
БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

УДК 624.01

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.6.18>

ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Перельмутер А.В. – доктор технічних наук,
старший науковий співробітник, головний науковий співробітник
НВТ «СКАД Софт»

ORCID ID: 0000-0001-9537-2728

Scopus Author ID: 6602444316

Юрченко В.В. – доктор технічних наук, професор,
професор кафедри металевих та дерев'яних конструкцій

Київського національного університету будівництва та архітектури

ORCID ID: 0000-0003-4513-809X

Scopus Author ID: 25637856200

Web of Science Researcher ID: AAG-3365-2019

У статті висвітлено проблему використання методів оптимізації конструкцій інженерами, які практикують. Розглянуто сфери ефективного застосування методів оптимізації під час проектування будівельних конструкцій: розробку будівельних конструкцій принципово нового типу, проектування споруд для використання у незвичайних умовах, удосконалення багатосерійних конструкцій, а також проектування об'єктів дуже високої одичної вартості.

Обґрунтовано доцільність постановки та розв'язку задач оптимального проектування металевих конструкцій, виготовлених із холодногнутих профілів. Для металевих конструкцій, що виготовляються з застосуванням тонкостінних холодногнутих профілів, основним сенсом рішення задач оптимізації є їхня висока повторюваність. Такі конструкції стали популярними у будівництві малоповерхових комерційних, легких промислових та сільськогосподарських споруд з невеликими прольотами, а їх виробництво побудовано на принципах виготовлення масового індустріального продукту.

Наведено постановки задач пошуку оптимальних проектних рішень стержневих конструкцій із холодногнутих профілів. Сформульовано задачу оптимізації розмірів поперечних перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів, задачу пошуку оптимальної форми холодногнутого профілю, задачу побудови оптимального сортаментного ряду холодногнутих профілів заданого типу, а також задачу пошуку оптимальних параметрів стержневих конструкцій каркасів будівель, виготовлених із холодногнутих профілів.

Запропоновано генетичні алгоритми як метод розв'язку задач оптимального проектування конструкцій із холодногнутих профілів. Наведено огляд праць у галузі оптимального проектування стержневих конструкцій із холодногнутих профілів.

Ключові слова: оптимізація, холодногнутий профіль, стержнева система, генетичний алгоритм.

Perelmuter A.V., Yurchenko V.V. On the expediency and formulation of searching problems for optimal design solutions of steel structures made from cold formed profiles

The problem of using structural optimization methods by practicing engineers has been considered by the paper. Areas of the effective application of optimization methods in the design procedures for building structures have been also discussed. The following areas have been considered: development of building structures of a fundamentally new type, design of building devoted to operation in unusual conditions, multi-series building structures improvement, as well as the design of building objects with very high unit value.

The expediency of statement and solving the optimal design problems for steel structures made of cold-formed profiles has been substantiated. For steel structures made from thin-walled cold-formed profiles, the main meaning to solve optimization problems is their high repeatability. Such building structures have become popular for the construction of low-rise commercial, light industrial and agricultural buildings with small spans, and their production is based on the principles of mass production of industrial products.

Problem formulations relating to searching for optimum design decisions of steel structures made from cold-formed profiles have been presented. The problem of cross-sectional size optimization of structural members made from cold-formed profiles, the problem of shape optimization of cold-formed profile, the problem of constructing the optimal range of cold-formed profiles of a given shape, and, finally, the parametric optimization problem for structural system made from cold-formed profiles have been formulated.

Genetic algorithms have been proposed as a method to solve the formulated optimization problems for building structures made from cold-formed profiles. A brief overview of the publications in the field of optimal design of steel structures made from cold-formed profiles has been also presented.

Key words: optimization, cold-formed profile, steel structure, genetic algorithm.

ВСТУП

Питання оптимального проектування будівельних конструкцій здавна привертають увагу дослідників. Активно вони почали вирішуватися з другої половини ХХ ст. завдяки досягненням теорії прийняття рішень і теорії дослідження операцій, а також у зв'язку з поширенням обчислювальної техніки. Це дозволило розробити відповідні методи, у доступні терміни прораховувати численні варіанти проектних рішень і вирішувати складні математичні задачі. Наразі теорія оптимального проектування є одним із розділів механіки деформованого твердого тіла, що розвивається. Кількість публікацій у цій галузі наразі вимірюється багатьма сотнями і продовжує постійно збільшуватися. Стають дедалі різноманітнішими постановки задач оптимального проектування та методи їх розв'язку. Оптимізаційні підходи в деякому сенсі розглядаються як майже обов'язкові. Так, у роботі [1] зазначено: «Етика нашої професії сьогодні не дозволяє проектувати конструкції без оптимізації».

Прикладні задачі оптимального проектування металевих конструкцій формуються як задачі пошуку таких значень невідомих параметрів системи, що забезпечують найменше (або найбільше) значення вибраного критерію оптимальності в межах допустимих проектних рішень.

У більшості робіт із оптимізації металевих конструкцій розглядаються так звані параметричні задачі, обмежені попереднім визначенням конструктивної форми за можливості зміни її параметрів. Базуючись на виборі конструктивного рішення об'єкта, прийнятого на стадії технічного проекту, оптимізація заданої конструктивної форми здійснюється варіюванням її параметрів за заданих конструктивних форм, умов закріплення її на опорах, характеру з'єднання елементів у вузлах та чинних навантажень.

