УДК 624.072.2.014.2-415:624.014

© Г. И. Белый, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: office@erkon.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-4-13-17

© G. I. Belyy, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: office@erkon.ru

К РАСЧЕТУ НА ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ЗАГРУЖЕНИИ

CALCULATION OF THE STRENGTH OF BAR STRUCTURAL ELEMENTS OF LIGHT WEIGHT THIN-WALLED STEEL STRUCTURES UNDER POLYVALENT LOADING

Проведено теоретическое обоснование определения редуцированных сечений при одновременном действии всего комплекса усилий (включая бимоментные) в сечениях стержневых элементов конструкций из стальных холодногнутых профилей. В обосновании используются алгоритм «сечение» и положение Еврокода в части редукиции сечения отдельных пластинок, составляющих стержень. Редуцированные сечения заменяются на нередуцированные с догрузением фиктивными усилиями, компенсирующими редукицию. Предложена быстродействующая (в аналитическом виде) методика определения коэффициентов потери местной устойчивости, с помощью которой могут быть получены более достоверные результаты проверки прочности, чем в действующей нормативной литературе.

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

The article presents theoretical substantiation of determining the reduced section under simultaneous action of the whole set of forces (including bimoment ones) in the sections of bar structural elements of structures made of cold-formed steel profiles. The substantiation includes using the «section» algorithm and the Eurocode provision concerning the section reduction of individual plates making up the bar. Reduced sections are replaced with non-reduced ones with additional loading of fictive forces compensating the reduction. An effective fast-acting (in the analytical form) method for determining the coefficients of local stability loss is proposed, which can be used for obtaining more reliable results of strength testing than by means of methods described in the valid regulatory literature.

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

Проверку прочности и устойчивости стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), как известно, следует выполнять с учетом потери местной устойчивости, которая может проявляться на ранних стадиях нагружения. Закритическая работа пластинок, составляющих стальной тонкостенный холодногнутый стержень с учетом физических и геометрических несовершенств, сопровождается

выключением из работы части их сечений. За рубежом нормативные методы^{1,2,3} определения

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.

«эффективной ширины» пластинок, в зависимости от их гибкости и схемы нагружения, достаточно хорошо обоснованы и базируются на большом объеме экспериментальных и теоретических исследований (см., например, [1–6]).

Таким образом, современные практические методы расчета с учетом потери местной устойчивости отдельных пластинок позволяют определять оставшееся в работе стержня ослабленное (редуцированное) сечение.

Зарубежные^{1,2,3} и отечественные⁴ нормы проектирования ЛСТК рекомендуют определять редуцицию сечения отдельно, от действия каждого силового фактора: продольной силы N , изгибающего момента в одной плоскости M_x , изгибающего момента в другой плоскости M_y . При этом проверка прочности при их совместном действии построена на основе использования трех типов редуцированных сечений, соответствующих N , M_x , M_y , что противоречит основным положениям механики и может приводить к недопустимым результатам.

В работах [7–10] с помощью, например, Еврокода³ предложен способ определения редуциции сечения при одновременном действии нескольких силовых факторов. При этом редуцированное сечение заменяется на нередуцированное с догружением фиктивными силовыми факторами, компенсирующими ослабления сечения,

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

которые определяются итерационным путем по мере возрастания усилий. С целью ускорения итерационного процесса в [11] редуциция сечения определялась в предельном состоянии.

В настоящей работе приводится обобщение метода фиктивных усилий [11] на общий случай нагружения с рассмотрением напряженных состояний до и после потери местной устойчивости. С этой целью рассмотрим стержневой элемент, составленный из спаренных стальных тонкостенных холодногнутых профилей любой формы, например, «С»-образной (рис. 1, а). При этом считается, что закрепления профилей между собой обеспечивают их совместную работу как сплошностенчатого стержня. В сечениях такого стержня предполагается действие всего комплекса усилий N , M_x , M_y , $B_\omega = M_\omega h$ (см. рис. 1, а). Общим параметром нагружения может являться коэффициент продольной силы $\varphi = N/R_A$. Тогда усилия M_x , M_y , B_ω следует выразить через соответствующие « φ » относительные одноосные и секторальный эксцентриситеты

$$m_x = \frac{e_y}{\rho_x}; m_y = \frac{e_x}{\rho_y}; m_\omega = \frac{\omega_N}{\rho_\omega}, \quad (1)$$

$$\text{где } e_y = \frac{M_x}{N}; e_x = \frac{M_y}{N}; \omega_N = \frac{B_\omega}{N}; \rho_x = \frac{W_{xc}}{A}; \rho_y = \frac{W_{yc}}{A}; \rho_\omega = \frac{W_{\omega c}}{A}.$$

