

УДК 693.8

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ПЕРФОРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ КОСОГО ЗГИНУ

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА КОСОЙ ИЗГИБ

STRESS STATE OF PERFORATED ELEMENTS WORKING UNDER SLANTING BEND CONDITIONS

Романюк В. В., к.т.н., доц. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Василенко В. Б., аспірант** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Романюк В. В., к.т.н., доц. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно), **Василенко В. Б., аспирант** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

Romanyuk V. V., candidate of technical sciences, associate professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne), **Vasylenko V. B., postgraduate** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

Наведено методику визначення нормальних напружень в перерізах перфорованих прогонів Z-подібного профілю, які працюють в умовах косоного згину.

Приведено методику определения нормальных напряжений в сечениях перфорированных прогонов Z-образного профиля, работающих в условиях косоного изгиба.

Normal stresses definition methodic of perforated elements working under slanting bend conditions have been shown.

Ключові слова:

Покриття, прогон, згин, напруження
Покрытие, прогон, изгиб, напряжение
Cover, summer, bend, stresses

До складного напруженого стану, одним з яких є косий згин, належать такі види деформацій, за яких у його поперечних перерізах виникатимуть не менше двох внутрішніх силових факторів. Виключенням є прямий попере-

чний згин, який не прийнято розглядати як випадок складного опору, хоча при цьому в перерізах і виникають два внутрішні силові фактори – згинаючий момент і поперечна сила. Цей вид деформацій розглядають як простий, тому що у переважаючій більшості випадків розрахунок на міцність і жорсткість виконують без урахування впливу поперечних сил, тобто тільки за одним силовим фактором – згинаючим моментом.

Косий згин відносять до першої групи складного опору, оскільки в небезпечних точках поперечного перерізу напружений стан є або одноосьовим, або може наближено розглядатися як такий у зв'язку з незначним впливом на міцність перерізу дотичних напружень, які в ньому виникають. Тому в таких випадках при розрахунках на міцність теорії міцності не використовуються.

Косим називають такий вид згину, за якого площина дії згинаючого моменту в поперечному перерізі елемента не проходить через жодну з головних центральних осей інерції цього перерізу. Випадок косоного згину, за якого в поперечному перерізі виникає лише згинаючий момент, називається чистим косим згином. Якщо ж в перерізі діє, крім того, поперечна сила, то має місце поперечний косий згин. В умовах косоного згину працюють прогони покриття у складі покрівлі з ухилом.

За існуючими нормами проектування металевих конструкцій можна розраховувати згинальні елементи суцільного перерізу за дії сил, які не збігаються з головними осями інерції, тобто в умовах косоного згину [1], або перфорованих елементів лише за прямого згину [2]. Ці фактори унеможливають використання перфорованих елементів як прогонів покриття, оскільки чинними нормативними документами не передбачено порядок розрахунку таких елементів в умовах косоного згину.

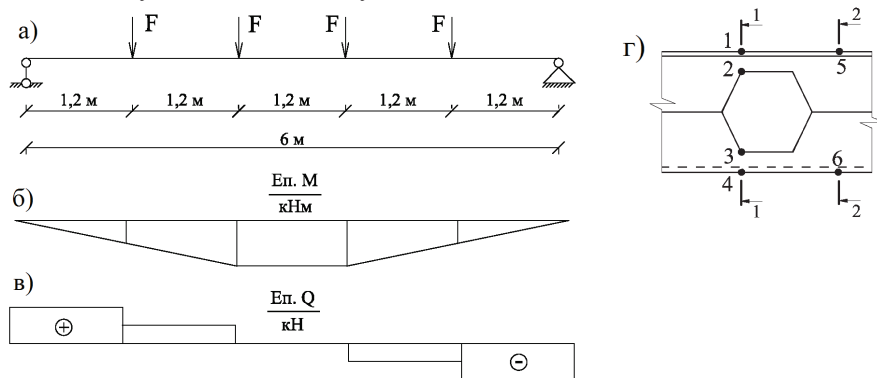


Рис. 1. Схема прогону

а – схема прикладання навантажень; б – епюра згинальних моментів;

в – епюра поперечних сил; г – розрахункові перерізи

Для розрахунку перфорованих прогонів в умовах косоного згину пропонується поєднати існуючі методики розрахунку перфорованих і суцільних зги-

нальних елементів. Оскільки до конструкції прикладене зовнішнє навантаження у вигляді зосереджених сил, то це дає змогу отримати по довжині елемента як зону чистого, так і зону поперечного згинів. Поперечна сила зменшується від краю до середини прольоту, а згинаючий момент навпаки збільшується, тому для визначення нормальних напружень в перерізі прогону його було поділено на 3 характерні ділянки, в кожній з яких нормальні напруження визначались у 2-х перерізах: в перерізі з отвором в точках 1...4 і в перерізі без отвору в точках 5 і 6 (рис. 1).

