

МІСЦЕВА СТІЙКІСТЬ ПОЛИЦЬ І СТІНОК ЗГИНАЛЬНИХ ПЕРФОРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

LOCAL STABILITY OF SHELVES AND WALLS OF BENDING PERFORATED ELEMENTS

Налепа О.І., к.т.н., доцент, orcid.org/0009-0008-0749-5663; 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)

Nalepa O. I., candidate of technical sciences, associate professor orcid.org/0009-0008-0749-5663; 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](https://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)

Виконано аналіз основних результатів експериментально-теоретичних досліджень вітчизняних та закордонних науковців щодо проблеми місцевої стійкості полиць і стінок згинальних перфорованих елементів з урахуванням дії згинаючого моменту та поперечної сили. Розглянуто розрахункові передумови, методики теоретичного визначення параметрів напружено-деформованого стану в розрахункових точках перерізу. Сформульовано мету та основні завдання для подальших досліджень.

An overview of the main results of experimental and theoretical studies of domestic and foreign scientists on the problem of local stability of shelves and walls of bending perforated elements is given. The calculated preconditions, formulation of the purpose and tasks of researches, methods of theoretical definition of parameters of a stress-strain state in calculated points of cross section are considered. The analysis of the existing problems of local stability of elements of cross section of beams taking into account action of the bending moment and cross force is executed.

It is noted that the issue of determining the critical load in terms of local stability of perforated beams has not yet been resolved. In most calculations, the perforated wall was considered as a cantilever beam or a compressed column. This approach is possible to evaluate the structure only with a certain

perforation geometry, which does not allow it to be applied to the structure as a whole. In the recommendations based on similar researches, the wall loaded with local loading is offered to strengthen with stiffening ribs, but there are no recommendations establishing the minimum necessary height at which these ribs will not be required.

Comprehensive experimental-theoretical studies of compressed-bending perforated elements according to the inseparable scheme, which worked as part of the pre-stressed arch, and perforated elements Z-shaped profile in oblique bending were performed at the Department of Industrial and Civil Engineering National University of Water and Environmental Engineering. As a result, new experimental data on the stress-strain state of perforated elements were obtained, which testified to the elastic work of the material at all load stages. It was found that after reaching the level of the calculated load, no visible destruction of structures was observed, and the vertical displacements in the middle of the span did not exceed the normative values. Loss of load-bearing capacity of structures occurred without their physical destruction due to loss of local stability of the shelf and wall in the upper part of the cross section with a hole in the part of the structure where the maximum bending moment occurs, which led to total loss of stability of elements from the plane.

It is concluded, that, despite the large amount of research, today there is no clear enough mechanism to take into account the local stability of shelves and walls and their impact on the overall stability of the beams, as well as their load-bearing capacity in general.

The main tasks for further research are formulated.

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

Вступ. Відповідно до теорії сортаменту прокатних профілів для двотаврів найбільш раціональним є переріз, у якому гнучкість стінок і полиць досягає граничних значень за умовою місцевої стійкості. Але виконати такий переріз методом гарячого прокатування не вдається з технологічних причин, оскільки сучасний універсальний стан дає можливість довести гнучкість стінки лише до $\lambda_w = 55$. Отримати гнучкість стінки максимально можливої величини за умовою місцевої стійкості, зберігаючи при цьому достатню несучу здатність поясів, дозволяє технологія виготовлення перфорованих балок. Найбільш придатними для їх виготовлення є широкополицеві двотаври, оскільки в них полиці ширші ніж у звичайних двотаврових балок, що дозволяє приводити вихідний номер широкополицевого двотавра до більшого номера звичайного двотавра зі значною економією сталі.