Следуя (1), напряжения также представим в безразмерных параметрах

Рис. 1. Схемы нагружения стержня в сечениях: а — начальное нагружение до появления редукиции; б — дополнительное догружение до предельного состояния редуцированного сечения; в — нагружение реальными и фиктивными усилиями нередуцированного сечения

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}}{R_y} = \varphi(1 + m_x \cdot \bar{y} + m_y \cdot \bar{x} + m_\omega \cdot \bar{\omega}), \quad (2)$$

где $\bar{y} = \frac{y}{y_*}$; $\bar{x} = \frac{x}{x_*}$; $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_*}$; x_*, y_*, ω_* — декартовы и секторальная координаты наиболее напряженного волокна.

По предельным условиям обеспечения местной устойчивости, которые предусмотрены, например, в Еврокоде³, определим соответствующий параметр начального нагружения

$$\varphi_n = \bar{\sigma}_{\max, n} (1 + m_x + m_y + m_\omega)^{-1}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_{\max, n}$ — максимальные относительные напряжения, при которых еще обеспечивалась местная устойчивость.

На рис. 1, а показаны усилия $N_n, M_{x,n}, M_{y,n}, B_{\omega,n}$, соответствующие φ_n .

Рассматривая предельное состояние в нередуцированном сечении при упругой работе материала, определим общий параметр нагружения $\varphi_{np} = (1 + m_x + m_y + m_\omega)^{-1}$ и догружающий φ_n параметр $\varphi_d = \varphi_{np} - \varphi_n$. При этом предельное напряженное состояние в нередуцированном сечении примет вид

$$\bar{\sigma}_{np} = (1 + m_x \cdot \bar{y} + m_y \cdot \bar{x} + m_\omega \cdot \bar{\omega}) \times \\ \times (1 + m_x + m_y + m_\omega)^{-1}, \quad (4)$$

по которому с помощью Еврокода³ в первом приближении определим редукцию сечения (см. рис. 1, б). Ослабления сечения показаны заштрихованной частью и разбиты на площадки площадью ΔA_{oi} с координатами $x_{oi}, y_{oi}, \omega_{oi}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n_o$).

Составим уравнение равновесия в редуцированном сечении (см. рис. 1, б) относительно прежних осей x, y , которые стали неглавными. Следуя алгоритму «Сечение» [12], воспользуемся гипотезой плоских сечений и секториальных площадей, в соответствии с которыми относительные деформации любого k -го волокна можно представить в виде

$$\varepsilon_k = \varepsilon_o - v'' \cdot y_k - u'' \cdot x_k - \theta'' \cdot \omega_k, \quad (5)$$

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

Учитывая упругую работу материала $\sigma_k = \varepsilon_k E$ и кинематические предпосылки (5), представим

