УДК 005.3:621.791.05
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).3

USE OF 3D MODELS TO DETERMINE CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL INDICATORS OF WELDED METAL STRUCTURES

ВИКОРИСТАННЯ 3D МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Ivan V. Simutienkov
simutenkovivan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2896-2637
Stanislav V. Dragan
stanyslav.dragan@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8634-782X

І. В. Сімутєнков,
канд. техн. наук, старший викладач
С. В. Драган,
канд. техн. наук, професор

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. To manage the resources of a metal structure manufacturing plant and to determine the timelines and costs for prospective orders which encompass a wide range of products (beams, trusses, and flat or volumetric sections) intended for various applications (construction, shipbuilding, and hydraulic engineering) an engineering calculation methodology has been developed; this methodology is based on determining the structural and technological parameters of welded metal structures using their 3D models. Generalized empirical relationships have been established that make it possible–as early as the pre-design or pre-contract stage of cost negotiation for prospective orders–to forecast the design and manufacturing parameters of future welded metal structures and the resources required for their production, thereby reducing estimation uncertainty. Examples illustrating the application of the developed methodology are provided. The *purpose* of this article is to develop an engineering methodology for determining the design and manufacturing parameters of welded metal structures using their 3D models to establish generalized empirical relationships. The research *method* is based on the statistical analysis of data (design and technological parameters) derived from 3D models of actual metal structures. *Results*. The established generalized empirical relationships make it possible to predict the design and manufacturing parameters and the resources required for the production of various types of metal structures. *Scientific novelty*. It has been established that structures serving different purposes but sharing the same structural (technological) type exhibit similar specific technological indicators and, consequently, can be approximated by unified mathematical relationships. This is based on the similarity of the environmental factors–specifically the loads and effects–incorporated into the standards and regulations governing the design of metal structures across various industrial sectors. *Practical significance*. The developed engineering methodology makes it possible–as early as the pre-design or pre-contract stage–to forecast the design and manufacturing parameters and resources required to fulfill prospective orders, thereby reducing uncertainty regarding the cost of order execution.
Key words: methodology; welded structures; 3D modeling; design and manufacturing parameters; approximation.

Анотація. Для управління ресурсами заводу по виробництву металоконструкцій (МК), визначення строків та вартості перспективних замовлень широкої номенклатури (балки, ферми, пласкі, та об'ємні секції) та різного призначення (будівельні, суднові, гідротехнічні) розроблено розрахункову інженерну методику, засновану на визначенні конструктивно-технологічних показників зварних МК з використанням їх 3D моделей. Визначені узагальнені емпіричні залежності, які дозволяють вже на передпроєктному або доконтрактному етапі узгодження вартості перспективних замовлень прогнозувати конструктивно-технологічні показники майбутніх зварних МК та ресурси, потрібні для їх реалізації, зменшуючи ступінь невизначеності оцінки. Наведені приклади використання розробленої методики. *Мета* даної статті полягає у розробці інженерної методики визначення конструктивно-технологічних показників зварних металоконструкцій з використанням їх 3D моделей для створення узагальнених емпіричних залежностей. Основою *методики* дослідження є статистичний аналіз даних (конструктивно-технологічних показників), визначених за 3D моделями реальних металоконструкцій. *Результати*. Визначені узагальнені емпіричні залежності дозволяють прогнозувати конструктивно-технологічні показники та ресурси, потрібні для виготовлення МК різних типів. *Наукова новизна*. Встановлено, що конструкції різного призначення але однакового конструктивного (технологічного) типу мають близькі

