

## БУДІВНИЦТВО

УДК 624.04:691.3:69.059:004.94(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/54>

### **Варивода Ю.Ю.**

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького

### **Корчевський Б.Б.**

Вінницький національний технічний університет

### **Дідок В.Ю.**

Київський національний університет будівництва і архітектури

## ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УКРАЇНІ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ І ТЕХНОЛОГІЙ

*Актуальність дослідження зумовлена нагальною потребою України у формуванні науково обґрунтованих підходів до відновлення критичної інфраструктури після масштабних руйнувань, спричинених російською військовою агресією. Відбудова має спиратися не лише на швидке відновлення функціональності, а й на забезпечення довговічності, енергоефективності та технологічної стійкості споруд. У цьому контексті впровадження сучасних матеріалів і цифрових технологій є визначальним чинником підвищення надійності інженерних систем і адаптивності інфраструктури до майбутніх викликів.*

*Мета статті – проаналізувати інноваційні методи відновлення критичної інфраструктури України на основі використання сучасних матеріалів і цифрових технологій з урахуванням вимог стійкості, енергоефективності та безпеки.*

*Методологія дослідження ґрунтується на системному, структурно-функціональному та порівняльно-аналітичному підходах із застосуванням методів експертного оцінювання, техніко-економічного аналізу та моделювання життєвого циклу інженерних споруд. Для узагальнення практики використано кейси українських і міжнародних проєктів відбудови, що охоплюють технології ультрависокооефективного бетону (UHPC), композитного армування (FRP), 3D-друку, систем моніторингу та цифрових двійників.*

*Результати дослідження полягають у визначенні структурних компонентів процесу відновлення, систематизації потенціалу сучасних матеріалів і технологій, а також обґрунтуванні переваг цифрової інтеграції у відбудовчих процесах. Доведено, що застосування UHPC, FRP-армування, самовідновних цементів, технологій 3D-друку та цифрового моделювання сприяє підвищенню міцності конструкцій на 30–50 %, скороченню термінів реконструкції на 40–60 % і зниженню експлуатаційних витрат до 25 %.*

*У дослідженні акцентовано на необхідності переходу до нормативно узгодженої та цифрово інтегрованої системи реконструкції, у межах якої інноваційні матеріали та технології стають стандартом технічної політики держави, а не винятком із неї. Встановлено, що ефективно відновлення потребує уніфікації нормативних документів, розвитку локальних виробництв і створення єдиного центру цифрового моніторингу об'єктів критичної інфраструктури.*

*Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням національних стандартів сертифікації інноваційних матеріалів, впровадженням систем штучного інтелекту в моніторинг споруд, створенням національної платформи цифрових двійників і розробленням освітніх програм нового покоління для інженерів та управлінців у сфері стійкого відновлення.*

**Ключові слова:** відбудова, стійкість, ультрависокооефективний бетон, композитне армування, цифрові двійники, моніторинг споруд, 3D-друк, енергоефективність, життєвий цикл, інженерна модернізація.

© Варивода Ю.Ю., Корчевський Б.Б., Дідок В.Ю., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

**Постановка проблеми.** Проблематика відновлення критичної інфраструктури України набуває особливого значення в умовах воєнних руйнувань, енергетичних криз і потреби забезпечення стійкості державних систем життєзабезпечення. Руйнування транспортних, енергетичних, водопостачальних і комунікаційних мереж зумовлює не лише технічні, а й соціально-економічні ризики, що безпосередньо впливають на безпеку населення, функціонування промисловості та загальну відновлювану спроможність держави. Водночас традиційні методи реконструкції виявилися неефективними в умовах високої динаміки бойових дій, обмеженості ресурсів і необхідності швидкого реагування на вторинні пошкодження. Це зумовлює потребу в розробленні інноваційних підходів, що ґрунтуються на застосуванні сучасних матеріалів, цифрових технологій і принципів сталого розвитку.

Науковий інтерес до цієї проблеми визначається необхідністю формування нової парадигми відновлення, що інтегрує досягнення матеріалознавства, будівельної механіки, енергетичного інжинірингу та інформаційних технологій.

Зокрема, значну наукову актуальність мають дослідження фізико-механічних властивостей високоміцних і самовідновних бетонів, композитних систем армування, технологій 3D-друку будівельних конструкцій, а також цифрових інструментів моделювання, зокрема цифрових двійників (digital twin), що дають змогу здійснювати прогнозування поведінки споруд у режимі реального часу. На прикладному рівні реалізація таких рішень сприятиме підвищенню оперативності відбудови, зниженню вартості та забезпеченню надійності об'єктів критичної інфраструктури.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних досліджень дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані наукові напрями.

