

УДК 624.014

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ПРОЛЕТНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПЕРФОРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА СКЛАДНОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

Кандидати техн. наук В. В. Романюк, В. В. Супрунюк

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Кандидаты техн. наук В. В. Романюк, В. В. Супрунюк

PECULIARITIES OF CALCULATION OF SPAN CONSTRUCTIONS FROM PERFORATED ELEMENTS AT A COMPLEX STRESS-DEFORMED CONDITION

Cand. tech. V. V. Romaniuk, V. V. Supruniuk

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127177

Представлено деякі результати власних теоретичних досліджень несучої здатності пролётних перфорованих конструкцій за граничними станами першої групи, а саме сталевій попередньо напруженої арки з верхнім поясом з перфорованого двутавра та прогону покриття Z-подібного профілю та запропоновано формули для обчислення напружень у характерних перерізах елементів конструкцій, які дозволяють точніше враховувати зміну напружено-деформованого стану в перфорованих елементах порівняно з існуючою методикою.

Ключові слова: несуча здатність, напружено-деформований стан, перфорований елемент, арка, прогін.

Представлены некоторые результаты собственных теоретических исследований несущей способности пролетных перфорированных конструкций по предельным состояниям первой группы, а именно стальной предварительно напряженной арки с верхним поясом из перфорированного двутавра и прогона покрытия Z-образного сечения и предложены формулы для вычисления напряжений в характерных сечениях элементов конструкций, которые позволяют более точно учитывать изменение напряженно-деформированного состояния в перфорированных элементах по сравнению с существующей методикой.

Ключевые слова: несущая способность, напряженно-деформированное состояние, перфорированный элемент, арка, прогон.

Some results of their own theoretical studies of the carrying capacity of span perforated structures on the limiting states of the first group, namely the steel pre-stressed arch with the upper belt of the perforated twine and the Z-section cross-section run, are presented. The formulas for calculating the stresses in the characteristic sections of the structural elements are proposed, which allow more accurately to take into account the change in the stress-strain state in the perforated elements with the joint action of the bending moment, the transverse and longitudinal forces for the upper belt of the arch, and also with the bending curve for the Z- sections with a slope of the roof from 0 to 25°. The results of calculating the stresses according to the reduced formulas, the results of numerical studies in the program complex "Lira" and the results of the experimental studies have fairly exact convergence, which makes it possible to draw a conclusion on the possibility of applying the proposed method for determining stresses in practice.

Key words: bearing capacity, strain-strain state, perforated element, arch, run.

Вступ. Актуальність наведених нижче результатів теоретичних досліджень перфорованих елементів і конструкцій на їх основі обґрунтовується широким використанням у будівництві сталевих конструкцій, у тому числі плоских конструкцій покриття. Висунуті на сьогодні вимоги до забезпечення необхідної несучої здатності конструкцій за одночасного зниження їх маси є підставою для удосконалення існуючих і створення нових конструктивних форм, вивчення їх дійсної роботи і розроблення відповідних методик розрахунку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрахунок традиційних елементів конструкцій на прості випадки напружено-деформованого стану не викликає особливих ускладнень, а от розрахунок перфорованих профілів має низку особливостей і є досить складним, особливо за сумісної дії згинального моменту, поперечної та поздовжньої сил, а також за дії згинального моменту у двох площинах, тобто за косоного згину. Методика розрахунку перфорованих елементів за пружної роботи наведена в нормах проектування [1, с. 115] і передбачає їх розрахунок як звичайних балок, що послаблені отворами. Але вона придатна для розрахунку лише згинальних елементів і не враховує додаткові деформації, які виникають у стиснуто-згинальних елементах, якими є верхні пояси арок, а також не враховує наявність згинальних моментів у двох площинах у конструкціях прогонів, що розміщені на верхніх поясах кровляних конструкцій, які найчастіше мають ухил у межах $0...25^0$. У результаті виникнення складного напружено-деформованого стану в поперечних перерізах таких елементів виникають додаткові напруження і тому виникає необхідність проведення подальших досліджень у цьому напрямку.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою проведення досліджень є:

1) розроблення методики розрахунку перфорованих елементів верхніх поясів перфорованих арок за деформаційною розрахунковою схемою, яка враховує реальні умови їх роботи і додаткові напруження, які виникають у їх перерізах за рахунок деформації форми, що утворюється за дії зовнішнього навантаження;

2) розроблення методики розрахунку перфорованих прогонів покриття Z-подібного профілю, які використовуються в покрівлях з ухилом від 0^0 до 25^0 , за дії згинального моменту у двох площинах, тобто за косоного згину.

Основними завданнями дослідження є визначення ексцентриситету прикладання поздовжньої сили у верхньому поясі арки; обґрунтування формул для визначення напружень у верхньому поясі арки з урахуванням деформаційної схеми; визначення положення нейтральної осі прогону за косоного згину; обґрунтування формул для визначення напружень у характерних точках поперечного перерізу прогону за косоного згину.

