

Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций

Григорий Иванович Белый, Егор Андреевич Матвеев

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Дефекты и повреждения стальных конструкций в сочетании с коррозией металла, стимулирующей к тому же потерю местной устойчивости, могут приводить к ограниченно работоспособному их состоянию или эксплуатационной непригодности. Метод расчета элементов с такими повреждениями отсутствует. При этом «нормативная» проверка прочности неповрежденных элементов при двух или более параметрических нагружениях ведет к заниженным результатам. Поэтому актуальна разработка достоверного метода расчета на прочность элементов, в том числе неповрежденных, при общем нагружении.

Материалы и методы. Предложен метод исследования прочности поврежденных и неповрежденных элементов стальных конструкций при общем случае нагружения с учетом взаимного влияния усилий по фактическому предельному состоянию, соответствующему критерию ограниченной пластической деформации $\bar{\epsilon}_{lim,p} = \epsilon_{lim,p} E / R_y$. Решение задачи проводится в безразмерных параметрах в обратной последовательности, что дает возможность сократить время расчета на несколько порядков.

Результаты. На основании анализа полученных результатов исследования разработан эффективный практический метод расчета поврежденных и неповрежденных элементов, позволяющий получить более достоверные сведения об их прочности. Установлено влияние повреждения на прочность, которое в зависимости от места его расположения относительно действующих усилий N , M_x , M_y может привести к работоспособному, ограниченно или неработоспособному состояниям. Выявлены существенные резервы прочности неповрежденных двутавровых элементов.

Выводы. Предложено аналитическое решение, в котором ослабления сечения компенсируются эквивалентным догружением фиктивными силами, позволяющими свести проверку прочности как для неповрежденного элемента. Обнаруженные резервы прочности неповрежденных двутавровых элементов указывают на необходимость исследования стрижней с другими типами сечений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: повреждения, редукция сечения, предельные состояния, прочность, общее нагружение, предельная пластическая деформация, алгоритм «сечение»

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белый Г.И., Матвеев Е.А. Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 544–556. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.544-556

Автор, ответственный за переписку: Егор Андреевич Матвеев, egormatveev7798@gmail.com.

Calculation method improvement of damaged elements of steel structures

Grigory I. Belyy, Egor A. Matveev

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint-Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Defects and damages of steel structures in combination with metal corrosion, stimulating the loss of local stability, can lead to their limited serviceable condition or operational unsuitability. There is no method for calculating elements with such damages. At the same time, “normative” strength testing of undamaged elements under two or more parametric loading leads to underestimated results. Therefore, the development of a reliable method for calculating the strength of elements, including undamaged ones, under general loading is relevant.

Materials and methods. A method for investigating the strength of damaged and undamaged elements of steel structures in the general case of loading, taking into account the mutual influence of forces on the actual limit state corresponding to the criterion of limited plastic deformation $\bar{\epsilon}_{lim,p} = \epsilon_{lim,p} E / R_y$ is proposed. The solution of the problem is carried out in dimensionless parameters in reverse order, which reduces the calculation time by several orders of magnitude.

Results. Based on the analysis of the obtained research results, an effective practical method for calculating damaged and undamaged elements is developed, which allows obtaining more reliable information about their strength. The effect of damage on strength was established, which, depending on its location relative to the acting forces N , M_x , M_y , can lead serviceable, limited or inoperable states. Significant strength reserves of undamaged I-beam elements were identified.

Conclusions. An analytical solution in which the weakening of the cross section is compensated by equivalent loading by fictitious forces, allowing to reduce the strength test as for an undamaged element. The discovered strength reserves of undamaged I-beam elements indicate the need to study the rods with other types of cross sections.

KEYWORDS: damages, reduction of cross-section, limit states, strength, total loading, limiting plastic deformation, algorithm “cross-section”

FORCITATION: Belyy G.I., Matveev E.A. Calculation method improvement of damaged elements of steel structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):544-556. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.544-556 (rus.).

Corresponding author: Egor A. Matveev, egormatveev7798@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция и техническое перевооружение действующих предприятий, широко проводимые в настоящее время, требуют выполнения достоверной оценки технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений. Стальные конструкции достаточно чувствительны к дефектам и повреждениям, приобретенным в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации, которые в сочетании с возможной коррозией металла [1–3] значительно ускоряют физический износ, приводя их к ограниченно работоспособному состоянию или эксплуатационной непригодности.

Для оперативного принятия решений в этих случаях необходимо иметь такой быстродействующий метод расчета, который позволил бы обоснованно и достоверно выявлять фрагменты конструкций и (или) их элементы, нуждающиеся в немедленном усилении, и элементы с потенциально неопасными дефектами и повреждениями.

Применение аналитически-численного метода [4] при рассмотрении предельных состояний элементов несущих конструкций покрытий из спаренных уголков, имеющих пространственные искривления оси и местные повреждения [5–9], позволило разработать практические рекомендации по их расчету, которые были изложены в Пособии по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23–81*)¹.

Полученные в трудах [6–13] результаты исследования не позволяют разработать подобные рекомендации на другие типы поврежденных элементов.

Учитывая изложенное, в настоящей статье изучение прочности проводится с использованием обратного метода [14], хорошо апробированного на исследованиях прочности и устойчивости неповрежденных элементов конструкций [15–18], а также их запредельных состояний [19]. Результаты исследования применяются при разработке инженерного метода расчета поврежденных и неповрежденных элементов с выявлением существенных резервов прочности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — элементы стальных конструкций, имеющие механические в виде мест-

ных погнутостей составляющих стержень пластинок; коррозионные, приводящие к утонению этих пластинок, с последующей потерей их устойчивости [20, 21], повреждения; а также ослабления сечения (вырезы, вырывы, истирания и др.). С целью унификации решения два первых повреждения сводятся к одному — третьему: эквивалентному вырезу (редукции сечения).

Остановимся на втором виде повреждений и рассмотрим модель неограниченно упругого стержневого элемента в двутавровом, как наиболее распространенном, сечении, в котором действуют предельные, соответствующие критерию ограниченной пластической деформации $\varepsilon_{\text{lim},p} = 3(\varepsilon_{\text{max}} = 4)$, «упругие» усилия: продольная сила N^* и изгибающие моменты M_x^* , M_y^* (рис. 1, а). При этом результатом коррозионного повреждения стало уменьшение толщины поясов и стенки до t_f^* и t_w^* , приводящие соответственно к увеличению условных гибкостей λ_f и λ_w , которые могут значительно превышать допустимые (см. табл. 21 СП 294.1325800.2017)² их значения $[\lambda_f]$ и $[\lambda_w]$.

