

УДК 624.012.45:338.2
DOI: 10.60022/3(5)-87S

Валовой Олександр Іванович

кандидат технічних наук, доцент
Криворізький національний університет, Україна
Valovoi Olexander
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kryvyi Rih National University, Ukraine
ORCID: 0009-0004-2939-3028

Валовой Максим Олександрович

кандидат технічних наук, доцент
Криворізький національний університет, Україна
Valovoi Maksym
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kryvyi Rih National University, Ukraine
ORCID: 0009-0004-4623-4248

Пастухов Станіслав Віталійович

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
Криворізький національний університет, Україна
Pastukhov Stanislav
PhD student
Kryvyi Rih National University, Ukraine
ORCID: 0009-0000-8576-6782

Малашенко Віктор Сергійович

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
Криворізький національний університет, Україна
Malashenko Victor
PhD student
Kryvyi Rih National University, Ukraine
ORCID: 0009-0009-6804-0299

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ В ПОРІВНЯННІ З НОВИМ БУДІВНИЦТВОМ

Анотація. У статті досліджено доцільність відновлення залізобетонних конструкцій замість демонтажу. Оскільки збитки, завдані інфраструктурі України, перевищують 176 мільярдів доларів, пошук ефективних методів відбудови є критичним.

Метою роботи є техніко-економічне обґрунтування методів нарізування зони перерізу пошкоджених елементів інноваційними композитними матеріалами порівняно з новим будівництвом. Проаналізовано напружений стан конструкцій, які підсилюються безпосередньо під дією експлуатаційного навантаження.

Враховано фактичні коефіцієнти умов роботи додаткової арматури. На прикладі ревіталізації індустриального парку доведено значну макроекономічну перспективу таких рішень. Встановлено, що адаптивне повторне використання (*adaptive reuse*) забезпечує необхідний рівень конструктивної надійності та дозволяє досягти коефіцієнта економії 1,93, що зберігає майже 57 % коштів та знижує викиди вуглецю порівняно зі зведенням нових споруд.

Ключові слова: економічна ефективність, коефіцієнт економії, післявоєнна відбудова, звіт RDNA4, залишковий ресурс, залізобетонні конструкції, композитні матеріали.



ECONOMIC EFFICIENCY AND TECHNICAL JUSTIFICATION OF STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH COMPOSITE MATERIALS IN COMPARISON WITH NEW CONSTRUCTION

Abstract. *The article examines the feasibility of restoring reinforced concrete structures instead of demolishing them. Since the damage to Ukraine's infrastructure exceeds 176 billion US dollars and total reconstruction needs surpass 524 billion, the search for effective rebuilding methods is becoming critical.*

The aim of the work is the technical and economic justification of methods of cross-section enlargement of damaged elements with innovative composite materials in comparison with new construction. The methodology relies on a non-linear deformation model and the finite element method, which makes it possible to analyse the stress-strain state of structures strengthened directly under the action of operational loading. The actual coefficients of the working conditions of the additional reinforcement, which formally describe the ratio of the actual relative strains to their limiting values, are taken into account. The technical part of the study shows the high efficiency of combined strengthening: the application of carbon-fibre composite tapes in the tensile zone of bent reinforced concrete elements together with the build-up of the compressed zone by an additional layer of concrete (overlay) made of steel-fibre-reinforced concrete, reactive-powder concrete or with basalt-fibre-reinforced polymer reinforcement (BFRP). The economic part of the study uses mathematical financial modelling that compares the costs of revitalisation (modernisation of the building core, spatial adaptation and modernisation of engineering systems) with the costs of complete demolition and new construction (demolition, debris removal, new construction). The environmental benefit (avoided CO₂ emissions and reduced construction waste) is also taken into account. The key indicator of comparison is the Savings Ratio, which accumulates both direct financial savings and monetised environmental advantages. Using the example of the revitalisation of the Radex Park Marywilka industrial complex, the considerable macroeconomic prospects of such solutions are proven. It is established that adaptive reuse provides the necessary level of structural reliability and makes it possible to reach a Savings Ratio of 1.93, preserving almost 57 % of capital expenditures and reducing carbon emissions in comparison with the construction of new buildings. The proposed approach is consistent with the European principles of the circular economy and is recognised as one of the most rational and cost-effective approaches to Ukraine's post-war reconstruction.