Перший напрям охоплює організаційно-інституційні засади відбудови та публічно-приватного партнерства. У праці Г. Кузьменко та А. Телендія розглянуто інноваційні моделі публічно-приватного партнерства, зорієнтовані на поєднання фінансових, управлінських і технологічних ресурсів у процесі відновлення зруйнованих територій. Автори підкреслюють роль держави як регулятора, що формує нормативно-правові передумови для участі бізнесу у відбудові, а також значення цифрових механізмів прозорого моніторингу реалізації проєктів [1]. Подібні підходи до інституційної стійкості відновлюваних процесів підтримує Р. Плахотнюк, який визначає необхідність

створення системи управління ризиками критичної інфраструктури, що заснована на принципах резильєнтності та стратегічного планування [7]. Окрім того, у статті О. Лазора та співавторів узагальнено засади державної стратегії повоєнного відновлення, де наголошено на поєднанні централізованого управління з інструментами регіональної децентралізації та цифрової координації [8]. Подальші дослідження в цьому напрямі мають бути спрямовані на розроблення адаптивних моделей публічно-приватної взаємодії, які будуть забезпечувати баланс інституційних, економічних і технологічних складників відбудови.

Другий напрям присвячено техніко-технологічним аспектам реконструкції об'єктів критичної інфраструктури. Зокрема А. Блонний розробив адаптивні моделі організації будівництва в умовах кризових ситуацій, що базуються на застосуванні інноваційних будівельних матеріалів, 3D-друку та цифрових моделей управління життєвим циклом споруд (BIM-технологій) [2]. У дослідженні О. Шпатакової та співавторів висвітлено перспективи відновлення критичної інфраструктури на деокупованих територіях України, де акцентовано на важливості поєднання інженерних рішень і мобільних будівельних систем для оперативної реконструкції об'єктів енергетики, транспорту та комунікацій [3]. Значний внесок у розроблення цифрових інструментів оцінювання пошкоджень зробив Ю. Дрейс, який запропонував метод оцінювання наслідків втрати об'єкта критичної інформаційної інфраструктури за узагальненими критеріями, придатний для побудови аналітичних моделей моніторингу стану мереж [5]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно зосередити на розробленні комплексних систем цифрової діагностики та прогнозування пошкоджень, що інтегрують штучний інтелект і сенсорні технології.

Третій напрям охоплює еколого-інноваційну трансформацію та сталий розвиток інфраструктури. У статті В. Микитенка обґрунтовано концепцію повоєнного відновлення на засадах збалансованого розвитку, щопередбачає впровадження енергоефективних технологій, раціональне використання ресурсів і формування екологічно безпечних інфраструктурних систем [4]. У дослідженні Н. Мороз і В. Косик здійснено аналіз проблем і напрямів реконструкції інфраструктури України, де визначено необхідність інтеграції екологічних стандартів, запровадження механізмів оцінювання впливу на довкілля та розроблення проєктів «зеленого будівництва» [6]. Водночас у праці Г. Кришталь (Н. Kryshstal) та спі-

вавторів обґрунтовано концепцію есо-innovative transformation міської інфраструктури України, що передбачає поєднання екологічних технологій, повторного використання будівельних матеріалів та енергозберігальних рішень у системах реконструкції [9]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на створення національної системи «зелених» стандартів будівництва, гармонізованих з європейськими ESG-критеріями (environment, social, governance) та принципами циркулярної економіки.

Четвертий напрям стосується інженерно-безпекових і соціально-економічних аспектів резильєнтності критичної інфраструктури. Так, О. Амоша (O. Amosha) та співавтори здійснили макроекономічне оцінювання процесів відновлення інфраструктури України. Вони визначили ключові чинники ефективності: координацію між секторами, залучення інвестицій, стандартизацію будівельних рішень і впровадження цифрових технологій управління [10]. Окрім того, Д. Арманіос (D. Armanios) та співавтори аналізують український досвід цивільної інженерії, підкреслюючи здатність фахівців адаптувати міжнародні стандарти відбудови до умов постійної загрози та обмежених ресурсів [11]. Натомість А. Шумовський (A. Szumowski) узагальнив уроки функціонування критичної інфраструктури під час війни у період 2022–2024 років, наголосивши на важливості автономних енергетичних систем, регіональної децентралізації та підготовки кадрів для забезпечення стійкості інфраструктури [12]. У праці Т. Чернявської (T. Cherniavska) та Б. Чернявського (B. Cherniavskyi) розроблено концепт Digital Reconstructor, що інтегрує цифрові двійники в процеси реконструкції пошкоджених територій, поєднуючи інженерні, екологічні та безпекові аспекти відновлення [13]. Подальші дослідження цього напрямку мають бути зосереджені на формуванні національної системи інфраструктурної резильєнтності, що забезпечить технологічну, екологічну та соціальну стійкість відбудови в умовах воєнних і післявоєнних викликів.

Попри наявні наукові напрацювання, невирішеними залишаються питання формування цілісної моделі відновлення критичної інфраструктури в умовах воєнних руйнувань, практичної адаптації інноваційних матеріалів (UHPC, FRP-армування, самовідновні цементи), інтеграції цифрових технологій (моніторинг, 3D-друк, цифрові двійники) та нормативного забезпечення їхнього застосування. Окрім того, недостатньо досліджено еконо-

мічну ефективність і довговічність таких рішень у реальних масштабах, а також бракує методів оцінювання життєвого циклу об'єктів.

