

УДК 624.012.45

Є. А. Дмитренко*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9737-943X>

Кафедра будівництва

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна, 03041

Н. О. Костира

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5934-9563>

Кафедра будівництва

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна, 03041

М. В. Усенко

к.т.н., старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1969-1265>

Кафедра будівництва

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна, 03041

Д. О. Денисенко

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6556-6159>

Кафедра будівництва

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна, 03041

*автор-кореспондент, e-mail: zmitrenko26@gmail.com

Вплив швидкості прикладання навантаження на параметри зчеплення арматури з бетоном при чисельних та експериментальних випробуваннях

Цитувати як:

Дмитренко, Є. А., Костира, Н. О., Усенко, М. В., Денисенко, Д. О. (2025). Вплив швидкості прикладання навантаження на параметри зчеплення арматури з бетоном при чисельних та експериментальних випробуваннях. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 123- 142. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-10)

© 2025, Дмитренко Є.А., Костира Н.О., Усенко М.В., Денисенко Д.О.

Зчеплення арматури з бетоном є основним фактором, який забезпечує сумісну роботу цих двох матеріалів, що критично впливає на несучу здатність, жорсткість та довговічність залізобетонних конструкцій. Незважаючи на велику значущість зчеплення, загальну теорію зчеплення досі не побудовано. Ця ситуація обумовлена великою кількістю взаємозалежних факторів, які систематизовано на сім основних груп (включаючи геометричні та фізичні параметри арматури/бетону, вид НДС, деформаційні параметри, тріщиностійкість, корозію та вплив середовища). Дослідження також базується на аналізі класичних законів зчеплення (ступінчастий закон Г. Рема, пружнопластичний закон І. Гійона, нормальний закон М. Холмянського, емпіричний закон С. Мирзи і Д. Хауда, модель ВРЕ), які аналітично описують зв'язок між дотичними напруженнями та відповідними деформаціями зсуву. Обґрунтовується необхідність вивчення

динамічних впливів (ударів, вибухів, сейсміки), віднесених до складних видів напружено-деформованого стану, що є критично важливим в умовах повномасштабної війни в Україні.

Метою дослідження є встановлення та аналіз впливу швидкості прикладання навантаження (loading rate) на ключові параметри зчеплення, а також оцінка ефективності сучасних чисельних та аналітичних моделей для прогнозування поведінки залізобетонних конструкцій під екстремальними динамічними впливами. Дослідження ґрунтується на узагальненні результатів експериментальних випробувань на висмикування (pull-out test) у квазістатичному (0,1 мм/с) та динамічному (до 100 мм/с, або значно вище при вибухах) режимах, а також чисельному моделюванні.

Результати підтверджують, що підвищення швидкості прикладання навантаження є значущим фактором, який призводить до збільшення міцності зчеплення. Динамічний коефіцієнт збільшення (DIF) для максимальних напружень зчеплення (τ_{bmax}) може сягати близько 1,5 у порівнянні зі статичним навантаженням. При високих швидкостях деформації, характерних для вибухових впливів (до або вище), явна міцність матеріалів може значно зростати. При вищій швидкості навантаження ефективна довжина анкерування зменшується, оскільки зусилля концентруються ближче до навантаженого кінця стержня. При цьому типи руйнування (висмикування, висмикування після досягнення межі текучості, розрив стержня) залишаються аналогічними статичним випробуванням.

Встановлено, що експериментальні дослідження зчеплення демонструють доволі високу мінливість результатів через гетерогенність бетону: коефіцієнт варіації може сягати до 18% для максимального напруження зчеплення та 23% для відповідного проковзування.

Чисельне моделювання динамічної поведінки зчеплення включає дискретні методи (наприклад, Slide Line Contact Model, CBISF у «LS-DYNA»), моделі на основі Concrete Damage-Plastic (CDP) та аналітичні моделі, модифіковані динамічним коефіцієнтом збільшення зчеплення (DIF) або моделю шаруватого перерізу (EI_{eq}) для вибухового аналізу. Встановлено, що чисельні моделі, калібровані на динамічних експериментальних даних, забезпечують адекватне прогнозування поведінки конструкцій під екстремальними впливами.

Ключові слова: зчеплення арматури з бетоном, швидкість прикладання навантаження, динамічні навантаження, динамічний коефіцієнт збільшення зчеплення (DIF), вибухові впливи, анкерування, проковзування, випробування на висмикування.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Зчеплення арматури з бетоном є основним фактором, який забезпечує сумісну роботу цих двох матеріалів і забезпечує несучу здатність, жорсткість, тріщиностійкість та довговічність залізобетонних конструкцій [1]. Однак не дивлячись на велику значущість цього процесу, загальну теорію зчеплення арматури з бетоном, яка б задовольняла основним вимогам інженерів-проектувальників, досі не побудовано [2]. Ця ситуація обумовлена результатами численних досліджень, які свідчать, що зчеплення залежить

від дуже великої кількості різних факторів [3]. Врахувати їх спільний вплив при моделюванні взаємодії арматури з бетоном є вкрай складним, а іноді — навіть неможливим [1]. Саме через багатофакторність даного процесу у більшості випадків інженерної практики розглядають лише середні напруження зчеплення [3].

Згідно класифікації, представленої у роботі [4] фактори та параметри, які впливають на зчеплення арматури з бетоном можна систематизувати на сім основних груп:

1. *Параметри армування (геометричні)*: діаметр, площа та периметр робочої арматури, площа конструктивної арматури хомутів та тип профілю (періодичний або гладкий).

