УДК 624.072.2.014.2-415:624.014

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-1-72-81

© Г. И. Белый, д-р техн. наук, профессор

© G. I. Belyy, Dr. Sci. Tech., Professor

© М. О. Смирнов, аспирант

© M. O. Smirnov, post-graduate student

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: office@erkon.ru, smirnov.maxim.sk@gmail.com

E-mail: office@erkon.ru, smirnov.maxim.sk@gmail.com

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

IMPROVEMENT OF ENGINEERING METHODS FOR CALCULATING THE STRENGTH OF CORE ELEMENTS OF LIGHT STEEL THIN-WALLED STRUCTURES

Проведено совершенствование методики определения редуцированных сечений при одновременном действии всего комплекса усилий (включая бимоментные). В решении, представленном в безразмерных параметрах, используется алгоритм «Сечение» и положения Eurocode в части редукции сечения. Вначале определяется общий безразмерный параметр усилий, соответствующий предельным условиям обеспечения местной устойчивости и формы сечения. Затем, по мере последующего роста указанного параметра, рассматривается развитие редукции сечения до предельного состояния. При этом редуцированные сечения заменяются на нередуцированные с догружением фиктивными усилиями, компенсирующими редукцию. Предложена быстродействующая методика определения коэффициентов потери местной устойчивости и формы сечения в безразмерных параметрах, с помощью которой могут быть получены более достоверные результаты проверки прочности, чем в действующей нормативной литературе. Методика иллюстрируется на примерах расчета с сопоставлением результатов Eurocode, которые показали достаточно значимые расхождения.

Ключевые слова: стальные тонкостенные холодногнутые профили, многопараметрическое нагружение, редукция сечения, прочность.

There has been carried out an improvement of the methodology for determination of reduced sections with the simultaneous action of the entire complex of efforts (including bimoment ones). The solution presented in dimensionless parameters uses the «Section» algorithm and the EUROCODE provisions regarding section reduction. At the beginning, a general dimensionless parameter of efforts is determined, which corresponds to the limiting conditions for ensuring the local stability and section shape. Then, as the specified parameter grows further, the development of the section reduction to the limiting state is considered. As this takes place, the reduced sections are replaced with unreduced ones with loading with fictitious forces that compensate for the reduction. The authors propose a high-speed method for determining the local stability loss coefficients and the cross-sectional shape in dimensionless parameters, which allows obtaining more reliable results of strength control in comparison with those included in the current regulatory literature. The method is illustrated using calculation examples with comparison of the EUROCODE results, which have shown quite significant discrepancies.

Keywords: steel thin-walled cold-formed profiles, multi-parameter loading, section reduction, strength.

Зарубежные^{1,2,3} и отечественные нормы⁴ проектирования легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) редуцирование сечения рекомендуют определять раздельно от действия каждого силового фактора: продольной силы N , изгибающего момента в одной плоскости M_x , изгибающего момента в другой плоскости M_y . Таким образом, проверка прочности при их совместном действии построена на использовании трех типов не связанных между собой редуцированных сечений. Такой подход не позволяет определять реальную редуциацию сечения, противоречит основным положениям механики и может приводить к недостоверным результатам.

Редуцирование сечения, как известно, является следствием потери местной устойчивости и потери формы сечения, которые могут проявляться на ранних стадиях нагружения. Закритическая работа пластинок, составляющих тонкостенный холодногнутый стержень с учетом физических и геометрических несовершенств, сопровождается выключением из работы части их сечения. Рекомендуемые нормами^{1,2,3} «эффективные ширины» пластинок в зависимости от их гибкости и схемы нагружения базируются на большом объеме экспериментальных и теоретических исследований (см., например, [1–6]).

Способ определения редуцирования сечения при одновременном действии нескольких силовых факторов предложен в работах [7–11], который затем в [12] был распространен на действие всего комплекса усилий (включая бимоментное B_ω). При этом редуцированное сечение заменяется на нередуцированное с нагружением фиктивными силовыми факторами, компенсирующими ослабление сечения.