питомі технологічні показники і, відповідно, можуть бути апроксимовані єдиними математичними залежностями. Підгрунтям для цього є схожа природа чинників зовнішнього середовища експлуатації, зокрема навантаження та впливи, що закладені у норми та правила, за якими проєктують МК у різних галузях промисловості. *Практична значимість*. Розроблена інженерна методика дозволяє вже на передпроєктному чи доконтрактному етапі прогнозувати конструктивно-технологічні показники та ресурси потрібні для виконання перспективних замовлень, зменшуючи ступінь невизначеності вартості виконання замовлення.
Ключові слова: методика; зварні конструкції; 3D моделювання; конструктивно-технологічні показники; апроксимація.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Важливу науково-прикладну задачу підвищення ефективності управління підприємством по виготовленню МК, скорочення тривалості та ступеню невизначеності ціни реалізації замовлення на етапах передпроєктного пошуку чи інжинірингової підготовки виробництва можна вирішувати шляхом створення розрахункової методики визначення ресурсів проєкту на доконтрактному етапі. Зазвичай на даному етапі замовник надає обмежений обсяг інформації, що може бути зв'язано як з небажанням розкриття комерційної таємниці до підписання контракту, так і з недостатньою визначеністю технічних параметрів майбутніх МК на початкових стадіях проєктування. Однак поряд з цім від коректності наданих попередніх оцінок зазвичай залежить не тільки рішення щодо отримання замовлення але і економічна доцільність його виконання, тобто можливий прибуток або збитки.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Конструктивні та технологічні показники для конструкцій відповідного призначення визначаються діючими галузевими нормами та правилами проєктування [1] та залежать від очікуваної вартості встановлюваної замовником.

Кількісні конструктивно-технологічні показники зварного виробу (кількість деталей, площа конструкції, маса листового і профільного прокату, наплавленого металу, довжина різу, зварних швів та т. ін.) для МК різних типів як функції від їх ваги дозволяють прогнозувати вказані показники нового замовлення вже на початкових етапах проєктування на підставі вже відомої контрактної маси [2].

Такий підхід можна використовувати також, коли окрім призначення відомі тільки габаритні розміри майбутніх МК і потрібно визначити їх масу та кількісні значення конструктивно-технологічних показників в залежності від об'ємного (кубічного) модуля. При цьому необхідне значення кубічного модуля визначається з використанням габаритних розмірів МК.

Необхідне значення кубічного модуля можна визначити за відомими габаритними розмірами МК та потенційно описати загальними математичними залежностями.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Визначення конструктивних та технологічних показників МК шляхом вимірювання реальних виробів чи з використанням паперових або електронних креслень досить трудомісткий шлях, тому доцільно виконувати аналіз по детальних 3D моделях, які зазвичай за геометрію ідентичні реальним МК та доступні для аналізу.

Однак за відсутності відповідного досвіду розробка методики використання таких 3D моделей і визначення на їх основі показників зварної металоконструкції являє собою актуальне завдання.

При цьому встановлення взаємозв'язку між конструктивно-технологічними показниками зварних МК різної номенклатури та призначення, відомості по яких носять неповний характер та належать до сфер теорії споруд та оптимального проєктування [1], має важливе практичне значення.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета даного дослідження полягає у розробці інженерної методики визначення конструктивно-технологічних показників зварних металоконструкцій з використанням їх 3D моделей для створення узагальнених емпіричних залежностей.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі використані методи статистичного аналізу даних (конструктивно-технологічних показників) отриманих шляхом комп'ютерного 3D моделювання реальних зварних металоконструкцій.

Об'єктом дослідження є зварні МК широкої номенклатури (балки, ферми, пласкі та об'ємні секції) різного призначення (будівельні, суднові, та гідротехнічні споруди).

Предмет дослідження – закономірності взаємозв'язку між різними конструктивно-технологічних показниками досліджених типів зварних МК.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Суть розробленої інженерної методики полягає у визначенні прогнозованих потрібних ресурсів для майбутніх замовлень МК на підставі узагальнених емпіричних залежностей конструктивно-технологічних показників раніше виготовлених зварних МК різних типів, отриманих шляхом аналізу їх 3D моделей.

Для визначення узагальнених емпіричних залежностей конструктивно-технологічних показників раніше виготовлених зварних МК різних типів було виконано їх розподіл МК по групах за функціональним призначенням, конструктивною схемою, геометричною формою, характером навантаження тощо, як прийнято [3]. Всі МК, що виготовляють на заводі-виконавці замовлення (відправні марки), були поділені згідно за рівнем складності на деталі та складальні одиниці: вузли, секції, блоки, корпуси, споруди.

