

**Романюк В. В., к.т.н., доцент, Супрунюк В. В., к.т.н., доцент,
Безнюк Л. І., аспірант** (Національний університет водного
господарства та природокористування, м. Рівне, Україна)

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН НЕРОЗРІЗНИХ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК БІЛЯ ПРОМІЖНИХ ОПОР

Виконано моделювання нерозрізної двопрольотної перфорованої балки методом скінчених елементів у програмному комплексі «Ліра» за різного конструктивного оформлення зони балки поблизу проміжної опори. Розглянуто варіанти з використанням або без використання ребра жорсткості, розміщеного по осі проміжної опори, а такожі з незавареними чи завареними отворами у стінці зліва і справа від опори. Отримано дані про напружено-деформований стан нерозрізної перфорованої балки та наведено основні результати проведених досліджень.

Ключові слова: нерозрізна балка; проміжна опора; елемент; перфорація; напруження; деформація; несуча здатність.

Вступ. За статичною схемою балки бувають статично визначними (однопрольотними розрізними і консольними) і статично невизначними (багатопрольотними нерозрізними, багатопрольотними з консолями і защемленими). Нерозрізні балки приблизно на 10% економічніші за витратами металу, менш деформативні, але вони дуже чутливі до просідання опор, непередбачені зміщення яких здатні значно змінити розрахункову схему, що призводить до перерозподілення зусиль і, як наслідок, впливає на несучу здатність конструкції в цілому. Перфоровані балки, як окремі конструктивні елементи, переважно використовують за однопрольотною схемою через недостатність вивчення їх роботи та напружено-деформованого стану біля проміжних опор.

Аналіз останніх досліджень. Раніше виконані теоретично-експериментальні дослідження балкових конструкцій, як звичайних суцільних, так і перфорованих, дозволяють отримати майже всю необхідну інформацію про етапи їх роботи від початку навантаження і аж до руйнування як за пружної, так і пружно-пластичної роботи. Напружено-деформований стан, включаючи розподілення напру-

жень в характерних перерізах по довжині балки і їх деформації, вивчений досить добре. Цьому у значній мірі сприяють розроблені програмні комплекси (Ліра, ANSYS), які дозволяють з високою точністю виконувати розрахунки таких конструкцій.

Але роботі перфорованих балок за нерозрізною схемою вітчизняні та закордонні науковці приділяли не так багато уваги і це питання є недостатньо вивченим.

Постановка проблеми. Вочевидь, що на несучу здатність балок, у тому числі і нерозрізних, впливає багато факторів. Тобто, проблема визначення несучої здатності балки, а тим більше нерозрізної перфорованої балки, є багатофакторною. І такими факторами у першу чергу є: величина навантаження; характер дії навантаження (статичне чи динамічне); вид навантаження (зосереджене, рівномірно розподілене, комбіноване); схема дії навантаження; міцність матеріалу балки (сталі звичайної міцності чи високоміцні); величина прольоту балки; геометричні параметри перерізу балки; конструктивне оформлення опорної частини балки.

Постановка мети і завдань досліджень. В роботі поставлено за мету вивчити напружено-деформований стан нерозрізних перфорованих балок двотаврового профілю на ділянках біля проміжних опор за різного їх конструктивного оформлення за дії рівномірно розподіленого навантаження у програмному комплексі «Ліра». Завданнями дослідження є: встановлення фактичних значень напружень і деформацій у характерних перерізах нерозрізної перфорованої балки двотаврового профілю, які виникають на проміжних опорах; виконання порівняльного аналізу результатів числових досліджень, отриманих у програмному комплексі «Ліра», для проміжного опорного вузла за різних варіантів його конструктивного оформлення; з'ясування впливу конструктивного оформлення балки у зоні проміжної опори на напружено-деформований стан розрахункових перерізів.

Методика досліджень. Аналіз літературних джерел, що присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням перфорованих конструкцій, а також використання методу скінчених елементів, реалізованого у програмному комплексі «Ліра».

Виклад основного матеріалу. Для дослідження напружено-деформованого стану та несучої здатності нерозрізної перфорованої балки як вихідний профіль обрано двотавр 20Б1 за ГОСТ 26020–83, з якого у подальшому запроектовано симетричну моностаєву пер-

форовану балку з шестикутними отворами відповідно до вимог чинних норм [3].

