УДК 624.071.34

СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ НА ДІЮ ПОПЕРЕЧНИХ СИЛ СТАЛЕВИХ ЛЕГКИХ БАЛОК ІЗ ПОДВІЙНОЮ ПРОФІЛЬОВАНОЮ СТІНКОЮ

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ НА ДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ СТАЛЬНЫХ ЛЕГКИХ БАЛОК С ДВОЙНОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

MODERN GOING NEAR CALCULATION ON ACTION OF TRANSVERSAL FORCES FOR STEEL EASY BEAMS WITH THE DOUBLE CORRUGATED WEB

Пічугін С.Ф., д.т.н., проф., Чичулін В.П., к.т.н., доц., Чичуліна К.В., к.т.н. (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)

Пичугин С.Ф., д.т.н., проф., Чичулин В.П., к.т.н., доц., Чичулина К.В., к.т.н. (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка)

Pichugin S.F., Doctor of Engineering, professor, Chichulin V.P., Candidate Engineering, Chichulina K.V., Candidate Engineering (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University)

В статті представлені сучасні підходи до розрахунку на дію поперечних сил нових конструктивних рішень сталевих легких балок із подвійною профільованою стінкою та розроблені рекомендації щодо проектування конструкцій такого типу для подальшого практичного застосування.

В статье представлены современные подходы к расчету на действие поперечных сил новых конструктивных решений стальных легких балок с двойной профилированной стенкой и разработаны рекомендации относительно проектирования конструкций такого типа для дальнейшего практического применения.

The article dwells on modern going near calculation on action of transversal forces for new constructional decisions of steel easy beams with the double corrugated web and developed recommendations in relation to planning of constructions of such a type for further practical application.

Ключові слова:
Сталеві балки, подвійна профільована стінка, коефіцієнти локального і загального згину стінки, дотичні напруження.
Стальные балки, двойная профилированная стенка, коэффициенты локального и общего изгиба стенки, касательные напряжения.
Steel beams, double corrugated web, factors for a local and global web buckling, tangent tensions.

Стан питання та задачі дослідження. Розглядаючи сучасний стан та перспективи розвитку легких металевих конструкцій, особливої уваги потребують нові двотаврові балки з гофрованою стінкою, які нещодавно почали виготовлятись в Україні. Австрійська технологія виготовлення такого типу конструкцій, дозволяє забезпечити зварювання тонкої стінки (1,5…3мм) з елементами більшої товщини (полицями, опорними ребрами, фланцями). Головною перевагою балок з гофрованими стінками є підвищення стійкості при роботі на зсувні зусилля, що призводить до суттєвого поліпшення техніко-економічних показників, зокрема зменшення ваги до 20%. Широке впровадження гофро-балок змушує проектувальників звертатися до зарубіжних нормативних документів, оскільки в державних нормах відсутні рекомендації щодо розрахунку такого типу конструкцій. Тому, існує потреба в формуванні концепції розрахунку балок з профільованою стінкою на основі вітчизняного та зарубіжного досвіду проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. В умовах відсутності в існуючих вітчизняних нормативних документах [1] методики розрахунку балок з гофрованими стінками, українські автори активно пропонують в ряді статей [2-3] введення рекомендацій щодо розрахунку та проектування двотаврів з гофрованою стінкою, в якості згинальних, центрально- та позацентрово стиснутих елементів, розглядаються балки з гофрованою стінкою трьох різних конфігурацій (хвиляста, трикутна, трапецеїдальна). В роботах зазначається, що тонкі поперечно-гофровані стінки практично не сприймають нормальні сили та згинаючий момент. В крайніх ділянки стінки, що примикають до поясів, дія нормальних напружень не враховуються у розрахунках, оскільки товщина гофрованого листа є досить малою. В [2] зазначається, що розрахунок міцності та загальної стійкості від приведених вище зусиль зводиться до перевірки поясних листів на міцність та стійкість, а також запропонована методика розрахунку гофрованої стінки.

Серед останніх зарубіжних досліджень, присвячених розрахунку балок з гофрованою стінкою, можна відмітити роботи П.І. Егорова [4], А.Н. Кретиніна [5], H.R. Kazemi [6], Kiymaz G. [7], Souza D.G. [8], E.Y. Sayed-Ahmed [9] та багатьох інших.

