

УДК 624.014:624.024

## ДЕФОРМАЦІЙНИЙ СТАН ПЕРФОРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА КОСОГО ЗГИНУ

### THE DEFORMATION STATE OF THE PERFORATED ELEMENTS IS AT SLANTING BEND

Романюк В.В., к.т.н. доцент; Супрунюк В.В., к.т.н. доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Romaniuk V.V., candidate of engineering sciences, associate professor; Supruniuk V.V., candidate of engineering sciences, associate professor (National University Of Water And Environmental Engineering, Rivne)

Розглянуто деформаційний стан перфорованих елементів Z-подібного профілю, які використовуються як прогони покриття в покрівлях з ухилом до  $25^\circ$ . Наведено формули для визначення повного прогину та відстані між точками кріплення в'язей, що перешкоджають переміщенню у горизонтальній площині.

The deformation state of the perforated elements of Z- of similar profile is considered, that is used as tuning-ups of coverage in roofs with a slope to  $25^\circ$ . Formulas over are brought for determination of the complete bending and distance between the points of fastening of links, that prevent to transferring to the horizontal plane. The charts of deformation of tuning-ups are presented for the angles of slope of construction, got as a result of calculation in a programmatic complex "Lira". It is found out, that in case of slanting bend direction of the complete bending in every transversal cut of the perforated profile is not perpendicular to the neutral line.

**Ключові слова:** косий згин, навантаження, деформування.

Keywords: slanting bend, loading, deformation.

Оскільки косий згин представляє собою поєднання двох прямих згинів, то переміщення у цьому випадку можуть бути визначені тими самими методами, що і для прямого згину. Для цього усі навантаження розкладаються на складові, які діють у головних площинах  $UX$  і  $ZX$ , а потім окремо визначаються переміщення у площині  $UX$  від складових, що діють у цій площині, і окремо – у площині  $ZX$ .

Якщо за косого згину зовнішні сили, що діють на переріз, розміщені в одній площині, то його вісь деформування (пружна лінія) представляє собою

плоску криву, яка не розміщена в площині дії сил. Це можна побачити на прикладі перфорованого Z-подібного прогону, до якого прикладене зовнішнє навантаження  $F$  (рис. 1), що обчислюється за нормами проектування [1].

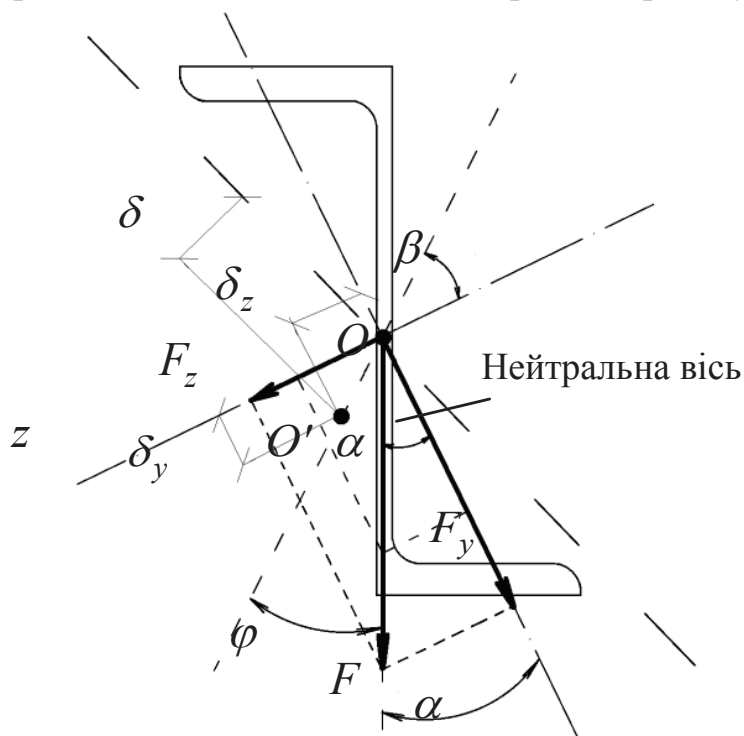


Рис. 1. Лінія деформування Z-подібного профілю

Складові цієї сили, що діють в площинах  $yx$  і  $zx$  :

$$F_y = F \cos \alpha ; F_z = F \sin \alpha , \quad (1)$$

де  $\alpha$  – кут між віссю  $y$  і площиною дії повного моменту.

