

УДК 624.01

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ІЗ НЕЗНІМНОЮ 3D-ДРУКОВАНОЮ ОПАЛУБКОЮ

Кандидати техн. наук П. А. Резнік, О. І. Лугченко,
аспіранти А. В. Володимиров, В. В. Тенесеску, Д. А. Алатаєв, О. О. Булдаков

NUMERICAL ANALYSIS OF 3D PRINTED PERMANENT FORMWORK FOR REINFORCED CONCRETE

PhD (Tech.) P. Reznik, PhD (tech.) O. Lugchenko, postgraduate student A. Volodymyrov,
postgraduate student V. Tenesescu, postgraduate student D. Alatayev,
postgraduate student O. Buldakov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336411>



Анотація. У статті досліджено конструктивну доцільність використання незнімної опалубки, виготовленої за допомогою технології 3D-друку бетоном, для залізобетонних балок з урахуванням їхньої інтеграції в сучасні системи забудови. Актуальність дослідження обумовлена потребою в інноваційних рішеннях для відновлення пошкоджених великопанельних будівель (ВПБ) у післявоєнній Україні з урахуванням обмежень традиційних технологій і значного потенціалу технології 3D Concrete Printing (3DCP).

Ключові слова: незнімна опалубка, 3D-друк бетоном, напружено-деформований стан, великопанельні будинки, відбудова.

Abstract. This study explores the structural viability of 3D-printed permanent formwork for reinforced concrete beams, focusing on their integration into construction systems. The research addresses the urgent need for innovative reconstruction solutions for large-panel buildings (LPS) in post-war Ukraine, emphasizing the limitations of traditional methods and the transformative potential of 3D Concrete Printing (3DCP) technology. A numerical analysis of 32 beam configurations with varying reinforcement schemes was conducted to evaluate their load-bearing capacity, stiffness, and stress distribution. The findings highlight that incorporating 3DCP formwork with moderate reinforcement increases load-bearing capacity by up to 77 %, while enhanced reinforcement configurations achieve improvements of up to 177 %. Beams with 3DCP formwork demonstrate significant stiffness enhancements, with only a 15% increase in deflection under 76.8 %

higher loads compared to conventional beams. However, stress concentrations in the formwork exceeded allowable tensile limits, underscoring the need for additional reinforcement in critical areas to prevent failure. This study underscores the practicality of 3DCP technology for structural applications, offering improvements in material efficiency, construction speed, and sustainability. The integration of digital fabrication and advanced structural design presents a robust framework for future applications in post-war reconstruction and beyond. Further experimental validation and optimization are required to address identified limitations and refine the proposed systems.

Keywords: permanent formwork, 3D concrete printing, stress-strain state, large-panel buildings, reconstruction.

Вступ. Масштабні руйнування, спричинені воєнною агресією російської федерації, зумовили нагальну потребу в пошуку інноваційних стратегій відновлення житлового фонду України [1]. Однією з найбільш уражених категорій забудови є великопанельні будинки, які складають значну частину житлового фонду країни (рис. 1). Ці споруди були розроблені у

другій половині XX ст. як рішення для швидкої та економічної урбанізації, проте сьогодні ці об'єкти пов'язані із суттєвими викликами в частині реконструкції. Основні труднощі пов'язані з відсутністю функціонуючих підприємств збірного домобудівництва та конструктивними обмеженнями, притаманними традиційним методам зведення.



Рис. 1. Наслідки авіаційного удару по будівлі ВПБ за адресою м. Харків, вул. Метробудівників, 40 (24 вересня 2024 р.)

Попри високу ефективність у процесі масового житлового будівництва,

сьогоднішній стан великопанельних будинків виявляє критичні недоліки

відновлення. Більшість заводів із виробництва збірних панелей не функціонує, а отже, традиційні підходи для реконструкції стають неактуальними. Ускладнює ситуацію й використання класичних опалубних систем, які є трудомісткими та малопридатними для конструкцій нестандартних геометричних форм. До того ж інтеграція нових елементів у вже зруйновані або деформовані структури часто потребує високих витрат і складних технічних рішень.

Альтернативним і перспективним рішенням є застосування технології тривимірного бетонного друку (3D Concrete Printing, 3DCP), яку сьогодні розглядають як потенційно революційний інструмент відновлення [2]. Зокрема, за допомогою неї можна створювати системи незнімної опалубки для основних конструктивних елементів, таких як колони, балки та плити [3]. Інноваційність підходу полягає у відмові від традиційного формотворення, що сприяє масштабованості, зменшенню трудомісткості на будівельному майданчику та пришвидшенню монтажу конструкцій. Неодноразово продемонстровано [4-6], що 3DCP-технологія забезпечує створення топологічно оптимізованих конструкцій, здатних інтегруватися в наявні системи каркаса, при цьому зберігаючи або перевищуючи просторову жорсткість вихідних рішень.

Окрім завдань відновлення, технологія 3D-друку має низку переваг для нових об'єктів капітального будівництва. Це відкриває можливості для проєктування індивідуальних конструктивних рішень, зокрема із нестандартними прольотами, варіативною несучою здатністю та інноваційними схемами каркаса. Інтеграція друкованої опалубки до несучої системи дає змогу підвищити загальну ефективність конструкцій, одночасно забезпечуючи архітектурну свободу. Такий підхід підтримує розвиток безбалкових систем перекриттів, поверхонь подвійної кривизни та нестандартної геометрії, які раніше були

технологічно обмежені в умовах масового будівництва.

Слід зазначити, що технологія 3DCP органічно поєднана з принципами сталого будівництва. Точність цифрового формування забезпечує мінімальні втрати матеріалу, а гнучкість технології дає змогу використовувати перероблені або альтернативні сировини [7]. Це особливо актуально в контексті повоєнного відновлення, де основним буде ефективне використання ресурсів та екологічна доцільність, через що 3DCP можна розглядати як перспективний підхід для формування нової міської інфраструктури України на етапі відбудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зараз суттєво зростає світова зацікавленість до технології 3D-друку взагалі та окремо – до методу 3DCP. За тематикою вибраного дослідження слід відзначити такі роботи. У роботі [8] висвітлено трансформаційний вплив використання незнімної опалубки, виготовленої за технологією 3D-друку, у контексті вдосконалення сучасних будівельних методів. Повномасштабні зразки плит перекриття (рис. 2), виготовлені з використанням 3DCP, демонструють, як за допомогою топологічної оптимізації та індивідуалізованих траєкторій друку можна точно контролювати геометрію і експлуатаційні характеристики елементів. Такий підхід підвищує ефективність і сталість будівництва, хоча водночас залишаються невирішеними питання матеріалознавчих характеристик, масштабування та логістики.

У роботі [9] досліджено системи ребристих плит перекриття, у яких поєднано самоущільнювальний бетон із незнімною опалубкою. Зазначено, що вони дають змогу зменшити витрати матеріалу до 40 %, зберігаючи при цьому несучу здатність і адаптивність конструкції. Проте проблеми недостатньої жорсткості опалубки, тривалого часу друку та складності розпалубки вказують на необхідність подальшого вдосконалення систем.

