

УДК 264.014.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.3>

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК ІЗ ПЕРФОРОВАНОЮ СТІНКОЮ У БУДІВНИЦТВІ

Годзинський Іван Ігорович

аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: ivan.godzynskyi@gmail.com, orcid: 0009-0007-5667-2286

Анотація. Мета: дослідити існуючі наукові джерела щодо напружено-деформованого стану сталевих балок із перфорованою стінкою, особливості їх роботи, виготовлення, розміри отворів і форми лінії розкрою.

Методологія. У дослідженні застосовано системний підхід, який включає аналіз наукових джерел, узагальнення експериментальних результатів досліджень, числове моделювання та порівняльний аналіз.

Результати. Установлено оптимальні розміри та форми отворів у стінці балки для мінімізації негативного впливу на міцність в ослаблених перерізах. Результати числового моделювання методом скінченних елементів пластинчастими елементами демонструють високу відповідність експериментальним даним.

Наукова новизна. Узагальнено і систематизовано сучасні підходи до проектування сталевих двотаврових балок із перфорованою стінкою з урахуванням впливу форми, розмірів і розташування отворів на їхню міцність і стійкість. Особливістю роботи є інтеграція результатів експериментальних і числових досліджень для визначення оптимальних геометричних параметрів перфорації.

Практична значущість. Результати дослідження можуть бути використані під час проектування сталевих конструкцій із перфорованими елементами, що дає змогу підвищити ефективність використання матеріалів без втрати несучої здатності. Запропоновані узагальнення щодо вибору форми та конфігурації отворів дають змогу конструкторам приймати більш обґрунтовані технічні рішення під час проектування. Практичну цінність дослідження підсилює його актуальність у контексті післявоєнної відбудови України, коли критично важливо забезпечити надійність і економічність будівництва за обмежених ресурсів. Отримані висновки можуть бути враховані під час розроблення нормативних документів і рекомендацій щодо використання перфорованих балкових елементів у будівництві.

Ключові слова: сталеві балки, перфорована стінка, несуча здатність, втрата стійкості, механізм Віренделя.

ВСТУП

Ураховуючи масштаби майбутньої післявоєнної відбудови України, дослідження можливості використання легких та надійних конструкцій мають великий потенціал. Ба більше, ураховуючи втрату металургійних заводів, ринок металопродукції зазнав значних змін. В Україні перестали вироблятися прокатні двотаври, деякі листові прокати, саме тому використання імпортованих прокатних двотаврів стає більш економічно доцільним і виправданим порівняно з довоєнним періодом. Можливість

значного підвищення несучої здатності прокатного двотавра за допомогою змін у його конструкції шляхом малозатратних дій надає дослідженням двотаврових балок із перфорованою стінкою особливої актуальності, тепер і для будівництва на території України.

Балки з перфорованою стінкою широко використовуються в промисловому і цивільному будівництві, зазвичай як балки покриття, хоча доволі часто використовуються також як балки перекриття. У разі використання як балок перекриття ведеться розрахунок як

композитної балки, і бетонне монолітне покриття по незйомній опалубці може включатися в роботу балки [6, с. 23; 10].

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У науковій спільноті досить багато напрацювань у сфері сталевих двотаврових балок із перфорованою стінкою, починаючи з досліджень напружено-деформованого стану балок із великими технологічними отворами для проходження комунікацій крізь стінку балки [23], закінчуючи розрізаними двотавровими балками по стінці з використанням різних марок сталі для стиснутого і розтягнутого поясу [21].

Основним фокусом уваги досліджень є оптимальні форми та розміри отворів [3; 10; 13; 17], їх крок [5] та способи посилення балок із перфорованою стінкою [10].

МЕТА

Метою статті є дослідження надбання наукової спільноти у питанні сталевих двотаврових балок із перфорованою стінкою та проблем, які виникають під час проєктування, конструювання та роботи даної балки під навантаженням. Завдання полягає у виявленні особливостей напружено-деформованого стану балок з отворами в стінці, зокрема ослаблення жорсткості, концентрація напружень,

утрата місцевої стійкості стійки стінки, порівнюючи різні конфігурації (круглі, гексагональні, прямокутні, синусоїдальні) та розміри отворів, відстані між ними та можливості посилення балок горизонтальними та вертикальними ребрами жорсткості.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Класичним прикладом балки з перфорованою стінкою можна вважати прокатний двотавр, який розрізаний криволінійним різом по стінці і зварений зі зміщенням верхньої та нижньої частин для збільшення висоти профілю (рис. 1) [7; 17; 20].

За рахунок збільшення висоти перерізу двотаврової балки момент інерції балки стає більшим, що, своєю чергою, збільшує максимальний згинальний момент, який здатна нести така балка. Зі збільшенням висоти балки також покращується жорсткість конструкції. З іншого боку, така балка має деякі послаблення в стінці двотавра, які негативно впливають на несучу здатність балки, особливо працюючи на зріз біля опори.