Виклад основного матеріалу. На основі досвіду проектування традиційних фланцевих вузлів сталевих балок для дослідження була обрана конструкція монтажного вузла з'єднання з фрагментами балок з подвійною профільованою стінкою (рис. 1) загальним прольотом *L=1980мм*. З'єднання між собою опорних ребер здійснюється за рахунок шістьох болтів. В торцях балок розташовані опорні ребра, полиці двотавра виконані з листів. Профільована стінка такої балки [10] має трапецеїдальну конфігурацію з нерівномірним кроком гофрів, що складається з двох холодногнутих профільованих листів, які закріплюються до поясів листів. Таким чином забезпечується приварювання профільованого настилу по всьому периметру балки (біля полиць та ребер). Довжина довшої та коротшої ділянок гофрів профільованої стінки дорівнює $a_{1,max}$ та $a_{1,min}$, а довжина похилої ділянки визначається розміром a_2, крок профільованого листа становить $s=2a$.

На основі проведених раніше теоретичних та експериментальних досліджень вузлів та балок із подвійною поперечно профільованою стінкою [11] детально розглянемо роботу трапецеїдальної гофрованої стінки як нового елемента.

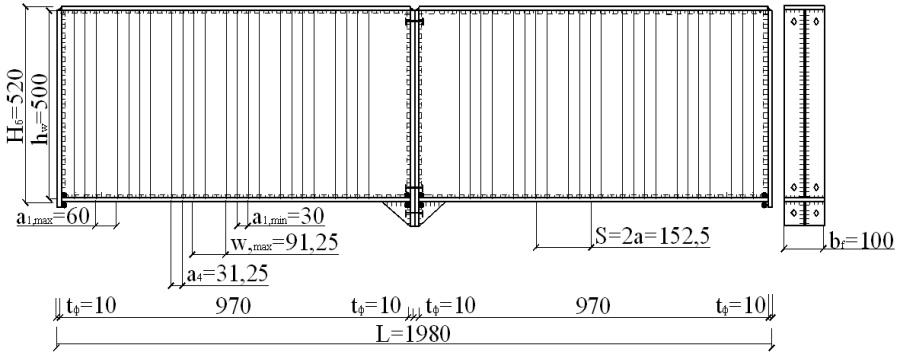

Рис. 1. Конструкція монтажного вузла з'єднання з фрагментами балок з подвійною профільованою стінкою

Деякі автори гофровану стінку балки рекомендують розраховувати на зріз за формулою (1):

$$\tau_{xy,\max} = \frac{Q_{\max}}{h_w \cdot t^*_w \cdot k_\lambda} \le R_s \gamma_c, \qquad (1)$$

де Q_{max} – максимальна поперечна сила в перерізі вузла; γ_c – коефіцієнт умов роботи; R_s=0,58R_y – розрахунковий опір сталі зрізу; k_λ – коефіцієнт, який враховує геометрично нелінійну поведінку гофрованої стінки [3] або гнучкість гофрованої стінки [12]; t_w^* – товщина стінки (при подвійній стінці враховується $2t_w$).

Зауважимо, що приймаючи дотичні напруження однаковими по всій висоті стінки, можна використовувати формулу (1) при умові врахування k_λ (2) [2] (за формулою) М.В. Лазнюка:

$$k_\lambda = 1{,}085 - 0{,}008 \cdot \overline{\lambda}_w \le 1, \qquad (2)$$

де умовна гнучкість подвійної профільованої стінки визначається:

$$\overline{\lambda}_w = \frac{h_w}{t^*_w}\sqrt{\frac{R_y}{E}}\,. \qquad (3)$$

Таблиця 1

Чисельні значення залежності коефіцієнту k_λ від товщини стінки t_w

Товщина стінки	Коефіцієнт, що враховує гнучкість стінки при h_w=50 *см*		
t_w, *см*	k_λ за формулою Лазнюка М.В.	k_λ за модифікацією формули Лазнюка М.В.	$k_{\lambda,1}$ за модифікацією формули EN 1993-1-5
0,1	0,948469	0,86346877	0,714427
0,11	0,960881	0,87588070	0,744257
0,12	0,971224	0,88622398	0,771087
0,13	0,979976	0,89497598	0,795347
0,14	0,987478	0,90247769	0,817391
0,15	0,993979	0,90897918	0,837508
0,16	0,999668	0,91466798	0,855941
0,17	1,004688	0,91968751	0,872892
0,18	1,009149	0,92414932	0,888533
0,19	1,013141	0,92814146	0,903011
0,20	1,016734	0,93173439	0,916451
0,21	1,019985	0,93498513	0,928960
0,22	1,022940	0,93794035	0,940632
0,23	1,025639	0,94063860	0,951548
0,24	1,028112	0,94311199	0,961779
0,25	1,030388	0,94538751	0,971388
0,26	1,032488	0,94748799	0,980430
0,27	1,034433	0,94943288	0,988954
0,28	1,036239	0,95123885	0,997002
0,29	1,037920	0,95292027	1,0046140
0,30	1,039490	0,95448959	1,011825
0,31	1,040958	0,95595767	1,018664
0,32	1,042334	0,95733399	1,025160
0,33	1,043627	0,95862690	1,031339
0,34	1,044844	0,95984376	1,037223
0,35	1,045991	0,96099108	1,042832
0,36	1,047075	0,96207466	1,048186
0,37	1,048100	0,96309967	1,053301
0,38	1,049071	0,96407073	1,058193
0,39	1,049992	0,96499199	1,062876
0,40	1,050867	0,96586719	1,067364

Відобразивши даний коефіцієнт в залежності від товщини стінки, попередньо задаючись висотою h_w=50*см* (рис. 2, а), можна вважати, що при переході рубіжного значення товщини 0,16*см*, його вплив можна не враховувати (табл. 1). При розрахунку дотичних напружень балок з профільованою стінкою в складі монтажних вузлів з урахуванням даного коефіцієнту в порівнянні зі значеннями, розрахованими за методом кінцевих елементів похибка досягає лише 1%.

При врахуванні зовнішніх обмежень (від 0,7 до 1), а саме при оптимальному співвідношенні товщини та висоти стінки (при підборі співвідношення рекомендується застосовувати гнучкість λ(300…400) в діапазоні згідно норм Еврокод λ(200…600)), отриманий модифікований вираз (4) для подвійної профільованої стінки. Використання даної форми модифікованого коефіцієнту надає можливість отримання теоретичних значень дотичних напружень, близьких до експериментальних.

$$k_\lambda = 1 - 0{,}008 \cdot \frac{h_w}{2t_w} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}\,. \qquad (4)$$

В табл. 1 приведені чисельні значення коефіцієнту k_λ, розрахованих за (4) при умові висоти стінки h_w=50*см*, які є оптимальними для досліджуваних конструкцій. Також були розраховані значення даного коефіцієнту для стінок різної висоти h_w(20…100*см*) та товщини t_w(0,1…..0,4*см*) з подальшим графічним відображенням (рис. 2, б) та застосуванням для розрахунку дотичних напружень (в порівнянні з МКЕ похибка не більше 10%) балок з профільованою стінкою в складі монтажних вузлів.

Згідно з казахськими нормами [13], величина k_λ=γ_{wc}=0,9, а в європейских нормах [12] k_λ та $k_{\lambda,l}$ залежать від гнучкості стінки, варіюються в межах 0,7÷1,0 та обираються з двох понижуючих факторів для локального (викривлення окремих ділянок гофрів) та загального (викривлення гофрованої стінки вздовж всієї її висоти) згину стінки за найменшим значенням.

Пропонується коефіцієнти k_λ та $k_{\lambda,l}$ для загального та локального згину стінки надалі визначати шляхом адаптації та перетворень відомих формул [12]. Згідно з [12] коефіцієнт $k_{\lambda,l}$ за понижуючим фактором для локального згину стінки становить:

$$k_{\lambda,l} = \frac{1{,}15}{0{,}9 + \overline{\lambda}_{c,l}} \le 1, \qquad (5)$$

де умовна гнучкість профільованої стінки при локальному згині визначається [12]:

$$\overline{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{R_s}{\tau_{c,l}}}\,. \qquad (6)$$

