



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2011, ТОМ 17, НОМЕР 3, 143–150

УДК 624.014:624.04:721.011.1

(11)-0240-1

## **ДОСЛІДЖЕННЯ БАЛОК З ГОФРОВАНОЮ СТІНКОЮ З УРАХУВАННЯМ ПОЧАТКОВИХ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ**

**М. В. Лазнюк<sup>a</sup>, І. Д. Євзеров<sup>b</sup>, О. Я. Мартинюк<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> ТОВ «ПЕМ Україна», Zetan Group, пр. Тбіліський, 4/10, м. Київ, Україна, 03055.

E-mail: lazniuk@pem.com

<sup>b</sup> ТОВ «ЛІРА Софт», вул. Кадетський Гай, 6а, оф. 206, м. Київ, Україна, 03048.

E-mail: yevzerov@voliacable.com.ua

Отримана 18 травня 2011; прийнята 24 червня 2011.

**Анотація.** В статті обговорюються проблеми проектування і виготовлення сталевих конструкцій двотаврового перерізу з тонкою гофрованою стінкою. За допомогою методу скінченних елементів досліджувався вплив початкових недосконалостей, таких як локальні погнутості і відхилення параметрів гофрування, на стійкість тонких гофрованих стінок елементів, що згинаються. Моделі конструкцій розраховувались за деформованою схемою з урахуванням непружної роботи сталі. Наведено основні теоретичні положення реалізованого в ПК ЛІРА метода вирішення задач в геометрично і фізично нелінійній постановці за допомогою МСЕ. Теоретичні дані були підтверджені результатами натурних випробувань. Отримані результати були використані при розробці технічних умов на виготовлення зварних двотаврів з гофрованою стінкою.

**Ключові слова:** балка з гофрованою стінкою, метод скінченних елементів, стійкість, початкові недосконалості.

## **ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ НА РАБОТУ БАЛОК С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ**

**М. В. Лазнюк<sup>a</sup>, И. Д. Евзеров<sup>b</sup>, А. Я. Мартинюк<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> ООО «ПЕМ Украина», Zetan Group, пер. Тбилиский, 4/10, г. Киев, Украина, 03055.

E-mail: lazniuk@pem.com

<sup>b</sup> ООО «ЛИРА Софт», ул. Кадетский Гай, 6а, оф. 206, г. Киев, Украина, 03048.

E-mail: yevzerov@voliacable.com.ua

Получена 18 мая 2011; принята 24 июня 2011.

**Аннотация.** В статье обсуждаются проблемы проектирования и изготовления стальных конструкций двутаврового сечения с тонкой гофрированной стенкой. С помощью метода конечных элементов исследовалось влияние начальных несовершенств, таких как локальные погнутости и отклонения параметров гофрирования, на устойчивость тонких гофрированных стенок изгибаемых элементов. Модели конструкций рассчитывались по деформированной схеме с учетом неупругой работы стали. Приведены основные теоретические положения реализованного в ПК ЛИРА метода решения задач в геометрически и физически нелинейной постановке с помощью МКЭ. Теоретические данные подтверждены результатами натурных испытаний. Полученные результаты были использованы при разработке технических условий на изготовление сварных двутавров с гофрированной стенкой.

**Ключевые слова:** балка с гофрированной стенкой, метод конечных элементов, устойчивость, начальные несовершенства.

## INFLUENCE OF INITIAL IMPERFECTIONS UPON THE OPERATION OF BEAMS WITH A CORRUGATED WALL

**Lazniuk Mykhailo <sup>a</sup>, Ievzerov Isaak <sup>b</sup>, Martyniuk Oleksandr <sup>a</sup>**

<sup>a</sup> PEM Ukraine Ltd., Zeman Group, Tbilisskiy lane, 4/10, Kyiv, Ukraine, 03055.

E-mail: lazniuk@pem.com

<sup>b</sup> Lira Soft Ltd., of. 206, 6A, Kadetskiy Gai Str., Kyiv, Ukraine, 03048.

