

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ ПЕРФОРОВАНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК З КРУГЛИМИ НЕПІДСИЛЕНИМИ ТА ПІДСИЛЕНИМИ ВИРІЗАМИ

STRESS-STRAIN STATE STUDY ON CELLULAR STEEL BEAMS WITH AND WITHOUT STIFFENERS ALONG THE OPENING EDGE BY FINITE ELEMENT METHOD

**Підгурський М.І., д.т.н., проф., ORCID [0000-0002-0218-8874](https://orcid.org/0000-0002-0218-8874),
Підгурський І.М., к.т.н., доц., ORCID [0000-0002-5937-7625](https://orcid.org/0000-0002-5937-7625),
Слободян В. В., інженер (Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль)**

Pidgurskyi M.I., doctor of technical sciences, professor, Pidgurskyi I.M., candidate of technical sciences, associate professor, Slobodian V. V., engineer (Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil)

Методом скінчених елементів проведено моделювання перфорованих балок з круглими вирізами. Отримано розподіл напружень в зонах перфорації балки з круглими вирізами. Продемонстровано доцільність підсилення круглих вирізів трубчастими вставками. Застосування такого способу підсилення привело до суттєвого зменшення напружень в зонах вирізів перфорованої балки.

In this article the results of studies of the stress-strain state in the areas of circular openings of cellular steel beams are considered. An overview of the types and features of cellular beams is given. Their advantages and disadvantages are given. It is noted that in cellular beams the most dangerous in terms of strength of their load-bearing capacity is the section weakened by perforation. Methods for estimating the stress-strain state of cellular beams in the areas of circular openings, in particular the finite element method are considered. Modeling of cellular beams with circular openings is carried out. The stress distribution in the perforation zone of the beam with circular openings was obtained by the finite element method. The stress distribution in the perforation zone of the beam with circular openings is obtained by the finite element method. Its features are analyzed. Methods of stiffening of circular openings of a cellular beam are considered. For the proposed cellular beam model, it is proposed to stiffen circular openings with tubular elements that are welded along the contour of the circles. The expediency of usage of this stiffening method for circular openings has been demonstrated. It is

established that when the beams are loaded with concentrated force in the middle of the span, the maximum normal stresses near the central circular openings are reduced by more than 40%. The maximum normal stresses in the beam flanges and its deflections are also reduced. A preliminary estimate of the degree of increase in the bearing capacity of the beam with stiffened circular openings is obtained.

Ключові слова: перфорована балка, круглі вирізи, метод скінчених елементів, напруження, підсилення.

Cellular beam, circular openings, finite element method, stress, stiffeners.

Вступ. У сучасному будівництві балки з перфорованою стінкою широко застосовуються як несучі конструкції покриттів та перекриттів рамних систем багатопверхових каркасів, у рамних каркасах промислових будівель, у тому числі з підвісними кранами, як балки шляхів підвісного транспорту та монорельсів, та ін.

Перфорована балка – це конструкція, яку отримують з прокатного двотавра після його зигзагоподібного розрізання і зварювання виступів стінки. Це дозволяє значно збільшити висоту балки у порівнянні з вихідним профілем. Несуча здатність таких перфорованих балок в 1,3 – 1,5 рази перевищує несучу здатність початкових профілів за рахунок збільшення моментів інерції в 1,5 ÷ 2,0 рази. Варто зазначити, що наявність вирізів в стінці прокатних двотаврів дозволяє розмістити інженерні комунікації в межах висоти балки перекриття. Таким чином, може бути зменшена висота будівлі і знижені експлуатаційні витрати. Ці якості, у поєднанні з компактністю, високим ступенем транспортабельності, пристосованістю до автоматизованого виготовлення, роблять такі балки конкурентоздатними з решітчастими конструкціями [1].

Аналіз останніх досліджень. Огляд конструктивних рішень перфорованих балок вказує на різноманіття форм і розташування вирізів, що застосовуються при їх виготовленні, наводяться переваги і недоліки, а також наведені результати досліджень таких балок [1, 2].