В настоящей работе приводится совершенствование способа определения редуцирования сечения [12] и соответствующего ей коэффициента потери местной устойчивости и формы сечения

Φ_{loc} , который в инженерной практике может быть использован при проверке прочности стержня с нередуцированным сечением:

$$\frac{1}{\Phi_{loc}} \times \left(\frac{N}{\gamma_c R_y A} + \frac{M_x}{\gamma_c R_y I_x} x_* + \frac{M_y}{\gamma_c R_y I_y} y_* + \frac{B_\omega}{\gamma_c R_y I_\omega} \omega_* \right) \leq 1, (1)$$

где x_* , y_* , ω_* — декартовы и секториальная координаты наиболее напряженного волокна; A — площадь сечения; I_x , I_y , I_ω — линейные и секториальные моменты инерции; γ_c — коэффициент условия работы; R_y — расчетное сопротивление стали.

С целью определения редуцирования сечения рассмотрим стержневой элемент, составленный из спаренных стальных тонкостенных холодногнутых профилей любой формы, например, С-образной (рис. 1).

При этом считаем, что закрепление профилей между собой обеспечивает их совместную работу как сплошностенчатого стержня. В сечении такого стержня предполагается действие всего комплекса усилий N , M_x , M_y , $B_\omega = M_f h$ (см. рис. 1, а). За общий параметр нагружения примем коэффициент продольной силы $\varphi = N/(R_y A)$. Остальные усилия M_x , M_y , B_ω выразим через соответствующие φ относительные одноосные и секториальные эксцентриситеты:

$$m_x = \frac{e_y}{\rho_x}; m_y = \frac{e_x}{\rho_y}; m_\omega = \frac{\omega_N}{\rho_\omega}, (2)$$

где $e_y = \frac{M_x}{N}$; $e_x = \frac{M_y}{N}$; $\omega_N = \frac{B_\omega}{N}$; $\rho_x = \frac{W_{xc}}{A}$; $\rho_y = \frac{W_{yc}}{A}$; $\rho_\omega = \frac{W_{\omega c}}{A}$; W_{xc} , W_{yc} , $W_{\omega c}$ — линейные и секториальные моменты сопротивления наиболее напряженного волокна с координатами x_* , y_* , ω_* .

Учитывая (2), напряжения в нередуцированном сечении, представим также в безразмерных параметрах

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{R_y} = \varphi(1 + m_x \bar{y} + m_y \bar{x} + m_\omega \bar{\omega}), (3)$$

где $\bar{y} = \frac{y}{y_*}$; $\bar{x} = \frac{x}{x_*}$; $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_*}$.

Используя предельные условия обеспечения местной устойчивости и формы сечения, которые предусмотрены, например, в EN 1993-1-3–2004³, определим соответствующий параметр продольной силы начального нагружения:

¹ AISI S100–2007. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington: American Iron and Steel Institute, 2007. 198 p.

² AS/NZS 4600:2005. Australian/New Zealand Standard. Cold-formed steel structures. Sydney/Wellington: Standards Australia/Standards New Zealand, 2005. 111 p.

³ EN 1993-1-3–2004. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1–3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. European Committee for Standardization, 2004.

⁴ СН 260.1325800. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. М., 2016. 116 с.

Рис. 1. Схемы загрузки стержня в сечениях: а — начальное нагружение до появления редукции; б — i -й этап нагружения, сопровождающийся редукцией сечения; в — i -й этап нагружения с учетом фиктивных усилий в нередуцированном сечении

$$\varphi_n = \bar{\sigma}_{\max, n} (1 + m_x + m_y + m_\omega)^{-1}, \quad (4)$$

где $\bar{\sigma}_{\max, n}$ — максимальные относительные напряжения наиболее нагруженного волокна, при которых еще обеспечивалась местная устойчивость. На рис. 1, а показаны усилия N_n , M_{xn} , M_{yn} , $B_{\omega n}$, соответствующие φ_n .

