

DOI: 10.32347/2076-815x.2021.78.426-434

УДК 624.072.014.2

к.т.н. Підгурський І.М.,
ipidhurskyu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5937-7625, h-index:3,
д.т.н., професор Підгурський М.І.,
pidhurskyu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0218-8874, h-index:6,
Підлужний О.М.,
pidluzhniyoleh@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0574-0740,
Слободян В.В., vasy1129@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9681-1227,
Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИМКОЇ ЗДАТНОСТІ БАЛОК З ОДНОРЯДНОЮ ТА ДВОРЯДНОЮ ПЕРФОРАЦІЄЮ РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Розроблено методику та досліджено методом скінчених елементів напружено-деформівний стан та граничні навантаження балок з круглою, різновидами еліпсоподібної та овальної перфорації при їх однорядному та дворядному розташуванні в стінці. Здійснено порівняння результатів для обґрунтованого компонування раціональних конструктивних форм перфорованих балок з однорядною та дворядною перфорацією стінок.

Ключові слова: перфоровані балки; однорядна перфорація; дворядна перфорація; метод скінчених елементів; напружено-деформівний стан; граничні навантаження.

Постановка проблеми. Застосування перфорованих балок перекриття і покриття знижує вагу конструкцій та забезпечує ефективне використання міжбалкового простору внаслідок проведення комунікацій в отворах балок. Крім технічних переваг перфорація створює ще й кращий естетичний вигляд, а використання різноманітних форм перфорованих елементів є цікавим архітектурно будівельним рішенням інтер'єру [1].

Ефективність двотавра з перфорованою стінкою у порівнянні з формоутворюючим двотавром пояснюється тим, що висота першого збільшується зазвичай в $1,3 \div 1,5$ рази, у зв'язку з цим в $1,5 \div 2$ рази збільшується момент інерції його перерізу і, як наслідок, в $1,3 \div 1,5$ рази збільшується несуча здатність у порівнянні з формоутворюючим двотавром [2]. Завдяки створеним вирізам у стінці двотавра з неї ніби вилучається до 35% – 40% матеріалу. Двотаври з перфорованою стінкою забезпечують 20-30% економії металу у порівнянні з формоутворюючими прокатними двотаврами і дешевші за останні на 10-18% [1-3].

Аналіз останніх досліджень. У будівельних спорудах широко застосовуються перфоровані балки з шести- чи восьмикутними [4], круглими [3], овальними [5], синусоїдальними [6] та ін. вирізами. За останні роки почали застосовувати балки з дворядною перфорацією шестикутними отворами [7]. Таке різноманіття конструктивних рішень засвідчує, що пошук раціональних форм балок з перфорованими стінками продовжується і є далеким від завершення. Вибір оптимальних варіантів можливий лише після аналізу впливу геометричних особливостей вирізів [3, 5] на напружено-деформівний стан та стійкість балок. Зокрема, досліджується вплив відносної висоти форми, варіювання відстані між вирізами та інші особливості [2, 3, 5].

Застосування дворядної перфорації шестикутними отворами, як показали дослідження, дозволяє підвищити міцність, жорсткість і стійкість балок завдяки більш рівномірному розподілу матеріалу в їх стінці [7].

Постановка завдання. У зв'язку з цим перспективною задачею є необхідність подальших досліджень напружено-деформівного стану балок з дворядною перфорацією з метою надійної оцінки їх міцності, жорсткості та стійкості та можливого підвищення їх несучої здатності та зниження металомісткості.

Викладення основного матеріалу. У даній роботі проведено порівняльні дослідження балок з однорядною та дворядною перфорацією стінки круглими отворами. Технологія виготовлення балок з однорядною перфорацією представлена на рис.1, а з дворядною – на рис. 2. Зазначимо, що технологія виготовлення балок з дворядною перфорацією відрізняється більшою кількістю ліній різання та необхідністю в додатковому зварюванні частин по краях балки (рис.2).