Варто зазначити, що більшість досліджень стосується шести- чи восьмикутних вирізів [3]. Проте за останній час у будівництві широко застосовуються інші форми вирізів [2] – овальні, синусоїдальні і, найчастіше, круглі. Вибір найбільш раціональних варіантів, як показали результати досліджень у вищезазначених роботах, можливий лише після аналізу впливу різних умов навантаження перфорованих балок та впливу різних елементів конструктивного оформлення на міцність балок та їх жорсткість.

Постановка проблеми. Варто зазначити, що оцінка НДС перфорованих балок з круглими отворами вимагає додаткових досліджень, незважаючи на значну частину наукових робіт з цього питання та практичний досвід експлуатації таких балок. Відсутність розділів з даної проблематики, як у

вітчизняних будівельних нормах ДБН В.2.6.–198: 2014[4], так і в Eurocode 3 [5] зумовлена складністю вирішення даної задачі.

У зв'язку з цим **метою** даної роботи є дослідження напружено-деформівного стану балок з круглими вирізами, що дозволить надійніше оцінювати їх міцність та запропонувати конструктивні способи підвищення несучої здатності перфорованих балок.

Основна частина. Досліджувався розподіл напружень у стінці перфорованої балки з круглими вирізами з однорядним їх розташуванням. Моделювалась шарнірно закріплена балка прольотом 12м, з рівномірно розподіленим навантаженням $q = 50$ кН/м. Моделювання проводилось в програмному комплексі Solid Works, а розрахунки – в Ansys Work bench за допомогою методу скінчених елементів [6]. Розрахунок проводився для пружної стадії роботи балки.

Розглянута балка моделювалась з низьколегової сталі 09Г2С класу С345 (прокатний двотавр №60Б2 (рис.1)) з такими геометричними параметрами $c = 310$ мм, $d = 590$ мм, $b = 240$ мм, $S = 830$ мм, $H = 847$ мм, $h = 597$ мм, $h_1 = 173,5$ мм, $h_2 = 423,5$ мм (рис. 2, а, б). Відносна ширина перемичок між отворами складає $b/d = 0,41$; відносна висота вирізів $d/H = 0,70$; відносна довжина балки $l/H \approx 14$.