Keywords: *economic efficiency, savings ratio, post-war reconstruction, RDNA4 report, residual resource, reinforced concrete structures, composite materials.*

Постановка проблеми. Сьогодні перед будівельною галуззю постає виклик післявоєнної відбудови. Збитки, завдані інфраструктурі України сягають 176 мільярдів доларів, а потреби відновлення перевищують 524 мільярди [1]. Реконструкція будівель замість демонтажу узгоджується зі стратегією адаптивного повторного використання [2]. Актуальність теми зумовлена значними масштабами руйнувань інфраструктури України, де загальні потреби на відбудову перевищують 524 мільярди доларів США [1]. В умовах гострого дефіциту фінансових ресурсів стратегічним пріоритетом стає збереження наявних будівельних активів шляхом інноваційної реконструкції замість їх повного демонтажу та зведення нових споруд [3]. Тому глибоке техніко-економічне обґрунтування ефективних методів підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій набуває сьогодні критично важливого макроекономічного та інженерного значення [2]. Ця стратегія узгоджується з нещодавно запропонованою «подвійною ієрархією 6R», яка обґрунтовує пріоритетність збереження та ремонту наявних конструкцій над їх повним знесенням у специфічних умовах post-disaster відбудови України [4].

За даними останніх макроекономічних звітів, найбільш постраждалими секторами є житловий фонд, транспортна та промислова інфраструктура, відновлення яких потребуватиме десятків мільярдів доларів [1], [5]. З огляду на те, що дефіцит державного бюджету у 2024 році перевищив 17,7 відсотка ВВП [1], традиційний будівельний підхід, який передбачає повне знесення пошкоджених об'єктів, є вкрай неефективним. Крім того, такий демонтаж генерує значні обсяги будівельного сміття [3]. Саме тому застосування інноваційних композитних матеріалів для підсилення конструкцій не лише вирішує гостру проблему дефіциту капіталу, а й узгоджується з європейськими принципами циркулярної економіки завдяки збереженню існуючого бетону та мінімізації будівельних відходів. Збереження існуючого бетону істотно знижує викиди вуглецю, що робить адаптивне повторне використання однією з ключових засад сталого післявоєнного розвитку нашої держави [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методологія та підхід до узагальнення даного

дослідження базується на комплексному міждисциплінарному підході, який поєднує глибокий інженерно-технічний аналіз із макроекономічним та фінансовим моделюванням [1], [6], [3]. Такий синтез дозволяє не лише оцінити технічну надійність підсилення пошкоджених будівель, а й довести їхню економічну доцільність у масштабах післявоєнної відбудови. Технічний підхід до оцінки залізобетонних конструкцій ґрунтується на використанні нелінійної деформаційної моделі розрахунку та методу скінченних елементів (МСЕ) [6]. Головним аспектом методології є аналіз напружено-деформованого стану (НДС) елементів, які підсилюються безпосередньо під дією експлуатаційного навантаження, оскільки в реальних умовах пошкоджені конструкції майже неможливо повністю розвантажити. Для забезпечення безпеки оновленої споруди враховується сумісна робота існуючого бетону та інноваційних матеріалів підсилення (полімерів, армованих волокном) шляхом введення у розрахунки спеціальних експериментально підтверджених коефіцієнтів умов роботи [2], [6].

