

УДК 691

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.25.1188

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ В ГАЛУЗІ ПРОМИСЛОВОГО СТАЛЕВОГО БУДІВНИЦТВА

БІЛОКОНЬ А. І.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КИСЛИЦЯ Л. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ФІЛЬЧЕНКО К. М.³, *асп.*,
ФІЛЬЧЕНКО Д. М.⁴, *асп.*,
МАКАРОВ А. В.⁵, *канд. техн. наук*

¹ Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 566-53-14, e-mail: belokon0604@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5229-781X

^{2*} Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 78-031-78, e-mail: lina_kalynysh@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4563-2530

³ Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 905-73-90, e-mail: filchenko.kn@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-5864-9992

⁴ Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 632-75-69, e-mail: FilchenkoDenis@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-8084-5271

⁵ Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49009, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 850-34-28, e-mail: makarov.a.v@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0009-0000-5052-2411

Анотація. Внаслідок бойових дій, Україна втратила більшу кількість виробничих площ, і для поновлення цієї складової, швидкокомантоване сталеве будівництво безперечно є пріоритетним напрямком, що обумовлює актуальність та важливість дослідження. Сучасні сталеві швидкокомантовані конструкції дають змогу оновити втрачену та пошкоджену промислову базу, що дозволяє створювати ефективні, економічні та екологічно стійкі будівлі, які відповідають світовим стандартам енергоефективності. У тому числі висока якість зовнішнього огороження, яке використовується в цих будівлях, є запорукою для досягнення енергоефективності, відповідності нормам сталого будівництва. Крім того, будівництво із високомісних сталевих виробів забезпечує ефективне використання сталі в будівництві, а сучасні технології та оптимальне проєктування зведення будівель, забезпечує високі стандарти сталого будівництва, включно з енергоефективністю та безпечною експлуатацією відповідно нормам безпеки та якості. Разом з цим, сталеве будівництво з використанням високомісних швидкокомантованих конструкцій сприяє зменшенню витрат та підвищенню продуктивності монтажу та контролю якості каркасів будівель. Використання нових технологій в сталевому будівництві, таких як комплексність і висока якість збирання попередньо виготовлених елементів, теж сприяє швидкому та ефективному монтажу і забезпечує кращу якість кінцевого результату, створюючи умови продуктивного середовища співпраці між усіма учасниками процесу. В цілому, швидкокомантоване сталеве будівництво сприяє підвищенню енергоефективності будівель, забезпечує баланс між екологічною доцільністю та економічною ефективністю. У підсумку, технологія зведення металевих будівель із використанням швидкокомантованих конструкцій підвищує ефективність сталого будівництва, мінімізує ризики в процесі зведення конструкцій, забезпечує якість, довговічність, стійкість та безпеку експлуатації конструкцій на довготривалий час. **Мета роботи** – визначити основні тенденції та перспективи в галузі промислового сталевих будівництва. **Завдання** – проаналізувати найкращі практики в світовому сталевому будівництві та узагальнити і впорядкувати структуру знань з проєктування зведення сталевих конструкцій промислових будівель; визначити основні тенденції, перспективи розвитку сталевих будівництва з використанням швидкокомантованих каркасних конструкцій; визначити регіональні особливості, тенденції та перспективи розвитку сталевих будівництва для сприяння впровадженню передових технологій монтажу сталевих конструкцій в промислового будівництва. **Результати дослідження:** вирішено завдання оцінки важливості визначальних характерних ознак сталевих будівель, які переважно слід враховувати при розробці концепції регіонального розвитку промислового будівництва.

Ключові слова: швидкокомантовані конструкції; сталеве будівництво; проєктування сталевих конструкцій; зведення збірних сталевих будівель; монтаж сталевих каркасних конструкцій

MAIN TRENDS AND PROSPECTS IN THE INDUSTRIAL STEEL CONSTRUCTION INDUSTRY

BILOKON A.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KYSLYTSIA L.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
FILCHENKO K.M.³, *Postgrad. Stud.*,
FILCHENKO D.M.⁴, *Postgrad. Stud.*,
MAKAROV A.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.)*

¹ Department of Construction Production Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 566-53-14, e-mail: belokon0604@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5229-781X

^{2*} Department of Construction Production Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 78-031-78, e-mail: lina_kalnysh@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4563-2530

³ Department of Construction Organization and Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 905-73-90, e-mail: filchenko.kn@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-5864-9992

⁴ Department of Construction Organization and Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 632-75-69, e-mail: FilchenkoDenis@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-8084-5271

⁵ Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, 25, Sergey Efremov St., Dnipro, 49009, Ukraine, tel. +38 (066) 850-34-28, e-mail: makarov.a.v@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0009-0000-5052-2411

Abstract. As a result of hostilities, Ukraine lost a large number of production areas, and to restore this component, prefabricated steel construction is undoubtedly a priority area, which determines the relevance and importance of the study. Modern steel precast structures make it possible to renew the lost and damaged industrial base, allowing for the creation of efficient, economical and environmentally sustainable buildings that meet global energy efficiency standards. Including the high quality of the external fencing used in these buildings, it is a guarantee of achieving energy efficiency and compliance with sustainable construction standards. In addition, construction with high-strength steel products ensures the efficient use of steel in construction, and modern technologies and optimal design of building construction ensure high standards of sustainable construction, including energy efficiency and safe operation in accordance with safety and quality standards. At the same time, steel construction using high-strength prefabricated structures helps reduce costs and increase the productivity of installation and quality control of building frames. The use of new technologies in steel construction, such as the complexity and high quality of assembly of prefabricated elements, also contributes to fast and efficient installation and ensures better quality of the final result, creating conditions for a productive environment of cooperation between all participants in the process. Overall, precast steel construction contributes to increasing the energy efficiency of buildings, providing a balance between ecological feasibility and economic efficiency. As a result, the technology of erecting metal buildings using prefabricated structures increases the efficiency of steel construction, minimizes risks in the process of erecting structures, and ensures the quality, durability, stability, and safety of long-term operation of structures. **The purpose of the work** is to identify the main trends and prospects in the field of industrial steel construction. **The task** is to analyze the best practices in global steel construction and summarize and organize the structure of knowledge on the design of steel structures for industrial buildings; to identify the main trends and prospects for the development of steel construction using prefabricated frame structures; to identify regional features, trends and prospects for the development of steel construction to promote the implementation of advanced technologies for the installation of steel structures in industrial construction. **Research results:** the task of assessing the importance of the defining characteristics of steel buildings, which should mainly be taken into account when developing a concept for the regional development of industrial construction, has been solved.