Следовательно, при $\bar{\lambda}_f^* > [\bar{\lambda}_f]$, $\bar{\lambda}_w^* > [\bar{\lambda}_w]$ теряют устойчивость сжатый пояс и стенка (рис. 1, б). Наиболее нагруженная сжатая часть ширины любой пластинки, выходящая за рамки определяемой предельной ее гибкостью, является нерабочей и считается ослаблением (рис. 1, с). Это позволяет выполнить переход от критического состояния пластинок к их ослаблениям. Методика определения мест ослабления и редуцированных сечений в целом хорошо изложена в работе [19] при исследовании запредельных напряженно-деформационных состояний.

Решение задачи прочности проводится в обратной последовательности в безразмерных параметрах, для чего за общий параметр загрузки принят коэффициент продольной силы $\varphi^* = N^*/R_y A$, тогда предельное условное деформированное $\bar{\varepsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varepsilon^*(\bar{x}, \bar{y}) E/R_y$, и относительно напряженное состояние $\bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \sigma^*(\bar{x}, \bar{y}) E/R_y$ при неограниченной упругости получают один вид:

$$\bar{\varepsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi^* (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x}), \quad (1)$$

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

¹ Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23–81*). М. : Стройиздат, 1989. 159 с.

² СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования (с Изменениями № 1, 2). М. : Стандартинформ, 2017.

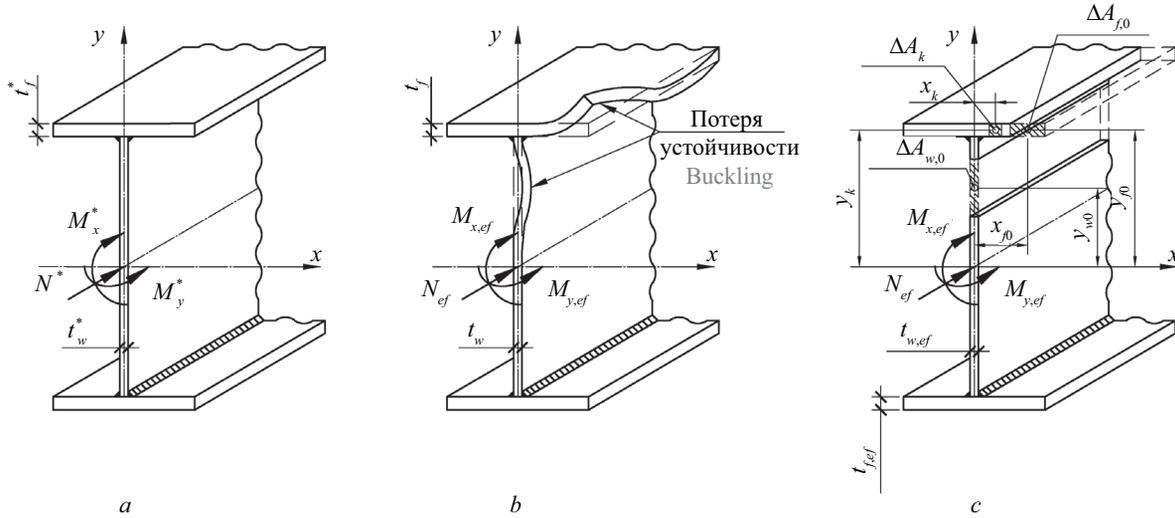


Рис. 1. Схема действующих усилий в поврежденном элементе: а — в нередуцированном сечении; б — при потере местной устойчивости; с — в эквивалентном редуцированном сечении

Fig. 1. The scheme of the acting forces in the damaged element: a — in the non-reduced section; b — with loss of local stability; c — in the equivalent reduced section

$$m_x^* = e_y^* / \rho_x; m_y^* = e_x^* / \rho_y; \\ e_y^* = M_x^* / N^*; e_x^* = M_y^* / N^*,$$

где $\rho_x = W_{x,c} / A$; $\rho_y = W_{y,c} / A$; $W_{x,c}$, $W_{y,c}$ — моменты сопротивления наиболее напряженного волокна, имеющего координаты x^* , y^* .

Для определения соответствующего (1) фактического предельного состояния за пределом упругости с учетом ослабления в полке площадь A_{of} и стенки A_{ow} разобьем фактически ослабленное сечение на n и ослабления на n_o достаточно малых дискретных площадок ΔA_k и ΔA_{ko} с координатами центра тяжести x_k, y_k и x_{ko}, y_{ko} соответственно (рис. 1, с).

В решении поставленной задачи используем унифицированную диаграмму работы стали с физическим пределом текучести $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ (рис. 2), с учетом которой гипотеза плоских сечений примет вид:

$$\bar{\epsilon}_k = \bar{\epsilon}_0 - \bar{v}'' \cdot \tilde{y}_k - \bar{u}'' \cdot \tilde{x}_k; \quad (2)$$

где $\bar{\epsilon}_0 = \epsilon_0 E / R_y$; $\bar{v}'' = v'' \rho_x E / R_y$; $\bar{u}'' = u'' \rho_y E / R_y$; $\tilde{x}_k = x_k / \rho_y$; $\tilde{y}_k = y_k / \rho_x$; ϵ_0 — относительная деформация

где

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_{ef} &= 1 - \bar{A}_{oc}; \quad \Delta \bar{A}_k = \Delta A_k / A; \quad \Delta \bar{A}_{ko} = \Delta A_{ko} / A; \quad \bar{A}_{oc} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \Delta \bar{A}_{k_o}; \\ \bar{y}_c &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{y}_{k_o} \Delta \bar{A}_{k_o}; \quad \bar{x}_c = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{x}_{k_o} \Delta \bar{A}_{k_o}; \quad \bar{i}_{x,ef}^2 = \frac{I_x}{\rho_x^2 A} - \bar{i}_{x,oc}^2; \\ \bar{i}_{x,oc}^2 &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{y}_{k_o}^2 \Delta \bar{A}_{k_o}; \quad \bar{i}_{y,ef}^2 = \frac{I_y}{\rho_y^2 A} - \bar{i}_{y,oc}^2; \\ \bar{i}_{y,oc}^2 &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k^2 \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{x}_{k_o}^2 \Delta \bar{A}_{k_o}; \quad \bar{i}_{xy,ef}^2 = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{x}_{k_o} \tilde{y}_{k_o} \Delta \bar{A}_{k_o}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

оси стержня с неослабленным сечением; v'' , u'' — кривизны при изгибе стержня относительно осей x и y соответственно.