Модель двотаврової балки з перфорацією стінки великих отворів може бути розглянута в аналітичному ключі через призму моделі безрозкісної ферми Віренделя (рис. 2). Зокрема, стійки стінок балки відіграють роль стійок ферми, а утворені верхні та нижні

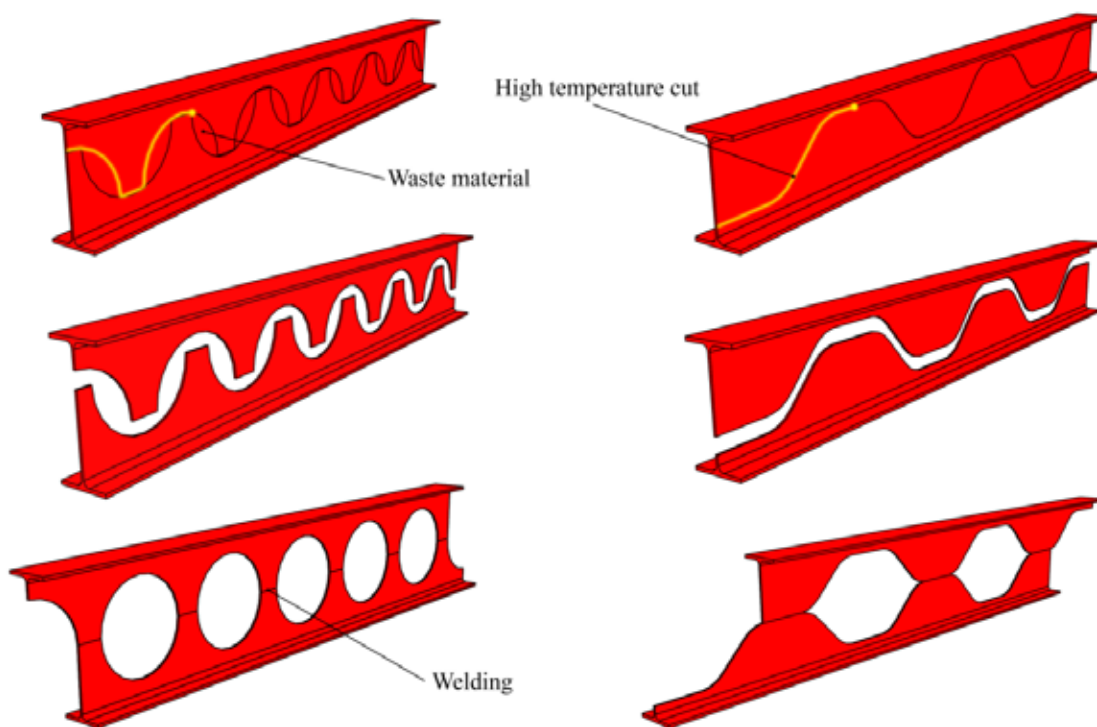


Рис. 1. Схема виготовлення балки з перфорованою стінкою (ліворуч – круглі отвори, праворуч – синусоїдальні)

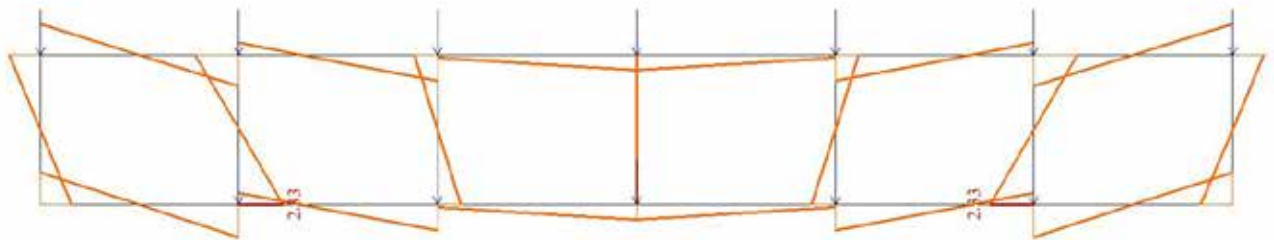
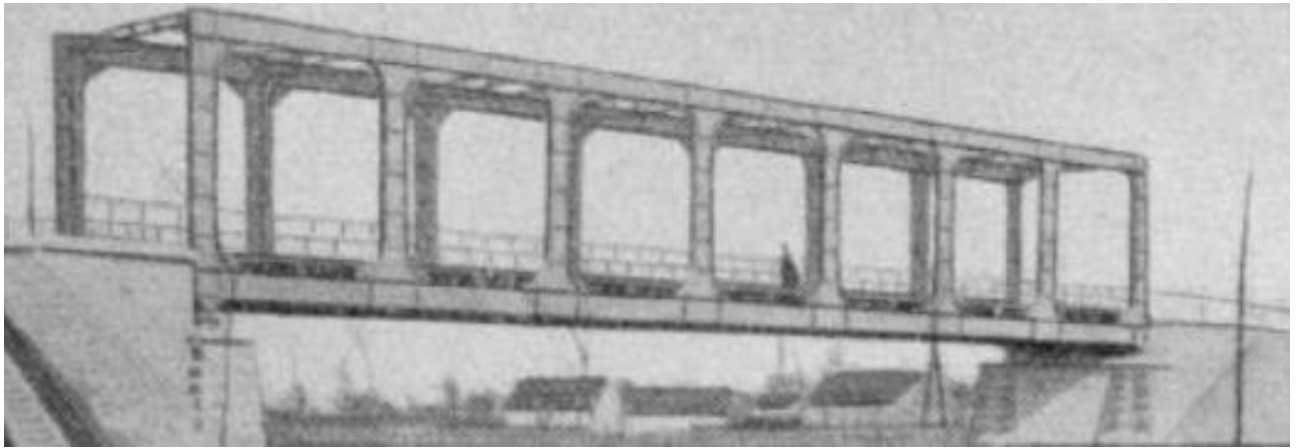