Переміщення  $\delta_y$  і  $\delta_z$  будь-якої точки осі прогону в напрямку осей  $y$  і  $z$ , що обумовлені дією сил  $F_y$  і  $F_z$  :

$$\delta_y = (F_y / EI_z) f(x) ; \delta_z = (F_z / EI_y) f(x), \quad (2)$$

де  $f(x)$  – деяка функція абсциси  $x$  точки, що розглядається.

Після деформації центр ваги  $O$  будь-якого поперечного перерізу по довжині елемента зміститься на величину  $\delta_y$  в напрямку осі  $y$  і на величину  $\delta_z$  в напрямку осі  $z$ , тобто він зміститься в точку  $O'$  (див. рис. 1). Кут  $\varphi$  нахилу прямої  $O-O'$  до площини прикладання зовнішнього навантаження  $F$  можна знайти з виразу

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\delta_z}{\delta_y} = \frac{(F_z / EI_y) f(x)}{(F_y / EI_z) f(x)} = \frac{I_z F_z}{I_y F_y} = \frac{I_z F \sin \alpha}{I_y F \cos \alpha} = \frac{I_z}{I_y} \operatorname{tg} \alpha . \quad (3)$$

На підставі формули (3)

$$(I_z / I_y) \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

Тому

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \beta \quad \text{і} \quad \varphi = \beta, \quad (5)$$

де  $\beta$  – кут нахилу нейтральної осі до головної осі  $z$ .

Таким чином, переміщення точок осі конструкції перфорованого прогону Z-подібного профілю відбувається в площині, яка перпендикулярна до нейтральної осі і яка не збігається з площиною дії навантаження.

У випадку косоного згину, коли зовнішні сили не розміщені в одній площині, напрямком повного прогину [2] в кожному поперечному перерізі перфорованого профілю не є перпендикулярним до нейтральної лінії.

Якщо переміщення  $\delta_y$  і  $\delta_z$  точки осі елемента в площинах  $yx$  і  $zx$  відомі, то повне переміщення  $\delta$  в цій точці, а також кут  $\varphi$  між напрямком  $\delta$  і віссю  $y$  визначають за методикою, наведеною у монографії [3] та рекомендаціях [4]

$$\delta = \sqrt{\delta_y^2 + \delta_z^2} \quad \text{і} \quad \operatorname{tg} \varphi = \left| \frac{\delta_z}{\delta_y} \right|. \quad (6)$$

Внаслідок малої жорсткості перерізу в напрямку силової складової  $F_z$  прогони необхідно розкріплювати тяжами, які зменшують розрахункові прольоти прогонів у площині схилу.

Втрата загальної стійкості перфорованих елементів виявляється у порушенні плоскої форми згину зі зміщенням перерізу конструкції у напрямку ухилу покрівлі за одночасного повороту її вертикальної осі. Наявність горизонтальних в'язей перешкоджає таким переміщенням і виникненню крутих деформацій, тобто забезпечує загальну стійкість конструкції. Причому, конструкція перфорованого прогону, яка закріплена зі своєї площини, буде працювати як за чистого косоного згину, тобто в ній не виникатимуть деформації вздовж поперечної осі інерції.

Загальна стійкість згинальних елементів, матеріал яких працює в області пружних деформацій, завжди забезпечена і не потребує перевірки, якщо стиснутий пояс закріплений від горизонтальних переміщень в окремих точках, при цьому відношення розрахункової довжини пояса  $l_{ef}$  до ширини стиснутого пояса  $b_f$  не перевищує значень отриманих за формулою (7), наведеною у нормах проектування [5]

$$\frac{l_{ef}}{b_f} = \left[ 0,35 + 0,0032 \frac{b_f}{t_f} + \left( 0,76 - 0,02 \frac{b_f}{t_f} \right) \frac{b_f}{h_0} \right] \sqrt{\frac{E}{R_y}}. \quad (7)$$

За формулою (7) можна обчислити максимально допустиму відстань між точками розміщення поперечних в'язей, яка для перфорованого Z-подібного прогону, виготовленого з прокатного швелера 22У/ДСТУ 3436–96, становить  $l_{ef} = 1,3$  м. У проведених розрахунках ця відстань була прийнята 1,2 м, що дорівнює стандартній ширині панелі типу „Сендвич”, закріпленої лише на краях.

