

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПРОМІЖНИХ ОПОР НЕРОЗРІЗНИХ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК ЗА ДІЇ СИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**STRESS-DEFORMED STATE OF INTERMEDIATE SUPPORTS OF INSEPARABLE PERFORATED BEAMS UNDER SYMMETRICAL LOADING**

**Романюк В.В.**, к.т.н., доцент, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2539-4654>; **Супрунюк В.В.**, к.т.н., доцент, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9534-4460>; **Безнюк Л.І.**, аспірант, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6703-5062> (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна)

**Romaniuk V.V.**, candidate of technical sciences, associate professor, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2539-4654>; **Supruniuk V.V.**, candidate of technical sciences, associate professor, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9534-4460>; **Bezniuk L.I.**, postgraduate student, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6703-5062> (The National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine)

Отримано дані про напружено-деформований стан різних 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. Розглянуто варіанти опор з використанням або без використання ребра жорсткості, розміщеного по осі проміжної опори, а також з незавареними чи завареними отворами у стінці балки зліва і справа від опори.

Despite the large number of theoretical and experimental studies of solid and inseparable beams, as well as structures using perforated elements, the calculation and design of inseparable perforated beams, especially near intermediate supports, has significant differences compared to solid beams, which are currently little studied and this is a deterrent to the wider use of such beams. For them, another factor that affects the bearing capacity, in addition to the value, nature of the action, type, scheme of action of the load; material strength; the value of the span; geometrical parameters of section, there is a constructin of intermediate support parts.

The current design standards of steel structures present the general principles of design of perforated beams, formulas for calculating stresses at

characteristic points of cross section with a hole are given and emphasize the need to strengthen the cross section on the support by transverse stiffeners. In other matters, the perforated beams are subject to the same requirements as conventional rolling beams. These requirements apply only to single-span beams, and the design features of multi-span continuous perforated beams are not considered at all.

The aim of these studies is to study the stress-strain state of different types of intermediate supports of inseparable perforated beams of I-beam profile of different heights under the action of symmetrically in two spans evenly distributed load in the software complex "Lira". The objectives of the study are to establish the actual values of stresses in the characteristic sections on the supports of inseparable perforated beams of the I-beam profile and perform a comparative analysis of the results of numerical studies. Modeling of beams is made in the software complex "Lira" on the basis of a method of finite elements with observance of the real sizes with all design features of support parts. Support parts with welded and unwelded holes, as well as without a stiffening rib or with a stiffening rib placed along the axis of the intermediate support are accepted for consideration.

The analysis of the stresses obtained as a result of the calculation of the diagram shows a significant change in the stress-strain state of the calculated cross sections as they approach from the middle of the span of the beam to the axis of the intermediate support. In the middle part of the beam, the stress distribution in the section with the hole is traditional - stresses at the points of cross section of the upper part of the I-beam have a sign "minus", and at the points of cross section of the lower part - sign "plus" in full accordance with the diagram of bending moment. The nature of the stress distribution at the calculated points of the support cross sections has significant differences due to the change in the sign of the bending moment and the transverse force.

As a result of the calculation by the finite element method in the software complex "Lira" under the action of symmetrically distributed in the spans load were received the data on the stress-strain state of different types of intermediate supports of two-span inseparable perforated beams.

**Ключові слова:** нерозрізний, проміжний, балка, опора, елемент, перфорація, напруження, деформація, несуча здатність.  
inseparable, intermediate, beam, support, element, perforation, stress, deformation, bearing capacity.

**Вступ.** Незважаючи на велику кількість теоретичних та експериментальних досліджень розрізних і нерозрізних балок, а також конструкцій з використанням перфорованих елементів, розрахунок і конструювання нерозрізних перфорованих балок, особливо поблизу проміжних опор, має порівняно з суцільними балками суттєві відмінності, які

на сьогодні є мало вивченими і це є стримуючим фактором для більш широкого використання таких балок. Для них ще одним показником, що впливає на 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 проміжних опорних частин.

**Аналіз останніх досліджень.** В чинних 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 [2] розрахунок перфорованих елементів наразі не регламентують.

Під час теоретично-експериментальних досліджень несучої здатності попередньо напруженої арки прольотом 9 м, результати яких представлено в [3, 4, 5], були з'ясовані певні особливості роботи та напружено-деформованого стану верхнього поясу арки, виконаного з перфорованого двотавру, який працював за нерозрізною схемою, 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 [6].