Основна частина дослідження. Як дослідні конструкції були прийняті двічі статично невизначна арка прольотом 9 м (рис. 1) і перфорований прогін Z-подібного профілю прольотом 6 м (рис. 2). Арка складається з двохсхилого верхнього пояса, елементи якого жорстко з'єднані у гребеневому вузлі, зтяжки для сприйняття зусилля розпору, розпірки для можливості здійснення перерозподілу внутрішніх зусиль по довжині верхнього пояса та підвіски, яка призначена для підтримання зтяжки від провисання під час транспортування та монтажу арки в проектне положення. Елемент верхнього пояса на ділянках між опорним і гребневим вузлами являє собою нерозрізний перфорований стрижень постійної жорсткості. Ухил верхнього пояса прийнятий $i=0,5$ і характеризується кутом α . Перфорований прогін виконаний на основі прокатного швелера за ДСТУ 3436–96.

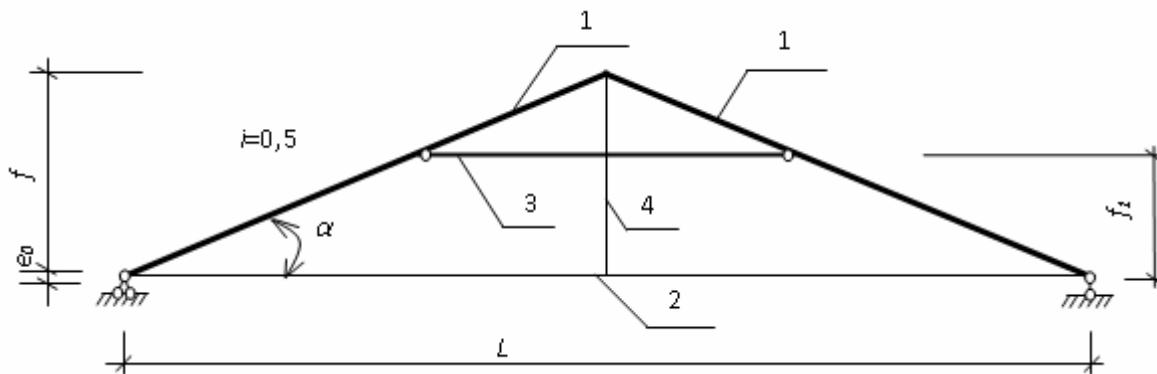


Рис. 1. Схема арки:

1 – елементи верхнього пояса з перфорованого двотавра постійної жорсткості;
2 – затяжка; 3 – розпірка; 4 – підвіска

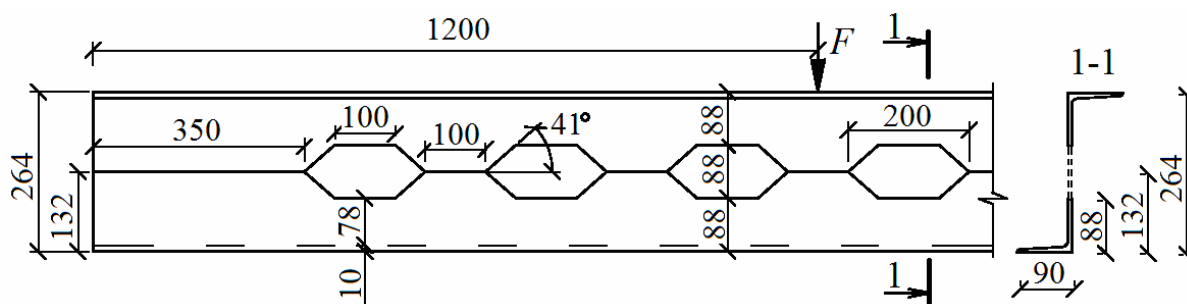


Рис. 2. Фрагмент прогону Z-подібного профілю

Враховуючи наявність прогину верхнього пояса арки, розрахункова модель перфорованого стиснуто-згинального

елемента за деформаційною схемою [2] має вигляд, зображений на рис. 3.

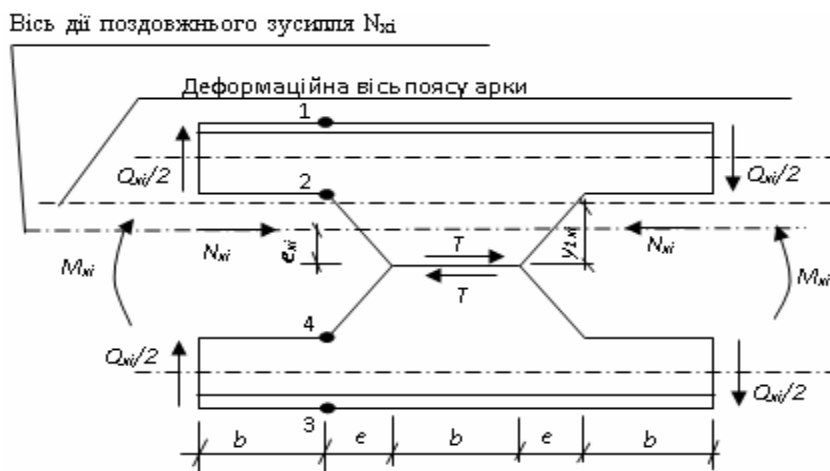


Рис. 3. Розрахункова модель перфорованого стиснуто-згинального елемента за деформаційною схемою