2. *Параметри армування (фізичні, клас арматури)*: розрахунковий та характеристичний опір на розтяг/стиск, модуль пружності.

3. *Параметри бетону (фізичні, клас бетону)*: тип бетону (важкий, середньої щільності, легкий), розрахунковий та характеристичний опір на стиск/розтяг, а також розрахунковий, характеристичний та усереднений модуль пружності.

4. *Вид напружено-деформованого стану (НДС)*: згинальний/крутний момент, центральний/позацентровий стиск/розтяг, плоский НДС, складні види НДС, а також динамічні впливи (від руху кранів, обладнання, сейсмічні/вибухові впливи) та температурні впливи.

5. *Деформаційні параметри*: прийняті діаграми деформування бетону та арматури, усереднені деформації.

6. *Тріщинистість*: тип тріщин (нормальні, похилі, просторові), момент утворення тріщин, коефіцієнт урахування роботи розтягнутого бетону, ширина розкриття та глибина розповсюдження тріщин, відстань між тріщинами.

7. *Корозія та вплив середовища*: величина захисного шару бетону, корозія арматурних стержнів та бетону, зменшення пороутворення, вплив агресивного та/або температурного середовища.

Теоретичні основи зчеплення арматури з бетоном базуються на законах або залежностях зчеплення, які являють собою аналітичне описання зв'язку між дотичними напруженнями і відповідними деформаціями зсуву [1]. Серед найбільш відомих законів зчеплення є розроблені свого часу ступінчастий закон Г. Рема, пружньопластичний закон І. Гійона, нормальний закон Холмянського, емпіричні закони С. Мірзи та Д. Хауди [1], модель ВРЕ (Bertero-Popov-Eligehausen) [5] та ін.

Однак неоднозначність результатів досліджень, істотні відмінності між залежностями зчеплення, отриманими різними авторами та відсутність універсальної теорії зчеплення спонукають до продовження експериментальних та чисельних досліджень даного процесу.

В умовах сучасних реалій повномасштабної війни в Україні питання забезпечення надійного захисту об'єктів критичної інфраструктури та

цивільного населення набуває особливої актуальності [6]. Одним із найбільш небезпечних чинників ураження є вибухова хвиля, що спричиняє значне динамічне навантаження на будівельні конструкції, що може призвести до їх часткового або повного руйнування [7]. Для залізобетонних конструкцій такі впливи, як удари, вибухи та сейсмічні впливи, віднесені до складних видів напружено-деформованого стану [1]. У свою чергу, динамічна поведінка зчеплення арматури з бетоном під впливом ударних та вибухових навантажень є критично важливою для забезпечення надійності залізобетонних конструкцій [8]. Оскільки звичайні методи чисельного аналізу часто ігнорують цей ефект, припускаючи ідеальне зчеплення [9], розробляються спеціальні експериментальні та чисельні моделі для точного опису динамічної поведінки зчеплення арматури з бетоном [10]. Швидкість прикладання навантаження суттєво впливає на параметри зчеплення арматури з бетоном, відповідно, тема даного дослідження є актуальною та обрана в якості основної.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є встановлення та аналіз впливу швидкості прикладання навантаження на ключові параметри зчеплення арматури з бетоном, а також оцінка ефективності сучасних чисельних та аналітичних моделей для прогнозування поведінки залізобетонних конструкцій під екстремальними динамічними впливами.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати та узагальнити експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном, проведені в умовах квазістатичних та динамічних навантажень, включаючи оцінку мінливості результатів.
2. Визначити кількісний вплив швидкості прикладання навантаження на максимальні напруження зчеплення τ_{bmax} та відповідне проковзування, а також оцінити динамічний коефіцієнт збільшення (DIF) для міцності зчеплення.
3. Оцінити вплив динамічних навантажень на ефективну довжину анкерування та розподіл напружень в арматурі.
4. Проаналізувати та класифікувати сучасні чисельні та аналітичні моделі зчеплення арматури з бетоном, здатні враховувати динамічні та нелінійні ефекти роботи матеріалів.

Матеріали та методи

В основу досліджень покладено аналіз та порівняння результатів, отриманих за допомогою експериментальних випробувань на висмикування (*pull-out test*) та чисельного моделювання, зокрема з акцентом на динамічні впливи.

Результати та обговорення

Основна різниця між статичними та динамічними випробуваннями із монотонним навантаженням, які направлені на дослідження зчеплення

арматури з бетоном, полягає у швидкості прикладання навантаження. Для статичних навантажень характерною є швидкість 0,1 мм/с або 20 мм/хв [11], яка діє постійно або змінюється повільно, а для динамічних – відповідною є швидкість до 100 мм/с у випробуваннях на висмикування (*pull-out tests*), або значно вище при вибухах.

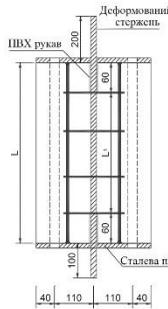
Дослідження монотонного навантаження показують, що початок зсуву вільного кінця стрижня відбувається при напруженнях в арматурі 100–200 МПа і не залежить від наявності атмосферних корозійних пошкоджень [1].

Експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном при динамічних навантаженнях.

Експериментальні дослідження динамічного зчеплення зазвичай проводяться за допомогою випробувань на висмикування (*pull-out test*) з різними швидкостями навантаження, систем ударних труб (*shock tube*) або розщепленого стрижня Гопкінсона під тиском [10].