Статистичні данні по різних за складністю МК, що зібрані та проаналізовані авторами (рис. 1), наочно ілюструють встановлену закономірність: зі збільшенням об'єму описаного навколо конструкції прямокутного паралелепіпеду зростає її маса, однак при переході від конструкцій простих типів – пласких або гнутих деталей чи профілю до складних зварних вузлів, секцій та блоків спостерігається зменшення відношення маси до об'єму («щільності») конструкцій. Це може бути пов'язано зі схожою природою чинників зовнішнього середовища експлуатації (навантаження та впливи) що покладені у чинні в різних галузях норми та правила, за якими проєктують МК.

Таким чином, встановлено, що конструкції різного призначення але однакового рівня складності мають близькі питомі технологічні показники і, відповідно, можуть бути апроксимовані єдиними математичними залежностями у межах спільної розрахункової методики.

Розроблена методика передбачає послідовну реалізацію наступних кроків.

1. Вибір зварних конструкцій різного призначення, групування їх за типами, розмірами та теоретичною масою для створення геометрично ідентичних 3D моделей. У даному досліджені загалом було розроблено більш ніж 5400 об'ємних моделей деталей та конструкцій різних типів: двотаврові балки, зв'язки, ферми, ортотропні плити, об'ємні балки, тощо теоретичною масою від 0,8 до 43 850 кг (табл. 1). Вихідні дані отримані протягом останніх 3 років на заводі по виготовленню МК, ТОВ «ВК «Автострада».

2. Визначення за 3D моделями основних показників МК:

– геометричних (габаритні розміри: довжина – Д, ширина – Ш, висота – В). При визначені розмірів слід керуватися умовою: Д ≥ Ш ≥ В та принципом: Д – найбільший розмір, визначений вздовж конструкції, В – найменший розмір конструкції, визначений ортогонально вектору, що паралельний найбільшому габаритному розміру, Ш – найбільший розмір, що одночасно ортогональний до векторів, які паралельні до найбільшого та найменшого розмірів;

– конструктивно-технологічних (об'єм описаного прямокутного паралелепіпеда – кубічний модуль – VMK, маса – MMK, площа зовнішньої поверхні – SMK, довжина зварних швів – $L_ш$, маса наплавленого металу – $M_{н.м}$ тощо).

3. Побудова взаємозалежностей конструктивно-технологічних показників за умови, що квадрат коефіцієнта кореляції Пірсона (коеф. детермінації) для двох масивів даних R^2 має бути найбільшим. За прийнятої умови у даному дослідженні перевагу віддавали лінійній апроксимації як більш зручній для практичного використання (рис. 2).

4. Визначення мінімально необхідного обсягу вибірки за кожним конструктивно-технологічним показником. Необхідний обсяг вибірки, який забезпечує її кількісну репрезентативність, визначали виходячи з умови: вибіркове середнє значення має відрізнятися від справжнього середнього значення генеральної сукупності на задану величину [4]. У цьому випадку мінімальний обсяг вибірки може оцінюватись за допомогою визначення довірчого інтервалу середнього значення. У даній роботі задавались довірчою ймовірністю 95 % та відхиленням вибіркового середнього значення від справжнього значення

