

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН НЕРОЗРІЗНИХ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК БЛЯ ПРОМІЖНИХ ОПОР ЗА ДІЇ СИММЕТРИЧНОГО У ПРОЛЬОТАХ НАВАНТАЖЕННЯ

STRESSED-DEFORMED STATE SEPARATE PERFORATED BEAMS NEAR INTERMEDIATE SUPPORTS UNDER THE ACTION OF A SYMMETRICAL LOAD IN THE SPANS

Безнюк Л. І., аспірант, orcid.org/0000-0001-6703-5062; **Романюк Є. В.,** аспірант, orcid.org/0009-0005-6097-9788; **Романюк В. В.,** к.т.н., доцент, orcid.org/0000-0002-2539-4654; **Супрунюк В. В.,** к.т.н., доцент, orcid.org/0000-0001-9534-4460 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна)

Bezniuk L. I., postgraduate student, orcid.org/0000-0001-6703-5062; **Romaniuk Y. V.,** postgraduate student, orcid.org/0009-0005-6097-9788; **Romaniuk V. V.,** candidate of technical sciences, associate professor, orcid.org/0000-0002-2539-4654; **Supruniuk V. V.,** candidate of technical sciences, associate professor, orcid.org/0000-0001-9534-4460 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine)

Отримано дані про напружено-деформований стан чотирьох типів проміжних опор двопрольотних нерозрізних перфорованих балок у результаті їх розрахунку методом скінчених елементів у програмному комплексі «Ліра» за дії симетричного у прольотах рівномірно розподіленого навантаження різної величини. Конструкції опор відрізняються наявністю заварених або незаварених отворів безпосередньо зліва і справа від точки обпирання балки, а також наявністю або відсутністю опорного поперечного ребра жорсткості.

Data on the stress-strain state of various types of intermediate supports of two-span continuous perforated beams with a height of 300 to 900 mm were obtained as a result of their calculation by the finite element method in the "Lira" software complex under the action of a load symmetrically distributed evenly in the spans. Beams of the above heights, obtained from the original I-beam beams with a height of 200 to 600 mm, respectively, by developing their cross sections with the coefficient $k = 1,5$.

It was found that the design of the intermediate support for beams of different heights significantly affects the maximum deflections in the beam span and stresses in the support cross-sections of the beams. The smallest deformations and stresses were recorded for the most rigid support with welded holes to the left and right of the support and a supporting transverse stiffening rib, and

the largest – for the least rigid support with non-welded holes in the absence of a supporting rib.

The presence of high values of the reduced stresses in the calculated point 11 of section 3–3 for perforated beams with a height of 750 and 900 mm requires the development of special constructive measures in order to reduce these stresses to certain values, that do not exceed the calculated resistance of the accepted steel class. One of the ways to ensure the load-bearing capacity of such beams according to the limit states of the 1st group can be the use of high-strength steels of a class not lower than C390.

The analysis of the obtained values of the tangential stresses shows that they are the largest in point 11 of section 3–3, that is, directly on the support, but none of them exceeds the value of the calculated resistance of the steel.

Since the real operation scheme of a two-span continuous perforated beam near the intermediate support differs to some extent from the ideal design scheme due to the presence of elements and details of its fastening to the lower supporting structures, there is a need to conduct experimental studies, which will make it possible to develop a calculation methodology taking into account numerous factors, which affect the bearing capacity of both the support itself and the beam as a whole.

Ключові слова: перфорація, балка, полиця, стінка, елемент, місцевий, стійкість, напруження, несучий, здатність, опора, жорсткість, ребро.
perforation, beam, shelf, wall, element, local, stability, stress, bearing, capacity, support, stiffness, rib.

Вступ. В чинних вітчизняних нормах проектування сталевих конструкцій [1] коротко представлено загальні принципи проектування перфорованих балок, наведено формули для обчислення напружень в характерних точках перерізу з отвором та підкреслено необхідність підсилення перерізу на опорі поперечними ребрами жорсткості. В інших питаннях до перфорованих балок висуваються ті самі вимоги, що і до звичайних прокатних балок. При цьому йдеться лише про однопрольотні балки, а особливості проектування багатопрольотних нерозрізних перфорованих балок взагалі не розглядаються. Європейські норми проектування розрахунків перфорованих елементів наразі не регламентують [2].