Економічна методологія дослідження спирається на порівняльний аналіз витрат і вигод та оцінку впливу на життєвий цикл. Для узагальнення фінансової ефективності застосовано математичне моделювання, яке покомпонентно зіставляє витрати на модернізацію та технічне переоснащення існуючих споруд із витратами на їхній повний демонтаж, утилізацію будівельного сміття та зведення нового об'єкта. Ключовим індикатором порівняння виступає коефіцієнт економії (Savings Ratio), який акумулює в собі як пряму фінансову економію, так і монетизовані екологічні переваги від збереження матеріалів і зниження викидів вуглецю [3]. Узагальнення техніко-економічних результатів здійснюється в макроекономічному контексті [1]. Масштаби пошкоджень інфраструктури та потреби у фінансуванні формуються на основі аналітичних даних звіту RDNA4 від Світового банку [5].

Метою статті є техніко-економічне обґрунтування ефективного підсилення залізобетонних конструкцій шляхом нарощування зони перерізу інноваційними композитними матеріалами порівняно з новим будівництвом [6]. Методологія роботи базується на комплексному аналізі напружено-деформованого стану пошкоджених елементів, оскільки їхнє підсилення майже завжди відбувається під впливом експлуатаційного навантаження [5].

Виклад основного матеріалу. Розглянемо технічне обґрунтування методів підсилення композитними матеріалами. Для відновлення та підвищення несучої здатності пошкоджених залізобетонних конструкцій одним із найефективніших інженерних підходів є метод підсилення нарощуванням перерізу. Цей підхід дозволяє уникнути повного демонтажу елемента і полягає у цілеспрямованому додаванні нових шарів матеріалів або додаткової арматури до існуючої конструкції. Сьогодні на зміну класичному масивному бетонуванню чи приварюванню важкого металевого прокату все частіше приходять інноваційні композитні матеріали [2], [6].

Інженерна практика та результати досліджень показують, що раціональне збільшення несучої здатності досягається саме завдяки зовнішньому композитному армуванню та підсиленню нарощуванням перерізу додатковим бетоном (наприклад, у вигляді суцільних об'ємів). Використання сучасних композитів, зокрема вуглепластикових матеріалів та стрічок, дозволяє суттєво підвищити міцність, тріщиностійкість та загальну жорсткість згинаних і стиснуто-згинаних елементів. Головна перевага таких композитів полягає у їхній винятковій міцності на розтяг, малій власній вазі та високій стійкості до агресивного середовища і корозії. Їх найбільш доцільно закріплювати (наклеювати) у розтягнутій зоні залізобетонних балок чи плит, що дозволяє ефективно компенсувати дефіцит або пошкодження робочої арматури без значного збільшення габаритів самої конструкції [2], [6].

Водночас для нарощування стиснутої зони перерізу успішно застосовують додатковий бетон або високоміцні суміші, що володіють підвищеною здатністю чинити опір розвитку мікротріщин. Проте найбільш прогресивним рішенням у сучасній будівельній практиці є комплексний метод підсилення нарощуванням перерізу. Він передбачає одночасне використання наклеєних композитів (у вигляді вуглецевих стрічок чи волокон) у розтягнутій зоні та додаткового бетонування у стиснутій, що дозволяє забезпечити максимальне зростання несучої здатності конструкції. Важливо розуміти, що вибір конкретного композитного матеріалу чи конфігурації нарощування завжди залежить від фактичного напружено-деформованого стану елемента та специфіки його пошкоджень [2], [6].