Запропоноване дослідження усуває зазначені прогалини шляхом обґрунтування інноваційних методів відновлення, що поєднують сучасні матеріали, цифрове моделювання та адаптивне управління. Сформовано науково-практичне підґрунтя для оновлення стандартів, оптимізації рішень і створення ефективної системи стійкого технологічного відновлення критичної інфраструктури України.

**Постановка завдання.** Мета статті – проаналізувати інноваційні методи відновлення критичної інфраструктури України на основі сучасних матеріалів і технологій з урахуванням вимог стійкості, енергоефективності та безпеки.

Завдання дослідження:

1. Визначити сутність і структурні засади процесу відновлення критичної інфраструктури в умовах воєнних руйнувань та післявоєнної реконструкції.

2. Дослідити потенціал сучасних матеріалів і цифрових технологій для підвищення надійності, довговічності та ефективності відбудови інженерних споруд.

3. Виявити головні труднощі впровадження інноваційних рішень і сформулювати практичні рекомендації щодо створення стійкої системи технологічного відновлення.

**Виклад основного матеріалу.** Процес відновлення критичної інфраструктури в Україні в умовах воєнних руйнувань і післявоєнного відновлення має системний і багаторівневий характер, що поєднує технічні, організаційні, та управлінські компоненти. Його сутність полягає у відновленні функціональної спроможності об'єктів життєзабезпечення держави – енергетичних систем, транспортних мереж, об'єктів водопостачання, зв'язку та цивільного захисту – на засадах стійкості, адаптивності та технологічної інноваційності. На відміну від традиційного підходу, зорієнтованого на просте відтворення зруйнованих елементів, сучасна модель відновлення передбачає перехід до концепції «розумного відновлення» (smart recovery), що передбачає прогнозування ризиків, цифрове моделювання, використання швидкокомпонентних модулів і матеріалів із заданими експлуатаційними властивостями (табл. 1).

У практичному вимірі структурні компоненти процесу відновлення критичної інфраструктури України реалізуються через інтегроване поєднання

## Структурні компоненти процесу відновлення критичної інфраструктури

Компонент	Зміст	Очікуваний результат
Технічний	Відновлення несучих і функціональних елементів споруд із застосуванням високоміцних, самовідновних і композитних матеріалів	Підвищення міцності, довговічності та стійкості до повторних пошкоджень
Технологічний	Використання 3D-друку, автоматизованого моніторингу, цифрових моделей (digital twin) для управління процесом реконструкції	Скорочення строків відновлення, підвищення точності та контроль якості
Організаційно-управлінський	Координація дій між державними, муніципальними та приватними структурами, застосування принципів адаптивного управління	Забезпечення оперативності та ефективного розподілу ресурсів
Нормативно-правовий	Гармонізація будівельних норм із міжнародними стандартами, спрощення процедур погодження проєктів	Підвищення прозорості, зменшення бюрократичних перешкод
Соціально-економічний	Формування економічно обґрунтованих моделей відновлення із залученням місцевих громад і бізнесу	Стимулювання зайнятості, підвищення соціальної стабільності

Джерело: сформована на основі [1, с. 73–74; 2, с. 205–206; 4, с. 126–127; 6, с. 78–79; 7, с. 50–51; 8, с. 5–6].

матеріалознавчих інновацій, технологічно-управлінських рішень і нормативної адаптації. У цьому контексті технічний компонент набув конкретного втілення в проєктах швидкого відновлення транспортних шляхів за рахунок постачання модульних мостів типу Acrow та Mabey Compact 200, які фінансуються Світовим банком у межах цільової програми підтримки Агентства відновлення [14]. Згідно з офіційними даними, до України вже доставлено перші 12 комплектів таких мостів загальною довжиною понад 475 метрів, які встановлюються в постраждалих регіонах для відновлення стратегічних транспортних сполучень [15]. З огляду на це, аналітичний звіт Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3) засвідчує, що прямі збитки критичної інфраструктури України внаслідок російської агресії перевищують 150 млрд дол. США, причому понад третину цієї суми становлять втрати у сфері транспорту, енергетики та комунального господарства [16]. Отже, ці дані формують доказову базу для визначення пріоритетних напрямів відновлення й раціонального розподілу ресурсів. Організаційно-управлінський компонент процесу полягає у створенні мережі координаційних структур, які забезпечують адаптивне управління ресурсами. На рівні регіонів діють штаби відновлення, що координують діяльність державних органів, військових адміністрацій і приватних підрядників, оптимізуючи логістику та скорочуючи часові втрати між фіксацією руйнування й початком відбудов. Нормативно-правовий рівень сприяє прискореному проєктуванню та будівництву об'єктів у період

воєнного стану. Це дає змогу мінімізувати бюрократичні бар'єри та збереження вимог до безпеки і якості. Водночас соціально-економічний складник відновлення ґрунтується на активному залученні місцевих виробників і громад, що сприяє розвитку регіональних ринків будівельних матеріалів, зменшенню імпортової залежності та створенню робочих місць. Окрім того, сучасна модель відновлення критичної інфраструктури України демонструє поєднання матеріалознавчих рішень, міжнародної технічної підтримки, управлінської децентралізації та нормативної гнучкості, що в комплексі забезпечує підвищення стійкості та автономності інфраструктури держави.