Keywords: *prefabricated structures; steel construction; design of steel structures; erection of prefabricated steel buildings; installation of steel frame structures*

Вступ. Сучасні сталеві швидкокомтовані конструкції дають змогу створювати ефективні, економічні та екологічно стійкі будівлі, що відповідають світовим стандартам енергоефективності.

У тому числі висока якість зовнішнього огороження, яке використовується в цих будівлях, є запорукою для досягнення енергоефективності, задовольняє нормам сталого будівництва.

Крім того будівництво із високоміцних сталевих виробів забезпечує ефективне використання сталі в будівництві, а сучасні технології та оптимальне проєктування зведення будівель, забезпечує високі стандарти сталого будівництва, включно з енергоефективністю та безпечною експлуатацією у відповідності нормам безпеки та якості.

У тому числі, сталеve будівництво з використанням високоміцних швидкомонтованих конструкцій сприяє зменшенню витрат та підвищенню продуктивності монтажу та контролю якості каркасів будівель.

Використання нових технологій в сталевому будівництві, таких як комплексність і висока якість збирання попередньо виготовлених елементів, теж сприяє швидкому та ефективному монтажу і забезпечує кращу якість кінцевого результату, створюючи умови продуктивного середовища співпраці між усіма учасниками процесу.

В цілому, швидкомонтоване сталеve будівництво сприяє підвищенню енергоефективності будівель забезпечує баланс між економічною доцільністю та екологічною ефективністю.

У підсумку, технологія зведення металевих будівель із використанням швидкомонтованих конструкцій підвищує ефективність сталевго будівництва, мінімізує ризики в процесі зведення конструкцій, забезпечує якість, довговічність, стійкість та безпеку експлуатації конструкцій на довготривалий час.

Оскільки Україна, внаслідок бойових дій, втратила більшу кількість виробничих площ, то, для поновлення цієї складової, швидкомонтоване сталеve будівництво безперечно стає пріоритетним напрямком, що обумовлює актуальність дослідження.

Мета даної роботи: Визначити основні тенденції та перспективи в галузі промислового сталевго будівництва.

Об'єкт дослідження: швидкомонтоване сталеve будівництво.

Предмет: визначальні характеристики і ознаки сталевих будівель, які переважно слід враховувати при концептуальному розвитку регіонального сталевго будівництва.

Основні завдання, які поставили перед собою автори:

1. Проаналізувати найкращі практики в світовому сталевому будівництві та узагальнити і впорядкувати структуру знань з проєктування зведення сталевих конструкцій промислових будівель;

2. Визначити основні тенденції, перспективи розвитку сталевго будівництва з використанням швидкомонтованих каркасних конструкцій.

3. Визначити регіональні особливості, тенденції та перспективи розвитку сталевго будівництва для сприяння впровадженню передових технологій монтажу сталевих конструкцій в промисловому будівництві

Аналіз публікацій в галузі сталевго будівництва.

У науковій роботі [1] описані найпоширеніші форми промислових будівель із сталевих конструкцій і великих огорожувальних конструкцій та їх застосування в Європі. Розглянуто регіональні відмінності, які можуть існувати в залежності від практики, нормативних актів та можливостей ланцюга постачань.

Основні завдання, що вирішуються авторами:

– висвітлити кращі світові практики використання сталевих конструкцій у промисловому будівництві;

– сприяння впровадженню передових технологій та підходів до проєктування і монтажу сталевих конструкцій;

– аналіз існуючих тенденцій, вивчення перспектив наступного покоління сталевих будівель.

Основний результат роботи – представлення міркувань щодо концептуального проєктування і тенденцій розвитку сталевго будівництва.

Публікація [2] спрямована на надання рекомендацій щодо найкращих практик у проєктуванні, будівництві та експлуатації одноповерхових сталевих будівель. Вона акцентує увагу на оптимізації процесів

проектування, впровадженні інноваційних рішень, підвищенні енергоефективності та стійкості будівель, а також на поліпшенні співпраці між усіма учасниками будівельного процесу.

Робота вирішує завдання:

- забезпечення ефективного використання сталі в будівництві одноповерхових будівель шляхом застосування сучасних технологій та оптимальних методів проектування;

- поліпшення взаємодії учасників проекту шляхом раннього залучення всіх сторін, таких як клієнти, архітектори, підрядники, постачальники та виробники конструкцій;

- зменшення витрат і підвищення продуктивності завдяки координації між технологіями будівництва, розробці більш ефективних процесів монтажу та контролю якості.

Вивчаючи матеріал, що викладений, можна дійти наступних висновків:

1. Сучасні сталеві конструкції дають змогу створювати ефективні, економічні та екологічно стійкі будівлі, що відповідають сучасним стандартам енергоефективності.

2. Ефективне будівництво одноповерхових будівель вимагає інтеграції всіх процесів – від проектування до фінального введення в експлуатацію.

