

УДК 624.072.2.014.2–415:624.014

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

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-4-20-31

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

РАЗВИТИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

DEVELOPMENT OF A PRACTICAL METHOD FOR CALCULATING STEEL STRUCTURE ELEMENTS FOR STRENGTH

Предложен метод исследования прочности элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении с учетом взаимного влияния усилий по фактическому предельному состоянию, соответствующему критерию предельной пластической деформации $\bar{\varepsilon}_{lim,p} = \varepsilon_{lim,p} E / R_y = 3$. Решение задачи проводится в безразмерных параметрах в обратной последовательности, что позволяет сократить время расчета на несколько порядков. На основании анализа полученных результатов разработан практический метод расчета двутавровых элементов на прочность, достоверность которого подтверждается хорошим согласованием с данными проведенного исследования. При этом выявлены весьма существенные резервы прочности: при двухпараметрических нагружениях M_x, M_y (косой изгиб) — 8...32 % и N, M_y (сжатие с изгибом из плоскости стенки) — 6...29 %; при трехпараметрическом нагружении N, M_x, M_y для двутавров с широко используемым в практике проектирования соотношением площадей пояса и стенки $A_f / A_w = 0,5$ при $\bar{M}_y / \bar{M}_x \geq 0,3$ — 10...45 %. Обнаруженные резервы прочности оказались весьма существенными, что указывает на необходимость исследования элементов с другими типами сечений.

Ключевые слова: предельные состояния, прочность, многопараметрические нагружения, предельная пластическая деформация, алгоритм «Сечение».

A method is proposed for studying the strength of elements of steel structures under multi-parameter loading, taking into account the mutual influence of forces according to the actual limit state corresponding to the criterion of maximum plastic deformation $\bar{\varepsilon}_{lim,p} = \varepsilon_{lim,p} E / R_y = 3$. The solution of the problem is carried out in dimensionless parameters in the reverse sequence, which reduces the calculation time by several orders of magnitude. Based on the analysis of the results obtained, there has been developed a practical method for calculating I-beam elements for strength, the reliability of which is confirmed by fairly good overlap with the data of the study. Thus, very significant strength reserves are revealed, namely, at two-parameter loads M_x, M_y (oblique bending) — 8...32 %; and N, M_y (compression with bending from the wall plane) — 6...29 %; at three-parameter loading N, M_x, M_y for I-beams with the belt and wall area ratio widely used in design practice at $\bar{M}_y / \bar{M}_x \geq 0,3$ — 10...45 %. The discovered strength reserves turned out to be very significant, which indicates the need to study elements with other types of cross sections.

Keywords: limiting states, strength, multi-parameter loadings, limiting plastic deformation, «Section» algorithm.

Первая группа предельных состояний строительных конструкций, как известно, включает в себя два критерия: по потере несущей способности и полной непригодности к эксплуатации. Оценивая их, Н. С. Стрелецкий [1] заметил, что главным критерием, определяющим предельное состояние, является предельная деформация, которая появляется в конструкции раньше потери несущей способности. За предельную деформацию следует принять такую [1], при которой эксплуатация становится опасной или нерациональной, что неизбежно связано с развитием пластических деформаций.

Учитывая трудности установления предельных перемещений в условиях полной непригодности конструкции к эксплуатации, В. А. Балдин [2] предложил косвенную проверку этого предельного состояния — по ограничению максимальной остаточной деформации в сечении. Дальнейшее развитие этой идеи можно найти в работах Г. Е. Бельского [3, 4], А. А. Потапкина [5, 6], Н. Н. Стрелецкого [7], В. А. Балдина и Г. Е. Бельского [8], а также зарубежных авторов [9].

В результате этих исследований были разработаны рекомендации по расчету элементов стальных конструкций на прочность по критерию предельной пластической деформации $\bar{\epsilon}_{\text{lim},p} = \epsilon_{\text{lim},p} E / R_y = 3$, которые явились основой для формирования соответствующих разделов в СНиП II-23-81¹ и последующей актуализированной их редакции в СП 16.13330.2017².

Учет влияния касательных напряжений на развитие пластических деформаций [7, 10, 11] осуществлялся в предположении сдвиговых деформаций по упругому закону. При этом упомянутый критерий сводится к ограничению аналогичной величины интенсивности деформации.

1. Особенности метода расчета на прочность по СП 16.13330.2017

Прочность по СП 16.13330.2017, как известно, характеризуется предельным состоянием наиболее нагруженного сечения, которое определяется предельным соотношением действующих силовых факторов. При этом не учитывается взаимное влияние этих факторов на развитие пластических деформаций, предельные значения которых следует устанавливать по максимальной деформации $\bar{\epsilon}_{\text{max}} = \epsilon_{\text{lim},p} + 1 = 4$, являющейся результатом их совместного действия. Метод расчета на прочность СП 16.13330.2017 в этой части, как это было показано в ряде работ (см., например, [12, 13]), приводит к заниженным результатам.

Для подтверждения последнего рассмотрим нагружение стержня в сечении полным комплексом усилий (рис. 1): продольной силой N ; изгибающими в двух главных плоскостях моментами M_x , M_y ; поперечной силой в плоскости симметрии Q_y и бимоментом $B_\omega = M_{f\theta}$ (M_f — изгибающий момент полки). Проверка прочности по СП 16.13330.2017 в этом случае выполняется по формуле

$$\left(\frac{N}{AR_y} \right)^n + \frac{M_x}{c_x \beta W_x R_y} + \frac{M_y}{c_y W_y R_y} + \frac{B_\omega}{c_\omega W_\omega R_y} \leq 1, \quad (1)$$

где c_x , c_y , c_ω — коэффициенты, характеризующие предельные состояния за пределом упругости при соответствующих однопараметрических нагружениях M_x , M_y , B_ω ; β — коэффициент, учитывающий влияние поперечной силы Q_y при $0,5R_y \leq \tau_\omega \leq 0,5R_s$ (τ_ω — касательные напряжения в стенке); n — показатель степени, который совместно с c_x учитывает взаимное влияние N , M_x на прочность. С целью упрощения исследования коэффициент условий работы γ_f в (1) опущен.

Для стержневых элементов моносимметричного сечения, у которых центр изгиба находится на оси симметрии, являющейся к тому же осью стенки, бимомент B_ω воспринимается только полками (см. рис. 1). Это позво-

¹ СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. М.: Центральный институт типового проектирования, 1990. 96 с.

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправкой, с Изм. № 1, 2, 3). М.: Стандартинформ, 2019. 175 с.

ляет «нормативную» (по СП 16.13330.2017) проверку прочности (1) свести к виду

$$\left(\frac{N}{AR_y}\right)^n + \frac{M_x}{c_x \beta W_x R_y} + \frac{M_y + M_f}{c_y W_y R_y} \leq 1. \quad (2)$$

При этом следует заметить, что разгружающее действие M_f на вторую, менее нагруженную полку, как показали примеры расчета, не отражается на прочности при общем нагружении.