Одним із найбільш розповсюджених методів випробувань щодо визначення впливу швидкості прикладення навантаження на параметри зчеплення арматури з бетоном є випробування на висмикування (рис. 1). При цьому довжина анкерування зразків L (рис. 1, а) може суттєво варіюватися: від застосування відносно коротких стержнів довжиною 60 мм або стержнів, довжина яких становить $5 \cdot d$ та $10 \cdot d$ арматури до застосування стержнів із довжиною анкерування $35 \cdot d$ та більше.

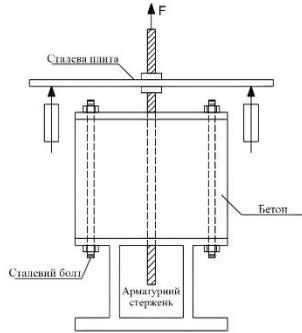
Під час динамічних випробувань зазвичай вимірюють значення прикладеного навантаження, проковзування на навантаженому кінці арматурного стержня та деформації вздовж довжини анкерування арматури за допомогою тензодатчиків чи датчиків розподіленого волоконно-оптичного зондування DFOS [13]. На основі даних вимірювань деформацій арматури по довжині її закладення в бетонному блоці, визначається повний набір параметрів, що характеризують зчеплення, включаючи напруження зчеплення τ_b та відносне проковзування δ_{sc} . Напруження зчеплення τ_b визначаються з умови рівноваги диференціального елемента арматури, вони є похідною (градієнтом) напружень в арматурі σ_s вздовж вісі стержня x . За умови рівноваги диференціального елемента арматури, зміна зусилля в арматурі на ділянці має дорівнювати силам зчеплення, що діють на цій поверхні [14].



а)



б)



в)

Рис. 1. Типова експериментальна установка для досліджень на висмикування при динамічній дії навантаження [12]:
а) розміри експериментальних зразків; б) фото фронтального виду установки; в) схематичний вид установки

На основі вимірян та обчислених параметрів зчеплення арматури з бетоном будують графіки залежності $T_b - \delta_{sc}$ або «висмикувальна сила» – «проковзування навантаженого кінця» (рис. 2). На рис. 2 а, б представлені по два графіки, які характеризують результат випробування двох зразків однієї серії [12]. При цьому наявною є характерна проблема експериментальних досліджень зчеплення: що навіть ідентичні випробування демонструють доволі високу мінливість результатів, зокрема по причині гетерогенності бетону. Так, коефіцієнт варіації може сягати 18% для максимального напруження зчеплення та 23% для відповідного значення проковзування [15].

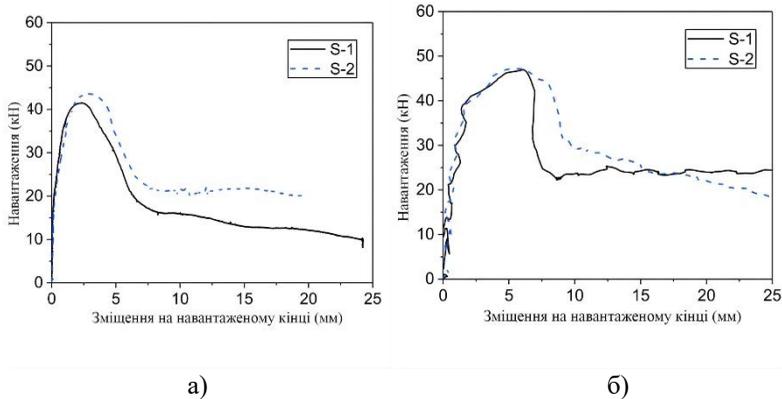


Рис. 2. Залежності «висмикувальна сила» – «проковзування навантаженого кінця», отримані шляхом експерименту при різних швидкостях навантажень [12]:

- а) при квазі-статичному режимі навантаження швидкістю $0,1 \text{ мм/с}$;
- б) при динамічному режимі навантаження швидкістю 100 мм/с .

Довжина анкерування є конструктивним параметром, який безпосередньо впливає на розподіл напружень зчеплення і здатність стержня передавати зусилля на бетон. Напружено-деформований стан арматури та бетону під час висмикування, у тому числі, при високих швидкостях навантаження залежить від довжини стержня в бетоні. Для коротких стержнів зона передачі зусиль стає постійною та рівною довжині стержня після досягнення певного рівня навантаження. Для довгих стержнів зона розподілу напружень продовжується практично до руйнування [3]. Хоча динамічне навантаження не змінює фізичну довжину анкерування, воно впливає на ефективну довжину передачі зусилля. При динамічних навантаженнях, як правило, зусилля концентруються ближче до навантаженого кінця і, відповідно, передаються на бетон по коротшій ділянці порівняно зі статичними випробуваннями.

Численні дослідження підтверджують, що швидкість прикладання навантаження (або *loading rate*) є значущим фактором, що впливає на міцність зчеплення [12]. Результати багатьох більш класичних (Hansen і Liepins (1962), Vos і Reinhardt (1982), Eligehausen та ін. [5]) та сучасних досліджень (Yan і Chen (2012), Li та ін. (2016)) впливу швидкості навантаження підтверджують, що підвищення швидкості прикладання навантаження призводить до збільшення міцності зчеплення [12]. Експериментальні програми даних досліджень, які включали випробування на висмикування, як найбільш оптимальні з точки зору економічності та простоти виготовлення зразків, із діапазоном швидкості навантаження від

0,1 мм/с до 100 мм/с.