Сопоставляя выражения (1) и (2) в предельном состоянии $\bar{\epsilon}_{lim} = 4$, можно увидеть:

$$\bar{\epsilon}_0 = \varphi^*; \quad \bar{v}'' = -\varphi^* m_x^* \frac{\rho_x}{y_*}; \quad \bar{u}'' = -\varphi^* m_y^* \frac{\rho_y}{x_*}. \quad (3)$$

Тогда, используя формулу (2) и алгоритм «сечение» [15], предельные параметры усилий, соответствующих заданному деформационному состоянию (1), примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{ef} &= \varphi^* \left(\bar{A}_{ef} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c \right) \\ m_{x,ef} &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{ef}} \left(-\bar{y}_c + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{x,ef}^2 - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{xy,ef}^2 \right) \\ m_{y,ef} &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{ef}} \left(-\bar{x}_c - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{xy,ef}^2 + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{y,ef}^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

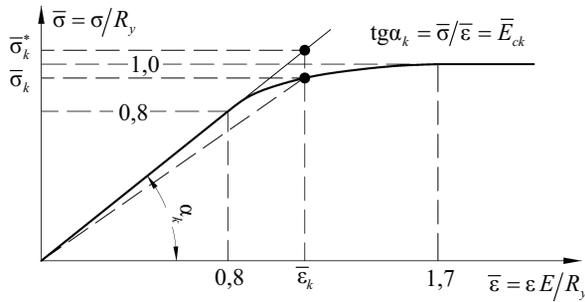


Рис. 2. Унифицированная диаграмма работы стали
Fig. 2. Unified steel work diagram

Для нередуцированных сечений φ , m_x , m_y определяются по выражению (4), в которых относительные характеристики ослабления сечения в формуле (5), учитывающие только физическую нелинейность, устанавливаются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_{oc} &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \Delta \bar{A}_k \\ \bar{y}_c &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k \\ \bar{x}_c &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \Delta \bar{A}_k \\ \bar{i}_{x,oc}^2 &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k \\ \bar{i}_{y,oc}^2 &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k^2 \Delta \bar{A}_k \\ \bar{i}_{xy,ef}^2 &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Имея предельные значения параметров усилий φ , m_x , m_y , проверку прочности неослабленных сечений можно свести к виду:

$$\frac{1}{\gamma_c R_y c_p} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1, \quad (7)$$

где

$$c_p = \varphi(1 + m_x + m_y) > 1. \quad (8)$$

При этом следует заметить, что вместо используемых в СП 16.13330.2017³ трех коэффициентов n , c_x , c_y получен один — c_p . Влияние повреждений представим коэффициентом:

$$K_{oc} = \varphi_{ef} (1 + m_{x,ef} + m_{y,ef}) [\varphi(1 + m_x + m_y)]^{-1}, \quad (9)$$

тогда проверка прочности ослабленного сечения приобретает вид:

$$\frac{1}{\gamma_c R_y c_p K_{oc}} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1. \quad (10)$$

³ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М., 2017. 139 с.

Исследование прочности элементов с повреждениями в обратной последовательности, как это отмечалось в работе [16], позволяет сократить время расчета на несколько порядков и получить необходимый для разработки практических рекомендаций объем данных. Однако, имея эти результаты, аналитическое построение зависимости коэффициентов c_p и K_{oc} от многих факторов оказалось весьма трудным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью разработки практических рекомендаций рассмотрим пример расчета двутаврового элемента и покажем влияние ослаблений пояса и его места расположения относительно действующих усилий N , M_x , M_y (табл.) на прочность выраженного K_{oc} . Анализируя представленные в таблице результаты, можно констатировать:

- ослабление площадью 6,07 %, находящееся в наиболее нагруженных зонах (сектор I и III), снижает прочность соответственно на 19,2–22,3 % и 13–17,9 %, что в 2,2–3,7 раз больше повреждения;
- в менее нагруженных секторах II и IV в зависимости от $m_{x,ef}$, $m_{y,ef}$ и их соотношений можно наблюдать как снижение (2,4–12,7 %), так и увеличение (5,7–18,7 %) прочности. Последнее объясняется тем, что ослабление в секторе II приводит к смещению центра тяжести сечения, уменьшая значения M_y ($m_{y,ef} = 0,5–1$) с его разгружающим действием. В секторе IV аналогичное действие оказывает M_x .

Практические рекомендации по расчету поврежденных элементов на прочность

Пример расчета прочности поврежденного элемента, а также многие другие исследования [6, 7, 13] показали, что наихудшее влияние оказывают повреждения, находящиеся в наиболее нагруженной зоне. Это свидетельствует о необходимости выбора специальной расчетной комбинации усилий.

Учитывая изложенное, рассмотрим нагружение стрелы в сечении N_{ef} , $M_{x,ef}$, $M_{y,ef}$ имеющем в наиболее нагруженной зоне (рис. 3) ослабление пояса площадью $A_{f,0}$ с координатами центра тяжести $x_{f,0}$, $y_{f,0}$ и стенки $A_{w,0}$ с $x_{w,0} = 0$, $y_{w,0}$.

Редуцированное сечение заменим на нередуцированное с компенсирующим догружением фиктивными силами $N_{f,0} = \sigma_{f,0} \cdot A_{f,0}$ и $N_{w,0} = \sigma_{w,0} \cdot A_{w,0}$, которые определяются по фиктивным напряжениям в центре тяжести ослаблений:

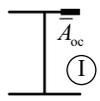
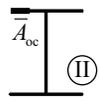
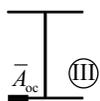
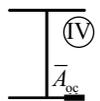
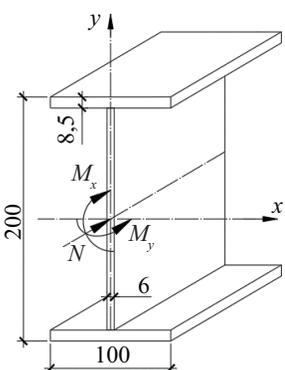
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{f,0} &= \frac{\sigma(x_{f,0}, y_{f,0}) K_2 + \sigma(0, y_{f,0}) \bar{A}_{w,0} K_3}{K_1 K_2 - \bar{A}_{f,0} \bar{A}_{w,0} K_3^2} \\ \sigma_{w,0} &= \frac{\sigma(0, y_{w,0}) K_1 + \sigma(x_{f,0}, y_{f,0}) \bar{A}_{f,0} K_3}{K_1 K_2 - \bar{A}_{f,0} \bar{A}_{w,0} K_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где

$$K_1 = 1 - \bar{A}_{f,0} \left(1 + \frac{y_{f,0}^2}{i_x^2} + \frac{x_{f,0}^2}{i_y^2} \right);$$

Коэффициент влияния ослабления сечения K_{oc} на прочность

Coefficient of influence of weakening of the K_{oc} section on strength

Схема загрузки Loading scheme	Относительные эксцентриситеты Relative eccentricities		Место расположения ослабления пл. 6,07 % The location of the weakening ar. 6.07 %			
	$m_{x,ef}$	$m_{y,ef}$				
	0,5	0,5	800	1072	870	873
		1	808	1057	861	884
		3	795	952	861	887
		5	777	947	851	878
	1	0,5	800	1073	848	904
		1	810	1061	856	886
		3	801	956	861	891
		5	786	949	855	884
	2	0,5	798	1075	836	1096
		1	804	1065	844	913
		3	802	987	856	890
		5	794	953	856	889
4	0,5	790	1077	821	1187	
	1	793	1070	827	1144	
	3	796	999	841	909	
	5	795	976	848	892	

Примечание: значения коэффициентов K_{oc} увеличены в 1000 раз.