Влияние поперечной силы Q_y , как это показано в СП 16.13330.2017, учитывается обособленно, коэффициентом β , поэтому исследование прочности при действии комплекса усилий $N, M_x, M_y, Q_y, B_\omega$ без снижения точности расчета может быть сведено к трем усилиям N, M_x и $M_{yf} = M_y + M_f$, что в дальнейшем будет использовано.

Исследование прочности с учетом взаимного влияния усилий в настоящей статье проводится обратным методом [14], обладающим быстроедействием, который был хорошо апробирован при исследовании прочности и устойчивости трубобетонных [15], стальных тонкостенных холодногнутых [16, 17] элементов конструкций, а также запредельных состояний двутавровых элементов и прямоугольных труб [18]. Суть этого

метода [14] заключается в следующем: по заданному предельному деформированному состоянию в сечении ($\bar{\epsilon}_{\max} = 4$) с помощью алгоритма «Сечение» [14] определяются предельные усилия.

2. Обратное решение задач прочности

Следуя методу упругих решений, используемому в [14], рассмотрим нагружение в моносимметричном, как более общем, сечении неограниченно упругого стержневого элемента продольной силой N^* и изгибающими моментами M_x^* и M_y^* , действующими в двух главных плоскостях (рис. 2).

Решение задачи проведем в безразмерных параметрах, за общий параметр нагружения примем коэффициент продольной силы $\phi^* = N^* / R_y A$, тогда «упругое» напряженно-деформированное состояние в сечении по $\bar{\epsilon}_{\max} = 4$ ($\bar{\epsilon}_{\lim, p} = 3$) примет вид:

$$\bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\epsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \phi^* (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x}), \quad (3)$$

где

$$\phi^* = 4(1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x})^{-1}; \quad \bar{x} = x / x_*, \quad \bar{y} = y / y_*;$$

$$m_x^* = e_y^* / \rho_x; \quad m_y^* = e_x^* / \rho_y;$$

$$e_y^* = M_x^* / N^*; \quad e_x^* = M_y^* / N^*;$$

$$\rho_x = W_{x,c} / A; \quad \rho_y = W_{y,c} / A; \quad W_{x,c}, \quad W_{y,c} \text{ —}$$

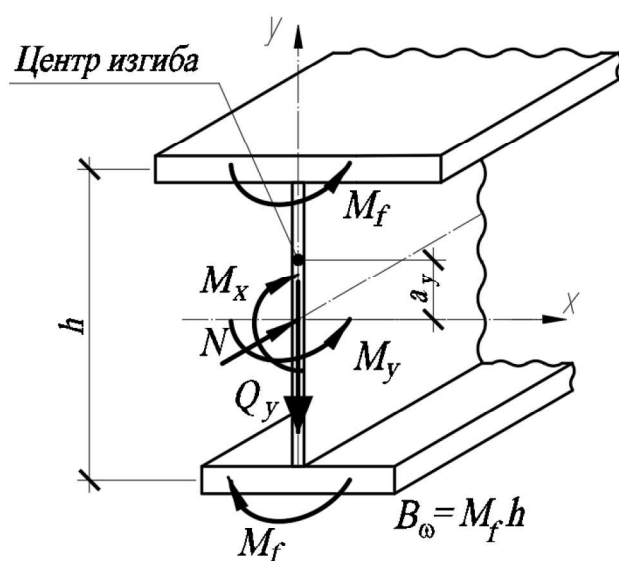


Рис. 1. Общее нагружение силовыми факторами

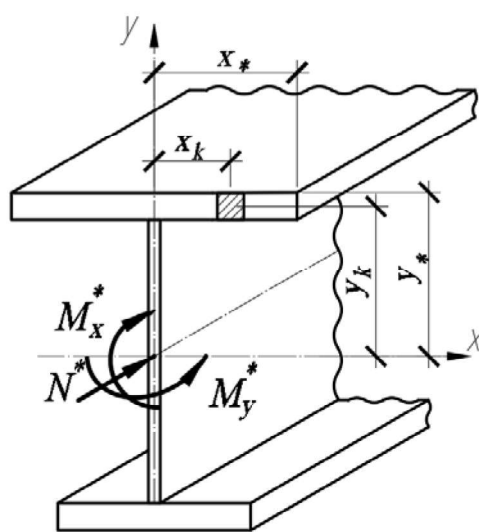


Рис. 2. Нагружение неограниченно упругого элемента в моносимметричном сечении

моменты сопротивления наиболее напряженного волокна, имеющего координаты x_* , y_* .

Для определения соответствующего (3) предельного состояния за фактическим пределом упругости разобьем сечение на n достаточно малых дискретных площадок ΔA_k с координатами центров тяжести x_k , y_k (см. рис. 2) и воспользуемся гипотезой плоских сечений, которая, следуя унифицированной диаграмме работы стали с физическим пределом текучести $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$ (рис. 3), представляется в виде:

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{\varepsilon}_0 - \bar{v}'' \cdot \bar{y}_k - \bar{u}'' \cdot \bar{x}_k, \quad (4)$$

где

$$\bar{\varepsilon}_0 = \varepsilon_0 E / R_y; \quad \bar{v}'' = v'' \rho_x E / R_y; \quad \bar{u}'' = u'' \rho_y E / R_y;$$

$$\bar{x}_k = x_k / \rho_y; \quad \bar{y}_k = y_k / \rho_x;$$

ε_0 — относительная деформация оси элемента; v'' , u'' — кривизны при изгибе стержня относительно осей x и y соответственно.

Сопоставляя (3) и (4) в предельном состоянии $\bar{\varepsilon}_{lim} = 4$, можно увидеть:

$$\bar{\varepsilon}_0 = \varphi^*; \quad \bar{v}'' = -\varphi^* m_x^* \frac{\rho_x}{y_*}; \quad \bar{u}'' = -\varphi^* m_y^* \frac{\rho_y}{x_*}. \quad (5)$$

Тогда при использовании (4) и алгоритма «Сечение» [14], параметры фактических предельных усилий, соответствующих заданному предельному деформированному состоянию (3), примут вид:

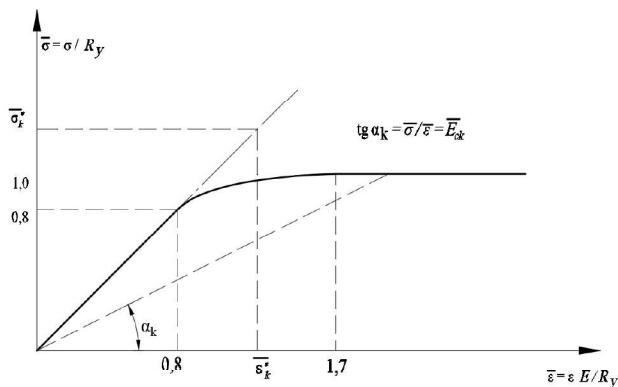


Рис. 3. Унифицированная диаграмма работы стали $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi^* \left(\bar{A}_{ef} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c \right); \\ m_x &= \frac{\varphi^*}{\varphi} \left(-\bar{y}_c + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{x,ef}^2 - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{xy,ef}^2 \right); \\ m_y &= \frac{\varphi^*}{\varphi} \left(-\bar{x}_c - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{xy,ef}^2 + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{y,ef}^2 \right), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\bar{A}_{ef} = 1 - \bar{A}_{oc}; \quad \bar{A}_{oc} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \Delta \bar{A}_k;$$

$$\bar{y}_c = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \bar{y}_k \Delta \bar{A}_k;$$

$$\bar{x}_c = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \bar{x}_k \Delta \bar{A}_k; \quad \bar{i}_{x,ef}^2 = \frac{I_x}{\rho_x^2 A} - \bar{i}_{x,oc}^2;$$

$$\bar{i}_{x,oc}^2 = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \bar{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k;$$

$$\bar{i}_{y,ef}^2 = \frac{I_y}{\rho_y^2 A} - \bar{i}_{y,ef}^2; \quad \bar{i}_{y,oc}^2 = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \bar{x}_k^2 \Delta \bar{A}_k;$$

$$\bar{i}_{xy,ef}^2 = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \bar{x}_k \bar{y}_k \Delta \bar{A}_k; \quad \Delta \bar{A}_k = \Delta A_k / A.$$

Получив φ , m_x и m_y по (6), проверку прочности можно свести к виду:

$$\frac{1}{\gamma_c R_y c_p} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{\beta W_{x,c}} + \frac{M_y}{W_{y,c}} \right) \leq 1, \quad (7)$$

где $c_p = \varphi(1 + m_x + m_y) > 1$; (8)

β — коэффициент, учитывающий влияние Q_y , определяемый по п. 8.2.3 СП 16.13330.2017.

При этом напомним, что M_y может содержать в себе также действие бимоента B_ω , которое выражается поясным моментом $M_f = B_\omega / h$ (см. рис. 1).

Таким образом, вместо используемых в СП 16.13330.2017 коэффициентов n , c_x , c_y , c_ω имеем один коэффициент c_p , учитывающий развитие пластических деформаций в сечении, соответствующий наступлению предельного состояния по прочности при действии заданного соотношения усилий N, M_x, M_y .

Для выявления резервов прочности проведем сопоставление результатов, полученных обратным методом по фактическому

предельному состоянию в сечении двутаврового элемента и «нормативным» методом по СП 16.13330.2017.

3. Разработка практических рекомендаций для двутавровых элементов и сопоставление результатов расчета с СП 16.13330.2017

Анализ полученных результатов, выраженных одним коэффициентом c_p , учитывающим влияние многих факторов (взаимное влияние усилий, форму и соотношение параметров сечения и др.), показал, что разработка аналитической его аппроксимации с целью практического применения оказалась весьма затруднительной.

Принимая во внимание изложенное, в настоящей статье инженерный метод расчета строится на физическом представлении предельного состояния стального элемента в сечении с использованием некоторых результатов исследования обратным методом, выражающих определенные качественные зависимости.

Пластинки, составляющие стержневые элементы, подвергаются, как правило, дей-

ствию продольной силы в сочетании с изгибом. Рассмотрим их предельные состояния по СП 16.13330.2017

$$\left(\frac{N_{пл}}{A_{пл} R_y} \right)^{3/2} + \frac{M_{y,пл}}{1,47 W_{y,пл} R_y} \leq 1 \quad (9)$$

и по разработанному методу (см. соответственно пунктирную и сплошную линии на рис. 4).

Сопоставляя результаты расчета, можно увидеть, что «нормативный» метод приводит к некоторому занижению прочности. Для устранения последнего в (9) введем коэффициент дополнительного влияния $\bar{M}_{y,пл} = M_{y,пл} / W_{y,пл} R_y$ на $\bar{N}_{пл} = N_{пл} / A_{пл} R_y$, который сформирован по результатам настоящего исследования.

$$K_{My} = 1 + 0,12 \bar{M}_{y,пл} - 0,19 (\bar{M}_{y,пл}^2 - \bar{M}_{y,пл}^3). \quad (10)$$

Тогда проверка прочности пластинки по (9) примет вид:

$$\left(\frac{\bar{N}_{пл}}{K_{My}} \right)^{3/2} + \frac{\bar{M}_{y,пл}}{1,47} \leq 1. \quad (11)$$

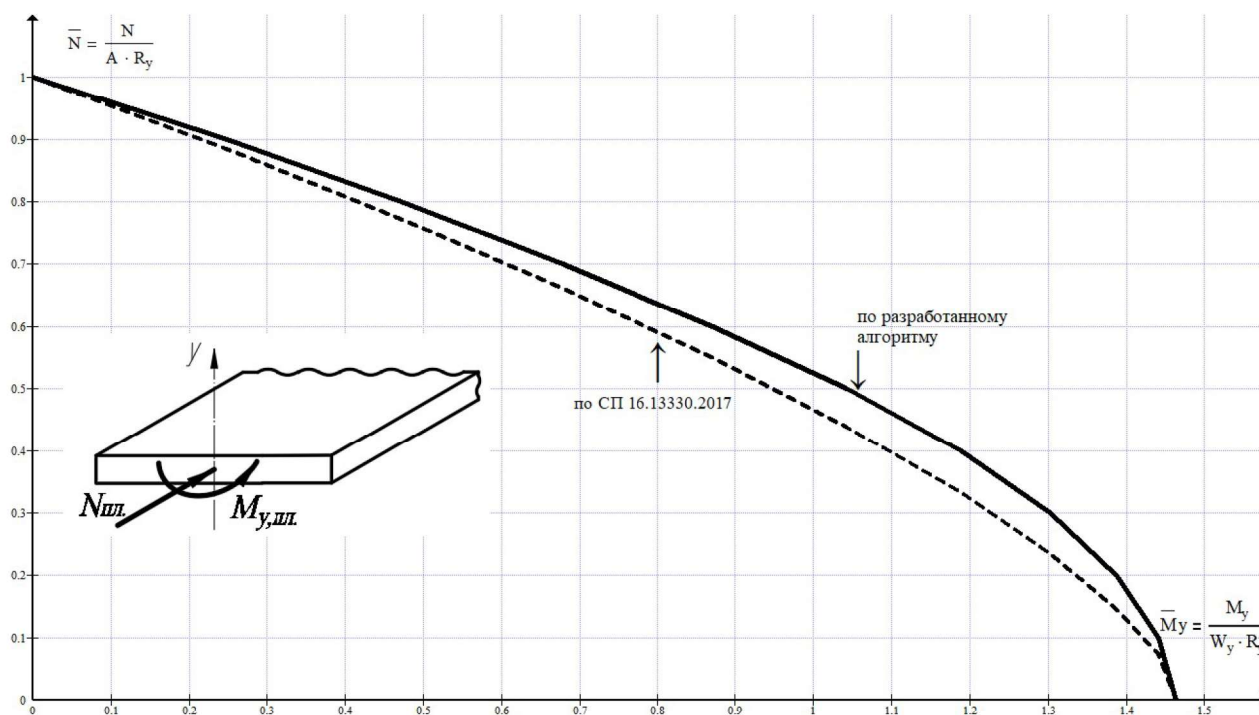


Рис. 4. Кривые предельных состояний пластинки при действии $\bar{N}$ и $\bar{M}_y$