Ефективним методом збільшення несучої здатності є влаштування надбетонки — нарощування стиснутої зони перерізу за допомогою сучасних композитних матеріалів та рішень. Зокрема, високу ефективність демонструє застосування сталевібробетону (SFRC) [7], реакційно-порошкового бетону (RPC), а також армування таких надбетонів інноваційною базальтопластиковою арматурою (BFRP) [8]. Використання сталевібробетонних нарощень дозволяє суттєво підвищити міцність та пластичність елементів завдяки здатності сталевібробетону стримувати мікротріщиноутворення. Такий підхід збільшує робочу висоту перерізу та плече внутрішньої пари сил [7]. Ефективною альтернативою масивному бетонуванню є застосування тонких шарів реакційно-порошкового бетону, який не зменшує корисний простір приміщень, володіє високою адгезією до існуючого залізобетону та здатний збільшити

навантаження утворення тріщин у кілька разів [8]. Поряд з цим, перспективним інноваційним рішенням є комплексна заміна традиційної сталеві арматури в армуванні на базальтопластикову (BFRP) [8].

Окремого розгляду потребують особливості роботи підсиленних перерізів під залишковим експлуатаційним навантаженням. Головною складністю реальної відбудови є те, що пошкоджені конструкції майже неможливо повністю розвантажити перед початком ремонтних робіт [2], [6]. Тому нові шари додаткового бетону або композитного армування доводиться приєднувати до елементів, які вже знаходяться у напружено-деформованому стані під дією залишкового експлуатаційного навантаження [6].

Для розуміння механіки цього процесу необхідно враховувати первинний напружено-деформований стан елемента до моменту виконання підсилення [6]. Для точного математичного моделювання несучої здатності такої конструкції та оцінки ступеня сумісності деформацій інженери використовують спеціальні експериментально підтверджені коефіцієнти умов роботи. Ці коефіцієнти обчислюються як відношення фактичних відносних деформацій елемента підсилення до його граничних деформацій (деформацій текучості). Формалізовано це виглядає так:

Для додаткової арматури підсилення:

$$\gamma_{s,dis}^{ad,exp} = \frac{\sigma_s^{ad}}{f_{y,ad}} = \frac{\varepsilon_s^{ad}}{\varepsilon_{s0}^{ad}}$$

Для додаткового бетону підсилення:

$$\gamma_{c,dis}^{ad,exp} = \frac{\varepsilon_{c(1)}^{ad}}{\varepsilon_{c1}^{ad}}$$

де ε_s^{ad} та $\varepsilon_{c(1)}^{ad}$ – відносні деформації розтягнутої арматури та стиснутого бетону додаткового перерізу відповідно; а ε_{s0}^{ad} та ε_{c1}^{ad} – їхні граничні деформації (при досягненні межі текучості) [6 с. 228]. Якщо ці коефіцієнти менші за одиницю, це вказує на те, що матеріали підсилення не використовуються на 100 % своєї потужності через наявність попереднього навантаження. Розуміння цих формул дозволяє інженерам забезпечити максимально ефективне використання матеріалів підсилення, а оновлена споруда відповідатиме критеріям безпеки.

Ефективність нарощування перерізу (надбетонки) критично залежить від здатності підсиленої конструкції працювати під навантаженням як єдиний монолітний елемент. При підсиленні на межі контакту старого бетону та нового матеріалу виникають складні дотичні напруження, зумовлені як впливом зовнішнього навантаження, так і внутрішніми силами від усадки свіжого бетону. За відсутності надійного зчеплення розвивається відносне проковзування шарів, що неминуче призводить до їх відшарування та зниження загальної жорсткості елемента. Для запобігання міжшаровому зсуву застосовують епоксидні смоли (хімічне зчеплення) або додаткове механічне анкерування шляхом встановлення хомутиків-нагелів [9].

Щоб уникнути такого дисбалансу, інженери повинні забезпечити сумісну роботу та кінематичну нерозривність деформацій на межі контакту основного і додаткового перерізів. Це означає, що підсилена багатоконпонентна конструкція має деформуватися як єдине монолітне ціле. На практиці такий стан досягається за рахунок надійного анкерування та зчеплення між існуючими та новими шарами за допомогою полімерних клеїв або відповідних конструктивних заходів (виконання насічок, зволоження тощо). Сам розрахунок таких елементів, згідно з сучасними деформаційними моделями, виконується у два етапи: спочатку оцінюється напружений стан початкового перерізу від існуючого навантаження, а потім моделюється робота всього комплексного перерізу від повного експлуатаційного навантаження [2], [6].