Рис. 2. Ферма Віренделя та епюра згинальних моментів у ній

таври в ослаблених перерізах балки – аналог поясів ферми. З'єднання поясу зі стійкою у фермі Віренделя жорстке і здатне сприймати згинальний момент у площині ферми аналогічно цілісній стінці балки. Як відомо з розрахунку жорстковузлової ферми Віренделя, найбільших згинальних моментів зазнають крайні стійки та пояс біля опор.

У балках із перфорацією стінки виникають концентрації напружень біля кутів різку стінки, що призводить до утворення шарнірів пластичності, і несуча здатність балки суттєво падає [23]. Це явище називають механізмом Віренделя (рис. 3). Передусім він залежить від висоти утворених верхнього і нижнього таврів в ослабленому перерізі. Саме тому у балок

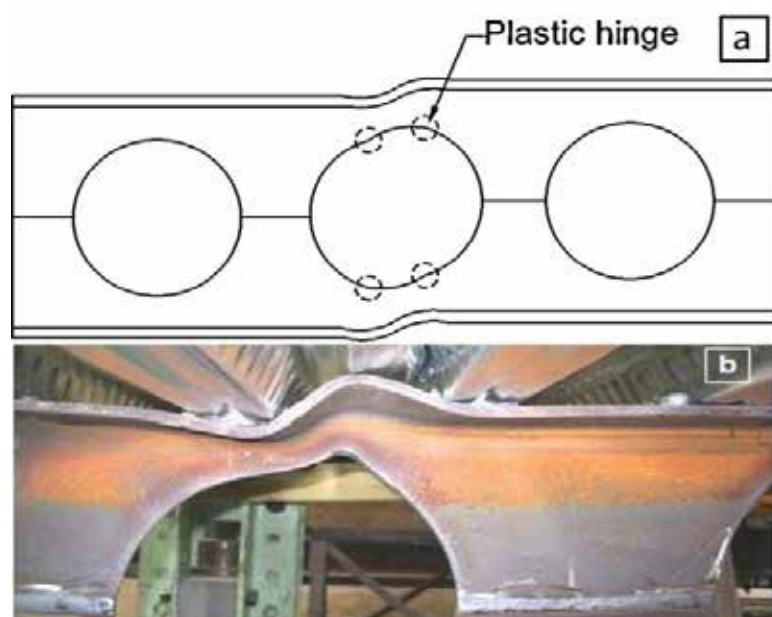


Рис. 3. Модель та експериментальний приклад механізму Віренделя

з отворами, які перевищують 75% від загальної висоти балки, спостерігається стрімке погіршення несучої здатності.

Оскільки значення згинальних моментів в утворених елементах найбільші на ділянці біля опори, у деяких дослідженнях рекомендують робити першу перфорацію на відстані 2–4 висоти балки від опори [14; 17]. В інших дослідженнях спостерігали позитивний вплив від забезпечення цілісності стінки за рахунок заварювання перших отворів біля опори листом металу товщиною, рівною товщині стінки (рис. 4) [6].

Оскільки пояси балки утворюють таври в ослабленому перерізі, і відомо, що тавр неефективно працює на згин, для посилення поясів балки з перфорованою стінкою можуть використовувати горизонтальні ребра жорсткості або з однієї сторони, або з обох (рис. 5) [10].

Зазвичай доцільно використовувати такі балки, для яких посилення необхідно лише для першого отвору біля опори, в інших випадках економія на отворах нівелюється складністю виготовлення, і доцільність таких рішень уже не економічна, а може бути лише конструктивна, наприклад для проходження

вентиляційних труб крізь отвори балок для підняття висоти чистої стелі.

Від поперечної сили в стійках стінки виникає перехресний розтяг і стискання, що, своєю чергою, може призводити до місцевої втрати стійкості (рис. 6). Зі збільшенням відстані між отворами ефект локальної втрати стійкості стійки стінки від діючої поперечної сили стає дедалі меншим і наближається до роботи балки із суцільною стінкою. Згідно з дослідженням [24], збільшення несучої здатності балки спостерігається за відношення відстані між центрами отворів до їх діаметру в межах 1,5–1,7.

Окремим розрахунком такої балки є розрахунок міцності зварного шву. Окрім місцевої втрати стійкості, треба враховувати, що зварний шов по осі балки має залишкові напруження після зварки, крім того, зварний шов має меншу міцність порівняно з міцністю сталі. Розрахунок проводиться на зріз, зокрема в області першої стійки стінки від опори, де поперечна сила найбільша, а переріз ослаблений отворами в стінці [2].