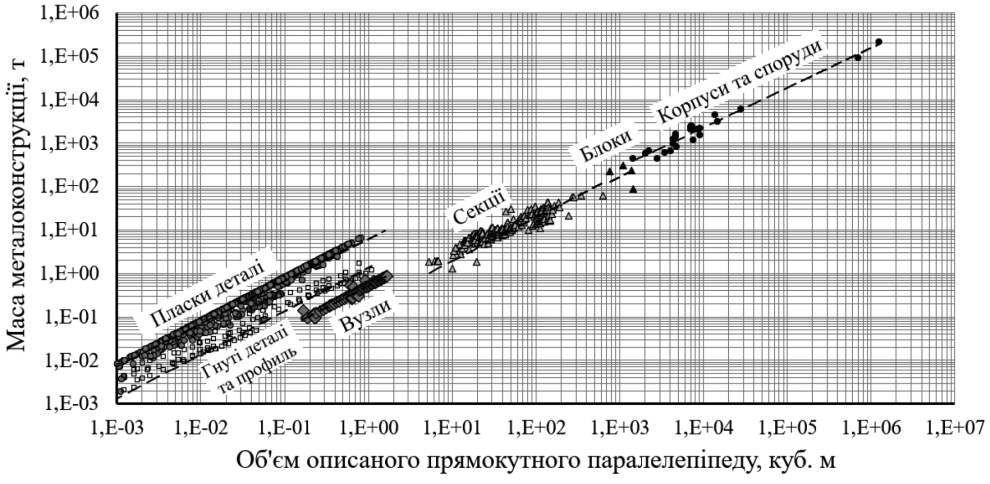
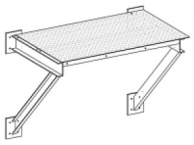
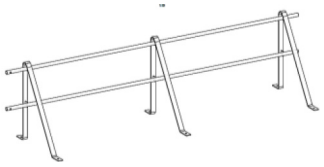
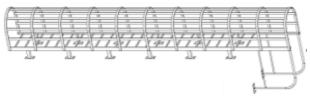
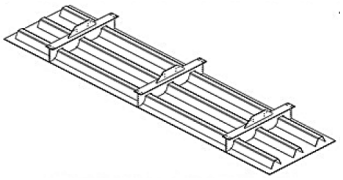
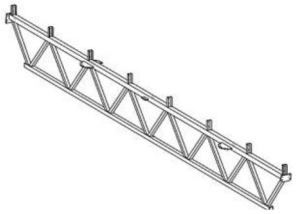
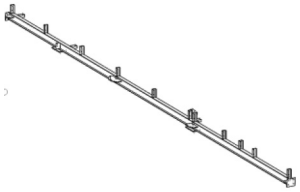
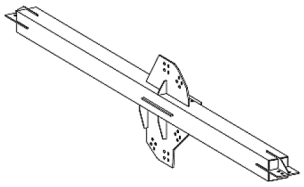
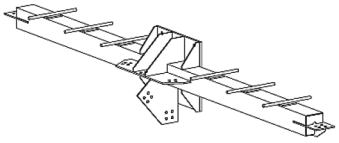
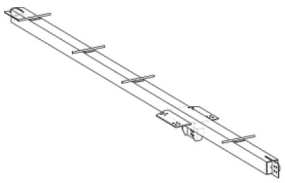
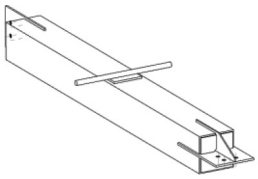
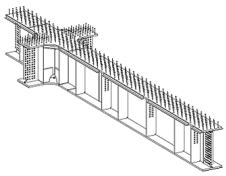
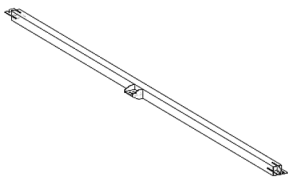
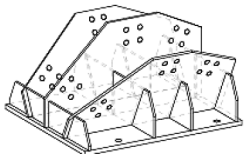
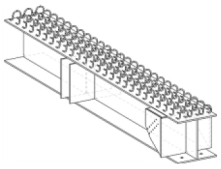
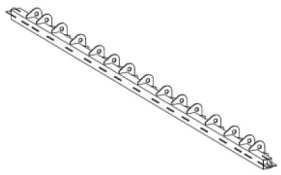
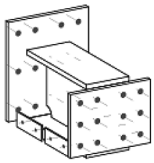
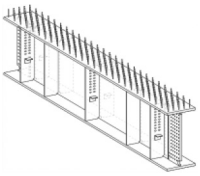
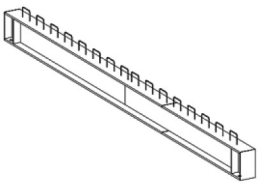
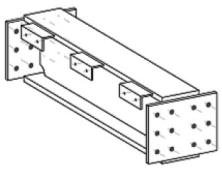
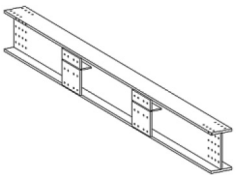
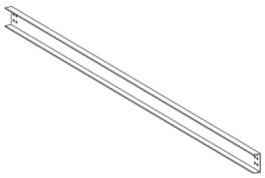
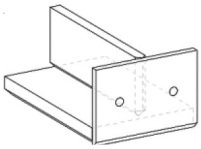
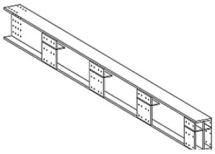
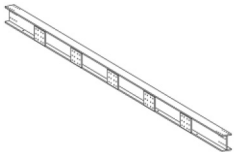
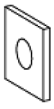
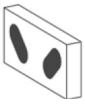
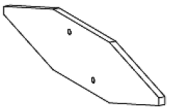