При последующем нагружении, вызывающем рост максимальных напряжений от $\bar{\sigma}_{\max, n}$ до 1, появится и будет развиваться до предельного состояния ($\bar{\sigma}_{\max} = 1$) редукция сечения. Для определения последней разобьем это нагружение (выраженное через рост $\bar{\sigma}_{\max}$) на m ступеней:

$$\Delta \bar{\sigma}_{\max} = \frac{1 - \bar{\sigma}_{\max, n}}{m}. \quad (5)$$

Используя (5), представим напряженное состояние в нередуцированном сечении на $(i + 1)$ -м этапе нагружения ($i = 1, 2, \dots, m$):

$$\bar{\sigma}_{(i+1)}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\omega}) = \frac{[\bar{\sigma}_{\max, n} + (i + 1)\Delta \bar{\sigma}_{\max}](1 + m_{xi}^* \bar{y} + m_{yi}^* \bar{x} + m_{\omega i}^* \bar{\omega})}{1 + m_{xi}^* + m_{yi}^* + m_{\omega i}^*}, \quad (6)$$

$$\text{где } m_{xi}^* = \frac{m_x + m_{x\varphi i} k_{\varphi i}}{1 + k_{\varphi i}}; \quad m_{yi}^* = \frac{m_y + m_{y\varphi i} k_{\varphi i}}{1 + k_{\varphi i}}; \\ m_{\omega i}^* = \frac{m_\omega + m_{\omega\varphi i} k_{\varphi i}}{1 + k_{\varphi i}}; \quad k_{\varphi i} = \frac{y_{\varphi i}}{y_i}.$$

Относительные эксцентриситеты фиктивных усилий $m_{x\varphi i}$, $m_{y\varphi i}$, $m_{\omega\varphi i}$ и параметры действующих φ_i и фиктивных $\varphi_{\varphi i}$ усилий предыдущего i -го

загружения могут быть определены с помощью алгоритма «Сечение» [12], учитывающего особенности расчета стержней с редуцированным сечением.

На рис. 1, б показано редуцированное сечение на i -м этапе нагружения с параметром φ_i действующих усилий N_i , M_{xi} , M_{yi} , $B_{\omega i} = M_{fi} h$, которые могут быть определены, например, по EN 1993-1-3–2004. Ослабления сечения показаны заштрихованной частью и разбиты на площадки ΔA_{oj} с координатами x_{oj} , y_{oj} , ω_{oj} ($j = 1, 2, \dots, n_{oi}$). Общее ослабление будет составлять $A_{oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj}$.

Следуя [12], воспользуемся гипотезой плоских сечений и секториальных площадей, в соответствии с которой относительные деформации любого k -го волокна можно представить в виде

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 - v'' y_k - u'' x_k - \theta'' \omega_k, \quad (7)$$

где ε_0 — относительная деформация оси стержня, имеющей кривизны v'' , u'' при изгибе относительно главных осей нередуцированного сечения x и y соответственно; θ'' — вторая производная угла закручивания сечения.