Згідно з [12] коефіцієнт $k_{\lambda,l}$ за понижуючим фактором для локального згину стінки за умови, що дотичні напруження при локальному згині: $\tau_{c,l} = 4{,}83 \cdot E \cdot \left[\frac{2t_w}{a_{1,\max}} \right]^2$, то шляхом деяких перетворень виразу (5) [14] для подвійної профільованої стінки був отриманий вираз (7):

$$k_{\lambda,l} = \frac{1{,}15}{0{,}9 + \sqrt{\frac{R_s}{\tau_{cr,l}}}} = \frac{1{,}15}{0{,}9 + \sqrt{\frac{R_s}{4{,}83 \cdot E \cdot \left[\frac{2t_w}{a_{1,\max}} \right]^2}}}. \qquad (7)$$

Дослідимо детально залежність коефіцієнту $k_{\lambda,l}$ від товщини стінки t_w, яка близька до параболічного закону (рис. 2, а). При товщині подвійної стінки $2t_w \geq 2{,}8$*мм* для представленого типу конструкцій коефіцієнт $k_{\lambda,l}$ можна не враховувати.

Коефіцієнт $k_{\lambda,l}$ за понижуючим фактором для локального згину не залежить від висоти стінки, а залежить від умовної гнучкості (рис. 2, г) та надає можливість використання останнього для конструкцій з невеликою товщиною стінки при $\overline{\lambda}_{c,l}$ від 0,2 до 0,74 та від 1,5 до 2 згідно [15]. В ході проведених досліджень було виявлено, що даний коефіцієнт підходить для конструкцій, що розглядаються та подібних до них з товщиною стінки до 2,8*мм*.

Відповідно [12] визначений коефіцієнт k_λ за понижуючим фактором для загального згину (8):

$$k_\lambda = \frac{1{,}5}{0{,}5 + \overline{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1, \qquad (8)$$

де умовна гнучкість профільованої стінки при загальному згині:

$$\overline{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{R_s}{\tau_{c,g}}}, \qquad (9)$$

$$\text{якщо } 0{,}5 \leq \frac{\tau_{c,g}}{\tau_{c,l}} \leq 2, \text{ то } \overline{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{2 \cdot R_s}{\tau_{c,g}}}. \qquad (10)$$

З метою модифікації для досліджуваних конструкцій зі стінкою коробчастого перерізу, пропонуються формули (11, 12), які оптимально підходять для отримання даних коефіцієнтів (рис. 2, а).

$$k_\lambda = \frac{1{,}5}{0{,}5 + \dfrac{R_s}{\dfrac{2{,}7E}{h_w^2}\sqrt[4]{\dfrac{t_w^2 \cdot a_3^6 \cdot \left(3a_{1,max} + a_2\right)^3}{\left(1-\nu\right)^2 \cdot s \cdot w^2}}}}, \qquad (11)$$

якщо $0{,}5 \le \dfrac{\tau_{c,g}}{\tau_{c,l}} \le 2$, то $k_\lambda = \dfrac{1{,}5}{0{,}5 + \dfrac{2 \cdot R_s}{\dfrac{2{,}7E}{h_w^2}\sqrt[4]{\dfrac{t_w^2 \cdot a_3^6 \left(3a_{1,max} + a_2\right)^3}{\left(1-\nu\right)^2 \cdot s \cdot w^2}}}}$. (12)

Даний коефіцієнт залежить від висоти та товщини стінки і уособлює дуже відповідальний аспект в розрахунку стінки, тому що інколи несуча здатність балки залежить саме від міцності стінки, а стійкість стінки при цьому забезпечується за рахунок гофрованого перерізу. При розрахунку коефіцієнту для загального згину за формулами (11, 12), виявлено, що коефіцієнт k_λ можна використовувати для стінок представлених балок з висотою $h_w \ge 120$ *см*.