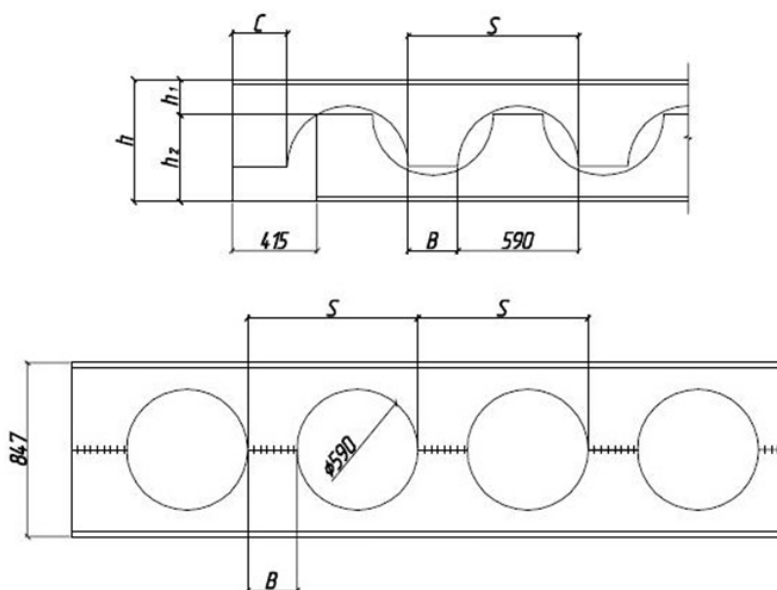


Рис. 1. Технологія виготовлення балок з однорядною перфорацією стінки круглими вирізами