Для дослідження деформованого стану конструкції прогону за різних кроків кріплення в'язей (рис. 2...3) у ПК „Ліра” було проведено відповідні розрахунки, а для забезпечення найкращої достовірності результатів виконано порівняльний аналіз величин деформацій у характерних перерізах перфорованого елемента, які було зведено в табл. 1, а також представлено на рис. 4 і 5. На рис. 3 наведено схеми деформування перфорованого прогону для кутів нахилу конструкції  $0^\circ$  і  $20^\circ$ .

Для визначення теоретичних прогинів, які виникають у перфорованому Z-подібному профілі за дії зовнішніх навантажень, зручно використовувати формулу методу початкових параметрів (МПП), який є універсальним і найбільш розповсюдженим для обчислення прогинів і деформацій будівельних конструкцій

$$\begin{cases} EI \theta_{xi} = EI \theta_0 + \sum M_{xi} (x_i - a) + \sum F_{xi} \frac{(x_i - b)^2}{2} + \sum q_{xi} \frac{(x_i - c)^3}{6}; \\ EI v_{xi} = EI v_0 + EI \theta_0 x_i + \sum M_{xi} \frac{(x_i - a)^2}{2} + \sum F_{xi} \frac{(x_i - b)^3}{6} + \sum q_{xi} \frac{(x_i - c)^4}{24}, \end{cases} \quad (8)$$

де  $\theta_{xi}$ ;  $v_{xi}$  – кут повороту та прогин в перерізі, що розглядаються;  $\theta_0$ ;  $v_0$  – кут повороту та прогин елемента на початку системи (початкові параметри);  $M_{xi}$ ;  $F_{xi}$ ;  $q_{xi}$  – відповідно зосереджені моменти, зосереджені сили та величина рівномірно розподіленого навантаження, які діють на конструкцію;

$x_i$  – відстань від початку системи до перерізу, в якому обчислюється деформація;  $a$ ;  $b$ ;  $c$  – відстань від початку системи до точок прикладання відповідно зосереджених моментів, зосереджених сил та до початку ділянок прикладання розподіленого навантаження;  $I$  – момент інерції перерізу (для перфорованих елементів це момент інерції у послабленому отворі перерізу,

що домножується на коефіцієнт 0,95, який враховує деяке збільшення прогину за рахунок податливості перемичок);  $E$  – модуль пружності сталі.

