

УДК 624.014

До розрахунку на місцеву стійкість стиснутих поясів двотаврових елементів з поперечно-гофрованими стінками

¹Нілова Т.О., ¹Лавріненко Л.І., к.т.н., ²Лазнюк М.В., к.т.н.

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

²ТОВ „ПЕМ Україна”, Zeman Group, Україна

Анотація. Пропонується методика розрахунку на місцеву стійкість стиснутих поясів сталевих двотаврів із тонкими поперечно-гофрованими стінками за умови пружної роботи сталі. Сформульовані умови забезпечення пружної роботи матеріалу стінки при складному напруженому стані з урахуванням параметрів гофрування.

Аннотация. Предлагается методика расчета сжатых поясов стальных двутавров с тонкими поперечно-гофрированными стенками на местную устойчивость при условии упругой работы стали. Сформулированы условия обеспечения упругой работы материала стенки при сложном напряженном состоянии с учетом параметров гофрирования.

Abstract. The method of local buckling analysis of I-section steel compression flanges with thin cross-corrugated webs under steel elastic behavior is proposed. Conditions for the elastic behavior of the web material under complex stress state are formulated with regard to the parameters of corrugation.

Ключові слова: місцева стійкість поясів, гофрована стінка, пружна робота.

Успішне застосування двотаврів із тонкими поперечно-гофрованими стінками [1] дає всі підстави для їх поширення в практиці ЛМК, а також подальшого обговорення та удосконалення методів розрахунку. З появою нових ДБН «Сталеві конструкції» питання щодо проектування елементів із гофрованими стінками не знімається, хоча конструкції такого типу застосовуються все частіше.

Подальше застосування таких двотаврів, на нашу думку, потрєбує уточнення розрахункового апарату елементів з поперечним гофруванням тонкої стінки для пошуку резервів несучої здатності, а також у дослідженні таких конструктивних форм, що надади б можливість застосовувати гофровані елементи в рамних та комбінованих системах [5].

Особливої уваги вимагають такі специфічні для цього виду профілів питання, як забезпечення загальної та місцевої стійкості стінки та полиць. На сьогодні питання про забезпечення місцевої стійкості гофрованої стінки вже має досить суттєве обґрунтування, існують аналітичні методи розрахунку гофрованої стінки на загальну і місцеву стійкість, які підтверджені експериментальними дослідженнями [2]. Проте, при

використанні гофрованих профілів у колонах виробничих будівель актуальним стає підвищення загальної стійкості елемента при випинанні поза площиною згину, що може бути забезпечене збільшенням ширини стиснутої полиці [1]. Така ж проблема виникає і при розрахунку ригелів, в яких виникають змінні за знаками моменти за довжиною (рис. 1), де стиснутим є нижній, не розкріплений ані прогонами, ані настилом, пояс. Тут забезпечення стійкості балки на ділянці зміни знаку моменту також може бути здійснене за рахунок збільшення ширини поясу. Проте збільшення ширини полиці у цьому разі стримується вимогами норм проектування.

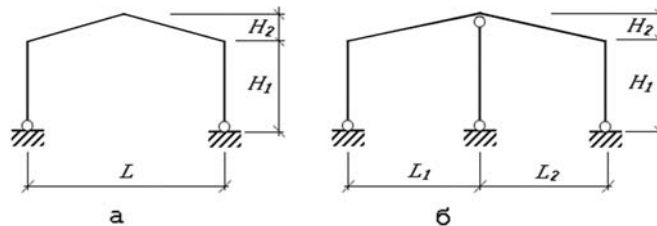


Рис. 1. Схеми рам: а – однопрогонова; б – багатопрогонова

Для розрахунку стиснутих поясів на місцеву стійкість прийнятої методики, на наш погляд, ще не розроблено (або всі вони вимагають уточнень). Складність побудови такої методики обумовлена змінною шириною звису поясу по довжині по обидві сторони від поздовжньої осі стінки, що значно ускладнює завдання форми випинання в аналітичному вигляді. У зв'язку з цим запропоновано деякі підходи до вирішення питання місцевої стійкості стиснутої полиці як довгої пластини, рівномірно стиснутої вдовж довгої сторони.