Задаваясь значением $\bar{M}_{y,пл}$ из (11) можно с высокой степенью точности определить предельное значение продольной силы $\bar{N}_{пл} = K_{My} \sqrt[3]{1 - \bar{M}_{y,пл} / 1,47}$, что в дальнейшем будет использовано при составлении практических рекомендаций.

Сопоставление результатов расчета по «нормативному» и разработанному методу при действии N и M_x (сжатие с изгибом в плоскости большей жесткости) показало их хорошее согласование, что избавляет от необходимости введения каких-либо корректировок. Так, при $0,25 \leq \alpha_f = A_f / A_w \leq 0,7$ (A_f, A_w — площади полки и стенки двутавра соответственно) «нормативный» метод завышает прочность до 6 %, а при $0,7 \leq \alpha_f \leq 2$, наоборот, — занижает до 6 %, что является вполне допустимым в практических расчетах.

3.1. Сопоставление результатов расчета и практические рекомендации при действии M_x и M_y

На графиках рис. 5 показаны кривые предельных состояний $\bar{M}_x = M_x / R_y W_{x,c}$ и $\bar{M}_y = M_y / R_y W_{y,c}$ при различных значениях $\alpha_f = 0,25 \dots 2,0$. Сплошные линии соответствуют результатам расчета по разработанному

методу, а пунктирные — по «нормативному», откуда видно, что последний существенно занижает предельные усилия.

Выявленные резервы прочности показаны на графиках рис. 6, где представлено сопоставление коэффициентов использования, полученных по разработанному методу и по СП 16.13330.2017. Видно, что при $\bar{M}_y / \bar{M}_x \geq 0,2$ резервы составляют от 8 до 32 %. Большие значения соответствуют $\alpha_f = 0,25 \dots 0,5$, а меньшие — $\alpha_f = 1,0 \dots 2,0$.

Практические рекомендации по расчету на прочность двутавровых элементов при действии M_x и M_y , а также Q_y с помощью коэффициента β представим в виде:

$$\frac{\bar{M}_x (1 + 6\alpha_f)}{\gamma_c (c_{x,w} \beta + 6\alpha_f K_{My} \sqrt[3]{1 - \bar{M}_y / 1,47})} \leq 1, \quad (12)$$

$$\text{где } K_{My} = 1 + 0,12\bar{M}_y - 0,19(\bar{M}_y^2 - \bar{M}_y^3); \quad (13)$$

$$\beta_{x,w} = \begin{cases} 1,47 - 0,32\bar{M}_y / 1,12 & \text{при } \bar{M}_y \leq 1,12 \\ 0,76 + 0,39(1,35 - \bar{M}_y) / 0,23 & \text{при } 1,12 \leq \bar{M}_y \leq 1,35 \\ 0,76(1,47 - \bar{M}_y) / 0,12 & \text{при } 1,35 \leq \bar{M}_y \leq 1,47 \end{cases}$$

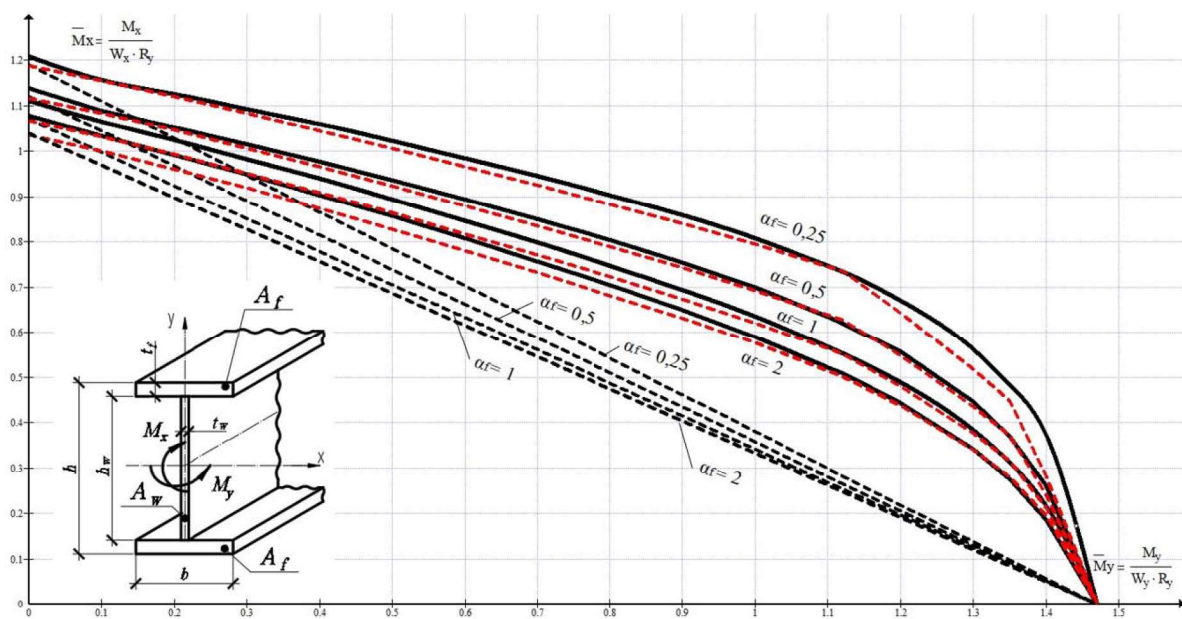
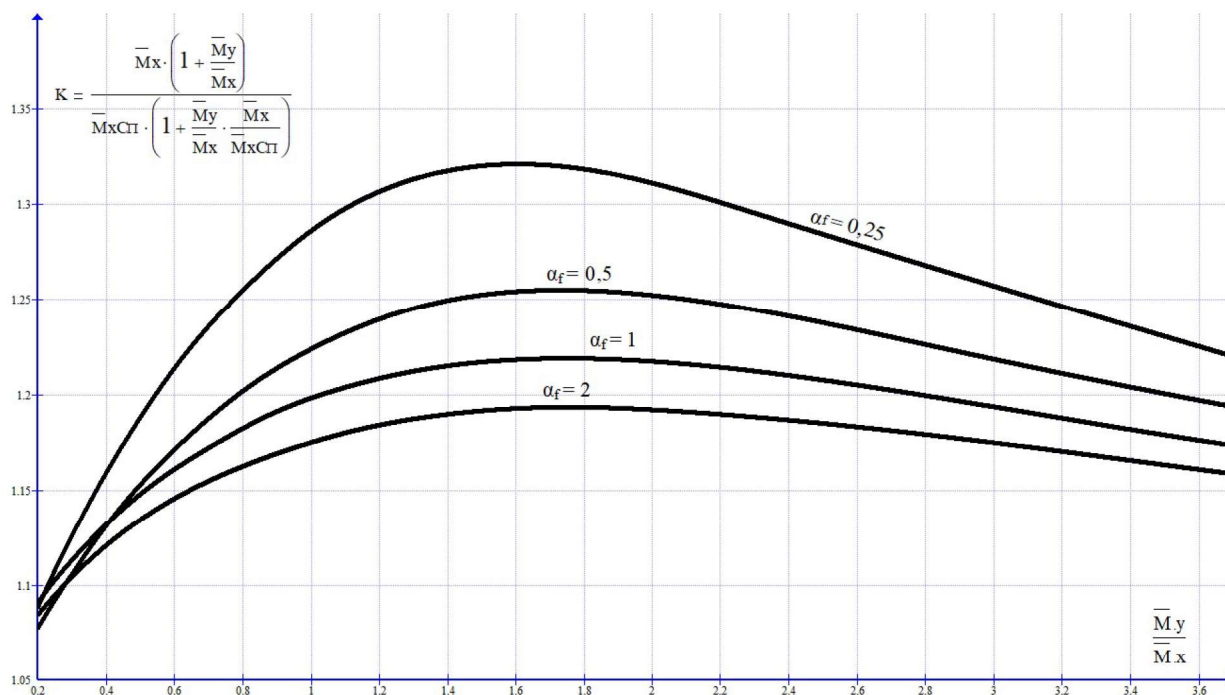