На будь-якій ділянці пояса між точками прикладання зосереджених сил, тобто на ділянці, в межах якої значення N_{xi} незмінне, приймаючи умову, що елементи арки (напівпояси) деформуються рівномірно по всій довжині між точками закріплення їх у площині арки, максимальний ексцентриситет прикладання поздовжньої сили

$$e_x = \frac{y_{1,xi} c}{l} \cos \alpha, \quad (1)$$

де e_x – максимальний ексцентриситет прикладання поздовжньої сили на будь-

якій ділянці пояса між точками прикладання до нього зовнішнього навантаження (рис. 4);

$y_{1,xi}$ – максимальний місцевий прогин стиснуто-згинального елемента;

c – довжина ділянки пояса між точками прикладання зосереджених сил, або довжина ділянки стрижня, у межах якої значення поздовжньої сили N_{xi} незмінне (як правило, для конструкцій покриття – це відстань між прогонами або ширина плит покриття);

l – довжина поясу між точками закріплення його в площині арки.

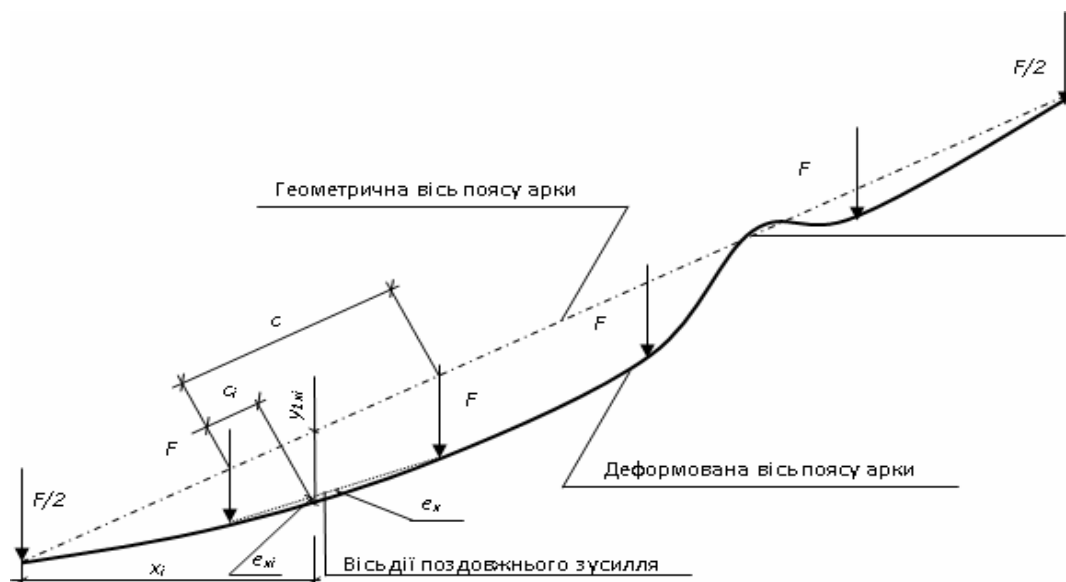


Рис. 4. Деформаційна схема напіварки

Враховуючи, що криволінійна форма деформації на будь-якій ділянці напівпояса арки (рис. 4) близька до трикутної, оскільки найбільший прогин знаходиться посередині, а в місцях прикладання навантаження дорівнює нулю, та з умови подібності трикутників ексцентриситет прикладання поздовжнього зусилля для будь-якого перерізу ділянки напівпояса

$$e_{xi} = \frac{2e_x c_i}{c}, \quad (2)$$

де c_i – менша з відстаней від точки прикладання навантаження до перерізу, у якому необхідно визначити ексцентриситет прикладання поздовжнього зусилля.

Тому з урахуванням деформаційної схеми для стиснуто-згинального перфорованого елемента формули для обчислення напружень у розрахункових точках перерізу пояса (точки 1, 2, 3 і 4 на рис. 3) мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1,3} &= \frac{(M_{xi} \pm N_{xi}e_{xi})H}{2I_x} \pm \frac{N_{xi}}{2A_T} + \frac{Q_{xi}bz_1}{4I_1} \leq R_y\gamma_c \\ \sigma_{2,4} &= \frac{(M_{xi} \pm N_{xi}e_{xi})d}{2I_x} \pm \frac{N_{xi}}{2A_T} + \frac{Q_{xi}by_c}{4I_1} \leq R_y\gamma_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Прогони покриття у складі покрівлі з певним ухилом працюють в умовах косоного згину [3]. Косим називають такий вид згину, за якого площина дії згинального моменту в даному поперечному перерізі елемента не збігається з жодною з головних центральних осей інерції цього перерізу.