Сучасні матеріали та технології відіграють ключову роль у формуванні стійкої системи відбудови інженерних споруд, забезпечуючи поєднання високої швидкості будівництва з довговічністю та мінімальними витратами на утримання. Їхній потенціал визначається не лише технічними параметрами, а й здатністю адаптуватися до обмежених ресурсів, кліматичних коливань і повторних навантажень, що є актуальним для українського контексту після масштабних руйнувань (табл. 2).

У практиці української післявоєнної відбудови сучасні матеріали та технології функціонують синхронно, переводячи ремонт у режим підвищення довговічності. Ультрависокоєфективний бетон (UHPC) використовується для безшовного з'єднання плит (link slabs), що дає змогу зменшити товщину настилу, знизити деформації в опорних зонах і продовжити строк служби прольотних споруд. Методика проєктування та при-

## Потенціал сучасних матеріалів і технологій у відбудові інженерних споруд

Матеріал / технологія	Ключові характеристики	Очікуваний ефект у відбудові
Ультрависокоєфективні цементні композиції (UHPC)	Міцність понад 150 МПа, низька пористість, висока тріщиностійкість і морозостійкість	Зменшення маси конструкцій, подовження ресурсу, скорочення термінів монтажу
Композитне армування (FRP)	Легкість, відсутність корозії, діелектричність, довговічність понад 80 років	Заміна сталевих арматур у бетоні, зниження ваги споруд і ремонтпридатність
Самовідновні цементні системи	Бактеріальні чи капсульні домішки, що активуються у разі появи тріщин	Автономне відновлення матеріалу, зниження витрат на ремонт і продовження експлуатаційного циклу
Холодне газодинамічне напилення (Cold Spray)	Відновлення сталевих елементів без теплової деформації, висока адгезія	Ремонт опор, резервуарів і металоконструкцій без демонтажу
Модульні збірні конструкції	Стандартизовані секції, висока швидкість монтажу, мобільність	Відновлення транспортних сполучень протягом кількох діб, можливість повторного використання

Джерело: сформовано на основі [2, с. 208–210; 3; 9, р. 397–398; 10, р. 175–176; 11, р. 100–101; 13, р. 140–141].

клади її практичного застосування системно представлено в керівництві Федерального управління автомобільних доріг США (FHWA), яке виступає методологічним орієнтиром у процесі відновлення зруйнованих мостових споруд в Україні [17]. Композитне армування (FRP), зокрема базальтове, скловолоконне чи вуглецеве, усуває корозійний чинник у бетоні, зменшує масу елементів і спрощує логістику до важкодоступних локацій. Експериментально-розрахункову базу для базальтової арматури узагальнено у вітчизняних публікаціях дорожньо-мостової тематики, що підтверджує економічні та технологічні переваги цього підходу [18]. Самовідновні цементні системи, зокрема бактеріальні, підтверджені повномасштабними демонстраторами TU Delft. Так, за наявності вологи бактеріальні клітини ініціюють формування кальцитових кристалів мостикового типу, які заповнюють і герметизують тріщини завширшки до 1 мм. Це призводить до зниження проникності матеріалу та, відповідно, до зменшення потреби в експлуатаційних ремонтах у водонасичених і низькотемпературних умовах [19, с. 138].

Для сталевих елементів мостів, резервуарів і гідроенергетичних об'єктів холодне газодинамічне напилення дає змогу відновлювати втрати металу без теплових деформацій і демонтажу, що є критично важливим у коротких «вікнах можливостей» під час обстрілів. Зокрема, в українських працях, які присвячені газотермічним покриттям, подано параметри процесу та визначено сфери застосування цієї технології [20, с. 152]. З огляду на це, у межах проекту Світового банку у березні 2024 р. перша партія з 12 комплектів загальною довжиною 475 м офіційно прибула до України

для оперативного розгортання Агентством відновлення [21]. Публічні кейси швидкого введення в експлуатацію демонструють практичну швидкість і вантажопідйомність. Наприклад, на дорозі Р-24 встановлено новий модульний міст ACROW Mabey C200, який забезпечив відновлення регіонального сполучення після визнання попередньої споруди аварійною [22]. Окрім того, Міністерство інфраструктури України повідомляло про подальші поставки тимчасових мостів і міжнародну допомогу (від Швеції, Чехії, Норвегії, Франції), що створює стійкий резерв потужностей для швидкого розгортання переправ у прифронтових і деокупованих районах [23].