Учитывая упругую работу материала $\sigma_k = \varepsilon_k E$ и кинематические предпосылки (7), представим уравнение равновесия в безразмерных параметрах на i -м этапе загрузки [12]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= \bar{\varepsilon}_{oi} \cdot \bar{A}_{ef,i} + \bar{v}_i'' \cdot \bar{y}_{ci} + \bar{u}_i'' \cdot \bar{x}_{ci} + \bar{\theta}_i'' \cdot \bar{\omega}_{ci}; \\ \varphi_i \cdot m_x &= -\bar{\varepsilon}_{oi} \cdot \bar{y}_{ci} - \bar{v}_i'' \cdot \bar{i}_{x,ef,i}^2 + \bar{u}_i'' \cdot \bar{i}_{xy,oi}^2 + \bar{\theta}_i'' \cdot \bar{\omega}_{cx,i}; \\ \varphi_i \cdot m_y &= -\bar{\varepsilon}_{oi} \cdot \bar{x}_{ci} + \bar{v}_i'' \cdot \bar{i}_{xy,oi}^2 - \bar{u}_i'' \cdot \bar{i}_{y,ef,i}^2 + \bar{\theta}_i'' \cdot \bar{\omega}_{cy,i}; \\ \varphi_i \cdot m_\omega &= -\bar{\varepsilon}_{oi} \cdot \bar{\omega}_{ci} + \bar{v}_i'' \cdot \bar{\omega}_{cx,i} + \bar{u}_i'' \cdot \bar{\omega}_{cy,i} - \bar{\theta}_i'' \cdot \bar{i}_{\omega,ef,i}^2 \end{aligned} \right\} (8)$$

где $\bar{\varepsilon}_{oi} = \varepsilon_{oi} \frac{E}{R_y}$; $\bar{v}_i'' = v_i'' \frac{E \rho_x}{R_y}$; $\bar{u}_i'' = u_i'' \frac{E \rho_y}{R_y}$; $\bar{\theta}_i'' = \theta_i'' \frac{E \rho_\omega}{R_y}$;

$$\bar{A}_{ef,i} = \frac{A_{ef,i}}{A}; \bar{y}_{ci} = \frac{S_{x,oi}}{A \rho_x}; \bar{x}_{ci} = \frac{S_{y,oi}}{A \rho_y}; \bar{\omega}_{ci} = \frac{S_{\omega,oi}}{A \rho_\omega};$$

$$S_{x,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} y_{oj}; S_{y,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} x_{oj};$$

$$S_{\omega,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} \omega_{oj}; A_{ef,i} = A - A_{oi}; A_{oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj};$$

$$\bar{i}_{x,ef,i}^2 = \frac{J_{x,ef,i}}{\rho_x^2 A}; \bar{i}_{y,ef,i}^2 = \frac{J_{y,ef,i}}{\rho_y^2 A}; \bar{i}_{xy,oi}^2 = \frac{J_{xy,oi}}{\rho_x \rho_y A};$$

$$J_{x,ef,i} = J_x - J_{x,oi}; J_{y,ef,i} = J_y - J_{y,oi};$$

$$J_{x,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} y_{oj}^2; J_{y,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} x_{oj}^2;$$

$$J_{xy,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} x_{oj} y_{oj}; \bar{\omega}_{cx,i} = \frac{S_{\omega x,oi}}{\rho_\omega \rho_x A}; \bar{\omega}_{cy,i} = \frac{S_{\omega y,oi}}{\rho_\omega \rho_y A};$$

$$\bar{i}_{\omega,ef,i}^2 = \frac{J_{\omega,ef,i}}{\rho_\omega^2 A}; J_{\omega,ef,i} = J_\omega - J_{\omega,oi}; J_{\omega,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} \omega_{oj}^2;$$

$$S_{\omega x,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} \omega_{oj} y_{oj}; S_{\omega y,oi} = \sum_{j=1}^{n_{oi}} \Delta A_{oj} \omega_{oj} x_{oj}.$$

Решив линейную систему уравнений (8), получим

$$\bar{\varepsilon}_{oi} = c_{1i} \varphi_i; \bar{v}_i'' = -c_{2i} \varphi_i; \bar{u}_i'' = -c_{3i} \varphi_i; \bar{\theta}_i'' = -c_{4i} \varphi_i, \quad (9)$$

где c_{1i} , c_{2i} , c_{3i} и c_{4i} — безразмерные коэффициенты, зависящие от геометрических характеристик редуцированного сечения, составленные относительно главных осей нередуцированного сечения и относительных эксцентриситетов m_x , m_y , m_ω .