Важливо, щоб усі учасники розуміли свої взаємозалежності та працювали злагоджено. Раннє залучення постачальників і виробників та інтеграція їхніх знань у процес проектування значно покращують якість будівництва та зменшують витрати, сприяє швидкому та ефективному монтажу, а також забезпечує кращу якість кінцевого результату.

Значну роль у забезпеченні успішного будівництва відіграє наявність досвідчених і компетентних клієнтів (користувачів), які можуть чітко визначити свої вимоги та сприяти створенню продуктивного середовища співпраці між усіма сторонами процесу.

Рекомендації [3] щодо проектування та будівництва стійких, низьковуглецевих складських приміщень були розроблені з

метою допомогти інженерам, архітекторам, девелоперам і власникам складів у впровадженні ефективних та екологічно відповідальних будівельних рішень.

Оптимізація проектування будівель із застосуванням сталі забезпечує баланс між екологічною ефективністю та економічною доцільністю. В підтвердження цього ствердження надано порівняльний аналіз вартості базового варіанту (сталева рама порталу) і альтернативними структурними рішеннями каркасу будівлі. Вартість корпусу складу (включаючи вартість будівельних робіт) на основі клеєних балок та прогонів, що спираються на бетонні колони, у порівнянні з базовим варіантом, складає (+12) відсотків; а варіант (сталеві рами порталу з світловими ліхтарями) перевищує вартість базового варіанту на (+8) відсотків.

Іншим стандартним посібником з монтажу є керівництво для будівельників і монтажників, які працюють зі сталевими швидкокомтованими будівельними конструкціями [4]. У ньому містяться докладні інструкції щодо правильної та безпечної практики монтажу для забезпечення якісного, довговічного та безпечного результату.

Укладачі посібника поставили за мету:

- надати покрокові інструкції з монтажу металевих будівель, включно з підготовкою, доставлянням, зберіганням і встановленням конструкцій;

- забезпечити дотримання стандартних процедур, що сприяють безпечному, ефективному та якісному монтажу;

- забезпечити належне складування і зберігання матеріалів, щоб запобігти пошкодженню і псуванню елементів конструкції;

- дати рекомендації щодо кріплення болтів, кронштейнів та інших елементів для забезпечення стійкості і довговічності конструкції.

Дотримання стандартних методів монтажу має вирішальне значення для безпеки та надійності металевих конструкцій. Використання інструкцій, наведених у цьому посібнику, дає змогу

уникнути помилок і порушень технологічного процесу.

Підсумовуючи вище зазначене можливо прийти до висновку, що успішний монтаж сталевих будівель залежить від ретельного планування, досвіду монтажників і суворого дотримання рекомендованих процедур.

Ще один посібник [5] з монтажу та встановлення швидкомонтованих металевих будівель містить докладні інструкції з підготовки, транспортування, складання та кріплення металевих конструкцій, а також рекомендації з контролю якості та безпеки під час монтажу.

Посібник містить докладні інструкції з монтажу збірних металевих будівель, що визначає якісне та безпечне виконання робіт.

Практичний посібник [6] з планування безпечного зведення сталевих будівель, опублікований Австралійським інститутом сталі у співпраці з Multiplex Constructions Pty Limited, призначений для дотримання високих стандартів безпеки та ефективності під час монтажу сталевих конструкцій на будівельних майданчиках.

Основну увагу в ньому приділено плануванню процесу, управлінню ризиками та дотриманню нормативних вимог. Посібник містить докладний опис основних етапів будівництва, включно з розробленням послідовності монтажу, взаємодією із зацікавленими сторонами та проведенням обов'язкових перевірок.

Посібник побудовано навколо етапів будівельного процесу, фази: концептуальний дизайн; ескізний проєкт; робочий проєкт; робочі креслення; передмонтажні роботи (підготовка будівельного майданчика до проведення основних робіт); виготовлення та транспортування; щоденний монтаж; підписання актів та передача (введення) в експлуатацію. Все це допомагає мінімізувати ризики на етапах будівництва, забезпечує координацію між учасниками будівельного процесу і підвищує якість робіт.

«Збірні конструкції сталеві будівлі» інструкція з монтажу [7], розроблена компанією Mueller Inc, містить інструкції з підготовки майданчика, зведення

конструкцій, ізоляції, монтажу покрівлі та оздоблення.

Інструкція з монтажу збірних сталевих будівель – це комплексне керівництво для будівельників і підрядників. Виконання всіх етапів у суворій відповідності з наведеними рекомендаціями забезпечує довговічність, безпеку і якість конструкції будівлі. У документі підкреслюється важливість правильного планування, використання відповідного обладнання та дотримання технічних норм на всіх етапах будівництва.

Наукове дослідження інтегрованого проєктування збірних сталевих каркасних конструкцій з акцентом на структурну безпеку [8] пропонує підхід до комплексного проєктування збірних сталевих каркасних конструкцій з використанням технологій інформаційного моделювання будівель (BIM). Основною метою дослідження є усунення невідповідностей між 3D-моделями, створеними в BIM-системах, і початковими проєктними розрахунковими рішеннями, що дає змогу забезпечити безпеку та надійність конструкцій.

Дослідження ґрунтується на аналізі загальної безпеки (стійкості) конструкцій, моделюванні з'єднань балок і колон та використанні отриманих результатів для оптимізації проєктування конструкцій:

BIM-платформа виводить 2D-креслення для механічної обробки елементів і вузлів балок та колон конструкції.

Проведене дослідження показує, що комплексне використання BIM-технологій з розрахунковими програмами забезпечує більш точне і безпечне проєктування збірної конструкції будівлі.

Такий підхід підвищує безпеку, точність і ефективність сталевих будівництва, усуває невідповідності між 3D-моделями і реальними технологічними проєктами, забезпечуючи автоматизований контроль критично важливих вузлів будівлі.