На ділянках 1 і 2 (рис. 5) перфорованого прогону виникатиме косий поперечний згин, оскільки на цих ділянках при-

сутні як згинальний момент, так і поперечна сила, причому на ділянці 1 поперечна сила є найбільшою на всьому прольоті конструкції, а згинальний момент найменшим. Для ділянки 2 ситуація дещо інша – поперечна сила зменшується за одночасного збільшення згинального моменту. На ділянці 3 має місце чистий косий згин, оскільки поперечна сила дорівнює нулю, а згинальний момент є максимальним.

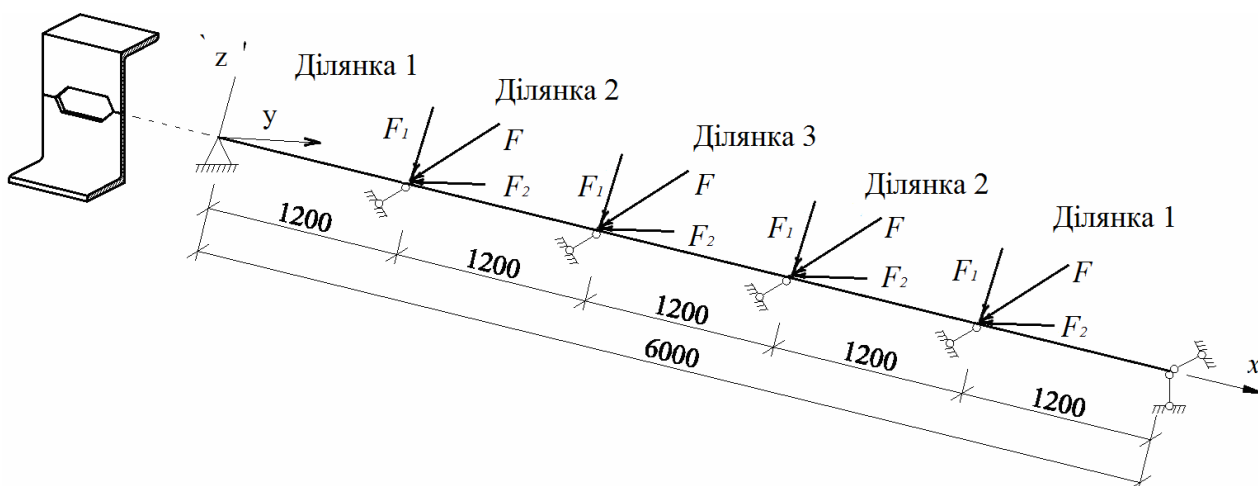


Рис. 5. Розрахункова схема прогону

У поперечних перерізах елемента на ділянках 1 і 2 відносно осі z виникає згинальний момент $M_z = F_1x$, який діє в головній площині ux , і поперечна сила $Q_y = -F_1$. У поперечному перерізі відносно осі y виникають згинальний момент $M_y = F_2x$ в головній площині zx і поперечна сила $Q_z = -F_2$. Повний згинальний момент розглядається як поєднання двох прямих згинів

$$M = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} \quad (4)$$

і на кожній з цих ділянок діє в площині, яка не збігається з жодною з головних площин перерізу.

Спираючись на принцип незалежності дії сил, повні нормальні напруження в будь-якій точці поперечного перерізу елемента дорівнюють сумі напружень від окремої дії моментів M_z і M_y

$$\sigma = \sigma_{M_z} + \sigma_{M_y} = \pm(M_z / I_z) y \pm (M_y / I_y) z, \quad (5)$$

де y і z – координати точки перерізу, де обчислюють напруження.

На рис. 6, а наведено епюри нормальних напружень σ_{M_z} і σ_{M_y} в поперечному

перерізі ділянки 2 перфорованого Z-подібного профілю (див. рис. 5) від окремої дії згинальних моментів M_z і M_y . Епюру σ від сумісної дії моментів M_z і M_y зображено в аксонометрії на рис. 6, б.