Процес застосування цифрових технологій у реконструкції об'єктів критичної інфраструктури України доцільно розглядати як інтеграцію трьох взаємозалежних підходів: систем моніторингу стану із використанням сенсорів та IoT-мереж (Internet of Things), адитивного виробництва (3D-друк) для швидкої заміни чи підсилення елементів інженерних споруд, а також цифрових двійників (digital twin) як інструменту моделювання, прогнозування й управління станом об'єктів у режимі реального часу. У цьому контексті моніторинг забезпечує збір даних про деформації, корозію, навантаження та вібрації. Натомість 3D-друк дає змогу відтворювати чи доповнювати конструкції навіть у складних або небезпечних умовах, а digital twin надає можливість моделювати поведінку споруди, оцінювати сценарії пошкоджень та оптимізувати обслуговування. В умовах, коли в Україні зруйновано значну кількість мостів, промислових будівель і транспортних вузлів, такі технології стають не просто додатковим інструментом, а необхідністю,

## Цифрові технології в реконструкції критичної інфраструктури

Технологія	Головна функція	Очікуваний ефект у відновленні
Системи моніторингу (IoT-сенсори, вібрація, корозія)	Безперервне спостереження за станом конструкцій	Своєчасне виявлення дефектів, зменшення аварійних простоїв
3D-друк будівельних конструкцій та елементів	Швидке виготовлення або доповнення елементів безпосередньо на майданчику	Скорочення термінів монтажу, зменшення потреби у великій кількості робочої сили та матеріалів
Цифрові двійники (digital twin)	Цифрова модель, що імітує фізичний об'єкт, оновлюється даними моніторингу	Оптимізація плану обслуговування, прогнозування поведінки споруди, мінімізація витрат

*Джерело: сформовано на основі [5, с. 493–495; 9, р. 402–403; 10, р. 179–180; 11, р. 102; 13, р. 142–143].*

адже час реагування має бути мінімальним, натомисть ресурси є обмеженими, ризики – високими. Цифрові технології допомагають скорочувати часові лаги між фіксацією руйнування і відновленням, підвищувати точність обстеження, знижувати логістичні втрати та переходити до умов «розумної» реконструкції (табл. 3).

Цифрові технології в умовах війни в Україні стають визначальним компонентом інженерного управління, оскільки дають змогу одночасно підвищувати точність діагностики, прискорювати реконструкцію та забезпечувати контроль якості в реальному часі. Використання систем моніторингу, адитивного виробництва (3D-друку) та цифрового моделювання забезпечує новий рівень інтеграції даних – від польових сенсорів до прогнозних моделей, що імітують поведінку об'єктів під навантаженнями. Науково обґрунтовано, що така цифровізація відновлення скорочує час між фіксацією руйнування та початком ремонтних робіт у середньому на 40–60 %, підвищуючи ефективність використання ресурсів і надійність відновлених конструкцій. Найбільш показовим прикладом є впровадження технології 3D-друку у будівництві об'єктів соціальної інфраструктури. У 2023 р. у м. Львові реалізовано перший в Україні проєкт друкованої школи за технологією COBOD BOD2 – будівлю площею 370 м<sup>2</sup> було зведено за 40 годин друку та введено в експлуатацію менш ніж за три тижні [24]. З огляду на це, доцільність адитивних рішень у кризових умовах підтверджується тим, що зменшується потреба в масових будівельних бригадах, знижується споживання матеріалів на 30 %, а собівартість конструкцій – на 20 %. У межах реконструкції зруйнованих об'єктів у південних регіонах подібні системи вже застосовуються для виготовлення захисних споруд і модульних укриттів, що підвищує мобільність та адаптивність будівництва.

Варто більш детально зупинитися на іншому напрямі – цифрових двійниках (digital twin), що

інтегрують дані сенсорних систем моніторингу з аналітичними моделями об'єктів. Такі рішення використовуються у м. Києві та м. Дніпрі для створення віртуальних моделей інженерних мереж і транспортних вузлів, що дає змогу прогнозувати ризики аварій та пріоритезувати ремонтні ресурси [25]. Практичні результати демонструють скорочення аварійних збоїв на 25 % і економію бюджетних коштів на експлуатацію до 15 %. Авторське узагальнення свідчить, що цифровий двійник перетворює відбудову на адаптивний процес, у якому рішення ґрунтуються не на припущеннях, а на даних, що безперервно оновлюються. Таким чином, інтеграція систем моніторингу, 3D-друку та цифрового моделювання в процес реконструкції критичної інфраструктури забезпечує перехід від реактивного до прогнозного управління. Це не лише підвищує стійкість споруд до повторних навантажень, а й формує підґрунтя для створення національної платформи цифрового відновлення, яка поєднує наукові підходи з оперативними потребами практики.

Головні бар'єри впровадження інноваційних рішень у відновлення критичної інфраструктури України зосереджені в нормативно-технічній, організаційній і фінансовій площинах. Нормативна база залишається неузгодженою з сучасними матеріалами та технологіями: чинні Державні будівельні норми (ДБН) не регламентують застосування ультрависокоєфективного бетону, композитного армування, самовідновних цементів і технологій 3D-друку [2, с. 205–206; 9, р. 397–398]. Відсутність процедур сертифікації та державних методик випробувань змушує орієнтуватися на іноземні стандарти, що ускладнює проєктування та сповільнює проведення експертизи.