Існують дослідження напружено-деформованого стану балок із перфорацією стінки



Рис. 4. Приклад завареного отвору біля опори на реальному об'єкті

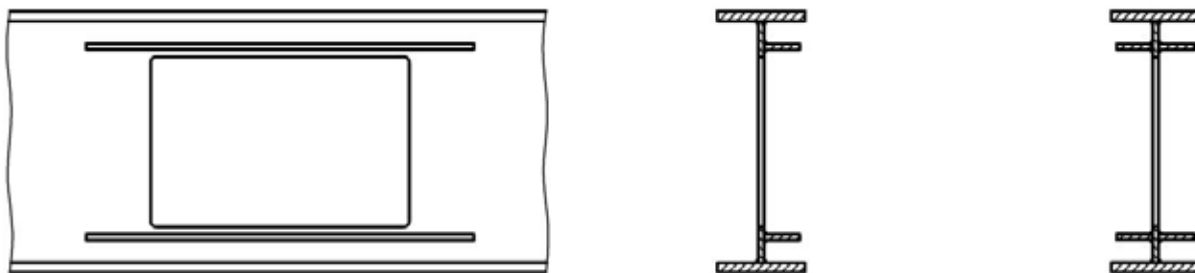


Рис. 5. Приклад посилення ослабленого перерізу горизонтальними ребрами жорсткості

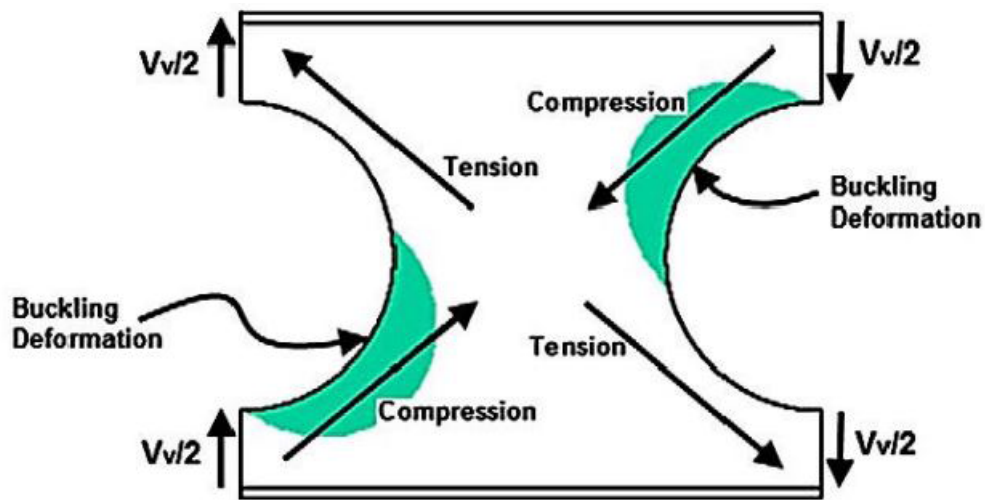


Рис. 6. Принципова модель утрати стійкості стійки стінки

різної форми. Згідно з дослідженнями [3; 13; 17], найоптимальнішими формами вирізу є круглі та гексагональні отвори із заокругленими краями для зменшення концентраційних напружень на внутрішніх кутах. Найгіршими з погляду несучої здатності та деформації виявилися прямокутні отвори.

Також проводилися дослідження впливу кроку отворів на несучу здатність. Експериментально порівнювали балки, розширені по висоті з решічастими вставками стінки балки для збільшення висоти перерізу [5]. Порівнювалися балки з вісімнадцятьма отворами та з дев'ятьма (рис. 7).

Згідно з даним дослідженням, балки з дев'ятьма отворами мають кращу несучу здатність [5], що відповідає загальним рекомендаціям щодо конструювання перфорованих балок, запропонованим у [17].

ArcelorMittal, одна з найбільших у світі сталеливарних та гірничодобувних компаній, розробила комерційні та інженерні рекомендації з проектування та виготовлення балок зі стінкою з перфорацією як круглого, так і синусоїдального профілю (рис. 8), з детальними схемами, таблицями та графіками несучих спроможностей та великою кількістю прикладів реалізованих