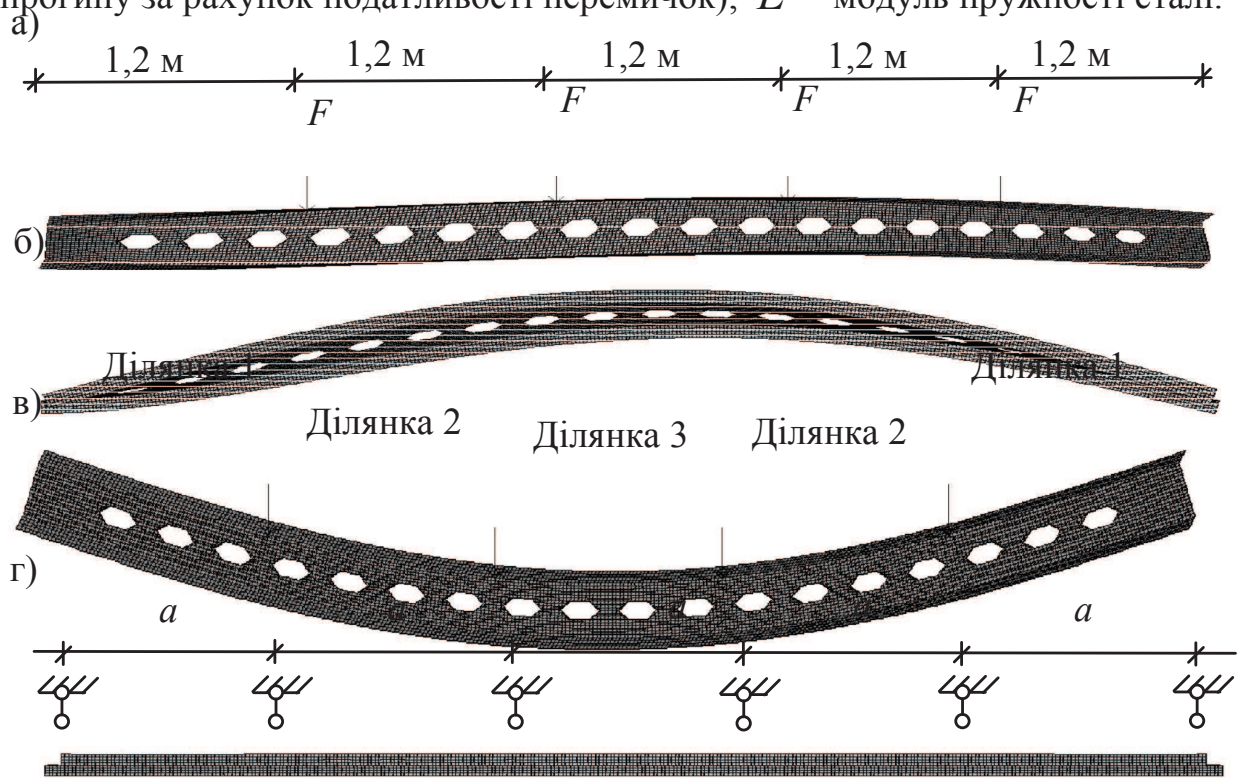


Рис. 2. Вплив поперечних в'язей на деформаційну схему перфорованого прогону  
а, б – схема деформування конструкції відповідно спереду і зверху без поперечного закріплення; в, г – теж саме, з в'язями

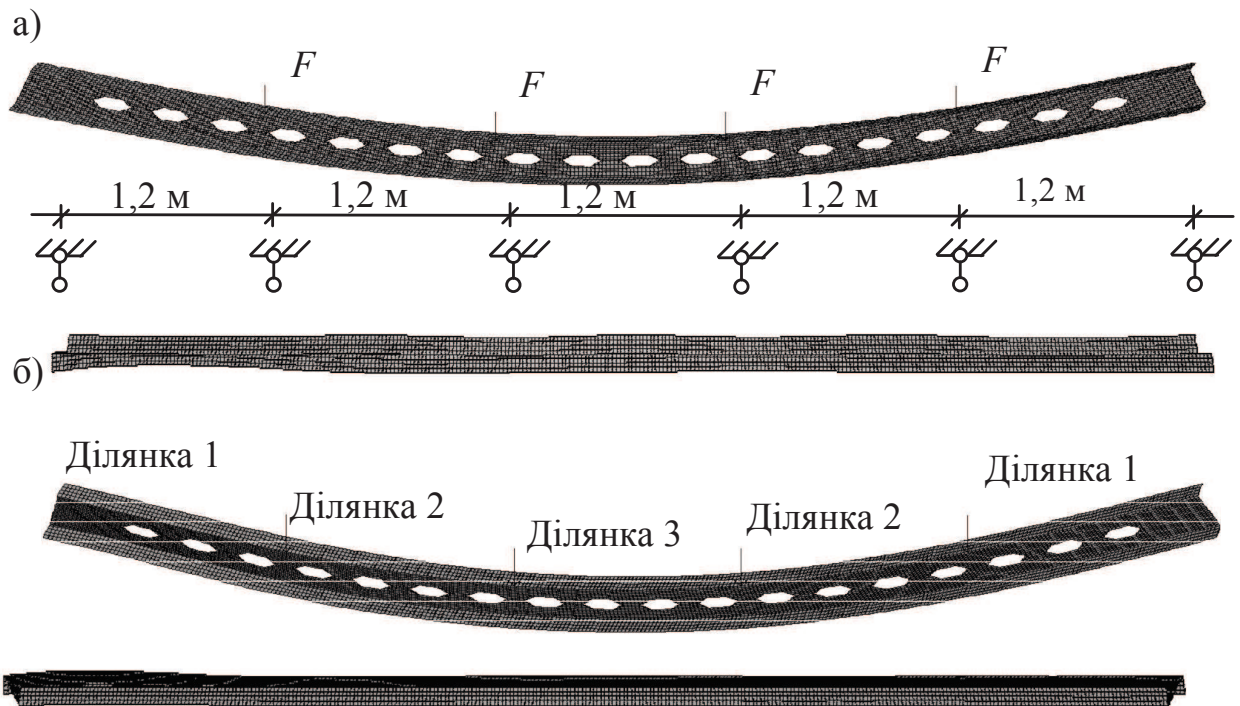


Рис. 3. Схема деформування перфорованого прогону із площини конструкції,  
якщо крок кріплення в'язей 1,2 м  
а – кут нахилу  $0^\circ$ ; б – кут нахилу  $20^\circ$