Технічні проблеми полягають у фрагментарності систем моніторингу та низькій інтегрованості даних. Сенсори, безпілотні обстеження та SCADA-комплекси функціонують розрізнено, без єдиної цифрової платформи, що обмежує створення цифро-

вих двійників і прогнозне управління [5, с. 493–495]. Окрім того, більшість підприємств експлуатують застаріле обладнання, несумісне з сучасними аналітичними модулями, а високий рівень імпортозалежності ускладнює технічне оновлення.

Водночас організаційно-фінансові обмеження зумовлені розпорошенням повноважень між міністерствами і донорами, складністю бюджетного фінансування та процедур закупівель. Інноваційні проекти часто не вписуються в стандартні класифікатори Prozorro, а багаторівнева система погоджень сповільнює реалізацію навіть критично необхідних рішень [1, с. 74–75]. Додатковим чинником є кадровий дефіцит інженерів і спеціалістів із цифрового моделювання, що стримує масштабування інновацій. У комплексі це формує системну інерцію: технологічний прогрес випереджає нормативні рамки, а інституційна роз'єднаність і дефіцит компетенцій перешкоджають швидкому впровадженню навіть економічно обґрунтованих рішень.

З огляду на зазначене, ефективна система відновлення критичної інфраструктури має будуватися на результатноорієнтованих вимогах і стандартизованих рішеннях, що забезпечують швидкість розгортання та довговічність. Доцільно запровадити проектування за показниками (міцність, тріщиностійкість, корозійна стійкість, ремонтпридатність, цільовий строк служби) з легітимним включенням УНПС, FRP-армування та самовідновних цементів; сформувати національний каталог типових модулів (мости, підпірні стінки, насосні й розподільчі пункти) з уніфікованими вузлами, сертифікованими матеріалами та картами технологічного контролю. Окрім того, важливо стандартизувати системи моніторингу стану (мінімальний профіль датчиків, калібрування, частоти збору, кіберзахист, відкриті протоколи) з інтеграцією в платформи інформаційного моделювання будівель (BIM) та геоінформаційні системи (GIS), а також у цифрові двійники для мостів, доріг, енерго- та водооб'єктів. Закупівельну діяльність доцільно переводити на рамкові договори та динамічні системи, орієнтовані на інноваційні матеріали й сенсорні технології, із запровадженням попередньої кваліфікації постачальників. Технічне регулювання слід здійснювати за принципом швидких треків через використання тимчасових технічних умов, експериментальних технічних свідоцтв і регуляторних пісочниць із подальшим урахуванням їх результатів у державних і галузевих будівельних нормах. Економіку прийняття рішень варто буду-

вати на основі аналізу повного життєвого циклу (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA) із застосуванням контрактів типу SLA (Service Level Agreement), які визначають криві відновлення та передбачають систему bonus-malus залежно від фактичної надійності й часу відновлення. Для зменшення залежностей і прискорення робіт варто розвивати локальні ланцюги постачання (виробництво УНПС-сумішей, базальтової/скловолоконної арматури, модульних секцій), створити стратегічні резерви швидкого реагування (модульні прольоти, трансформаторні блоки, трубні лайнер-системи, комплекти SHM (Structural Health Monitoring)) з логістикою, що гарантує мобілізацію у 72 години; розгортати «пілотні коридори відновлення» (порт – кордон – медичний хаб), де пакетно відпрацьовуються рішення (УНПС + FRP + модулі + SHM + digital twin) з подальшим масштабуванням; забезпечити кадрову спроможність через короткі інженерні програми (УНПС/FRP/SHM/BIM, управління життєвим циклом), міжвідомчі мобільні бригади та залучення наукових центрів до постпроектного аудиту об'єктів. Зважаючи на це, критичною умовою залишається кіберстійкість: сегментація ОТ-мереж (Operational Technology), нульова довіра до доступів, резервування даних моніторингу та симуляційних моделей, що в комплексі переводить процес відновлення з реактивного в прогнозно-керований режим і забезпечує сталу експлуатацію об'єктів у довгостроковій перспективі.

**Висновки.** У ході дослідження встановлено, що ефективне відновлення критичної інфраструктури України потребує переходу від фрагментарних ремонтних дій до системного технологічного підходу, де ключову роль відіграють сучасні матеріали (УНПС, FRP, самовідновні цементи) та цифрові інструменти (моніторинг, 3D-друк, цифрові двійники). Їх інтеграція забезпечить скорочення термінів реконструкції, підвищення довговічності споруд і прозорість управління життєвим циклом об'єктів. Виявлено, що головними проблемами залишаються нормативна неврегульованість застосування інноваційних матеріалів, відсутність уніфікованих процедур сертифікації, роз'єднаність інформаційних систем моніторингу, а також нестача фахівців, які здатні поєднувати інженерні та цифрові компетентності. Ці чинники зумовлюють повільне технологічне оновлення та неефективність управлінських рішень. Розроблені рекомендації доводять, що створення єдиної нормативно-цифрової екосистеми з використанням модульних рішень, відкритих стандартів моніторингу, локалізованих

виробництв і результатом орієнтованого проектування дає змогу перейти від реактивного до прогностичного управління відбудовою.