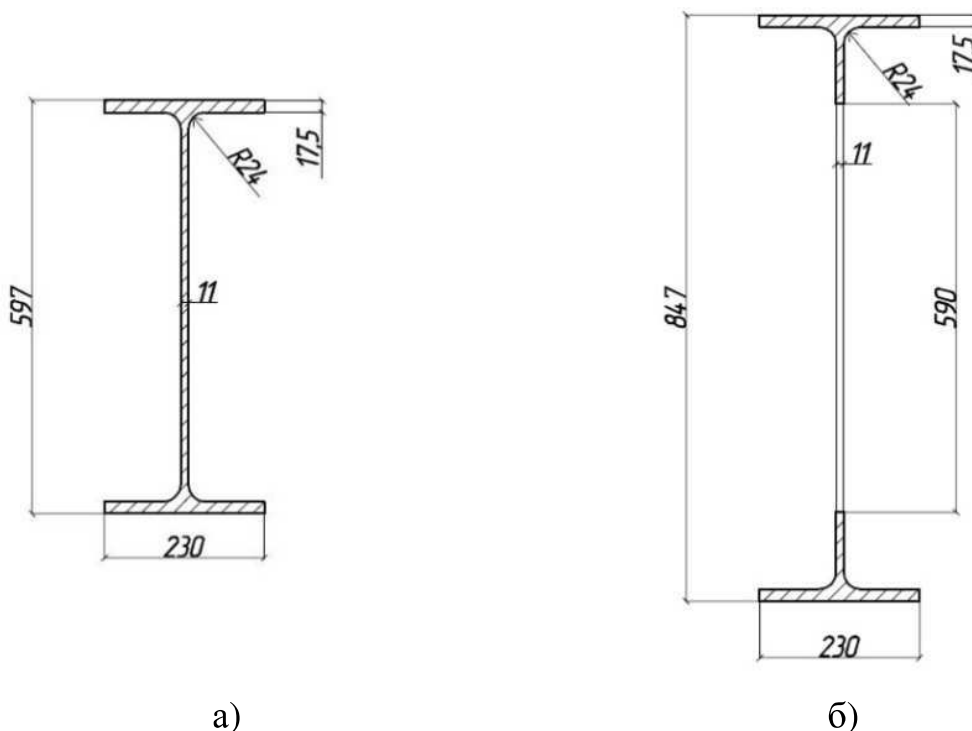


Рис. 1 – Перерізи балок: а) прокатної двотаврової балки №60Б2; б) перфорованої балки з діаметром круглого отвору 590 мм.

Нормальні напруження σ_z визначались посередині прольоту по чотирьох перерізах 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 (рис. 2, б).

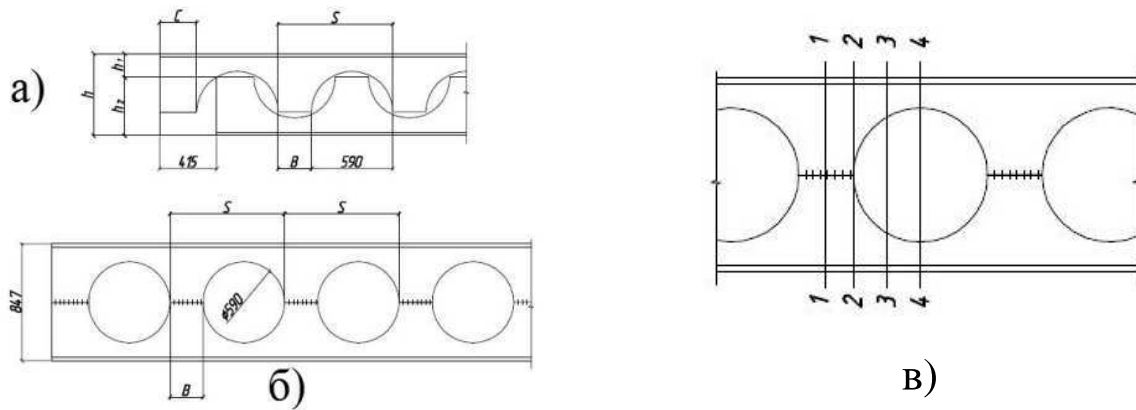


Рис.2. Схема перфорації балки та досліджувані перерізи: а) схема розрізання; б) схема перфорації; в) схема перерізів для оцінки напружень σ_z

Результати досліджень НДС розглянутої перфорованої балки методом скінчених елементів представлено на рисунку 3.