Математична модель задачі оптимального проектування конструкцій об'єднує критерій якості, множину незалежних змінних проектування та обмеження, які відображають в загальному випадку нелінійні взаємозв'язки між ними. Вона формулюється, як правило, з урахуванням можливостей методу її розв'язку, що використовує той чи інший автор. Саме цим можна пояснити велике розмаїття моделей і методів розв'язку задач оптимального проектування конструкцій.

1. ЗАГАЛЬНІ МІРКУВАННЯ ЩОДО ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Проблема використання методів оптимізації конструкцій інженерами, які практикують. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють якщо не повністю, то значною мірою подолати труднощі, пов'язані зі складністю розв'язку задач оптимального проектування, і в більшості випадків отримати рішення розумно сформульованих задач оптимального проектування. А ось відсутність у промислових програмних продуктах, орієнтованих на будівельне проектування, опцій та процедур, пов'язаних із пошуком оптимальних проектних рішень, змушує задуматися про причини такого явища. Розробники програмних комплексів у галузі розрахунку та проектування будівельних конструкцій, безумовно, відгукнулися би на реальний ринковий попит щодо реалізації зазначених опцій, і якщо це не відбулося дотепер, то очевидно, що реальний попит досі явно не проявився.

Таким чином, постає питання: чому методика оптимального проектування за понад 50-річний термін існування не стала звичайним робочим інструментом проєктувальника, як, наприклад, метод скінченних елементів, що з'явився навіть дещо пізніше? Який чинник гальмує цей процес?

Слід зазначити, що такі питання лунають не вперше. Деякий огляд проблеми наведено у відомій праці [2], в якій автори дають відповіді на питання щодо неохочого використання методів оптимізації конструкцій інженерами, які практикують. При цьому автори серед інших міркувань зазначають, що оптимальні конструкції, отримані за допомогою детермінованої оптимізації, можуть мати недостатню надійність, оскільки оптимальне проектне рішення часто досягається у точці, яка лежить на межі допустимої ділянки пошуку, де одночасно перетинаються декілька обмежень-нерівностей, що може призвести до вичерпання несучої здатності конструкції одночасно за кількома критеріями. Окрім цього, у роботі [2] висловлюється думка про недостатню наближеність оптимальних проектних рішень до реальної практики проектування, що обумовлює невеликий попит на пошук оптимальних проектних рішень від інженерів, які практикують.

З метою наближення отримуваних оптимальних проектних рішень до реальної практики проектування до складу системи обмежень математичної моделі необхідно залучати додаткові обмеження, що описують, зокрема, умови конструювання, виготовлення та зведення. Наразі вибір конструктивної форми не спирається на чітко формалізовані наукові положення і багато в чому є актом, що більш наближений до мистецтва, ніж до науки. Й якщо розрахункові процедури, які реалізують статичний чи динамічний аналіз конструкції, базуються на добре розвинутих і формалізованих науковій основі (теорія пружності, теорія пластичності та механіка деформівного твердого тіла), то оптимізаційні процедури, які охоплюють важко формалізовані умови конструювання, такої основи не мають.

1.2. Сфери ефективного застосування методів оптимізації під час проектування будівельних конструкцій. Конструктивні рішення будівель і споруд, які зазвичай використовуються у проектній практиці, застосовувалися десятки тисяч

разів. Ця практика, яку можна розглядати в якості такого собі пошукового експерименту (можливо, погано організованого, але об'єктивно наявного), призвела до набору типових конструктивних форм, які досить важко істотно покращити. Така практика зазвичай добре досліджена, і рекомендації, що впливають з неї, наведені в технічній літературі [3; 4].

Зіставлення оптимальних проєктних рішень з рішеннями, отриманими на основі досвіду проєктування досліджуваного класу конструкцій, рідко вказує на економію, що перевищує одиниці відсотків. У тих випадках, коли розробники методів оптимізації говорять про більш значні ефекти, найчастіше з'ясовується, що в якості прикладу для порівняння був обраний свідомо невдалий варіант або ж оптимальне рішення ще потребує уточнення, оскільки під час оптимізації не були враховані деякі вимоги, які неможливо було формалізувати на етапі постановки задачі оптимізації.

На жаль, автори більшості робіт із оптимізації будівельних конструкцій розглядають добре вивчені та перевірені практикою проєктування конструкції. Якщо метою розгляду таких конструкцій є демонстрація того, що подолано небезпеку отримання вироджених або інших «патологічних» проєктних рішень, тоді такий підхід може вважатися виправданим. Але якщо метою є демонстрація ефективності оптимізаційного підходу, тоді їм слід було б розглянути зовсім інші конструкції та типи оптимізаційних задач.

На нашу думку, існують три основні сфери ефективного застосування методів оптимізації під час проєктування будівельних конструкцій, зокрема:

а) розробка будівельних конструкцій принципово нового типу або проєктування споруд для використання у незвичайних умовах. Природно, що в таких випадках майже неможливо спиратися на попередній досвід (через його відсутність). При цьому отримане оптимальне проєктне рішення, навіть у випадку, коли не повністю враховані деякі важко формалізовані умови, може бути гарним початковим наближенням до реального проєктного рішення;

б) удосконалення багатосерійних конструкцій, коли навіть незначна економія дає великий ефект через велику кількість повторювань. Тут слід звернути увагу на такі труднощі: умови застосування таких конструкцій можуть сильно варіюватися, ця обставина змушує вирішувати ще одну оптимізаційну задачу, пов'язану з розумною уніфікацією серійного рішення [5];

в) проєктування об'єктів дуже високої одиничної вартості, де навіть невелике зниження ваги помітно перекриває всі витрати, пов'язані з пошуком оптимального проєктного рішення, навіть тоді, коли ефект оптимізації порівняно невеликий.

2. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Для металевих конструкцій, що виготовляються з застосуванням тонкостінних холодногнутих профілів, основним сенсом рішення задач оптимізації є їх висока повторюваність. Такі конструкції стали популярними у будівництві малоповерхових комерційних, легких промислових та сільськогосподарських споруд із невеликими прольотами, а їх виробництво побудовано на принципах виготовлення масового індустріального продукту.

Вимоги, які висуваються до будівельних конструкцій із холодногнутих профілів за їх оптимального проєктування, враховуються комплексно за допомогою математичної моделі. Математична модель задачі оптимального проєктування конструкцій об'єднує критерій якості, множину незалежних змінних проєктування

та обмеження, які відображають у загальному випадку нелінійні взаємозв'язки між змінними. Рівень достовірності моделі визначимо відповідністю її структури нормативним вимогам і можливістю реалізації практичного досвіду проєктування цього класу конструкцій [6].

Змінні проєктування (невідомі параметри конструкції) перебувають у нелінійній залежності один від одного. Орієнтація на числові методи математичного програмування дозволяє зберегти загальноприйнятий підхід до проєктування і досить точно описати умови роботи конструкції в складі тонкостінної стержневої конструкції.

2.1. Оптимізація розмірів поперечного перерізу стержневого елемента з холодногнутого профілю. Характерною особливістю роботи тонкостінного стержневого елемента з холодногнутого профілю є можливість його закритичної роботи – здатність чинити опір зовнішнім навантаженням після втрати місцевої стійкості стиснутих елементів перерізу та/або після втрати стійкості форми перерізу, яка ототожнюється з втратою стійкості елемента жорсткості (що підкріплює полицки профілю) за згинальною формою його випинання [7]. З огляду на це задача параметричної оптимізації розмірів поперечного перерізу стержневого елемента з холодногнутого профілю може формулюватись як: *за заданої довжини стержневого елемента, заданих значень внутрішніх зусиль, що діють у розрахункових перерізах стержневого елемента, заданої товщини та довжини розгортки холодногнутого профілю, а також за заданого типу поперечного перерізу профілю визначити його оптимальні розміри за критерієм максимізації несучої здатності стержневого елемента з урахуванням його закритичної роботи та конструктивних вимог.*

У разі, коли в якості критерію оптимальності розглядається максимізація несучої здатності стержневого елемента, цілком очевидно, що в постановці задачі параметричної оптимізації необхідно розглядати обмеження на об'єм матеріалу (товщину та довжину розгортки профілю). Оскільки несуча здатність стержневих елементів конструкцій визначається здебільшого їхньою здатністю чинити опір втраті загальної стійкості, то в якості критерію оптимальності доцільно розглядати максимізацію несучої здатності саме на втрату загальної стійкості. Таким чином, у наведеній вище постановці задачі параметричної оптимізації оптимальні розміри профілю залежатимуть від довжини стержневого елемента.

У праці [8] розглядалася задача параметричної оптимізації розмірів поперечного перерізу С-подібного холодногнутого профілю, що працює в умовах центрального стиску. За критерій оптимальності брався критерій максимізації несучої здатності профілю на втрату загальної стійкості за центрального стиску, представлений у формі лінійної розгортки несучих здатностей, що враховують згинальне, крутильне та згинально-крутильне випинання стержневого елемента, визначені відповідно до нормативних вимог. Пошук оптимальних розмірів реалізований з урахуванням закритичної роботи тонкостінного холодногнутого профілю, що характеризується місцевою втратою стійкості та втратою стійкості форми перерізу. Результати виконаних оптимізаційних розрахунків дозволяють розробити рекомендації щодо оптимального розподілу матеріалу в перерізах несучих елементів досліджуваного класу конструкцій та служать базою для створення ефективних національних сортamentів стандартних гнутих профілів.

У праці [9] аналізувався вплив параметрів форми гнутих профілів на їх ефективність під час роботи на згин і на стиск. За критерій оптимальності автори брали відношення максимального згинального моменту, який здатний сприйняти

поперечний переріз у пружній стадії роботи сталі, до площі поперечного перерізу, що характеризує витрату матеріалу. Зображено та проаналізовано закономірності впливу ширини поясу та ширини одинарного відгину у С-подібних та Z-подібних холодногнутих профілях на ефективність їх роботи в умовах поперечного згину за різних товщин профілю та різних характеристик міцності сталі.

У роботі [10] проаналізовано результати розрахунку стійкості холодногнутого С-подібного профілю з висотою перерізу 250 і 300 мм, що працює в умовах центрального стиску. Авторами виявлено закономірність впливу розмірів профілю на ефективність перерізу та визначено найбільш ефективні параметри перерізів.

У статті [11] розглядалися холодноформовані тонкостінні балки із Z-подібним, С-подібним перерізом та перерізом у формі клоатоїди. Змінними проектування були розміри перерізів. Авторами подано короткий огляд оптимальних конструкцій тонкостінних балок із відкритими перерізами, описано геометричні характеристики трьох перерізів залежно від змінних проектування, сформульовано обмеження міцності, загальної та місцевої стійкості тонкостінних балок, що працюють в умовах поперечного згину.

2.2. Задачі пошуку оптимальної форми холодногнутого профілю. Важливим чинником, що ініціює рішення задач оптимізації, є наявність питання про пошук конфігурації холодногнутого профілю. Якщо для фасонного прокату це питання давно вирішене у металургійній промисловості та жорстко регламентується наявністю прокатного обладнання, то виробництво холодногнутих профілів має більше можливостей для їх створення. І ці можливості доцільно використовувати для пошуку найкращих рішень.