E-mail: yevzerov@voliacable.com.ua

Received 18 May 2011; accepted 24 June 2011.

**Abstract.** In the article problems of designing and manufacturing of steel structures of I sections with a thin corrugated wall are discussed. By means of a method of final elements influence of initial imperfections, such, as local curvature and a deviation of parameters of corrugating, on stability of the thin corrugated walls of bent elements has been investigated. Models have been designed with the deformed scheme taking into account not elastic operation of steel. The basic theoretical positions realized in the personal computer LIRA of a method of problem solving in geometrically and physically nonlinear statement by means of FEM are resulted. The theoretical data is confirmed by results of natural tests. The received results have been used when working out specifications of manufacturing of welded double tee with a corrugated wall.

**Keywords:** a beam with a corrugated wall, a method of final elements, stability, initial imperfections.

Использование аппарата МКЭ для исследования новых форм металлических конструкций приобрело в последнее время достаточно массовый характер [2, 9–11]. В научно-технической литературе прочно закрепилось понятие численного эксперимента. Развитие аппарата МКЭ, который лег в основу мощных программных комплексов, таких как ПК ЛИРА, позволяет с достаточной точностью решать сложнейшие задачи линейной и нелинейной статики и динамики строительных конструкций.

С помощью приведенного ниже алгоритма, реализованного в ПК ЛИРА [1, 2, 11], решалась задача определения влияния начальных несовершенств на НДС балок с гофрированной стенкой.

Решение  $u$  нелинейной статической задачи удовлетворяет принципу возможных перемещений

$$a(u, v) + l(v) = 0, \quad (1)$$

где  $v$  – возможное перемещение;  $l(v)$ ,  $a(u, v)$  – функционалы возможных работ внешних и внутренних сил, линейные по  $v$ . Функционал  $a(u, v)$  нелинеен по  $u$ .

Обозначим  $a'(u, v, w)$  – производную функционала  $a(u, v)$  по  $u$ . Достаточным условием существования и единственности решения уравнения (1) является строгая монотонность фун-

кционала  $a(u, v)$  [15, 16]: при всех возможных перемещениях  $v$  справедливо неравенство

$$a'(u, v, v) \geq K \|v\|^2, \quad (2)$$

где  $\|v\|$  – энергетическая норма.

Неравенство (2) справедливо для физической нелинейных задач и для геометрически нелинейных задач в докритической стадии.

Если функционал  $a'(u, v, w)$  непрерывен по  $u$  (это справедливо для геометрически и физически нелинейных задач при непрерывно дифференцируемой зависимости напряжений от деформаций), для решения задачи (1) применяется шаговый метод:

$$a'(u_m, u_{m+1} - u_m, v) = (\theta_{m+1} - \theta_m) l(v), \quad (3)$$

$u_0 = 0$ ;  $0 = \theta_0 < \theta_1 < \dots < \theta_{M-1} < \theta_M = 1$ ,  $M$  – количество шагов.

Для шагового метода справедлива оценка погрешности

$$\|u - u_M\| \leq K \cdot \theta, \quad \theta = 1/M. \quad (4)$$

Если зависимость между деформациями и напряжениями не является непрерывно дифференцируемой (диаграмма Прандтля, условие Гениева, грунты, односторонние связи, трение), применяется итерационный метод [1, 11]

$$a_0(u_{m+1}, v) + d(u_m, v) + l(v) = 0, \quad (5)$$

где  $u_0 = 0$ ;  $a_0(u, v) = a'(0, u, v)$ ,  $d(u, v) = a(u, v) - a_0(u, v)$ .

