



УДК 624.012

**ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF LIGHTWEIGHT STEEL THIN-WALLED STRUCTURES****ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ЛЕГКИХ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ****Hud M.I. / Гудь М.І.***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доцент кафедри*

ORCID: 0000-0001-8793-3193

**Koval I.V. / Коваль І.В.***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доцент*

ORCID: 0000-0003-2075-2915

**Frankiv M.R. / Франків М.Р.***Student gr. MBmn-61/ студент гр. МБмн-61**Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ruska, 56, 46001**Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя,**Тернопіль, Руська, 56, 46001*

**Анотація.** У статті розглядаються переваги та недоліки легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК), які стають все більш популярними у сучасному будівництві. Аналізуються основні характеристики ЛСТК, такі як мала металоємність, висока технологічність, легкість транспортування і швидкість монтажу. Досліджено, як ці фактори впливають на економічну ефективність і якість будівництва. Розглядаються також потенційні недоліки, включаючи обмеження в дизайні та необхідність спеціалізованого обладнання для виробництва і монтажу. У підсумку, робиться висновок про доцільність використання ЛСТК в різних типах будівельних проектів, з урахуванням їхніх особливостей і вимог до конструкцій.

**Ключові слова:** легкі сталеві тонкостінні конструкції, легкі металеві конструкції, металоємність.

**Вступ.**

В умовах активного розвитку сегменту інноваційних будівельних технологій кількість проектно-будівельних компаній, що пропонують клієнтам сучасні та економічно обґрунтовані комплексні будівельні системи і послуги, постійно зростає. Серед таких пропозицій є і швидке будівництво будівель і споруд з використанням ЛСТК (легких сталевих тонкостінних конструкцій), що є популярною та ефективною технологією у багатьох країнах.

ЛСТК належать до широкого класу легких металевих конструкцій (ЛМК). Вони характеризуються низькою металоємністю, високою технологічністю, зручністю виготовлення на автоматизованих лініях, легкістю транспортування та можливістю використання для конвеєрно-блокових і інших швидкісних методів монтажу. Високий ступінь заводської готовності та можливість постачання комплектних будівель-модулів і несучих конструкцій також є важливими перевагами ЛСТК. Основним елементом ЛСТК є тонкостінний холодногнутий оцинкований профіль.

**Основний текст.**

Теоретична основа роботи тонкостінних холодногнутих профілів була розроблена в ХХ столітті. Неоціненний внесок у розвиток загальної теорії вигину, крутіння і стійкості тонкостінних стрижнів довільного відкритого



профілю вніс С.П. Тимошенко С.П. [4, 5]. Тимошенко вивів точний розв'язок визначення центру вигину перерізу. Роботи С.П. Тимошенка стали основоположними в дослідженнях К. Вебера, Г. Вагнера, Ф. і Г. Блейхі. К. П. [6] незалежно один від одного вивели формулу для визначення критичної стисливої сили під час кручення. Розвиток емпіричної формули І. Ходкінсона і теоретичних висновків Дж. Брайана задачі стійкості стиснутих прямокутних пластин з різними граничними умовами, включно з пластинами з поздовжніми ребрами жорсткості, були детально викладені в його дослідженнях.

Неоціненний внесок у теорію тонкостінних стрижнів зробив радянський учений В.З. Власов. Він розвинув безсувну теорію довільно навантажених тонкостінних стрижнів відкритого профілю в 1930-х роках [7]. Побудована ним теорія дала змогу дати вичерпне розв'язання задачі про вигинно-крутильну форму втрати стійкості та коливання тонкостінних пружних стрижнів. Загальну теорію деформації тонкостінного стрижня закритого профілю розроблено та проаналізовано роботу стрижнів у закритичній стадії [7,8]. Роботою тонкостінних стрижнів у закритичній стадії також займалися Б.М. Броуде, [8] Г.Г. Голенко, А.В. Геммерлінг, Т. Карман, Л. Доннел, Е. Шехлер та інші.