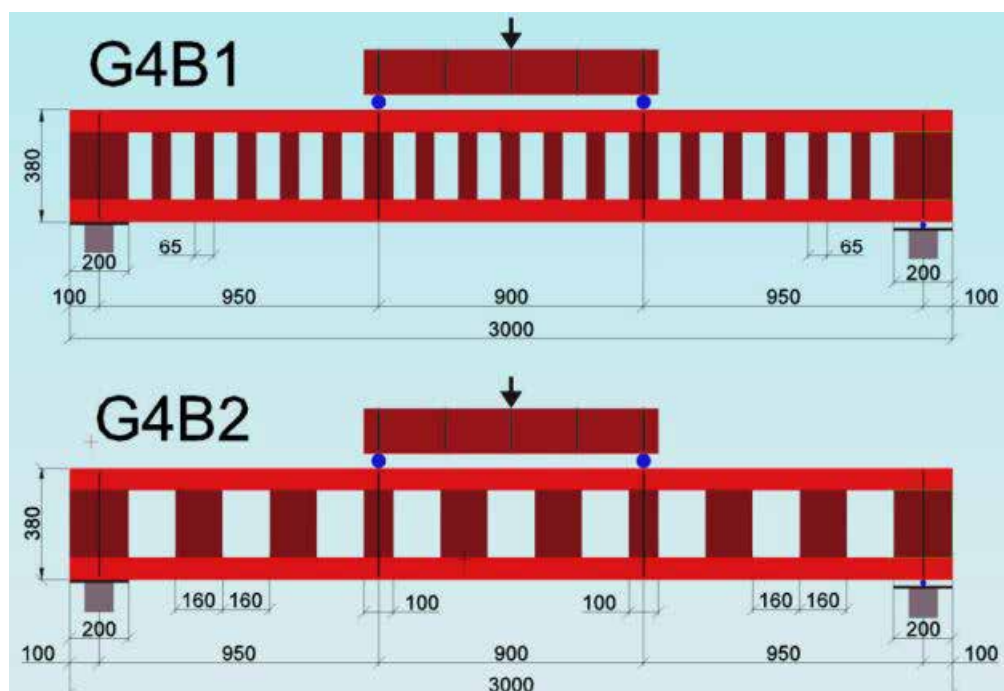


Рис. 7. Схеми балок із різним кроком отворів, для яких виконувався порівняльний експеримент



Рис. 8. Приклади комерційних балок від компанії ArcelorMittal

проектів із використанням перфорованих балок [6].

У будь-якому разі усвідомлення аналогії роботи балки з перфорованою стінкою з безрозкісною балкою допомагає краще зрозуміти роботу конструкції у цілому та шляхи покращення конструктивних особливостей, навіть допомагає створити емпіричні формули для розрахунку максимального згинального моменту, який здатна витримувати така балка [2], але найбільшу точність дає розрахунок моделі балки, виконаний методом скінченних елементів із пластинчастих елементів, що багаторазово підтверджується експериментально [3; 13; 17].

Із погляду конфігурації отворів широкого розповсюдження набули балки з перфорацією стінки круглої, шестикутної або гексагональної, прямокутної, ромбічної, овальної/еліптичної, а також синусоїдальної форм [6; 19]. Форма вирізів безпосередньо впливає на поведінку балки: круглі та більш «згладжені» отвори, як правило, створюють менші концентраційні напруження, тоді як гострі кути або значне видовження отвору посилюють локальні пікові напруження [18; 23]. Синусоїдальні отвори дають плавну зміну перерізу і добре розподіляють навантаження по висоті балки, що може зменшувати ризик виникнення локальних напружень [6].

Розміри отворів відіграють важливу роль, адже, з одного боку, зі збільшенням отворів виростає загальна висота балки, що суттєво збільшує момент інерції, а з іншого – зменшує висоту верхнього і нижнього таврів в ослаблених перерізах, що призводить до раннього виникнення шарнірів пластичності. Тому розміри підбираються емпірично, залежно від конструктивних особливостей рами, прольотів, та багатьох факторів. Експериментальні дослідження показують, що висота отворів більше 75% від висоти балки суттєво погіршує стійкість, натомість при значеннях нижче 50% вплив вирізів стає незначним [17].

Відстань між отворами впливає на ширину стійок стінки.

За умови розміщення отворів біля опори, у місцях максимальної поперечної сили, вплив локальної втрати стійкості першої та другої стійок стінки стає вирішальним. Розміщення першого отвору на відстані не менше двох висот балки, а також дотримання міжосьової відстані між отворами не менше висоти перерізу виявляється ефективним з огляду на забезпечення достатньої ширини стінкових стійок, необхідної для запобігання місцевій втраті стійкості [9]. Така геометрія сприяє досягненню прийнятної конструктивної ефективності.

У разі необхідності існують **шляхи посилення перфорації** шляхом заварювання або обрамлення отворів, або горизонтальними чи вертикальними ребрами жорсткості. Горизонтальні ребра перетворюють верхні і нижні таври в ослаблених перерізах на двотаврову конфігурацію, яка здатна сприймати згин і зменшує ефект механізму Віренделя. Натомість вертикальні ребра жорсткості зменшують передумови для місцевої втрати стійкості стійки стінки. Своєю чергою, обрамлення гнутими пластинами всередину отвору хоч і є найбільш працевзатратним заходом серед усіх запропонованих, ефект від такого посилення найбільший, його можна розглядати у випадках конструктивно-архітектурної необхідності виконання отворів у стінці балки, наприклад для проходження комунікацій через тіло балки.

Розрахунок балки на міцність повинен включати такі основні перевірки, які безпосередньо впливають на несучу здатність: розрахунок на згин ослабленого перерізу в місці максимального згинального моменту, перевірка на предмет утворення пластичних шарнірів у поясах балки (механізм Віренделя), перевірка місцевої стійкості стійки стінки в місцях найбільшої поперечної сили, перевірка стикових зварних швів на осі балки. Ці перевірки мають емпіричний характер, який описано в рекомендаціях щодо проектування балок із перфорованою стінкою [2; 22], проте найбільш точним методом сьогодні є створення пластинчастої моделі методом скінченних елементів у таких програмних комплексах, як LIRA-САПР та ANSYS.