Для указанных задач функционал  $d(u, v)$  удовлетворяет неравенству

$$|d(u_1, v) - d(u_2, v)| \leq q \|u_1 - u_2\| \cdot \|v\|, \quad (6)$$

причем  $0 < q < 1$ . Поэтому для метода (5) справедлива оценка погрешности

$$\|u - u_m\| \leq K \cdot q^m. \quad (7)$$

Уравнения физически нелинейной динамической задачи имеют вид

$$b(u'', v) + a_0(u, v) + d(u, v) + b(v) = 0, \quad (8)$$

где  $u'' = d^2u/dt^2$ ;  $b(u, v)$  – возможная работа инерционных сил.

Для решения задачи (8) применяется, безусловно, устойчивая разностная схема

$$\theta^{-2}b(u_{m+1} - 2u_m + u_{m-1}, v) + a_0(u_{m+1} + u_{m-1}, v)/2 + d(u_m, v) + l_m(v) = 0, \quad (9)$$

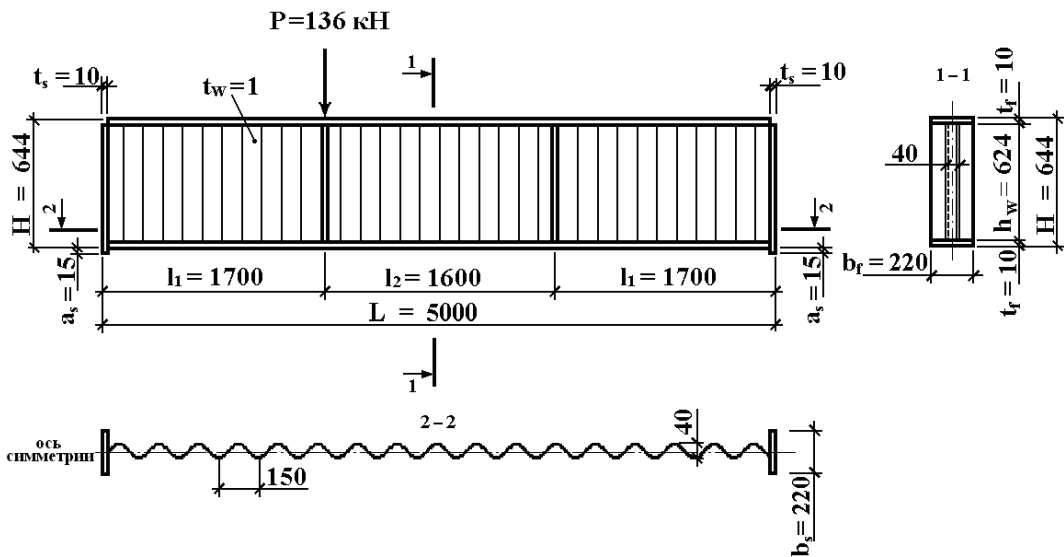
где  $\theta$  – шаг по времени,  $t_m = \theta_m$ ,  $u_m = u(t_m)$ .

Для схемы (9) справедлива оценка погрешности

$$\|u(t_m) - u_m\| \leq K \cdot \theta^2. \quad (10)$$

В качестве математических и натуральных моделей принята шарнирно-опертая стальная балка двутаврового сечения с гофрированной стенкой (рис. 1а). Изготовление натурной конструкции (рис. 2) выполнялось с применением полуавтоматической сварки

- а)  $E = 2.06 \times 10^5$  МПа  
 $\nu = 0.3$   
 $\rho = 7.85$  т/м<sup>3</sup>



- б)



Рисунок 1. Модель экспериментальной конструкции: а – геометрия; б – натурное формобразование гофрированной стенки (фрагмент).

без использования специальных технологий.

Геометрия стенки в первой группе конечно-элементных задач задавалась в идеализированном виде (проектная геометрия), а во второй группе задач – по результатам обмеров экспериментальной модели, т. е. с учетом отклонений от проектной геометрии. В результате проведенных обмеров (рис. 16) определено, что максимальные отклонения от идеальной формы тонкой гофрированной стенки в поперечном направлении составили 20 мм; в продольном направлении – 15 мм; максимальная винтообразность – 22 мм.