Існують чисельні експериментально-теоретичні дослідження згинальних перфорованих елементів, виконані як вітчизняними, так і закордонними науковцями [3-12], але вони не дозволяють відповісти на всі питання, пов'язані з особливостями розрахунку та конструювання багатопрольотних нерозрізних балок, для яких суттєвим фактором, що впливає на їх несучу здатність, окрім величини, характеру дії (статичне чи динамічне), виду (зосереджене, рівномірно розподілене, комбіноване), схеми дії навантаження; міцності матеріалу (сталі звичайної міцності чи високоміцні); величини

прольоту; геометричних параметрів перерізу, є конструктивне оформлення проміжної опорної частини балки.

Під час досліджень несучої здатності попередньо напруженої арки [6] були з'ясовані певні особливості роботи і напружено деформованого стану її верхнього поясу, виконаного з перфорованого двотавру, який працював за нерозрізною схемою двопрольотної балки, оскільки мав проміжну опору у вигляді попередньо напруженої розпірки. Отримана інформація наштовхнула авторів на думку про необхідність проведення додаткових комплексних експериментально-теоретичних досліджень саме ділянки згинального елемента поблизу проміжної опори. На першому етапі для цього доцільно застосувати програмний комплекс «Ліра», який широко використовується у практиці проектування різноманітних будівельних конструкцій і який підтвердив свою високу ефективність і точність під час дослідження перфорованих прогонів Z-подібного профілю [7].

Постановка мети і завдань досліджень. У роботі поставлено за мету вивчити напружено-деформований стан різних типів проміжних опор нерозрізних перфорованих балок двотаврового перерізу, отриманих з вихідних профілів № 20, 30, 40, 50, 60/ДСТУ 8768:2018 зі сталі класу С235, що дозволить встановити певні закономірності та з'ясувати раціональну область використання кожного з типів опор. Коефіцієнт розвитку висоти перерізу прийнято $k = 1,5$ для всіх балок незалежно від висоти вихідного профілю, а висота отвору перфорації дорівнює половині висоти вихідного профілю. Під час моделювання балок дотримано реальні розміри з усіма конструктивними особливостями опорних частин.

Методика досліджень. Аналіз літературних джерел, що присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням перфорованих конструкцій, зокрема їх несучій здатності, загальній стійкості та місцевій стійкості елементів перерізу, а також числові дослідження балок зазначених вище розмірів у програмному комплексі ПК «Ліра» на основі методу скінчених елементів.

Результати досліджень. До розгляду прийнято варіанти конструкції проміжної опорної частини нерозрізної перфорованої балки, що наведено на рис. 1, 2, 3, 4.

Використовуючи відомі формули для визначення величин поперечних сил і згинаючих моментів у характерних точках і перерізах по довжині двопрольотної нерозрізної балки за дії певного рівномірно розподіленого навантаження, можна визначити величину навантаження, за прикладання якого в балці виникатиме граничний стан 1-ї групи, а саме втрата несучої здатності за досягнення у поперечному перерізі балки граничних значень нормальних напружень. Виходячи з цих міркувань обчислено граничні значення розрахункового рівномірно розподіленого навантаження q , які для зазначених вище висот балок становлять відповідно $q = 16,45; 45,22; 85,24; 142,1; 229,0$ кН/м.