Нині найефективнішою технологією будівництва споруд, що швидко зводяться, є використання каркасної системи з легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК). Однак така важлива властивість, як легкість, може помітно позначитися на несучій здатності конструкції. Тому легкі сталеві тонкостінні конструкції (ЛСТК) перед їхнім впровадженням у будівництво мають бути піддані ретельному аналізу щодо несучої здатності.

Основним будівельним елементом ЛСТК є тонкостінний холодно вигнутий профіль, виготовлений на профілезгинальному обладнанні з високоміцної низьковуглецевої оцинкованої сталі. Основною відмінністю ЛСТК від інших сталевих конструкцій є застосування холодноформованих профілів з оцинкованої сталі товщиною від 1 до 4 мм. Це дає низку переваг ЛСТК перед традиційними конструкціями з гарячекатаного прокату:

Галузь застосування сталевих тонкостінних конструкцій: малоповерхові будівлі житлового [2] і громадського призначення, промислові об'єкти, об'єкти реконструкції [3] і спеціальні конструкції.

Аналіз світових тенденцій у будівництві та застосуванні будівельних матеріалів приводить до висновку, що застосування гнутих профілів у будівництві швидкокомтованих будівель рік від року розширюється і зачіпає все нові типи конструкцій, водночас відстежується тренд до зменшення товщини таких профілів; для запобігання втраті місцевої стійкості в таких профілях ЛСТК часто влаштовують поздовжнє гофрування. Основні конструктивні елементи швидкокомтованої будівлі - оцинкований профіль і профлист - виготовляються за технологією холодного формування сталевих стрічки при прокаті. Ця технологія вже давно і широко застосовується в різних галузях промисловості, глибоко розвинена і вивчена, не вимагає використання великої кількості ручної праці, обладнання, ресурсів, що дає змогу одержувати високоточну геометрію та стабільні властивості готової продукції з гарантованими параметрами (площа перерізу, моменти опору, осьові моменти інерції, радіуси інерції).