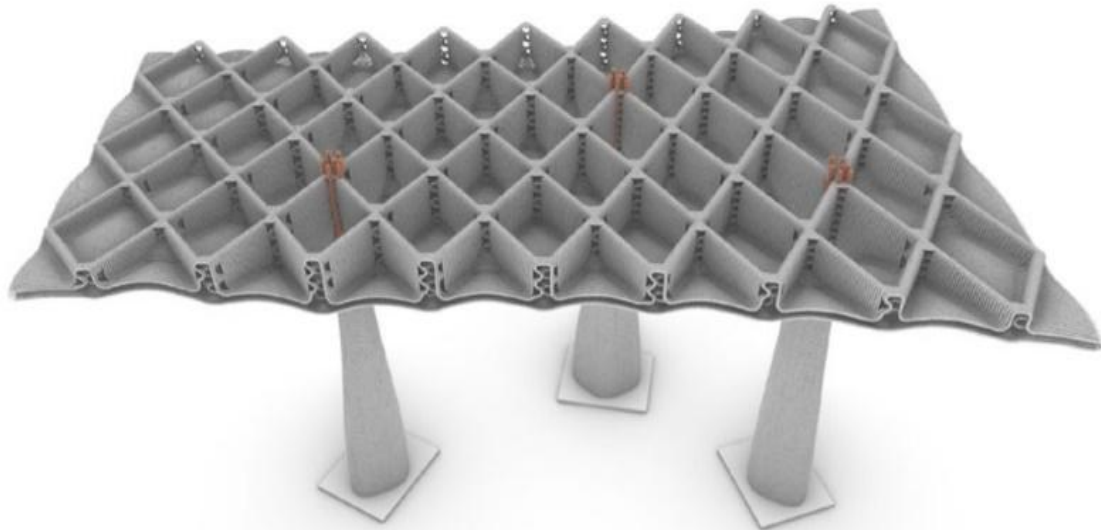


Рис. 2. Приклади конструкцій незнімної опалубки, надрукованих за технологією 3DCP [9]

Інноваційні приклади застосування ультратонкої незнімної опалубки з вторинного PET-G-пластику [10] демонструють потенціал для створення нетипових об'єктів, зокрема павільйонів зі складною колонно-плитною конфігурацією. Цей підхід поєднує роботизований друк і традиційне бетонування, забезпечуючи як гнучкість проєктування, так і економне використання матеріалу, водночас розв'язуючи проблеми, пов'язані з обмеженням прольотів і високою трудомісткістю.

Низку досліджень зосереджено на аналізі структурної ефективності незнімної опалубки, надрукованої на 3D-принтері, насамперед для балок і колон. Так, у роботі [11] наведено підвищення згинальної жорсткості залізобетонних балок на 14.3 % завдяки застосуванню ребристих інтерфейсів і з'єднань, які забезпечують роботу зсуву, що суттєво покращило інтеграцію між шарами. Проблему розшарування, викликану невідповідністю жорсткостей матеріалів, автори розв'язували через оптимізацію шорсткості поверхні та покращення інтерфейсних контактів. Це свідчить про практичну доцільність використання 3D-друкованої

опалубки для зниження матеріаломісткості й підвищення ефективності будівництва.

Паралельно досліджували залізобетонні колони [12], для яких було зафіксовано помітне зростання жорсткості та несучої здатності порівняно з традиційними технологіями. Це пояснено поліпшеним зчепленням на поверхні та підвищеною міцністю бетону. Проте залишаються відкритими питання про пористість і адгезію між шарами, що потребують подальших досліджень. Загалом результати підтверджують потенціал незнімної опалубки з 3D-друку в контексті сталого й ефективного будівництва, що базовано на сучасних технологіях цифрового формування.

Окремий напрям досліджень стосується удосконалення підходів для моделювання та вивчення властивостей матеріалів. У роботі [13] запропоновано два підходи на основі методу скінченних елементів (VoxelPrint і CobraPrint), які дають змогу оптимізувати параметри друку (швидкість, товщину шару) і прогнозувати стійкість і запобігати руйнуванню. VoxelPrint забезпечує вищу швидкість, а CobraPrint показує кращу точність для

складної геометрії, що сприяє інтеграції цифрових симуляцій у процес 3D-друку.

У роботі [14] проаналізовано анізотропні властивості бетону, надрукованого за допомогою 3D-принтера. Встановлено, що якість міжшарового зчеплення критично впливає на міцність: гранична міцність на стиск максимальна в напрямку X (уздовж шару), тоді як згинальна міцність у цьому ж напрямку найменша. Автори показали, що за рахунок оптимізації геометрії сопла й обробки інтерфейсу можна покращити несучу здатність елементів, що також продемонстровано в роботі [15].

Останні дослідження підтверджують потенціал технології 3DCP щодо підвищення сталості будівництва. Наприклад, показано, що ребристі плити перекриття, виготовлені за допомогою 3D-друку, дають змогу знизити витрати бетону на 40–50 % з одночасним покращенням акустичних і міцнісних характеристик [16]. Однак у впровадженні залишаються бар'єри: вартість технологій, проблеми переробки незнімної опалубки та необхідність оптимізації технологічного процесу [7].

Також наведено переваги округлих геометричних форм опалубки – опір гідростатичному тиску зростає на 50 %, за результатами повномасштабних випробувань [17]. Проте й тут є обмеження, такі як деградація матеріалу й тривалий час друку складних елементів, що стримують масштабування таких рішень.

Наявні на сьогодні дослідження [11–14, 16–19] підтверджують, що незнімна опалубка, надрукована за допомогою 3DCP, є трансформаційним нововведенням, здатним виконувати як функцію формотворення, так і конструктивну роль несучого елемента. Ця технологія дає суттєві переваги, серед яких спрощення технологічних процесів, зменшення відходів матеріалів, підвищення гнучкості та адаптивності до нестандартних проєктних рішень, а також підтримка принципів сталого будівництва [7].

Разом із тим, попри наявні переваги, сучасний стан наукових досліджень вказує на істотні прогалини, що стримують ефективне впровадження 3DCP у широкомасштабному будівництві. Зокрема, роботи [13, 14] зосереджені переважно на лабораторних експериментах, що дає змогу отримати цінні дані про міжшарову адгезію та анізотропію, але не охоплює низку прикладних викликів, таких як повномасштабна інтеграція в складні конструктивні системи, логістика транспортування елементів, організація монтажу і стикування.

Крім того, більшість наявних досліджень не враховують довгострокову роботу та експлуатаційну довговічність 3D-друкованих елементів у реальних умовах, зокрема в обмежених ресурсних середовищах, характерних для післявоєнних програм реконструкції. Зазначені обмеження формують чіткий запит на проведення комплексних досліджень, що поєднують теоретичні досягнення з практичними рішеннями, орієнтованими на масштабування, надійність і довговічність конструкцій, створених із використанням технології 3D-друку.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження – сформулювати науково обґрунтовану базу для подальшого застосування подібних інноваційних конструктивних рішень у практиці будівництва та реконструкції.

Робота структурована за такими основними завданнями:

1. Оцінити конструктивну ефективність незнімної опалубки, виготовленої методом 3D-друку, шляхом визначення її внеску в несучу здатність і жорсткість залізобетонних балок за різних схем армування.

2. Проаналізувати розподіл напружень та ймовірні механізми руйнування в композитних балках, зокрема можливість тріщиноутворення через перевищення розтягувальних напружень в опалубці.

3. Розробити і верифікувати числові моделі для аналізу конструкцій, зокрема моделі, побудовані методом скінченних елементів (МСЕ), з метою точного моделювання взаємодії між опалубкою та залізобетонним ядром.

4. Порівняти конструктивну ефективність різних конфігурацій перерізів, кількісно оцінивши покращення несучої здатності, жорсткості та ефективності використання матеріалу.