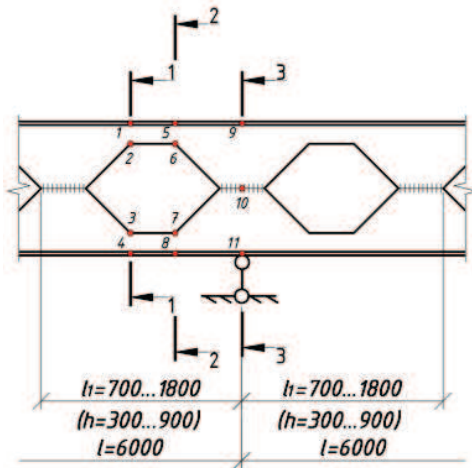


Рис. 1. Опорна ділянка без ребра жорсткості і з незавареними отворами (тип 1)

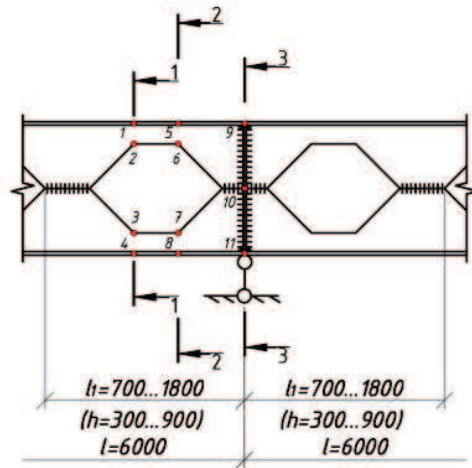


Рис. 2. Опорна ділянка з ребром жорсткості і з незавареними отворами (тип 2)

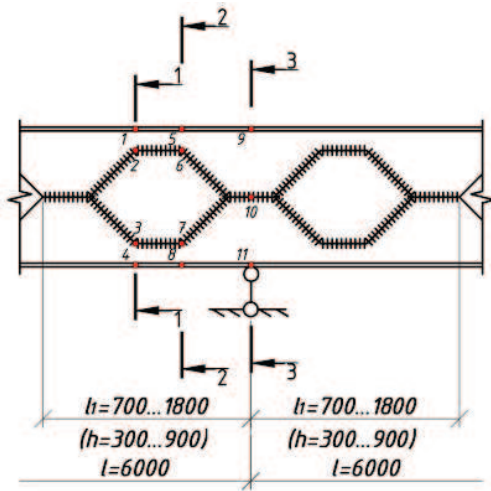


Рис. 3. Опорна ділянка без ребра жорсткості і з завареними отворами (тип 3)

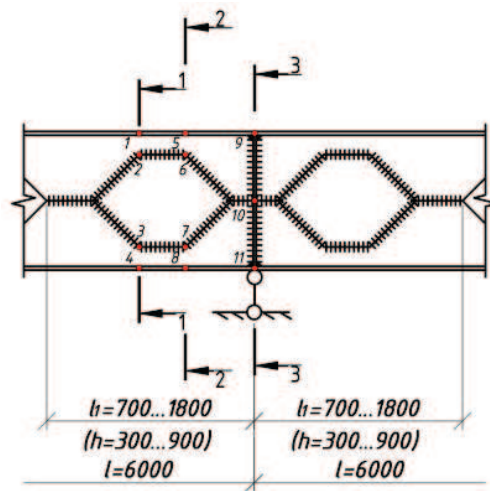


Рис. 4. Опорна ділянка з ребром жорсткості і з завареними отворами (тип 4)

У табл. 1 наведено епюри максимальних приведених напружень у розрахункових перерізах балок з різними типами проміжних опор.

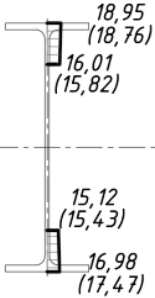
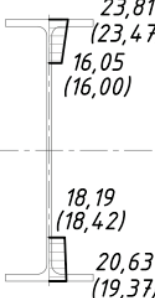
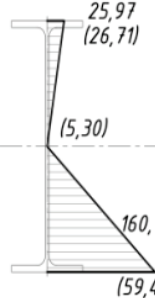
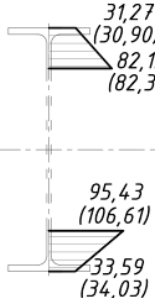
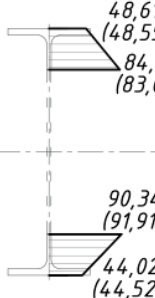
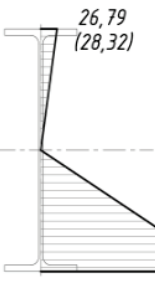
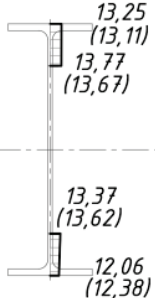
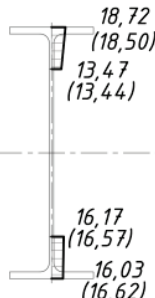