Для визначення напружень у розрахункових перерізах перфорованого біс-тального елемента з несиметричними по висоті поясами на 1-й і 3-й ділянках для балок 1-го класу пропонується використовувати формули:

1) верхній пояс – точка 1

$$\sigma_{sup1} = \frac{M_z h_1}{J_z} + \frac{Q_{sup1}^a}{2W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (1)$$

2) верхній пояс – точка 2

$$\sigma_{sup2} = \frac{M_z d_1}{J_z} + \frac{Q_{sup2}^a}{2W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (2)$$

3) нижній пояс – точка 3

$$\sigma_{inf3} = \frac{M_z h_2}{J_z} + \frac{Q_{inf1}^a}{2W_{inf,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (3)$$

4) нижній пояс – точка 4

$$\sigma_{inf4} = \frac{M_z d_2}{J_z} + \frac{Q_{inf2}^a}{2W_{inf,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c, \quad (4)$$

де $M_z = M \cos \alpha$; $M_y = M \sin \alpha$ – згинаючі моменти відповідно в площині та із площини дії зовнішнього навантаження; h_1 ; d_1 ; h_2 ; d_2 – відстані від головних осей інерції до точки, що розглядається; J_z – момент інерції у відповідному перерізі; $W_{sup,max}$; $W_{sup,min}$; $W_{inf,max}$; $W_{inf,min}$ – максимальні і мінімальні моменти опорів таврів верхнього і нижнього поясів; Q_{sup1} ; Q_{sup2} ; Q_{inf1} ; Q_{inf2} – відповідні поперечні зусилля, які сприйма-

ються тавровими поясами і визначаються пропорційно їх жорсткостям, тобто приймаються коефіцієнти розподілення:

$$1) \text{ для верхнього поясу} \quad \alpha_{sup} = \frac{J_{sup}}{J_{sup} + J_{inf}}; \quad (5)$$

$$2) \text{ для нижнього поясу} \quad \alpha_{inf} = 1 - \alpha_{sup}, \quad (6)$$

де J_{sup} ; J_{inf} – моменти інерції таврових перерізів верхнього і нижнього поясів.

Тоді поперечні сили в поясах

$$\begin{cases} Q_{sup1} = \alpha_{sup} Q_1; Q_{sup2} = \alpha_{sup} Q_2; \\ Q_{inf1} = \alpha_{inf} Q_1; Q_{inf2} = \alpha_{inf} Q_2, \end{cases} \quad (7)$$

де Q_1 ; Q_2 – поперечні зусилля в перерізі; R_y – розрахунковий опір сталі за межею текучості; γ_c – коефіцієнт умов роботи елемента.

Для визначення напружень на ділянці 2 пропонується використовувати формулу

$$0,87 \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{zy}^2} \leq R_y \gamma_c, \quad (8)$$

де $\sigma_z = \frac{M_z h_1}{J_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2W_{sup,max}}$ – нормальні напруження в серединній площині стінки, спрямовані паралельно до поздовжньої осі балки;

$\sigma_y = \frac{M_y}{W_y}$ – теж саме, спрямовані перпендикулярно до поздовжньої осі балки;

$\tau_{zy} = \frac{Q_y S}{J_z t_w}$ – дотичні напруження у точці стінки балки, що розглядається.