Note: the values of the coefficients K_{oc} are increased by 1,000 times.

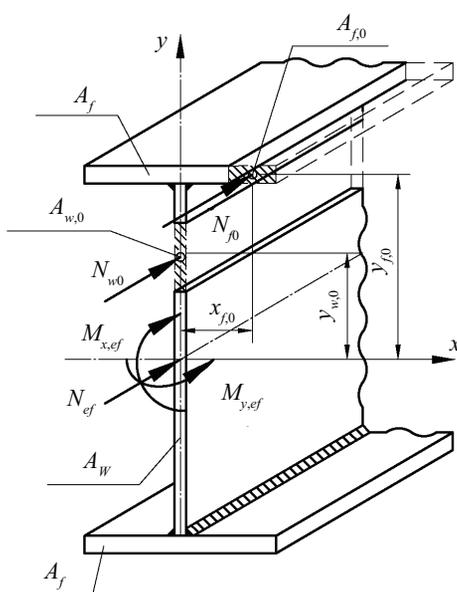


Рис. 3. Ослабленное поперечное сечение элемента и действующие усилия

Fig. 3. Weakened element cross-section and acting forces

$$K_2 = 1 - \bar{A}_{w,0} \left(1 + \frac{y_{w,0}^2}{i_x^2} \right);$$

$$K_3 = 1 + \frac{y_{f,0} y_{w,0}}{i_x^2}; \quad \bar{A}_{f,0} = A_{f,0} / A; \quad \bar{A}_{w,0} = A_{w,0} / A;$$

$$\sigma(x_{f,0}, y_{f,0}) = \frac{N_{ef}}{A} + \frac{M_{x,ef}}{I_x} y_{f,0} + \frac{M_{y,ef}}{I_y} x_{f,0};$$

$$\sigma(0, y_{w,0}) = \frac{N_{ef}}{A} + \frac{M_{x,ef}}{I_x} y_{w,0}.$$

Тогда проверку прочности можно выполнить по СП 16.13330.2017³, как для неповрежденных элементов:

$$\left(\frac{N}{\gamma_c AR_y} \right)^n + \frac{M_x}{\gamma_c c_x R_y W_x} + \frac{M_y}{\gamma_c c_y R_y W_y} \leq 1, \quad (12)$$

где

$$N = N_{ef} + N_{f,0} + N_{w,0};$$

$$M_x = M_{x,ef} + N_{f,0} \cdot y_{f,0} + N_{w,0} \cdot y_{w,0};$$

$$M_y = M_{y,ef} + N_{f,0} \cdot x_{f,0}.$$

При одном ослаблении ($A_{w,0} = 0$) имеем $\sigma_{f,0} = \sigma(x_{f,0}, y_{f,0})/K_{11}$, что полностью совпадает с формулой (6) Пособия (с. 17)¹.

Совершенствование практического метода расчета неповрежденных элементов

Метод расчета на прочность элементов по СП 16.13330.2017³ при действии в сечении двух и более усилий, кроме сжатия с изгибом в плоскости большей жесткости N и M_x , содержит существенный недостаток: взаимное влияние усилий на развитие пластических деформаций не учитывается, что приводит к заниженным результатам.

В настоящей статье на основании результатов исследования предложен инженерный метод расчета, лишенный указанного недостатка. Для этого на первом этапе усовершенствуем расчет на прочность отдельной сжато-изогнутой с параметрами $\bar{N}_{пл} = N_{пл}/R_y A_{пл}$ и $\bar{M}_{пл} = M_{пл}/R_y W_{пл}$ пластинки, который без учета коэффициента условий работы γ_c представим в виде:

$$\left(\frac{\bar{N}_{пл}}{K_M}\right)^{3/2} + \frac{\bar{M}_{пл}}{1,47} \leq 1, \tag{13}$$

где

$$K_M = 1 + 0,12\bar{M}_{пл} - 0,19(\bar{M}_{пл}^2 - \bar{M}_{пл}^3). \tag{14}$$

Коэффициент дополнительного влияния $\bar{M}_{пл}$ на $\bar{N}_{пл}$ (14) сформирован по результатам настоящего исследования. Задаваясь значением $\bar{M}_{пл}$ из выражения (13), можно с высокой степенью точности определить предельное значение продольной силы:

$$\bar{N}_{пл} = K_M^{3/2} \sqrt{1 - \frac{\bar{M}_{пл}}{1,47}}, \tag{15}$$

что будет использовано при составлении практических рекомендаций.

Сопоставление результатов расчета и практические рекомендации при действии M_x и M_y

На графиках (рис. 4) показаны кривые предельных состояний \bar{M}_x и \bar{M}_y двутавровых элементов при $\alpha_f = A_f/A_w = 0,25 - 2,0$. Сплошные линии соответствуют разработанному методу, точечные — «нормативному»³. Очевидно, что последний существенно занижает предельные усилия. Выявленные резервы прочности показаны на рис. 5, где представлено сопоставление коэффициентов использования. При $\bar{M}_y/\bar{M}_x \geq 0,2$ резервы составляют от 8 до 32%. Большие из них соответствуют $\alpha_f = 0,25 - 0,5$, меньшие $\alpha_f = 1,0 - 2,0$.