Якщо до цього додати, що навіть невеликий економічний ефект від покращення геометрії перерізу холодногнутого профілю значно збільшується завдяки його масовому застосуванню у каркасах будівель і споруд, то стане зрозумілою не тільки доцільність, але й перспективність рішення такої оптимізаційної задачі.

З огляду на особливості розрахунку та конструювання, а також з урахуванням практичного попиту задачу пошуку оптимальної форми холодногнутого профілю для стержневого елемента зазвичай формулюють як: *за заданої довжини стержневого елемента, заданих значень внутрішніх зусиль, що діють в його розрахункових перерізах, заданої товщини та довжини розгортки холодногнутого профілю визначити оптимальну форму та розміри поперечного перерізу профілю за критерієм максимізації його несучої здатності з урахуванням закритичної роботи, конструктивних вимог та обмежень на кількість кутів згину профілю.*

Дослідження авторів робіт [12; 13] були спрямовані на оптимізацію форми перерізу колони з холодноформованої сталі за максимізації її несучої здатності на дію поздовжньої сили стиску. У складі системи обмежень автори розглядали також обмеження на кількість роликів, за допомогою яких формується профіль. В результаті авторами були отримані нові оптимальні форми профілів, які можуть бути використані для розвитку нових видів комерційних продуктів.

У працях [14; 15] наведені математична модель та метод, що використовуються для оптимізації форми холодноформованих профілів. До складу системи обмежень автори додали обмеження, що описують умови виготовлення холодноформованих профілів. В якості критерію оптимальності розглянуто співвідношення маси перерізу профілю до його опору. Точність та працездатність запропонованого алгоритму перевірена його реалізацією для оптимізації опору перерізу із замкнутих холодногнутих профілів, симетричних стосовно двох головних осей інерції, для яких відомий аналітичний розв'язок.

2.3. Побудова оптимального сортаментного ряду холодногнутих профілів.

Технологія виготовлення холодноформованих профілів дозволяє отримувати профілі з заданим типом поперечного перерізу за варіації розмірів перерізу в широкому діапазоні. Внаслідок цього перед кожним виробником холодногнутого профілю на початку запуску виробництва постає завдання побудови їх оптимального сортаментного ряду.

У роботі [16] було доведено, що за побудови сортаментного ряду оптимальні розміри профілів у сортаменті залежать від конструктивної ролі стержневого елемента і є різними, наприклад, для балкових та колонних двотаврів. Адже у випадку балкових двотаврів за заданого об'єму матеріалу максимізації підлягає фактично момент опору перерізу, а у випадку колонних двотаврів – радіус інерції перерізу.

Якщо обмежитися розглядом стержневих несучих елементів із наперед заданим характером роботи у конструкції (балці, колоні), тоді задачу про побудову оптимального сортаментного ряду холодногнутих профілів із визначеним типом поперечного перерізу (наприклад, С- чи Z-подібним) можна звести до низки задач параметричної оптимізації розмірів поперечного перерізу стержневого елемента з холодногнутого профілю, формулювання яких наведено вище. При цьому тип поперечного перерізу та об'єм матеріалу (товщина і довжина розгортки профілю) є заданими константами, а варіюванню підлягають розміри поперечного перерізу профілю. В разі, якщо розглядається задача побудови оптимального сортаментного ряду для профілів, що будуть використовуватися у конструкції в якості балок, за критерій оптимальності беруть максимізацію несучої здатності стержневого елемента з холодногнутого профілю на дію згинального моменту. Якщо ж профілі будуть використовуватися в якості колон (переважно центрально-стиснутих), тоді за критерій оптимальності беруть максимізацію несучої здатності стержневого елемента на дію поздовжньої сили стиску. У складі системи обмежень необхідно обов'язково розглядати конструктивні вимоги, що описують обмеження технологічних ліній із виготовлення холодногнутих профілів.

Задача про побудову оптимального сортаментного ряду холодногнутих профілів із визначеним типом поперечного перерізу зводиться до ряду задач параметричної оптимізації розмірів поперечного перерізу стержневого елемента, якщо розглядати внутрішні зусилля, що діють у розрахункових перерізах стержневого елемента, як змінні вихідні дані задачі оптимізації. При цьому варіювання певного силового фактору (наприклад, згинального моменту в разі, коли розглядається задача пошуку оптимального сортаментного ряду для холодногнутих балок) може виконуватися відповідно до ряду чисел, побудованого на основі геометричної прогресії, де знаменник геометричної прогресії (коефіцієнт градації) може бути прийнятий як $\sqrt[3]{10} \approx 1.12$. Відносні перевитрати за такого коефіцієнта градації становитимуть 5,66% [16].

2.4. Оптимальне проєктування стержневих конструкцій із холодногнутих профілів. Використання холодногнутих профілів у конструкціях будівельних каркасів, порівняно з традиційними конструктивними рішеннями, які використовують фасонний прокат, має значно меншу історію. З'ясовано, що не завжди можна спиратися на досвід, накопичений під час проєктування конструкцій із прокатних профілів.

Самі властивості роботи тонкостінних стержнів, які працюють у більшості випадків у закритичній стадії роботи (після втрати місцевої стійкості та/або стійкості форми перерізу) [7], ставлять під сумнів можливість безпосереднього застосування відомих конструктивних рішень, що були знайдені для стержневих конструкцій, виготовлених із прокатних профілів.