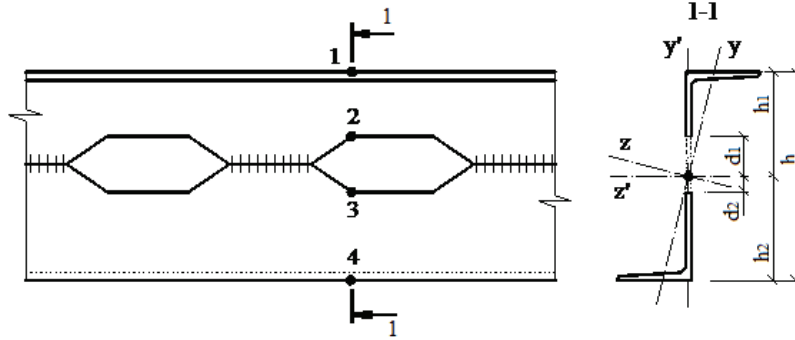


Рис. 2. Схема ділянки прогону Z-подібного профілю з перфорованою стінкою

Розрахунок на міцність розрізних моностальних елементів симетричного по висоті перерізу 2-го і 3-го класів пропонується виконувати за формулами:

1) точка 1

$$\sigma_1 = \frac{M_z h_1}{c_x \beta J_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{c_y W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (9)$$

2) точка 2

$$\sigma_2 = \frac{M_z d_1}{c_x \beta J_z} + \frac{Q_{sup2} a}{2W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{c_y W_y} \leq R_y \gamma_c; \quad (10)$$

де β – коефіцієнт, який приймається таким, що дорівнює:

$$- \beta = 1, \text{ якщо } \tau_y \leq 0,5R_s;$$

$$- \beta = 1,0 - \frac{0,2}{\alpha_f + 0,25} \left(\frac{\tau_y}{R_s} \right)^4, \text{ якщо } 0,5R_s < \tau_y \leq 0,9R_s,$$

де $\alpha_f = A_f / A_w$ – відношення площ поперечних перерізів поясу і стінки;

c_x і c_y – коефіцієнти, значення яких приймаються для балок 3-го класу згідно з табл. Н1 додатку Н [2], а для балок 2-го класу в інтервалі між 1,0 і значеннями c_x і c_y , обчисленими за табл. Н1 [2] зазначеного додатку; R_s – розрахунковий опір зсуву.

Використовуючи формули існуючих методик розрахунку перфорованих елементів [1, 2] і запропонованої методики (1 – 10), було отримано теоретичні значення нормальних напружень у характерних перерізах перфорованого

прогону на 3-ох ділянках для кутів нахилу конструкції $0^\circ \dots 25^\circ$, які порівнювалися з теоретичними результатами, визначеними у ПК «Ліра» і з даними отриманими експериментально (табл. 1).

Таблиця 1

Нормальні напруження в перерізах перфорованого Z-подібного профілю

Кут	Ділянка	Точка	Методика розрахунку					
			ДБН без урахування поперечного закріплення	ДБН з урахуванням поперечного закріплення	ДБН+СНиП без урахування поперечного закріплення	ДБН+СНиП з урахуванням поперечного закріплення	Ліра	Експеримент
0	1	1	64	64	76	76	54	37
		2	21	21	59	59	63	48
		3	70	70	70	70	55	55
	2	1	100	100	106	106	100	96
		2	29	29	48	48	60	62
		3	103	103	103	103	101	120
	3	1	128	128	128	128	110	113
		2	43	43	43	43	45	68
		3	127	127	127	127	111	143
5	1	1	70	46	79	55	37	42
		2	39	15	66	42	44	52
		3	74	50	74	50	39	37
	2	1	64	74	67	78	69	78
		2	36	27	39	38	42	66
		3	66	76	66	76	70	82
	3	1	141	92	141	92	76	73
		2	80	31	80	31	27	31
		3	140	91	140	91	77	94
10	1	1	58	28	63	33	23	15
		2	39	9	56	26	26	21
		3	61	31	61	31	23	23
	2	1	47	46	48	48	42	44
		2	43	17	42	24	26	24

Продовження табл. 1

	3	3	48	47	48	47	43	43
		1	116	56	116	56	46	50
		2	79	19	79	19	18	19
		3	116	56	116	56	47	52
15	1	1	52	20	56	24	16	12
		2	39	7	51	19	18	15
		3	54	22	54	22	16	13
	2	1	44	32	45	33	29	24
		2	46	11	45	16	18	14
		3	44	33	44	33	30	26
	3	1	103	39	103	39	32	25
		2	77	13	77	13	13	13
		3	103	39	103	39	33	29
20	1	1	48	15	51	18	12	8
		2	38	5	47	14	14	13
		3	49	16	49	16	12	10
	2	1	46	24	45	26	22	19
		2	49	9	48	12	14	10
		3	45	25	45	25	23	22
	3	1	96	30	96	30	25	23
		2	76	10	76	10	10	12
		3	95	29	95	29	25	24
25	1	1	45	12	47	14	9	4
		2	37	4	44	11	11	11
		3	46	13	46	13	10	7
	2	1	46	19	46	20	18	14
		2	50	8	48	11	11	11
		3	46	20	46	20	18	14
	3	1	89	23	89	23	20	13
		2	74	8	74	8	8	12
		3	89	23	89	23	20	15