Збільшення міцності зчеплення пов'язують із ефектом швидкості деформації (*strain rate effect*) для бетону та арматури, відповідним динамічним коефіцієнтом збільшення (тут і надалі, DIF), відносно високою динамічною межею текучості арматури та швидким розвитком проковзування (*rapid slip*) в зоні контакту. Встановлено, що максимальні напруження зчеплення можуть мати DIF близько 1,5 у порівнянні зі статичним навантаженням [10].

При впливі вибухових навантажень на залізобетонні конструкції будівель та споруд, бетон та сталь можуть реагувати з дуже високими швидкостями деформації, порядку $10 \cdot c^{-1}$ до $1000 \cdot c^{-1}$ або навіть вище [8]. При цих високих швидкостях явна міцність матеріалів може значно зростати. Збільшення міцності, викликане високою швидкістю деформації, може бути розраховане за формулою, рекомендованою Malvar (DIF для межі текучості арматури) [12]. Наприклад, при швидкості деформації $2,9 \cdot 10^{-2} \cdot c^{-1}$, межа текучості арматури може зрости на 17%.

DIF для міцності бетону на розтяг і стиск [16] визначаються окремо згідно положень діючих нормативних документів для розрахунку та проектування залізобетонних конструкцій [10].

У роботі [12] встановлено, що при вищій швидкості навантаження необхідна довжина анкерування для опору прикладеному навантаженню може бути зменшена. Наприклад, ділянка із незначними розтягувальними деформаціями була ближчою до навантаженого кінця при вищій швидкості навантаження, коли прикладене напруження в арматурі було відповідним її статичній межі текучості. (рис. 3)

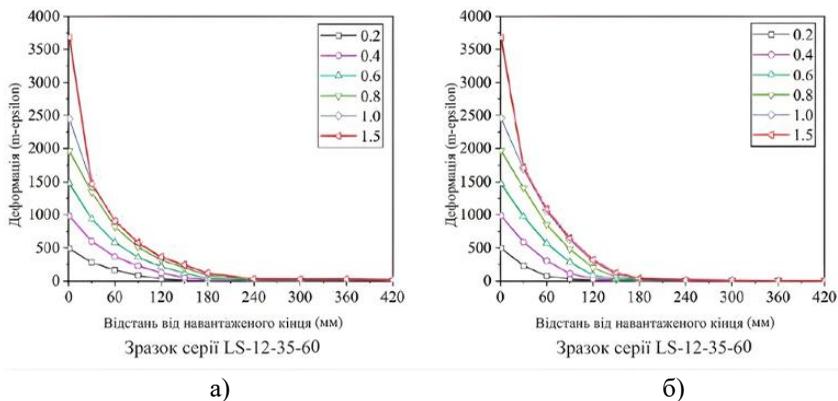


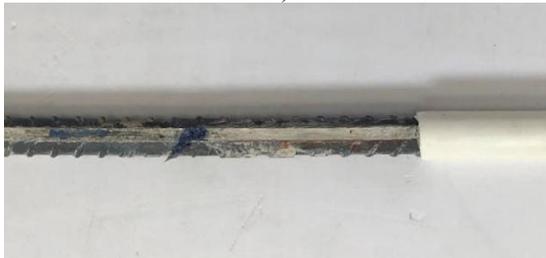
Рис. 3. Розподіл деформацій арматури по довжині її закладення в бетоні при різних ступенях навантаження [9]:

- а) зразок із меншою швидкістю навантаження;
- б) зразок із більшою швидкістю навантаження

При випробуваннях із високими швидкостями прикладання навантаження, як правило, виникають декілька типів руйнування, які є також характерними і для статичних випробувань (рис. 4).



а)



б)



в)

Рис. 4. Типи руйнування експериментальних зразків при випробуванні на висмикування [10, 12]:

- а) висмикування арматурного стержня внаслідок порушення зчеплення з бетоном;
- б) внаслідок висмикування після досягнення межі текучості арматури;
- в) внаслідок розриву арматурного стержня

Виникнення даних типів руйнування обумовлено насамперед конструктивними параметрами експериментальних зразків (довжиною анкерування арматури та наявності обмеження бетону внаслідок наявності поперечної арматури та/або поперечного тиску, співвідношення захисного шару бетону s до діаметру арматурного стержня d) [17].

Тип руйнування внаслідок висмикування арматурного стержня по

причині порушення зчеплення арматури з бетоном (рис. 4, а) є характерним для зразків із короткою довжиною закладення ($5 \cdot d$), як правило, на стадії пружної роботи арматури [18]. Руйнування внаслідок розриву арматурного стержня (рис. 4, б) виникає у зразках, в яких довжина закладення є достатньою або збільшеною ($\geq 10 \cdot d$) [23]. Даний тип руйнування виникає, коли міцність зчеплення є вищою, ніж межа міцності самої арматури на розтяг [19]. Тип руйнування внаслідок висмикування після досягнення межі текучості арматури є можливим при монотонному навантаженні, коли арматура має довжину анкерування, достатню для досягнення нею текучості, але недостатню для руйнування [9]. Однак, у загальному контексті досліджень зчеплення, вихід арматури за межу текучості суттєво знижує напруження зчеплення через пластичне видовження та змінання бетонних виступів між ребрами [20].