Незважаючи на наявність значної кількості досліджень, у науковій спільноті залишаються відкритими деякі важливі питання. Залишається малодослідженим питання проектування перфорації під навантаженнями особливих режимів (сейсмічні, вибухові, циклічні). Слід розробити методи оптимізації форми, розмірів і розташування отворів з урахуванням динамічних ефектів. Недостатньо досліджено нестандартні комбінації навантажень (згин + кручення + поперечна сила [8]) та екстремальні ситуації (удари, пожежі). Треба вивчити, як перфорація впливає на поведінку балок у цих умовах.

Малодослідженими є ригелі з перфорованою стінкою з жорстким кріпленням до колони. У таких ригелях найбільший згинальний момент виникає на опорах, де одночасно і найбільші поперечні сили. Варто було б дослідити роботу балок із перфорованою стінкою змінної висоти для покращення гнучкості проектування рам. Подальші експериментальні та

чисельні дослідження, а також розроблення оптимізаційних алгоритмів і збір емпіричних даних допоможуть розв'язати ці питання. Особливо актуальним є розроблення програмних засобів і баз знань для інженерів, які реалізують сучасні підходи до проектування перфорованих балок.

ВИСНОВКИ

Балки з перфорованою стінкою, виготовлені з прокатних двотаврів, можуть значно підвищити несучу спроможність за рахунок збільшення висоти перерізу порівняно зі звичайними прокатними двотаврами. Перфорація балки знижує жорсткість та міцність її перетину: вона створює концентрації напружень навколо отворів та сприяє небезпечним режимам руйнування (механізм Віренделя, локальна втрата стійкості стійки стінки). Знайшовши компроміс між збільшенням висоти перерізу та ослабленням стінки отворами, можна збільшити несучу здатність та жорсткість балки на 20–30% за рахунок перерозподілу матеріалу без збільшення його кількості.

Існує кілька поширених форм отворів: круглі, шестикутні, прямокутні/ромбічні, еліптичні і синусоїдальні – і форма безпосередньо впливає на поведінку балки. Наприклад, круглі отвори демонструють менші концентрації напружень порівняно з гострокутними вирізами.

Оптимальні геометричні параметри: висота вирізів не повинна перевищувати 75% глибини балки, а відстань між отворами не менше за глибину балки. Найкращою зоною для отворів вважається середина прольоту, подалі від опор.

Незважаючи на наявні дослідження, бракує чітких нормативних указівок і стандартів для проектування балок із перфорованою стінкою. Окрім того, оптимізація конфігурацій перфорації за умов сейсмічних чи інших екстремальних навантажень залишається відкритим завданням.

Подальше розроблення методик проектування і досліджень дасть змогу підвищити надійність і ефективність таких конструкцій у будівництві.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Биків Д.З. Дослідження напружено-деформованого стану сталевих балок із синусоїдальною перфорацією : дис. ... канд. техн. наук. Тернопіль, 2023. 80 с.

[2] ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування : чинний від 01.01.2015. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 181 с.

[3] Abbas J.L. Behaviour of Steel I Beams with Web Openings. *Civil Engineering Journal*. 2023. T. 9, № 3. P. 596–617. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-08>.

[4] Ahmed A., Said A. The Effect of Expansion Ratio, Opening Size, and Prestress Strand on the Flexural Behavior of Steel Beams with Expanded Web using FEA. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. 2024. T. 27, № 2. P. 1–9. <https://doi.org/10.48084/etasr.7254>.

[5] Ahmed A., Said A. The Effect of Opening Size and Expansion Ratio on the Flexural Behavior of Hot Rolled Wide Flange Steel Beams with Expanded Web. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. 2024. T. 14, № 1. P. 13033–13040. URL: <https://doi.org/10.48084/etasr.6698>.

[6] ArcelorMittal Europe – Long Products. *Sections and Merchant Bars. ACB and Angelina beams: a new generation of beams with large web openings* [бровура] / ArcelorMittal. Luxembourg: ArcelorMittal, 2021. 64 p.

[7] Carvalho A., Santos V.B., Rossi A., Martins C.H. Nonlinear inelastic stability behavior of high-strength stainless steel I-beams with sinusoidal web openings. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2023. T. 24, № 7. P. 1–39. <https://doi.org/10.1142/S0219455424500809>.

[8] De'nan F., Hashim N.S. Stress analysis of I-beam with web opening via finite element analysis and experimental study. *World Journal of Engineering*. 2022. T. 20, № 5. P. 974–988. <https://doi.org/10.1108/WJE-11-2021-0627>.

[9] El-Dehemy H. Static and Dynamic Analysis Web Opening of Steel Beams. *World Journal of Engineering and Technology*. 2017. №5. P. 275–285. <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.52022>.

[10] Lawson R.M., Hicks S.J. Design of Composite Beams with Large Web Openings; The Steel Construction Institute. 2011. London, UK. 355 p.