Як відомо [6], критичні напруження для розрахункової схеми полиці, що вважається шарнірно або жорстко закріпленою до стінки, в межах пружної роботи можуть бути записані як

$$\sigma_{cr} = K \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_f}{b_{ef}} \right)^2, \quad (1)$$

де $K = 0,425$ - коефіцієнт стійкості довгої пластини, рівномірно стиснутої нормальними напруженнями та шарнірно закріпленої однією стороною. Таке значення теоретично дозволяє для балок приймати співвідношення звису полиці до її товщини

$$b_{ef} / t_f = n \sqrt{E / R_y} = 0,61 \sqrt{E / R_y}. \quad (2)$$

З урахуванням початкових недосконалостей, прогинів і залишкових напружень, а також рівня діючих напружень у практичних розрахунках це співвідношення дещо в запас стійкості набуло саме того вигляду, у якому регламентується чинними нормами проектування:

$$\bar{\lambda}_{uf} = (b_{ef} / t_f) \sqrt{R_y / E} \leq 0,5 \sqrt{R_y / \sigma_c}, \quad (3)$$

де σ_c – величина стискального напруження.

Проте, на відміну від двотаврів з плоскими стінками, гофрована стінка створює певним чином ефект защемлення полиці через сприйняття моменту протилежними вершинами гофрів, розміщеними по різні сторони від поздовжньої осі. При повному защемленні безкінечно довгої пластини в [6] наводиться значення критичних напружень при $K = 1,28$, якому відповідає теоретичне співвідношення $b_{ef} / t_f = 1,07 \sqrt{E / R_y}$. Тут і далі за розрахункову ширину полиці, або її вільний звис $b_{ef} = 0,5b_f$, приймається половина ширини полиці, тобто відстань від вільної крайки полиці до осі стінки балки, решта позначень відповідно до рис. 2.

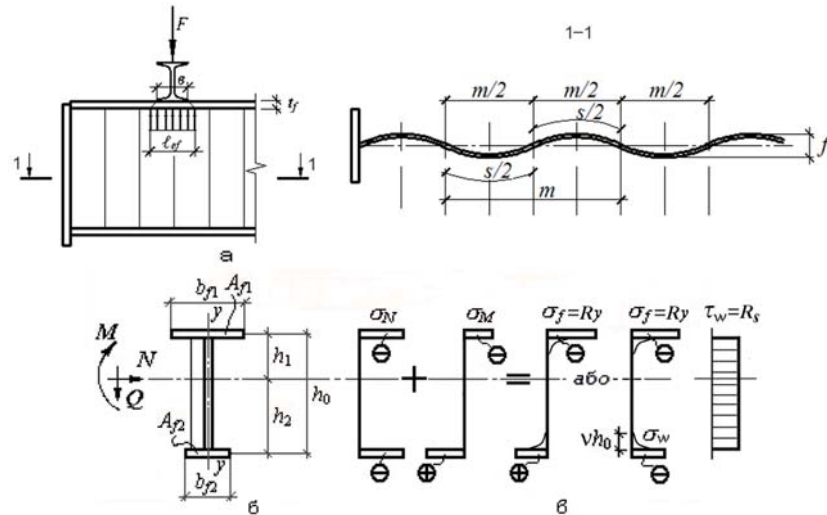


Рис. 2. До визначення напружень у перерізі елемента:
а – схема елемента; б – схема перерізу; в – нормальні і дотичні напруження

Задача стійкості пластини в такій постановці може бути вирішена залежно від ступеня защемлення полиці стінкою, який описується через коефіцієнт защемлення $\zeta = 2t_f^3 h_w / t_{eq}^3 b_{ef}$. При цьому враховується, що поперечно-гофрована стінка практично не сприймає поздовжніх зусиль.

Задача стійкості полиці балки з гофрованою стінкою може бути приведена до аналогічної задачі з плоскою еквівалентною за жорсткістю стінкою. У випадку гофрованої стінки її товщина має бути врахована як еквівалентна через те, що жорсткість гофрованої стінки відносно поздовжньої осі балки суттєво підвищує ефект защемлення полиці. За геометричними параметрами хвилі гофра обчислюємо його момент інерції на одиницю довжини стінки $I_w = I/m$, де m - довжина хвилі гофра, відповідно еквівалентна товщина стінки становитиме $t_{eq} = \sqrt[3]{12I_w}$. В таблиці наведено значення еквівалентних товщин гофрованих стінок для сортаменту фірми «Zeman» при технологічно обумовлених параметрах гофрування (амплітуда гофра $0,5f = 20$ мм, довжина хвилі гофра 155 мм).