Чисельне моделювання зчеплення арматури з бетоном при динамічних навантаженнях.

Чисельне моделювання динамічної поведінки «зчеплення» – «проковзування» при ударних та вибухових навантаженнях є складною задачею, яка вимагає застосування спеціалізованих методів, здатних врахувати нелінійні ефекти, швидкі зміни деформацій та руйнування матеріалів [7].

Існує велика кількість розроблених чисельних та аналітичних моделей, які можна розділити на декілька груп за способом моделювання.

1. *Моделювання у програмних комплексах (наприклад, «LS-DYNA», «ABAQUS»).* Використовується дискретний метод, згідно якого елементи арматури та бетону моделюються окремо, а взаємодія реалізується через спеціальні інтерфейсні моделі [10]. Нижче представлені моделі, які відносяться до цієї групи.

Модель контактної лінії ковзання (Slide Line Contact Model). Для моделювання зчеплення арматури з бетоном у програмному комплексі «LS-DYNA» використовується одновимірна модель контактної лінії ковзання. Ця модель імітує ковзання арматурного стрижня вздовж послідовності вузлів бетону. Для її точного налаштування пропонується метод визначення параметрів (модуля зсуву зчеплення G_s , максимального пружного ковзання s_{max} та експоненційного коефіцієнта кривої пошкодження h_{dmg}) на основі даних звичайних випробувань на висмикування. Ця модель здатна моделювати зчеплення та ковзання в умовах динамічного навантаження [8].

Модель із застосуванням методів дискретної взаємодії. В «LS-DYNA» взаємодія арматури та бетону може бути реалізована за допомогою ключових слів, серед яких CBISF (*CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID з функцією), Contact-1D та MAT_121 (рис. 5). Лише ці три методи дозволяють відтворити поведінку зчеплення арматури з бетоном [10].

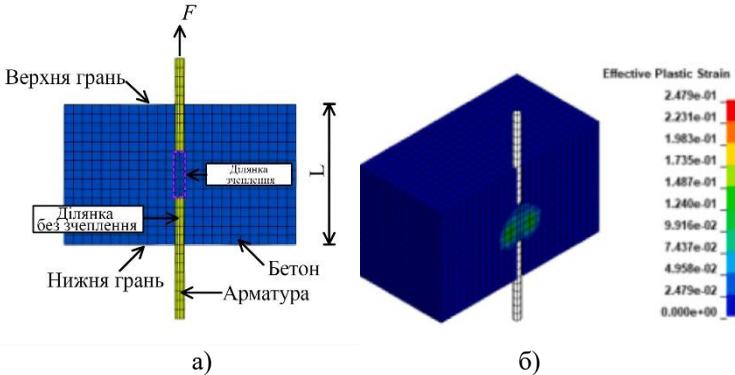


Рис. 5 Приклад чисельної моделі із застосуванням методів дискретної взаємодії [10]:

а) загальна схема; б) дослідження руйнування зони контакту у ПК «LS-DYNA»

Модель на базі когезійного методу. Передбачає контакт «поверхня-до-поверхні» між суцільними елементами бетону та арматури. Моделювання здійснюється за допомогою закону *зачеплення-розділення* (*traction-separation law*), який описує лінійно-пружний діапазон, появу та розвиток пошкодження [21]. Для сценаріїв ударного навантаження когезійний метод краще відтворює тенденції прогину в часі, хоча може недооцінювати реакцію після початку нелінійної поведінки [19].

Модель на основі методу конекторів. Арматура моделюється як балка або ферма, а конектори встановлюють зв'язок «вузол-до-вузла» з проміжним елементом, приєднаним до бетонних елементів. Метод конекторів точніше відтворює експериментально спостережувані типи руйнування при ударних навантаженнях і є більш ефективним з точки зору обчислень [19].

2. *Моделі з урахуванням пластичності та пошкоджень (CDP)* являють собою наближену мультиконтактну модель для дослідження динамічного зчеплення арматури з бетоном на основі моделі *Concrete Damage-Plastic (CDP)*. У цій моделі використовується пружно-пластичний сталевий циліндричний контактний елемент (кільцевий контактний елемент), зменшення міцності якого симулює проковзування. Це дозволяє отримати наближену математичну залежність між проковзуванням арматури та опором кільцевого елемента, що має прийнятну точність (в межах 15% при порівнянні із експериментами на висмикування) і нижчу обчислювальну вартість порівняно із попередніми моделями [11].

3. Аналітичні моделі.

Узагальнення статичних моделей. Для динамічних навантажень

часто використовується підхід, де статичні моделі зчеплення (наприклад, СЕВ-FIP-2010 [10], або ВРЕ-модель [21] або модель [22]) модифікуються. Зазвичай передбачається, що зі збільшенням швидкості навантаження напруження зчеплення зростає при однаковій величині проковзування (рис. 6), щоб врахувати динамічний ефект [21].

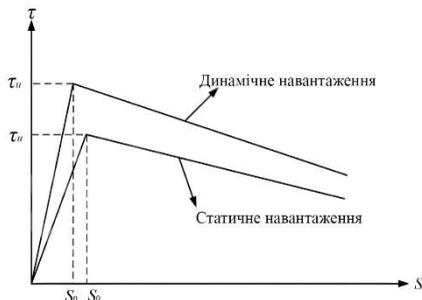


Рис. 6 Модифікація залежності «напруження зчеплення» - «проковзування» при динамічних навантаженнях [2]

Модель шаруватого перерізу (Layered Section Method). Удосконалена модель шаруватого перерізу для залізобетонних балок під вибуховими та ударними навантаженнями враховує ефект «зчеплення» – «проковзування» шляхом зміни еквівалентної жорсткості на вигин EI_{eq} в межах довжини пластичного шарніра [9]. Впровадження ефекту bond-slip у цю модель призводить до значного покращення точності чисельних результатів порівняно з класичним підходом, який ігнорує ковзання.