Для балки прийнято сталь класу С345 з розрахунковим опором $R_y = 335 \text{ МПа}$ для фасонного прокату товщиною $2 \text{ мм} \leq t \leq 20 \text{ мм}$ [3].

Епюри згинаючого моменту та поперечної сили, які виникають у нерозрізній двопрольотній балці за дії рівномірно розподіленого по довжині балки навантаження [2] наведено на рис. 1, а її фрагмент на рис. 2. Геометричні розміри отриманої перфорованої балки прийнято на основі рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів розрізу стінки вихідних профілів.

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 і величину рівномірно розподіленого 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.

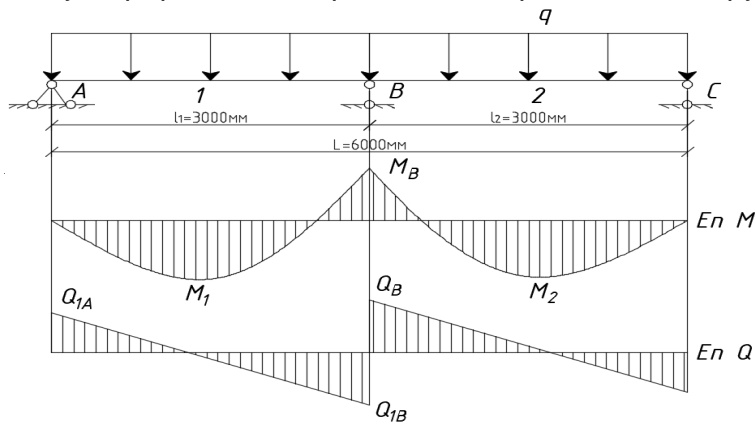


Рис. 1. Розрахункова схема нерозрізної балки

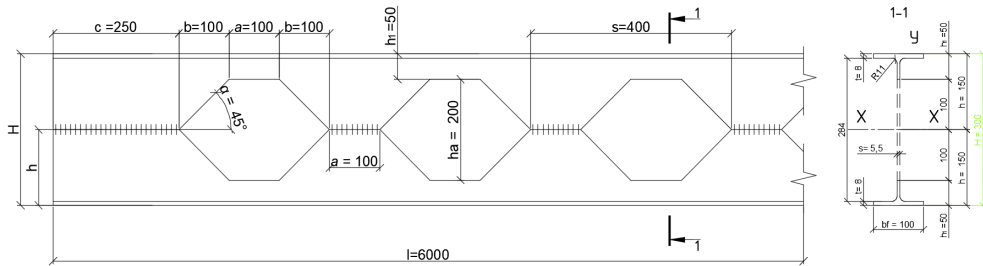


Рис. 2. Фрагмент перфорованої балки прольотом 6 м

Використовуючи відповідні значення моменту опору W_x , розрахункового опору за межею текучості R_y , значення коефіцієнтів надійності за відповідальністю $\gamma_n = 0,95$ [1] і умов роботи $\gamma_c = 0,9$ [3], а також виходячи з можливості розвитку пружно пластичних деформацій, які у даному випадку враховуються коефіцієнтом $c_1 = 1,092$ [3], можна отримати розрахункове граничне значення згинаючого моменту M_{max} та максимальне значення рівномірно розподіленого погонного навантаження, яке витримає двотавр № 20Б1 за ГОСТ 26020–83.

Моделювання перфорованої нерозрізної балки двотаврового перерізу (див. рис. 2) виконано у програмному комплексі ПК «Ліра» на основі методу скінчених елементів (МСЕ), суть якого полягає в тому, що будь яку неперервну величину можна апроксимувати кусочно-неперервною функцією, яка будується у реальних розмірах з усіма конструктивними особливостями, у скінченій кількості точок.

Для побудови дискретної моделі неперервної величини перфорованих балок з шестикутними отворами прийнято такі умови:

- 1) область величини, яка досліджується, розбивається на скінчене число елементів, які мають спільні вузлові точки, що в цілому апроксимують форму області;
- 2) вузли в області, яка розглядається, фіксуються;
- 3) значення в середині області визначаються у вузлових точках, які апроксимують функцію, використовуючи значення неперервної величини, що досліджується.

З точки зору конструкції нерозрізної перфорованої балки її розглядають як сукупність конструкційних елементів (стілки і полиці), які з'єднані між собою у вузлових точках. Якщо відомі співвідношен-

ня між силами і переміщеннями для кожного елемента, то можна описати властивості і дослідити поведінку конструкції в цілому.