Для точного математичного моделювання несучої здатності та залишкового ресурсу такої конструкції в розрахунки вводяться спеціальні, експериментально підтверджені коефіцієнти умов роботи додаткової арматури та бетону. Вони прямо залежать від рівня попереднього напруження конструкції під час її підсилення. Використання цих коефіцієнтів дозволяє забезпечити максимально ефективне використання матеріалів підсилення, а оновлена споруда відповідатиме критеріям безвідмовної роботи [6].

Поряд із технічною надійністю, принципове значення має економічна ефективність підсилення порівняно з новим будівництвом. Успішне інженерне рішення має бути не лише технічно надійним, а й економічно обґрунтованим. З огляду на дефіцит державного бюджету України, який у 2024 році

перевищив 17,7 відсотка ВВП [1], та значні загальні потреби у відбудові, що за даними Світового банку оцінюються у понад 524 мільярди доларів США, пріоритет повинен надаватися будівельним технологіям, що дозволяють мінімізувати капітальні витрати [5], [3].

Для прямого техніко-економічного зіставлення стратегій ревіталізації існуючих конструкцій та їх повного знесення із новим будівництвом використовується математичне фінансове моделювання. Загальні витрати на ревіталізацію формалізуються як сума трьох ключових компонентів:

$$C_R = C_M + C_A + C_S$$

де C_M – витрати на модернізацію ядра будівлі (структурний ремонт), C_A – витрати на просторову адаптацію та розширення, C_S – модернізація інженерних систем [3].

Водночас вартість зведення об'єкта з нуля (нового будівництва) вимагає значно ширшого спектру інвестицій:

$$C_C = C_D + C_W + C_B$$

де C_D – витрати на знесення та демонтаж старої конструкції, C_W – вивезення та утилізація будівельного сміття, C_B – витрати безпосередньо на нове будівництво [3].

Різниця цих витрат формує пряму фінансову економію (Cost difference):

$$\Delta C = C_C - C_R$$

Однак сучасний європейський підхід вимагає врахування ще й екологічного фактору. Екологічна вигода від збереження об'єкта визначається як:

$$B_{Env} = E_S + W_R$$

де E_S – монетизована економія від уникнення викидів вуглецю (CO_2), а W_R – економія від зменшення обсягів будівельного сміття [3].

Ключовим показником інвестиційної привабливості проекту стає Коефіцієнт економії (Savings Ratio), який акумулює в собі як пряму фінансову економію, так і екологічні переваги:

$$Savings\ Ratio = \frac{\Delta C + B_{Env}}{C_R}$$

Фінансовий аналіз ревіталізації промислового комплексу Radex Park Marywilska підтверджує дієвість цієї моделі на практиці. Завдяки підсиленню залізобетонних конструкцій замість їх знесення вдалося досягти прямої економії капітальних витрат на рівні майже 57 відсотків. При цьому розрахований коефіцієнт економії (Savings Ratio) склав 1,93. Це означає, що кожна вкладена у підсилення грошова одиниця принесла 1,93 одиниці загальної вигоди. Екологічний фактор у цьому показнику склав: уникнення утворення понад 72 тисяч тонн будівельного сміття та попередження викидів понад 48 тисяч тонн вуглецю (CO_2) [3].

Ці результати узгоджуються з незалежним порівняльним аналізом життєвого циклу (LCA), який довів, що реновація існуючих будівель зменшує емісію парникових газів на 22–46 % порівняно з повною реконструкцією завдяки збереженню втіленого вуглецю наявних конструктивних елементів [10]. Зокрема, найбільший внесок у зниження екологічного навантаження забезпечує саме збереження несучого каркасу — фундаментів, колон та балок, — виробництво яких є найбільш енерго- та вуглецемістким етапом будівельного циклу. Таким чином, екологічна складова коефіцієнта економії отримує додаткове кількісне підтвердження на рівні повного життєвого циклу.