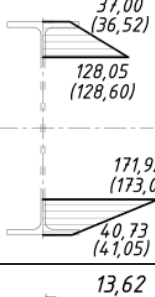
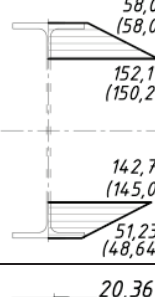
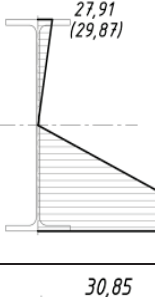
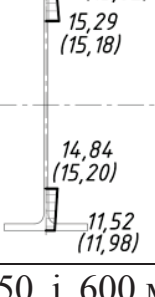
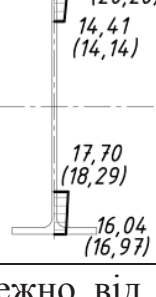

Для балок висотою 300 мм з типами опор 1 і 2 епюри нормальних напружень у перерізах 1-1 і 2-2 мають однаковий характер і, окрім того, мають практично однакові величини напружень у розрахункових точках цих перерізів, а величини напружень у перерізі 3-3 мають суттєву розбіжність (особливо у т. 11), що пояснюється наявністю поперечного ребра жорсткості, розміщеного по осі проміжної опори. Але величини напружень у всіх цих точках є значно меншими за розрахунковий опір сталі, прийнятий у розрахунках, що дозволяє не заварювати отвори зліва і справа від проміжної опори, а також не використовувати опорні ребра жорсткості.

Таблиця 1

Епюри максимальних приведених напружень, МПа

Висота балки/Тип опори	Перерізи		
	1-1	2-2	3-3
1	2	3	4
300/1 (2)			
300/3 (4)			
450/1 (2)			
450/3 (4)			
600/1 (2)			

Продовження табл. 1

1	2	3	4
600/3 (4)			
750/1 (2)			
750/3 (4)			
900/1 (2)			
900/3 (4)			

Для балок висотою 450 і 600 мм незалежно від типів опор і величини прикладеного рівномірно-розподіленого у прольоті навантаження зберігаються такі самі закономірності, як і для балок висотою 300 мм.

Для забезпечення несучої здатності балок висотою 750 і 900 мм за граничними станами 1-ої групи використання опорних ребер є недостатнім,