Основна частина дослідження. На основі структурної системи, запропонованої в роботі [2] (рис. 3), розроблено й адаптовано проєкт, поданий до конкурсу Norman Foster Foundation Kharkiv Housing Challenge [20]. Концепція реконструкції 16-

поверхового житлового будинку за адресою вул. Наталії Ужвій, 82 в м. Харкові, включає сім типів колон, десять типів балок і тринадцять типів плит перекриття, що підкреслює модульність і адаптивність запропонованих конструктивних рішень. Для зовнішніх фасадних елементів передбачено вісім типів балконних плит і два типи колон (рис. 4). Масове впровадження будь-яких новітніх конструктивних рішень потребує виконання цілих серій чисельних і натурних досліджень. Вони мають охоплювати оцінювання окремих елементів конструктивної системи, таких як балки, колони та плити, а також аналіз поведінки вузлів з'єднання та загальної роботи будівлі в цілому.

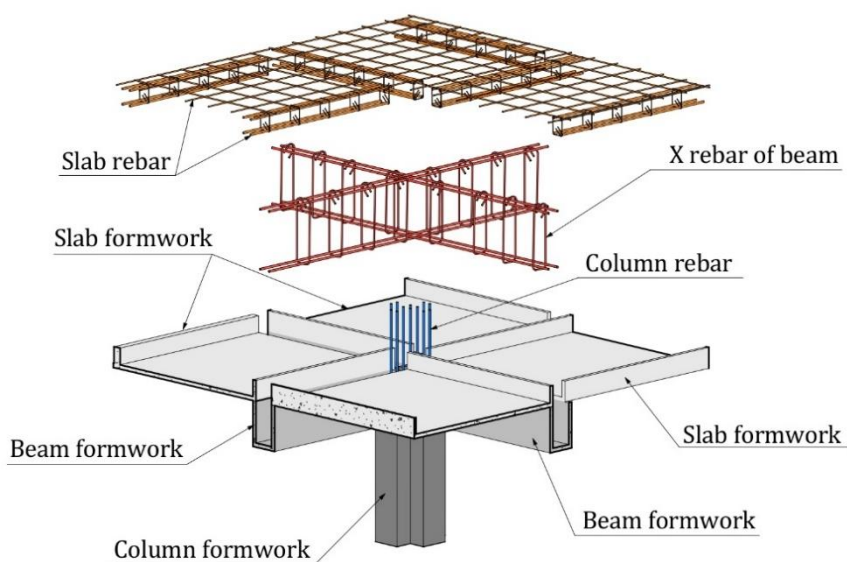


Рис. 3. Загальний вигляд каркасної системи, сформованої з використанням незнімної опалубки, виготовленої за технологією 3D-друку

Ця робота присвячена саме чисельному аналізу балок, що містять незнімну опалубку, виготовлену за технологією 3D-друку (рис. 5). Основну увагу приділено оцінюванню їхньої несучої здатності та компонентів напружено-деформованого стану, а також обґрунтуванню необхідності додаткового армування 3DCP-опалубки.

У межах цього дослідження використано такі матеріали: для залізобетонного ядра балок застосовували бетон класу C25/30; для незнімної опалубки – суміш для 3D-друку Ceresit із розрахунковим опором до стиску $f_{ck, prism} = 15$ МПа і розрахунковою міцністю на розтяг за згину $f_{ctm} = 0.8$ МПа.

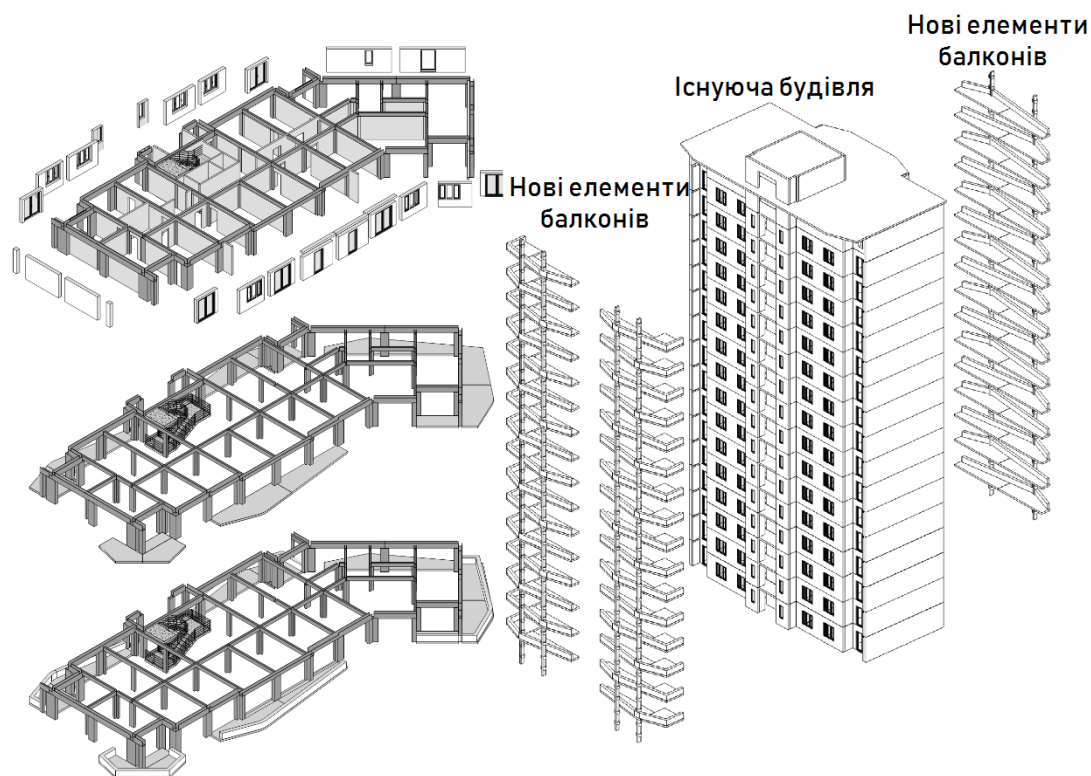


Рис. 4. Будівельна система [2], що передбачає модульні конструктивні елементи для реконструкції 16-поверхового житлового будинку



Рис. 5. Зразки залізобетонних балок з інтегрованою незнімною опалубкою, виготовленою за технологією 3D-друку (3DCP)

Слід зазначити, що на практиці елементи, виготовлені за технологією 3D-друку, можуть демонструвати різні граничні значення міцності залежно від того, навантаження прикладене паралельно чи

перпендикулярно до напрямку нанесення шарів [14]. Проте в цьому дослідженні анізотропні властивості матеріалу не враховувано, оскільки їх необхідно підтвердити експериментально. Фактичні

значення міцності значною мірою залежать від геометричних параметрів шару (висота, ширина), які потребують уточнення під час лабораторних випробувань. Отже, результати цієї роботи є первинною оцінкою несучої здатності запропонованих конструктивних рішень.

Переріз залізобетонного ядра балки становить 130×275 мм, тоді як товщина незнімної 3DCP-опалубки – 25 мм. З урахуванням опалубки загальні розміри (брутто-переріз) балки складають 180×300 мм. Для визначення впливу різних конфігурацій на конструктивну ефективність були проаналізовані кілька типів композитних балок із різними схемами армування (рис. 6).