Моделирование выполнялось с помощью конечных элементов, учитывающих геометрическую и физическую нелинейность одновременно. При задании жесткостных характеристик использовалась кусочно-линейная зависимость  $\sigma_i - \varepsilon_i$ , соответствующая унифицирован-

ной диаграмме  $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$  [3] для низкоуглеродистой стали класса С245. Физические характеристики стали принимались как по нормативным данным (в первом приближении), так и по результатам испытаний малогабаритных образцов в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Расчеты выполнялись с помощью нелинейного процессора простым шаговым методом [1, 2, 11] с автоматическим выбором шага, реализованным в ПК ЛИРА, для геометрически и физически нелинейных задач.

Анализ НДС и устойчивости стенок экспериментальных конструкций засвидетельствовал достаточно хорошее совпадение с результатами математического моделирования в ПК ЛИРА. Снижение экспериментальной критической нагрузки по сравнению с результатами численных исследований с идеализированной геометрией составляет 9,8...16,9 %, что объясняется следующими факторами:

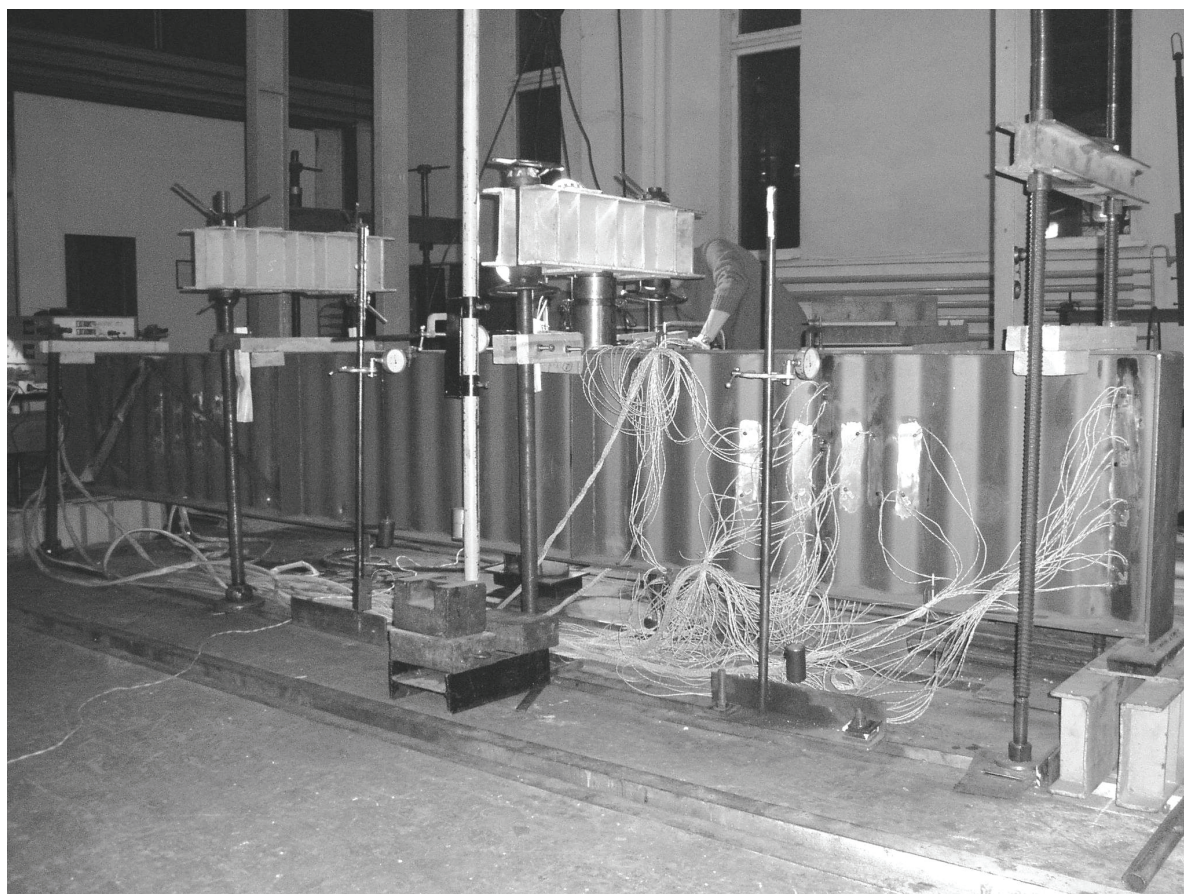


Рисунок 2. Общий вид экспериментальной конструкции.