Експериментальне дослідження з'єднань болтами збірних сталевих балок каркасу наведено в роботі [9]. Його основна мета – оцінити механічні властивості стійких сталевих рамних балок, дослідити їхню міцність, жорсткість і стійкість до

навантажень, а також визначити оптимальні параметри з'єднання для підвищення ефективності конструкцій.

Результати експериментів підтвердили ефективність деяких схем болтових з'єднань, які забезпечують рівномірний розподіл навантаження і знижують ризик місцевих деформацій.

Виявлено певні розбіжності між теоретичними розрахунками та реальними (фактичними) даними, що вказує на необхідність подальшого вдосконалення методів розрахунку.

Болтові з'єднання істотно впливають на міцність і жорсткість балок, а оптимальне розташування болтів може значно поліпшити експлуатаційні характеристики конструкції. Жорсткість балок може бути збільшена за рахунок оптимізації діаметра болтів, кількості з'єднань і матеріалу кріплення, що знижує прогини під навантаженням.

У статті [10] досліджується вплив інформаційного моделювання будівель (BIM) на будівництво збірних сталевих каркасів з точки зору малих і середніх підприємств (МСП). Основною метою є розробка BIM-орієнтованої системи управління будівництвом, яка допоможе МСП підвищити ефективність проектування, виготовлення та монтажу сталевих каркасів, зменшити витрати та покращити процеси управління проектами.

Впровадження BIM на малих і середніх підприємствах значно підвищує ефективність будівельного процесу, особливо з точки зору скорочення витрат і поліпшення управління ресурсами. BIM дозволяє більш точно прогнозувати обсяги та витрати матеріалів, що знижує ризики перевитрат і помилок під час виготовлення та монтажу сталевих каркасів.

Покращений контроль якості, використання BIM і лазерного сканування дозволяє точно контролювати відповідність побудованих конструктивних елементів будівлі проектним рішенням.

Результати дослідження підтверджують економічну доцільність використання BIM для МСП, особливо в умовах зростаючих вимог до точності та швидкості будівництва.

BIM може значно підвищити ефективність сталевих каркасних будівництв на малих і середніх підприємствах, але його впровадження вимагає додаткових ресурсів, навчання персоналу та адаптації до конкретних умов бізнесу.

Наукове дослідження [11], розглядає застосування технології Digital Twin (DT) у сталевому будівництві сталевих конструкцій. Основна мета – підвищення рівня цифровізації та інтелектуалізації будівельних процесів за рахунок інтеграції BIM, штучного інтелекту і сенсорних систем.

У дослідженні запропоновано архітектуру цифрового двійника, що охоплює всі етапи будівництва сталевих конструкцій. Метод створення цифрового двійника включає три основні етапи:

- збір і передача фізичних даних (інформація про персонал, обладнання, матеріали, навколишнє середовище);
- побудова віртуальної моделі (геометрична, фізична, поведінкова і нормативна моделі);
- обмін інформацією між фізичною та віртуальною моделями (моніторинг, аналіз, прогнозування, управління будівельними процесами).

У документі також наведені реальні приклади застосування цифрового двійника:

- будівництво бібліотеки кампусу в місті Сюньган (Китай);
- реконструкція та розширення аеропорту Наньчжун Гаопін.

Цифровий двійник може значно підвищити ефективність будівництва за рахунок інтеграції даних і автоматизації процесів.

Впровадження технологій цифрового моделювання знижує ризик виникнення структурних дефектів, допомагає прогнозувати небезпеки і мінімізувати затримки. Практичне застосування DT під час будівництва бібліотеки та аеропорту підтвердило ефективність методу, зокрема, у зниженні витрат, підвищенні точності та автоматизації контролю якості. У перспективі – ширше використання штучного інтелекту для автоматизованого ухвалення рішень у процесі будівництва.

Наступна публікація [12] є науковим дослідженням, в якому порівнюються традиційні сталеві будівлі (ТСБ) та швидкомонтовані сталеві будівлі (ШМСБ). Дослідження фокусується на конструктивних особливостях, матеріальних витратах, будівельному процесі, транспортних витратах та загальній ефективності обох підходів.

В рамках дослідження були проведені розрахунки витрат на реальному промисловому об'єкті (25 м × 52,5 м) з використанням двох конструктивних систем – ТСБ та ШМСБ. Були використані методи калькуляції витрат, аналізу ефективності та оцінки часу будівництва.

Аналізувалися технології монтажу традиційних сталевих будівель (ТСБ):

- використання гарячекатаних сталевих профілів постійного перерізу;
- виготовлення конструктивних елементів на заводі, транспортування та подальша обробка на будівельному майданчику;
- монтаж за допомогою зварювання, болтового з'єднання та різання матеріалів безпосередньо на об'єкті;
- велика вага конструкцій, що збільшує навантаження на фундамент.

Дані співставлялися з технологією швидкомонтованих інженерних будівель (ШМСБ):

- легкі металеві каркаси з тонкостінних елементів зі змінним перерізом;
- всі деталі виготовляються на заводі, транспортуються в готовому вигляді і збираються на місці без додаткових модифікацій;
- швидкий монтаж за допомогою болтових з'єднань і мінімального зварювання.

Висновки викладені у дослідженні вказують на те, що:

- ШМСБ є більш економічно ефективними, оскільки вони забезпечують 40 % економію коштів у порівнянні з традиційними сталевими будівлями.
- монтаж ШМСБ відбувається на 30–40 % швидше, що скорочує час будівництва.

- ШМСБ легші, що зменшує навантаження на фундамент і витрати на бетонні роботи.