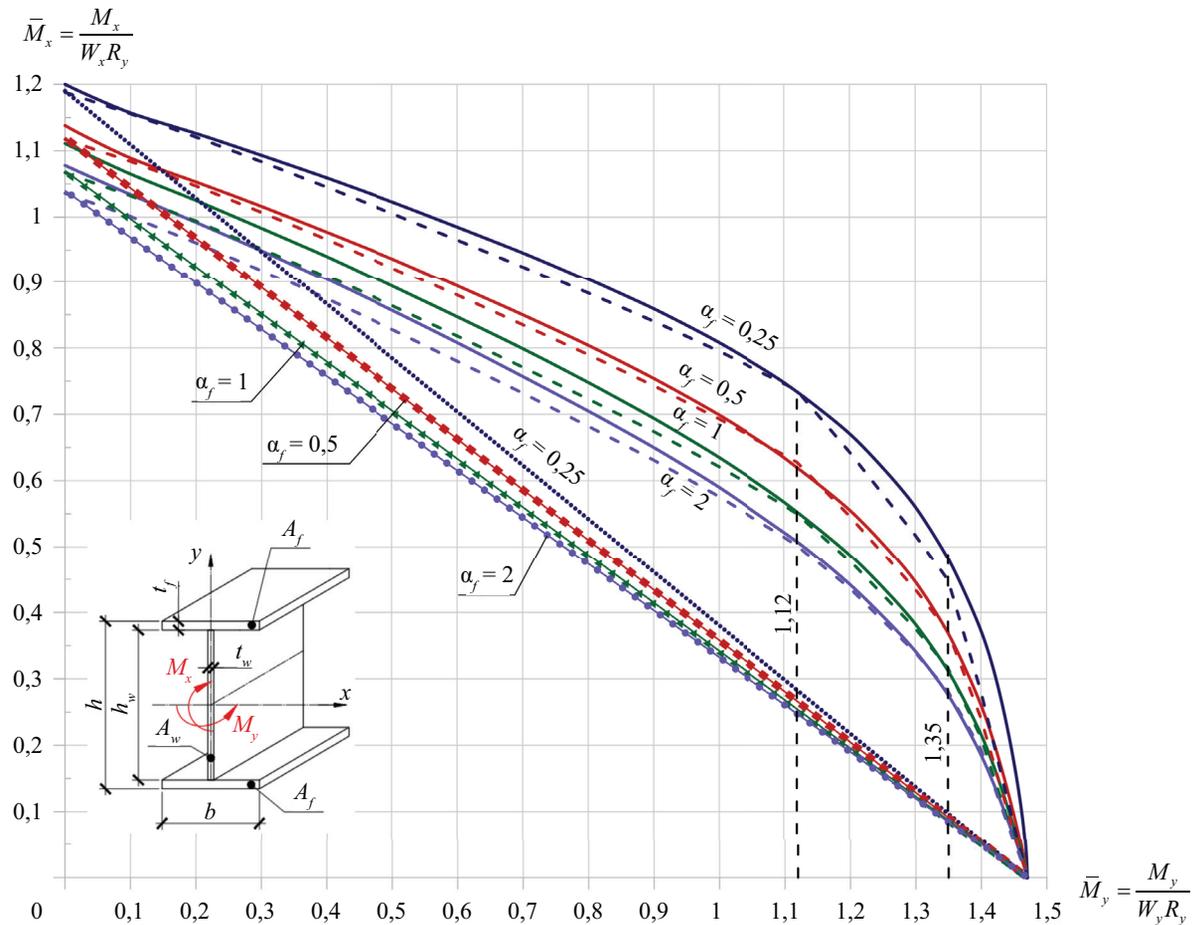


Рис. 4. Кривые предельных состояний при действии \bar{M}_x и \bar{M}_y

Fig. 4. Curves of limit states in action \bar{M}_x and \bar{M}_y

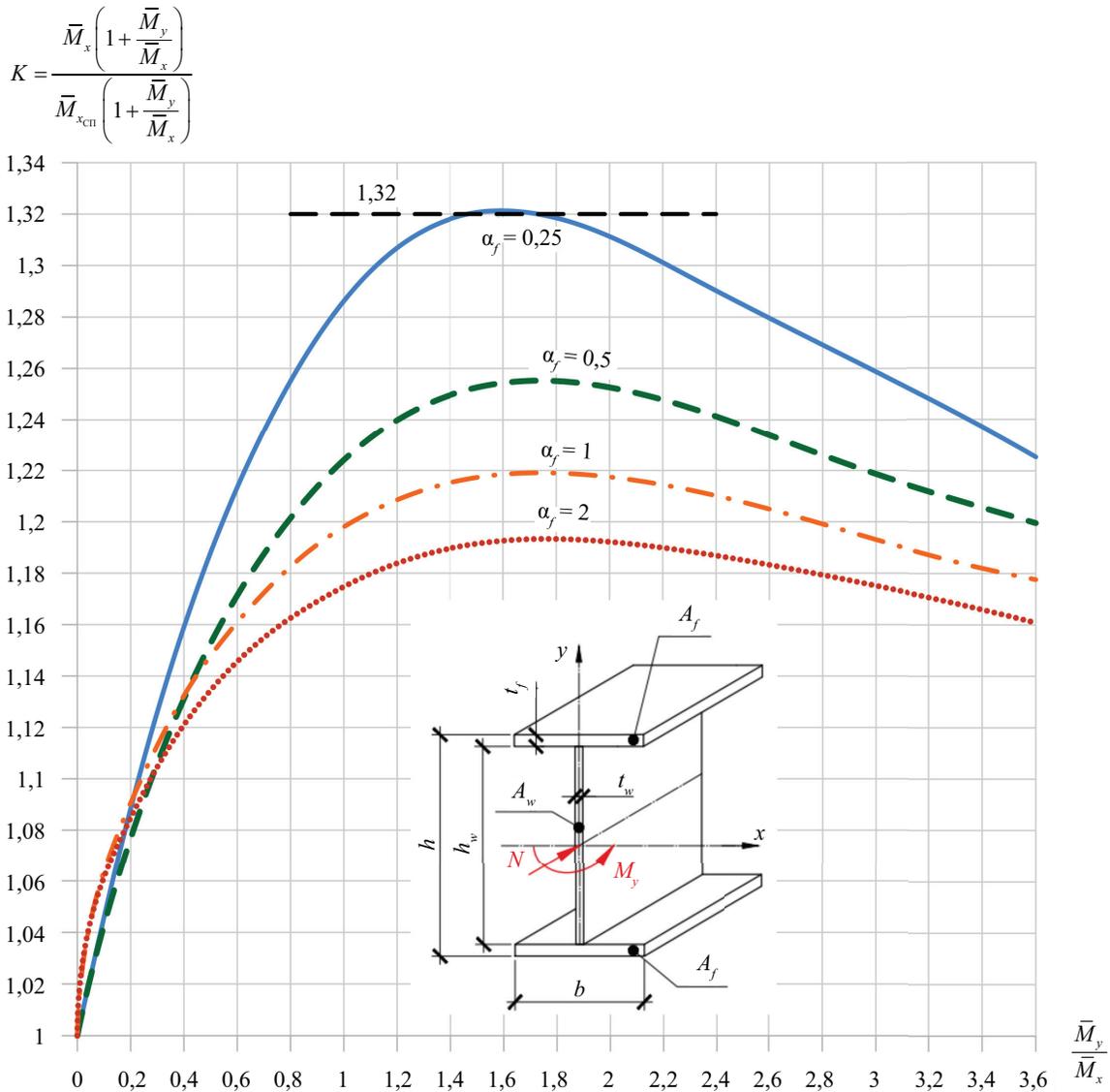


Рис. 5. Резервы прочности при действии \bar{M}_x и \bar{M}_y
 Fig. 5. Reserves of strength in action \bar{M}_x and \bar{M}_y

Практические рекомендации с учетом выражения (15) представим в виде:

$$\frac{\bar{M}_x (1 + 6\alpha_f)}{\gamma_c (c_{x,w} + 6\alpha_f K_{M_y} \sqrt[3]{1 - \bar{M}_y / 1,47})} \leq 1, \quad (16)$$

где

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

Коэффициент $c_{x,w}$ характеризует влияние \bar{M}_y на изгибающий момент в стенке, который получен по результатам настоящего исследования.