Водночас слід наголосити, що наведені кількісні показники (економія близько 57 % та коефіцієнт економії 1,93) отримані для комерційного об'єкта в умовах мирного часу, а тому потребують обережного перенесення на українські реалії. Разом з тим структура руйнувань в Україні робить такий підхід особливо доречним: за даними RDNA4, багатоквартирні будинки становлять близько 80 % усього пошкодженого та зруйнованого житла [5], тобто переважно це каркасні та панельні залізобетонні споруди — саме той тип конструкцій, для якого розглянуті методи нарощування перерізу є найбільш ефективними. До того ж переважна частина постраждалих об'єктів класифікується як пошкоджені, а не повністю зруйновані, що формує велику сукупність будівель, придатних саме до підсилення, а не до демонтажу [5]. Технічну здійсненність такого підходу підтверджують і вітчизняні дослідження з відновлення збірних залізобетонних елементів промислових будівель, пошкоджених обстрілами [11].

Таким чином, отримані для кейсу Radex Park Marywilska результати доцільно розглядати як орієнтири максимально можливої економії, фактичне значення якого для кожного українського об'єкта має уточнюватися за результатами технічного обстеження з урахуванням ступеня пошкоджень, а також безпекових і логістичних обмежень воєнного та повоєнного періоду.

Зведена порівняльна характеристика двох стратегій відбудови, що наочно демонструє переваги методу підсилення та нарощування перерізу, наведена у Таблиці 1.

Таблиця 1

Економічні та технічні показники стратегій відновлення

Параметр порівняння	Підсилення (FRP та нарощування бетоном)	Повний демонтаж та нове будівництво
Капітальні витрати	Економія майже 57 % (витрати складають менше половини від нового)	100 % бюджету (включає витрати на демонтаж, вивезення сміття та зведення)
Економічна рентабельність (Savings Ratio)	1,93 (кожна вкладена одиниця приносить 1,93 вигоди)	Значно нижча через значні початкові капіталовкладення
Екологічний слід та відходи	Низький (узгоджується з принципами циркулярної економіки, істотно знижує емісію CO ₂)	Високий (масштабна емісія вуглецю та генерація десятків тисяч тонн будівельного сміття)
Терміни реалізації	Стислі (часто без повної зупинки експлуатації об'єкта)	Тривалі (потребують повного демонтажу, нульового циклу та технологічної витримки)

Джерело: складено авторами на основі [3]

Отже, застосування інноваційних методів підсилення забезпечує необхідний рівень безпеки конструкцій і водночас є фінансово найдоцільнішим шляхом для післявоєнної відбудови.

Висновки. Для сучасної України, де дефіцит державного бюджету за підсумками 2024 року перевищив 17,7 відсотка ВВП, а загальні потреби на відбудову оцінюються у понад 524 мільярди доларів США, перехід до концепції адаптивного повторного використання (стратегія «Repair, not Replace») є не лише доцільним інженерним рішенням, а й вагомою макроекономічною перевагою в умовах дефіциту ресурсів.

Проведений у статті комплексний аналіз доводить, що підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій шляхом нарощування їхнього перерізу інноваційними композитними матеріалами є технічно ефективним та надійним рішенням. Використання сучасних деформаційних моделей розрахунку та експериментально підтверджених коефіцієнтів умов роботи дозволяє інженерам забезпечувати сумісність деформацій та необхідний залишковий ресурс оновлених споруд навіть за умови їх підсилення безпосередньо під дією експлуатаційного навантаження.