Аналіз включав випадки, де 3D-друкована опалубка не врахована в несучій здатності перерізу – оцінювали лише монолітну частину з армуванням у верхній (без армування, $2\emptyset 12$ A500C, $2\emptyset 14$ A500C) і нижній зонах ($2\emptyset 12$ A500C, $2\emptyset 16$ A500C,

$2\emptyset 18$ A500C, $2\emptyset 20$ A500C). Ці конфігурації позначені як UCore 1–8 (рис. 6, а).

Інша група конфігурацій урахувала спільну роботу незнімної опалубки та залізобетонного ядра без армування в опалубці за тих самих схем армування у верхній і нижній зонах. Вони позначені як UFull 1–8 (рис. 6, б).

Наступна серія – UFull 9–16 – включала помірне армування в опалубці ($2\emptyset 8$ A500C) за тих самих схем армування в основному бетонному ядрі (верхня і нижня зони) (рис. 6, в).

Остання група – UFull 17–24 (рис. 6, г) – передбачала посилене армування в опалубці ($2\emptyset 10$ A500C), з аналогічним армуванням у верхній і нижній зонах, що дає змогу оцінити граничний потенціал несучої здатності композитних балок.

Загалом було проаналізовано і розраховано 32 варіанти поперечних перерізів балок.

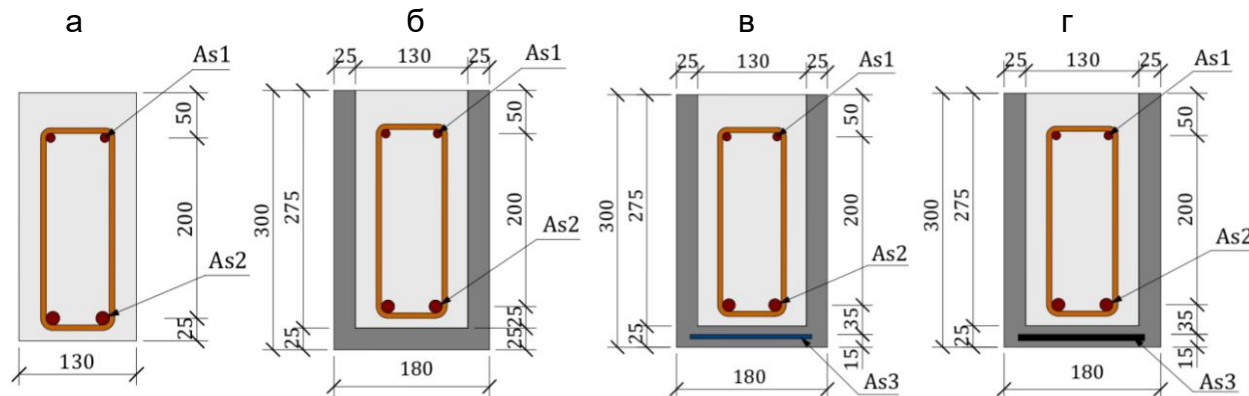


Рис. 6. Складений переріз балки з U-подібною незнімною опалубкою, надрукованою за технологією 3DCP, із зазначенням варіантів розташування армування (As1, As2, As3)

Чисельне моделювання та прийняті припущення

Реалізація зазначених принципів розрахунку наведена нижче у вигляді схем і креслень. Розрахунки виконано методом деформацій відповідно до вимог [21, 22], зокрема розд. 4 і дод. А.

Розрахунки здійснювали з урахуванням низки основних припущень, спрямованих на забезпечення достовірності і точності результатів. Переріз моделювали як усереднений, що описує середні деформації бетону та арматури вздовж довжини ділянки, з урахуванням появи

тріщин, де це доцільно. Передбачали, що деформації арматури відповідають деформаціям навколишнього бетону як у зоні розтягування, так і стиску, що забезпечує спільну роботу матеріалів. По висоті перерізу приймали лінійний розподіл деформацій, що відповідає класичній гіпотезі плоских перерізів у будівельній механіці.

Діаграму напружень і деформацій для стисненого бетону приймали згідно з рис. 3.1 [21], а для арматури – згідно з рис. 3.1 [22]. Розрахунки здійснювали з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, розробленого авторами. Це ПЗ реалізує алгоритм розв’язання нелінійних рівнянь рівноваги для композитного залізобетонного перерізу методом деформацій [23].

Створювали та аналізували 3D-моделі U-подібних балок довжиною 3 м у середовищі Lira-FEM 2024 Full Academic (ліцензія № 7293-22 від 15.02.2023 р.). У процесі моделювання враховували фізичну нелінійність для забезпечення достовірного відтворення поведінки конструкції під навантаженням.

Зовнішнє навантаження прикладено у двох точках, розташованих на відстані 1 м від торців балки. Навантаження вводили у вигляді 20 рівномірно розподілених кроків для забезпечення стабільності і точності обчислень. Щоб уникнути локальних концентрацій напружень у зонах прикладення сили, навантаження розподілено по довжині 200 мм і відповідній ширині балки (залежно від типу), а не введено у вузли безпосередньо. Величину прикладеного навантаження підібрано так, щоб створити згинальний момент у середині прольоту, який відповідає граничній несучій здатності згідно з розрахунками плоского перерізу.

Умови закріплення моделювали на торцях балки у вигляді опор довжиною 200 мм із визначенням матеріалу як «сталь» для відтворення реалістичної граничної роботи. Ядро балки (залізобетон) і незнімну

3D-друковану опалубку моделювали з використанням восьмивузлових ізопараметричних тривимірних скінченних елементів (тип SE 236) з урахуванням фізичної нелінійності. Сітку скінченних елементів формували з розмірами елементів від 8 до 10 мм для забезпечення балансу між точністю і обчислюваною ефективністю.

Поздовжню арматуру моделювали з використанням фізично нелінійних стрижневих 3D-елементів (тип SE 210), що дає змогу точно врахувати її внесок у загальну конструктивну роботу балки.

Фізико-механічні властивості бетону та 3D-друкованої опалубки задавали у вигляді нелінійної діаграми «напруження – деформація» з урахуванням спадної гілки відповідно до Eurocode 2 (тип матеріальної моделі 12) [24]. Це дало змогу змодельовати поведінку бетону на стиск і розтяг включно зі спадною ділянкою після досягнення граничної міцності. Для арматури було застосовано кусочно-лінійну діаграму з двох сегментів (діаграма Прандтля, матеріальна модель типу 14), яка достовірно відтворює її пружну та пластичну поведінку під навантаженням.

Одну з побудованих скінченно-елементних моделей розглянутих балок наведено на рис. 7.

Результати та обговорення

Результати розрахунку поперечних перерізів за методом деформацій, наведені в табл. 1 та 2, демонструють несучу здатність і відсоток армування для кожної конфігурації. Аналіз, підкріплений діаграмами згинальний момент – кривизна та розподілами деформацій і напружень (рис. 8), показує, що всі розглянуті варіанти перерізів є конструктивно оптимальними.

Це підтверджено досягненням граничних стискальних напружень у стисненій зоні бетону та граничних розтягувальних напружень у шарах робочої арматури, що свідчить про повне використання несучої здатності матеріалів у кожному з проаналізованих випадків.