Суть методу полягає у визначенні прогинів у будь-якому перерізі конструкції послідовно, враховуючи всі силові фактори, які мають вплив на цей переріз та параметри його жорсткості, встановивши при цьому деякі початкові загальновідомі передумови (наприклад, що опорні вузли можуть повертатися, але не можуть переміщатися у вертикальній і горизонтальній площинах, тощо).

В табл. 2 наведено значення напружень на характерних ділянках прогону без закріплення у площині схилу, тобто без поперечних в'язей, і для різних кутів нахилу конструкції.

Таблиця 1

Прогини перфорованого прогону без закріплення у площині схилу

Кут нахилу	Навантаження, кН	Прогин, мм		
		МПП	Ліра	Експеримент
0	8,8	16,0	16	16,2
5	5,6	11,7	11,1	10,9
10	3,3	7,4	6,8	5,2
15	2,3	5,2	4,8	4,5
20	1,8	4,1	4,2	4,1
25	1,5	3,3	3,1	2,8

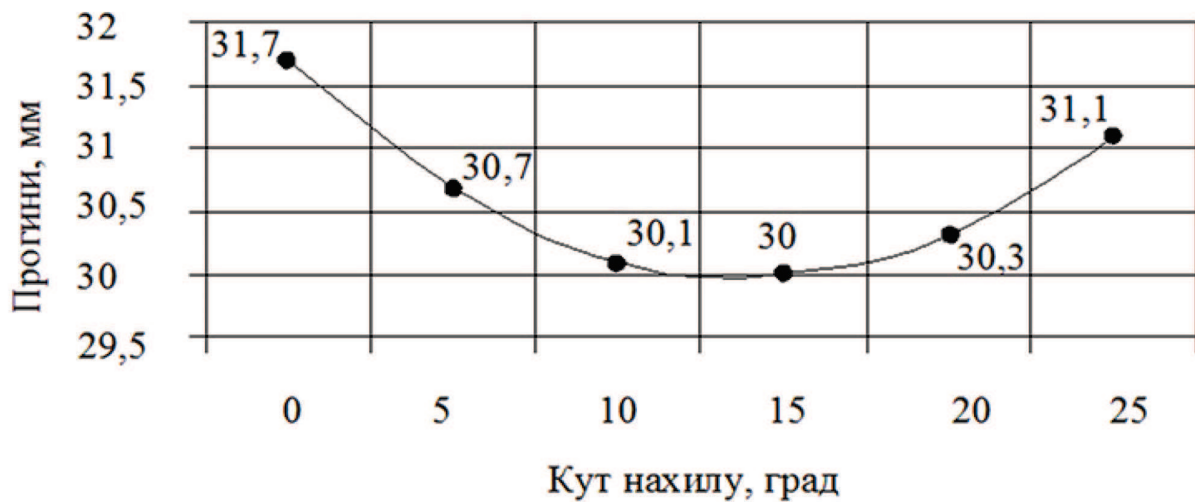


Рис. 4. Прогини перфорованого прогону залежно від кута нахилу конструкції за дії постійного зовнішнього навантаження  $F_e = 16,8$  кН

Таблиця 2

Нормальні напруження в перерізі перфорованого Z-подібного профілю  
залежно від кроку в'язей