Отже, за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) вирішення даної задачі для заданої ділянки представлено у вигляді певного набору функцій.

Балку було поділено сіткою скінчених елементів, виходячи з таких умов $a \geq 2t$ і $b \geq 2t$, де a і b – довжина і ширина скінчених елементів; t – товщина елементів (полиці, стінки), що розглядаються. Скінчені елементи полиці прийнято квадратної форми з розмірами 25x25 мм, стінки також квадратної форми розмірами 25x25 мм. Скінчені елементи біля шестикутних отворів формуються три- і чотиривузловими пластинами. Прийняті розміри і форма скінчених елементів дозволяє отримати високу точність розрахунку.

Під час моделювання конструкції у програмному комплексі «Ліра» для кріплення балки з площини дії навантаження використано поперечні елементи, які розміщено по верхніх поясах профілю з кроком 1 м (рис. 3). Таким чином було усунено можливий поворот перерізу навколо своєї осі під час прикладання навантаження, а також поперечні деформації конструкції. Завдяки цьому робота змодельованої конструкції максимально наближена до роботи реальної конструкції.

Кріплення кінців перфорованої двопрольотної балки прийнято: крайня опора зліва – шарнірно нерухома; крайня опора справа – шарнірно рухома; проміжна опора – шарнірно рухома (див. рис. 3).

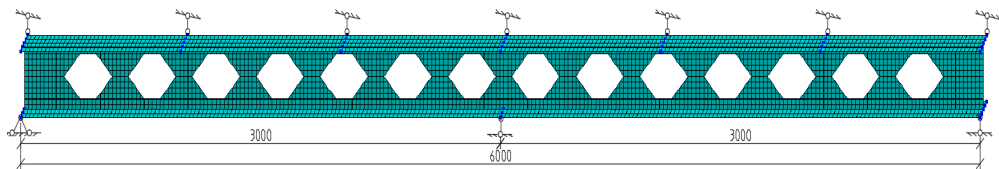


Рис. 3. Кріплення нерозрізної перфорованої балки в ПК «Ліра»

Відповідно до мети та задач, сформульованих на початку, розглядаються нерозрізні перфоровані балки двотаврового профілю з такими особливостями конструктивної форми в зоні проміжної опори (рис. 4–7):

1) без ребра жорсткості, розміщеного по осі проміжної опори, і з незавареними отворами зліва і справа від опори (рис. 4);

2) з ребром жорсткості, розміщеним по осі проміжної опори, і з незавареними отворами зліва і справа від опори (рис. 5);

3) без ребра жорсткості, розміщеного по осі проміжної опори, і з завареними отворами зліва і справа від опори (рис. 6);

4) з ребром жорсткості, розміщеним по осі проміжної опори, і з завареними отворами зліва і справа від опори (рис. 7).

Усі балки незалежно від конструктивних особливостей завантажуються рівномірно розподіленим погонним навантаженням однакової величини.

На опорній ділянці балки розглядаються 7 розрахункових перерізів (див. рис. 4–7). Вони розміщені таким чином, що напруження, визначені в розрахункових точках перерізів, дозволяють отримати усю необхідну інформацію щодо напружено-деформованого стану нерозрізної перфорованої балки поблизу проміжної опори.

Епюри нормальних напружень в розрахункових точках перерізів наведено на рис. 8–11.