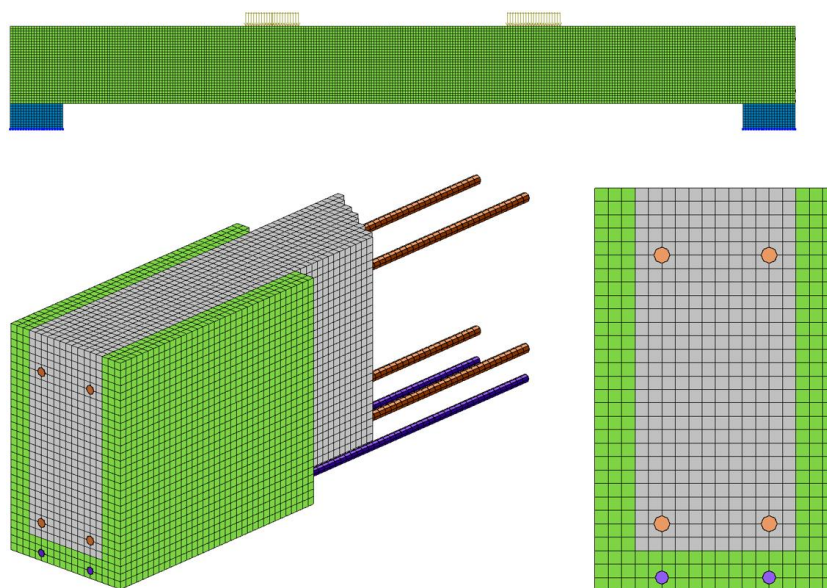


Рис. 7. Модель балки конфігурації UFull 21 у скінченно-елементному вигляді

Таблиця 1

Результати аналізу поперечних перерізів балок із незнімною та без незнімної опалубки за різних схем армування (без додаткового армування опалубки)

Позначення перерізу	Загальна площа армування, мм ²	Несуча здатність, М·кНм	Порівняння несучої здатності, %	Порівняння площі армування, %	Коефіцієнт армування, %
1	2	3	4	5	6
UCore1 (As2)	226.19	22.26	100.0	100.0	0.63
UCore2 (As2)	402.12	36.4	100.0	100.0	1.12
UCore3 (As2)	508.94	43.46	100.0	100.0	1.42
UCore4 (As2)	628.32	48.84	100.0	100.0	1.76
UCore5 (As1 + As2)	452.38	22.23	100.0	100.0	1.27
UCore6 (As1 + As2)	628.31	37.35	100.0	100.0	1.76
UCore7 (As1 + As2)	816.82	46.22	100.0	100.0	2.28
UCore8 (As1 + As2)	936.2	55.65	100.0	100.0	2.6
UFull1 (As2)	226.19	22.9	102.9	100.0	0.42

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
UFull2 (As2)	402.12	38.44	105.6	100.0	0.74
UFull3 (As2)	508.94	46.82	107.7	100.0	0.94
UFull4 (As2)	628.32	55.43	113.5	100.0	1.16
UFull5 (As1 + As2)	452.38	23.06	103.7	100.0	0.84
UFull6 (As1 + As2)	628.31	38.57	103.3	100.0	1.16
UFull7 (As1 + As2)	816.82	47.65	103.1	100.0	1.51
UFull8 (As1 + As2)	936.2	57.54	103.4	100.0	1.73

Таблиця 2

Результати аналізу поперечних перерізів балок із незнімною опалубкою
за різних рівнів армування

Позначення перерізу	Загальна площа армування, мм ²	Несуча здатність, М·кН·м	Порівняння несучої здатності, %	Порівняння площі армування, %	Коефіцієнт армування, %
1	2	3	4	5	6
UFull9 (As1 + As2+As3)	326.72	33.4989	150.5	144.4	0.61
UFull10 (As1 + As2+As3)	502.65	47.8978	131.6	125.0	0.93
UFull11 (As1 + As2+As3)	609.47	55.6472	128.0	119.8	1.13
UFull12 (As1 + As2+As3)	728.85	63.4297	129.9	116.0	1.35
UFull13 (As1 + As2+As3)	552.91	33.4717	150.6	122.2	1.02
UFull14 (As1 + As2+As3)	728.84	48.5878	130.1	116.0	1.35
UFull15 (As1 + As2+As3)	917.35	57.5182	124.4	112.3	1.70

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6
UFull16 (As1 + As2+As3)	1036.73	66.9735	120.3	110.7	1.92
UFull17 (As1 + As2+As3)	383.27	39.2714	176.4	169.4	0.71
UFull18 (As1 + As2+As3)	559.2	52.9999	145.6	139.1	1.04
UFull19 (As1 + As2+As3)	666.02	60.3526	138.9	130.9	1.23
UFull20 (As1 + As2+As3)	785.4	67.4644	138.1	125.0	1.45
UFull21 (As1 + As2+As3)	609.46	39.3495	177.0	134.7	1.13
UFull22 (As1 + As2+As3)	785.39	54.1347	144.9	125.0	1.45
UFull23 (As1 + As2+As3)	973.9	62.5606	135.4	119.2	1.80

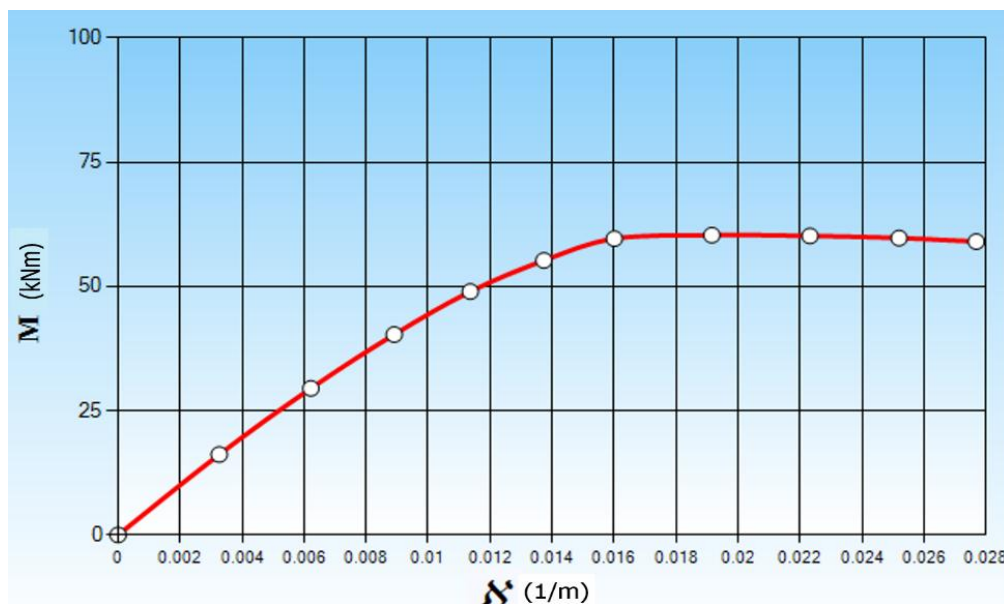
Отримані результати вказують, що незнімна опалубка з 3D-друку без армування має незначний вплив на несучу здатність балки, особливо у випадку однопрольотних елементів, де опалубка розташована в зоні розтягування. Водночас збільшення висоти перерізу конструкції може підвищити несучу здатність на 3–7 %. Додавання армування безпосередньо в тіло опалубки суттєво покращує її ефективність: зростання несучої здатності сягає 77 %, тоді як витрати сталі зростають лише на 34 %. Це демонструє високий рівень конструктивної ефективності такого підходу. Порівняльні результати наведені на рис. 9.

Водночас суттєвим обмеженням є неможливість забезпечення нормативного бетонного захисного шару з розміщенням додаткового армування в тілі опалубки. Це

зумовлює необхідність застосування нержавіючої сталі або інших заходів протикорозійного захисту, що підвищує вартість і ускладнює реалізацію. Отже, доцільність використання армованої опалубки з 3D-друку значною мірою залежить від специфіки проекту – вимог щодо навантажень, умов експлуатації та бюджетних обмежень.