[11] Morkhade S., Jagtap K.R., Ghorpade P.S., Ahiwale D.D. Buckling performance evaluation of steel cellular beams strengthened with flange cover plate. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2022. T. 22, P. 1277–1290. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00483-3>

[12] Morkhade S., Martins C.H. Effect of Web Post Width on Strength Capacity of Steel Beams with Web Openings: Experimental and Analytical Investigation. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2022. T. 27, № 2. P. 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000688](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000688).

[13] Morkhade S. et al. Structural behaviour of castellated steel beams with reinforced web openings. *Journal of Civil Engineering*. 2020. T. 27. P. 1067–1078. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00262-y>.

[14] Nseir J. et al. Lateral Torsional Buckling of Cellular Steel Beams. Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Grapevine, Texas. 2012.

[15] Osmani A. et al. Deflection Predictions of Tapered Cellular Steel Beams Using Analytical Models and an Artificial Neural Network. *Buildings*. 2025, T.15. № 992. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/buildings15060992>.

[16] Pawar K., Kumbhar P. Performance Analysis of Castellated Steel I-Beam using FRP Stiffeners.

International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2022. T. 10, № 2. P. 1134–1142. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.38596>.

[17] Samadhan M., Gupta L. Critical study of steel beams with web openings, *Australian Journal of Structural Engineering*. 2023. T. 24. № 1. P. 24–35. <https://doi.org/10.1080/13287982.2022.2117319>.

[18] Silwal P., Parvin A., Alhusban M. Numerical Investigation on Strengthening of Steel Beams for Corrosion Damage or Web Openings Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets. *MDPI, Buildings*. 2024. T. 14. № 1069. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/buildings14041069>.

[19] Saternus P. Cellular Beams with Closely Spaced Web Openings – A Review of Analytical Calculation Models for Web-Post Buckling, *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. T. 16, № 1. P. 213–230. <https://doi.org/10.12913/22998624/144146>.

[20] Sehwal M., Celikag M. Investigation on Failure Mechanisms of Symmetric and Asymmetric Cellular Steel Beams, *Special Issue:EUROSTEEL 2021 Sheffield – Steel's coming home*. 2021. T. 4, № 2–4. P. 2308–2314. <https://doi.org/10.1002/cepa.1554>

[21] Sehwal M., Celikag M. Load Carrying Capacity of Hot-Rolled Hybrid Cellular Steel Beams: Experimental Investigations. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. T. 47. № 10. P. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06508-4>

[22] Shamass R. et al. Web-Post Buckling Prediction Resistance of Steel Beams with Elliptically-Based Web Openings using Artificial Neural Networks (ANN); *Thin-Walled Structures*, London, UK. 2022. T. 180. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109959>.

[23] Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes, through Non-linear Finite Element Analyses. *Journal of Structural Engineering*, 2012. T. 138, № 10. P. 1214–1230. ISSN 0733-9445.

[24] Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with Different Novel Web Opening Shapes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011. T. 67, № 10. P. 1605–1620. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004>.

REFERENCES

[1] Bykiv, D.Z. (2023). Doslidzhennia napruzhenodeformovanoho stanu stalevykh balok iz synusoidalnoiu perforatsieiu [Investigation of the stress-strain state of steel beams with sinusoidal perforation]. [Master's thesis, Ternopil Ivan Puluj National Technical University]. Ternopil, Ukraine [in Ukrainian].

[2] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proiektuvannia : chynnyi vid 01.01.2015. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy [Ministry for Regional Development, Construction, and Housing of Ukraine. (2014). DBN V.2.6-198:2014 Steel structures. Design code. With amendment No. 1 [Effective from 2015-01-01]. Kyiv, Ukraine: Minregionbud of Ukraine [in Ukrainian].

[3] Abbas, J.L. (2023). Behaviour of Steel I Beams with Web Openings. *Civil Engineering Journal*, 9(3), 596–617. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-08> [in English].