Незважаючи на великий комплекс виконаних експериментально-теоретичних досліджень проблема розрахунку несучої здатності з подальшим забезпеченням місцевої стійкості стінок і поясів перфорованих балок є актуальною і сьогодні, оскільки сучасні методики розрахунку не завжди враховують дійсний напружено-деформований стан і часто базуються на спрощеному розгляді таких конструкцій. Саме тому, дослідження у цьому напрямку мають бути продовжені, а їх результати разом з використанням сучасних комп'ютерних технологій дозволять отримати дані, що відповідають сучасним вимогам будівельної науки.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні існує не так багато теоретично-експериментальних досліджень перфорованих конструкцій, що стосувались би проблеми місцевої стійкості їх стінок і поясів. Автори зосереджувались в основному на дослідженні несучої здатності елементів, концентрації напружень навколо отворів та розробці алгоритму розрахунку для тієї чи іншої геометрії перфорації, приділяючи питанню місцевої стійкості не так багато уваги. Однак тенденція останніх років вказує на те, що існуючий комплекс невирішених питань у цьому напрямі стимулює науковців більш активно проводити і теоретичні, і експериментальні дослідження.

Стан вирішення проблеми розрахунку несучої здатності перфорованих балок з одночасним забезпеченням місцевої стійкості їх стінок і поясів не повністю відповідає на актуальні питання науковців, оскільки раніше запропоновані методики розрахунку враховують не всі можливі граничні стани, базуються на спрощеному розгляді таких внутрішньо складних систем і тому є досить наближеними. Завдяки розвитку комп'ютерних технологій стала можливою розробка загального підходу до розрахунку перфорованих елементів з урахуванням геометрії отворів, а також всіх внутрішніх зусиль, що виникають в їх перерізах, що сприятиме вирішенню цілого комплексу питань.

Найпростіший метод розрахунку використовує елементарну теорію згину і передбачає, що робота перфорованої балки ідентична роботі балки з послабленим поперечним перерізом стінки. Але значення напружень і деформацій, обчислених за цим методом, не у повній мірі збігаються з експериментальними результатами, тому що не враховується місцевий згин полиці таврового перерізу і концентрація напружень у місцях розміщення отворів у стінці.

У деяких дослідженнях закордонних науковців [1, 2, 3] розглянуто роботу перфорованих сталевих балок з близько розташованими отворами в стінці. Дослідні зразки, включаючи типові балки з круглими отворами в стінці, а також перфоровані балки з новою формою отворів у стінці, були випробувані авторами з метою дослідження способу їх руйнування та визначення несучої здатності за дії навантаження на стінку між двома сусідніми отворами в ній. Ці нові форми отворів у стінках покращують структурні характеристики перфорованих балок щодо руйнування стінки. Крім того, вдосконалено

технологію отримання цих нових отворів у стінці під час виготовлення балки, що сприяє сталому проектуванню. З метою дослідження стабільності (незмінності) дії вертикального зсувного навантаження було вивчено вплив інтервалу розміщення отворів в стінці на глибину отвору в стінці, а також глибини отвору в стінці на товщину стінки. У результаті отримано низку значних переваг порівняно зі звичайними перфорованими балками.

За результатами інших проведених досліджень міцності і стійкості перфорованих балок авторами побудовано графіки інтенсивності горизонтальних переміщень в контрольних точках перерізів та їх прогинів з площини стінки. За момент втрати стійкості приймалось значення, за якого інтенсивність переміщення значно зростала. Значення навантаження при такому переміщенні приймалось як експериментальне критичне навантаження. Аналіз форм втрати стійкості стінки показав, що у більшості випадків вони мали вигляд викривленої напівхвилі або ж вигляд синусоїдної форми. У всіх випадках втрата стійкості мала місце у пружній стадії роботи.

Експериментально-теоретичним дослідженням та дослідженням з використання програмних комплексів присвячено роботи, де розглядались питання стійкості перфорованих балок з круглими та прямокутними вирізами в стінці за дії осьового навантаження; роботи, в яких досліджувались конструкції з трапецієподібною перфорацією не лише з використанням електронно-обчислювальної техніки, а і експериментально; роботи, в яких виконано порівняльний аналіз стійкості балок з суцільною та перфорованою стінками, що дозволило оцінити вплив перфорації на величину критичного навантаження. В деяких роботах було досліджено роботу балок з нерегулярною шаховою перфорацією стінки, зокрема її стійкості, і на основі аналізу методом скінчених елементів було розроблено нову методику розрахунку.