**Мета і задачі досліджень.** В роботі поставлено за мету вивчити напружено-деформований стан різних типів проміжних опор нерозрізних перфорованих балок двотаврового профілю різної висоти, отриманих з вихідних двотаврових балок №№ 20, 30, 40, 50, і 60 (ГОСТ 8239-89) зі сталі класу С235 з максимально можливим значенням коефіцієнту розвитку висоти перерізу 1,5 за дії симетричного у двох прольотах рівномірно розподіленого навантаження у програмному комплексі «Ліра». Завданнями дослідження є встановлення фактичних значень напружень у характерних перерізах на опорах нерозрізних перфорованих балок двотаврового профілю та виконання порівняльного аналізу результатів числових досліджень, отриманих у програмному комплексі „Ліра”, для різних типів проміжних опор.

**Методика досліджень.** Аналіз літературних джерел, теоретичних та експериментальних досліджень плоских несучих конструкцій, у тому числі із застосуванням перфорованих елементів; теоретичні дослідження з використанням методу скінчених елементів, реалізованого у ПК «Ліра».

**Основні результати досліджень.** Наразі для подальших досліджень пропонується розглянути варіанти конструкції проміжної опорної частини нерозрізних перфорованих балок двотаврового профілю, які наведеної на рис. 1...4.

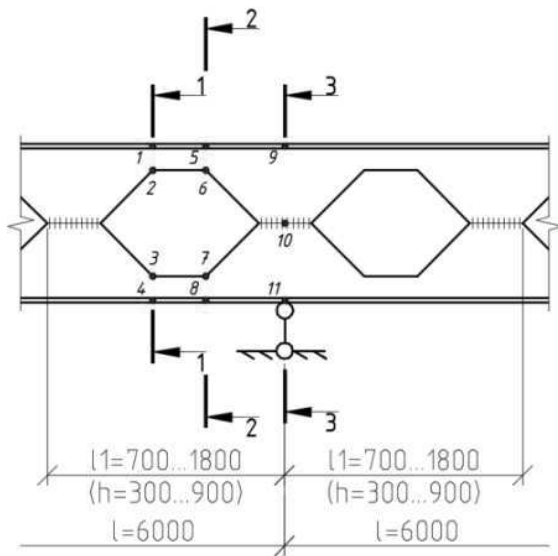


Рис. 1. Опорна ділянка без ребра жорсткості і з незавареними отворами

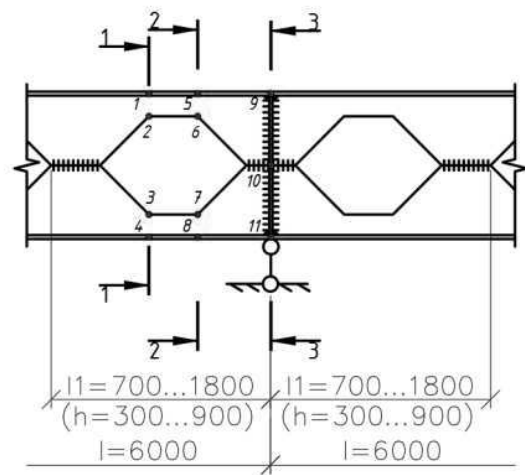


Рис. 2. Опорна ділянка з ребром жорсткості і з незавареними отворами

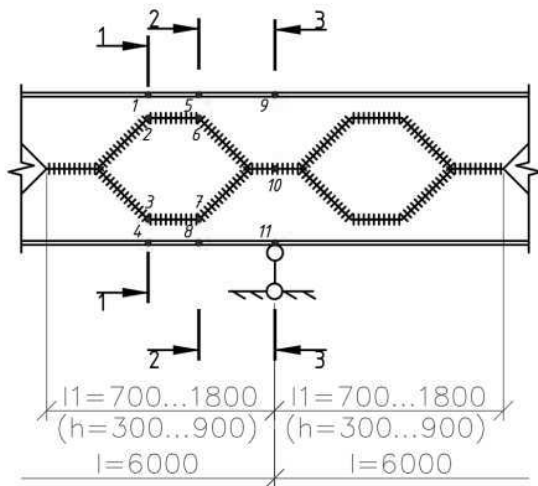


Рис. 3. Опорна ділянка без ребра жорсткості і з завареними отворами

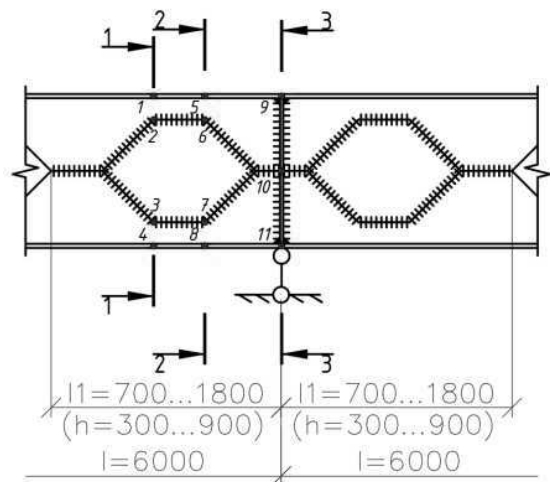


Рис. 4. Опорна ділянка з ребром жорсткості і з завареними отворами

На першому етапі визначення напружено-деформованого стану нерозрізних перфорованих балок двотаврового профілю на ділянках біля проміжних опор за різного їх конструктивного оформлення і за дії симетричного у прольотах рівномірно розподіленого навантаження