Незважаючи на зазначені обмеження, результати дослідження підтверджують потенціал застосування 3D-друкованої незнімної опалубки для покращення конструктивної ефективності, проте для подальшого впровадження необхідні додаткові дослідження щодо уточнення методики та її оптимізації для умов будівельної практики.

а



б

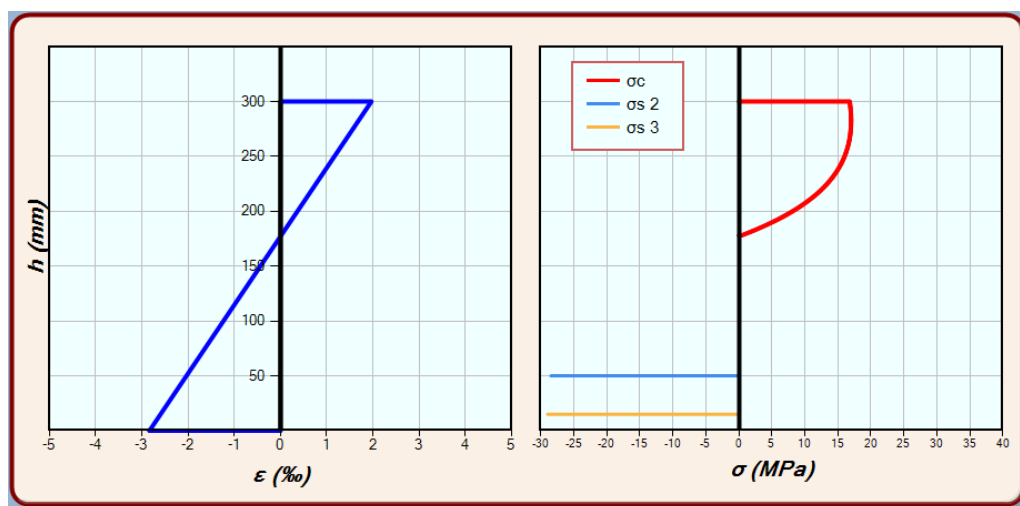


Рис. 8. Діаграма «момент–кривизна» і розподіли деформацій і напружень для проаналізованого поперечного перерізу балки типу UFull19

Аналізуючи тривимірні скінченно-елементні моделі балок, дійшли важливих висновків. Аналіз переміщень (рис. 10) показав зростання жорсткості балок із 3DCP-опалубкою. Наприклад, балка типу UCore 5 (без друкованої опалубки) продемонструвала вертикальний прогин 0.892 мм під дією загального навантаження 44.5 кН. Натомість балка UFull 23, оснащена незнімною опалубкою, мала прогин 1.04 мм за значно більшого навантаження – 78.7 кН. Це свідчить про те, що збільшення прогину

становило лише 15 %, тоді як прикладене навантаження зросло на 76.8 %, що демонструє суттєвий внесок опалубки у жорсткість конструкції.

Аналіз головних розтягувальних напружень σ_1 в тілі опалубки показав, що граничне допустиме значення розтягувального напруження (0.8 МПа) було перевищене. Зони концентрації напружень виявлені не лише в середній частині прольоту чи на опорах, а і в проміжних ділянках, що вказує на

потенційний ризик утворення похилих тріщин. Тому для практичного застосування незнімної опалубки слід передбачити

додаткові армувальні елементи в опорних зонах.

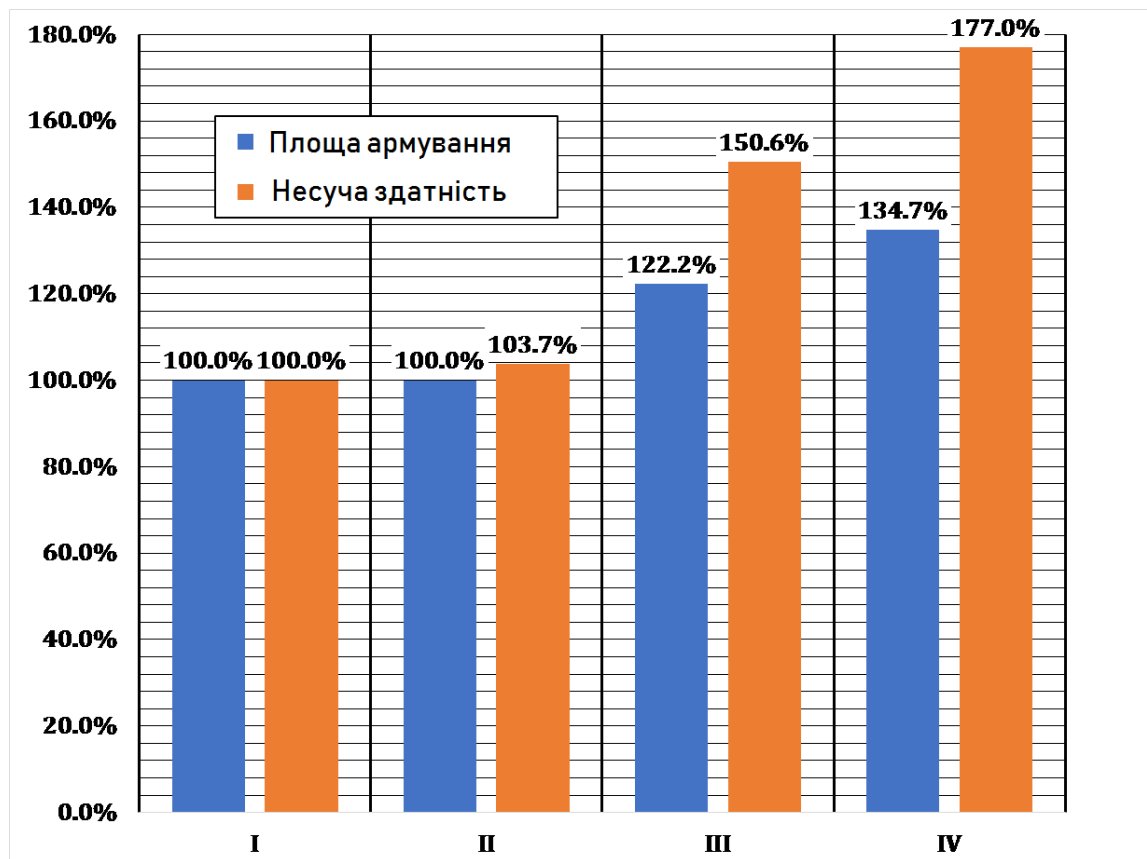


Рис. 9. Діаграма, що ілюструє вплив розміщення додаткового армування в площині незнімної опалубки на несучу здатність балки:

I – переріз без урахування спільної роботи з опалубкою (UCore 1–8); II – переріз із урахуванням спільної роботи, але без армування в опалубці (UFull 1–8); III – переріз зі спільною роботою і помірним армуванням в опалубці (UFull 9–16); IV – переріз зі спільною роботою і підсиленням армуванням в опалубці (UFull 17–24)

На противагу цього напруження в залізобетонному ядрі залишалися в межах допустимих значень: у випадку балки UFull 23 головне розтягувальне напруження не перевищувало 1.7 МПа за допустимого значення 2.6 МПа (рис. 11, 12). Отримані результати підкреслюють важливість

ретельного аналізу розподілу напружень та обґрунтованого вибору стратегії армування для проектування балок із використанням 3DCP-опалубки з метою забезпечення як конструктивної надійності, так і ефективного використання матеріалів.