- вплив ШМСБ на навколишнє середовище нижчий, оскільки вони зменшують кількість будівельних відходів і забезпечують більш ефективне використання ресурсів.

Загалом, ШМСБ є кращим вибором для промислових, комерційних і складських будівель завдяки економії часу, коштів і ресурсів.

Наступний документ [13] є результатом дослідження, в якому розглядається нова методологія проектування та виконання збірних комерційних стінових конструкцій для підвищення продуктивності будівельних процесів. Основною метою дослідження є оптимізація використання збірних стінових панелей для скорочення термінів будівництва, підвищення точності та зменшення трудовитрат.

У цьому дослідженні розроблено модель, яка забезпечує визначену процедуру для проектування та реалізації збірних комерційних стінових конструкцій. Основний внесок цього дослідження в сукупність знань полягає в розробці адаптованої і масштабованої моделі для підвищення продуктивності на будівництві з використанням холодноформованих металевих стін на шпильках.

Модель може бути широко використана як у нових, так і в реконструйованих проектах у вертикальному будівництві.

Виконане дослідження підтверджує ефективність інноваційної моделі у підвищенні продуктивності та якості будівництва комерційних будівель.

Тематичне дослідження будівельних проектів в Окленді [14] аналізує вплив збірного будівництва на продуктивність, витрати і час будівництва.

Основна ідея дослідження полягає в тому, що традиційні методи будівництва (TBS – Traditional Building System) мають ряд обмежень, таких як тривалі терміни виконання робіт, висока залежність від погодних умов та велика кількість відходів. Натомість використання збірних

конструкцій (ЗК) дозволяє знизити витрати, підвищити якість і скоротити час будівництва.

Автори дослідили 66 будівельних проєктів в Окленді, серед яких житлові будинки, комерційні споруди, квартири, освітні та громадські будівлі. Для аналізу ефективності збірних конструкцій були використані наступні параметри:

- загальні витрати;
- тривалість виконання;
- продуктивність.

Дослідження порівнює ЗК з традиційним будівництвом (TBS), використовуючи історичні дані, отримані від будівельних компаній. Збірні конструкції скорочують час будівництва в середньому на 34 % порівняно з традиційними методами. Також завдяки використанню ЗК можна досягти зниження загальних витрат на будівництво на 19 %, що робить їх більш рентабельними.

Найбільше зростання продуктивності (11 %) спостерігалось в житлових проєктах, що свідчить про особливу ефективність ЗК для будівництва житлових будинків. Громадські будівлі показали найбільшу економію коштів (24 %), що свідчить про те, що вони підходять для великих інфраструктурних проєктів.

В роботі [15] аналізується взаємозв'язок між виробництвом збірних конструкцій та їх монтажем на будівельному майданчику. Основною метою є оптимізація будівельного процесу шляхом узгодження графіків виготовлення та монтажу збірних елементів, що мінімізує затримки, зменшує витрати на складування та підвищує ефективність роботи.

Ключові аспекти дослідження:

- використання концепції Just-in-Time (JIT) для синхронізації виробництва та монтажу;
- оптимізація ланцюжка поставок для уникнення простоїв та перевитрат.

- використання математичного моделювання для побудови ефективного робочого графіка;

- аналіз випадкових затримок у виробництві та їх впливу на процес будівництва.

В рамках дослідження також проведено емпіричний аналіз реального будівельного проєкту, що дозволяє оцінити ефективність розробленого методу в реальних умовах. Синхронізація виробництва і збірки конструкцій будівлі значно скорочує час простою як на заводах, так і на будівельному майданчику.

Використання Just-in-Time зменшує складські та транспортні витрати.

Математична модель дозволяє створити ефективний графік робіт, мінімізуючи затримки.

Практичне застосування методу на будівельному майданчику підтвердило можливість скорочення термінів будівництва на 10–20 %, а також оптимізація ланцюга поставок на будівництві сприяє зниженню витрат і поліпшенню організації робіт.

Дослідження рекомендує широке впровадження цього підходу у сфері швидкомонтованого будівництва, що дозволить підвищити ефективність використання ресурсів та зменшити втрати через неузгоджений графік будівництва.

Результати дослідження: На основі аналізу, узагальнень і впорядкування наукових робіт за темою дослідження, визначено предметна область в галузі сталого будівництва і основні напрямки досліджень (табл. 1).

Результати викладених наукових робіт за темою дослідження дозволили сформулювати основні тенденції та перспективи розвитку сталого будівництва (табл. 2).

Таблиця 1

Предметна область досліджень в галузі сталевих будівництва

Напрямки досліджень	Наукові праці
Приклади і аналіз кращих практик в галузі сталевих будівництва	[1]
Інтеграція і оптимізація процесів зведення швидкокомтованих сталевих промислових будівель	[1; 2; 6; 15]
Дослідження структури витрат сталевих будівель і альтернативних проєктів каркасного будівництва	[3]
Покращення ефективності та безпечної практики монтажу сталевих швидкокомтованих каркасів будівель	[4; 5; 7]
Інтегроване проєктування сталевих каркасів на основі BIM-технологій	[8; 10]
Підвищення цифровізації, побудова віртуальної моделі (фізичної, поведінкової)	[11]
Дослідження механічних і геометричних властивостей сталевих конструкцій (з'єднань, балок, рам)	[9]
Порівняльний аналіз будівництва збірних систем швидкокомтованих металевих будівель (ШМБ) з традиційним сталевим будівництвом (ТСБ)	[12–14]