Рис. 5. Кривые предельных состояний при действии $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

Рис. 6. Резервы прочности при действии $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

Коэффициент $s_{x,w}$ характеризует изгибающий момент $M_{x,w}$, воспринимаемый стенкой с учетом влияния M_y . Аналитическая его аппроксимация сформирована по результатам настоящего исследования.

Предельные значения $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$ по (12) показаны на рис. 5 пунктирными линиями, которые достаточно хорошо согласуются с соответствующими сплошными линиями, полученными обратным методом, что свидетельствует о достоверности предложенных практических рекомендаций.

3.2. Сопоставление результатов расчета и практические рекомендации при действии N и M_y

Графики рис. 7 и 8 свидетельствуют также о выявленных резервах прочности, которые при действии $\bar{N}$ и $\bar{M}_y$ составляют (см. рис. 8) от 4...11 % (в зависимости от α_f) при $\bar{M}_y = 0,4$ до 29 % при $\bar{M}_y > 0,4$.

Практические рекомендации в этом случае могут иметь аналогичный (12) вид:

$$\frac{\bar{N}(1+2\alpha_f)}{\gamma_c(K_w + 2\alpha_f K_{My} \sqrt[3]{1-\bar{M}_y/1,47})} \leq 1, \quad (14)$$

$$\text{где } K_w = \begin{cases} 1 & \text{при } \bar{M}_y \leq 1,12 \\ \frac{1,47 - \bar{M}_y}{0,35} & \text{при } 1,12 \leq \bar{M}_y \leq 1,47 \end{cases}.$$

Коэффициент K_w сформирован по результатам исследования прочности обратным методом и учитывает фактическую часть продольной силы, воспринимаемой стенкой, чего не обнаруживает «нормативный» метод.

Предельные состояния по (14) (см. пунктирные линии на рис. 7) хорошо согласуются с результатами проведенного исследования (сплошные линии), что также свидетельствует о достоверности предложенных рекомендаций.

3.3. Сопоставление результатов расчета при действии N , M_x , M_y

Взаимное влияние усилий на предельное состояние при трехпараметрическом нагружении $\bar{N}$, $\bar{M}_x$, $\bar{M}_y$ приведем на примере расчета двутаврового элемента с $\alpha_f = 0,5$. На рис. 9