Предельные значения \bar{M}_x и \bar{M}_y по формуле (16) показаны на рис. 4 пунктирными линиями,

которые хорошо согласуются с результатами проведенного исследования.

Резервы прочности прямоугольных труб при действии \bar{M}_x , \bar{M}_y находятся в тех же пределах 8–31 %. Практические рекомендации разработаны также по результатам исследования, которые имеют вид:

$$\frac{\bar{M}_x (1 + 6\alpha_f)}{\gamma_c [1,47(1 - K_{y,w} \bar{M}_y) + 6\alpha_f K_{M_y} \sqrt[3]{1 - \bar{M}_y / 1,47}]} \leq 1, \quad (17)$$

где

$$K_{y,w} = \begin{cases} 0,06 \bar{M}_y / 0,3 & \text{при } \bar{M}_y \leq 0,3; \\ 0,06 + 0,9 (\bar{M}_y - 0,3) / 0,7 & \text{при } \bar{M}_y \geq 0,3. \end{cases}$$

При $\bar{M}_y \leq 1/K_{y,w}$ в выражении (17) принимает-ся: $1 - K_{y,w} \bar{M}_y = 0$.

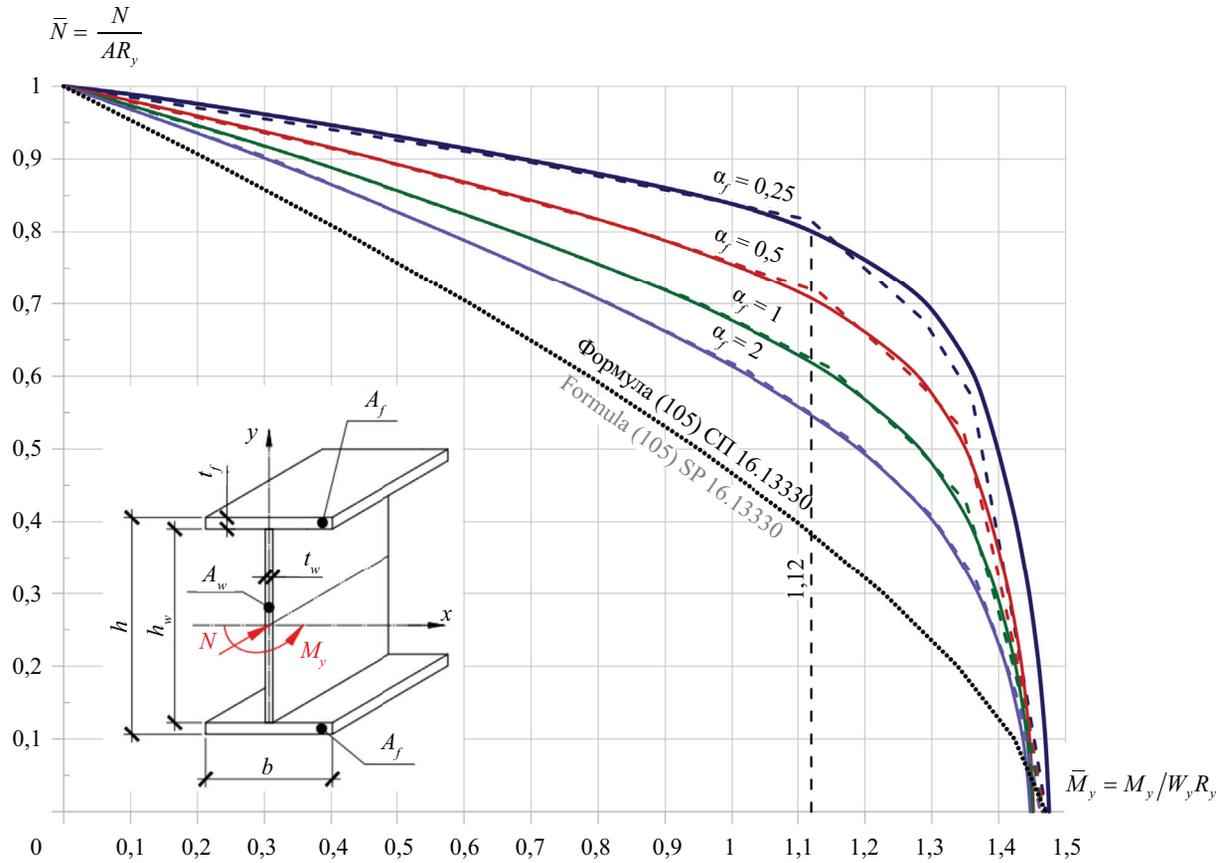


Рис. 6. Кривые предельных состояний при действии \bar{N} и \bar{M}_y

Fig. 6. Curves of limit states in action \bar{N} and \bar{M}_y

Сопоставление результатов расчета и практические рекомендации при действии N и M_y

Графики (рис. 6, 7) свидетельствуют также о выявленных резервах, которые для двутавровых элементов составляют (см. рис. 7) от 4–11 % при $\bar{M}_y \leq 0,4$ до 29 % при $\bar{M}_y > 0,4$.

Практические рекомендации (см. пунктирные линии на рис. 6) имеют аналогичный (16) вид:

$$\frac{\bar{N}(1 + 2\alpha_f)}{\gamma_c (K_w + 2\alpha_f K_{M_y} \sqrt[3]{1 - \bar{M}_y / 1,47})} \leq 1, \quad (18)$$

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 учитывает фактическую часть продольной силы, которую воспринимает стенка, чего не обнаруживает «нормативный»³ метод.

Сопоставление результатов расчета при действии N, M_x, M_y

На рис. 8 сплошными линиями показаны кривые предельных состояний \bar{M}_x, \bar{M}_y для двутавро-

вых элементов с $\alpha_f = 0,5$ при различных значениях \bar{N} , построенные по результатам настоящего исследования. Там же пунктирными линиями приведены соответствующие данные «нормативного»³ метода. Сопоставляя их, можно констатировать, что СП 16.13330.2017³ при трехпараметрическом нагружении значительно больше занижает предельные усилия, чем при двухпараметрических.