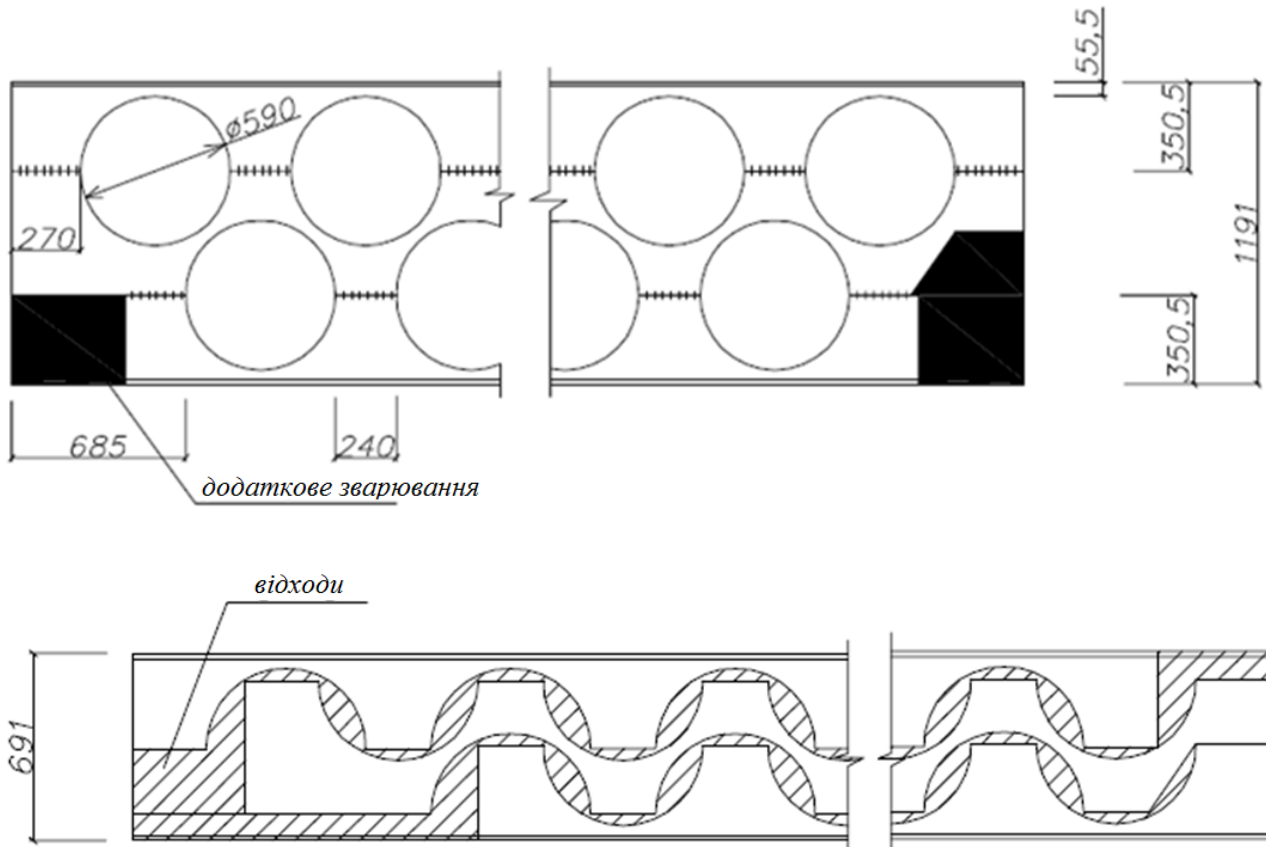


Рис. 2. Технологія виготовлення балок з дворядною перфорацією стінки круглими вирізами.

Розглянуто шарнірно закріплені балки прольотом 12м з рівномірно розподіленим навантаженням $q=50\text{кН/м}$. Балки виготовлені з низьколегованої сталі 09Г2С з механічними характеристиками $\sigma_y = 380\text{ МПа}$ та $\sigma_u = 530\text{ МПа}$. Формоутворюючим профілем для балок з однорядною перфорацією є прокатний двотавр № 60Б2, а для балок з дворядною перфорацією – прокатний двотавр №70Б1.

Балки моделювались у програмному комплексі SolidWorks. Оцінка напружено-деформівного стану здійснювалась за допомогою як програмного пакету прикладних програм SolidWorks, так і ANSYS [8, 9]. При оцінці НДС в зонах вирізів присутня концентрація напружень, тому в цій області важливо правильно вибрати розмір скінченого елемента. Він повинен бути суттєво меншим розміру перетинки між вирізами. Особливо це стосується дворядної перфорації з шахматним розташуванням вирізів. У зв'язку з цим створювалась модель з глобальною сіткою елементів розміром 40,8 мм з її згущенням біля вирізів з величиною скінченого елемента 2,6 мм. Для балок з однорядною перфорацією стінки розмір скінченого елемента глобальної сітки становив 86 мм, а біля вирізів – 2,4мм. Фрагменти сітки скінчено-елементної моделі для перфорованої балки з однорядною перфорацією представлено на рис. 3 а, з дворядною – на рис. 3 б.