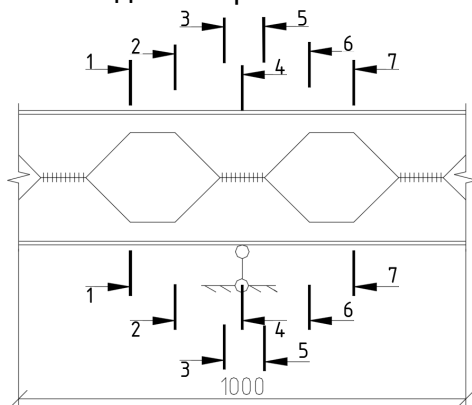


Рис. 4. Опорна ділянка без ребра жорсткості і з незавареними отворами

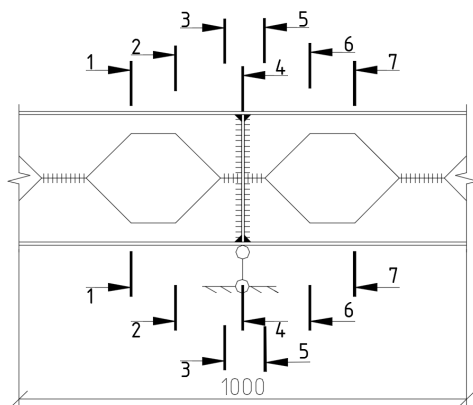


Рис. 5. Опорна ділянка з ребром жорсткості і з незавареними отворами

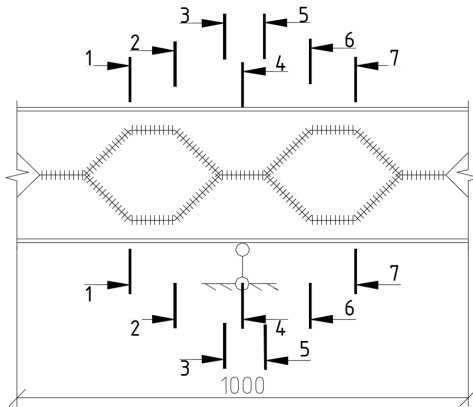


Рис. 6. Опорна ділянка без ребра жорсткості і з завареними отворами

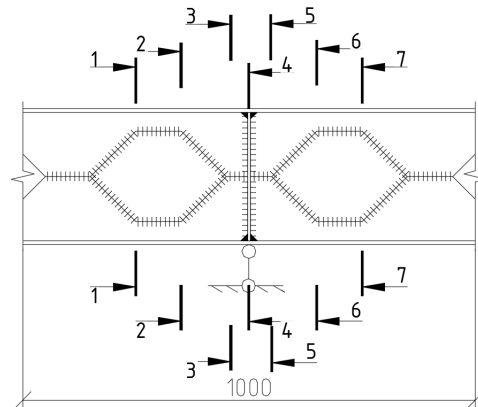


Рис. 7. Опорна ділянка з ребром жорсткості і з завареними отворами

В балці без ребра жорсткості і з незавареними отворами зліва і справа від осі проміжної опори спостерігається поступове збільшення нормальних напружень у фібрових волокнах як у розтягнутій, так і у стиснутій зонах. Звичайно, епюри напружень в перерізах 1-1 і 7-7, 2-2 і 6-6, 3-3 і 5-5 є попарно симетричними відносно осі проміжної опори (див. рис. 8).

Аналогічне розподілення напружень і в балках з іншим оформленням опорної частини (див. рис. 9–11). Окрім того, в усіх типах балок по мірі наближення до проміжної опори величини стискаючих напружень є більшими за величини напружень розтягу. Причому наявність ребра жорсткості не впливає суттєво на величину напружень. Наявність ребра жорсткості суттєво впливає на характер розподілення напружень і їх величину лише в перерізі 4-4, тобто в перерізі, що збігається з віссю проміжної опори.

Незалежно від типу опорної частини балки нормальні напруження σ_x і σ_y , а також дотичні τ_{xy} є набагато меншими за відповідні розрахункові опори R_y і R_s . Це свідчить про те, що балка, переріз якої підібраний за дії рівномірно розподіленого навантаження, яке є розрахунковим за граничними станами першої групи для вихідного двотавра 20Б/ГОСТ 26020–83, має значний запас несучої здатності поблизу проміжної опори.