виконується у програмному комплексі «Ліра». Коефіцієнт розвитку висоти перерізу становить 1,5 для всіх балок незалежно від висоти вихідного профілю, з якого утворюється перфорована балка, а висота отвору перфорації дорівнює половині висоти вихідного профілю. Моделювання балок виконано у програмному комплексі «Ліра» на основі методу скінчених елементів з дотриманням реальних розмірів з усіма конструктивними особливостями опорних частин.

До складу проміжної опорної частини балки входять дві ділянки довжиною по  $l_1 = 700 \dots 1800$  мм зліва і справа від осі опори. Таким чином, довжина опорної частини залежно від висоти перфорованої балки  $h = 300 \dots 900$  мм становить  $2l_1 = 1400 \dots 3600$  мм. Розмір  $l_1$  – це відстань від точки перетинання епюрою згинаючого моменту  $M$  нейтральної лінії, тобто нульової точки, до осі проміжної опори.

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, що належить до граничних станів 1-ї групи, а саме втрата несучої здатності за досягнення у поперечному перерізі балки граничних нормальних напружень. Виходячи з цих міркувань обчислено граничні значення розрахункового рівномірно розподіленого навантаження  $q$  для балок різної висоти. Причому ці навантаження обчислені для вихідних двотаврових балок №№ 20, 30, 40, 50, 60 і становлять відповідно  $q = 16,45; 45,22; 85,24; 142,1; 229,0$  кН/м.

Аналіз епюр напружень, наведених в табл. 2, свідчить про суттєву зміну напружено-деформованого стану розрахункових перерізів по мірі наближення від середини прольотної частини балки до осі проміжної опори. В середній частині балки розподілення напружень в перерізі з отвором є традиційним – напруження в точках верхнього тавру поперечного перерізу мають знак «мінус», а в точках нижнього тавру знак «плюс» у повній відповідності до епюри згинаючого моменту.

Для опори типу 1 в перерізі 1-1 залежно від номеру вихідного двотавра, з якого утворено перфоровані профілі розподілення напружень таке:

1. У верхніх таврах перфорованих профілів висотою 300, 450 і 600 мм зафіксовано напруження розтягу як у в. 1, так і в т. 2. Причому напруження в т. 2 є набагато більшими за напруження в т. 1. Такий характер епюри напружень повністю відповідає епюрі моментів на середній опорі двопрольотної нерозрізної балки.

2. У верхніх таврах перфорованих профілів висотою 750 і 900 мм характер епюри напружень змінюється і в т. 1 вже фіксуються напруження стиску, хоча верхній тавр профілів знаходиться, відповідно до епюри моментів, у розтягнутій зоні.

3. У нижніх таврах всіх профілів зафіксовано напруження стиску з набагато більшими значеннями в т. 3 порівняно з т. 4.

Для цього ж типу опори в перерізі 2-2 для верхніх таврів профілів переважно виникають напруження стиску, хоча в т. 5 для профілів висотою 450, 750 і 900 мм виникають незначні напруження розтягу. В нижніх таврах в основному зафіксовано напруження розтягу, хоча в т. 8 в профілях висотою 450 і 600 мм зафіксовано незначні, порівняно з розтягом, напруження стиску.

В опорному перерізі 3-3 на опорі без ребра жорсткості у верхніх частинах балок (т.т. 9 і 10) всіх профілів напруження розтягу дуже незначні, а напруження стиску у т. 11 є небезпечними лише для профілю висотою 900 мм, де їх величина становить 380 МПа, що робить можливим використання опори даного типу лише у випадку застосування для балок сталей високої міцності з розрахунковим опором не меншим за 400 МПа. Якщо використовувати сталі звичайної міцності, то застосування ребер жорсткості, розміщених по осях проміжних опор нерозрізних балок, є обов'язковим.

Для опори типу 2 характер розподілення напружень в перерізах 1-1 і 2-2 є аналогічним характеру розподілення напружень в цих самих точках для опори типу 1. Причому і величини напружень у розрахункових точках перерізів майже не відрізняються між собою. Лише в перерізі 3-3 напруження у т. 11 є набагато меншими завдяки наявності опорного ребра жорсткості.

У разі використання опори типу 3, тобто у разі використання опорної частини перфорованої балки без отворів, майже всі верхні таври всіх профілів зазнають розтягу як в перерізі 1-1, так і в перерізі 2-2. Лише для профілю висотою 600 мм в т. 1 і в т. 5 зафіксовано дуже незначні напруження стиску у межах 2 МПа. В нижніх таврах всіх профілів в перерізах 1-1 і 2-2 виникають незначні напруження стиску. В перерізі 3-3 характер епюри напружень майже такий самий, як і для опори типу 1, і майже з тими самими значеннями напружень, особливо в т. 11.