На рис. 3 зображені графіки несучої здатності перфорованих прогонів, яка визначалася за граничними станами 1-ої і 2-ої груп. Усі відповідні графіки є подібними, що свідчить про однакові залежності у зміні зовнішнього навантаження від коефіцієнта розвитку k вихідного профілю. Для профілів з невеликою висотою перерізу визначальним є розрахунок за граничними станами

2-ої групи, оскільки конструкція набуде максимального прогину раніше, ніж напруження в матеріалі досягнуть значення розрахункового опору за межею текучості.

Для великих вихідних профілів розрахунок конструкції необхідно проводити за граничними станами 1-ої групи, оскільки через велику жорсткість перерізу міцність конструкції вичерпується раніше, ніж вона досягне своїх граничних прогинів.

Наприклад для вихідного швелера №22 при коефіцієнті розвитку k перерізу по висоті, який рівний $1 \dots 1,35$ визначальними для розрахунку є граничні стани 2-ої групи, а при $k = 1,4 \dots 1,5$ вже за 1-ої групою (рис. 3,б).

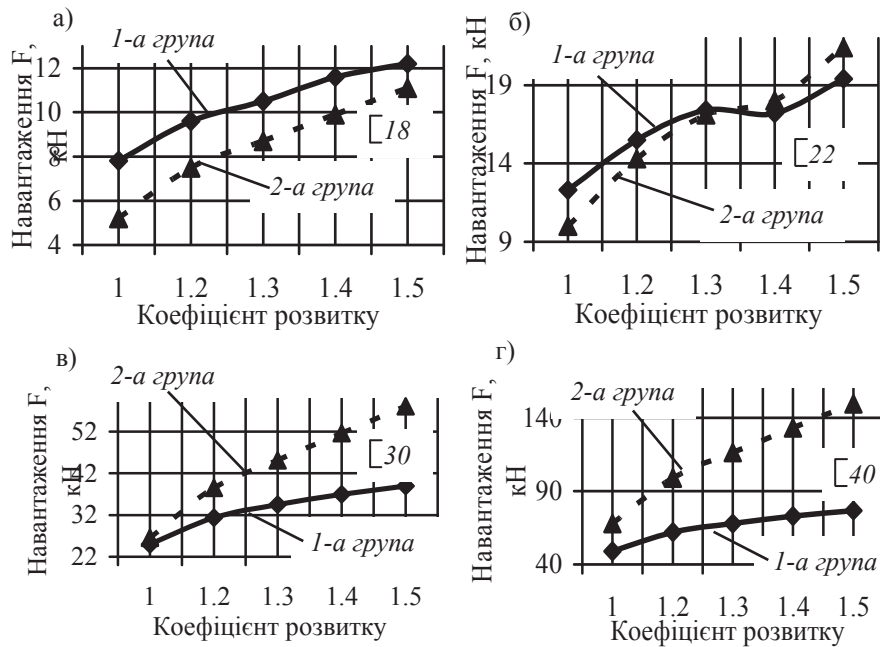


Рис. 3. Залежність несучої здатності перфорованого прогону від коефіцієнта розвитку висоти вихідного швелера

На рис. 4 зображені залежності несучих здатностей перфорованих прогонів від коефіцієнта розвитку k вихідного профілю. Ці криві мають чітко виражену параболічну залежність, що свідчить про непропорційне зростання несучої здатності конструкції. Як вже зазначалося вище, для профілів з невеликою висотою перерізу для незначних коефіцієнтів розвитку визначальним буде розрахунок за граничними станами 2-ої групи. При подальшому збільшенні цього коефіцієнта потрібно вже використовувати граничні стани 1-ої