Таблиця 1

t_w , мм	1,5	2,0	2,5	3,0
t_{eq} , мм	15,69	17,28	18,62	19,78

Далі за схемою розв'язку задачі з плоскою стінкою можемо отримати значення коефіцієнта K для аналізу ступеня защемлення полиці гофрованою стінкою за (1).

Як видно з таблиці, еквівалентна товщина стінки надає їй значної жорсткості, а проведені дослідження показали, що значення коефіцієнта K практично для всього сортаменту [7], що застосовується у теперішній час (стінки заввишки 333...750 мм при товщині 1,5...3,0 мм та 1000 мм ...1500 мм при товщині 2,5...3,0 мм; полиці завширшки 200...430 мм, завтовшки 10...30 мм), ефект защемлення набуває досить високих значень. Так перерізи із співвідношеннями $0,6 \leq t_f^3 h_w / t_{eq}^3 b_{ef} \leq 10,0$ мають значення коефіцієнта $1,29 \leq K \leq 1,05$. Відносно більш тонкі полиці (400×10; 500×10) защемляються стінкою сильніше та можуть мати значення $K \leq 2,02$, що свідчить про високий ступінь защемлення, проте цей випадок має скоріш теоретичне значення, аніж практичне.

Проведеними дослідженнями встановлено, що для елемента з гофрованою стінкою критичні напруження втрати стійкості полиці наближаються до довгої пластини, защемленої з одного боку, для якої $K = 1,28$. У різних джерелах це питання вирішується по-різному, та безсумнівним є те, що защемлення полиці підвищує її стійкість та впливає на її граничний розрахунковий звис. Через те, що довжина півхвилі пластини за втрати нею стійкості приймається у задачі такою, що приблизно дорівнює половині ширини полиці, довжина хвилі гофра (відстань між вершинами по один бік від осі балки) при розглядуваних параметрах гофрування є

порівнюванню з величиною звису. Таке рішення є справедливим для широкого діапазону перерізів із значеннями $t_f^3 h_w / t_{eq}^3 b_{ef} \leq 10$.

Уточнення результатів та з'ясування впливу параметрів гофрування виконано на основі аналітичних рішень роботи [9], де відзначено, що за примикання гофрованої стінки до поясів із збільшенням амплітуди та зменшенням довжини півхвилі гофра стійкість стиснутого поясу підвищується на 15...50 % та більше. В роботі наводиться рішення щодо місцевої стійкості полиці, отримане в припущенні, що з одного боку пояс шарнірно спирається на гофровану стінку, а вплив деформацій поясу з іншого боку при цьому не враховується. За розрахункову модель прийнято віддзеркалений відносно поздовжньої осі фрагмент полиці, шарнірно обпертий на стінку (рис. 3). При цьому, виходячи з припущення про те, що довжина півхвилі випинання збігається з довжиною хвилі гофрування, шарнірно обпертим вважається прямолінійний край, а криволінійний – вільним.

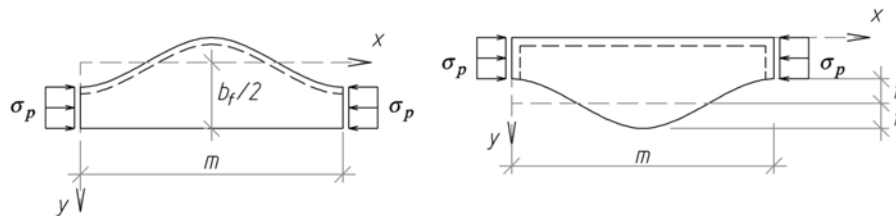


Рис. 3. Дійсна та розрахункова схеми ділянки звису поясу при визначенні критичного стискаючого зусилля (за дослідженнями А.М. Степаненка)