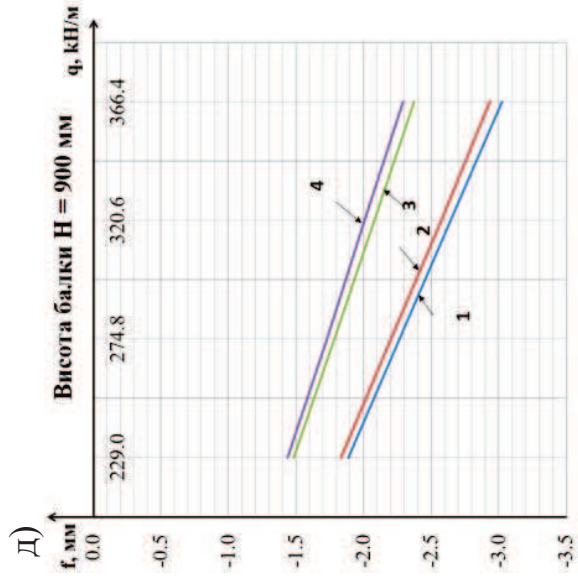
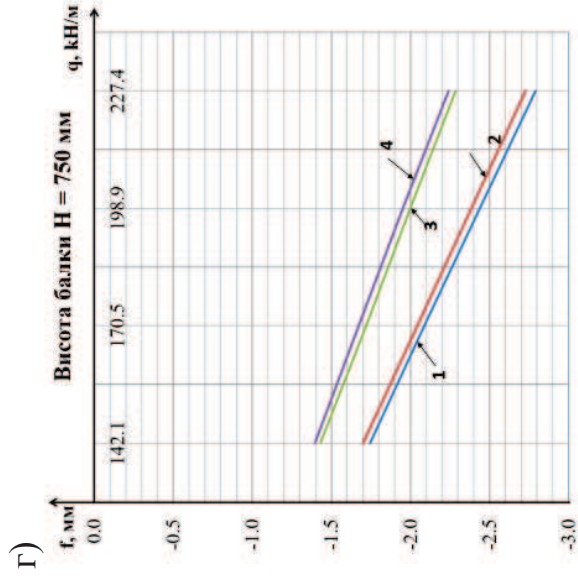
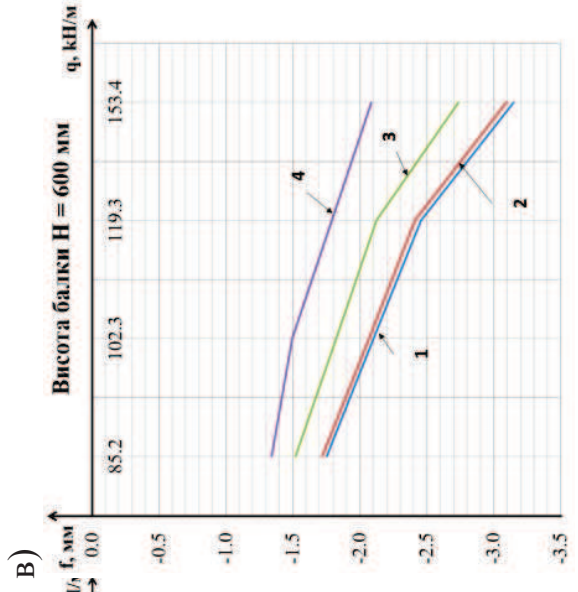
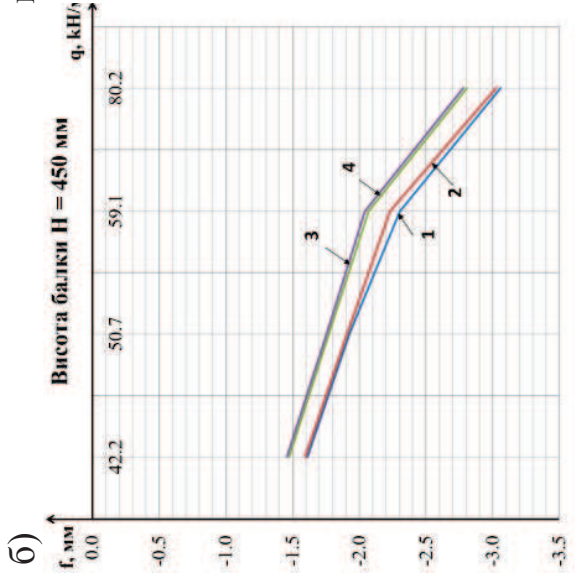
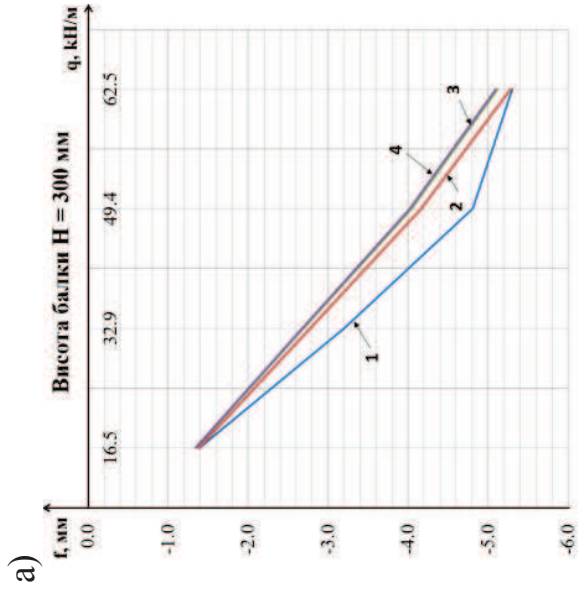


Рис. 5. Максимальні прогини двопрольотних перфорованих балок з різними типами проміжних опор та високою після перфорації:
 а – 300 мм; б – 450 мм;
 в – 600 мм; г – 750 мм;
 д – 900 мм
 Примітка. Нумерацію типів опор наведено відповідно до рис. 1, 2, 3 і 4.