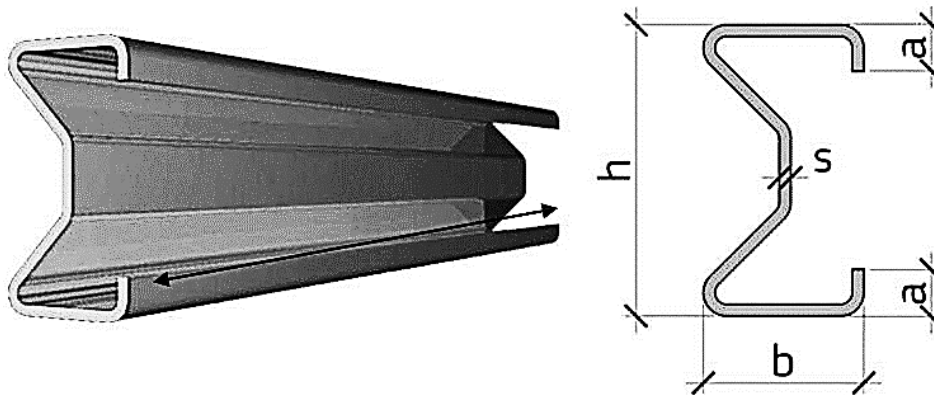


**Таблиця 1. - Основні переваги ЛСТК**

№	Перевага використання ЛСТК	Примітка
1	Зменшення витрат на будівництво	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зниження трудовитрат, можливість монтажу без застосування кранів та інших вантажопідйомних механізмів</li> <li>- зниження витрат на влаштування фундаментів завдяки зниженню ваги конструкцій (економія на нульовому циклі до 30-60%)</li> <li>- високий ступінь заводської готовності компонентів, простоти й уніфікації складальних елементів</li> <li>- низькі експлуатаційні витрати</li> </ul>
2	Зменшення витрат на будівництво	<ul style="list-style-type: none"> <li>- готовність внутрішньої поверхні під чистове оздоблення</li> <li>- економія оздоблювальних матеріалів завдяки високій точності та правильній геометрії металоконструкцій</li> <li>- висока контрольованість використовуваних матеріалів</li> <li>- відносно невисокі трудовитрати на будівництво</li> </ul>
3	Скорочення термінів будівництва	- відсутність "мокрих" процесів і висока швидкість монтажу
4	Екологічність матеріалу	<ul style="list-style-type: none"> <li>- можливість рециркуляції металоконструкцій необмежену кількість разів</li> <li>- не вбирає і не виділяє хімікати</li> <li>- скорочення витрат первинної енергії (необхідність підігріву бетону і його компонентів у процесі приготування, транспортування і застигання)</li> </ul>
5	Висока точність виготовлення	- забезпечується мінімально допустимими похибками під час виробництва на заводі і дає змогу скоротити витрати на вирівнювання і доопрацювання конструкцій на будмайданчику, а також забезпечує швидкий і точний монтаж інших елементів будівлі (вікон, дверей, фасадів, обладнання).
6	Можливість індивідуальних архітектурно-планувальних рішень	
7	Можливість економічного будівництва в складних кліматичних зонах (сейсмонебезпечні райони)	
8	Технічні переваги	<ul style="list-style-type: none"> <li>- енергоефективність, зниження експлуатаційних витрат на опалення та кондиціонування</li> <li>- збільшення внутрішніх площ завдяки малій товщині стін за збереження тих самих теплотехнічних характеристик</li> <li>- мала вага конструкції</li> <li>- стійкість до динамічних навантажень</li> <li>- вогнестійкість</li> <li>- довговічність, термін служби сталі близько 100 років</li> <li>- можливість позасезонного будівництва завдяки "сухості" процесу</li> <li>- можливість ефективного ремонту та реконструкції</li> </ul>

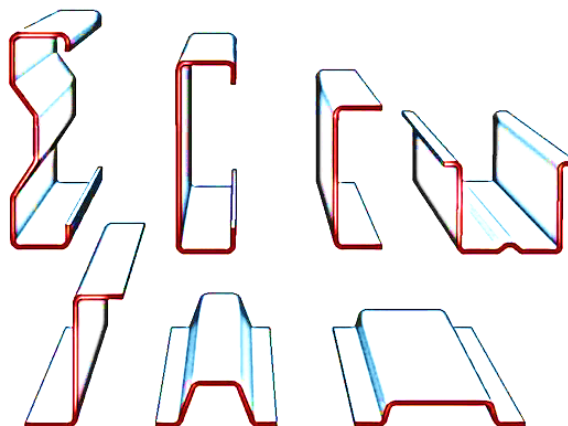


Тонкостінний профіль є стрижнем, у якого всі три характерні розміри істотно відрізняються: товщина стінки набагато менша за протяжність профілю поперечного перерізу, яка, своєю чергою, набагато менша за довжину стрижня (рисунок 1).



**Рисунок 1. - Схема тонкостінного стрижня**

Сортамент тонкостінних холодногнутих профілів різноманітний [3], залежно від призначення профілю використовують різні форми перерізу (рисунок 2).



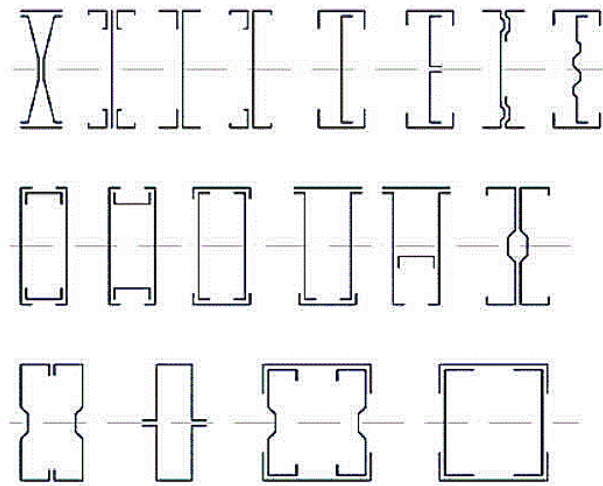
**Рисунок 2. - Сортамент перерізів тонкостінних профілів (С,  $\Sigma$ , П-подібні)**

Найпоширенішими перетинами тонкостінних профілів для несучих конструкцій є С,  $\Sigma$ , Z-подібні перетини. Так само використовуються складові перерізи, що складаються з двох і більше поодиноких профілів (рисунок 3).