- [4] Ahmed, A., & Said, A. (2024). The Effect of Expansion Ratio, Opening Size, and Prestress Strand on the Flexural Behavior of Steel Beams with Expanded Web using FEA. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 27(2), 1–9. <https://doi.org/10.48084/etasr.7254> [in English].
- [5] Ahmed, A., & Said, A. (2024). The Effect of Opening Size and Expansion Ratio on the Flexural Behavior of Hot Rolled Wide Flange Steel Beams with Expanded Web. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(1), 13033–13040. <https://doi.org/10.48084/etasr.6698> [in English].
- [6] ArcelorMittal (2021). Beams with large web openings. *ArcelorMittal* [in English].
- [7] Carvalho, A., Santos, V.B., Rossi, A., & Martins, C.H. (2023). Nonlinear inelastic stability behavior of high-strength stainless steel I-beams with sinusoidal web openings. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 24(7), 1–39. <https://doi.org/10.1142/S0219455424500809> [in English].
- [8] De'nan, F., & Hashim, N.S (2022). Stress analysis of I-beam with web opening via finite element analysis and experimental study. *World Journal of Engineering*, 20(5), 974–988. <https://doi.org/10.1108/WJE-11-2021-0627> [in English].
- [9] El-Dehemy, H. (2017). Static and Dynamic Analysis Web Opening of Steel Beams. *World Journal of Engineering and Technology*, (5), 275–285 <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.52022> [in English].
- [10] Lawson, R.M., & Hicks, S.J. (2011). Design of Composite Beams with Large Web Openings, P355 ed.; *The Steel Construction Institute*: London, UK [in English].
- [11] Morkhade, S. et al. (2022). Buckling performance evaluation of steel cellular beams strengthened with flange cover plate. *Asian Journal of Civil Engineering*, 22, 1277–1290. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00483-3> [in English].
- [12] Morkhade, S., & Martins, C.H. (2022). Effect of Web Post Width on Strength Capacity of Steel Beams with Web Openings: Experimental and Analytical Investigation. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 27(2), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000688](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000688) [in English].
- [13] Morkhade, S. et al. (2020). Structural behaviour of castellated steel beams with reinforced web openings. *Journal of Civil Engineering*, 27, 1067–1078. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00262-y> [in English].
- [14] Nseir, J. et al. (2012). Lateral Torsional Buckling of Cellular Steel Beams. *Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Grapevine, Texas* [in English].
- [15] Osmani, A. et al. (2025). Deflection Predictions of Tapered Cellular Steel Beams Using Analytical Models and an Artificial Neural Network. *Buildings*, 15(992), 1–23. <https://doi.org/10.3390/buildings15060992> [in English].
- [16] Pawar, K., & Kumbhar, P. (2022). Performance Analysis of Castellated Steel I-Beam using FRP Stiffeners. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(2), 1134–1142. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.38596> [in English].
- [17] Samadhan, G.M., & Gupta, L.M. (2022). Critical study of steel beams with web openings, *Australian Journal of Structural Engineering*, 24(1), 24–35. <https://doi.org/10.1080/13287982.2022.2117319> [in English].
- [18] Silwal, P., Parvin, A., & Alhusban, M. (2024). Numerical Investigation on Strengthening of Steel Beams for Corrosion Damage or Web Openings Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets, *MDPI, Buildings*, 14(1069), 1–22. <https://doi.org/10.3390/buildings14041069> [in English].
- [19] Saternus, P. (2022). Cellular Beams with Closely Spaced Web Openings – A Review of Analytical Calculation Models for Web-Post Buckling. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(1), 213–230. <https://doi.org/10.12913/22998624/144146> [in English].
- [20] Sehwal, M., & Celikag, M. (2021). Investigation on Failure Mechanisms of Symmetric and Asymmetric Cellular Steel Beams. *Special Issue: EUROSTEEL 2021 Sheffield – Steel's coming home*, 4(2-4), 2308–2314. <https://doi.org/10.1002/cepa.1554> [in English].
- [21] Sehwal, M., & Celikag, M. (2022). Load Carrying Capacity of Hot-Rolled Hybrid Cellular Steel Beams: Experimental Investigations. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(10), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06508-4> [in English].
- [22] Shamass, R. et al. (2022). Web-Post Buckling Prediction Resistance of Steel Beams with Elliptically-Based Web Openings using Artificial Neural Networks (ANN); *Thin-Walled Structures*, 180, (1–11), London, UK. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109959> [in English].
- [23] Tsavdaridis, K.D., & D'Mello, C. (2012). Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes, through Non-linear Finite Element Analyses. *Journal of Structural Engineering*, 138(10). 1214–1230. ISSN 0733-9445 [in English].
- [24] Tsavdaridis, K.D., & D'Mello, C. (2011). Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with Different Novel Web Opening Shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1605–1620. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004> [in English].

ABSTRACT**Godzynskyi I. Features of the Application of I-Beams with Perforated Webs in Construction**

Purpose. To investigate existing scientific sources concerning the stress–strain state of steel beams with perforated webs, their structural behavior, manufacturing features, hole dimensions, and the shapes of cutting lines.

Methodology. The study employs a systematic approach that includes the analysis of scientific literature, generalization of experimental research results, numerical modeling, and comparative analysis.

Results. Optimal hole sizes and shapes in the beam web have been identified to minimize the adverse effects on strength in weakened sections. The results of numerical modeling using the finite element method with plate elements show a high correlation with experimental data.

Scientific novelty. The study summarizes and systematizes modern approaches to the design of steel I-beams with perforated webs, count the influence of hole shape, size, and arrangement on strength and stability. A distinctive feature of the work is the integration of experimental and numerical research results to determine the optimal geometric parameters of the perforation.

Practical relevance. The findings can be applied in the design of steel structures with perforated elements, enabling more efficient use of materials without compromising load-bearing capacity. The proposed generalizations regarding the selection of hole shapes and configurations allow engineers to make more informed technical decisions during the design process. The practical relevance of the study is reinforced by its applicability in the context of Ukraine's post-war reconstruction, where ensuring both reliability and cost-effectiveness of construction under resource constraints is critically important. The conclusions may be considered in the development of regulatory documents and guidelines for the use of perforated beam elements in construction.

Keywords: steel beams, perforated web, load-bearing capacity, buckling, Vierendeel mechanism.

AUTHOR'S NOTE:

Godzynskyi Ivan, Postgraduate Student at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: ivan.godzynskyi@gmail.com, orcid: 0009-0007-5667-2286.

Стаття подана до редакції 28.05.2025 р.