уравнение равновесия в безразмерных параметрах:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{ef} &= \bar{\varepsilon}_o \cdot \bar{A}_{ef} + \bar{v}'' \cdot \bar{y}_c + \bar{u}'' \cdot \bar{x}_c + \bar{\theta}'' \cdot \bar{\omega}_c; \\ \Phi_{ef} \cdot m_x &= -\bar{\varepsilon}_o \cdot \bar{y}_c - \bar{v}'' \cdot \bar{i}_{x,ef}^2 + \bar{u}'' \cdot \bar{i}_{xy,0}^2 + \bar{\theta}'' \cdot \bar{\omega}_{cx}; \\ \Phi_{ef} \cdot m_y &= -\bar{\varepsilon}_o \cdot \bar{x}_c + \bar{v}'' \cdot \bar{i}_{xy,0}^2 - \bar{u}'' \cdot \bar{i}_{\phi,ef}^2 + \bar{\theta}'' \cdot \bar{\omega}_{cy}; \\ \Phi_{ef} \cdot m_\omega &= -\bar{\varepsilon}_o \cdot \bar{\omega}_c + \bar{v}'' \cdot \bar{\omega}_{cx} + \bar{u}'' \cdot \bar{\omega}_{cy} - \bar{\theta}'' \cdot \bar{i}_{\omega,ef}^2, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_o &= \varepsilon_o \frac{E}{R_y}; \bar{v}'' = v'' \frac{E \cdot \rho_x}{R_y}; \bar{u}'' = u'' \frac{E \cdot \rho_y}{R_y}; \\ \bar{\theta}'' &= \theta'' \frac{E \cdot \rho_\omega}{R_y}; \bar{A}_{ef} = \frac{A_{ef}}{A}; \bar{y}_c = \frac{S_{x,o}}{A \cdot \rho_x}; \bar{x}_c = \frac{S_{y,o}}{A \cdot \rho_y}; \\ \bar{\omega}_c &= \frac{S_{\omega,o}}{A \cdot \rho_\omega}; S_{x,o} = \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot y_{oi}; S_{y,o} = \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot x_{oi}; \\ S_{\omega,o} &= \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot \omega_{oi}; A_{ef} = A - A_o; A_o = \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi}; \\ \bar{i}_{x,ef}^2 &= \frac{J_{x,ef}}{\rho_x^2 \cdot A}; \bar{i}_{y,ef}^2 = \frac{J_{y,ef}}{\rho_y^2 \cdot A}; \bar{i}_{xy,0}^2 = \frac{J_{xy,0}}{\rho_x \rho_y \cdot A}; \\ J_{x,ef} &= J_x - J_{x,o}; J_{y,ef} = J_y - J_{y,o}; \\ J_{x,o} &= \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot y_{oi}^2; J_{y,o} = \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot x_{oi}^2; \\ J_{xy,0} &= \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot x_{oi} \cdot y_{oi}; \bar{\omega}_{cx} = \frac{S_{\omega x,o}}{\rho_\omega \cdot \rho_x \cdot A}; \\ \bar{\omega}_{cy} &= \frac{S_{\omega y,o}}{\rho_\omega \cdot \rho_y \cdot A}; \bar{i}_{\omega,ef}^2 = \frac{J_{\omega,ef}}{\rho_\omega^2 \cdot A}; \\ J_{\omega,ef} &= J_\omega - J_{\omega,o}; J_{\omega,o} = \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot \omega_{oi}^2; \\ S_{\omega x,o} &= \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot \omega_{oi} \cdot y_{oi}; S_{\omega y,o} = \sum_{i=1}^{n_o} \Delta A_{oi} \cdot \omega_{oi} \cdot x_{oi}. \end{aligned}$$

Решив линейную систему уравнений (6), получим

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_o &= c_1 \cdot \Phi_{ef}; \bar{v}'' = -c_2 \cdot \Phi_{ef}; \bar{u}'' = -c_3 \cdot \Phi_{ef}; \\ \bar{\theta}'' &= -c_4 \cdot \Phi_{ef}, \end{aligned} \quad (7)$$

где c_1, c_2, c_3 и c_4 — безразмерные коэффициенты, зависящие от геометрических характеристик редуцированного сечения, составленные относительно главных осей нередуцированного сечения и относительных эксцентриситетов. В частности, при $B_\omega = \theta'' = 0$ коэффициенты c_1, c_2 и c_3 представлены в работе [11].

Используя (7), получим дополнительный (предельный) параметр усилий для редуцированного сечения:

$$\Phi_{ef,д} = (1 - \bar{\sigma}_{\max,н}) \cdot (c_1 + c_2 \frac{y_*}{\rho_x} + c_3 \frac{x_*}{\rho_y} + c_4 \frac{\omega_*}{\rho_y})^{-1}. \quad (8)$$

Возвращаясь к нередуцированному сечению (см. рис. 1, в), определим параметр фиктивных усилий и его относительные эксцентриситеты, которые были бы восприняты ослаблениями сечения A_o :

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\Phi} &= \Phi_{ef,д} (c_1 \cdot \bar{A}_o + c_2 \cdot \bar{y}_c + c_3 \cdot \bar{x}_c + c_4 \cdot \bar{\omega}_c); \\ m_{x,\Phi} &= \frac{\Phi_{ef,д}}{\Phi_{\Phi}} (c_1 \cdot \bar{y}_c + c_2 \cdot \bar{i}_{x,o}^2 + c_3 \cdot \bar{i}_{xy,o}^2 + c_4 \cdot \bar{\omega}_{cx}); \\ m_{y,\Phi} &= \frac{\Phi_{ef,д}}{\Phi_{\Phi}} (c_1 \cdot \bar{x}_c + c_2 \cdot \bar{i}_{xy,o}^2 + c_3 \cdot \bar{i}_{y,o}^2 + c_4 \cdot \bar{\omega}_{cy}); \\ m_{\omega,\Phi} &= \frac{\Phi_{ef,д}}{\Phi_{\Phi}} (c_1 \cdot \bar{\omega}_c + c_2 \cdot \bar{\omega}_{cx} + c_3 \cdot \bar{\omega}_{cy} + c_4 \cdot \bar{i}_{\omega,o}^2), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\text{где } \bar{A}_o = \frac{A_o}{A}; \bar{i}_{x,o}^2 = \frac{J_{x,o}}{\rho_x^2 \cdot A}; \bar{i}_{y,o}^2 = \frac{J_{y,o}}{\rho_y^2 \cdot A}; \bar{i}_{\omega,o}^2 = \frac{J_{\omega,o}}{\rho_{\omega}^2 \cdot A}.$$