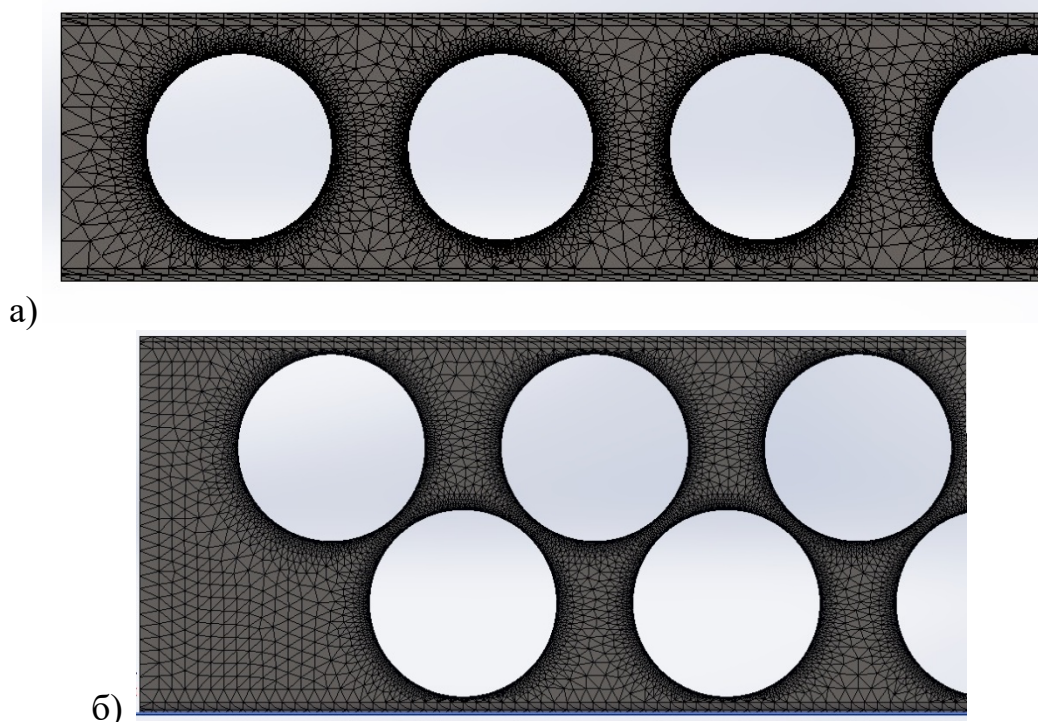


Рис. 3. Фрагменти сітки скінчено-елементних моделей балок: а) з однорядною перфорацією стінки; б) з дворядною перфорацією стінки.

На першому етапі розрахунків виконано порівняльний аналіз двох перфорованих балок з круглою перфорацією, що мають майже однакову вагу. Формоутворюючим профілем для першої є прокатний двотавр 60Б2 (балка має однорядну перфорацію); для другої – прокатний двотавр 70Б1 (балка має дворядну перфорацію). Порівняльний розрахунок балок представлено у табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз розрахунку балок з круглою перфорацією.

Тип перфорації	Критерії порівняння					
	діаметр вирізів, мм	кількість вирізів	вага перфорованої балки, кг	висота перфорованої балки, мм	максимальний прогин, мм	критична сила, кН/м
однорядна з круглими вирізами	590	14	937,8	847	44,6	14,6
дворядна з круглими вирізами	590	27	861,0	1191	27,1	19,0995

Порівняльний аналіз майже однакових за вагою перфорованих балок показує (табл. 1), що максимальний прогин у балках з дворядною перфорацією при оцінці жорсткості є в 1,65 раз меншим, а критична сила при оцінці загальної стійкості є в 1,31 рази вищою, ніж у балках з однорядною перфорацією стінки. Зазначимо, що максимальні напруження виникають в

перемичці між отворами. Характер розподілу напружень біля вирізів представлено на рис. 4.

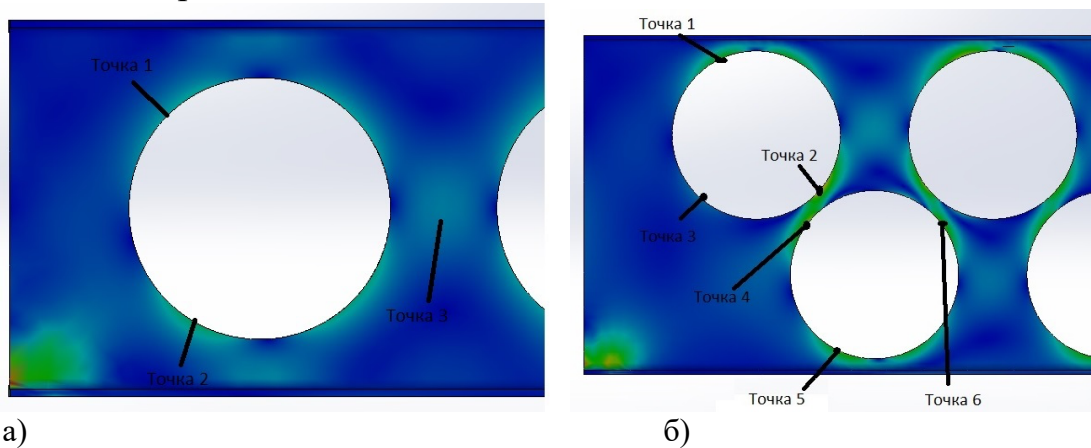


Рис. 4. Фрагмент розподілу напружень в перетинах між круглими вирізами при:
а) однорядній перфорації стінки; б) дворядній перфорації стінки.

Таким чином, якщо порівнювати з однорядною перфорацією, то у дворядній утворена балка буде мати більшу висоту і відповідно вищу міцність і жорсткість, що свідчить про перспективність застосування конструкцій з дворядною перфорацією.