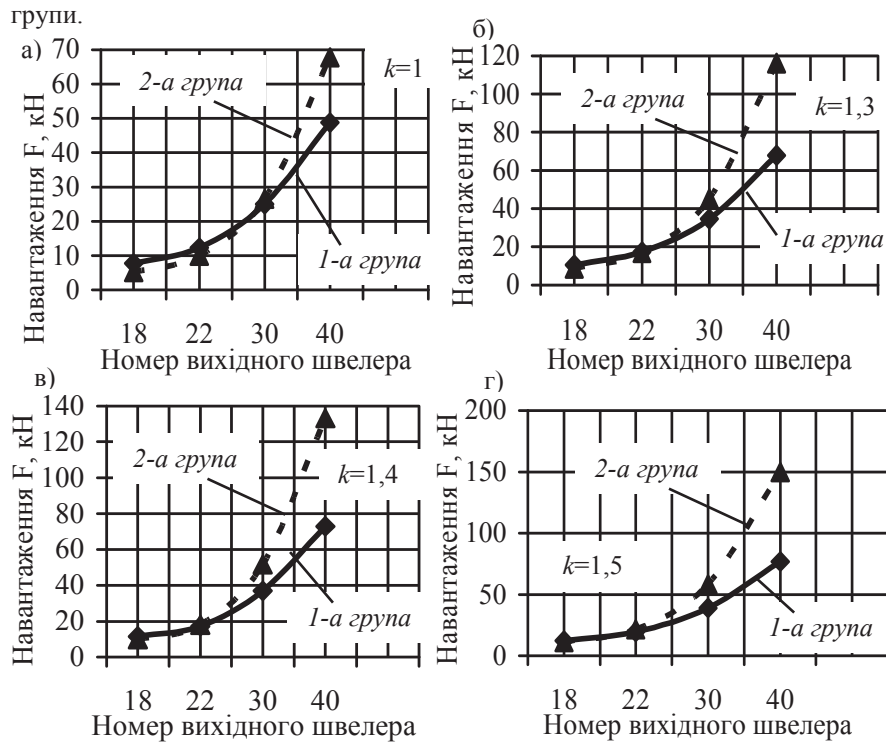


Рис. 4. Залежність несучої здатності перфорованого прогону від номера вихідного швелера

На графіках 5 відображено різницю несучих здатностей, які визначаються з урахуванням і без урахування поперечних деформацій конструкції. Відповідні графіки є подібними, що свідчить про однакову залежність зміни навантаження. Така кривина лінії (зображено пунктиром) несучої здатності, яка визначалася з урахуванням поперечної деформації перфорованої конструкції, пояснюється значними відхиленнями силової площини від головних осей інерції Z-подібного профілю і тому несуча здатність буде незначною. За кутів нахилу конструкції $15^{\circ} \dots 20^{\circ}$, коли кут між головними осями інерції і силовою площиною найменший, в конструкції виникатиме чистий згин, за якого несуча здатність і буде найбільшою. Якщо ж визначати граничне навантаження на конструкцію без урахування поперечної деформації (так як вона працює в дійсності), то крива його зміни буде майже прямою, оскільки значення зміни кута між головними осями інерції і силовою площиною майже не впливає на зміну граничного навантаження.