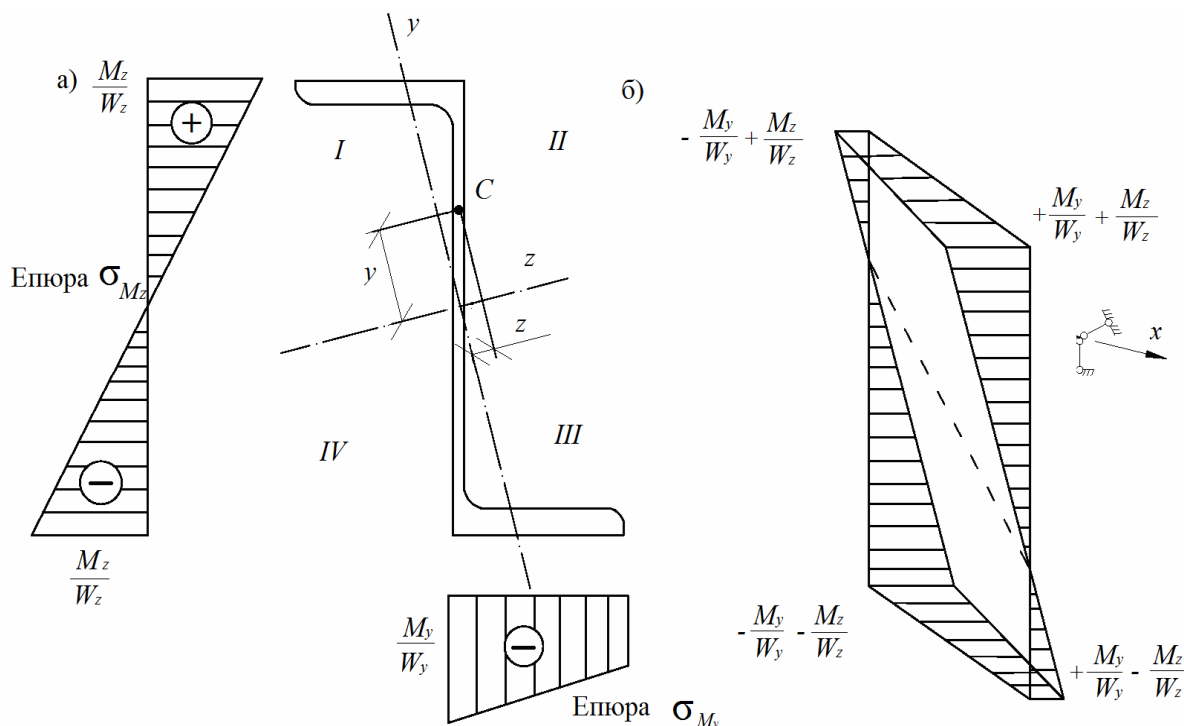


Рис. 6. Нормальні напруження в перерізі перфорованого прогону: а – за дії M_z і M_y ; б – за сумісної дії згинальних моментів

Повний згинальний момент M пов'язаний з його складовими M_z і M_y залежностями

$$\begin{cases} M = \sqrt{M_z^2 + M_y^2}; \\ M_z = M \cos \alpha; \\ M_y = M \sin \alpha, \end{cases} \quad (6)$$

де α – кут між віссю y і площиною дії повного моменту (рис. 7).

Кут нахилу силової площини до головної осі інерції перерізу

$$\operatorname{tg} \alpha = |M_y / M_z|. \quad (7)$$

Положення площини дії повного моменту встановлюється з урахуванням того, що ця площина проходить через центр ваги перерізу і два квадранти, у яких обидва моменти M_z і M_y викликають напруження одного знаку. Нормальні напруження за косоного згину

$$\sigma = \pm M \left(\frac{y \cos \alpha}{I_z} + \frac{z \sin \alpha}{I_y} \right) \quad (8)$$

у центрі ваги поперечного перерізу дорівнюють нулю, у чому можна легко

переконались, підставивши у формулу (8) значення $y = 0$ і $z = 0$ (тобто координати центра ваги перерізу). Отже, за косою згину нейтральна вісь проходить через центр ваги поперечного перерізу.

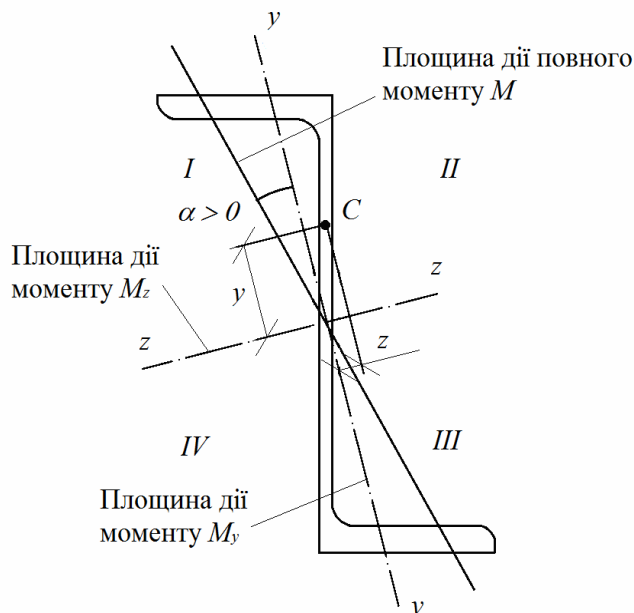


Рис. 7. Кут нахилу площини дії повного моменту M

Для Z-подібного профілю положення головних осей інерції y і z не будуть вертикальним і горизонтальним. Вони будуть повернуті на деякий кут, що зумовлено несиметричністю поперечного перерізу конструкції. Наприклад, для Z-подібного перфорованого прогону, виготовленого з вихідного прокатного швелера № 22У/ДСТУ 3436-96, цей кут складатиме 14° (рис. 8) і за кута нахилу конструкції 0° площина дії згинального моменту не буде паралельною головній осі інерції y , тобто виникатиме косий згин. Причому повне зовнішнє навантаження F сприйматиметься лише стінкою прогону і у верхньому поясі перфорованого профілю виникатиме крутний момент від дії горизонтальної складової F_2 (див. рис. 5), який спричиняє деформацію конструкції з її площини.