У роботах [] зазначено, що при конструюванні перфорованих балок суттєвий вплив на напружено-деформівний стан та стійкість мають вид перфорації (шестикутна, кругла, овальна та ін.) та розмір перемичок між вирізами. У зв'язку з цим розглянуто 5 варіантів дворядної перфорації: з отворами у вигляді: круга, овалу горизонтального, овалу вертикального, еліпса вертикального та еліпса нахиленого на 45° (рис.5).

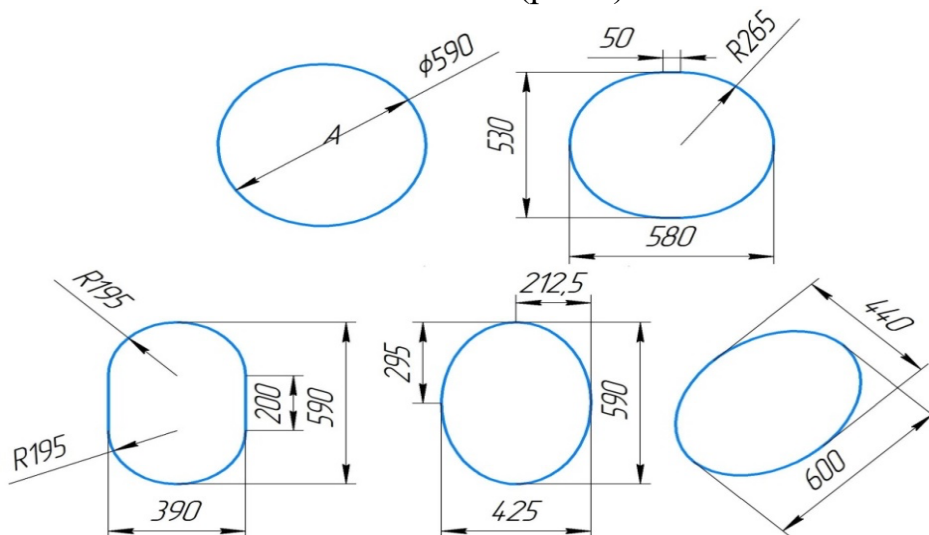


Рис. 5. Розміри отворів для розглянутих видів перфорації.

Результати досліджень балок з дворядною перфорацією у вигляді круга, овалу горизонтального, овалу вертикального, еліпса та еліпса, повернутого на 45° зведено у таблицю 2.

Таблиця 2.
Результати досліджень напружено-деформівного стану та критичної сили при різних видах дворядної перфорації.

Критерії порівняння	Вид дворядної перфорації				
	Кругла	Овальна (горизонтальна)	Овальна (вертикальна)	Еліпсоподібна (вертикальна)	Еліпсоподібна (повернута на 45°)
Площа отворів, см ²	73779,8	76573,1	76986	76767,2	76678,8
Кількість отворів	27	31	39	39	37
Прогин δ_{\max} , мм	27,1	27,1	30,3	28,7	28
σ_{\max} , МПа	400,4	322,4	464,4	386,9	392,4
Критична сила, кН/м	19,0995	19,0695	19,0855	19,166	19,043

Отримані результати свідчать, що найменші загальні деформації спостерігаються в балках з круглою та овальною горизонтальною перфорацією і складають 27,1 мм. Зазначимо, що максимальний прогин спостерігається для овальної вертикальної перфорації – 30,3 мм, тобто розбіжність екстремальних значень прогинів не перевищує 11,8 %. Підводячи підсумок виконаних розрахунків з оцінки стійкості, слід відмітити, що найбільшу критичну силу матиме балка з еліпсоподібною вертикальною перфорацією (19,166кН/м). Максимальні відхилення критичної сили для досліджуваних видів дворядної перфорації не перевищують 0,65 %.

При аналізі напружень в зонах перемичок між отворами варто зазначити наступне. По-перше, задача з визначення напружень розв'язується в пружній постановці. По-друге зазначимо, що величина перемичок для досліджуваних форм вирізів коливається в діапазоні 52 – 58 мм, тільки для перфорації у вигляді вертикального овалу вона складає 40 мм. Це пов'язано з висотою отвору і, відповідно, технологією виготовлення. Тому для цього випадку спостерігаються максимальні напруження. На основі порівняльного аналізу перфорованих балок з дворядною перфорацією стінки встановлено, що розмір перемички буде чи не основним важелем під час їх компонування.