Имея (9), определим:

$$\begin{aligned} \varphi_i &= (\bar{\sigma}_{\max,н} + i \cdot \Delta \bar{\sigma}_{\max}) \times \\ &\times \left(c_{1i} + c_{2i} \frac{y^*}{\rho_x} + c_{3i} \frac{x^*}{\rho_y} + c_{4i} \frac{\omega^*}{\rho_\omega} \right)^{-1}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\varphi_{\Phi i} = \varphi_i (c_{1i} \bar{A}_{oi} + c_{2i} \bar{y}_{ci} + c_{3i} \bar{x}_{ci} + c_{4i} \bar{\omega}_{ci}); \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{x,\Phi i} &= \frac{\varphi_i}{\varphi_{\Phi i}} (c_{1i} \bar{y}_{ci} + c_{2i} \bar{i}_{x,oi}^2 + c_{3i} \bar{i}_{xy,oi}^2 + c_{4i} \bar{\omega}_{cx,i}); \\ m_{y,\Phi i} &= \frac{\varphi_i}{\varphi_{\Phi i}} (c_{1i} \bar{x}_{ci} + c_{2i} \bar{i}_{xy,oi}^2 + c_{3i} \bar{i}_{y,oi}^2 + c_{4i} \bar{\omega}_{cy,i}); \\ m_{\omega,\Phi i} &= \frac{\varphi_i}{\varphi_{\Phi i}} (c_{1i} \bar{\omega}_{ci} + c_{2i} \bar{\omega}_{cx,i} + c_{3i} \bar{\omega}_{cy,i} + c_{4i} \bar{i}_{\omega,oi}^2), \end{aligned} \right\} (12)$$

где $\bar{A}_{oi} = \frac{A_{oi}}{A}$; $\bar{i}_{x,oi}^2 = \frac{J_{x,oi}}{\rho_x^2 A}$; $\bar{i}_{y,oi}^2 = \frac{J_{y,oi}}{\rho_y^2 A}$; $\bar{i}_{\omega,oi}^2 = \frac{J_{\omega,oi}}{\rho_\omega^2 A}$.

Параметры действующих φ_i и фиктивных $\varphi_{\Phi i}$ усилий с учетом относительных эксцентриситетов последних $m_{x\Phi i}$, $m_{y\Phi i}$, $m_{\omega\Phi i}$ характеризуют общее загрузку усилиями N_i^* , M_{xi}^* , M_{yi}^* , $B_{\omega i}^* = M_{fi}^* h$, действующими в нередуцированном сечении, показанном на рис. 1, в.

Таким образом, получив результаты расчета с предыдущего i -го этапа нагружения (10), (11), (12), имеем все необходимые данные для определения напряженного состояния (6), соответствующего $(i + 1)$ -му этапу нагружения. Последнее используем, чтобы найти редукцию сечения с общим ослаблением $A_{o(i+1)}$ и с помощью алгоритма «Сечение» находим соответствующие этому загрузению параметры действующих и фиктивных усилий. Далее, на последующих этапах нагружения, расчет проводится аналогичным образом.

Выполнив расчеты последнего этапа нагружения $i = m$, имеем φ_m , который позволяет определить снижение несущей способности, связанное с редукцией сечения, выраженное коэффициентом потери местной устойчивости:

$$\varphi_{loc} = \varphi_m (1 + m_x + m_y + m_\omega)^{-1}. \quad (13)$$

На примерах расчета на прочность при трехпараметрическом нагружении N , M_x , M_y , соответствующих ему безразмерных параметров φ , m_x , m_y ($\varphi = N_{ef}/(R_y A)$), проиллюстрируем зависимость коэффициента потери местной устойчивости и формы сечения φ_{loc} (13) от относительных эксцентриситетов m_x , m_y и сопоставим их с результатами расчета по EN 1993-1-3-2004:

$$\begin{aligned} \varphi_{loc,EN} &= \varphi_m (1 + m_x + m_y + m_\omega) \times \\ &\times \left[\frac{A}{A_{ef}} + \frac{(e_y + y_c) A}{W_{x,ef}} + \frac{(e_x + x_c) A}{W_{y,ef}} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (14)$$

где y_c , x_c — смещения центра тяжести сечения, вызванные его редукцией при действии M_x и M_y соответственно.