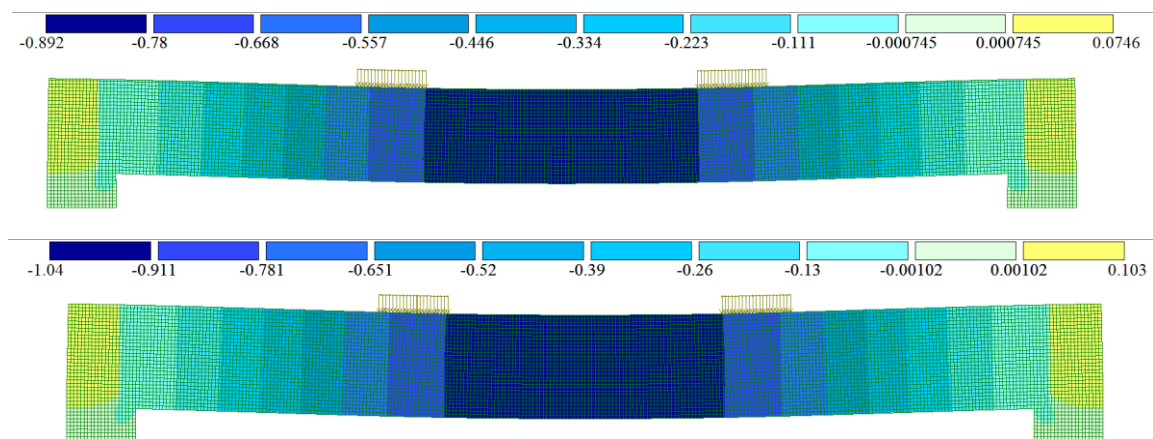


Рис. 10. Вертикальні переміщення (мм) у моделях балок: UCore 5 (угорі) і UFull 23 (унизу), що ілюструють деформування під дією навантаження

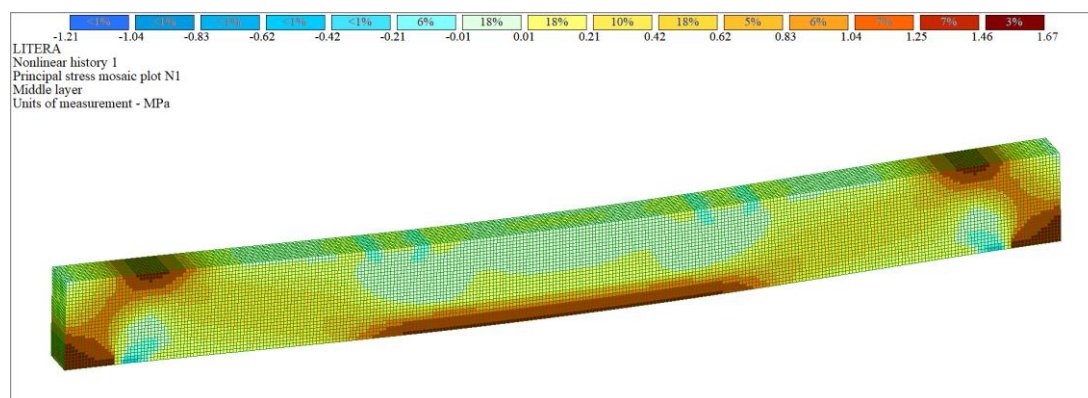


Рис. 11. Ізополя головних розтягувальних напружень σ_1 (МПа) у залізобетонному ядрі балки UFull 23; максимальне значення напруження становить 1.67 МПа

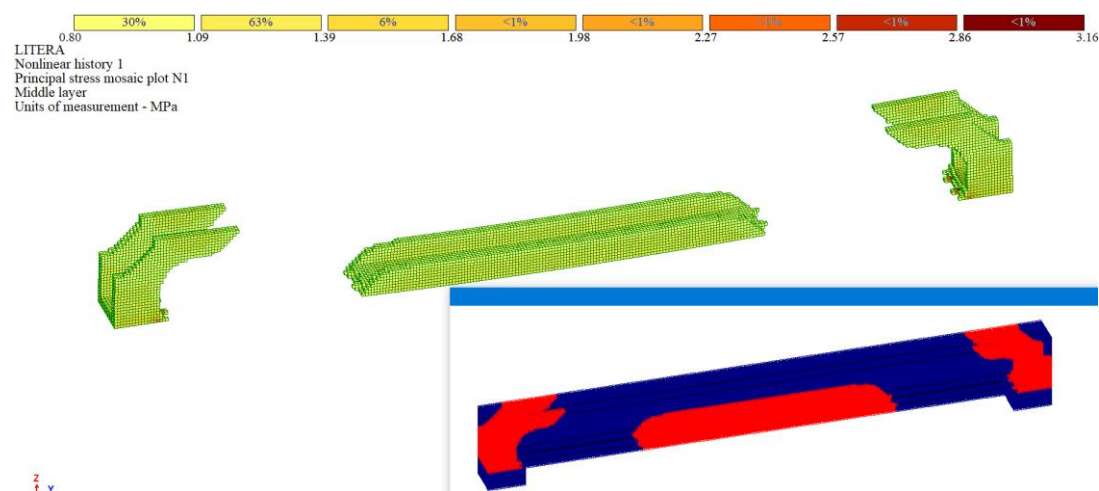


Рис. 12. Ізополя головних розтягувальних напружень σ_1 (МПа) у незнімній 3ДСР-опалубці балки UFull 23

Висновки. У дослідженні проаналізовано 32 різні конфігурації залізобетонних балок із незнімною опалубкою, виготовленою за технологією 3D-друку, для оцінювання конструктивної ефективності, зокрема несучої здатності, жорсткості та розподілу напружень. На підставі чисельного моделювання та подальшого аналізу результатів можна зробити такі висновки:

1. Включення 3DCP-опалубки без армування забезпечило лише незначне покращення несучої здатності (до 7 %), тоді як конфігурації з помірним армуванням продемонстрували збільшення несучої здатності до 77 %. За умов підсиленого армування покращення складо до 177 %.

2. Розміщення армування в тілі опалубки виявилось конструктивно ефективним, проте потребує ретельного врахування питань захисту від корозії через недостатню товщину бетонного захисного шару. Це можна реалізувати через застосування нержавіючої сталі або спеціалізованих протикорозійних заходів. Крім того, інтеграція армування між шарами 3D-друку може ускладнити технологію виготовлення та підвищити трудомісткість.

3. Застосування незнімної опалубки з 3D-друку суттєво покращує жорсткість балок. Наприклад, балки з 3DCP-опалубкою мали лише на 15 % більші вертикальні переміщення зі зростанням прикладеного навантаження на 76.8 %, що свідчить про ефективність системи щодо деформаційної стійкості.

4. Аналіз головних розтягувальних напружень показав перевищення допустимого значення 0.8 МПа у 3D-друкованій опалубці, зокрема в середній

частині прольоту та на опорах. Це вказує на підвищений ризик утворення тріщин і потенційних локальних відмов, що можуть порушити сумісну роботу опалубки із залізобетонним ядром. Для запобігання руйнуванню по похилих перерізах доцільним є локальне підсилення армування в опорних зонах.