оскільки у т. 11 перерізу 3-3 напруження значно перевищують розрахунковий опір сталі і тому необхідно розробити заходи з метою зменшення цих напружень.

Аналіз отриманих значень дотичних напружень свідчить про те, що вони є найбільшими у т. 11 перерізу 3-3, тобто безпосередньо на опорі, але жодне з них не перевищує значення розрахункового опору сталі зрізу. Отже, не дивлячись на те, що зараз серед науковців існує переконання, що отвори обов'язково мають бути завареними, а у місці дії опорної реакції повинно бути розміщене ребро жорсткості, необхідно виконати низку додаткових досліджень з метою спростування або підтвердження цієї думки.

Аналіз графіків, наведених на рис. 5, свідчить про те, що найбільші величини прогинів у прольоті нерозрізних перфорованих балок висотою 300 мм зафіксовані для типу опори 1. За дії навантаження $q = 16,5$ кН/м прогини балок незалежно від типу проміжної опори є однаковими, але надалі зі збільшенням зовнішнього навантаження спостерігається суттєва різниця у їх величинах. Причому прогини балок для типів опор 2, 3 і 4 незначно відрізняються між собою, але вони є значно меншими за прогини для балки з типом опори 1, що можна пояснити їх більшою жорсткістю внаслідок використання у конструкції додаткових деталей у вигляді заварених отворів та/або наявності ребра жорсткості, розміщеного по осі проміжної опори. За дії максимального навантаження $q = 62,5$ кН/м, тобто навантаження, що відповідає настанню граничного стану поперечного перерізу перфорованої балки за 1-ою групою, графіки прогинів для балок з типами опор 1 і 2 наближаються один до одного, а графіки прогинів балок з опорами 3 і 4 збігаються один з одним від початку навантаження.

Для балок висотою 450 мм графіки прогинів йдуть майже паралельно один до одного незалежно від типу опори, але за дії навантаження $q = 59,1$ кН/м спостерігається порушення прямолінійної залежності між навантаженнями і прогинами, хоча надалі лінійна залежність знову поновлюється. Як і для балок висотою 300 мм, найменші прогини зафіксовано для балок з типами опор 3 і 4, а для балок з типом опори 1 вони є, хоча і несуттєво, найбільшими.

Балки висотою 600 мм мають найбільшу різницю у величинах прогинів для різних проміжних опор, але, як і у попередніх випадках найменші прогини зафіксовано для балок з жорсткою проміжною опорою за типом 4.

Графіки прогинів для балок висотою 750 і 900 мм мають однаковий характер, на них спостерігається пряма залежність між величинами прогинів і зовнішніх навантажень, що спричинили ці прогини. Як і у всіх попередніх випадках, величини прогинів зростають від використання опори з завареними отворами і поперечним ребром жорсткості до опори з незавареними отворами без опорного ребра, що є цілком логічним, оскільки жорсткість типу опори 4 є найвищою.

Висновки та рекомендації. 1. Отримано дані про напружено-деформований стан різних типів проміжних опор двопрольотних нерозрізних перфорованих балок висотою від 300 до 900 мм у результаті їх розрахунку методом скінчених елементів у програмному комплексі «Ліра» за дії симетричного у прольотах рівномірно розподіленого навантаження. Балки наведених вище висот, отримані з вихідних двотаврових балок висотою відповідно від 200 до 600 мм шляхом розвитку їх поперечних перерізів з коефіцієнтом $k = 1,5$.