Таким чином, чисельні моделі (особливо дискретні методи та моделі на основі EI_{eq}), калібровані на динамічних експериментальних даних (наприклад, тестах на висмикування із високою швидкістю навантаження), дозволяють адекватно прогнозувати поведінку залізобетонних конструкцій під екстремальними динамічними впливами, тоді як прості припущення про ідеальне зчеплення часто призводять до неточностей [8].

У роботі [21] було розроблено аналітичну модель зчеплення арматури з бетоном, а її точність перевірено за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) (рис. 7,а). Методика моделювання включала варіацію п'яти діаметрів арматури (6, 8, 9, 12, 16 мм), двох довжин анкерування ($5-d$ та $10-d$), і три різні швидкості навантаження: 0,10 мм/с (квазістатична швидкість), 1,00 мм/с, 5,00 мм/с (динамічна швидкість).

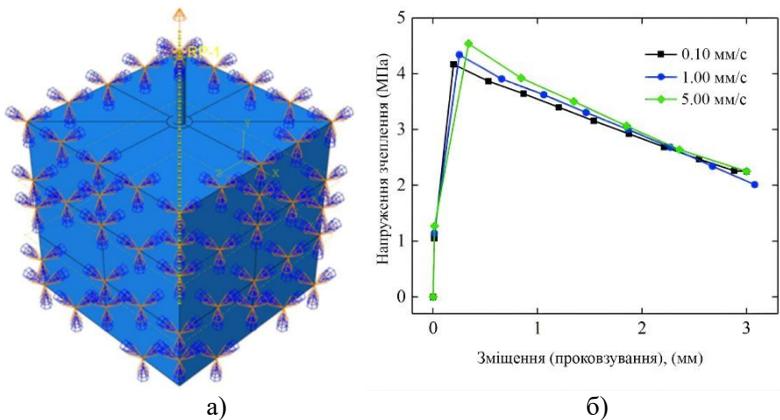


Рис. 7 Скінченно-елементна модель центрально-армованого бетонного блоку (а) та залежності «напруження зчеплення» - «проковзування» при різних швидкостях навантаження (б) [21]

За результатами чисельного моделювання було встановлено, що напруження зчеплення збільшувалися при зростанні швидкості навантаження від 0,10 мм/с до 5,00 мм/с (рис. 7,б). Прогнозоване максимальне напруження зчеплення за динамічної швидкості навантаження значно вище, ніж за квазістатичної [21], що підтверджується результатами експериментальних досліджень.

Висновки

Таким чином, огляд-аналіз проведених чисельних та експериментальних досліджень впливу швидкості прикладання навантаження на параметри зчеплення арматури з бетоном дозволив встановити наступне:

1. Підвищення швидкості прикладання навантаження (loading rate) є значущим фактором, який призводить до збільшення міцності зчеплення. Прогнозоване максимальне напруження зчеплення за динамічної швидкості (наприклад, 5,00 мм/с) значно вище, ніж за квазістатичної (0,10 мм/с). Динамічний коефіцієнт збільшення (DIF) для максимальних напружень зчеплення може сягати близько 1,5 у порівнянні зі статичним навантаженням.

2. При вищій швидкості навантаження необхідна довжина анкерування може бути зменшена, оскільки зусилля концентруються ближче до навантаженого кінця стержня і, відповідно, передаються на бетон по коротшій ділянці порівняно зі статичними випробуваннями.

3. При випробуваннях із високими швидкостями навантаження виникають типи руйнування, аналогічні статичним випробуванням: висмикування арматурного стержня (характерно для короткої довжини закладення), руйнування внаслідок висмикування після досягнення межі текучості арматури, та розрив арматурного стержня (при достатній довжині анкеровання).

4. Чисельні моделі (особливо дискретні методи та моделі на основі EI_{eq}), калібровані на результатах динамічних експериментальних даних, дозволяють адекватно прогнозувати поведінку залізобетонних конструкцій під екстремальними динамічними впливами. Прості припущення про ідеальне зчеплення часто призводять до неточностей.

5. Встановлено, що навіть ідентичні випробування на зчеплення демонструють доволі високу мінливість результатів, зокрема через гетерогенність бетону. Коефіцієнт варіації може сягати до 18% для максимального напруження зчеплення та 23% для відповідного проковзування.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

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 із урахуванням нових ефектів опору».