5. Залізобетонне ядро балок працювало задовільно: головні розтягувальні напруження залишалися у межах допустимих значень для бетону класу C25/30. Це підтверджує конструктивну доцільність використання незнімної опалубки з 3D-друку, хоча також вказує на необхідність подальшої оптимізації стратегій армування та керування напруженнями.

6. Результати чисельного моделювання потребують підтвердження за умов повномасштабних експериментальних випробувань. З цією метою буде проведено серію фізичних досліджень на триметрових балках (рис. 5) для верифікації несучої здатності та поведінки конструкцій.

Отримані результати формують науково обґрунтовану основу для ширшого впровадження систем незнімної опалубки, виготовленої за технологією 3D-друку, у будівельну практику. Це особливо актуально в контексті післявоєнної відбудови, де критично важливими є ефективне використання ресурсів і скорочення термінів виконання робіт. Подальші експериментальні дослідження та натурні впровадження необхідні для подолання виявлених обмежень і оптимізації інтеграції 3DCP-технологій у залізобетонні конструктивні системи.

Список використаних джерел

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України станом на листопад 2024 року. Київ: Київська школа економіки, 2023. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf (дата звернення: 11.06.2025).

2. Ma G., Buswell R., Leal da Silva W., Wang L., Xu J., Jones S. (2022). Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106774>.
3. Shmukler Valeriy & Reznik Petro & Krul Yuriy & Volodymyrov Anton & Binkevych Kostiantyn. (2024). Design features of the new system for reconstruction and renovation of large panel buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1376. 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012012>.
4. Jipa Andrei & Dillenburger Benjamin. (2021). 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 9. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0024>.
5. Bekaert M., Van Tittelboom K., & De Schutter G. (2020). Printed concrete as formwork material : a preliminary study. In F. Bos, S. Lucas, R. Wolfs & T. Salet (Eds.). *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Digital Concrete 2020*. Vol. 28. P. 575–583. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_59
6. Jipa A., Bernhard M., Dillenburger B. (2017). Submillimeter Formwork: 3D-Printed Plastic Formwork for Concrete Elements. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000237359>.
7. Zgalat-Lozynskyy O., Zgalat-Lozynska L. (2020). Розвиток та впровадження інноваційних технологій 3D-друку у будівництві. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Economy and Management*. 70. <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-5-7>.
8. Aziz S., Apellániz D., Weber M., Betti G., Gengnagel C. (2021). Towards a multifunctional 3DCP slab system.
9. Burger Joris & Huber Tobias & Lloret Ena & Mata-Falcón Jaime & Gramazio Fabio & Kohler Matthias. (2022). Design and fabrication of optimised ribbed concrete floor slabs using large scale 3D printed formwork. *Automation in Construction*. 144. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104599>.
10. Burger J. Aejmelaeus-Lindstrom P. Gu rel S. Niketic F. Lloret-Fritsch E. Flatt R. J. Gramazio F. and Kohler M. Eggshell Pavilion: A reinforced concrete structure fabricated using robotically 3D printed formwork.
11. Guan Jingyuan & Wang Li & Ma Guowei. (2022). Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beam with 3d-Printed Permanent Formwork. *SSRN Electronic Journal*. 10.2139/ssrn.4117121.
12. Zhu Binrong & Nematollahi Behzad & Pan Jinlong & Zhang Yang & Zhou Zhenxin & Zhang Yamei. (2021). 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction. *Cement and Concrete Composites*. 121. 104039. [10.1016/j.cemconcomp.2021.104039](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104039).
13. Vantghem G. Ooms T. and De Corte W. FEM Modelling Techniques for Simulation of 3D Concrete Printing. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.06907>.
14. Xiao Jianzhuang & Liu Haoran & Ding Tao. (2020). Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure. *Additive Manufacturing*. 39. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101712>.
15. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів, які виготовляються за допомогою 3D друку / І. К. Сенченков, М. В. Юрженко, О. П. Червінко та ін. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 8. С. 29-34. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001273670>.
16. Mata-Falcón J., Bischof P., Huber T., Anton A. et al (2022). Digitally fabricated ribbed concrete floor slabs: a sustainable solution for construction. *RILEM Technical Letters*. 7. 68-78. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.161>.

17. Burger J., Wangler T., Chiu Y., Techathuvanun C., Gramazio F., Kohler M., Lloret E. (2021). Material-informed Formwork Geometry The effects of cross-sectional variation and patterns on the strength of 3D printed eggshell formworks. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.2.199>.
18. Gebhard L., Burger J., Mata-Falcón J., Lloret E., Gramazio F., Kohler M., Kaufmann W. (2022). Towards efficient concrete structures with ultra-thin 3D printed formwork: exploring reinforcement strategies and optimisation. *Virtual and Physical Prototyping*. 17. 1-18. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2041873>.
19. Han D., Yin H., Qu M., Zhu J, Wickes A. (2020). Technical analysis and comparison of formwork-making methods for customized prefabricated buildings: 3D printing and conventional methods. *Journal of Architectural Engineering*, Vol. 26, Iss. 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.000039](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.000039).
20. Kharkiv housing challenge: Upgrading concrete panel housing and residential neighbourhoods in Ukraine's second largest city. URL: https://architecturecompetitions.com/kharkivhousingchallenge/?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_term=2024-05-06&utm_campaign=Norman+Foster+invites+Kharkiv+Housing+Challenge (дата звернення 11.06.2025).
21. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Чинний від 2011-06-01. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-792> (дата звернення: 11.06.2025).
22. ДСТУ В В.2.6 156:2010. Конструкції будівель і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Чинний від 2012-01-01. URL: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY/dsty_b_v.2.6-156-2010.pdf (дата звернення: 11.06.2025).
23. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) / В. М. Бабаєв, А. М. Бамбура, О. М. Пустовойтова та ін. Харків: Золоті сторінки, 2015. 432 с. ISBN 978-966-400-327-5.
24. EN 1992-1-1:2004/NA:2010 (нац. додаток). Єврокод 2: Проектування бетонних конструкцій. Ч. 1-1: Загальні правила і правила для будівель. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2012. 243 с.

Резнік Петро Аркадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380506158638. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Лугченко Олена Іванівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380500510018. ORCID iD: 0000-0001-5397-355X. E-mail: olena.lugchenko@kname.edu.ua.

Володимиров Антон Валерійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380505881321. ORCID ID: 0009-0001-8416-535X. E-mail: anton.volodymyrov@kname.edu.ua.

Тенесеску Владислав Віталійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380637332473. ORCID ID: 0000-0002-4935-4454. E-mail: vladislav.tenesesku@kname.edu.ua.

Алатаєв Джамалдїй Аслудїйович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380971398944. ORCID ID: 0000-0003-1570-8469. E-mail: dzhamaldii.alataiev@kname.edu.ua.

Булдаков Олексій Олексійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380988578167. ORCID ID: 0009-0002-4663-7392. E-mail: oleksii.buldakov@kname.edu.ua.

Petro Reznik, PhD (Tech), associate professor, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Olena Lugchenko, PhD (Tech), associate professor, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-5397-355X. E-mail: olena.lugchenko@kname.edu.ua.

Volodymyrov Anton, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0009-0001-8416-535X. E-mail: anton.volodymyrov@kname.edu.ua.

Vladyslav Tenesescu, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-4935-4454. E-mail: vladislav.tenesescu@kname.edu.ua.

Dzhamaldii Alataiev, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0003-1570-8469. E-mail: dzhamaldii.alataiev@kname.edu.ua.

Oleksii Buldakov, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0009-0002-4663-7392. E-mail: oleksii.buldakov@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 24.06.2025 р.