По трем силовым параметрам Φ_n , $\Phi_{ef,д}$ и Φ_{Φ} определим общий $\Phi_1^* = \Phi_n + \Phi_{ef,д} + \Phi_{\Phi}$ и его относительные эксцентриситеты:

$$\begin{aligned} m_{x1}^* &= \frac{m_x \cdot (\Phi_n + \Phi_{ef,д}) + \Phi_{\Phi} \cdot m_{x,\Phi}}{\Phi_1^*}; \\ m_{y1}^* &= \frac{m_y \cdot (\Phi_n + \Phi_{ef,д}) + \Phi_{\Phi} \cdot m_{y,\Phi}}{\Phi_1^*}; \\ m_{\omega 1}^* &= \frac{m_{\omega} \cdot (\Phi_n + \Phi_{ef,д}) + \Phi_{\Phi} \cdot m_{\omega,\Phi}}{\Phi_1^*}. \end{aligned}$$

Тогда предельное напряженное состояние для нередуцированного сечения во втором приближении можно представить в аналогичном (4) виде:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_2 &= (1 + m_{x,1}^* + m_{y,1}^* + m_{\omega,1}^*)^{-1} \times \\ &\times (1 + m_{x,1}^* \cdot \bar{y} + m_{y,1}^* \cdot \bar{x} + m_{\omega,1}^* \cdot \bar{\omega}), \end{aligned} \quad (10)$$

по которому, используя Еврокод, во втором приближении определим редукцию сечения. Расчет следует повторять до ситуации, когда на двух последних итерациях редукция сечения окажется неизменной. По нашему представлению, это две итерации.

Таким образом, получив окончательное значение дополнительного предельного параметра усилия $\Phi_{ef,д}^*$ в достоверном редуцированном сечении, проверку прочности можно свести к следующему виду:

$$\frac{1}{\gamma_A \cdot R_y \cdot \Phi_{eoc}} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{B_{\omega}}{W_{\omega}} \right) \leq 1, \quad (11)$$

где $\Phi_{eoc} = (\Phi_n + \Phi_{ef,д}^*) \cdot (1 + m_x + m_y + m_{\omega})$.

Предложенное совершенствование и обобщение метода фиктивных усилий [11] на бимоментное усилие и алгоритм расчета обладают быстродействием (на несколько порядков быстрее, чем при использовании МКЭ) и позволяют получать достоверные, по сравнению со стандартными нормативными методиками^{1,2,3,4}, результаты расчета на прочность. Коэффициенты потери местной устойчивости Φ_{eoc} могут быть получены для большого спектра практических задач, использование которых позволит упростить инженерную проверку прочности для стержневых элементов без потери местной устойчивости.

Библиографический список

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 // 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 редукции 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. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформированной схеме с учетом касательных напряжений и деформаций сдвига // Металлические конструкции и испытания сооружений. 1985. № 62. С. 10–20.

References

1. Winter G. Strength of thin steel compression flanges. *Transactions ASCE*, 1947, no. 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. *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 Eh. L., Belyy G. I. *Issledovanie raboty stal'noy formy iz kholodnognutyykh profiley s uchetom ikh mestnoy i obshchey ustoychivosti* [Study of the performance

characteristics of the steel form from cold-formed profiles, taking into account the 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' stержnevyykh ehlementov konstruktsiy iz tonkostennykh kholodnognutyykh profiley* [To the calculation of rod element stability of structures made from 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' stержnevyykh ehlementov konstruktsiy iz sparenykh kholodnognutyykh 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 stержnevyykh ehlementov konstruktsiy iz kholodnognutyykh profiley* [New provisions in the engineering calculation procedure on the stability of steel rod 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 stержnevyykh 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. *O raschete uprugoplasticheskikh tonkostennykh stержney po prostranstvenno-deformirovannoy skheme s uchetom kasatel'nykh napryazheniy i deformatsiy sdviga* [On the calculation of elastic-plastic thin-walled rods according to the spatially deformed scheme taking into account shear stresses and shear strains]. *Metallicheskie konstruksii i ispytaniya sooruzheniy — Metal structures and testing of structures*, 1985, no. 62, pp. 10–20.