- наличием начальных несовершенств формы гофрированной стенки;
- наличием начальных напряжений от профилирования и сварки;
- при испытании второго отсека конструкций балок (после восстановления работоспособности первого) возможно снижение критических нагрузок вследствие развития местных невосстанавливаемых выпуклостей, сопровождающихся развитием пластических деформаций, что отмечалось ранее другими исследователями при испытании аналогичных конструкций [12–14].

Результаты математического моделирования с заданными начальными несовершенствами формы (для одного отсека) показали отличие менее 5 % от результатов натурного эксперимента.

С целью определения допусков на начальные отклонения от проектной геометрической

формы гофрированных стенок выполнялось сравнительное моделирование 26 моделей балок, половина из которых имела идеализированную форму гофрированной стенки, а вторая половина имела геометрию стенки, изображенную на рис. 16. Для второго типа моделей варьировалось отношение совокупности начальных несовершенств к толщине стенки, т. е. варьировалась толщина стенки при ее заданной геометрии и величина нагрузки. Параллельно для сравнения выполнялись расчеты идеализированных моделей с соответствующими параметрами стенки. Принятые при исследовании параметры гофрированных стенок составили  $\lambda_w = h_w/t_w = 50; 80; 100; 200; 312; 400; 500; 624; 700; 800; 900; 1000; 2000$ .

Дополнительно с целью определения степени влияния локальных погнутостей на критические тангенциальные напряжения гофрированной стенки был рассчитан ряд задач со



Рисунок 3. Изготовление сварных двутавров с поперечно-гофрированной стенкой.

смоделированными локальными погнутостями сферической формы с радиусами  $t_w, 2t_w, 5t_w, 10t_w$ .

В результате решения данных задач определено, что гофрированная стенка является достаточно устойчивой к локальным погнутостям. Максимальное снижение критических напряжений составило лишь 3,6 %.

Влияние начальных отклонений от заданной геометрической формы на снижение критических напряжений гофрированной стенки мало зависит от их отношения к толщине стенки и может составлять в среднем 15,4 %. Выявлено, что наиболее негативное влияние оказывают отклонения от высоты гофрирования. Определено, что изменение длины гофра на 10 мм приводит к из-

менению величины критических напряжений в среднем на 4 %. Изменение же высоты гофра на  $\pm 1$  мм приводит к изменению критических напряжений стенки на 2,4 %. Винтообразность гофрированной стенки мало сказывается на ее устойчивости даже при превышении допустимой нормативной величины более чем в 4 раза.

Результаты приведенных в данной работе исследований легли в основу при разработке ТУ [4, 5] и допусков на изготовление сварных двутавров с гофрированной стенкой, изготавливаемых на Украине с помощью технологий фирмы ZEMAN&Co [6–10], оборудованием которой в настоящее время оснащены два ЗМК в Украине (рис. 3).