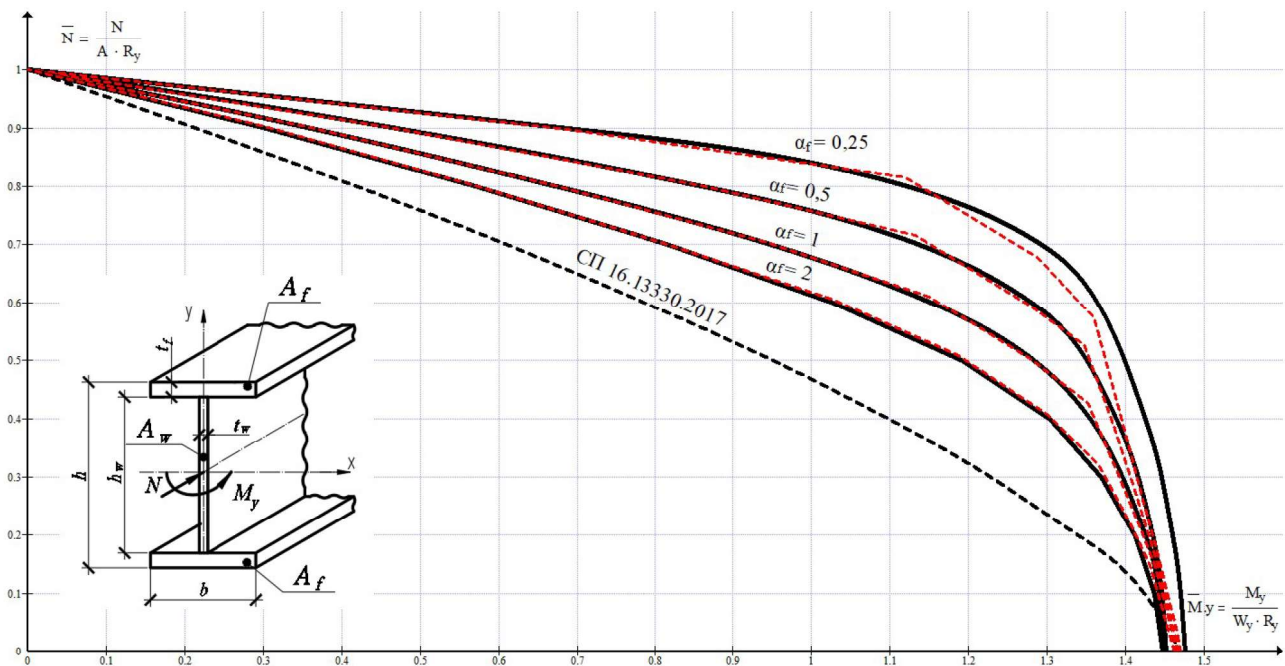


Рис. 7. Кривые предельных состояний при действии $\bar{N}$ и $\bar{M}_y$

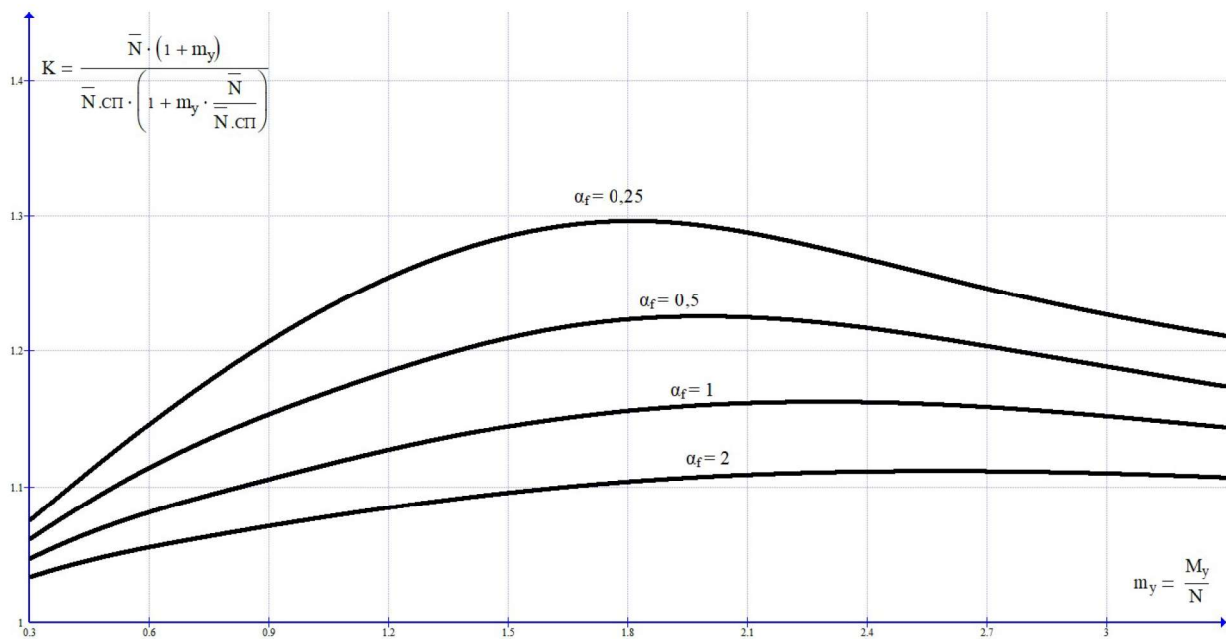
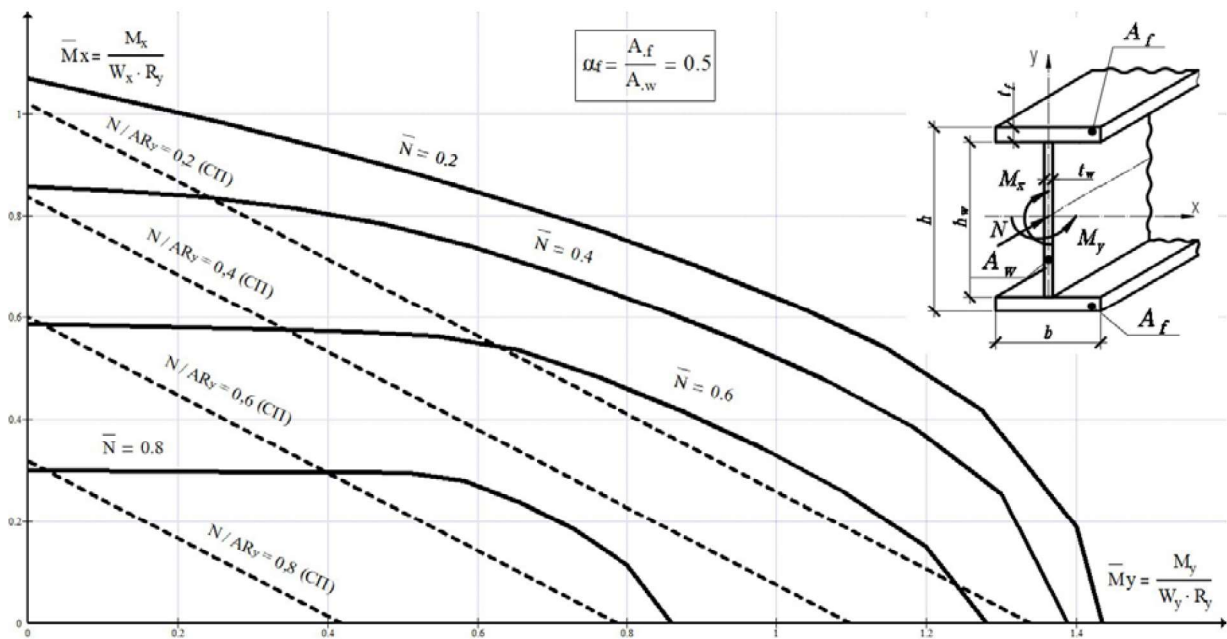


Рис. 8. Резервы прочности при действии $\bar{N}$ и $\bar{M}_y$

сплошными линиями показаны кривые предельных состояний $\bar{M}_x$, $\bar{M}_y$ при различных значениях $\bar{N}$, построенные по результатам настоящего исследования. Там же пунктирными линиями приведены соответствующие данные «нормативного» метода. Сопостав-

ляя их, можно констатировать, что расчет на прочность по СП 16.13330.2017 при трехпараметрическом нагружении значительно больше занижает предельные усилия, чем при двухпараметрическом нагружении $\bar{M}_x$, $\bar{M}_y$ и $\bar{N}$.

Рис. 9. Кривые предельных состояний при действии $\bar{M}_x$, $\bar{M}_y$ и $\bar{N}$

Резервы прочности, выявленные при исследовании фактических предельных состояний, иллюстрируются графиками рис. 10, откуда видно, что при средних значениях продольной силы $\bar{N} = 0,4 \dots 0,6$ ($m_y/m_x \geq 0,3$) они находятся в пределах 10...45 %. Малым значениям $\bar{N} \leq 0,2$ соответствует снижение этих резервов в 1,5 раза, а большим, $\bar{N} \geq 0,8$, — в 2,5 раза. При $0,25 \leq \alpha_f \leq 0,5$ приведенные параметры увеличиваются, а при $0,5 \leq \alpha_f \leq 2$, наоборот, уменьшаются.