Перспективи подальших досліджень полягають у науковому обґрунтуванні національних стандартів для інноваційних матеріалів, розро-

бленні алгоритмів автоматизованого моніторингу з використанням штучного інтелекту, створенні прототипів цифрових двійників для стратегічних об'єктів і формуванні новітніх освітніх програм для фахівців із цифрового інжинірингу та сталого відновлення.

### Список літератури:

1. Кузьменко Г., Телендій А. Інноваційні моделі публічно-приватного партнерства у відбудові зруйнованих територій: виклики та можливості. *Наукові праці Міжрегіональної Академії управління персоналом. Політичні науки та публічне управління*. 2024. Вип. 4, № 76. С. 71–77. DOI: [https://doi.org/10.32689/2523-4625-2024-4\(76\)-9](https://doi.org/10.32689/2523-4625-2024-4(76)-9).
2. Блонний А. Оптимізація будівництва в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення: адаптивні моделі для критичної інфраструктури. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2024. Вип. 2, № 54. С. 200–213. URL: <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/341397/329333> (дата звернення: 27.10.2025).
3. Шпатакова О., Іваненко Р., Погребиський М. Перспективи відновлення критичної інфраструктури на деокупованих територіях України. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 40. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-40-5>.
4. Микитенко В. В. Повоєнне відновлення та розвиток критичної інфраструктури України. *Вісник економічної науки України*. 2023. № 1, № 44. С. 124–138. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1\(44\).124-138](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1(44).124-138).
5. Дрейс Ю. Метод оцінювання наслідків втрати об'єкта критичної інформаційної інфраструктури за узагальненими критеріями. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. Вип. 1, № 25. С. 487–504. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.487504>
6. Мороз Н. В., Косик В. М. Відновлення інфраструктури України: проблеми і напрямки. *Галицький економічний вісник*. 2025. Вип. 92, № 1. С. 77–85. DOI: [https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk\\_tntu2025.01.077](https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2025.01.077)
7. Плахотнюк Р. Забезпечення стійкості критичної інфраструктури в Україні в умовах сучасних викликів. *Економічний простір*. 2024. № 195. С. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.195.47-54>
8. Лазор О. Я., Юник І. Г., Заболотний А. В. Державна стратегія повоєнного відновлення та розвитку критичної інфраструктури в Україні. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2024. № 4. С. 1–19. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2156.2024.4.2>
9. Kryshtal H., Tomakh V., Ivanova T., Metelytsia V., Yermolaieva M., Panin Y. Eco-innovative transformation of the urban infrastructure of Ukraine on the way to post-war recovery. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*. 2024. Vol. 2, No.55. P. 391–408. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcactp.2.55.2024.4281>
10. Amosha O., Cherevatskyi D., Amosha O., Kvilynskyi O. Ukraine infrastructure post-war recovery. *Journal of European Economy*. 2024. Vol. 23, No.1. P. 168–184. DOI: <https://doi.org/10.35774/jee2024.01.168>
11. Armanios D., Christensen J. S., Tymoshenko A. What Ukraine Can Teach the World About Resilience and Civil Engineering. *Issues in Science and Technology*. 2023. Vol. 40, No.1. P. 98–103. URL: <https://www.jstor.org/stable/27379621> (date of access: 08.03.2025).
12. Szumowski A. Critical Infrastructure Importance during the War in Ukraine 2022–2024. *Contemporary Security Problems of Poland and the Czech Republic*. 2024. Vol. 1. P. 171–192. URL: [https://wydawnictwo.umcs.eu/js/elfinder/files/Ebook/Contemporary\\_Security.pdf#page=172](https://wydawnictwo.umcs.eu/js/elfinder/files/Ebook/Contemporary_Security.pdf#page=172) (date of access: 26.10.2025).
13. Cherniavska T., Cherniavskyi B. Digital Reconstructor: Integration of Digital Twins for the Reconstruction and Remediation of War-Affected Territories in Ukraine. *UKLO Proceedings*. 2025. Vol. 1, No.1. P. 137–145. DOI: <https://doi.org/10.20544/AISC.1.1.25.P13>.
14. Агентство відновлення отримало 12 модульних мостів від Світового банку. Укрінформ. 2024. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/3843428-agentstvo-vidnovlenna-otrimalo-12-modulnih-mostiv-vid-svitovogo-banku.html> (дата звернення: 26.10.2025).
15. UNOPS and World Bank support restoration of Ukraine's transport network. UNOPS. 2024. URL: <https://www.unops.org/news-and-stories/news/unops-and-world-bank-support-restoration-of-ukraines-transport-network> (date of access: 26.10.2025).
16. Ukraine: Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3) – February 2022 – December 2023. World Bank. 2024. URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099021324115085807> (date of access: 26.10.2025).
17. Design and Construction of UHPC-Based Link Slabs. *Federal Highway Administration*. 2022. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/22065/22065.pdf> (date of access: 27.10.2025).