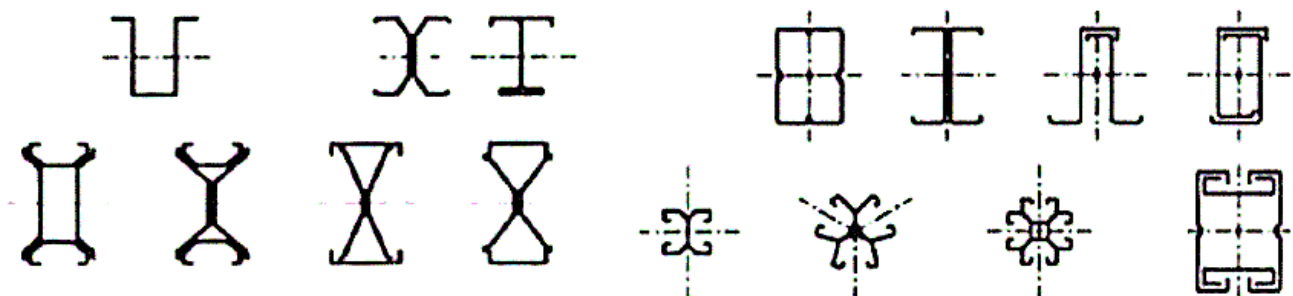
Для з'єднання поодиноких профілів у складові використовуються самонарізні гвинти, заклепки, болти. Зварне з'єднання для тонкостінних профілів застосовується вкрай рідко, оскільки невелика товщина профілів підвищує ризик наскрізного проварювання, а також призводить до порушення цинкового покриття.

Тонкостінні профілі можна розділити на дві категорії (рисунок 4):

- відкритого перетину;
- замкнутого (закритого) перерізу.



**Рисунок 3. - Складені перерізи елементів конструкцій зі сталевих тонкостінних, холодногнутих профілів**



**Рисунок 4. - Відкриті та замкнуті перерізи елементів конструкцій зі сталевих тонкостінних, холодногнутих профілів**

### **Втрата стійкості. Місцева втрата стійкості**

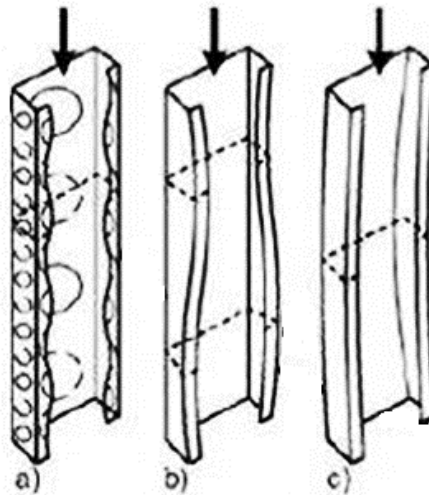
До середини XIX ст. вважали, що якщо напруження, які виникають в елементі, не перевищують величини, що залежить від механічних властивостей матеріалу, то експлуатаційна надійність конструкції забезпечена. Однак поява конструкцій, до складу яких входять довгі стиснуті стрижні, змусила переглянути вкорінену точку зору. Після вивчення низки аварій, що сталися, було встановлено, що вони сталися внаслідок недостатньої стійкості стиснутих стрижнів.

Фізичною ознакою стійкості або нестійкості форми рівноваги слугує поведінка навантаженої пружної системи в разі її відхилення від розглядуваного положення рівноваги на деяку малу величину. Якщо система, відхилена від положення рівноваги, повертається в початкове положення після усунення причини, що викликала відхилення, то рівновага стійка. Якщо відхилення не зникає, а продовжує зростати, то рівновага нестійка.