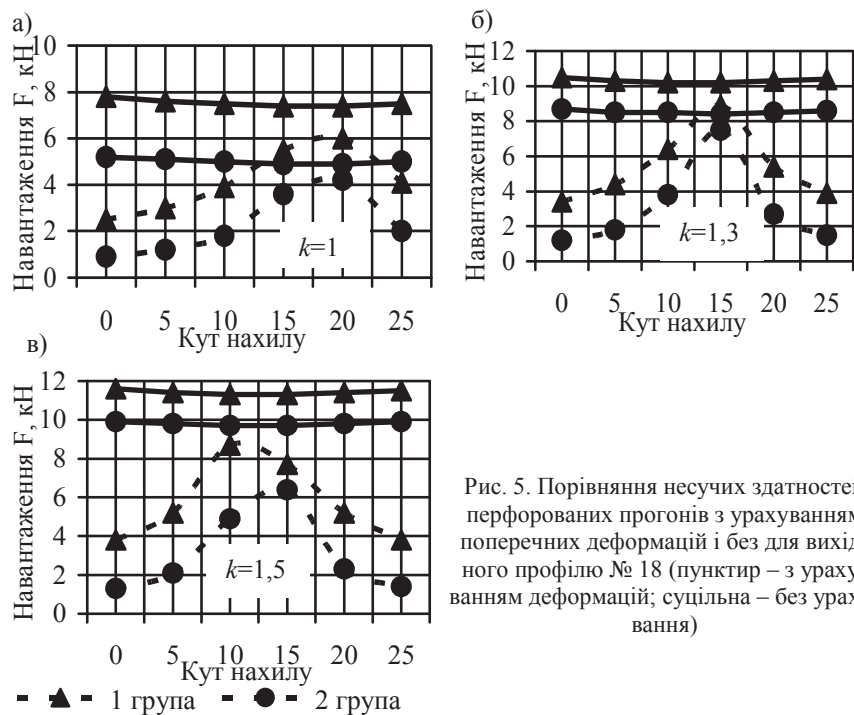


Рис. 5. Порівняння несучих здатностей перфорованих прогонів з урахуванням поперечних деформацій і без для вихідного профілю № 18 (пунктир – з урахуванням деформацій; суцільна – без урахування)

Розглянуті вище графіки наведено лише для одного вихідного профілю і для кількох коефіцієнтів k розвитку перерізу, оскільки для всіх інших профілів і коефіцієнтів розвитку залежності є однаковими.

На рис. 6 зображено графіки зміни нормальних напружень у перерізах перфорованого прогону залежно від кута нахилу конструкції. Залежності є майже лінійними, оскільки і графіки зміни навантаження також є лінійними. Дані графіки наведено лише для одного профілю і за кількох коефіцієнтів розвитку перерізу k , оскільки для інших прокатних швелерів і для різних коефіцієнтів k криві зміни нормальних напружень мають таку саму лінійну залежність.

При порівнянні нормальних напружень у характерних перерізах на трьох ділянках прогону для різних коефіцієнтів k і для різних кутів нахилу конструкції (рис. 7) має місце концентрація напружень у кутах отворів, причому для всіх профілів концентрація напружень завжди присутня на 1-й ділянці, а з подальшим збільшенням коефіцієнта k концентрація починає виникати і на ділянці 2. Значення нормальних напружень у кутах отворів для жодного з профілів при будь-якому коефіцієнті розвитку і куті нахилу конструкції не перевищують розрахунковий опір сталі за межею текучості, тобто запас міцності забезпечений.