Враховуючи змінну ширину полиці, критичні напруження зручно визначати залежно від повної ширини полиці. В роботі [9] для критичних напружень $\sigma_{cr,f} = K_{sp} E (t_f / b_f)^2$ отримані значення коефіцієнтів K_{sp} , які дають змогу проаналізувати граничні значення умовної гнучкості полиці $\bar{\lambda}_{uf} = (b_f / t_f) \sqrt{R_y / E} \leq n_1 \sqrt{R_y / \sigma_c}$. Чисельний аналіз залежності критичних напружень від відносної амплітуди гофра $0,5f / b_f$ та відносної довжини гофра b_f / a і порівняння отриманих результатів із балкою з плоскою стінкою показали, що тривіальні значення при $0,5f / b_f = 0$ та $b_f / a = 0$ дають граничні мінімальні значення $b_f / t_f = 1,239 \sqrt{E / R_y}$, а з урахуванням дотичних напружень $b_f / t_f = 1,235 \sqrt{E / R_y}$, що повністю відповідає отриманим за (2). Як відомо, довжина півхвилі випинання для довгої стиснутої полиці приблизно дорівнює половині її ширини, тому

характерним значенням може бути $b_f/a = 4$. Найменше допустиме значення умовної гнучкості полиці складає за цієї умови $b_f/t_f = 2,269\sqrt{E/R_y}$. Всі значення умовної відносної гнучкості при $b_f/a < 4$ стосуються більш довгих гофрів та при $b_f/a \leq 2$ для пологих синусоїд із значеннями $0,5f/b_f < 0,2$ займають проміжне положення між шарнірним та жорстким примиканням. Більш короткі гофри з $b_f/a > 4$ скорочують півхвилю випинання та підвищують вплив жорсткості стінки. Врахування дотичних напружень несуттєво змінює результат.

Для реальних значень гофрування відповідно до прийнятої технології з $a = 155/2$ (мм) та $f = 40$ мм і полиць завширшки 200...450 мм відповідні значення складають $b_f/a = (2,58...5,81)$ та $0,5f/b_f = (0,10...0,04)$ (табл. 2).

Таблиця 2

Відносні параметри гофрування	Значення відносних параметрів гофрування при ширині полиці b_f , мм							
	200	220	250	300	350	400	430	450
b_f/a	2,58	2,839	3,225	3,87	4,52	5,16	5,55	5,81
$0,5f/b_f$	0,10	0,09	0,08	0,065	0,055	0,05	0,045	0,04

Граничним оцінним значенням умовної гнучкості полиці за таких відносних параметрів при $b_f/a = 2,58$ та $0,5f/b_f = 0,1$ можна вважати $b_f/t_f = 2,20\sqrt{E/R_y}$, що наближене до $b_{ef}/t_f = 1,07\sqrt{E/R_y}$ для балки з плоскою стінкою. Аналіз наведеного аналітичного рішення підтверджує думку про суттєвий вплив гофрованої стінки на місцеву стійкість стиснутої полиці та її істотне підвищення за реально існуючих параметрів гофрування.

Проведені авторами чисельні дослідження в МКЕ (ПК ЛИРА) в пружній постановці дають підстави вважати, що наведені вище значення можна вважати не стільки кількісними, скільки якісними, оскільки в процесі випинання полиці жорсткість стінки не врахована [9] або врахована опосередковано [6]. При випинання поясу завжди відбуваються деформації стінки, а отже при розрахунку його на місцеву стійкість необхідно враховувати жорсткість стінки (рис. 4). При втраті стійкості полицею стінка деформується, а деформації протилежного (звуженого краю) полиці не є нульовими і збільшують довжину півхвилі випинання

полиці, що є непрямим доказом недостатньої для повного защемлення жорсткості стінки.