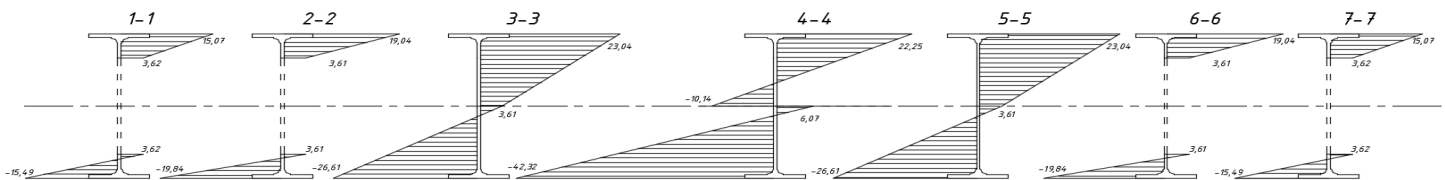


Рис. 8. Епюри напружень у характерних перерізах на опорній ділянці за рис. 4

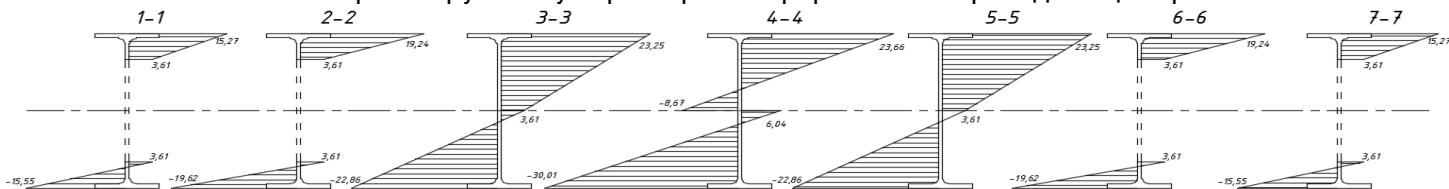


Рис. 9. Епюри напружень у характерних перерізах на опорній ділянці за рис. 5

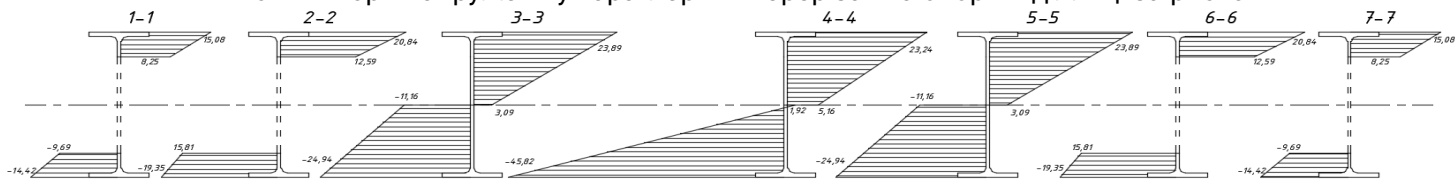


Рис. 10. Епюри напружень у характерних перерізах на опорній ділянці за рис. 6

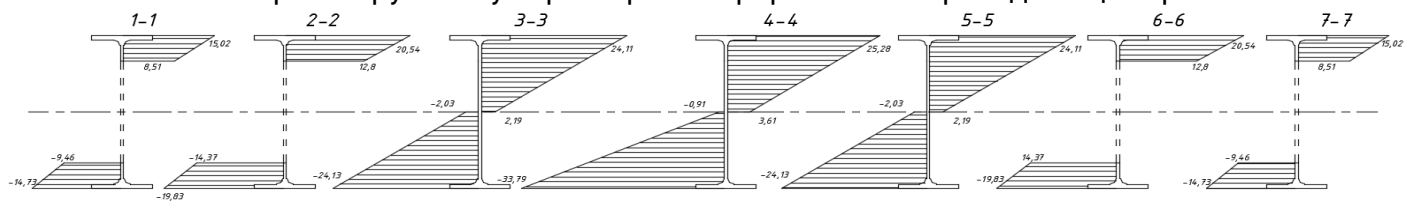


Рис. 11. Епюри напружень у характерних перерізах на опорній ділянці за рис. 7

Звичайно, розрахункові величини згинаючих моментів для однопрольотної балки і двопрольотної нерозрізної балки є дуже різними і ця різниця дозволяє проектувати нерозрізну балку значно меншої висоти або прикладати до такої балки значно більше навантаження.

Відомо, що для балок великого прольоту за дії незначного за величиною навантаження визначальним є розрахунок за граничними станами другої групи, у той час, як для балок невеликого прольоту за дії значного навантаження визначальним є розрахунок за граничними станами першої групи. У цих двох випадках напружено-деформований стан балок в зоні проміжної опори буде суттєво відрізнятися один від одного.

Використання поперечних ребер жорсткості для таких балок теж є не до кінця урегульованим, оскільки чинні норми проектування [3] дозволяють лише проектувати геометричні параметри таких ребер, але не дають конкретних вказівок щодо розміщення їх по довжині балок.

Основні результати. 1. Відповідно до вимог [3] виконано проектування двопрольотної нерозрізної перфорованої балки на основі вихідного двотавра 20Б1/ГОСТ 26020–83. Балку прийнято висотою 300 мм з регулярним розміщенням по її довжині шестикутних отворів. 2. Методом скінчених елементів у програмному комплексі «Ліра» виконано числові дослідження напружено-деформованого стану перфорованої нерозрізної балки з шестикутними отворами, в результаті яких визначено напружено-деформований стан в розрахункових перерізах балок з різним їх конструктивним оформленням у зоні проміжної опори. 3. У результаті аналізу отриманих даних з'ясований вплив конструктивного оформлення балки у зоні проміжної опори на напружено-деформований стан розрахункових перерізів.