Висновки.

1. Розроблено методику та проведено моделювання балок з перфорованою стінкою круглими вирізами при однорядному та дворядному їх розташуванні. Встановлено, що за практично однакової ваги балок, при дворядній перфорації максимальний прогин є в 1,65 раз меншим, а граничне

зусилля при оцінці загальної стійкості є в 1,31 рази більшим, ніж у балках з однорядною перфорацією.

2. Здійснено моделювання та аналіз напружено-деформівного стану балок з різними видами перфорації (круглою, овальною, еліпсоподібною) при їх дворядному розташуванні в стінці. Встановлено, що найсуттєвіший вплив (за однакових інших умов) має розмір перетинки між отворами. Встановлення коректних розмірів вирізів та відстаней між ними є вирішальним при конструюванні балок з дворядною перфорацією стінки.

Список використаних джерел

1. Лоусон М., Билык А. Стальные конструкции в архитектуре: 2-е изд., исправ. и доп. — Киев: Украинский Центр Стального Строительства (УЦСС), 2015. — 140 с.
2. Sameer S. Fares, P.E., S.E., P. Eng, John Coulson, P.E., David W. Dinehart, Ph.D., Castellated and cellular beam design / Aisc design guide 31– 2016 –110 p.
3. Pritykin, A.I., Lavrova A.S. (2017). Prediction of the stress level and stress concentration in cellular beams with circular openings. – Mechanics Of Solid Bodies –Vol. 23 No. 4 (2017) pp. 488-494.
4. Kaveh, A. & Shokohi, Farnoud. (2014). Cost optimization of castellated beams using charged system search algorithm. Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Civil Engineering. 38. pp. 235-249.
5. Підгурський, М.І.; Слободян, В.В. Дослідження напружено–деформівного стану та граничних навантажень перфорованих балок методом скінчених елементів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2015, 30: с. 218-224.
6. Rohit Kurlapkar , Amruta Patil, 2021, Optimization of Various Parameters of Castellated Beam Containing Sinusoidal Openings, International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT) Volume 10, Issue 06 (June 2021). – pp. 120-123.
7. Pritykin A.G. Beams deformations with a single or double rows perforated wall/ A.I.Pritykin// Proceedings of the International conference "Mechanika-2007". Kaunas.: "Technologija" Lithuania-. 2007. pp. 229-234.
8. H.H. Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19, SDC Pub., 2019.
9. Tayseer Almatarr Learn SOLIDWORKS 2020: A hands-on guide to becoming an accomplished SOLIDWORKS Associate and Professional – Packt Publishing – 2019 – 586 pages.

к.т.н., **Пидгурский И.Н.**, д.т.н., профессор **Пидгурский Н.И.**,

Пидлужный О.М., **Слободян В.В.**,

Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БАЛОК С ОДНОРЯДНОЙ И ДВУХРЯДНОЙ ПЕРФОРАЦИЕЙ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В статье рассмотрены вопросы расчета и технологии изготовления балок с одно- и двухрядной перфорацией стенки круглыми отверстиями. В частности, проанализирован опыт современного строительства объектов с перфорированными балками. Рассмотрены вопросы потенциальных резервов

уменьшения массы таких балок. Продемонстрировано разнообразие перфорированных балок с различной конфигурацией вырезов. С целью определения влияния разных параметров конструктивного оформления вырезов в стенке балки на напряженное состояние, несущую способность и устойчивость балок проведено моделирование и расчет перфорированных балок с однорядной и двухрядной перфорацией стенки. Для таких балок при незначительных размерах перемычек между отверстиями сгенерированы модели с сеткой конечных элементов, имеющих существенное сгущение элементов возле кромок отверстий. Методом конечных элементов проведен расчет перфорированных балок. Показано, что влияние формы отверстий, расстояние между ними и количество рядов в стенке имеет существенное значение для обеспечения их прочности, жесткости и устойчивости. Установлено, что более равномерное распределение материала в стенке балки за счет увеличения численности рядов вырезов увеличивает их прочностные и жесткостные характеристики и способствует эффективному функционированию таких балок. В результате проведенных исследований предложены рациональные конструктивные решения для перфорированных балок с однорядной и двухрядной перфорацией стенки.