Таблиця 2

Основні тенденції та перспективи сталевих будівництва

Переваги	Проблемні моменти	Концептуальні напрями розвитку*
- Підвищення енергоефективності - Стійкості - Поліпшення співпраці учасників будівельного процесу - Забезпечення ефективності використання сталі в будівництві - Забезпечення оптимального проєктування - Зменшення витрат і підвищення продуктивності - Ефективність, екологічність економічність будівництва - Забезпечення якості довговічності та безпечного результату - Високий рівень стандартизації - Високий рівень безпеки та надійності конструкцій - Мінімізація ризиків - Високий рівень координації співпраці - Забезпечення комплексного проєктування на всіх етапах будівництва	- Визначення оптимальних параметрів з'єднань для забезпечення ефективності конструкції - Необхідність вдосконалення методів розрахунку - Існування невідповідностей розрахункових і реальних характеристик конструкцій і з'єднань, що вказує на необхідність вдосконалення деяких методів розрахунку [9] - Комплексне використання BIM-технологій з розрахунковими програмами, що забезпечує більш точне і загальне проєктування збірної конструкції	- Оптимізація простору - Швидкість будівництва - Доступ і безпека - Гнучкість використання та простору - Екологічні показники - Стандартизація компонентів - Спеціалізована інфраструктура - Сталість - Закінчення терміну експлуатації та повторне використання - Інтеграція послуг - Ландшафтний дизайн - Естетика та візуальний вплив - Теплові характеристики та повітронепроникність - Акустична ізоляція - Атмосферостійкість - Розрахунковий термін служби

*Фактори, рекомендовано враховувати при концептуальному проєктуванні проєктів [1]

Для вирішення завдання оцінки важливості визначальних факторів і ознак для перспективи раціонального розвитку сталевих будівництва доцільно задіяти методи експортного аналізу.

Ухвалення рішень на підставі думок експертів значною мірою залежить від організації формування груп експертів,

процедури аналізу та обробки суджень експертів.

Формування сукупності експертів здійснювалося згідно з їх компетентністю в галузі сталевих будівництва. Для оцінювання компетентності фахівців, які залучались до експертизи враховувалося:

- обізнаність фахівця щодо досліджуваної проблеми;
- практичний досвід, пов'язаний з вирішенням даної проблеми;
- кількість реалізованих проектів, у яких фахівець брав участь на різних етапах;
- участь у семінарах, конференціях та нарадах, як в Україні, так і за кордоном з досліджуваної проблеми;
- здібність до прогнозування і інтуїція фахівця у прийнятті рішень.

Оцінка професійної компетентності фахівців здійснювалась за допомогою попереднього опитування методом анкетування.

Формування сукупності експертів згідно їх професійної компетентності в галузі сталого будівництва виконувалась методом «снігового кому» [16].

У першому наблизенні, за концепцією «снігового кому» ми отримали дані від 20 фахівців щодо самооцінювання на їхню компетентність і обізнаність.

За [17] було розраховано максимальна необхідна кількість експертів для цього дослідження, яка склала $N_{\max} \approx 21$ експерт, мінімальна кількість експертів $N_{\min} \approx 13$ осіб.

Таким чином ми отримали діапазон $N_{\max} = 21$ експерт, $N_{\min} = 13$ експертів.

На основі даних анкетування, які надійшли від 20 фахівців, і попередньої кваліфікації їх професійної компетентності було відібрано 14 експертів з різних областей діяльності, які були поділені на дві групи.

До першої групи увійшли 7 осіб:

– фахівці, які мають значний науковий стаж, наукові праці і неодноразово брали участь у міжнародних науково-практичних семінарах і конференціях за темою дослідження;

– молоді науковці, з числа аспірантів та магістрів, які підвищують свою кваліфікацію, мають практичний досвід і науковий інтерес пов'язаний з розв'язанням невизначених питань в галузі сталого будівництва.

До другої групи увійшли сім осіб із числа:

– керівники інженерно-технічних відділів; лінійний склад виконавців робіт підрядних монтажних організацій, що працюють у сталевому будівництві більше ніж 5 років.

В рамках даного дослідження експерти оцінювали параметри (ознаки) сталевих будівель (склади, промислові виробничі, розподільчі центри, спорткомплекси, виставкові комплекси) в рамках міркувань визначення перспектив щодо концептуального розвитку сталого будівництва з врахуванням регіональних потреб і особливостей.

Тип одноповерхових сталевих будівель і міркування щодо концептуального їх проектування визначено і було запозичено з роботи [1]. В цьому дослідженні автори визначили і оцінили ознаки розвитку сталого будівництва (нового покоління) на якісному (емоційному) рівні, тобто: *важливо; дуже важливо; неважливо.*

В рамках нашого дослідження перед експертами було поставлено завдання оцінити характерні ознаки розвитку сталого будівництва кількісно і скласти пріоритет (рейтинг) їх значимості щодо розвитку і потреб регіонального сталого будівництва.

Із сукупності методів експертної оцінки був задіяний метод попарного порівняння на основі діагональних зворотніх матриць:

– якщо параметри (a_i) у попарному порівнянні мають однакову значимість, їм присвоюється індекс 1;

– якщо один із параметрів (a_i) більш важливий, йому присвоюється індекс 2 (інший приймає значення 1/2);

– якщо один із параметрів (a_i) набагато важливіший, йому присвоюється індекс 3 (відповідно інший приймає значення 1/3).

Кожен з експертів провів ранжування параметрів (в один тур) і обробка матриць (думок експертів) дозволила отримати інтегровану оцінку важливості ознак сталого будівництва на регіональному рівні.

Результат обробки попарної матриці експертів представлено на рисунку.