На відміну від прямого згину, за косою згину нейтральна вісь (нульова лінія) не буде перпендикулярною до площини дії згинального моменту, а буде повернута на певний кут від осі, яка перпендикулярна до площини дії згинального моменту, до осі, відносно якої момент інерції має мінімальне значення.

Нормальні напруження в кожній точці поперечного перерізу перфорованого Z-подібного прогону за косою згину, як і у випадку прямого згину, прямо пропорційні відстані від цієї точки до нейтральної осі. Тобто найбільші напруження, які виникають у точках поперечного перерізу, найбільш віддалені від нейтральної осі.

Визначення положення нейтральної осі необхідне для знаходження небезпечних точок перерізу (див. рис. 8) і подальшого розрахунку на міцність.

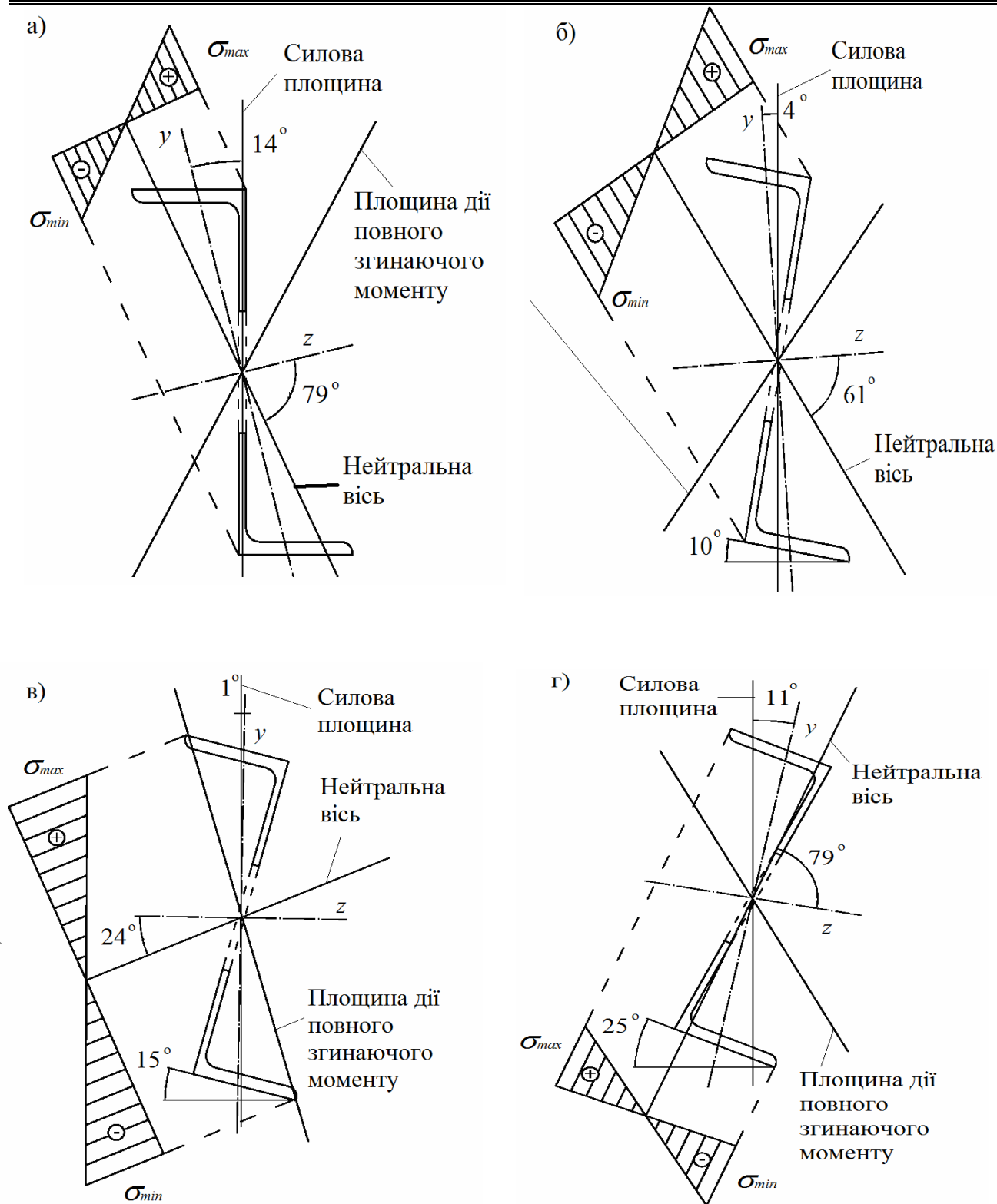


Рис. 8. Небезпечні точки перфорованого елемента для різних кутів нахилу:
 а – 0°; б – 10°; в – 15°; г – 25°