## Литература

1. Горбовец, А. В. Приближенные схемы для стационарных и нестационарных задач с односторонними ограничениями / А. В. Горбовец, И. Д. Евзеров // Вычислительные технологии. – 2000. – Т. 5, № 6. – С. 33–35.
2. Городецкий, А. С. Использование ПК ЛИРА в нелинейных задачах строительной механики / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров, М. В. Лазнюк // Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов : Тезисы докладов XXII Международной конференции (24–27 сентября 2007 г.). – СПб. : СПбГАСУ, 2007. – С. 47–48.
3. Моисеев, В. И. Устойчивость прямоугольной пластинки при чистом сдвиге за пределом упругости / В. И. Моисеев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1970. – № 5. – С. 53–55.
4. Технические условия. Балки двутавровые гофрированные облегченные : ТУ У В.2.6-28.1. – 30653953-007:2007.
5. Технічні умови. Балки двотаврові полегшені з поперечно-гофрованою стінкою : ТУ У В.2.6-28.1-35512066-001:2010.
6. Siokola, W. Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profilierten Steg. Stahlbau 66 (1997) Heft 9, S. 595.
7. Мартинюк, А. Я. Сварные соединения элементов двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой / А. Я. Мартинюк, А. А. Нилов, М. В. Лазнюк // Металеві конструкції. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 237–244.
8. Corrugated web beam. Technical documentation. – Vienna : Zeman & Co Gesellschaft mbH, 1999. – 14 p.
9. Pasternak, H., Hannebauer, D. Trägern mit profilierten Stegen, Stahlbau-Kalender 2004, S. 449–492, Ernst&Sohn.

## References

1. Gorbovets, A. V.; Yevzerov, I. D. Approximate schemes for stationary and non stationary problems with one side limits. *Computer technologies*, 2000, Vol. 5, No. 6, p. 33–35. (in Russian)
2. Gorodetskii, A. S.; Yevzerov, I. D.; Lazniuk, M. V. PC LIRA using in non linear problems of construction mechanics. *Mathematical modeling in mechanics of deformed bodies and structures. Methods of limit and finite elements: Reports at XXII International conference (24–27 September 2007)*. St. Petersburg: SPbGASU, 2007, p. 47–48. (in Russian)
3. Moiseev, V. I. Stability of a rectangular plate with a clear shift beyond the limit of elasticity. *Construction Mechanics and Building Design*, 1970, No. 5, p. 53–55. (in Russian)
4. Technical conditions. Universal corrugated light weight beams: TU U B.2.6-28.1-30653953-007:2007. (in Russian)
5. Technical conditions. Universal cross corrugated light weight beams: TU U B.2.6-28.1-35512066-001:2010. (in Ukrainian)
6. Siokola, W. Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profilierten Steg. *Stahlbau* 66 (1997) Heft 9, S. 595.
7. Martyniuk, A. Ya.; Nilov, A. A.; Laznyuk, M. V. T elements and thin cross-corrugated web. *Metal Constructions*, 2008, Vol. 14, No. 4, p. 237–244. (in Russian)
8. Corrugated web beam. Technical documentation. Vienna: Zeman & Co Gesellschaft mbH, 1999. 14 p.
9. Pasternak, H.; Hannebauer, D. Trägern mit profilierten Stegen, *Stahlbau-Kalender* 2004, S. 449–492, Ernst&Sohn.
10. Pasternak, H., und Siokola, W. Zur Querkrafttragfähigkeit von Wellstegträgern – FE-Unter-