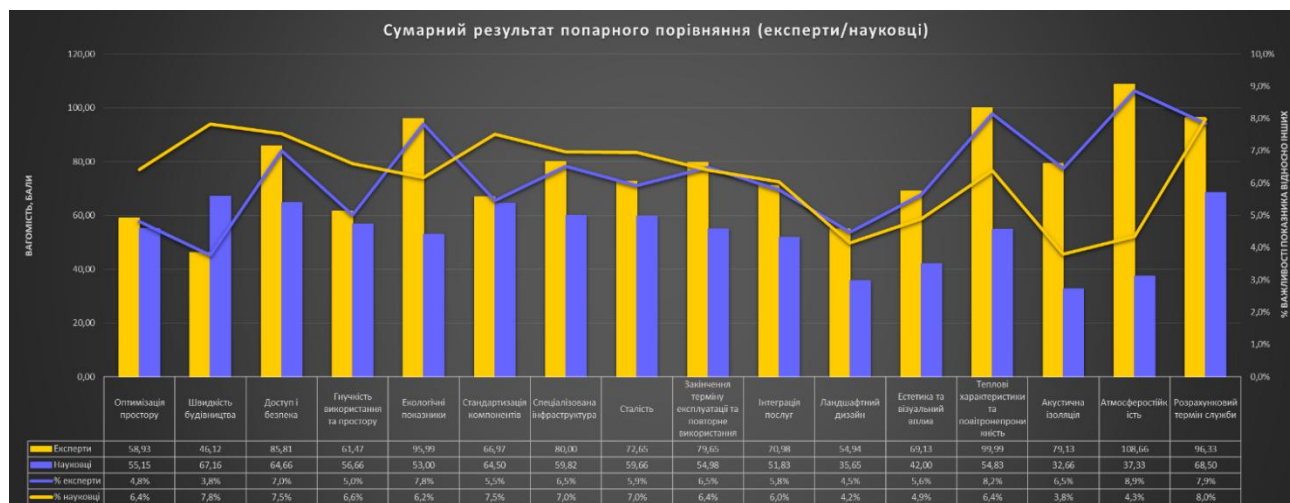


Рис. Сумарний результат попарного порівняння

На основі обробки оцінок експертів було визначено рівень узгодженості думок експертів γ -коефіцієнт варіації розбіжності в оцінках.

Отримані результати дозволили зробити висновок про ступінь згоди в оцінках, яка знаходиться в межах: $0,1 \leq \gamma \leq 0,15$ та $0,15 \leq \gamma \leq 0,25$, що відповідає рівню узгодженості «середньому» та «вище середнього».

Висновок

Вирішено завдання оцінки важливості визначальних характерних ознак сталевих будівель, які переважно враховувати при розробці концепції регіонального розвитку сталевих промислового будівництва.

Показано, що ситуація, в якій опинилась Україна, вимагає поновлення великого обсягу промислових площ, внаслідок завданих руйнувань.

Сучасне сталеве будівництво із використанням швидкокомтованих конструкцій дозволить в короткий термін ефективно і якісно забезпечити ці потреби.

Виконано аналіз наукових праць, що вирішують актуальні питання в галузі швидкокомтованого сталевих будівництва. Узагальнено структуру знань, що впорядковує досягнення в області швидкокомтованих сталевих будівель.

Вирішено завдання оцінки важливості визначальних критичних характеристик і ознак, які переважно враховувати при розробці концепції розвитку сталевих будівництва на регіональному рівні. В першу чергу це такі ознаки як: доступ і безпека; екологічні показники; теплові характеристики та повітронепроникність; атмосферостійкість; розрахунковий термін служби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Londhe P. M. та ін. A comparative analysis of conventional steel building and pre-engineered building systems: a case study approach. *E3S web of conferences*. 2024. Т. 559. С. 1–12. Р. 04030. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455904030> (дата звернення : 21.03.2025).
2. He R., Zhang Z., Li J. Experimental study on bolt-spliced prefabricated steel frame beams. *Advances in civil engineering*. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/6191475> (дата звернення: 21.03.2025).
3. Jaskowski P., Biruk S., Krzeminski M. Synchronizing production of precast elements with on-site erection. *Archives of civil engineering*. 2024. Pp. 607–618. URL: <https://doi.org/10.24425/ace.2024.151005> (дата звернення: 21.03.2025).
4. Liu Z., Lin S. Digital twin model and its establishment method for steel structure construction processes. *Buildings*. 2024. Т. 14, № 4. С. 1–17. 1043. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14041043> (дата звернення: 21.03.2025).
5. Renner A., Karatas A., Videan B. Innovative design and execution model for improving productivity of interior prefabricated commercial wall assemblies. *Buildings*. 2022. Vol. 13, № 1. Pp. 1–20. 68. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13010068> (дата звернення: 21.03.2025).