Рис. 1. Зв'язок між об'ємом описаного прямокутного паралелепіпеду та масою металоконструкцій різних типів

ISSN 3154-8245 (print), 3154-8253 (online)

Таблиця 1. Зовнішній вигляд конструкції в залежності від пропонованого показника $M_{МК}/V_{МК}$ та відношення Д/Ш

$M_{МК}/V_{МК}$, кг/м³	Зовнішній вигляд конструкції		
	Відношення довжини МК до її ширини		
	≤5 (1–5)	5–20	≥20 (20–90)
10–50			
60–140			
150–200			
300–500			
600–800			
900–1100			
1200–1500			
1600–3000			
4000–7800			

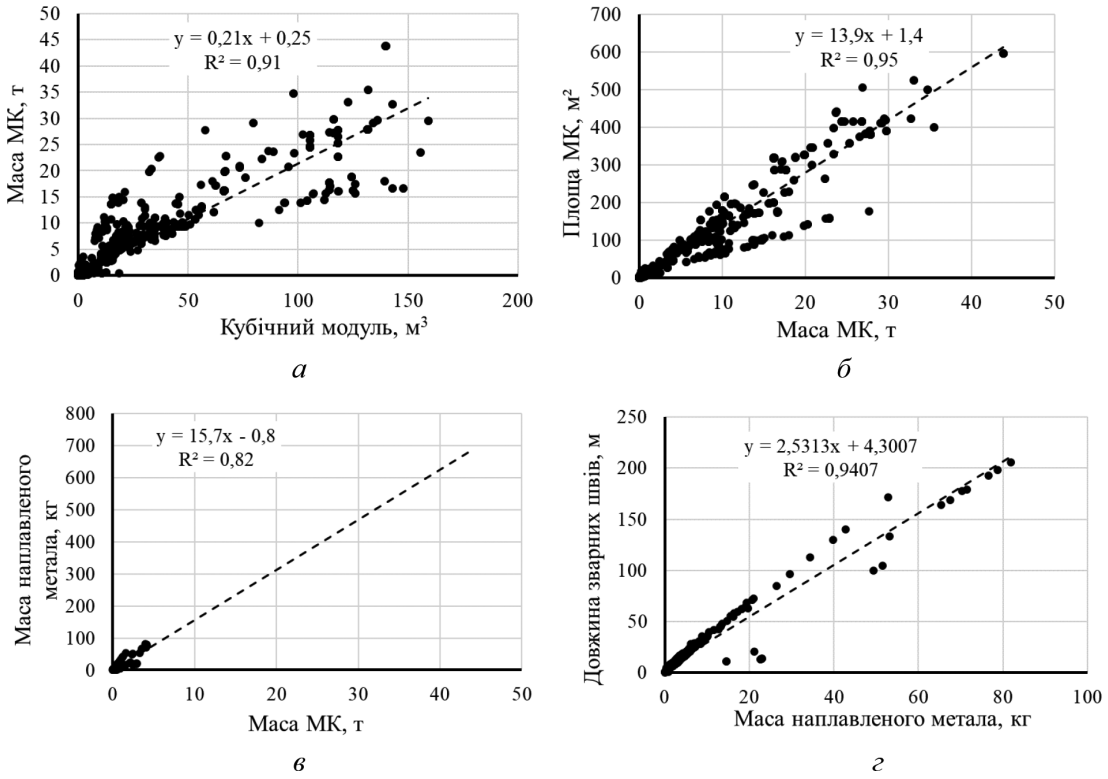


Рис. 2. Апроксимаційні залежності конструктивно-технологічних показників МК за корпусообробним, складально-зварювальним та ізоляційно-малярним виробництвами: *а* – маса МК в залежності від кубічного модулю; *б* – площа МК в залежності від її маси; *в* – маса наплавленого металу в залежності від маси МК; *г* – довжина зварних швів в залежності від маси наплавленого металу

середнього результату не більше ніж на 10 %. Так, визначений мінімальний обсяг вибірки для деяких конструктивно-технологічних показників становить: VMK – 4220, MMK – 3204, SMK – 3078, Мн.м. – 1086.