2. Встановлено, що конструктивне оформлення проміжної опори для балок різної висоти суттєво впливає на величини максимальних прогинів у прольоті балки і напружень в опорних перерізах балок. Найменші деформації і напруження зафіксовані для найбільш жорсткої опори із завареними отворами зліва і справа від опори та опорним поперечним ребром жорсткості, а найбільші – для найменш жорсткої опори з незавареними отворами за відсутності опорного ребра.

3. Наявність великих за значеннями приведених напружень у розрахунковій точці 11 перерізу 3-3 для перфорованих балок висотою 750 і 900 мм вимагає розробки спеціальних конструктивних заходів з метою зменшення цих напружень до прийнятних величин, що не перевищують розрахункового опору певного класу сталі. Одним зі способів забезпечення несучої здатності таких балок за граничними станами 1-ої групи може бути використання сталей підвищеної або високої міцності класу не нижчим за С390.

4. Аналіз отриманих значень дотичних напружень свідчить про те, що вони є найбільшими у т. 11 перерізу 3-3, тобто безпосередньо на опорі, але жодне з них не перевищує значення розрахункового опору сталі зрізу.

5. Оскільки реальна схема роботи двопрольотної нерозрізної перфорованої балки поблизу проміжної опори певною мірою відрізняється від ідеальної розрахункової схеми через наявність елементів та деталей її кріплення до нижче розташованих опорних конструкцій, то виникає необхідність у проведенні подальших числових та експериментальних досліджень, що дасть можливість розробити методика розрахунку з урахуванням численних факторів, які впливають на несучу здатність як самої опори, так і балки в цілому.

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 198 с. (Державні будівельні норми України).

DBN V.2.6 – 198: 2014. . Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya [Chynnyy vid 2015-01-01]. Kyiv : Minrehion Ukrayiny, 2014. 198 s. (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).

2. Eurocode 3, 2005: Design of steel structures. EN 1993-1-8:2005.

3. Chung K.F. et al. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalized moment-shear interaction, *The Journal of Constructional Steel Research*, 2003. Vol. 59. pp. 117-1200.
4. Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Shapes of Web Openings, through Non-linear Finite Element Analyses", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2011, 138 (10). pp. 1214 – 1230.
5. Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with Different Novel Web Opening Shapes". *The Journal of Constructional Steel Research*. 2011. Vol. 67, Issue 10. pp. 1605-1620.
6. Романюк В. В., Супрунюк В. В. Міцність та деформативність перфорованих елементів сталевих арки: монографія. Рівне: НУВГП, 2013. 106 с.
Romaniuk V. V., Supruniuk V. V. Mitsnist' ta deformatyvnist' perforovanykh elementiv stalevoyi arki: monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2013. 106 s.
7. Романюк В. В., Василенко В. Б., Супрунюк В. В. Несуча здатність перфорованих прогонів Z-подібного профілю за косоного згину: монографія. Рівне: НУВГП, 2017. 206 с.
Romaniuk V. V., Vasylenko V. B., Supruniuk V. V. Nesucha zdatnist' perforovanykh prohoniv Z-podibnoho profilyu za kosoho zhynu: monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2017. 206 s.
8. Romaniuk V. et al. Determination of rigidity of node bolt joints. *AIP Conference Proceedings*. Volume 2678, Issue 1. 020016, 2023.
9. Romaniuk V., Supruniuk V. Influence of Flexibility of Bolted Joints on Rigidity of the Hingeless Frame. *Proceedings of EcoComfort 2020. EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 100. 371–377. Springer, Cham, 2021.
10. Xue-Chun Liu. et al. Tension–bend–shear capacity of bolted-flange connection for square steel tube column. *Engineering Structures*, Volume 20115, Article 109798, 2019.
11. Farshad Hashemi Rezvani, Hamid Ronagh. Span length effect on alternate load path capacity of welded unreinforced flange-bolted web connections. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 138. Pages 714–728, 2017.
12. Jia Wang et al. Behaviour and design of demountable beam-to-column composite bolted joints with extended end-plates. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 144. Pages 221–235, 2018.
13. M. P. Son. Experimental determination of yield in beam-to-column flange connections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 687, Issue 3, 2018.