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Klymov, Y. (2021). Influence of corrosion damage on the bond of reinforcement in concrete. *Building Constructions. Theory and Practice*, 9, 4-14. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.4-14>
2. Romashko, O.V., Zhuravskiy, V.M., & Romashko, O.D. (2019). General model of adhesion reinforcement of concrete. *Resource-Saving Materials, Structures, Buildings and Structures*, 37, 214-221. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.319>
3. Kochkarev, D.V. (2014). About average tension of reinforcement coupling with concrete. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 1, 176-

184. 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=FILE=&S21STR=Vnuvgp_tekhn_2014_1_24
- 4.Yakovenko, I.A., & Dmytrenko, Ye.A. (2025). Klasyfikatsiia parametriv ta poshuk analitichnykh zalezhnostey zchepлення armatury z betonom u zalizobetonnykh konstrukciiah 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. Retrieved from: <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3c39cde7-138b-42c6-97b8-e2a42afed33d/content>
- 5.Eligehausen, R., Popov, E.P., & Bertero, V.V. (1983). Local Bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Berkeley, California: University of California. Retrieved from: <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstreams/f20592ed-7314-4412-9e28-a834343dc413/download>
- 6.Tomenko, V., & Velykyi, I. (2024). Metody otsinky ta vidnovlennia tekhnichnoho stanu zalizobetonnykh konstruksii pry sylovykh, vysokotemperaturnykh vplyvakh ta vybukhovykh navantazhenniakh [Methods for assessing and restoring the technical condition of reinforced concrete structures under force, high-temperature influences and explosive loads]. In: *Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference "Innovative Solutions in Science: Balancing Theory and Practice"* (pp. 28-35). San Francisco, USA: European Open Science Space. Retrieved from: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24203>
- 7.Polyakov, A., & Lapenko, O. (2025). Numerical studies of the dynamic impact of the blast wave on protective structures. *Theory and Practice of Design*, (36), 103–115. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.10>
- 8.Shi, Y., Li, Z.-X., & Hao, H. (2009). Bond slip modelling and its effect on numerical analysis of blast-induced responses of RC columns. *Structural Engineering and Mechanics*, 32(2), 251-267. <https://doi.org/10.12989/sem.2009.32.2.251>
- 9.Lee, M., & Kwak, H.G. (2018). Blast and impact analyses of RC beams considering bond-slip effect and loading history of constituent materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12, article number 32. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0244-9>
10. Peng, Q., Wu, H., Jia, P.C., Ma, L.L., & Fang, Q. (2023). Numerical studies on rebar-concrete interactions of RC members under impact and explosion. *Structures*, 47, 63-80. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.063>
11. Mirhosseini, R.T., Araghizadeh, E., & Rashidi, S. (2023). Approximate relationship for the bond-slip using a concrete damage-plastic model. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023, article number 1320192. <https://doi.org/10.1155/2023/1320192>
12. 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117749>

13. 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>
14. Corres, E., & Muttoni, A. (2023). Bond of steel reinforcement based on detailed measurements: Results and interpretations. *Structural Concrete*, 24(6), 7173-7204. <https://doi.org/10.1002/suco.202300324>
15. Corres, E., & Muttoni, A. (2024). Local bond-slip model based on mechanical considerations. *Engineering Structures*, 314, article number 1181190. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118190>
16. Romashko-Maistruc, O.V., & Romashko, V.M. (2024). Simulation of stress-strain diagram of compressed concrete under long-term loads. *Resource-Saving Materials, Structures, Buildings and Structures*, 46, 275-282. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.32>
17. 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131437>
18. 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>
19. Ansell, A., Pixa, M., Peterson, V., & Hallgren, M. (2025). Modelling of bond slip for impact-loaded reinforced concrete beams. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures (SILOS)*. Gothenburg, Sweden: KTH Royal Institute of Technology. Retrieved from: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1992753&dswid=8118>
20. 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>
21. Long, X., Li, H., Iyela, P.M., & Kang, S.-B. (2024). Predicting the bond stress-slip behavior of steel reinforcement in concrete under static and dynamic loadings by finite element, deep learning and analytical methods. *Engineering Failure Analysis*, 161, article number 108312. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108312>
22. 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.
23. 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>

Література

1. Клімов Ю. Вплив корозійних пошкоджень на зчеплення арматури періодичного профілю з бетоном. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2021. Вип. 9. С. 4–14. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.4-14>

2. Ромашко О. В., Журавський В. М., Ромашко О. Д. Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2019. Вип. 37. С. 214–221. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.319>

3. Кочкаръов Д. В. Про середні напруги зчеплення арматури з бетоном. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2014. Вип. 1. С. 176–184. URL: http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Vnuvpg_tekhn_2014_1_24

4. Яковенко І. А., Дмитренко С. 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, Україна : НУБіП України, 2025. С. 533–536.

5. Elgehausen, R., Popov, E.P., & Bertero, V.V. (1983). *Local Bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations*. Berkeley, California: University of California. Retrieved from: <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstreams/f20592ed-7314-4412-9e28-a834343dc413/download>

6. Томенко В., Великий І. (2024). Методи оцінки та відновлення технічного стану залізобетонних конструкцій при силових, високотемпературних впливах та вибухових навантаженнях. *Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference “Innovative Solutions in Science: Balancing Theory and Practice”*. Сан-Франциско, США : European Open Science Space, 2024. С. 28–35. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24203>

7. Polyakov, A., & Lapenko, O. (2025). Numerical studies of the dynamic impact of the blast wave on protective structures. *Theory and Practice of Design*, (36), 103–115. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.10>

8. Shi Y., Li Z. X., Hao H. Bond slip modelling and its effect on numerical analysis of blast-induced responses of RC columns. *Structural Engineering and Mechanics*. 2009. Vol. 32, No 2. P. 251–267. <https://doi.org/10.12989/sem.2009.32.2.251>

9. Lee M., Kwak H. G. Blast and impact analyses of RC beams considering bond-slip effect and loading history of constituent materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. No 32. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0244-9>