Таблица 1

**Разница между φ_{loc} и $\varphi_{loc,EN}$ в процентах для профиля
Double Channel 190×90×20×2**

m_y	m_x					
	0,01	0,5	1	1,5	2	3
0,01	-0,13	1,94	-1,74	-5,05	-7,25	-10,10
0,5	8,21	11,14	8,48	7,32	4,31	-0,01
1	8,22	10,42	8,81	7,99	6,79	3,17
1,5	7,89	9,49	8,28	7,28	7,98	4,67
2	7,18	8,53	7,68	6,70	6,00	5,25
3	2,00	6,49	5,67	4,99	4,34	2,83

Таблица 2

**Разница между φ_{loc} и $\varphi_{loc,EN}$ в процентах для профиля
Double Channel 270×50×20×2**

m_y	m_x					
	0,01	0,5	1	1,5	2	3
0,01	0,08	-3,61	-3,75	-4,40	-5,81	-7,10
0,5	-4,53	-8,08	-7,11	-6,64	-7,54	-8,34
1	-1,89	-4,00	-3,76	-3,45	-4,45	-5,60
1,5	0,41	-1,67	-1,74	-2,12	-2,19	-3,46
2	1,66	-0,19	-0,34	-0,78	-1,16	-1,76
3	2,67	1,36	1,22	1,05	0,72	0,72

На рис. 2, 3 представлены результаты расчета для стержней, составленных из спаренных С-образных профилей двух типоразмеров Double Channel 190×90×20×2 и Double Channel 270×50×20×2 соответственно. Графики зависимости φ_{loc} (13) по предлагаемой методике (сплошные линии) и $\varphi_{loc,EN}$ по EN 1993-1-3-2004 (14) (пунктирные линии), а также редуцированные сечения $\bar{A}_{ef} = \frac{A_{ef}}{A}$ (штрихпунктирные линии) от m_x (изгиб в плоскости стенки) при фиксированных значениях m_y представлены на рис.: 2, а, 3, а при $m_y = 0$; рис. 2, б, 3, б при $m_y = 1$ и рис. 2, в, 3, в при $m_y = 2$.

Из графиков видно, что в зависимости от типа сечения и соотношения m_x и m_y использование методики EN 1993-1-3-2004 может приводить как к завышенным значениям предельного состояния (см. рис. 2, а, 3), характеризующимся φ_{loc} (в нашем случае до 10 %), так и к заниженным (см. рис. 2, б, в) в пределах 4,5...12 %. Более подробно результаты представлены в табл. 1 и 2.

На тех же рис. 2, 3 представлены также зависимости редуцированных сечений $\bar{A}_{ef} = \frac{A_{ef}}{A}$ от

параметров загрузки m_x , m_y (см. штрихпунктирные линии). Сопоставляя графики $\bar{A}_{ef}$ и φ_{loc} на рис. 2, можно увидеть, что при относительно больших $\bar{A}_{ef}$ редукция весьма существенно снижает несущую способность. Это относится к ситуациям, когда потеря местной устойчивости происходит преимущественно в широких полках (см. редуцированные сечения на рис. 4, б и 4, в). Однако в случаях относительно небольшой ширины профиля и вытянутой стенки, которая в основном и теряет местную устойчивость (см. рис. 5, б и 5, в), сечение обладает повышенной прочностью.