Окрім того, використання вузлових з'єднань без застосування зварювання впливає на топологію стержневої системи, оскільки існує тенденція конструювати вузли з меншою кількістю елементів, що примикають до цих вузлів.

І ще одне важливе зауваження: розробка конструкції з використанням холодногнутих профілів (особливо за конструювання об'єктів масового призначення) може виконуватися з одночасним пошуком оптимальної форми холодногнутих профілів, які найкраще підходять до шуканої конструктивної схеми. Такого розширення можливостей немає під час використання прокатних профілів, тому можна сподіватися на досягнення більшого економічного ефекту.

З огляду на особливості розрахунку та конструювання, а також з урахуванням практичного попиту задачі параметричної оптимізації стержневих конструкцій будівель і споруд із холодногнутих профілів часто формулюють як [17]: *за заданої топології стержневої конструкції з холодногнутих профілів, типів поперечних перерізів її елементів, умов закріплення на опорах та схеми розрахункових навантажень визначити оптимальні параметри геометричної схеми, оптимальні значення зусиль попереднього напруження (за наявності) та оптимальні розміри поперечних перерізів її елементів з урахуванням закритичної роботи стержневих елементів, обмежень функціонального об'єму та конструктивних вимог.*

Вектор змінних проєктування містить розміри поперечних перерізів елементів стержневої системи, зусилля попереднього напруження (за наявності) та параметри геометричної схеми. За критерій оптимальності беруть визначений техніко-економічний показник конструкції: масу матеріалів, їх вартість, зведені витрати або інші детерміновані показники якості. Обмеження математичної моделі описують задані умови проєктування, які забезпечують необхідну несучу здатність та жорсткість як стержневої конструкції загалом, так і окремих елементів конструкції, а також конструктивні, архітектурні, технологічні та інші додаткові вимоги.

У праці [17] розглядалася задача параметричної оптимізації поперечної рами каркаса будівлі з решічастими несучими елементами, виконаними із холодногнутих профілів. Задача оптимізації формулювалася як задача пошуку оптимальних параметрів геометричної схеми рами та розмірів поперечних перерізів її наскрізних елементів за мінімізації маси металу або кошторисної вартості та задоволення системи обмежень, що відображала вимоги до забезпечення несучої здатності стержневих елементів рами і деформативності каркаса загалом, відповідно до вимог будівельних норм, з урахуванням обмежень функціонального об'єму та конструктивних вимог. При цьому вихідними даними були топологія і генеральні розміри стержневої системи, типи поперечних перерізів її елементів, умови закріплення на опорах та схема розрахункових навантажень. В межах запропонованої пошукової методології автором були сформульовані і розв'язані нові задачі пошуку оптимальної конструктивної форми великопрольотних поперечних рам каркасів будівель комплектного постачання, виготовлених із тонкостінних холодногнутих профілів, та виявлена їх техніко-економічна ефективність.

3. ГЕНЕТИЧНІ АЛГОРИТМИ ЯК МЕТОД РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Наведені вище міркування дозволяють обґрунтовано стверджувати доцільність використання методів оптимізації під час проєктування конструкцій із холодногнутих профілів і формулювання відповідних задач досліджень, які поєднують пошук не тільки оптимальної форми перерізів елементів стержневої системи, але й її оптимальної топології.

Для вирішення задач такого типу найчастіше використовуються методи, що реалізує цілеспрямований перебір скінченної множини варіантів проєктних рішень. До таких методів належать еволюційні методи, що формалізуються за допомогою генетичних алгоритмів та базуються на моделюванні генетичних процесів біологічних організмів [18] й еволюційного розвитку популяцій [19]. Теоретичні засади генетичного підходу до розв'язку задач оптимізації заклали та розвинули Дж. Голланд [20], Д. Гольдберг [19] і Л. Девіс [21]. Генетичні алгоритми є одними з сучасних методів структурної та параметричної оптимізації конструкцій, які дозволяють отримати близькі до глобального оптимуму проєктні рішення і знаходять дедалі більше застосування на практиці [22].

Генетичний алгоритм використовує деяке кодування множини шуканих параметрів системи замість значень цих параметрів, тому його можна застосовувати для розв'язування задач дискретної оптимізації. При цьому шукані параметри задають як на числових множинах, так і на скінченних множинах довільної природи. Стратегія пошуку в таких алгоритмах побудована на обчисленні та порівнянні значень деякої функції оцінки проєктних рішень в точках простору пошуку, що розглядаються. Водночас вимоги до унімодальності, неперервності, диференційованості такої функції не висуваються. Це обумовлює можливість використання генетичного алгоритму для широкого класу функцій, зокрема для функцій, які не мають аналітичного опису.

Робота [23] присвячена огляду праць, в яких для реалізації задач оптимального проєктування конструкцій було використано генетичні алгоритми. Автор показав, що, попри обмеженість у застосуванні генетичних алгоритмів через значний обсяг прямих розрахунків напружено-деформованого стану системи, цей метод знаходить дедалі більше поширення на практиці.

Цикл праць [24; 25] присвячений питанню оптимального проєктування ферм за допомогою генетичного алгоритму. Змінними параметрами ферм є площі поперечних перерізів стержнів та координати вузлів ферм. До системи обмежень включені обмеження міцності стержнів та переміщень вузлів, а також рівняння рівноваги методу скінченних елементів. На численних прикладах показано ефективність застосування генетичних алгоритмів для цього класу конструкцій.