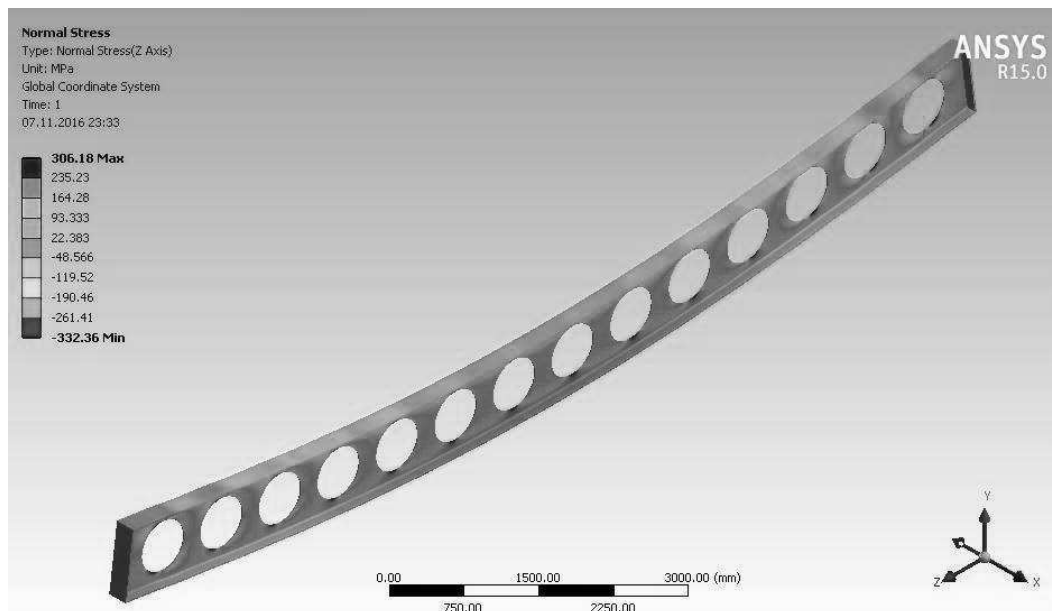


Рис. 3. Розподіл нормальних напружень у перфорованій балці

На основі отриманих результатів побудовано епюри нормальних напружень у перерізах 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 (рис.4).

Аналізуючи наведені вище результати, варто зазначити, що наявність вирізів в стінці суттєво змінює картину напружень у перерізах перфорованої балки у порівнянні з суцільною балкою. У балках з перфорованою стінкою розподіл напружень є криволінійним і відрізняється від звичайного, розрахованого за формулами опору матеріалів, у якому напруження змінюються за лінійним законом. Це пояснюється як зміною напружено-деформівного стану в області вирізу, так і взаємовпливом сусідніх вирізів. Максимальні значення напружень спостерігаються у верхній та нижній точках кругового отвору.

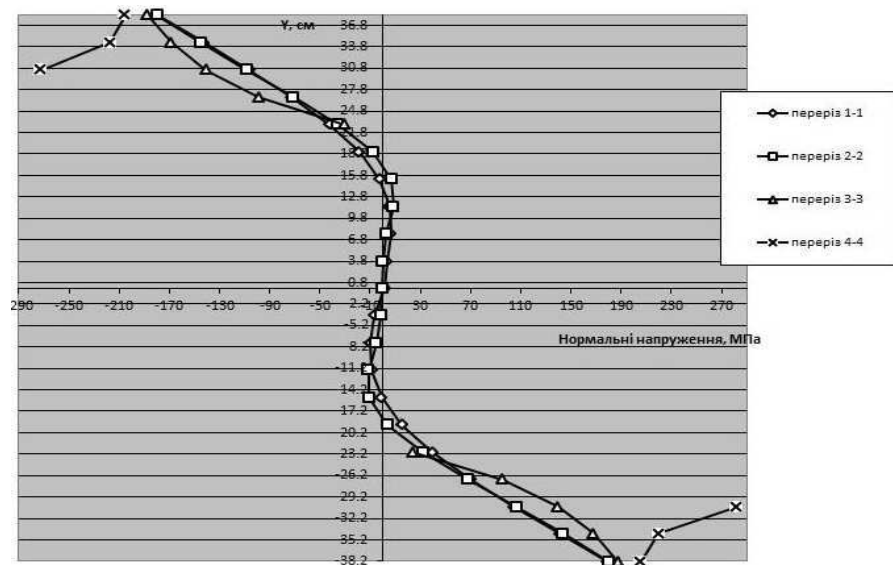


Рис.4. Епюри нормальних напружень σ_z .

У зв'язку з цим необхідний пошук способів підсилення стінки перфорованої балки, які дозволять якісно змінити її напружений стан в зонах впливу концентрації напружень – в зонах вирізів. Таке підсилення [7, 8] є доцільним, для перфорованих балок, що сприймають циклічні навантаження.