На рис. 4 и 5 представлены реальные редуцированные сечения двух типоразмеров, на которых можно увидеть потерю местной устойчивости в виде отсутствия части сечения и потерю формы сечения за счет редукции толщины участков с краевыми отгибами. Редуцированные сечения, представленные на рис. 4, а и 5, а, соответствуют центральному сжатию, на рис. 4, б и 5, б — сжатию с изгибом в плоскости стенки ($m_x = 3$, $m_y = 0$), на рис. 4, в и 5, в — сжатию с изгибом в двух плоскостях ($m_x = 2$, $m_y = 1$).

Рис. 2. Графики зависимости $\varphi_{loc,EN}$, φ_{loc} , $\bar{A}_{ef}$ от m_x для Double Channel 190×90×20×2 при: а — $m_y = 0$; б — $m_y = 1$; в — $m_y = 2$

Рис. 4. Реальная редукция сечений для Double Channel 190x90x20x2 при:
а — $m_x = 0, m_y = 0$; б — $m_x = 3, m_y = 0$; в — $m_x = 2, m_y = 1$

Рис. 5. Реальная редукция сечений для Double Channel 270x50x20x2 при:
а — $m_x = 0, m_y = 0$; б — $m_x = 3, m_y = 0$; в — $m_x = 2, m_y = 1$

Таблица 3

Отношение $1 - \varphi_{loc}$ к $\bar{A}_0$ для профиля
Double Channel 190x90x20x2

m_y	m_x					
	0,01	0,5	1	1,5	2	3
0,01	1,009	1,057	1,321	1,467	1,581	1,724
0,5	1,589	1,312	1,279	1,538	1,668	1,829
1	1,641	1,707	1,789	1,799	1,852	2,076
1,5	1,776	1,903	2,063	2,322	2,077	2,312
2	1,967	2,188	2,472	2,985	3,240	2,493
3	2,579	2,808	2,931	3,061	3,122	2,936

Таблица 4

Отношение $1 - \varphi_{loc}$ к $\bar{A}_0$ профиля Double Channel для 270×50×20×2

m_y	m_x					
	0,01	0,5	1	1,5	2	3
0,01	0,993	0,892	0,860	0,865	0,971	1,079
0,5	0,843	0,829	0,774	0,812	0,920	1,039
1	0,819	0,759	0,725	0,776	0,885	1,012
1,5	0,756	0,746	0,733	0,756	0,868	1,000
2	0,724	0,730	0,729	0,805	0,860	1,003
3	0,727	0,764	0,800	0,865	0,996	1,191

В табл. 3 показано, что снижение несущей способности $\varphi_0 = 1 - \varphi_{loc}$ (при преимущественной потере местной устойчивости полки) может в несколько раз превосходить ослабление сечения $\bar{A}_0 = 1 - \bar{A}_{ef}$. Если же местную устойчивость теряет стенка, то эти соотношения становятся меньше единицы (табл. 4).

Расчеты по предложенной в безразмерных параметрах методике определения редуцированных сечений при одновременном действии всего комплекса усилий и соответствующих им коэффициентов потери местной устойчивости на несколько порядков быстрее, чем с помощью МКЭ. Она позволяет получать достоверные результаты расчета на прочность по сравнению со стандартными нормативными методиками^{1,2,3,4}. С ее помощью могут быть найдены коэффициенты потери местной устойчивости φ_{loc} для большого спектра типов сечений и комбинаций расчетных усилий, которые позволят значительно упростить существующую^{1,2,3,4} проверку прочности стержневых элементов ЛСТК.

Библиографический список

1. Winter G. Strength of Thin Steel Compression Flanges // Transactions ASCE. 1947. Vol. 112. Pp. 527–554.
2. Winter G. Thin-Walled Structures – Theoretical Solutions and Test Results // Preliminary Publications of the Eighth Congress, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). New York, 1968. Pp. 101–112.
3. Peköz T. Development of a Unified Approach to the Design of Cold-Formed Steel Members // American Iron and Steel Institute Research Report, 1987. CF 87-1.
4. Moldovan A. Compression Tests on Cold-Formed Steel Columns with Monosymmetrical Section // Thin-Walled Structures. 1994. Vol. 20 (1–4). Pp. 241–252.