З фінансової точки зору, підсилення та ревіталізація існуючих будівель замість їх повного демонтажу та зведення нових об'єктів забезпечує суттєву економію. Як демонструють результати фінансового моделювання, застосування такого підходу дозволяє зекономити майже 57 відсотків капітальних витрат і досягти високої рентабельності інвестицій із коефіцієнтом економії (Savings Ratio) на рівні 1,93. Крім того, збереження наявного бетону та металу мінімізує утворення тисяч тонн будівельного сміття та істотно знижує викиди вуглецю, що узгоджується з європейськими принципами сталого розвитку та циркулярної економіки.

Доведено, що комбіноване влаштування надбетонів та нарощування перерізу інноваційними матеріалами (сталевібробетоном, реакційно-порошковим бетоном або базальтопластиковою арматурою BFRP) забезпечує високий приріст жорсткості та несучої здатності згинаних елементів. Критичним фактором їх успішного підсилення під залишковим навантаженням є забезпечення надійного зчеплення шарів за допомогою хімічних або механічних засобів, що повністю усуває ефекти проковзування та деформаційного відставання.

Отже, інтеграція передових методів композитного підсилення з макроекономічним плануванням є одним із найбільш раціональних та економічно обґрунтованих напрямів післявоєнної відбудови, що дозволяє відновити інфраструктуру швидше, значно дешевше та з дотриманням найвищих технічних і екологічних стандартів.

Література

1. Гончаренко І. Г. Відновлення післявоєнної економіки: джерела фінансування, роль міжнародних інституцій, інвестиційний клімат. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Економічна»*. 2025. Вип. 109. С. 116–131. DOI: 10.26565/2311-2379-2025-109-11 (дата звернення: 11.04.2026).

2. Gomon S., Romanyuk V., Ziatyuk Y., Marchuk V., Nalepa O. Effective methods to strengthen the

bending reinforced concrete elements. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*. 2022. Vol. 21, No. 1. P. 51–56. DOI: 10.22630/ASPA.2022.21.1.6 (дата звернення: 11.04.2026).

3. Sobieraj J., Fernandez M., Metelski D. The Economics of Adaptive Reuse — Comparative Cost Analysis of Revitalization vs. Demolition and Reconstruction at Radex Park Marywilka. *Buildings*. 2025. Vol. 15. Article 2828. DOI: 10.3390/buildings15162828 (дата звернення: 11.04.2026).

4. Bohne R. A., Wærner E. R., Klungseth N. J. Build Back Better for war-torn Ukraine: dual strategies for integrating circularity in post-disaster recovery. *Proceedings of the Design Society*. 2025. Vol. 5. DOI: 10.1017/pds.2025.10096 (дата звернення: 11.04.2026).

5. World Bank Group. Ukraine — Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022 — December 2024. Washington, D.C., 2025. URL: <https://www.worldbank.org/en/country/ukraine> (дата звернення: 11.04.2026).

6. Хміль Р. Є. Напружено-деформований стан та залишковий ресурс залізобетонних конструкцій, підсилених за дії навантаження : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2021. 380 с.

7. Ziara M. M. Behavior of Beams Strengthened with Steel Fiber RC Overlays. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2009. Vol. 7, No. 1. P. 111–121.

8. Liao W., Yang W., Yang J. Study on the Mechanical Performance of RC Beams under Load Reinforced by a Thin Layer of Reactive Powder Concrete on Four Sides. *Buildings*. 2024. Vol. 14. Article 1451. DOI: 10.3390/buildings14051451 (дата звернення: 11.04.2026).

9. Fouda M. A., Elkateb M., Elkateb T., Khalil A. Experimental Investigation of RC Footings Resting on Sand Strengthened with Concrete Jacketing. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2020. Vol. 5, No. 6. P. 133–142. DOI: 10.25046/aj050615 (дата звернення: 27.05.2026).

10. Lim H. Comparative Life Cycle Assessment of Reconstruction and Renovation for Carbon Reduction in Buildings. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 18. Article 3388. DOI: 10.3390/buildings15183388 (дата звернення: 11.04.2026).