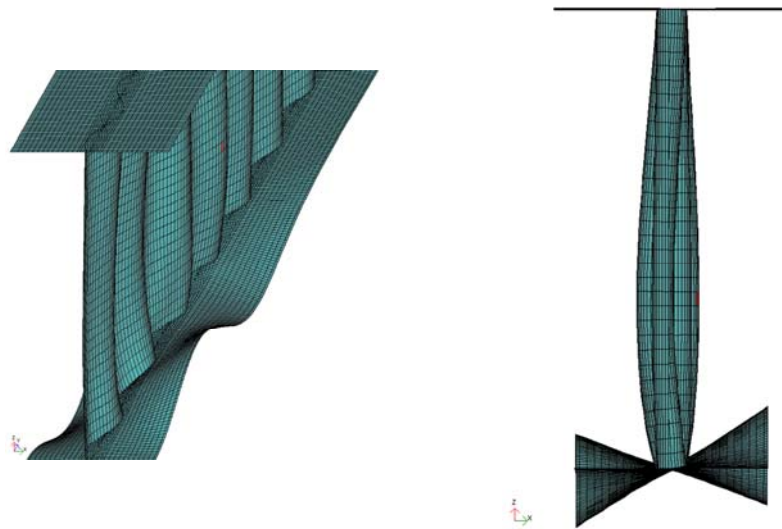


Рис. 4. Деформації стиснутого поясу та стінки при втраті стійкості полицею

Отримані результати дають підстави для обґрунтованого збільшення граничної умовної гнучкості полиці $\bar{\lambda}_{uf} = (b_f / t_f) \sqrt{R_y / E} \leq n_1 \sqrt{R_y / \sigma_c}$ до значень $n_1 = 1,2$ та приймати розрахунковий звис полиці таким, що дорівнює $b_{ef} = b_f / 2 + f / 2$, тобто:

$$\bar{\lambda}_{uf} = (b_{ef} / t_f) \sqrt{R_y / E} \leq 0,6 \sqrt{R_y / \sigma_c} . \quad (4)$$

Для стиснутих поясів колон, а також стиснутих поясів балок (або ділянок, розкріплених від випинання в поперечному напрямку в'язями або прогонами з кроком l_{ef}) ширина звису може бути збільшена. Для цього в (3) треба прийняти $\sigma_c = \sigma_{cr}$, і тоді формула (4) набуває виду

$$\bar{\lambda}_{uf} = (b_{ef} / t_f) \sqrt{R_y / E} \leq 0,6 \sqrt{1 / \varphi} . \quad (5)$$

Коефіцієнт критичних напружень при центральному стиску φ визначається за гнучкістю $\lambda = l_{ef} / i_y$, де i_y – радіус інерції полиці відносно вертикальної осі.

Формули для розрахунку стиснутих поясів на місцеву стійкість справедливі за умови пружної роботи сталі перерізу. Доведено, що поперечно-гофровані стінки з умовною гнучкістю $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}} > 6$

сприймають нормальні напруження у поздовжньому напрямку σ_w лише у вузькій зоні заввишки νh_w біля поясів, а тому їх вплив на несучу здатність елемента є вкрай незначним, і ним зазвичай нехтують. Проте експериментальні і чисельні дослідження свідчать, що хоча нормальні напруження в стінці σ_w і не впливають практично на несучу здатність елемента, проте змінюють НДС стінки в рівні її сполучення з поясами і можуть спричинити появу в цій зоні пластичних деформацій. Так в роботі [4] показано, що в стінці виникають пластичні деформації, які повинні враховуватися при розрахунках на місцеву стійкість поясів, що є важливим для уточнення розрахункової ситуації. Згідно з [8] міцність плоскої стінки в рівні її сполучення з поясами при складному напруженому стані має перевірятися за формулою

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_{loc}^2 - \sigma_w \sigma_{loc} + 3\tau^2} \leq \beta R_{yw} \gamma_c. \quad (6)$$

Внаслідок сумісної поздовжньої деформації полиці і кромки гофрованої синусоїдної стінки при однаковому поздовжньому видовженні Δl відносне видовження полиці буде $\varepsilon_f = \Delta l / m$, а видовження дуги стінки –

$$\varepsilon_s = \Delta s / s. \text{ Довжина дуги хвилі становить } s = m \left(1 + \frac{\pi^2 f^2}{16 \left(\frac{m}{2}\right)^2} \right).$$

Зробимо очевидні перетворення $\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_f} = \frac{m}{s} \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right) = \frac{m}{s} \frac{ds}{dm} = \frac{m}{s} k_s$, де

$$k_s = m \left(1 - \frac{\pi^2 f^2}{16 \left(\frac{m}{2}\right)^2} \right).$$

Це дозволяє записати значення нормальних напружень у стінці через нормальні напруження в полиці:

$$\sigma_w = \sigma_f \frac{m}{s} k_s. \quad (7)$$

Для профілів фірми «Zeman» за [7], для яких $t = 155$ мм та $f = 40$ мм, нормальне напруження в стінці $\sigma_w = 0,72\sigma_f$.