В связи с определенными трудностями аналитического описания физической нелинейности предельного состояния при трехпараметрическом нагружении N , M_x , M_y , как это было сделано для двухпараметрических нагружений, $\bar{M}_x$, $\bar{M}_y$ (12) и $\bar{N}$, $\bar{M}_y$ (14), практические рекомендации в настоящее время находятся в разработке. При этом заметим, что результаты исследования могут быть использованы в графическом виде (см., например, кривые предельных состояний на рис. 9) и с помощью разработанного метода могут быть получены для более широкого класса практических задач.

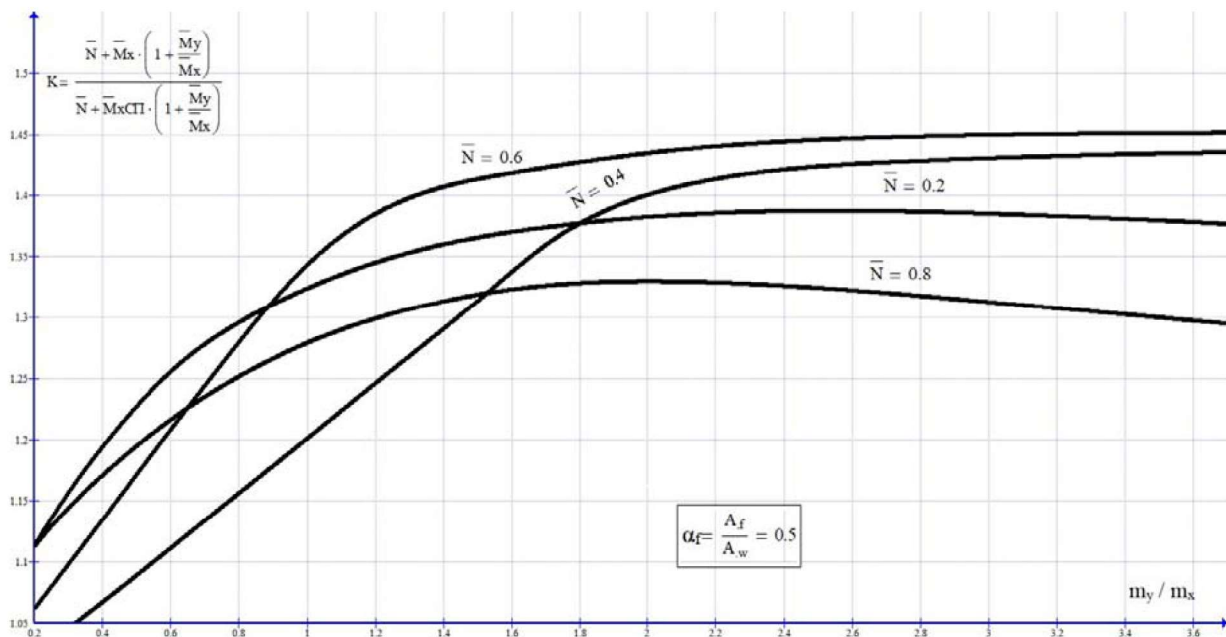
Выводы

1. Разработан метод исследования предельных состояний в сечениях элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении с учетом взаимного влияния усилий. Решение задачи проводится в безразмерных параметрах в обратной последовательности, что позволяет сократить время расчета на несколько порядков по сравнению с существующими методами.

2. На основании анализа полученных результатов разработан практический метод расчета двутавровых элементов на прочность, достоверность которого подтверждается хорошим согласованием с данными проведенного исследования.

3. Выявлены резервы прочности двутавровых элементов, которые в зависимости от соотношения площадей пояса и стенки $\alpha_f = A_f / A_w$ находятся в пределах:

- при двухпараметрических нагружениях M_x , M_y ($\bar{M}_y / \bar{M}_x \geq 0,2$) — 8...32 %;
- при трехпараметрическом нагружении N , M_x , M_y ($\alpha_f = 0,5$) — 10...45 %.

Рис. 10. Резервы прочности при действии $\bar{N}$, $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

4. Запасы прочности для двутавровых элементов оказались весьма существенными, что указывает на актуальность исследования прочности стержней с другими, наиболее распространенными в практике проектирования типами сечения.

Библиографический список

1. Стрелецкий Н. С. К вопросу развития методики расчета по предельным состояниям // Развитие методики расчета по предельным состояниям. М.: Стройиздат, 1971. С. 5–37.
2. Балдин В. А. К вопросу дальнейшего совершенствования метода расчета строительных конструкций по предельным состояниям // Развитие методики расчета по предельным состояниям. М.: Стройиздат, 1971. С. 63–70.
3. Бельский Г. Е. О предельных состояниях элементов металлических конструкций при сжатии (растяжении) с изгибом // Строительная механика и расчет сооружений. 1973. № 2. С. 51–56.
4. Бельский Г. Е. О количественных критериях предельных состояний по непригодности к эксплуатации // Строительная механика и расчет сооружений. 1978. № 2. С. 15–20.
5. Потапкин А. А. Теория и расчет стальных и сталежелезобетонных мостов на прочность с учетом

нелинейных и пластических деформаций. М.: Транспорт, 1972. 192 с. (Тр. ЦНИИС. Вып. 84.)

6. Потапкин А. А. Расчет стальных мостов на прочность в упругопластической стадии // Конструкции, расчет и технология изготовления стальных мостов / под ред. К. П. Большакова. М.: Транспорт, 1974. С. 60–78. (Тр. ЦНИИС. Вып. 90.)

7. Стрелецкий Н. Н. Рекомендации по расчету элементов стальных конструкций на прочность по критерию предельных пластических деформаций. М.: ЦНИИПроектстальконструкция, 1980. 48 с.

8. Балдин В. А., Бельский Г. Е. Основные положения расчета стальных конструкций по предельным состояниям // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1980. № 11. С. 3–21.

9. Lee H. P., Harris P. J. Finite element investigation of the post-buckling strength of thin-walled structural members under compression // Canadian Journal of Civil Engineering. 1978. Vol. 5. № 4. Pp. 595–610.

10. Любаров Б. Н. К расчету элементов стальных конструкций на прочность при наличии нормальных и касательных напряжений по критерию ограниченных пластических деформаций // Металлические конструкции и испытания сооружений. Л., 1984. С. 37–45.

11. Насонкин В. Д. К учету касательных напряжений при расчете упругопластических стержней на прочность // Металлические конструкции и испытания сооружений: межвуз. темат. сб. тр. Л., 1989. С. 37–44.

12. Пичугин С. Н. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из гнутосварных профилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1985. 22 с.

13. Асташкин М. В. Напряженно-деформационные и предельные состояния в сечениях стержневых элементов стальных конструкций при общем случае статического нагружения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2003. 30 с.