5. Shafer B. W. Designing Cold-Formed Steel Using the Direct Strength Method // 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, October 26–27, 2006, Orlando, Florida.

6. Shafer B. W. Local, distortional, and Euler buckling of thin-walled columns // J. Struct. Eng. 2002. Vol. 128 (3). Pp. 289–299.

7. Айрумян Э. Л., Белый Г. И. Исследование работы стальной формы из холодногнутых профилей с учетом их местной и общей устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 5. С. 41–44.

8. Белый Г. И. К расчету на устойчивость стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 46–51.

9. Белый Г. И., Кузнецов А. Ю. Влияние редукиции сечения на устойчивость стержневых элементов конструкций из спаренных холодногнутых тонкостенных профилей // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 57–63.

10. Белый Г. И. Новые положения в инженерной методике расчета на устойчивость стальных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 75–80.

11. Белый Г. И. К определению редуцированных сечений стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 33–37.

12. Белый Г. И. К расчету на прочность стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 4 (75). С. 13–17.

References

1. Winter G. Strength of Thin Steel Compression Flanges. Transactions ASCE. 1947, 112, pp. 527–554.
2. Winter G. Thin-Walled Structures-Theoretical Solutions and Test Results. Proc. of the Eighth Congress,

International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). New York, 1968, pp. 101–112.

3. Peköz T. *Development of a Unified Approach to the Design of Cold-Formed Steel Members*. American Iron and Steel Institute Research Report, 1987. CF 87-1.

4. Moldovan A. Compression Tests on Cold-Formed Steel Columns with Monosymmetrical Section. *Thin-Walled Structures*, 1994, vol. 20 (1–4), pp. 241–252.

5. Shafer B. W. *Designing Cold-Formed Steel Using the Direct Strength Method*. Proc. of the 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures October 26–27, 2006, Orlando, Florida.

6. Shafer B. W. Local, distortional, and Euler buckling of thin-walled columns. *J. Struct. Eng.*, 2002, vol. 128 (3), pp. 289–299.

7. Ayrumyan E. L. Belyy G. I. *Issledovanie raboty stal'noy formy iz kholodnognutnykh profiley s uchetom ikh mestnoy i obshchey ustoychivosti* [Study of the operation of a steel truss made of cold-bent profiles, taking into account their local and general stability]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2010, no. 5, pp. 41–44.

8. Belyy G. I. *K raschetu na ustoychivost' sterzhnevnykh elementov konstruktsiy iz tonkostennykh kholodnognutnykh profiley* [The calculation of rod elements stability of structures made of thin-walled cold-formed profiles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56), pp. 46–51.

9. Belyy G. I., Kuznetsov A. Yu. *Vliyanie reduktsii secheniya na ustoychivost' sterzhnevnykh elementov konstruktsiy iz sparennykh kholodnognutnykh tonkostennykh profiley* [The influence of the section reduction on the stability of bar structural elements of the design made of doubled cold-formed profiles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 4 (57), pp. 57–63.

10. Belyy G. I. *Novye polozheniya v inzhenernoy metodike rascheta na ustoychivost' stal'nykh sterzhnevnykh ehlementov konstruktsiy iz kholodnognutnykh profiley* [New provisions in the engineering calculation procedure on the stability of steel bar elements of structures made of cold-formed profiles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 75–80.

11. Belyy G. I. *K opredeleniyu reduktirovannykh secheniy sterzhnevnykh ehlementov legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsiy* [About calculation of reduced cross sections of bar elements of light weight thin-walled cold formed steel structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 5 (64), pp. 33–37.

12. Belyy G. I. *K raschetu na prochnost' sterzhnevnykh elementov legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsiy pri mnogoparametricheskom zagruzhenii* [Calculation of the strength of bar structural elements of light weight thin-walled steel structures under polyvalent loading]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 4 (75), pp. 13–17.