У роботах [26; 27] наведено застосування генетичних алгоритмів для розв'язку задач оптимізації ферм за критерієм мінімуму ваги з урахуванням обмежень міцності, стійкості та жорсткості. Змінні проєктування задачі оптимізації включають кількість стержнів (інформацію про наявні стержні), площі поперечних перерізів елементів та координати вузлів ферми.

Так, наприклад, у роботі [28] розглянуто задачу оптимізації двосхилої поперечної рами, що використовується в складі легкого каркаса будівлі промислового або сільськогосподарського призначення. Як неперервні змінні проєктування розглядалися крок поперечних рам та ухил ригеля рами, а як дискретні змінні проєктування – розміри поперечних перерізів її несучих елементів. Для мінімізації вартості поперечної рами будівлі автори використали генетичний алгоритм із дійсним кодуванням змінних проєктування.

У роботі [29] була розглянута задача оптимізації двосхилих симетричних ферм покриття житлових будинків, виконаних із холодногнутих профілів. В якості змінних проєктування розглядалися нахил покрівлі, конфігурація (топология) ферми та координати вузлів ферми. Критерієм оптимальності автори обрали максимізацію сумарного опору елементів ферми за міцністю на дію поздовжньої сили за одночасної мінімізації ваги ферми. До системи обмежень додали обмеження несучої здатності елементів ферми, сформульовані для першої групи граничних

станів, а також обмеження переміщень вузлів ферми, сформульовані для другої групи граничних станів. Для пошуку оптимальних проектних рішень конструкцій автори використали генетичний алгоритм.

Ефективний пошуковий метод оптимізації, що базується на гібридному генетичному алгоритмі, запропонований авторами досліджень [30; 31]. Початкове наближення, що локалізується в ділянці екстремуму функції мети, знаходять з використанням генетичного алгоритму, а згодом розташування екстремуму уточнюють за допомогою градієнтного методу [32; 33]. У такому разі пришвидшується збіжність ітеративного процесу пошуку та підвищується точність розв'язку. До того ж у межах числового алгоритму, розробленого на основі градієнтних методів, можна використати аналіз чутливості, що є корисним інструментом у процесі пошуку оптимального проектного рішення [34].

ВИСНОВКИ

У статті висвітлено проблему використання методів оптимізації конструкцій інженерами, які практикують, та розглянуто сфери ефективного застосування методів оптимізації під час проектування будівельних конструкцій. Обґрунтовано доцільність постановки та розв'язку задач оптимального проектування будівельних конструкцій із холодногнутих профілів.

Наведено постановки задач пошуку оптимальних проектних рішень стержневих конструкцій із холодногнутих профілів. Сформульовано задачу оптимізації розмірів поперечних перерізів стержневих елементів із холодногнутих профілів, задачу пошуку оптимальної форми холодногнутого профілю, задачу побудови оптимального сортаментного ряду холодногнутих профілів заданого типу, задачу пошуку оптимальних параметрів стержневих конструкцій каркасів будівель із холодногнутих профілів. Запропоновано генетичні алгоритми як метод розв'язку задач оптимального проектування конструкцій із холодногнутих профілів. Наведено огляд праць у сфері оптимального проектування конструкцій із холодногнутих профілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Mungan I. Structural engineering and structures from antiquity to the present. *Proceedings IASS Symposium*. 2001. P. 1–3.
2. Elishakoff I., Ohsaki M. Optimization and Anti-Optimization of Structures under uncertainty. London : Imperial College Press, 2010. 402 p.
3. Никонов Н.Н. Большепролетные покрытия: анализ и оценка : учебное пособие для студентов вузов. Москва : Издательство АСВ, 1998. 432 с.
4. Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономических металлических конструкций. Москва : Стройиздат, 1964. 359 с.
5. Перельмутер А.В. Выбор оптимальных параметров для ряда однотипных объектов. *Теория и практика металлических конструкций : сборник трудов международной конференции*. 1997. Том 2. С. 10–13.
6. Пермяков В.А. Обобщенная задача оптимального проектирования стержневых систем. *Актуальные проблемы строительства* : доклады II международной конференции. 1990. С. 81–85.
7. Юрченко В.В., Перельмутер А.В. Несуча здатність стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів. Київ : Каравела, 2020. 308 с.
8. Bilyk S.I., Yurchenko V.V. Size optimization of single edge folds for cold-formed structural members. *Strength of Materials and Theory of Structures* : Scientific-and-technical collected articles. 2020. Issue 105. P. 73–86. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.105.73-86.
9. Кикоть А.А. Влияние ширины поясов и отгибов в сечениях С- и Z-образных стальных тонкостенных холодногнутих профилей на эффективность работы в условиях изгиба. *Ползуновский вестник*. 2011. № 1. С. 70–75.