Висновки. З викладеного вище можна зробити висновок, що, незважаючи на велику кількість теоретичних і 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 тому є стримуючими факторами для більш широкого використання перфорованих балок. Комплексна ме-

тодика розрахунку нерозрізних перфорованих балок на ділянках біля проміжних опор наразі відсутня.

1. ДБН В.1.2-14-2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд [На заміну ДБН В. В.1.2-14-2009; Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 29 с. (Державні будівельні норми України). **2.** ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [На заміну СНиП 2.01.07-85; Чинний від 2007-10-01]. Київ : Мінрегіон України, 2006. 75 с. (Державні будівельні норми України). **3.** 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).

REFERENCES:

1. DBN V.1.2-14-2018. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel i sporud [Na zaminu DBN V. V.1.2-14-2009; Chynnyi vid 2019-01-01]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2018. 29 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy). **2.** DBN V.1.2-2:2006. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia [Na zaminu SNyP 2.01.07-85; Chynnyi vid 2007-10-01]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2006. 75 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy). **3.** DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia [Chynnyi vid 2015-01-01]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2014. 198 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy).

Romaniuk V. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Supruniuk V. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Bezniuk L. I., Post-graduate Student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine)

TENSIONALLY DEFORMED STATE OF INSEPARABLE PERFORATED BEAMS NEAR INTERMEDIATE SUPPORTS

The purpose of the research is formulated, which is the need to study the stress-strain state of inseparable perforated beams of the I-beam profile in the areas near the intermediate supports with their different design in the software complex "Lira". The objectives of the

study are to establish the actual values of stresses and strains in the characteristic cross-sections of the inseparable perforated beam of the I-beam profile, which occur on the intermediate supports; performing a comparative analysis of the results of numerical studies obtained in the software complex "Lira" for the intermediate support node for different variants of its design and elucidation of the influence of the design of the beam in the area of intermediate support on the stress-strain state of the calculated sections.

The geometric dimensions of the experimental perforated beam are accepted on the basis of recommendations for the choice of rational parameters of the section of the wall of the original profiles. Using the known formulas for determining the values of transverse forces and bending moments at characteristic points and cross sections along the length of a two-span inseparable beam under the action of a uniformly distributed load, the magnitude of the load is determined, for the application of which in the beam there is a limit state belonging to the limit states of the 1st group. Modeling of an inseparable two-span perforated beam by the finite element method in the software complex "Lira" with different structural design of the beam zone near the intermediate support is performed. Variants with or without the use of a stiffening rib placed along the axis of the intermediate support, as well as with unwelded or welded holes in the wall to the left and right of the support are considered. Data on the stress-strain state of an inseparable perforated beam near the intermediate support are obtained and the main results of the research are given.

The use of transverse stiffeners, including on the support, for such beams is not fully regulated, as the current design standards allow only to design the geometric parameters of such ribs, but do not give specific instructions on the location of these elements along the length of the beams.

It is concluded that there is no comprehensive method of calculating inseparable perforated beams in areas near intermediate supports, which is a deterrent to their wider application.

Keywords: inseparable beam; intermediate support; element; perforation; stress; deformation; bearing capacity.

**Романюк В. В., к.т.н., доцент, Супрунук В. В., к.т.н., доцент,
Безнюк Л. И., аспирант** (Национальный университет водного
хозяйства и природопользования, г. Ровно, Украина)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕРАЗРЕЗНЫХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ БАЛОК У ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОПОР

Выполнено моделирование неразрезной двухпролетные перфорированной балки методом конечных элементов в программном комплексе «Лира» с различным конструктивным оформлением зоны балки вблизи промежуточной опоры. Рассмотрены варианты с использованием или без использования ребра жесткости, расположенного по оси промежуточной опоры, а также и с незаваренными или заваренными отверстиями в стенке слева и справа от опоры. Получены данные о напряженно-деформированное состояние неразрезной перфорированной балки и приведены основные результаты проведенных исследований.

***Ключевые слова:* неразрезная балка; промежуточная опора; элемент; перфорация; напряжение; деформация; несущая способность.**