Постановка проблеми. Наразі питання визначення критичного навантаження з точки зору місцевої стійкості перфорованих балок дотепер не вирішене. Більшість досліджень у цій області проводились експериментально. Практично всі вони брали до уваги втрату стійкості стінки за дії поперечної сили і не враховували вплив згинаючого моменту. Більшість розрахунків розглядали перфоровану стінку, як консольну балку або стиснуту колону. Такий підхід можливий для оцінки конструкції лише з певною геометрією перфорації, що не дозволяє його застосовувати для конструкції в цілому. В рекомендаціях, що засновані на подібних дослідженнях, стінку, що навантажена локальним навантаженням, пропонують підсилювати ребрами жорсткості і при цьому відсутні рекомендації, що встановлюють мінімально необхідну висоту, за якої ці ребра не будуть потрібні.

Постановка мети і завдань досліджень. В роботі поставлено за мету виконати критичний аналіз останніх експериментально-теоретичних досліджень перфорованих елементів та конструкцій з їх використанням, які

так чи інакше стосувались би проблем місцевої стійкості їх стінок і поясів. Важливо зрозуміти, які завдання науковцями були вирішені, з якими проблемами вони стикались під час досліджень та як результати їх роботи можуть бути використані у подальших дослідженнях та розробці комплексної методики розрахунку місцевої стійкості стінок і поясів перфорованих елементів за різних видів навантажень.

Методика досліджень. Аналіз літературних джерел, що присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням перфорованих конструкцій, зокрема їх несучій здатності, загальній стійкості та місцевій стійкості елементів перерізу.

Результати досліджень.

Комплексні дослідження роботи металевих перфорованих конструкцій за дії різних силових факторів та їх комбінацій, що викликали складний напружено-деформований стан, було проведено на кафедрі промислового цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне).

Зокрема було досліджено роботу сталеві попередньо напруженої арки з перфорованим верхнім поясом за різних видів навантаження у комбінації з попереднім напруженням розпірки і без нього [4]. Тобто, фактично було проведено комплексні експериментально-теоретичні дослідження роботи стиснуто-згинальних перфорованих елементів за нерозрізною схемою, які працювали у складі попередньо-напруженої арки.

Застосування деформаційної схеми перфорованого елемента дозволило врахувати додаткові напруження в його перерізах за рахунок деякого збільшення або зменшення згинаючого моменту. В результаті цього напруження по висоті перерізу збільшуються або ж зменшуються залежно від того, де знаходиться розрахункова точка перерізу – в розтягнутій чи стиснутій зоні. З урахуванням деформаційної схеми для розрахунку стиснуто-згинального перфорованого елемента були запропоновані формули для обчислення напружень в розрахункових точках перерізу.

В результаті експериментальних досліджень, які в цілому підтвердили розроблену методику розрахунку, було встановлено, що після досягнення рівня розрахункового навантаження видимих руйнувань в елементах арки не відбувалось, зафіксовані напруження в розрахункових перерізах перфорованого поясу не перевищували розрахункового опору сталі, а вертикальні переміщення вузлів арки були не більшими за нормативні. З подальшим збільшенням вузлового навантаження відбулась втрата стійкості однієї з напіварок з площини дії навантаження між точками його прикладання, яка супроводжувалась втратою місцевої стійкості поясу і стінки на відстані ≈ 1 м від опорного вузла.

Також було проведено експериментально-теоретичні дослідження роботи перфорованих елементів Z- подібного профілю за косоного згину на натурному зразку [5]. Авторами було отримано нові експериментальні дані про

напружено-деформований стан перфорованих елементів Z-подібного профілю, що працюють в умовах косоного згину, в характерних точках поперечних перерізів з отворами і без отворів на трьох розрахункових ділянках по довжині прогону; побудовано графіки зміни напружень в характерних точках залежно від місця розміщення перерізу по довжині прогону та кута нахилу конструкції, які засвідчили пружну роботу матеріалу на всіх ступенях навантаження, визначеного за граничними станами другої групи. Як і в першому випадку було встановлено, що після досягнення рівня розрахункового навантаження видимих руйнувань конструкції не спостерігалось, а вертикальне переміщення посередині прольоту не перевищувало нормативного значення.

Втрата несучої здатності прогону відбулася без його фізичного руйнування через втрату місцевої стійкості полиці та стінки у верхній частині перерізу з отвором на ділянці конструкції, де має місце максимальний згинаючий момент, що призвело до загальної втрати стійкості прогону з площини між точками його закріплення (рис. 1).