10. Галкина А.А., Кикоть А.А. Влияние параметров сечения на эффективность центрально-сжатого тонкостенного холодногнутого С-образного профиля. *Ползуновский альманах*. 2017. № 2. С. 95–98.
 11. Lewinski J., Magnucki K. Optimization of anti-symmetrical cross-sections of cold-formed thin-walled beams. *Journal of theoretical and applied mechanics*. 2009. Vol. 47. P. 553–571.
 12. Leng J.Z., Guest J.K., Schafer B.W. Shape optimization of cold-formed steel columns. *Thin Walled Structures*. 2011. Vol. 49. P. 1492–1503.
 13. Leng J.Z., Li Z.J., Guest J.K., Schafer B.W. Shape optimization of cold-formed steel columns with fabrication and geometric end-use constraints. *Thin Walled Structures*. 2014. Vol. 85. P. 271–290.
 14. Wang B. et al. Shape Optimisation of ColdFormed Steel Profiles with Manufacturing Constraints. Part I: Algorithm. *22nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 2014. № 2.
 15. Wang, B. et al. Shape Optimisation of ColdFormed Steel Profiles with Manufacturing Constraints. Part II: Applications. *22nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 2014. № 3.
 16. Пермяков В.А., Перельмутер А.В., Юрченко В.В. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций. Київ : ТОВ «Видавництво «Сталь», 2008. 538 с.
 17. Юрченко В.В. Удосконалення конструктивної форми легких каркасів будівель із холодногнутих профілів на базі рішення задачі оптимального проектування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Київ, 2019. 44 с.
 18. Лима-ле-Фариа А. Эволюция без отбора: автоэволюция формы и функции. Москва : Мир, 1991.
 19. Goldberg D.E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading, MA : Addison-Wesley, 1989.
 20. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor : University of Michigan Press, 1975.
 21. Davis L. Adaptive design for layout synthesis. Dallas : Texas Instruments, 1985.
 22. Gen M. Genetic algorithms and engineering design. John Wiley & Sons, 1997.
 23. Бараненко В.О. Генетичні алгоритми в оптимальному проектуванні конструкцій. Огляд. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва й архітектури. Науковий та інформаційний бюлетень*. 2002. № 10. С. 4–9.
 24. Czarnecki S. Multithreaded genetic program in truss shape optimization. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. 2000. Vol. 8. P. 556–560.
 25. Czarnecki S. Optimal structural design using a genetic algorithm. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. 1999. Vol. 7. P. 201–210.
 26. Burczynski T. et al. Evolutionary computation in optimization and identification. *Computer assisted mechanics and engineering sciences*. 2002. Vol. 9. P. 3–20.
 27. Burczynski T., Kus W., Orantek P. Optimization of plane truss structures using evolutionary algorithm. *Computer assisted mechanics and engineering sciences*. 2002. No. 9. P. 3–20.
 28. Phan T.D. et al. Design optimization of cold-formed steel portal frames taking into account the effect of building topology. *Engineering Optimization*. 2013. Vol. 45. No. 4. P. 415–433. DOI: 10.1080/0305215X.2012.678493.
 29. Kok K.Y. et al. Design optimisation for cold-formed steel residential roof truss using genetic algorithm. *World Journal of Engineering*. 2018. Vol. 15. No. 5. P. 575–583. DOI: 10.1108/WJE-10-2017-0322.
 30. Permyakov V.O., Yurchenko V.V., Peleshko I.D. An optimum structural computer-aided design using hybrid genetic algorithm. *Proceeding of the International Conference "Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures"*. 2006. P. 819–826.
 31. Peleshko I.D., Yurchenko V.V. Hybrid genetic algorithm with gradient learning of the best individual for optimum computer-aided design of steel structural systems. *Proceedings of 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2009. P. 40.
-

32. Yurchenko V.V., Peleshko I.D. Improved gradient projection method for parametric optimisation of bar structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 98 (6). Article 9812. DOI: 10.18720/MCE.98.12.

33. Peleshko I.D., Yurchenko V.V. An improved gradient-based method to solve parametric optimisation problems of the bar structures. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. 2020. Issue 104. P. 265–288. DOI: 10.32347/2410-2547.2020.104.265-288.

34. Yurchenko V.V., Peleshko I.D. Searching for optimal pre-stressing of steel bar structures based on sensitivity analysis. *Archives of Civil Engineering*. 2020. Vol. 66. No. 3. P. 525–540. DOI: 10.24425/ACE.2020.134411.

REFERENCES:

1. Mungan, I. (2001) Structural engineering and structures from antiquity to the present. *Proceedings IASS Symposium*, pp. 1–3.

2. Elishakoff, I., Ohsaki, M. (2010) Optimization and Anti-Optimization of Structures under uncertainty. London: Imperial College Press.

3. Nikonov, N.N. (1998) Bolsheproletnyie pokryitiya: Analiz i otsenka: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov [Large-span roof structures: analysis and estimation: tutorial for IHE students]. Moscow: Izdatelstvo ASV. (in Russian)

4. Streletskiy, N.S., Streletskiy, D.N. (1964) Proektirovanie i izgotovlenie ekonomichnykh metallicheskih konstruksiy [Economic steel structures: design and fabrication]. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)

5. Perelmuter, A.V. (1997) Vyibor optimalnykh parametrov dlya ryada odnotipnykh ob'ektov [Choice of optimum parameters for a number of objects of the same type]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoy konferentsii "Teoriya i praktika metallicheskih konstruksiy"*, vol. 2, pp. 10–13. (in Russian)

6. Permyakov, V.A. (1990) Obobschennaya zadacha optimalnogo proektirovaniya sterzhnevyykh sistem [Generalized optimum design problem for bar structures]. *Aktualnyie problemy stroitelstva: doklady II mezhdunarodnoy konferentsii*, pp. 81–85. (in Russian)

7. Yurchenko, V.V., Perelmuter, A.V. (2020) Nesucha zdatnist sterzhnevyykh elementiv konstruksii iz kholodnohnutykh profiliv [Load-bearing capacity of structural members made from cold-formed profiles]. Kyiv: Karavella. (in Ukrainian)

8. Bilyk, S.I., Yurchenko, V.V. (2020) Size optimization of single edge folds for cold-formed structural members. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*, issue 105, pp. 73–86.