З цією метою розглянуто конструктивне підсилення вирізів шарнірно закріпленої перфорованої балки прольотом 12м. Балка виготовлена з прокатного двотавра №60Б2 з низьколегованої сталі 09Г2С та навантажена зосередженою силою посередині прольоту балки. Лінія дії сили проходить посередині перемички між круглими вирізами. У запропонованій моделі чотири центральні вирізи підсилено трубчастими елементами зі зварюванням їх по контуру отворів. Геометричні розміри балки з підсиленими отворами та фрагмент розрахункової моделі представлено на рис. 5.

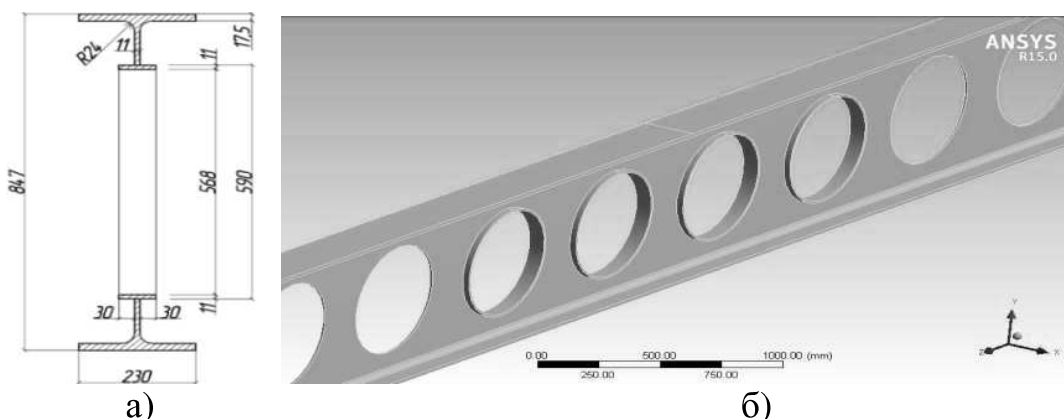


Рис. 5. Перфорована балка з підсиленими круглими вирізами: а) розріз; б)фрагмент розрахункової моделі

На рис. 6 представлено розподіл нормальних напружень у перфорованій балці з круглими вирізами без підсилень (рис. 6, а) та з підсиленними чотирма центральними вирізами (рис. 6, б).

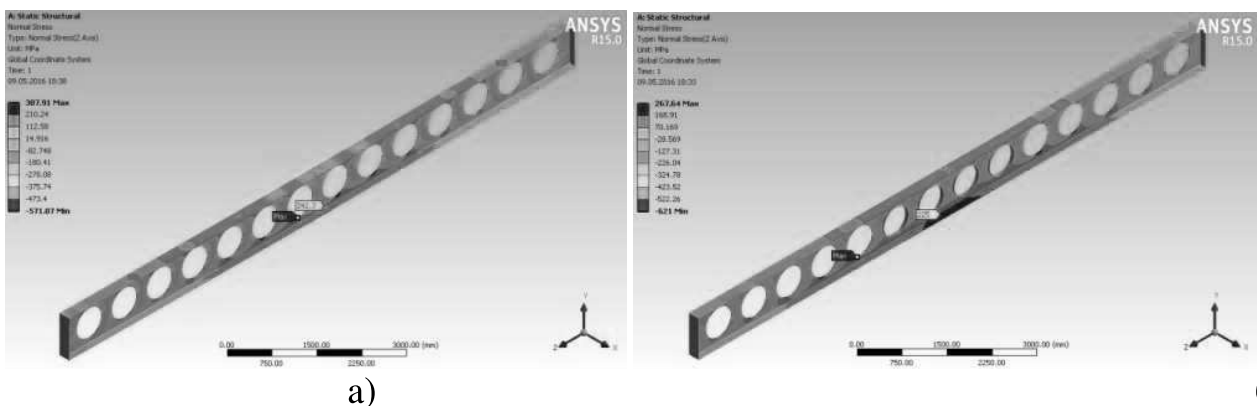


Рис. 6. Розподіл нормальних напружень у перфорованій балці з круглими вирізами: а) без їх підсилень; б)зпідсиленням.