Для розрахунку перфорованих елементів в умовах косого згину пропонується взяти за основу існуючу методику розрахунку згинальних перфорованих елементів

[1, с. 115] і визначити напруження в розрахункових перерізах бісталевого елемента з несиметричними по висоті поясами (рис. 9) на 1-й і 3-й ділянках за формулами:

$$\text{точка 1} \quad \sigma_{sup1} = \frac{M_z h_1}{I_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n; \quad (9)$$

$$\text{точка 2} \quad \sigma_{sup2} = \frac{M_z d_1}{I_z} + \frac{Q_{sup2} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u \gamma_n}; \quad (10)$$

$$\text{точка 3} \quad \sigma_{inf3} = \frac{M_z h_2}{I_z} + \frac{Q_{inf1} a}{2 W_{inf,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n; \quad (11)$$

$$\text{точка 4} \quad \sigma_{inf4} = \frac{M_z d_2}{I_z} + \frac{Q_{inf2} a}{2 W_{inf,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u \gamma_n}, \quad (12)$$

де $M_z = M \cos \alpha$; $M_y = M \sin \alpha$ – згинальні моменти відповідно в площині та з площини дії зовнішнього навантаження;

$h_1; d_1; h_2; d_2$ – відстані від головних осей інерції до точки, що розглядається; I_z – момент інерції у відповідному перерізі;

$W_{sup,max}; W_{sup,min}; W_{inf,max}; W_{inf,min}$ – максимальні та мінімальні моменти опорів перерізів верхнього і нижнього поясів;

R_y, R_u – розрахункові опори сталі відповідно за межею текучості і межею міцності;

γ_c, γ_u – коефіцієнти відповідно умов роботи і надійності;

$Q_{sup1}; Q_{sup2}; Q_{inf1}; Q_{inf2}$ – відповідні поперечні зусилля, які сприймаються тавровими поясами і визначаються пропорційно їх жорсткостям, тобто приймаються коефіцієнти розподілу:

$$\text{для верхнього пояса} \quad \alpha_{sup} = \frac{I_{sup}}{I_{sup} + I_{inf}}; \quad (13)$$

$$\text{для нижнього пояса} \quad \alpha_{inf} = 1 - \alpha_{sup}, \quad (14)$$

де $I_{sup}; I_{inf}$ – моменти інерції перерізів верхнього і нижнього поясів.

Поперечні сили в поясах

$$\begin{cases} Q_{sup1} = \alpha_{sup} Q_1; & Q_{sup2} = \alpha_{sup} Q_2; \\ Q_{inf1} = \alpha_{inf} Q_1; & Q_{inf2} = \alpha_{inf} Q_2, \end{cases} \quad (15)$$

де $Q_1; Q_2$ – поперечні зусилля в перерізі.