Для опори типу 4 характерним є наявність дуже незначних напружень стиску у т.т. 1 і 5 для профілів висотою 300, 450 і 600 мм у межах 2 МПа і дуже незначних напружень розтягу для профілів висотою 750 і 900 мм. В т.т. 2 і 6 перерізів 1-1 і 2-2 всіх балок виникають незначні напруження розтягу. У нижніх таврах всіх балок виникають напруження стиску, величина яких не перевищує 14 МПа.

Розподілення напружень в перерізі 3-3 подібне до розподілення напружень у цьому самому перерізі для опори типу 2, оскільки в обох випадках використовуються ребра жорсткості. Причому і значення напружень теж суттєво не відрізняються.

Таблиця 2

Епюри нормальних напружень в розрахункових перерізах балок з проміжними опорами різних типів

№ з/п	№ вихідного двотавра/тип опори	Епюри напружень, МПа, в перерізах		
		Нормальні $\sigma$		
		Переріз 1-1 (точки 1, 2, 3, 4)	Переріз 2-2 (точки 5, 6, 7, 8)	Переріз 3-3 (точки 9, 10, 11)
1	2	3	4	5
1	20/1			
2	20/2			
3	20/3			
4	20/4			

1	2	3	4	5
1	60/1			
2	60/2			
3	60/3			
4	60/4			

В таблиці 2 для прикладу наведено лише результати розрахунків для балок, утворених з використанням вихідних двотаврів №№ 20 і 60.

**Висновки.** Розподіл напружень в розрахункових точках характерних перерізів з отворами нерозрізних перфорованих балок поблизу проміжних опор різної конструкції суттєво відрізняється від розподілу напружень у розрахункових перерізах прольотної частини, оскільки знак епюри згинаючого моменту в опорній частині змінюється з додатнього на від'ємний і це повністю змінює характер напружено-деформованого стану. Ця зміна



свідчить про неможливість використання формул чинних норм проектування [1] для обчислення напружень в розрахункових точках і таким чином є необхідність у проведенні подальших експериментально–теоретичних досліджень різних типів опорних частин балок з метою розробки комплексної методики їх розрахунку та рекомендацій щодо визначення раціональної області застосування кожного з них.

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]. Kyuyiv :Minrehion Ukrayiny, 2014. 198 s. (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).

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

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

3. Романюк В. В., Супрунюк В.В. Міцність та деформативність перфорованих елементів сталеві арки: монографія. Рівне: НУВГП, 2013. 106 с.

Romaniuk V. V., Supruniuk V. V. Mitsnist' ta deformatyvnist' perforovanykh elementiv stalevoyi arky (Strength and deformability of perforated elements of steel arch): monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2013. 106 s.

4. Романюк В. В., Супрунюк В. В. Особливості розрахунку прольотних конструкцій з перфорованих елементів за складного напружено-деформованого стану. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Випуск 175. С. 98 – 108.

Romaniuk V.V., Supruniuk V.V. Osoblyvosti rozrakhunku prol'otnykh konstruktsiy z perforovanykh elementiv za skladnoho napruzhenno-deformovanoho stanu. Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu. Kharkiv: UkrDUZT, 2018. Vypusk 175. S. 98 – 108.

5. Романюк В. В., Супрунюк В. В. Експериментальні дослідження прольотних конструкцій з перфорованих елементів за складного напружено-деформованого стану. Опір матеріалів і теорія споруд: наук. –тех збірник. К.: КНУБА, 2019. Вип. 103. С. 189 – 300.

Romaniuk V.V., Supruniuk V.V. Eksperymental'ni doslidzhennya prol'otnykh konstruktsiy z perforovanykh elementiv za skladnoho napruzhenno-deformovanoho stanu (Experimental researches of flexible constructions from perforated elements at a complex stress-deformed state). *Opir materialu i teoriya sporud: nauk. –tekh.zbirn.* К.: КНУБА, 2019. Vyp. 103. S. 189-200.

6. Романюк, В.В., Василенко В.Б., Супрунюк В.В. Несуча здатність перфорованих прогонів Z-подібного профілю за косоного згину: монографія / В.В. Романюк, В.Б. Василенко, В.В. Супрунюк. – Рівне: НУВГП, 2017. – 206 с.

Romaniuk V.V., Vasylenko V.B., Supruniuk V.V. Nesucha zdatnist' perforovanykh prohoniv Z-podibnoho profilyu za kosoho zhynu (Carrying capacity of perforated runs of Z-shaped profile in oblique bending) : monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2017. 206 s.