Для тонкостінних стрижнів існує три основні форми втрати стійкості: місцева (локальна), втрата форми перерізу, загальна (рисунок 5).

Особливість роботи тонкостінних стрижнів полягає в тому, що вичерпання несучої здатності може настати як унаслідок втрати загальної стійкості елемента, так і в результаті іншої форми втрати стійкості елемента.





**Рисунок 5 - Форми втрати стійкості**

*a)- місцева втрата стійкості;  
b)- втрата форми перерізу; c) - загальна втрата стійкості.*

Під час поступового навантаження стрижня з ЛСТК профілю осьовою центральною силою для "коротких" стрижнів першим лімітуючим фактором буде місцева втрата стійкості (точка А), для "довгих" - загальна вигинна форма втрати стійкості (точка Б). Тому після розрахунків визначальної граничної сили та згинального моменту місцевої та дисторсійної втрати стійкості слід виконати перевірку стрижня на загальну стійкість. У Єврокод 3 [16] переріз тонкостінного профілю розглядають як сукупність пластин із різними граничними умовами, стійкість яких і визначають розрахунками.

Розрахунки надзвичайно громіздкі, особливо за наявності численних елементів жорсткості, і в реальній інженерній практиці виконувати їх дуже складно і трудомістко.

Суть розрахунків полягає у визначенні ефективної (реально працюючої) площі та ефективного моменту опору поперечного перерізу ЛСТК профілю.

Проблемами загальної та місцевої стійкості тонкостінних стрижнів займалися багато вчених, основними вважаються роботи Блейха, Брезіни, Колбруннера, Налешкевича і Вольміра.

Спочатку розглядали два випадки втрати стійкості тонкостінного стрижня: загальна (самого стрижня) і місцева (його стінок). Втрата загальної стійкості може статися в разі осьового стиснення, позацентрового стиснення, розтягування або вигину стрижня. Пізніше дослідниками було введено поняття "втрата форми перерізу".

Під час стиснення стрижнів малої та середньої довжини проявляється найбільший вплив кручення і можливість втрати місцевої стійкості стінок, які найчастіше мають контури пластинок. При стисненні стрижнів великої довжини - загальна втрата стійкості. Аналіз низки досліджень показав, що один і той самий переріз тонкостінного стрижня за різної довжини стрижня поводитиметься по-різному, тобто переважною будуть різні форми втрати стійкості, і, навпаки, за однакової довжини різні перерізи матимуть різні властивості. Наприклад, у роботах Блейха Ф., Вольміра А.С. та ін. наводять



графіки залежності гнучкості від довжини, які показують, що місцеве випучування є вирішальним у стрижнях завдовжки до 1,25 м незалежно від розмірів перерізу.

Також у багатьох роботах показано, що зміна конфігурації перерізу (наприклад, додавання відгинів) різко збільшує опір місцевій втраті стійкості, але мало впливає на опір вигинокрутільній втраті загальної стійкості та вимагає розрахунку з урахуванням "спотворення" перерізу. Отримати загальні залежності гнучкості та довжини вельми важко у зв'язку з різноманіттям профілю, що випускається нині.

Втрата місцевої стійкості зовні проявляється у вигляді хвилястості полиці та випучуванні ділянок стінки. Зазвичай втрата місцевої стійкості в стиснутій зоні перерізу відбувається на ранніх стадіях навантаження, за рівня напружень, істотно нижчого від розрахункових значень, але це не означає досягнення профілем граничного стану, переріз загалом залишається працездатним, має достатній запас за несучою здатністю і може сприймати зовнішнє навантаження.

### **Висновки.**

Розвиток інноваційних будівельних технологій сприяє зростанню кількості проєктно-будівельних компаній, які пропонують сучасні та економічно ефективні рішення. Однією з перспективних технологій є будівництво з використанням легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК). Ця технологія, що відзначається низькою металоємністю, високою технологічністю, легкістю транспортування та швидкістю монтажу, здобула визнання у багатьох країнах. Завдяки можливості виготовлення на автоматизованих лініях і високому ступеню заводської готовності, ЛСТК забезпечують швидке та якісне зведення будівель і споруд.