11. Журавський О. Д., Журавський Д. О., Поважнюк О. Особливості відновлення збірних залізобетонних ребристих плит покриттів промислових будівель, зруйнованих обстрілами. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2024. № 15. С. 185–195. DOI: 10.32347/2522-4182.15.2024.185-195 (дата звернення: 12.04.2026).

References

1. Honcharenko I. H. (2025) Vidnovlennia pisliavoiennoi ekonomiky: dzherela finansuvannia, rol mizhnarodnykh instytutstii, investytsiinyi klimat [Restoration of the post-war economy: sources of financing, the role of international institutions, investment climate]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Serii «Ekonomichna»*, issue 109, pp. 116–131. DOI: 10.26565/2311-2379-2025-109-11 (accessed 11 April 2026).

2. Gomon S., Romanyuk V., Ziatyuk Y., Marchuk V., Nalepa O. (2022) Effective methods to strengthen the bending reinforced concrete elements. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, vol. 21, no. 1, pp. 51–56. DOI: 10.22630/ASPA.2022.21.1.6 (accessed 11 April 2026).

3. Sobieraj J., Fernandez M., Metelski D. (2025) The Economics of Adaptive Reuse — Comparative Cost Analysis of Revitalization vs. Demolition and Reconstruction at Radex Park Marywilka. *Buildings*, vol. 15, article 2828. DOI: 10.3390/buildings15162828 (accessed 11 April 2026).

4. Bohne R. A., Wærner E. R., Klungseth N. J. (2025) Build Back Better for war-torn Ukraine: dual strategies for integrating circularity in post-disaster recovery. *Proceedings of the Design Society*, vol. 5. DOI: 10.1017/pds.2025.10096 (accessed 11 April 2026).

5. World Bank Group (2025) Ukraine — Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022 — December 2024. Washington, D.C. Available at: <https://www.worldbank.org/en/country/ukraine> (accessed 11 April 2026).

6. Khmil R. Ye. (2021) Napruzhenno-deformovanyi stan ta zalyshkovyi resurs zalizobetonnykh konstruktstii, pidsylenykh za dii navantazhennia [Stress-strain state and residual resource of reinforced concrete structures strengthened under load action]. Doctoral dissertation. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 380 p.

7. Ziara M. M. (2009) Behavior of Beams Strengthened with Steel Fiber RC Overlays. *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 111–121.

8. Liao W., Yang W., Yang J. (2024) Study on the Mechanical Performance of RC Beams under Load Reinforced by a Thin Layer of Reactive Powder Concrete on Four Sides. *Buildings*, vol. 14, article 1451. DOI: 10.3390/buildings14051451 (accessed 11 April 2026).

9. Fouda M. A., Elkateb M., Elkateb T., Khalil A. (2020) Experimental Investigation of RC Footings

Resting on Sand Strengthened with Concrete Jacketing. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 133–142. DOI: 10.25046/aj050615 (accessed 27 May 2026).

10. Lim H. (2025) Comparative Life Cycle Assessment of Reconstruction and Renovation for Carbon Reduction in Buildings. *Buildings*, vol. 15, no. 18, article 3388. DOI: 10.3390/buildings15183388 (accessed 11 April 2026).

11. Zhuravskiy O. D., Zhuravskiy D. O., Povazhniuk O. (2024) Osoblyvosti vidnovlennia zbirnykh zalizobetonnykh rebrystykhyk plyt pokryttiv promyslovykh budivel, zruinovanykh obstrilamy [Features of restoration of precast reinforced concrete ribbed slabs of coverings of industrial buildings destroyed by bombardment]. *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, no. 15, pp. 185–195. DOI: 10.32347/2522-4182.15.2024.185-195 (accessed 12 April 2026).

Отримано: 13.04.2026

Прийнято до публікації: 14.05.2026

Опубліковано: 15.05.2026