Резервы прочности иллюстрируются графиками на рис. 9. Видно, что при средних значениях $\bar{N} = 0,4 - 0,6$ ($m_y / m_x \geq 0,3$) они находятся в пределах 10–45 %. Малым значениям $\bar{N} \leq 0,2$ соответствуют снижения этих резервов в 1,5 раза, 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 трудностями аналитического описания физической нелинейности предельного состояния при действии N, M_x, M_y практические рекомендации в настоящее время находятся в разработке. При этом заметим, что результаты исследования могут быть использованы в графическом виде (см. кривые предельных состояний на рис. 8), которые с помощью обратного метода могут быть получены для более широкого класса практических задач.

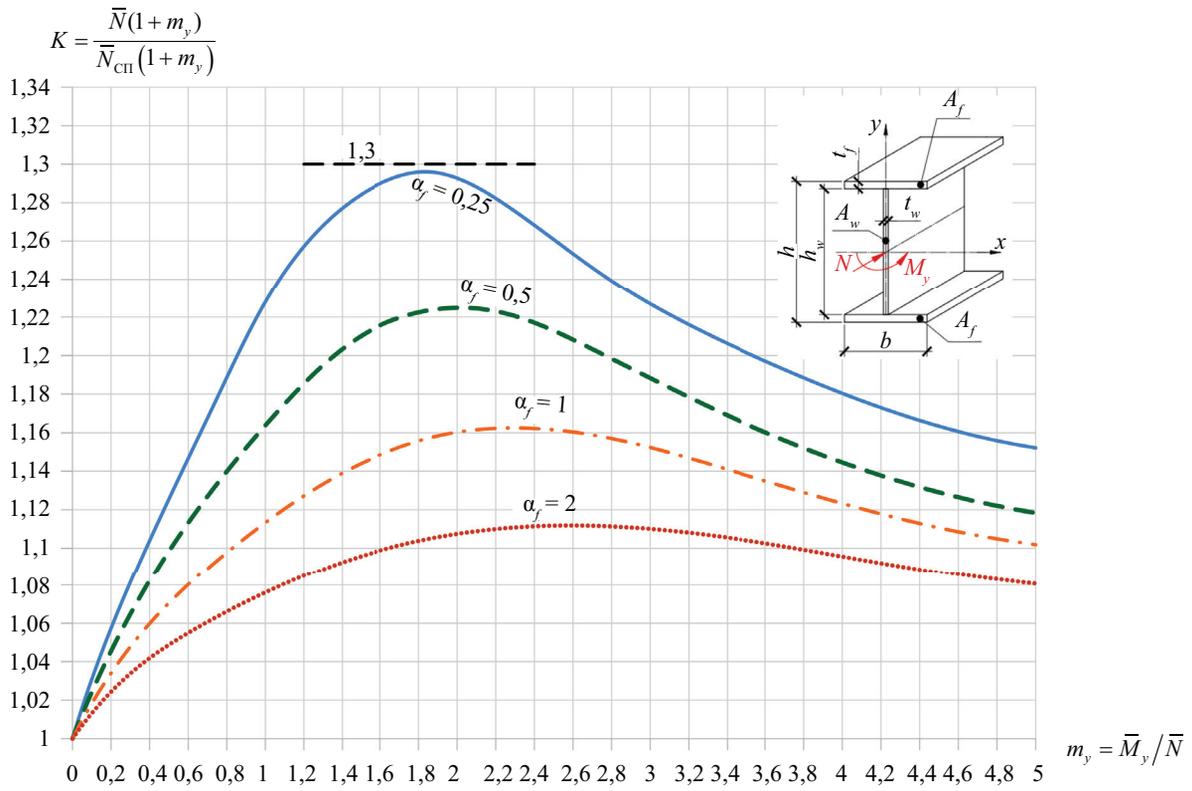


Рис. 7. Резервы прочности при действии \bar{N} и \bar{M}_y
 Fig. 7. Reserves of strength in action \bar{N} and \bar{M}_y

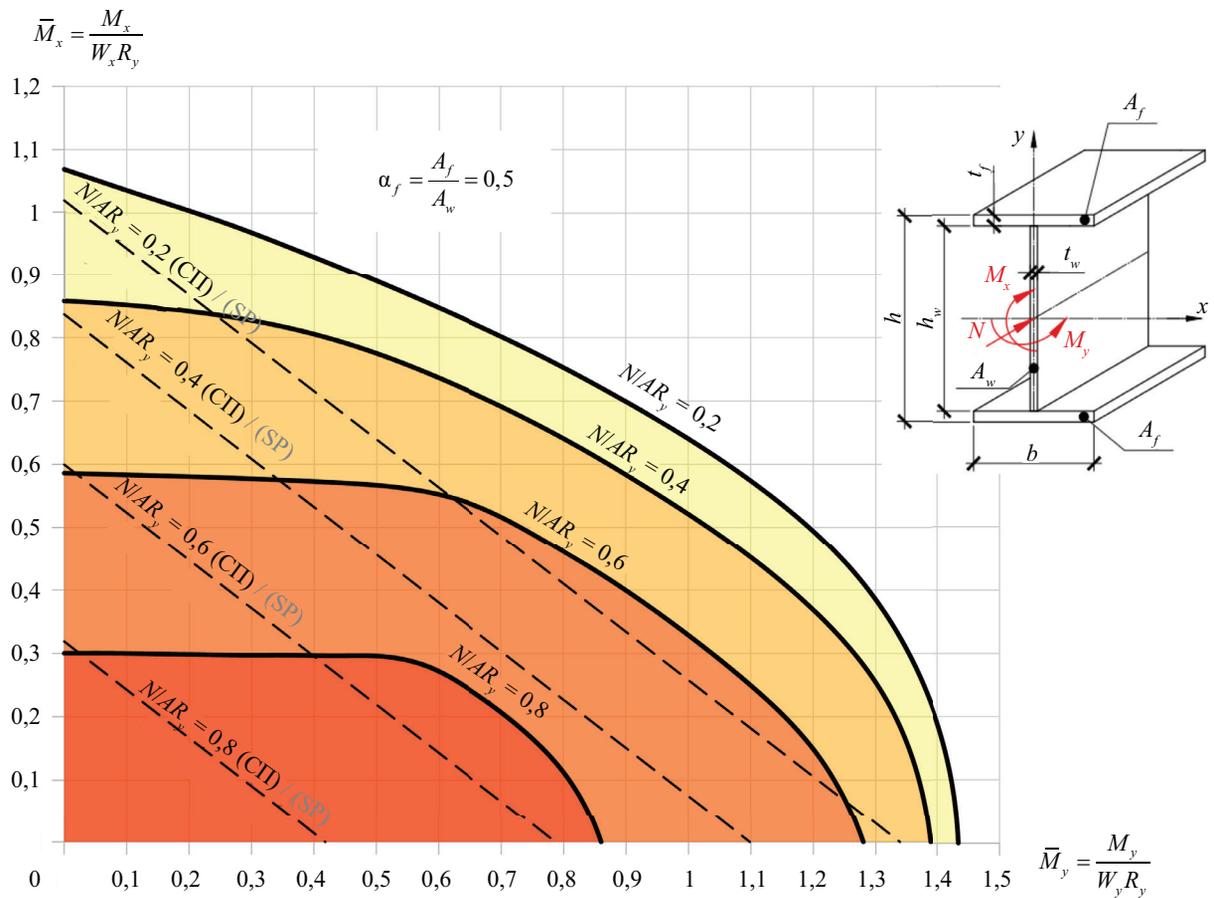


Рис. 8. Кривые предельных состояний при действии \bar{N} , \bar{M}_x и \bar{M}_y
 Fig. 8. Curves of limit states in action \bar{N} , \bar{M}_x and \bar{M}_y