14. Белый Г. И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 46–55.

15. Белый Г. И., Ведерникова А. А. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 26–35.

16. Белый Г. И., Смирнов М. О. Обратный численно-аналитический метод расчета легких стальных тонкостенных стержневых элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 3. С. 57–68.

17. Смирнов М. О. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей с фактически редуцированным сечением: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 157 с.

18. Белый Г. И., Гарипов А. И. Запредельные напряженно-деформированные состояния в поперечных сечениях элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4 (93). С. 16–30.

References

1. Streletskiy N. S. *K voprosu razvitiya metodiki rascheta po predel'nyim sostoyaniyam* [Regarding the issue of developing the methodology of limit state calculation]. *Razvitie metodiki rascheta po predel'nyim sostoyaniyam* [In: Developing the methodology of limit state calculation]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, pp. 5–37.

2. Baldin V. A. *K voprosu dal'neyshego sovershenstvovaniya metoda rascheta stroitel'nykh konstruktsiy po predel'nyim sostoyaniyam* [To the issue of further improvement of the calculation method of building structures by limit state]. *Razvitie metodiki rascheta po predel'nyim sostoyaniyam* [In: Developing the methodology of limit state calculation]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, pp. 63–70.

3. Bel'skiy G. E. *O predel'nykh sostoyaniyakh elementov metallicheskikh konstruktsiy pri szhatii(rastyazhenii) s izgbom* [About limit states of elements of metal structures under compression (tension) with bending]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Structural mechanics and calculation of structures*, 1973, no. 2, pp. 51–56.

4. Bel'skiy G. E. *O kolichestvennykh kriteriyakh predel'nykh sostoyaniy po neprigodnosti k ekspluatatsii* [About quantitative criteria of limit states on unsuitability for operation]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Structural mechanics and calculation of structures*, 1978, no. 2, pp. 15–20.

5. Potapkin A. A. *Teoriya i raschet stal'nykh i stalezhelezobetonnykh mostov na prochnost' s uchetom nelineynykh i plasticheskikh deformatsiy* [Theory and calculation of steel and steel-reinforced concrete bridges for strength taking into account nonlinear and plastic deformations]. Moscow, Transport Publ., 1972, 192 p. (Tr. TsNIIS. Vyp. 84.)

6. Potapkin A. A. *Raschet stal'nykh mostov na prochnost' v uprugoplasticheskoy stadii* [Calculation of steel bridges for strength in elastoplastic stage]. *Konstruktsii, raschet i tekhnologiya izgotovleniya stal'nykh mostov* [In: Designs, calculation and technology of steel bridge manufacturing]. Ed. by Bol'shakov K. P. Moscow, Transport Publ., 1974, pp. 60–78. (Tr. TsNIIS. Vyp. 90.)

7. Streletskiy N. N. *Rekomendatsii po raschetu elementov stal'nykh konstruktsiy na prochnost' po kriteriyu predel'nykh plasticheskikh deformatsiy* [Recommendations on calculation of elements of steel structures for strength by the criterion of ultimate plastic deformations]. Moscow, TsNIiproektstal'konstruktsiya Publ., 1980, 48 p.

8. Baldin V. A., Bel'skiy G. E. *Osnovnye polozheniya rascheta stal'nykh konstruktsiy po predel'nyim sostoyaniyam* [Basic provisions of steel structures calculation by limiting states]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of Higher Schools. Construction and Architecture*, 1980, no. 11, pp. 3–21.

9. Lee H. P., Harris P. J. Finite element investigation of the post-buckling strength of thin-walled structural members under compression. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1978, vol. 5, no. 4, pp. 595–610.

10. Lyubarov B. N. *K raschetu elementov stal'nykh konstruktsiy na prochnost' pri nalichii normal'nykh i kasatel'nykh napryazheniy po kriteriyu ogranichennykh plasticheskikh deformatsiy* [To calculation of elements of steel structures for strength in the presence of normal and tangential stresses by the criterion of limited plastic deformations]. *Metallicheskie konstruktsii i ispytaniya sooruzheniy – Metal constructions and testing of structures*, Leningrad, 1984, pp. 37–45.

11. Nasonkin V. D. *K uchetu kasatel'nykh napryazheniy pri raschete uprugoplasticheskikh sterzhney na prochnost'* [To the account of tangential stresses at calculation of elastoplastic rods on strength]. *Trudy mezhvuz. nauch. konf. «Metallicheskie konstruktsii i ispytaniya sooruzheniy»* [Proceedings of the interuniversity scientific conf. “Metallic constructions and testing of structures”]. Leningrad, 1989, pp. 37–44.

12. Pichugin S. N. *Prochnost' i ustoychivost' sterzhnevyykh elementov konstruktsiy iz gnutosvarnykh profiley. Avtoref. disc. kand. tekhn. nauk* [Strength and stability of rod elements of structures from bent-welded profiles. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1985, 22 p.
13. Astashkin M. V. *Napryazhenno-deformatsionnye i predel'nye sostoyaniya v secheniyakh sterzhnevyykh elementov stal'nykh konstruktsiy pri obshchem sluchae staticheskogo zagruzheniya. Avtoref. disc. kand. tekhn. nauk* [Stress-strain and limit states in cross-sections of rod elements of steel structures in the general case of static loading. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2003, 30 p.
14. Belyy G. I. «Obratniy» metod rascheta usilivaemykh pod nagruzkoy sterzhnevyykh elementov stal'nykh konstruktsiy putem uvelicheniya secheniy [“Inverse” method of calculation of reinforced under load rod elements of steel structures by increasing the cross-sections]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 6 (83), pp. 46–55.
15. Belyy G. I., Vedernikova A. A. *Issledovanie prochnosti i ustoychivosti trubobetonnykh elementov konstruktsiy obratnym chislenno-analiticheskim metodom* [Research of strength and stability of pipe-concrete structural elements by inverse numerical-analytical method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 2 (85), pp. 26–35.
16. Belyy G. I., Smirnov M. O. *Obratniy chislenno-analiticheskiy metod rascheta legkikh stal'nykh tonkostennykh sterzhnevyykh elementov* [Inverse numerical-analytical method of calculation of light steel thin-walled rod elements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2021, no. 3, pp. 57–68.
17. Smirnov M. O. *Prochnost' i ustoychivost' sterzhnevyykh elementov konstruktsiy iz kholodnognutyykh profiley s fakticheski reduktirovannym secheniem. Diss. kand. tekhn. nauk* [Strength and stability of rod structural elements from cold-formed sections with actually reduced cross-section. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2021, 157 p.
18. Belyy G. I., Garipov A. I. *Zapredel'nye napryazhenno-deformirovannye sostoyaniya v poperechnykh secheniyakh elementov stal'nykh konstruktsiy* [Limiting strength deformed states in cross-sections of elements of steel structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 4 (93), pp. 16–30.