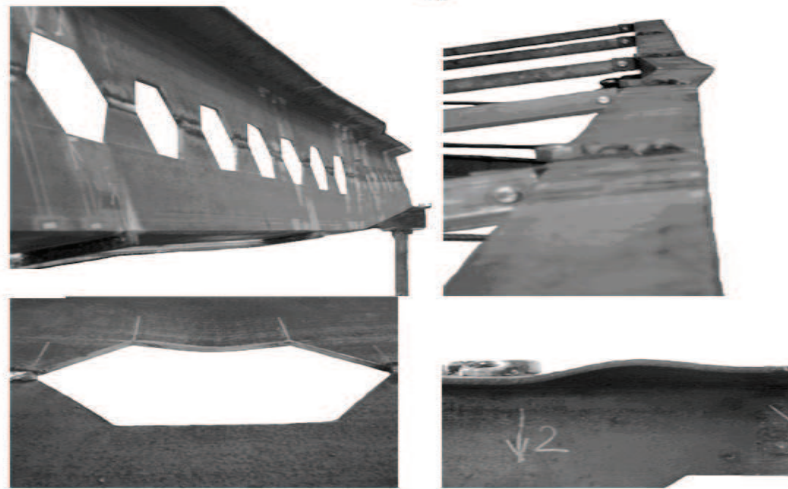


Рис. 1. Втрата місцевої стійкості елементів перерізу прогону

Згідно з чинними нормами проектування [6] для балки з перфорованою стінкою виконується не лише розрахунок міцності у характерних точках 1, 2, 3 і 4 (рис. 2), а і перевіряється місцева стійкість її поясу і стінки.

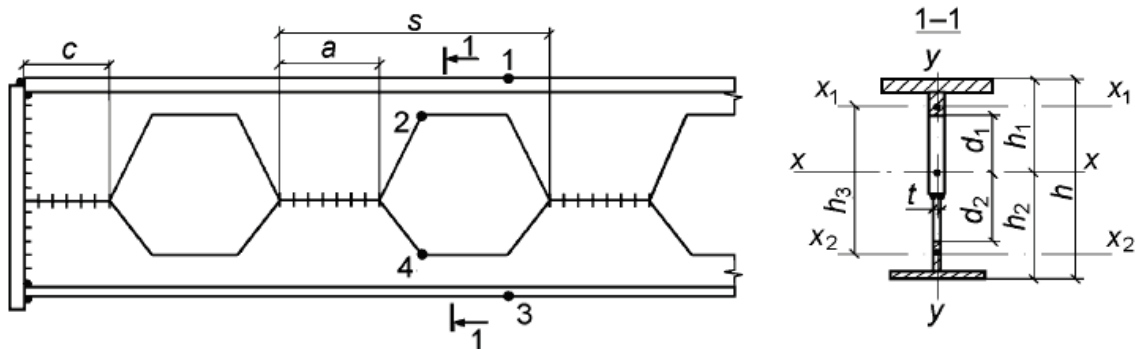


Рис. 2. Схема ділянки балки з перфорованою стінкою

Для стиснутого таврового перерізу за умовної гнучкості $0,8 \leq \bar{\lambda} \leq 4$ відношення розрахункової висоти стінки тавра до товщини, якщо, $1 \leq b_f / h_{ef1} \leq 2$, не повинно перевищувати значень, які визначають за формулою

$$h_{ef1}/t_w = (0,40 + 0,07\lambda)(1 + 0,25\sqrt{2 - b_f/h_{ef1}})\sqrt{E/R_y}, \quad (1)$$

де h_{ef1} – розрахункова висота стінки тавра; $\bar{\lambda}$ – умовна гнучкість, яку необхідно приймати 1,4; b_f – ширина полиці тавра.