10. Peng Q., Wu H., Jia P. C., Ma L. L., Fang Q. Numerical studies on rebar-concrete interactions of RC members under impact and explosion. *Structures*. 2023. Vol. 47. P. 63–80. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.063>

11. Mirhosseini R. T., Araghizadeh E., Rashidi S. Approximate relationship for the bond-slip using a concrete damage-plastic model. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 2023. No 1320192. <https://doi.org/10.1155/2023/1320192>

12. 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117749>
13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120824>
14. Corres E., Muttoni A. Bond of steel reinforcement based on detailed measurements: Results and interpretations. *Structural Concrete*. 2023. Vol. 24, No 6. P. 7173–7204. <https://doi.org/10.1002/suco.202300324>
15. Corres E., Muttoni A. Local bond-slip model based on mechanical considerations. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 314. No 1181190. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118190>
16. Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М. Моделювання діаграми напруження-деформації стиснутого бетону за дії довготривалих навантажень. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2024. Вип. 46. С. 275–282. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.32>
17. 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131437>
18. 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. <https://doi.org/10.3390/buildings13030577>
19. Ansell A., Pixa M., Peterson V., Hallgren M. Modelling of bond slip for impact-loaded reinforced concrete beams. *Proceedings of the 15th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures (SILOS)*. Gothenburg, Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 2025. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1992753&dswid=8118>
20. 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116467>
21. Long X., Li H., Iyela P. M., Kang S. B. Predicting the bond stress-slip behavior of steel reinforcement in concrete under static and dynamic loadings by finite element, deep learning and analytical methods. *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 161. No 108312. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108312>
22. 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.

23. 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. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.093>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.11.2025	Received 14.11.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 20.11.2025	Received in revised form 20.11.2025
Прийнято 24.11.2025	Accepted 24.11.2025
Опубліковано 25.12.2025	Published 25.12.2025

Ye. A. Dmytrenko*

PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9737-943X>

Department of Construction

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony St., 15, Kyiv, Ukraine, 03041

N. O. Kostyra

PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5934-9563>

Department of Construction

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony St., 15, Kyiv, Ukraine, 03041

M. V. Usenko

PhD (Tech. Sci.), Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1969-1265>

Department of Construction

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony St., 15, Kyiv, Ukraine, 03041

D. O. Denysenko

PhD Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6556-6159>

Department of Construction

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony St., 15, Kyiv, Ukraine, 03041

*corresponding author, e-mail: zdmityrenko26@gmail.com

The influence of the parameters loading rate for reinforcement with concrete bond by numerical and experimental tests

How to Cite:

Dmytrenko, Ye. A., Kostyra N.O., Usenko M.V & Denysenko, D. O. (2025). The influence of the parameters loading rate for reinforcement with concrete bond by numerical and experimental tests. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 24, 123-142. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-10)

Abstract. Bond between reinforcement and concrete is a fundamental factor ensuring the composite behavior of these materials, crucial for the load-bearing capacity, stiffness, crack resistance, and durability of reinforced concrete (RC) structures. Despite its importance, a universal theory of bond satisfying engineering requirements remains undeveloped. This difficulty stems from the influence of a large number of interrelated factors, systematically classified into seven major groups (including geometric and physical parameters of reinforcement/concrete, stress-strain state, deformation

parameters, crack resistance, and environmental/corrosion effects). The study addresses the theoretical challenge stemming from classic bond laws (Rehm's step law, Guyon's elasto-plastic law, Kholmyanskiy's normal law, and Mirza and Houde's empirical law, BPE bond-slip model), which analytically describe the relationship between bond stresses and corresponding slip deformations. The necessity for this study is amplified by the critical nature of dynamic actions (impacts, explosions), categorized as complex stress-strain states, particularly relevant in the context of the full-scale war in Ukraine, where blast waves and missile strikes subject structures to severe dynamic loads.

The aim of this research was to establish and analyze the influence of the loading rate on key bond parameters and to evaluate the efficiency of modern numerical and analytical models for predicting RC structural behavior under extreme dynamic excitations. The methodology involves synthesizing results from experimental pull-out tests conducted under quasi-static (0.1 mm/s) and dynamic (up to 100 mm/s, or higher for explosions) regimes, alongside advanced numerical simulations.

The results unequivocally demonstrate that increasing the loading rate is a significant factor that leads to an increase in bond strength. The predicted maximum bond stress (τ_{bmax}) at dynamic loading speeds (e.g., 5.00 mm/s) is markedly higher than under quasi-static conditions. It was established that the Dynamic Increase Factor (DIF) for can reach approximately 1.5 when compared to static loading. This strengthening effect is attributed to the strain rate effect in concrete and steel, as well as the rapid development of slip in the contact zone. Furthermore, at higher loading rates, the effective anchorage length is reduced, concentrating forces closer to the loaded end of the bar compared to static tests. The observed failure modes (pull-out, pull-out after yielding, and bar rupture) remain consistent with those observed during static tests. The research also highlighted the inherent high variability of test results due to concrete heterogeneity, noting coefficients of variation up to 18% for maximum bond stress and 23% for corresponding slip.

Numerical modeling of dynamic bond behavior requires specialized approaches to capture nonlinear effects. Effective modeling techniques include discrete methods (e.g.,

S

l

i

d

e

L

i

Keywords: bond of reinforcement with concrete, loading rate, dynamic loads, dynamic increase factor (DIF) of bond, explosive effects, anchoring, slip, pull-out test.

e

C

o

n

t

a

c

t

M

o

d

e

l