5. Порівняння різних МК між собою за основними показниками. Для цього можна використовувати різні прийоми. Авторами запропоновані показники MMK/VMK (кг/м^3) та відношення Д/Ш. Для аналізованої вибірки показник MMK/VMK знаходиться у діапазоні від 10 до 7850. Верхня межа діапазону відповідає щільності матеріалу конструкції (сталі). Для спрощення практичного використання усі МК були поділені на три групи за відношенням MMK/VMK та на три групи за відношенням Д/Ш. Таким чином було отримано дев'ять поєднань, кожне з яких містило приблизно 1/9 від загальної кількості МК (табл. 2). Розбиття на групи дозволяє збільшити точність апроксимації для кожного поєднання у порівнянні з апроксимацією загального масиву даних.

Таблиця 2. Апроксимаційні залежності конструктивно-технологічних показників та R^2 від $M_{МК}/V_{МК}$ та Д/Ш

MMK/VMK, кг/м^3		Відношення Д/Ш					
		≤5		5–20		≥20	
До 400	MMK	$184{,}7V_{МК} + 933{,}9$	0,84	$233{,}7V_{МК} + 36{,}3$	0,97	$219{,}9V_{МК} + 14{,}8$	0,92
	SMK	$0{,}015M_{МК} + 2{,}1$	0,95	$0{,}014M_{МК} + 2{,}2$	0,99	$0{,}017M_{МК} + 2{,}7$	0,93
	$M_{н.м}$	$0{,}017M_{МК} + 0{,}6$	0,99	$0{,}016M_{МК} + 1{,}4$	0,81	–	–
	$L_ш$	$3{,}2M_{н.м} + 2{,}9$	0,99	$2{,}5M_{н.м} + 7{,}7$	0,97	–	–
400–900	MMK	$482{,}9V_{МК} + 107{,}0$	0,96	$657{,}9V_{МК} + 41{,}3$	0,95	$543{,}4V_{МК} + 44{,}2$	0,91
	SMK	$0{,}007M_{МК} + 2{,}6$	0,94	$0{,}007M_{МК} + 4{,}4$	0,95	$0{,}02M_{МК} + 0{,}8$	0,97
	$M_{н.м}$	$0{,}016M_{МК} + 2{,}2$	0,93	$0{,}012M_{МК} + 0{,}6$	0,97	–	–
	$L_ш$	$0{,}55M_{н.м} + 11{,}3$	0,91	$0{,}8M_{н.м} + 14{,}9$	0,93	$3{,}9M_{н.м} + 2{,}1$	1
Більше 900	MMK	$954{,}9V_{МК} + 63{,}3$	0,96	$926{,}1V_{МК} + 36{,}4$	0,99	$1023{,}9V_{МК} + 11{,}5$	0,95
	SMK	$0{,}009M_{МК} + 0{,}95$	0,91	$0{,}007M_{МК} + 1{,}4$	0,99	$0{,}018M_{МК} + 1{,}0$	0,86
	$M_{н.м}$	$0{,}014M_{МК} + 0{,}75$	0,99	$0{,}013M_{МК} + 0{,}37$	0,99	–	–
	$L_ш$	$0{,}7M_{н.м} + 4{,}0$	0,98	$0{,}7M_{н.м} + 4{,}9$	0,99	$3{,}5M_{н.м} + 2{,}4$	0,98

ISSN 3154-8245 (print), 3154-8253 (online)

З використанням розробленої методики були визначені конструктивно-технологічні показники для конструкції за заготівельним, складально-зварювальним та ізоляційно-малярним видами виробництва.