Місцеву стійкість стиснутих поясів слід вважати забезпеченою, якщо умовна гнучкість звису поясу

$$\bar{\lambda}_f = b_{ef}/t_f \sqrt{R_{yf}/E} \quad (2)$$

балок 1-го класу, а також бісталевих балок 2-го класу не перевищує значень граничної умовної гнучкості $\bar{\lambda}_{uf}$, що визначається формулою для звисів поясів балок двотаврового перерізу, які не обрамлені ребрами або не підсилені відгинами,

$$\bar{\lambda}_{uf} = 0,5\sqrt{R_{yf}/\sigma_c}, \quad (3)$$

де σ_c – нормальні напруження в стиснутому поясі, що обчислюються для перерізу з однорідної сталі за формулою

$$\sigma_c = M_x/W_{xnc} \gamma_c \quad (4)$$

де W_{unc} та W_{xnc} – моменти опору поперечного перерізу відносно відповідних осей, які обчислені для стиснутих волокон.

Окрім того, чинні норми проектування [6] пропонують підсилювати стінку балки, що навантажена локальним навантаженням, поперечними ребрами жорсткості, але рекомендації щодо влаштування цих ребер потребують уточнення.

Питання розрахунку та конструювання балок з перфорованою стінкою, а також забезпечення місцевої стійкості поясів і стінок в таких балках в європейських нормах розрахунку [7] не регламентуються.

Висновки та рекомендації.

Вищенаведений аналіз експериментально-теоретичних досліджень перфорованих балок, у тому числі місцевої стійкості поясів і стінок профілів, свідчить про те, що, незважаючи на великий обсяг досліджень, на сьогодні не існує достатньо чіткого механізму урахування місцевої стійкості поясів і стінок та їх впливу на загальну стійкість балок, а також на їх несучу здатність в цілому.

Варто взяти до уваги результати останніх досліджень, які свідчать, що конструкція балки може руйнуватись від втрати місцевої стійкості так і не вичерпавши свій потенціал несучої здатності за міцністю матеріалу. Саме тому, важливим є теоретичне дослідження і розробка алгоритму з розрахунку місцевої стійкості стінок перфорованих конструкцій, оскільки більшість раніше виконаних завдань в цій області є експериментальними.

Тому на основі проведення теоретично-експериментальних досліджень необхідно розробити комплексну методику перевірки місцевої стійкості поясів і стінок перфорованих елементів за дії згинаючого моменту та поперечної сили з урахуванням специфіки прикладеного навантаження.

Для реалізації зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести числові дослідження перфорованих елементів з отворами різної конфігурації з їх регулярним та нерегулярним розміщенням по довжині за дії локальних зосереджених та рівномірно розподілених навантажень з використанням програмного комплексу «Ліра».

2. Виявити закономірності розподілення напружень в поясах і стінках перфорованих елементів в характерних перерізах балок залежно від місця прикладання навантажень, їх виду та геометричних параметрів перерізів.

3. Розробити експериментальні зразки та методику проведення експериментальних досліджень, в результаті яких отримати дійсні дані про напружено-деформований стан елементів з урахуванням специфіки прикладання навантажень.

4. Розробити методику перевірки місцевої стійкості поясів і стінок на різних розрахункових ділянках перфорованих балок з вихідними профілями у вигляді двотавра і швелера, а саме на ділянці з максимальним значенням поперечної сили, на ділянці з максимальним значенням згинаючого моменту і на ділянці балки, де значення згинаючого моменту і поперечної сили одночасно досягають великих значень.

5. Розробити заходи щодо забезпечення місцевої стійкості поясів і стінок на різних ділянках балок з поперечними перерізами у вигляді двотавра і швелера.

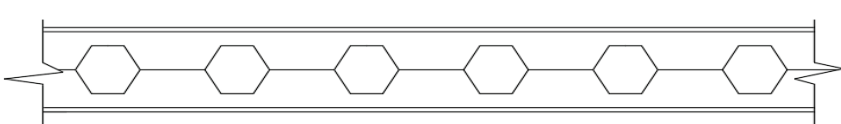
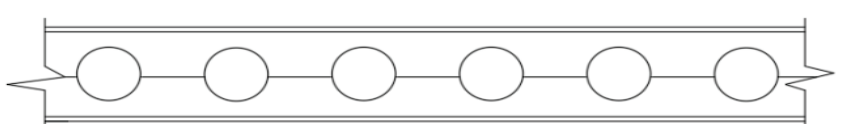
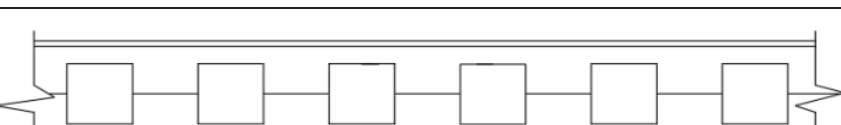
Для вирішення цих питань необхідно теоретично та експериментально дослідити розподіл напружень у розрахункових перерізах перфорованих профілів та форми втрати стійкості стінки та полиці за дії різних видів навантаження для балок з різною формою отворів та місцем їх розташування; розробити методику оцінки стійкості стінок та полиць з урахуванням параметрів отворів та виду прикладеного навантаження. У підсумку вирішення задачі стійкості стінки та полиць дозволить розробити ефективні конструкції балок, у певній мірі їх оптимізувати та розробити рекомендації щодо їх практичного застосування.