Кут нахилу	Навантаження, кН	Точка	Нормальні напруження (МПа), якщо крок закріплення конструкції, м														
			0,6			1,2			1,5			2,0			3,0		
			Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка			Ділянка		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	8,8	1,4	54	100	110	54	100	110	56	103	105	61	96	112	67	102	84
		2,3	62	61	43	63	60	45	64	62	42	66	60	46	72	61	35
		5,6	56	101	111	55	101	111	57	103	103	61	93	113	67	105	79
5	5,6	1,4	37	69	76	37	69	76	38	70	74	40	68	77	41	70	68
		2,3	44	42	30	44	42	27	44	42	31	44	44	31	45	42	32
		5,6	38	70	77	39	70	77	39	71	75	40	68	77	42	71	67
10	3,3	1,4	22	42	46	23	42	46	23	42	47	23	42	46	22	42	48
		2,3	27	26	18	26	26	18	26	25	20	25	27	17	24	25	25
		5,6	23	43	47	23	43	47	23	42	48	23	43	46	22	42	50
15	2,3	1,4	15	29	32	16	29	32	15	28	33	15	30	32	13	29	38
		2,3	20	18	13	18	18	13	18	17	20	16	20	12	14	17	21
		5,6	16	30	33	16	30	33	16	29	35	16	32	32	13	29	41
20	1,8	1,4	12	22	25	12	22	25	11	21	26	10	24	24	8	22	33
		2,3	14	14	10	14	14	10	13	13	11	11	16	9	9	13	18
		5,6	12	23	25	12	23	25	12	22	28	11	25	24	8	22	37
25	1,5	1,4	9	18	20	9	18	20	9	17	22	7	19	19	5	17	30
		2,3	12	11	8	11	11	8	11	10	9	8	13	7	6	10	17
		5,6	9	18	20	10	18	20	9	18	24	8	21	19	5	17	34

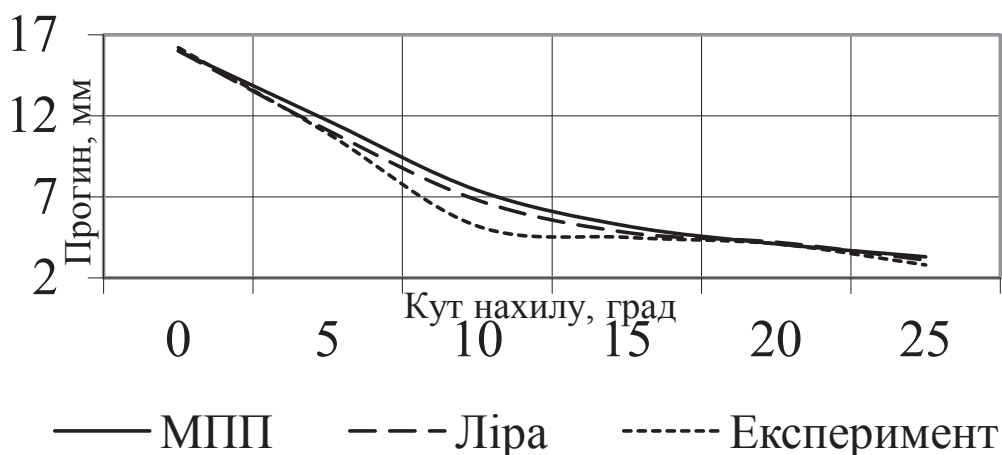


Рис. 5. Прогини перфорованого прогону, отримані за різними методами розрахунків

**Висновки.** Оскільки головні осі інерції Z-подібного профілю повернуті на деякий кут відносно вертикалі, то такий профіль доцільно використовувати у покриттях зі значним ухилом. Наприклад, для перфорованого прогону, виготовленого з прокатного швелера 22У/ДСТУ 3436-96, до якого прикладене зовнішнє навантаження  $F_e = 16,8$  кН, визначене за граничними станами II-ої групи, однакове для кутів нахилу  $0^\circ \dots 25^\circ$ , найменший прогин у конструкції виникатиме для кута  $15^\circ$ , оскільки силова площина майже проходить через головну вісь інерції  $y$  і переріз матиме найбільший момент інерції (див. рис. 4).

1. Навантаження і впливи : ДБН В.1.2 – 2:2006. – Офіц вид. – К. : Сталь, 2006. – 59 с. (Нормативний документ Мінбуду України. Норми проектування).

2. Прогини і переміщення. Вимоги проектування : ДСТУ Б В.1.2 – 3:2006. – К. : Сталь, 2006. – 10 с. (Нормативний документ Мінбудархітектури України. Національний стандарт України).

3. 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.

4. Романюк В.В., Василенко В.Б. Розрахунок перфорованих Z-подібних профілів в умовах косоного згину: Рекомендації. – Рівне: НУВГП, 2015. – 44 с.

5. Сталеві конструкції : ДБН В.2.6 – 198: 2014. – Офіц вид. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2014. – 199 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).