Таким чином, проведені дослідження та розроблена методика дозволяють заводу-виконавцю укрупнено визначати, з урахуванням наявних можливостей певного виду виробництва, потрібні ресурси для реалізації перспективного проєкту з виготовлення зварних металоконструкцій.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Алгоритм використання розробленої методики відповідає схемі, наведеної на рис. 3. При цьому, у залежності від характеру вхідної інформації, можливі два варіанти розрахунку конструктивно-технологічних показників МК для вибраної групи виробів.

Варіант 1. Розрахунок показників МК, коли відомі призначення та габаритні розміри майбутнього виробу.

Крок 1. Визначення групи, до якої належить замовлена МК.

Крок 2. За габаритними розмірами об'єкту виробництва розраховується кубічний модуль VMK;

Крок 3. За значенням кубічного модуля розраховуються конструктивно-технологічні показники металоконструкції: маса MMK, площа SMK, довжина зварних швів $L_ш$ та маса наплавленого металу $M_{н.м}$.

Крок 4. За розрахованими конструктивно-технологічними показниками визначаються, з використанням нормативних документів, витрати матеріалів,

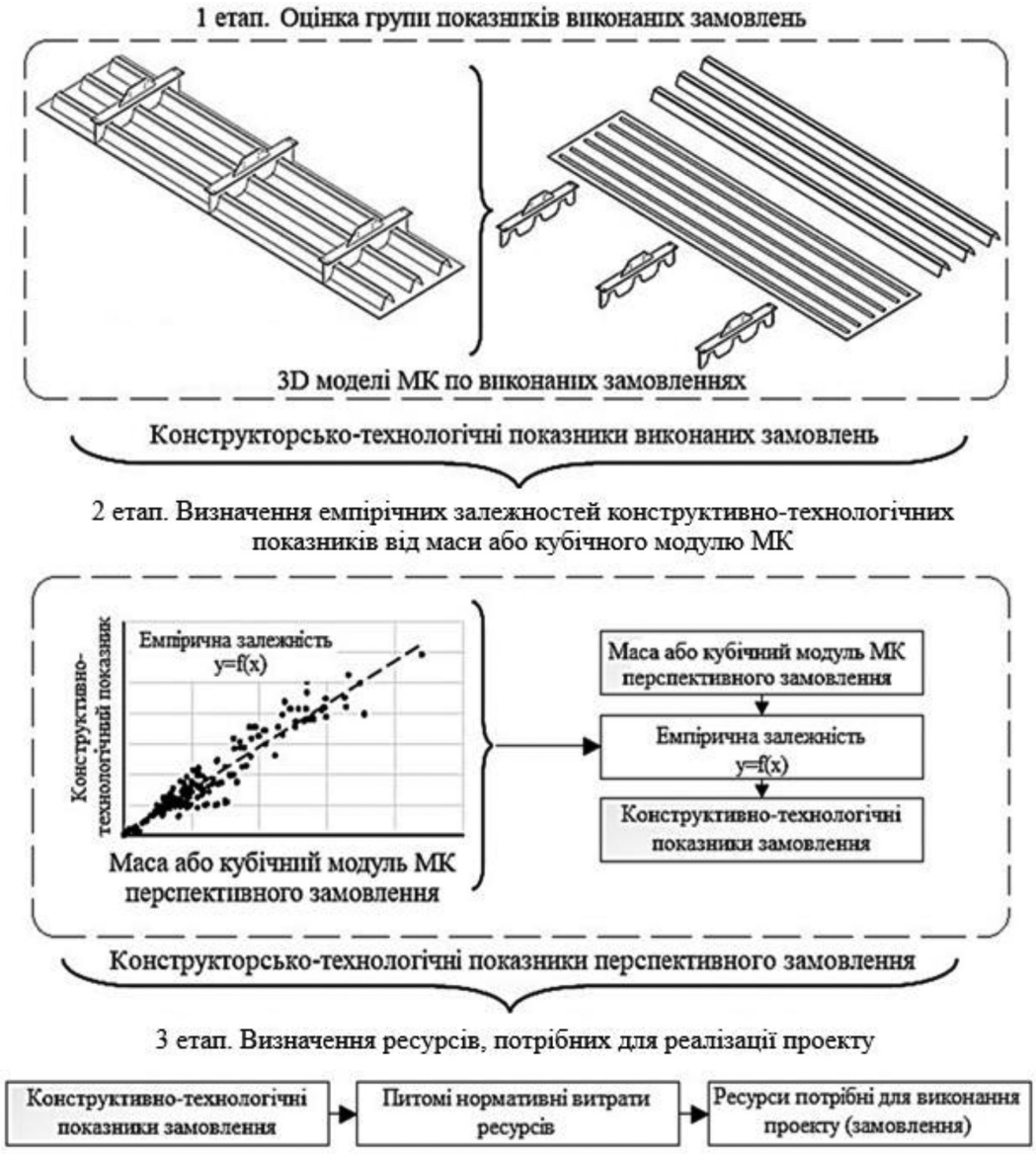


Рис. 3. Зміст етапів та послідовність дій за розробленою інженерною методикою використання 3D моделей для визначення конструктивно-технологічних показників зварних металоконструкцій

трудомісткість основних операцій – складання, зварювання, фарбування та допоміжних операцій – очищення, зачищення, знежирення тощо.

Варіант 2. Відрізняється від попереднього тим, що в умові замість відомих габаритних розмірів майбутнього виробу використовується значення його маси.

Далі, за масою розраховуються конструктивно-технологічні показники SMK, $L_ш$, $M_{н.м}$ і, після цього, відповідні витрати матеріалів та трудомісткість операцій.

Розроблена методика дозволяє завдяки використанню 3D моделей ідентичних реальним металоконструкціям автоматизувати та суттєво прискорити процес збору та обробки даних порівняно з існуючими підходами що використовують 2D креслення у паперовому чи електронному вигляді.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена інженерна методика дозволяє вже на передпроєктному чи доконтрактному етапі виконання проєкту перспективних замовлень прогнозувати потрібні конструктивно-технологічні показники зварних металоконструкцій та ресурси, зменшуючи ступінь невизначеності оцінки.