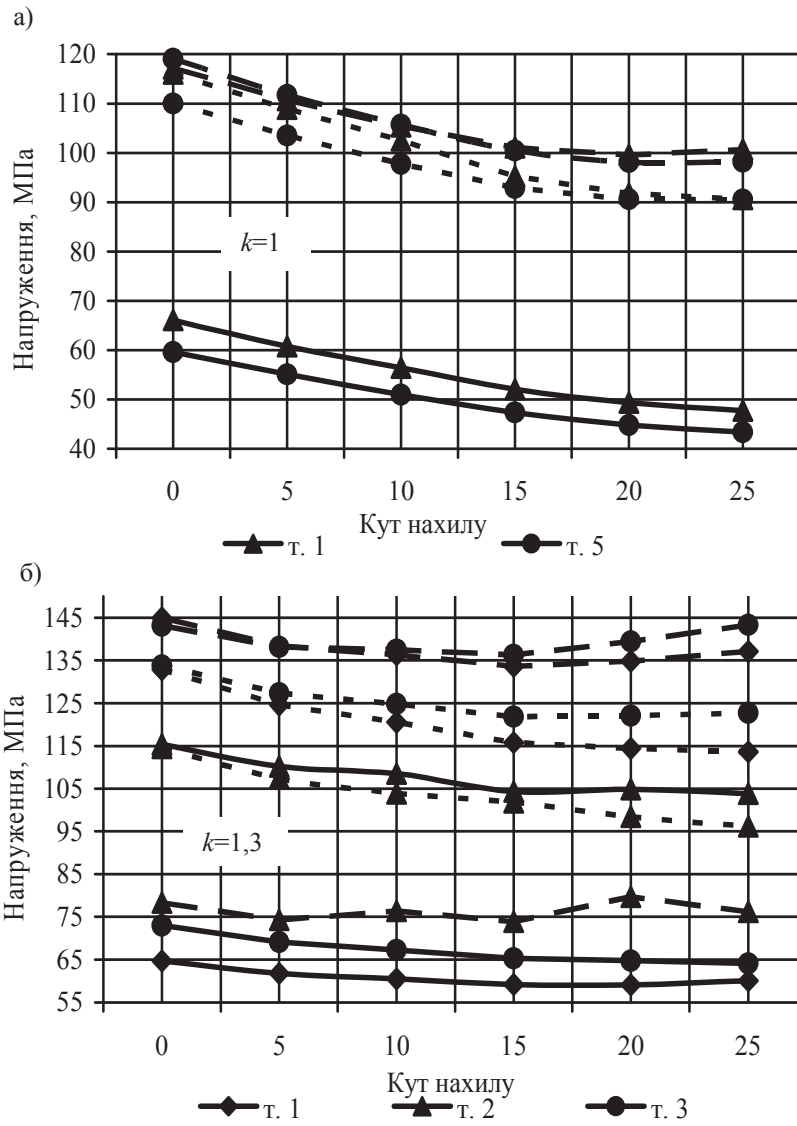


Рис. 6. Залежність нормальних напружень перфорованих прогонів від кута нахилу конструкції для вихідного профілю № 18 (суцільним – ділянка 1; крапками – ділянка 2; пунктиром – ділянка 3)

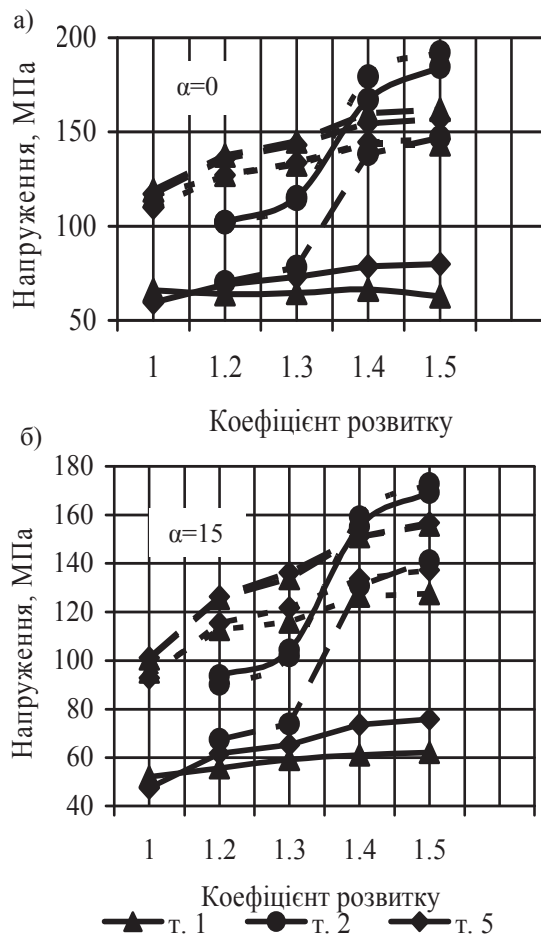


Рис. 10. Залежність нормальних напружень перфорованих прогонів від коефіцієнта k для профілю № 18

(суцільним – ділянка 1; крапками – ділянка 2; пунктиром – ділянка 3)

1. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстроя СССР. – М.: ЦИТП / Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
2. ДБН В.2.6-...:2010. Сталеві конструкції. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 220 с.
3. Клименко Ф.С. та інші. Металеві конструкції: Підручник / Ф.С. Клименко, Ф.С. Барабаш, Л.І. Стороженко / за ред. Ф.С. Клименка – 2-е видання виправлене і доп. – Львів: Світ, 2002. – 312 с.
4. Проектирование металлических конструкций: Спец. курс. Учеб. пособие для вузов / В.В. Бирюлев, И.И. Кошин, И.И. Крилов, А.В. Сильвестров. – Л.: Стройиздат, 1990. – 432 с.: ил.
5. Супрунюк В.В. Стальні попередньо напружені перфоровані арки: Дис. канд. техн. наук. – Рівне, 2007. – 185 с.
6. Романюк В.В., Супрунюк В.В. Міцність та деформативність перфорованих елементів сталевих арок: Монографія. – Рівне: НУВГП, 2013. – 106 с.