10. Pasternak, H., und Siokola, W. Zur Querkrafttragfähigkeit von Wellstegträgern – FE-Untersuchungen und Versuche. Erscheint 1998 im Bauingenieur.
11. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К. : Факт, 2007. – 394 с.
12. Исследование и разработка лёгких сварных металлических конструкций из тонколистового проката и гнутых профилей : отчёт о научно-исследовательской работе / КИСИ, Кафедра МДК ; рук. А. А. Нилов. – К., 1989. – 168 с. – № ГР 01880064894. – Инв. № 54–88.
13. Михайлова, Т. В. О влиянии периодических закрытых гофров стенки двутавровой балки на ее несущую способность / Т. В. Михайлова // Разработка и исследование стали для металлических конструкций : Сб. науч. тр. – М. : ЦНИИПСК, 1988. – С. 158–162.
14. Михайлова, Т. В. Экспериментальные исследования сварных двутавровых балок с периодическими гофрами в стенке / Т. В. Михайлова // Типизация и стандартизация металлических конструкций : Сб. науч. тр. – М. : ЦНИИПСК, 1987. – С. 64–71.
15. Browder, F. E. Nonlinear elliptic boundary value problem / F. E. Browder // Bull. Amer. Math. Soc. – 1963. – V. 69. – P. 862–874.
16. Ciarlet, P. Une justification des equations de Marquerre von Karman pour les coques peu profondes / P. Ciarlet, J.-C. Paumier // C. R. Acad. Sci. – 1985. – Ser. 1. – V. 301, № 18. – P. 857–860.
- suchungen und Versuche. Erscheint 1998 im Bauingenieur.
11. Gorodetskii, A. S.; Yevzerov, I. D. Computer models of structures. Kyiv: Fakt, 2007. 394 p. (in Russian)
12. Research and development of light welded metal structures made of metal sheets and bended profiles: report of scientific research work. KISI, Department MWC; head A. A. Nilov. Kyiv, 1989. 168 p. No. GP 01880064894. Inv. No. 54–88. (in Russian)
13. Mihailova, T. V. The influence of recurrent closed corrugations of a universal beam upon its carrying ability. *Steel Development and Research for Metal Structures: scientific works*. Moscow: TsNIIPSK, 1988, p. 158–162. (in Russian)
14. Mihailova, T. V. Experimental research of universal beams recurrent corrugations. *Types and Standards of Metal Structures: scientific works*. Moscow: TsNIIPSK, 1987, p. 64–71. (in Russian)
15. Browder, F. E. Nonlinear elliptic boundary value problem. *Bull. Amer. Math. Soc.*, 1963, V. 69, p. 862–874.
16. Ciarlet, P.; Paumier, J.-C. Une justification des equations de Marquerre von Karman pour les coques peu profondes. *C. R. Acad. Sci.*, 1985, Ser. 1, V. 301, No. 18, p. 857–860.

**Лазнюк Михайло Васильович** – кандидат технічних наук, головний конструктор ТОВ «ПЕМ Україна» (Zeman Group). Наукові інтереси: сталеві балки з гофрованою стінкою, методика автоматизованого проектування.

**Євзеров Ісаак Данилович** – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ТОВ «ЛІРА Софт». Наукові інтереси: метод скінченних елементів, чисельні методи розв'язання нелінійних та нестационарних задач математичної фізики.

**Мартинюк Олександр Ярославович** – кандидат технічних наук, директор ТОВ «ПЕМ Україна», Zeman Group. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність обладнання для виробництва будівельних металевих конструкцій, аналіз стійкості автоматичних систем управління.

**Лазнюк Михайл Васильевич** – кандидат технических наук, главный конструктор ООО «ПЕМ Украина» (Zeman Group). Научные интересы: стальные балки с гофрированной стенкой, методика автоматизированного проектирования.

**Евзеров Исаак Данилович** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ООО «ЛИРА Софт». Научные интересы: метод конечных элементов, численные методы решения нелинейных и нестационарных задач математической физики.

**Мартинюк Александр Ярославович** – кандидат технических наук, директор ООО «ПЕМ Украина», Zeman Group. Научные интересы: эксплуатационная надежность оборудования для производства строительных металлических конструкций, анализ устойчивости автоматических систем управления.

**Lazniuk Mykhailo** – Ph.D, the chief designer of «PEM Ukraine» plc (Zeman Group). Scientific interests: steel beams with a corrugated wall, a technique of the automated designing.

**Ievzerov Isaak** – D.Sc., leading research assistant of «LYRE Soft» plc. Scientific interests: a method of final elements, numerical methods of solving nonlinear and non-stationary problems of mathematical physics.

**Martyniuk Oleksandr** – Ph.D, the director of «PEM Ukraine» plc, Zeman Group. Scientific interests: operational reliability of the equipment for manufacture of building metal structures, the analysis of stability of automatic control systems.