На першому етапі планується вивчення напружено-деформованого стану перфорованих балок двотаврового профілю на різних ділянках, а саме на ділянці з максимальним значенням поперечної сили, на ділянці з

максимальним значенням згинаючого моменту i на ділянці балки, де значення згинаючого моменту i поперечної сили одночасно досягають великих значень. Числові дослідження виконуватимуться на моделях у програмному комплексі «Ліра» на основі методу скінчених елементів. Розглядатимуться перфоровані балки з різною геометрією отвору: шестикутна, кругла, прямокутна (табл. 1) за дії різних видів навантаження (рис. 3). Розміри отворів перфорації визначатимуться залежно від висоти поперечного перерізу вихідного профілю балки .

Таблиця 1

Типи балок

| №№ з/п | Фрагмент балки | Коефіцієнт розв'язку висоти перерізу k |
|--------|--|--|
| 1. |  | 1,1 ... 1,5 |
| 2. |  | 1,1 ... 1,5 |
| 3. |  | 1,1 ... 1,5 |

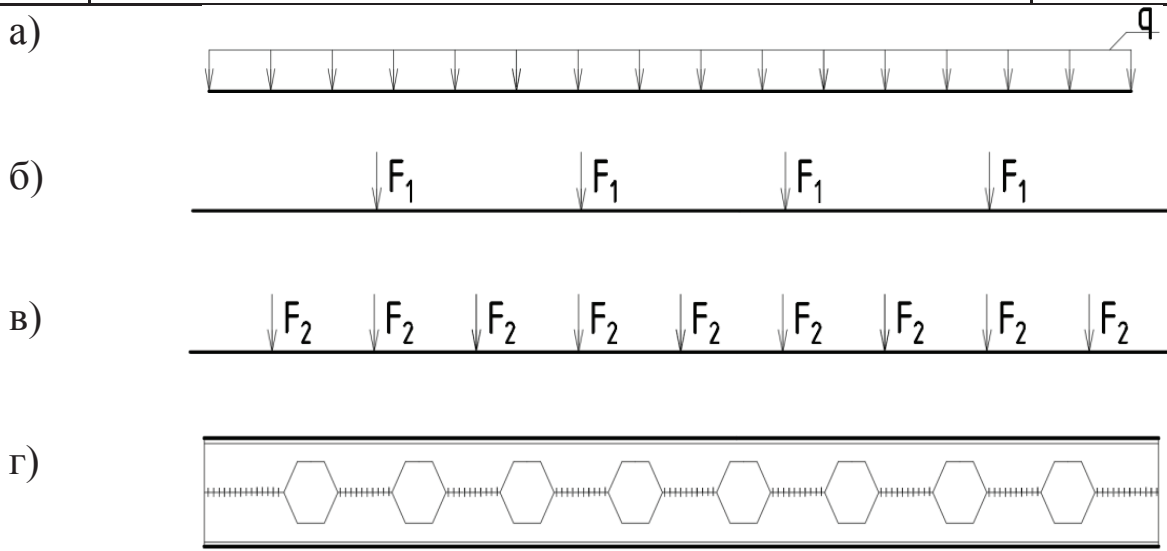


Рис. 3. Схеми навантаження балок

а – рівномірно розподіленим навантаженням q ; б – зосередженими навантаженнями F_1 ; в – зосередженими навантаженнями F_2 ; г – схема ділянки балки

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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: monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2013. 106 s.

5. 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.

6. 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).

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

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