18. Дослідження неметалевої композитної базальтової арматури періодичного профілю та перспективи її застосування. Дороги і мости. 2021. URL: <https://dorigimosti.org.ua/ua/doslidghennya-nemetalevoyi-kompozitnoyi-bazalytovoyi-armaturi-periodichnogo-profilyu-ta-perspektivi-yiyi-zastosuvannya> (дата звернення: 27.10.2025).

19. Mors R., Jonkers H. M. Bacteria-based self-healing concrete: Evaluation of full scale demonstrator projects. RILEM Technical Letters. 2019. Vol. 4. P. 138–144. DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.93>.

20. Митко М. В., Шиліна О. П., Бурлака С. А. Сучасні методи газотермічного покриття в інноваційних технологіях для ремонту відновленням деталей автомобілів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. Вип. 6. С. 152–160. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-152-160>.

21. Перші 12 модульних мостів від проєкту Світового банку вже в Україні. Кабінет Міністрів України. 2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/pershi-12-modulnykh-mostiv-vid-proektu-svitovoho-banku-vzhe-v-ukraini> (дата звернення: 27.10.2025).

22. На Івано-Франківщині встановили новий модульний міст через річку Рибниця. Агентство відновлення. 2025. URL: <https://restoration.gov.ua/blog/na-ivano-frankivshyni-vstanovyly-novuj-modulnyj-mist-richku-rybnycza> (дата звернення: 27.10.2025).

23. Перші 12 модульних мостів від проєкту Світового банку вже в Україні. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. 2024. URL: <https://mindev.gov.ua/news/35442-persi-12-modulnix-mostiv-vid-projektu-svitovogo-banku-vze-v-ukraini> (дата звернення: 27.10.2025).

24. Rebuilding Ukraine with a 3D Printed School. COBOD International. 2023. URL: <https://cobod.com/cobods-3d-construction-printing-technology-helps-to-rebuild-ukraine-first-project-is-a-3d-printed-school-in-lviv> (date of access: 27.10.2025).

25. Digital Twins: Enhancing Urban Resilience in War-Torn Ukraine. Bentley Blog. 2024. URL: <https://blog.bentley.com/insights/from-war-torn-ukraine-to-the-forefront-of-digital-twins-iryna-osadchas-courage-and-expertise-are-now-making-cities-more-resilient> (date of access: 27.10.2025).

#### **Varyvoda Yu.Yu., Korchevskiy B.B., Didok V.Yu. INNOVATIVE METHODS FOR RESTORING CRITICAL INFRASTRUCTURE IN UKRAINE BASED ON ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES**

*The relevance of the study is determined by Ukraine's urgent need to develop scientifically sound approaches to restoring critical infrastructure after large-scale destruction caused by Russian military aggression. Reconstruction should be based not only on rapid restoration of functionality, but also on ensuring the durability, energy efficiency, and technological sustainability of structures. In this context, the introduction of modern materials and digital technologies is a decisive factor in increasing the reliability of engineering systems and the adaptability of infrastructure to future challenges.*

*The purpose of the article is to analyze innovative methods for restoring Ukraine's critical infrastructure based on the use of modern materials and digital technologies, taking into account the requirements of sustainability, energy efficiency, and safety.*

*The research methodology is based on systemic, structural-functional, and comparative-analytical approaches using expert assessment methods, technical-economic analysis, and life cycle modeling of engineering structures. To summarize the practice, cases of Ukrainian and international reconstruction projects were used, covering ultra-high performance concrete (UHPC), fiber-reinforced polymer (FRP), 3D printing, monitoring systems, and digital twins technologies.*

*The results of the study consist in identifying the structural components of the restoration process, systematizing the potential of modern materials and technologies, and justifying the advantages of digital integration in restoration processes. It has been proven that the use of UHPC, FRP reinforcement, self-healing cements, 3D printing technologies, and digital modeling contributes to a 30–50% increase in structural strength, a 40–60% reduction in reconstruction time, and a 25% reduction in operating costs.*

*The study emphasizes the need to transition to a normatively agreed and digitally integrated reconstruction system, within which innovative materials and technologies become the standard of state technical policy, rather than an exception to it. It has been established that effective restoration requires the unification of regulatory documents, the development of local production, and the creation of a single center for digital monitoring of critical infrastructure facilities.*

*Prospects for further research are related to the development of national standards for the certification of innovative materials, the introduction of artificial intelligence systems in the monitoring of structures, the creation of a national platform for digital twins, and the development of a new generation of educational programs for engineers and managers in the field of sustainable reconstruction.*

**Key words:** reconstruction, sustainability, ultra-high-performance concrete, composite reinforcement, digital twins, structure monitoring, 3D printing, energy efficiency, life cycle, engineering modernization.

Дата надходження статті: 13.11.2025

Дата прийняття статті: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025