6. Wang P. та ін. Research on integrated design of prefabricated steel frame structures based on BIM technology with a focus on structural safety. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 8. Pp. 1–20. 2341. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14082341> (дата звернення: 21.03.2025).
7. Shahzad W., Mbachu J., Domingo N. Marginal productivity gained through prefabrication : case studies of building projects in auckland. *Buildings*. 2015. Vol. 5, № 1. Pp. 196–208. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings5010196> (дата звернення: 21.03.2025).
8. Yoo M., Kim J., Choi C. Effects of bim-based construction of prefabricated steel framework from the perspective of smes. *Applied sciences*. 2019. Vol. 9, № 9. Pp. 1–21 1732. URL: <https://doi.org/10.3390/app9091732> (дата звернення: 21.03.2025).
9. Ran He, Zaihua Zhang, Jingchao Li Експериментальне дослідження з'єднаних болтами збірних сталевих каркасних балок. Гобокен : Wiley. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/6191475>
10. Mooyoung Yoo, Jaejun Kim, Changsik Choi. Вплив будівництва збірних сталевих каркасів на основі BIM з точки зору МСП. Базель : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/9/1732>
11. Zhansheng Liu, Sen Lin. Модель цифрових двійників та метод її створення для процесів будівництва сталевих конструкцій. Базель : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/4/1043>
12. Londhe Pratik M., Ambekar Rohan Vilas, Dhumal Priyanka R., Chipade Amar M. Порівняльний аналіз традиційних сталевих будівель і готових будівельних систем: підхід із прикладного дослідження. Лез-Юліс : EDP Sciences. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/89/e3sconf_icstce2024_04030.pdf
13. Andrew Renner, Aslihan Karatas, Benjamin Videan. Інноваційна модель дизайну та виконання для підвищення продуктивності внутрішніх збірних комерційних стінових конструкцій. Базель : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/1/68>
14. Wajih Shahzad, Jasper Mbachu, Niluka Domingo Гранична продуктивність, досягнута завдяки заводському виготовленню: тематичні дослідження будівельних проектів в Окленді. Базель : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/5/1/196>
15. Piotr Jaskowski, Sławomir Biruk, Michał Krzeminski Синхронізація виробництва збірних елементів із монтажем на місці. Варшава : Польська академія наук. URL: https://journals.pan.pl/Content/132831/39_2k.pdf
16. Наумов В.О., Білоконь А.І. Створення паспорту об'єкта для цифровізації та підбору сценаріїв демонтажу будівель та споруд. Innovative technologies for training and educating young people : the 2nd International scientific and practical conference (January 14–17, 2025). Boston, USA. International Science Group. 2025. 309 p. ISBN 979-8-89692-744-0; DOI- 10.46299/ISG.2025.1.2.
17. Гнатенко Г. М., Снитюк В. Є. Експертні технології прийняття рішень. Маулаут, Київ 2008, 444 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/324015476_Ekspertni_tehnologii_prijnatta_risen

REFERENCES

1. Londhe P.M. and oth. A comparative analysis of conventional steel building and pre-engineered building systems: a case study approach. E3S web of Conferences. 2024, vol. 559, pp. 1–12. 04030. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455904030>
2. He R., Zhang Z. and Li J. Experimental study on bolt-spliced prefabricated steel frame beams. Advances in civil engineering. 2020, vol. 2020, pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/6191475>
3. Jaskowski P., Biruk S. and Krzeminski M. Synchronizing production of precast elements with on-site erection. Archives of Civil Engineering. 2024, pp. 607–618. URL: <https://doi.org/10.24425/ace.2024.151005>
4. Liu Z., Lin S. Digital twin model and its establishment method for steel structure construction processes. Buildings. 2024, T. 14, no. 4, pp. 1–17. 1043. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14041043>
5. Renner A., Karatas A. and Videan B. Innovative design and execution model for improving productivity of interior prefabricated commercial wall assemblies. Buildings. 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1–20. 68. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13010068>
6. Wang P. and oth. Research on integrated design of prefabricated steel frame structures based on BIM technology with a focus on structural safety. Buildings. 2024, vol. 14, no. 8, pp. 1–20. 2341. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14082341> (in Ukrainian).
7. Shahzad W., Mbachu J. and Domingo N. Marginal productivity gained through prefabrication: case studies of building projects in auckland. Buildings. 2015, vol. 5, no. 1, pp. 196–208. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings5010196> (in Ukrainian).
8. Yoo M., Kim J. and Choi C. Effects of bim-based construction of prefabricated steel framework from the perspective of smes. Applied Sciences. 2019, vol. 9, no. 9, pp. 1–21. URL: <https://doi.org/10.3390/app9091732>
9. Ran He, Zaihua Zhang and Jingchao Li. Experimental study of bolted prefabricated steel frame beams. Goboken : Wiley. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/6191475>
10. Mooyoung Yoo, Jaejun Kim and Changsik Choi. Effects of BIM-Based Construction of Prefabricated Steel Framework from the Perspective of SMEs. Basel : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/9/1732>
11. Zhansheng Liu and Sen Lin. Digital Twin Model and Its Establishment Method for Steel Structure Construction Processes. Basel : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/4/1043>

12. Londhe Pratik M., Ambekar Rohan Vilas, Dhumal Priyanka R. and Chipade Amar M. A Comparative Analysis of Conventional Steel Building and Pre-Engineered Building Systems : a case study Approach : EDP Sciences. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/89/e3sconf_icstce2024_04030.pdf
13. Andrew Rener, Aslihan Karatas and Benjamin Videan. Innovative Design and Execution Model for Improving Productivity of Interior Prefabricated Commercial Wall Assemblies. Basel : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/1/68>
14. Wajiha Shahzad, Jasper Mbachu and Niluka Domingo. Marginal Productivity Gained Through Prefabrication : Case Studies of Building Projects in Auckland. Basel : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/5/1/196>
15. Piotr Jaskowski, Sławomir Biruk and Michał Krzeminski. Synchronizing production of precast elements with on-site erection. POLISH ACADEMY OF SCIENCES. URL: https://journals.pan.pl/Content/132831/39_2k.pdf
16. Naumov V.O. and Bilokon A.I. *Stvorennya pasportu ob'yekta dlya tsyfrovizatsiyi ta pidboru stsenariyiv demontazhu budivel' ta sporud* [Creating a passport of an object for digitalization and selection of scenarios for dismantling buildings and structures]. Innovative Technologies for Training and Educating Young People : the 2nd International scientific and practical conference (January 14–17, 2025), Boston, USA. International Science Group, 2025, 309 p. ISBN 979-8-89692-744-0; DOI : 10.46299/ISG.2025.1.2 (in Ukrainian).
17. Hnatenko G.M. and Snityuk V.E. *Ekspertni tekhnolohiyi pryynyattya rishen'* [Expert decision-making technologies]. Kyiv : Maulaut, 2008, 444 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/324015476_Ekspertnitehnologiiprijnattarisen (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 06.05.2025.