2. Питомі технологічні показники зварних металоконструкцій різного призначення, але однакового конструктивного (технологічного) типу, отримані на підставі їх 3D моделей, можуть бути описані єдиними апроксимаційними залежностями.

3. Для менеджменту підприємства по виробництву металоконструкцій пропонована розрахункова методика використання 3D моделей зварних виробів слугує складовою частиною системи підтримки прийняття управлінських рішень на етапах підготовки виробництва і виготовлення перспективних замовлень.

Під час підготовки статті інструменти штучного інтелекту не використовувалися.

REFERENCES

[1] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia [Steel structures. Design standards]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2014. 205 p. [in Ukrainian].

[2] Simutienkov, I. V., Dragan S. V. (2023). Kontseptual′ni osnovy stvorennya funktsional′noyi modeli kompleksu korpusnykh vydiv vyrobnytstva sudnobudivnoyi verfi. [Conceptual Foundations for Creating a Functional Model of the Hull Production Complex at a Shipbuilding Yard]. Collection of scientific works of the Ukrainian National University. no. 4. pp. 135–144. http://znp.nuos.mk.ua/4-2023. [in Ukrainian].

[3] Engel, H. (2007). Tragsysteme = Structure systems. Hatje Cantz. [in English].

[4] Herasymenko, S. S., Holovach, A. V., Yerina, A. M., Kozyrev, O. V., Kuyan, S. M., Myronov, O. M.,... & Fedorchenko, A. V. (2000). Statystyka [Statistics]. KNEU. 467 p.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. К. : Мінрегіон України, 2014. 205 с.

[2] Сімутєнков І. В. Концептуальні основи створення функціональної моделі комплексу корпусних видів виробництва суднобудівної верфі / І. В. Сімутєнков, С. В. Драган // Збірник наукових праць НУК. 2023. № 4. С. 135–144. URL: http://znp.nuos.mk.ua/4-2023

[3] Engel H. Tragsysteme = Structure systems. Ostfildern: Hatje Cantz, 2007. 352 p.

[4] Статистика / С.С. Герасименко та ін. К., КНЕУ, 2000. 467 с.

© Сімутєнков І. В., Драган С. В.

Дата першого надходження статті до видання: 14.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)