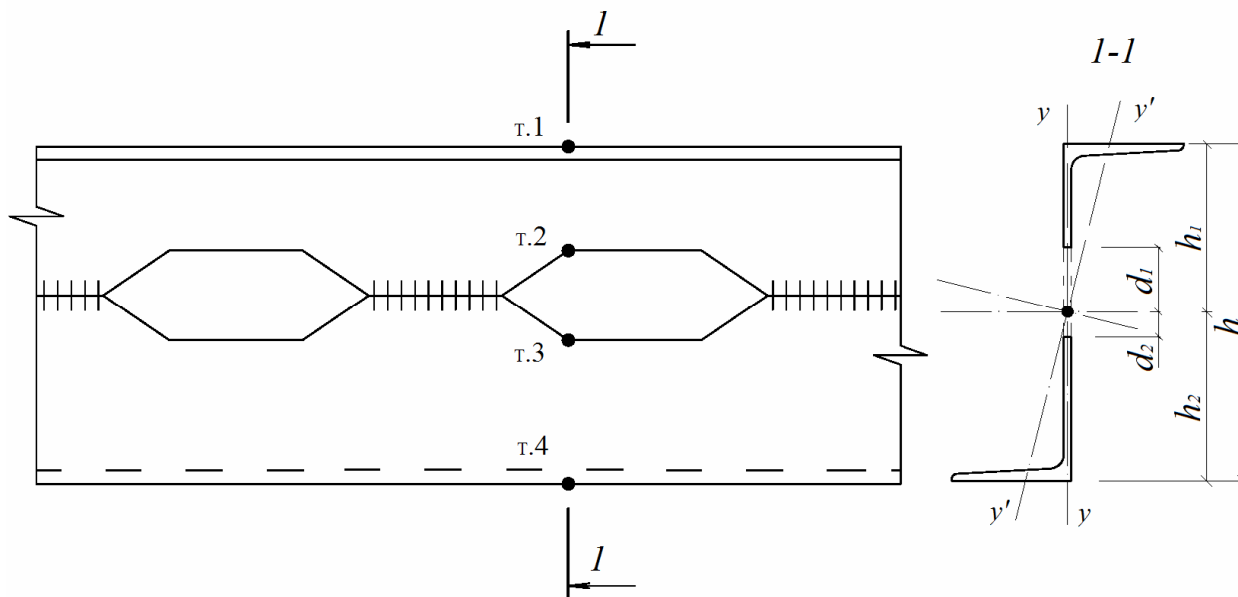


Рис. 9. Схема ділянки прогону з перфорованою стінкою

Для визначення напружень на ділянці 2 використовується формула

$$\sigma = 0,87 \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{zy}^2} \leq R_y \gamma_c, \quad (16)$$

де $\sigma_z = \frac{M_z h_1}{I_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}}$ – нормальні напруження в серединній площині стінки,

спрямовані паралельно поздовжній осі конструкції;

$\sigma_y = M_y / W_y$ – те саме, спрямовані перпендикулярно до поздовжньої осі конструкції;

$\tau_{zy} = \frac{Q_y S}{I_z t_w}$ – дотичні напруження в точці стінки конструкції, що розглядається.

Розрахунок на міцність розрізних балок 2-го і 3-го класів пропонується виконувати за формулами:

$$\text{точка 1} \quad \sigma_1 = \frac{M_z h_1}{c_x \beta J_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{c_y W_y} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n; \quad (17)$$

$$\text{точка 2} \quad \sigma_2 = \frac{M_z d_1}{c_x \beta J_z} + \frac{Q_{sup2} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{c_y W_y} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n, \quad (18)$$

де c_x ; c_y ; β – коефіцієнти, які приймаються за нормами проектування [1].

Окрім теоретичних досліджень для зазначених конструкцій були проведені числові дослідження у програмному комплексі "Ліра", а також комплексні експериментальні дослідження на зразках у натуральну величину, результати яких мають досить точну збіжність, що дає можливість зробити висновок про можливість застосування запропонованих методик і формул для визначення напружено-деформованого стану на практиці.

Висновки. Застосування деформаційної схеми для стиснуто-згинального перфорованого елемента дозволяє враховувати додаткові напруження в його перерізах за рахунок деякого збільшення або зменшення згинального моменту. У

результаті цього напруження по висоті перерізу збільшуються або ж зменшуються залежно від того, де знаходиться розрахункова точка перерізу – у розтягнутій чи стиснутій зоні. Для перфорованих елементів, що працюють в умовах косоного згину, запропоновано формули для визначення напружень у характерних точках перерізів елементів з отворами і без них для розрахунку з урахуванням і без урахування пружно-пластичних деформацій. Подальшого дослідження потребують питання втрати місцевої стійкості поясів і стінок перфорованих елементів, оскільки саме через неї відбувається втрата несучої здатності елементів у цілому за різних видів напружено-деформованого стану.

Список використаних джерел

1. Сталеві конструкції [Текст]: ДБН В.2.6 – 198: 2014. – [офіц вид.]. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2014. – 199 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).
2. Романюк, В. В. Міцність та деформативність перфорованих елементів сталевих арки [Текст] : монографія / В. В. Романюк, В. В. Супрунюк. – Рівне : НУВГП, 2013. – 106 с.
3. Романюк, В. В. Несуча здатність перфорованих прогонів Z-подібного профілю за косоного згину [Текст]: монографія / В. В. Романюк, В. Б. Василенко, В. В. Супрунюк. – Рівне : НУВГП, 2017. – 206 с.

Романюк Володимир Володимирович, кандидат технічних наук, професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування. Тел.: (096) 804-31-77. E-mail: v.v.romaniuk@nuwm.edu.ua.

Супрунюк Володимир Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, основ і фундаментів Національного університету водного господарства та природокористування. Тел.: (097) 732-99-01. E-mail: v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua.

Романюк Владимир Владимирович, кандидат технических наук, профессор кафедры промышленного, гражданского строительства и инженерных сооружений Национального университета водного хозяйства и природопользования. Тел.: (096) 804-31-77. E-mail: v.v.romaniuk@nuwm.edu.ua.

Супрунюк Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов Национального университета водного хозяйства и природопользования. Тел.: (097) 732-99-01. E-mail: v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua.

Romaniuk Volodymyr Volodymyrovych, Cand. Tech. Sciences, Professor of the Department of Industrial, Civil Engineering at the National University of Water Management. Tel.: (096) 804-31-77. E-mail: v.v.romaniuk@nuwm.edu.ua.

Supruniuk Volodymyr Volodymyrovych, Cand. Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Roads, Fundamentals and Foundations of the National University of Water Management. Tel.: (097) 732-99-01. E-mail: v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 15.02.2018 р.