Ключевые слова: перфорированные балки; однорядная перфорация; двухрядная перфорация; метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние; предельные нагрузки.

candidate of technical sciences **Pidgurskyi Ivan**,
doctor of technical sciences, professor **Pidgurskyi Mykola**,
Pidluzhnyi Oleh, Slobodian Vasyl,
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil

RESEARCH OF BEARING CAPACITY OF SINGLE-ROW AND DOUBLE-ROW CASTELLATED BEAMS OF DIFFERENT CONFIGURATIONS

The article considers the issue of estimation and technology of beams manufacturing with single- and double-rows perforation of the web with round holes. In particular, the national and foreign experience of constructing facilities with castellated beams is analyzed. The issue of potential reserves for weight decrease of the beams is considered. It is shown that the types of castellated beams are quite diverse and are associated with different configurations and numbers of cutting lines, and as a result with different shapes and sizes of holes. In order to determine the influence of various parameters of structural design, in particular single-row and

double-rows perforation of the web on the stress state, bearing capacity and stability of beams modeling of perforated beams with single-row and double-rows web perforation is carried out. For the beams with the insignificant section sizes between round openings, the mesh of finite elements with their essential concentration in zones of holes is carried out. The castellated beams were estimated using the finite element method. It is shown that the influence of circular holes is essential for ensuring the strength, rigidity and efficient operation of cellular beams. A comparative analysis of beams with single-row and double-rows perforation of the web with holes having equal diameters is conducted. It is determined that a more uniform distribution of material in the web of the beam with double-rows perforation increases their rigidity and stability in comparison with single-row perforation with the same weight of structural elements. Based on the research, rational design solutions for castellated beams with single-row and double-rows perforation are proposed based on the criteria of ultimate strength, rigidity and stability.

Keywords: castellated beams; single-row perforation; double-row perforation; finite element method; stress-strain state; ultimate loads.

REFERENCES

1. Louson M. Bilyk A. *Stalnye konstrukcii v arhitekture: 2-e izd., isprav. i dop.* – Kiev: Ukrainskij Centr Stalnogo Stroitelstva (UCSS), 2015. – 140 p. {in Russian}.
2. Sameer S. Fares, P.E., S.E., P. Eng, John Coulson, P.E., David W. Dinehart, Ph.D., *Castellated and cellular beam design / Aisc design guide 31– 2016 –110 p.* {in English}.
3. Pritykin, A.I., Lavrova A.S. (2017). Prediction of the stress level and stress concentration in cellular beams with circular openings. – *Mechanics Of Solid Bodies –Vol. 23 No. 4 (2017) pp. 488-494.* {in English}.
4. Kaveh, A. & Shokohi, Farnoud. (2014). Cost optimization of castellated beams using charged system search algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Civil Engineering.* 38. pp. 235-249. {in English}.
5. Pidhurskyi, M. I.; Slobodian, V. V. *Doslidzhennia napruzhenno-deformivnoho stanu ta hranychnykh navantazhen perforovanykh balok metodom skinchenykh elementiv. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy,* 2015, 30: p. 218-224. {in Ukrainian}.
6. Rohit Kurlapkar , Amruta Patil, 2021, Optimization of Various Parameters of Castellated Beam Containing Sinusoidal Openings, *International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT) Volume 10, Issue 06 (June 2021).* – pp. 120-123. {in English}.
7. Pritykin A.Г. Beams deformations with a single or double rows perforated wall/ A.I.Pritykin// *Proceedings of the International conference "Mechanika-2007". Kaunas.: "Technologija" Lithuania-. 2007. pp. 229-234.* {in English}.
8. H.H. Lee. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19,* SDC Pub., 2019. {in English}.
9. Tayseer Almatrar *Learn SOLIDWORKS 2020: A hands-on guide to becoming an accomplished SOLIDWORKS Associate and Professional – Packt Publishing – 2019 – 586 pages.* {in English}.