У формулі (6) локальні напруження, що виникають у стінці елемента від зосереджених сил (опорних реакцій – прогонів), визначаються за формулою

$$\sigma_{loc} = \frac{F}{t_w l_{ef}} \leq R_{wy} \gamma_c, \quad (8)$$

при цьому l_{ef} приймається з врахуванням параметрів гофрування

$$l_{ef} = (b + 2t_f) \frac{S}{m},$$

де b – ширина елемента вузла спирання прогону, що передає зусилля на пояс.

Дотичні напруження в формулі (6) приймаються такими, що рівномірно розподілені по висоті стінки. На сьогодні в Україні при виготовленні гофро-балок за технічними умовами заводів-виробників для стінок найчастіше використовується гарячекатана сталь С245, а для поясів сталі С255 і С345 [7]. При використанні сталі С345 ($R_y = 315$ МПа при $t = 11 \div 20$ мм) значення нормальних напружень у стінці можуть сягати $\sigma_w = R_y \cdot (m/s) \cdot k_s = 315 \cdot 0,72 = 226,8$ МПа і значно перевищувати R_{wy} для сталі С245.

Висновки

Розроблена методика визначення відношення ширини звису полиці до її товщини в елементах з гофрованими стінками дає можливість використовувати більш тонкостінні полиці в порівнянні з вимогами [8] і таким чином підвищувати ефективність перерізів при розрахунку на загальну стійкість поза площиною згинання.

Література

- [1] Нилов А.А., Мартинюк А.Я., Лазнюк М.В., Рыженко С.С. Рамы из сварных двутавров с гофрированной стенкой // Збірн. наук. праць УкрНДПСК ім.В.М. Шимановського. – К.: «Сталь», 2009. Вип. 4. – С. 71–78.
- [2] Нилов А.А., Лазнюк М.В., Мартинюк А.Я. К вопросу о нормативном обеспечении проектирования стальных двутавров с гофрированными стенками // Збірн. наук. праць УкрНДПСК ім.В.М. Шимановського. – К.: «Сталь», 2008. Вип. 1. – С. 44–54.

- [3] Нілова Т.О., Білик С.І., Лавріненко Л.І. Розрахунок і компонування перерізів стиснутих сталевих елементів з поперечно-гофрованими стінками // *Современные строительные конструкции из металла и древесины: Сб. научных трудов, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, № 15, часть 2. – Одесса, 2011, – С. 165 – 172.*
- [4] Нілова Т.О. До розрахунку на міцність сталевих двутаврових елементів з поперечно-гофрованою стінкою при складному напруженому стані // *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі і споруди: Зб.наукових праць, Національний університет водного господарства та природокористування. Вип. 23 – Рівне, 2012. – С. 341–346.*
- [5] Нилов А.А., Мартынюк А.Я., Лавриненко Л.И., Лазнюк М.В., Рыженко С.С. Применение сварных двутавров с гофрированной стенкой в комбинированных конструкциях // *Сб. научн. тр. ОГАСА «Современные строительные конструкции из металла и древесины». - Одесса, 2010, №14, ч. 1 – С. 169–174.*
- [6] Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. – М.: Физматгиз, 1959. – 544 с.
- [7] АО «Металлист – СМК». Рекомендации по проектированию (для внутреннего пользования). Балки двутавровые гофрированные облегченные (гофро-балки). ТУ У В.2.6.-28.1-30653953-007:2007. IV редакция. 2008.
- [8] ДБН В.2.6-163:2010 «Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу» – К., Мінрегіонбуд, 2011. – 219 с. – Чинні з 01.12.2011 р.
- [9] Степаненко А.Н. Прочность и устойчивость конструкций из двутавра с волнистой стенкой. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук; Хабаровск 2001. – 234 с.
- [10] Лавріненко Л.І., Лазнюк М.В, Нілова Т.О. Резерви несучої здатності та застосування профілів з поперечно гофрованими стінками в легких металевих конструкціях // *Донбас-Ресурс 2011. Якість і безпека у будівництві/ Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, Маріуполь, 2011. – К., «Сталь», 2011.– С. 77–81.*

Надійшла до редколегії 03.06.2012 р.