В працях німецьких науковців [15, 16] було запропоновано введення коефіцієнту загального згину k_λ у вигляді (13) (рис. 2, а):

$$k_\lambda = \frac{1}{\bar{\lambda}_{c,g}^{1,5}} \le 1, \qquad (13)$$

Шляхом перетворень були отримані нові форми визначення даного коефіцієнту (14, 15):

$$k_\lambda = \left(\frac{\dfrac{2{,}7 \cdot E}{h_w^2}\sqrt[4]{\dfrac{t_w^2 \cdot a_3^6 \left(3a_{1,max} + a_2\right)^3}{\left(1-\nu^2\right) \cdot s \cdot w^2}}}{R_s} \right)^{0{,}75}, \qquad (14)$$

якщо $0{,}5 \le \dfrac{\tau_{c,g}}{\tau_{c,l}} \le 2$, то $\kappa_\lambda = \left(\dfrac{\dfrac{2{,}7E}{h_w^2}\sqrt[4]{\dfrac{t_w^2 \cdot a_3^6 \left(3a_{1,max} + a_2\right)^3}{\left(1-\nu\right)^2 \cdot s \cdot w^2}}}{2 \cdot R_s} \right)^{0{,}75}$. (15)

Він подібно до (11, 12) при $\overline{\lambda}_{c,g} \le 1$ не може використовуватись для конструкцій балок з заданими вище параметрами, тобто k_λ=1 (рис.2, в).

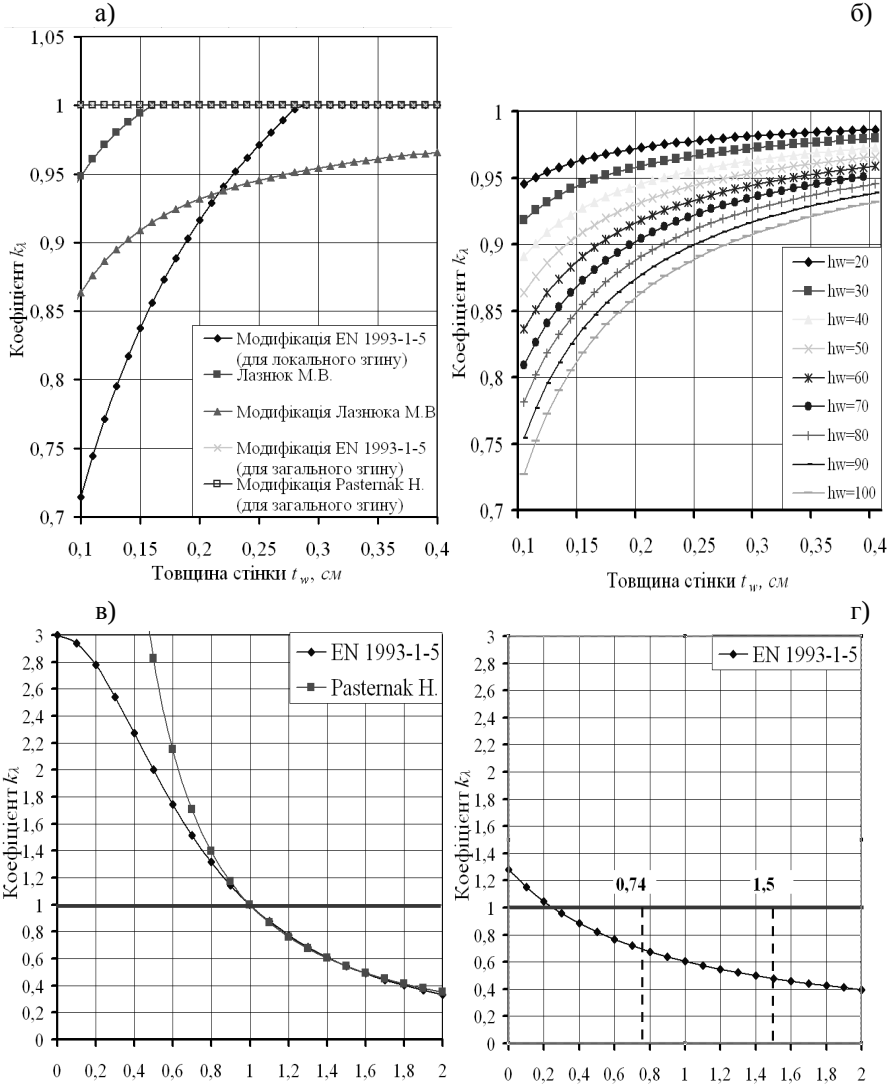

Рис. 2. Залежність коефіцієнту k_λ: а) від товщини стінки t_w (для представленого типу конструкцій); б) від товщини стінки t_w (модифікований вираз формули Лазнюка М.В.); в), г) від умовної гнучкості $\overline{\lambda}_c$

Висновки. Поперечні сили сприймаються профільованою стінкою балки, розподілення дотичних напружень відбувається по закону, близькому до рівномірного. Отримані залежності для визначення коефіцієнтів для локального і загального згину, що використовуються при визначенні дотичних напружень і здебільшого залежать від гнучкості стінки.