Проведено порівняльний аналіз максимальних нормальних напружень в перших семи вирізах перфорованої балки без підсилень (варіант 1) та з підсиленними центральними вирізами №6 та №7(варіант 2) (табл. 1.)

Таблиця 1

Максимальні нормальні напруження у вирізах непідсиленої та підсиленої перфорованих балок з круглими вирізами

Модель перфорованої балки	Напруження σ_{\max} , МПа						
	Номер отвору						
	1	2	3	4	5	6	7
Без підсилення	151,2	195,5	210,6	241,7	267,1	300,7	307,9
З підсиленням	151,1	193	211,8	238,2	267,6	155,1	175,4

На основі порівняльного аналізу встановлена доцільність підсилення стінки перфорованих балок. Так, максимальні напруження σ_{\max} в області вирізів, максимально наближених до лінії зосередженої сили (вирізи 7 та 6), зменшились на 43,0 % та 47,4 % відповідно. Також зменшуються на 7,6 % максимальні нормальні напруження σ_{\max} в полиці перфорованої балки з підсиленними круглими вирізами. Те ж саме можна сказати про максимальні прогини, які на 3% будуть меншими в балках з підсиленням. Зазначимо, що вага балки збільшилась на 3% і незначно зростає трудомісткість виконання робіт при влаштуванні підсилень.

Висновки. 1. Проведено моделювання та аналіз напружено-деформівного стану балок з круглою перфорацією стінки методом скінчених елементів.

2. Отримано розподіл напружень в околі круглих вирізів та в стінці-перемичці.
3. Для перфорованих балок з круглою перфорацією, що сприймають циклічні навантаження, запропоновано конструкційні підсилення отворів трубчастими вставками. Встановлено, що при навантаженні балки зосередженою силою максимальні напруження в околі підсилених отворів зменшуються на понад 40 %.

1. Пермяков В.О., Нілов О.О., Шимановський О.В. Металеві конструкції. Підручник. К.: Вид-во «Сталь», 2010. 869 с.

Permyakov V.O., Nilov O.O., Shymanovs'kyu O.V. Metalevi konstruktsiyi. Pidruchnyk. K.: Vyd-vo «Stal'», 2010. 869 s.

2. Підгурський М. І., Слободян В. В. Дослідження напружено–деформівного стану та граничних навантажень перфорованих балок методом скінчених елементів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2015. Вип. 30. С. 219-225.

Pidhurs'kyu M. I., Slobodyan V. V. Doslidzhennya napruzheno–deformivnoho stanu ta hranychnykh navantazhen' perforovanykh balok metodom skinchenykh elementiv. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Rivne, 2015. Vyp. 30. S. 219-225.

3. Pritykin A. Stress concentration in castellated I-beam sunder transverse bending. МЕХАНІКА, 2016. Volume 22(6). Pp. 466-473.

4. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції Норми проектування. Київ:Мінрегіон України, 2014. 206 с.

DBN V.2.6-198:2014 Stalevi konstruktsiyi Normy proektuvannya. Kyiv:Minrehion Ukrayiny, 2014. 206 s.

5. BS EN 1993-1-5:2006+A2:2019 Eurocode 3. Design of steel structures Plated structural elements. European committee for standardization. Brussels, 2019. 58 p.

6. H.H. Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19, SDC Pub., 2019.

7. V. V. Kshirsagar, S.R. Parekar Behaviour of Castellated Beams with and without Stiffeners A Review. International Research Journal of Engineering and Technology, 2018. V.5. Issue 4. Pp. 2964-2969.

8. Siddheshwari A. Patil, Popat D Kumbhar. Comparative Study of Transverse Stiffeners and Stiffeners along the Opening Edge used for Castellated Beam. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology. Volume 5. Pp. 8516-8522, (2016).