Легкі сталеві тонкостінні конструкції мають низку переваг перед традиційними конструкціями з гарячекатаного прокату:

- зниження витрати металу, ефективне використання сталей підвищеної міцності;
- зниження витрат на влаштування фундаментів завдяки зниженню ваги конструкцій;
- зниження трудовитрат, можливість монтажу без застосування кранів та інших вантажопідйомних механізмів;
- зменшення термінів монтажу;
- економія витрат на транспортування конструкцій, як завдяки полегшенню конструкцій, так і завдяки їхній компактності.

Невелика вага ЛСТК дає основну перевагу порівняно з іншими будівельними конструкціями. На підставі цього, в даній роботі було розглянуто можливість збільшення несучої здатності ЛСТК без істотного збільшення ваги самої конструкції в цілому.

### **Література:**

1. I. Schafer, B.W. and Peköz, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses // Journal of Constructional Steel Research, 47(3), 1998. pp.193-210



2. Weng, C.C., Peköz, T., Teoman. Residual stresses in cold-formed steel members // Journal of structural engineering New York, N.Y., 116 (6), 1990, pp
3. Hancock, G.J. Cold-formed steel structures // Journal of Constructional Steel Research, Volume 59, Issue 4, April 2003. pp. 473-487.
4. Kwon, Y. B. and Hancock, G. J. Tests of cold-formed channel with local and distortional buckling // Journal of structural engineering, 118(7), 1992. pp. 1786-1803.
5. Lau, S.C.W., Hancock, G. J. Distortional buckling formulas for channel columns // Journal of structural engineering, New York, N.Y., 113 (5), 1987, pp. 1063-1078.
6. Schafer, B.W. Cold-formed steel behavior and design: analytical and numerical modeling of elements and members with longitudinal stiffeners, PhD dissertation, Cornell Univ., Ithaca, N.Y., 1997.
7. Papangelis, J.P., Hancock, G.J. Computer analysis of thin-walled structural members // Computers and Structures, №56 (1), 1995, pp. 157-176.
8. Ungermann D., Lübke S., Brune B. Tests and design approach for plain chnels in local and coupled local-flexural buckling based on Eurocode 3 // Thin-Walled Structures. 2014. Vol. 81. Pp. 108–120.
9. Moen C.D., Schafer B.W. Experiments on cold-formed steel columns with holes // Thin-Walled Structures. 2008. No.46. Pp. 1164–1182.
10. Tarigopula V., Langseth M., Hopperstad O.S., Clausen A.H. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections // International Journal of Impact Engineering. 2006. No.32. Pp. 847–882.
11. M. Mohammadreza and Sanjay R. A. Improving buckling response of the square steel tube by using steel foam, 2014.
12. БАРАН, Денис Ярославович; ГУДЬ, Михайло Іванович; ШУМЕЙКО, В. Вплив високих температур на ударну в'язкість сталі 25Х1М1Ф. Праці конференції Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 70-річчю від дня народження член-кореспондента НАН України, проф. Яснія Петра Володимировича „Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій“, 2022, 89-90.

***Abstract.** The article discusses the advantages and disadvantages of lightweight steel thin-walled structures (LSTS), which are becoming increasingly popular in modern construction. The article analyses the main characteristics of lightweight steel structures, such as low metal consumption, high manufacturability, ease of transportation and speed of installation. The article investigates how these factors affect the economic efficiency and quality of construction. Potential disadvantages, including design limitations and the need for specialised equipment for production and installation, are also considered. As a result, it is concluded that LSTS can be used in various types of construction projects, taking into account their specific features and structural requirements.*

***Key words:** lightweight steel thin-walled structures, lightweight metal structures, metal intensity.*

Стаття відправлена: 05.27.2024 р.

© Гудь М.І.