9. Kikot', A.A. (2011) Vliyanie shirinyi poyasov i otgibov v secheniyah C- i Z-obraznykh stalnykh tonkostennykh holodnognutyykh profilya na effektivnost raboty v usloviyakh izgiba [Influence of flange width and edge fold size in C- and Z-thin-walled cold-formed profiles on the effective structural behavior under the bending]. *Polzunovskiy vestnik*, no. 1, pp. 70–75. (in Russian)

10. Galkina, A.A., Kikot', A.A. (2017) Vliyanie parametrov secheniya na effektivnost tsentralno-szhatogo tonkostennogo holodnognutogo S-obraznogo profilya [Influence of cross-section sizes of C-cold-formed profile on the effective structural behavior under central compression]. *Polzunovskiy almanah*, no. 2, pp. 95–98. (in Russian)

11. Lewinski, J., Magnucki, K. (2009) Optimization of anti-symmetrical cross-sections of cold-formed thin-walled beams. *Journal of theoretical and applied mechanics*, vol. 47, pp. 553–571.

12. Leng, J.Z., Guest, J.K., Schafer, B.W. (2011) Shape optimization of cold-formed steel columns. *Thin Walled Structures*, vol. 49, pp. 1492–1503.

13. Leng, J.Z., Li, Z.J., Guest, J.K., Schafer, B.W. (2014) Shape optimization of cold-formed steel columns with fabrication and geometric end-use constraints. *Thin Walled Structures*, vol. 85, pp. 271–290.

14. Wang, B. et al. (2014) Shape Optimisation of ColdFormed Steel Profiles with Manufacturing Constraints – Part I: Algorithm. *22nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 2.

15. Wang, B. et al. (2014) Shape Optimisation of ColdFormed Steel Profiles with Manufacturing Constraints – Part II: Applications. *22nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 3.
 16. Permyakov, V.A., Perelmuter, A.V., Yurchenko, V.V. (2008) Optimalnoe proektirovanie stalnykh sterzhnykh konstruktсий [Optimum design of steel structures]. Kyiv: Izdatelstvo Stal'. (in Russian)
 17. Yurchenko, V.V. (2019) Udoskonalennia konstruktyvnoi formy lehkkykh karkasiv budivel iz kholodnohnutykh profiliv na bazi rishennia zadachi optymalnoho proektuvannia [Development of structural form of light gauge steel structures made from cold-formed profiles based on solution of the optimization problem] (Dr. Sc. Thesis), Kyiv: Kyiv National University of Construction and Architecture. (in Ukrainian)
 18. Lima-le-Faria, A. (1991) Evolyutsiya bez otbora: Avtoevolyutsiya formy i funktsii [Evolution without selection: form and function by authevolution]. Moscow: Mir. (in Russian)
 19. Goldberg, D.E. (1989) Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley.
 20. Holland, J.H. (1975) Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: University of Michigan Press.
 21. Davis, L. (1985) Adaptive design for layout synthesis. Dallas: Texas Instruments.
 22. Gen, M. (1997) Genetic algorithms and engineering design. John Wiley & Sons.
 23. Baranenko, V.O. (2002) Henetychni alhorytmy v optymalnomu proektuvanni konstruktсий. Ohliad [Genetic algorithms in optimum design of building structures]. *Prydniprovska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury. Visnyk akademii: Naukovyi ta informatsiyni biuletyn*, no. 10, pp. 4–9. (in Ukrainian)
 24. Czarnecki, S. (2000) Multithreaded genetic program in truss shape optimization. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*, vol. 8, pp. 556–560.
 25. Czarnecki, S. (1999) Optimal structural design using a genetic algorithm. *Theoretical Foundations of Civil Engineering*, vol. 7, pp. 201–210.
 26. Burczynski, T. et al. (2002) Evolutionary computation in optimization and identification. *Computer assisted mechanics and engineering sciences*, vol. 9, pp. 3–20.
 27. Burczynski, T., Kus, W., Orantek, P. (2002) Optimization of plane truss structures using evolutionary algorithm. *Computer assisted mechanics and engineering sciences*, no. 9, pp. 3–20.
 28. Phan, T.D. et al. (2013) Design optimization of cold-formed steel portal frames taking into account the effect of building topology. *Engineering Optimization*, vol. 45, no. 4, pp. 415–433.
 29. Kok, K.Y. et al. (2018) Design optimisation for cold-formed steel residential roof truss using genetic algorithm. *World Journal of Engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 575–583.
 30. Permyakov, V.O., Yurchenko, V.V., Peleshko, I.D. (2006) An optimum structural computer-aided design using hybrid genetic algorithm. *Proceeding of the International Conference “Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures”*, pp. 819–826.
 31. Peleshko, I.D., Yurchenko, V.V. (2009) Hybrid genetic algorithm with gradient learning of the best individual for optimum computer-aided design of steel structural systems. *Proceedings of 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, p. 40.
 32. Yurchenko, V.V., Peleshko, I.D. (2020) Improved gradient projection method for parametric optimisation of bar structures. *Magazine of Civil Engineering*, 98 (6), no. 9812.
 33. Peleshko, I.D., Yurchenko, V.V. (2020) An improved gradient-based method to solve parametric optimisation problems of the bar structures. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*, issue 104, pp. 265–288.
 34. Yurchenko, V.V., Peleshko, I.D. (2020) Searching for optimal pre-stressing of steel bar structures based on sensitivity analysis. *Archives of Civil Engineering*, vol. 66, no. 3, pp. 525–540.
-