1. СНиП II-23-81* Стальные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 95 с. **2.** Нилов А.А. К вопросу о нормативном обеспечении проектирования стальных двутавров с гофрированными стенками / А.А. Нилов, М.В. Лазнюк, А.Я. Мартинюк // Збір. наук. праць УкрНДІпроектстальконструкцій ім. В.М. Шимановського. – К: Сталь, 2008. – Вип. 1. – С. 45–53. **3.** Нилов А.А., Лазнюк М.В. Уточнение расчета тонких поперечно-гофрированных стенок изгибаемых элементов двутаврового сечения с различной формой и параметрами гофров / А.А. Нилов, М.В. Лазнюк // Науковий вісник будівництва: зб. наук. пр. – Харків: ХДТУБА, 2006. – Вип.37. – С.91–100. **4.** Егоров П.И. Исследования напряженно-деформированного состояния стальных балок и колонн из двутавра с тонкой гофрированной стенкой : автореф. дис. на соискание уч. степ. докт. техн. наук : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения”/ П.И. Егоров. – Хабаровск, 2010. – 24 с. **5.** Кретинин А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения” / А.Н. Кретинин. – Новосибирск, 2008. – 25 с. **6.** Kazemi H.R. The Effects of the Corrugation Profiles of the Web on the Lateral-Torsional Buckling Strength of the Inelastic I-Girder / H.R. Kazemi. Nia Korrani, S. Molanaei // World Applied Sciences. – 2010. No. 8 (5). – P. 527–530. **7.** Kiymaz G. Transverse load carrying capacity of sinusoidally corrugated steel web beams with web openings / G. Kiymaz, E. Coskun, C. Cosgun, E. Seckin // Steel and Composite Structures. – 2010. – No. 1, Vol. 10. – P. 9–85. **8.** Souza D.G. Estudio da flambagem local da mesa de perfis i com alma sinoidal via análise análise náo-linear pero meff / D.G. Souza. – Belo Horizonte: Universidade federal de minas gerais escola de en genharia, 2006. – 142 p. **9.** Sayed-Ahmed E.Y. Design aspects of steel I-girders with corrugated steel webs / E.Y. Sayed-Ahmed // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2007. –No. 7. – P. 27–40. **10**. Пат. 45328 Україна, МПК (2006) E 04 C 3/02. Сталева балка з поперечно профільованою стінкою коробчастого перерізу з нерівномірним кроком гофрів / Пічугін С.Ф., Чичулін В.П., Чичуліна К.В.; власник : Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u 2009 03785; заявл. 17.04.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. – 4 с. **11.** Чичуліна К.В. Надійність вузлів сталевих балок з профільованою стінкою : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / Чичуліна К.В. – Полтава, 2011. – 26 с. **12.** Eurocode 3 EN 1993-1-5 : Design of steel Structures. Part 1.5. Plated Structural Elements. – 2004. **13.** ҚР ҚНжЕ 5.04-07:2004 / СН РК 5.04-08:2002. Стальные конструкции. – Астана : Комитет по делам строительства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2003. – 118 с. **14.** Hoop H.G. Literature study. Master thesis: Girders with corrugated webs / H.G. Hoop. – The Netherlands: Papendrecht, 2003. – 48 p. **15.** Pasternak H. Plate girders with corrugated webs / Hartmut Pasternak, Gabriel Kubieniec // Journal of civil engineering and management. – 2010. – No. 16(2). – P. 166–171. **16**. Pasternak H. Beams and Columns with sinusoidal corrugated webs and crane brackets / Hartmut Pasternak, Dina Hannebauer. – Chair of Steel Construction, Brandenburg Technical University. – 8 p.