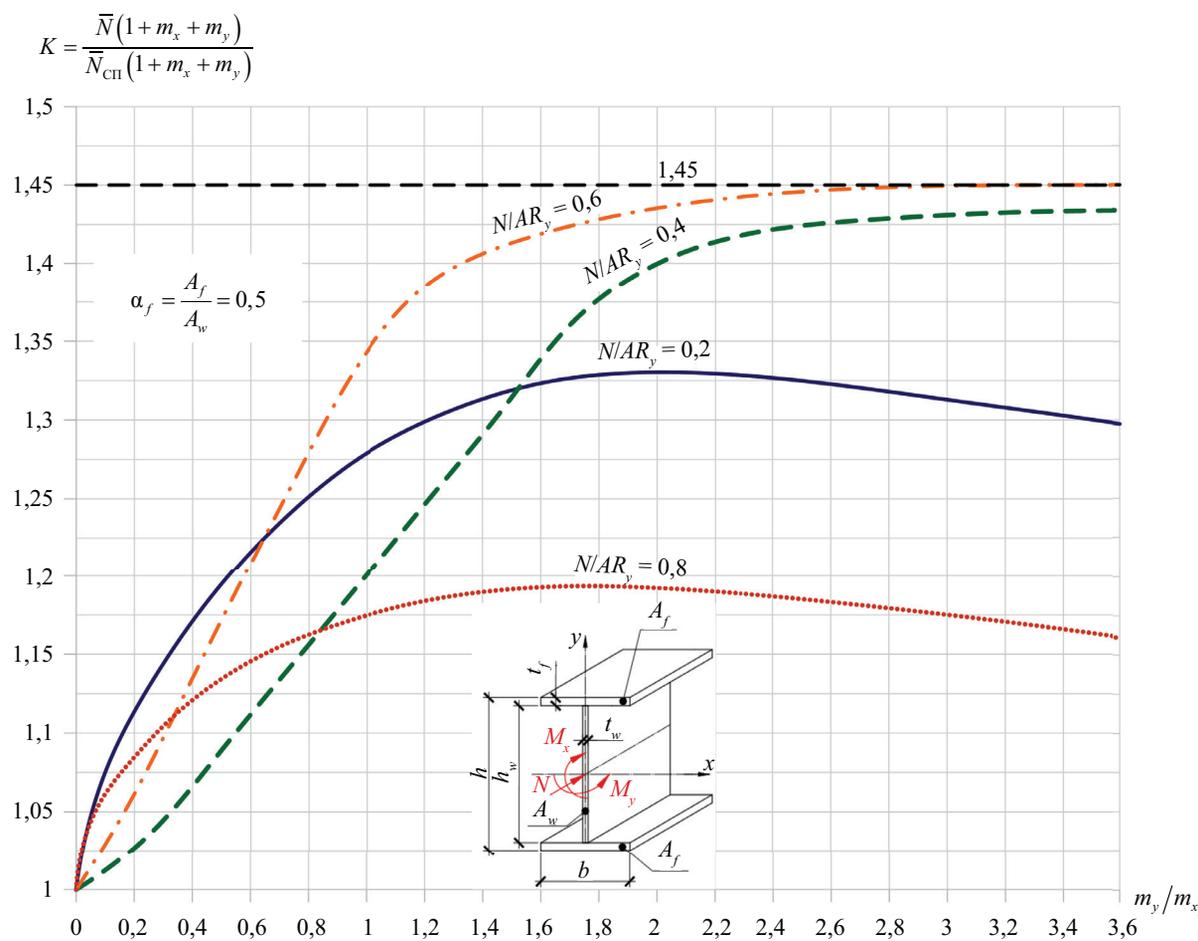


Рис. 9. Резервы прочности при действии \bar{N} , \bar{M}_x и \bar{M}_y
 Fig. 9. Reserves of strength in action \bar{N} , \bar{M}_x and \bar{M}_y

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработан метод исследования прочности поврежденных и неповрежденных элементов стальных конструкций при общем нагружении с учетом взаимного влияния усилий на развитие пластических деформаций. Решение задачи проводится в безразмерных параметрах в обратной последовательности, что дает возможность сократить время расчета на несколько порядков.

На основании анализа полученных результатов исследования разработан эффективный практический метод расчета поврежденных и неповрежденных элементов, позволяющий получить более достоверные сведения об их прочности.

Установлено влияние повреждения на прочность, которое в зависимости от места его распо-

ложения относительно действующих усилий N , M_x , M_y может привести элемент к работоспособному, ограниченно- или неработоспособному состоянию.

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

- при двухпараметрических нагружениях M_x и M_y — 8–32 %, N и M_y — 4–29 %;
- при трехпараметрическом нагружении ($\alpha_f = 0,5$) N , M_x и M_y — 10–45 %.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Di Sarno L., Majidian A., Karagiannakis G. The effect of atmospheric corrosion on steel structures: a state-of-the-art and case-study // Buildings. 2021. Vol. 11. Issue 12. P. 571. DOI: 10.3390/buildings11120571

2. Zhao Z., Zhang N., Wu J., Gao Y., Sun Q. Shear capacity of steel plates with random local corrosion // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 239. P. 117816. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117816

3. Kong Z., Jin Y., Hossen G.M.S., Hong S., Wang Y., Vu Q.V. et al. Experimental and theoretical study on mechanical properties of mild steel after corrosion // Ocean Engineering. 2022. Vol. 246. P. 110652. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110652

4. Белый Г.И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Строительная механика сооружений. 1983. С. 40–48.

5. Стегачев П.Б. Исследование вопросов оценки эксплуатационного состояния стальных стропильных ферм : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982. 27 с.

6. Сотников Н.Г. Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций из спаренных уголков, имеющих общие и местные дефекты и повреждения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1987. 28 с.

7. Родиков Н.Н. Устойчивость сжатых стержневых элементов конструкций из открытых профилей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1987. 27 с.

8. Лакусса К.С.Э. Прочность и пространственная устойчивость стержней из одиночных уголков : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1993. 26 с.

9. Мункуева Е.М. Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций крестового сечения, имеющих общие и местные дефекты и повреждения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 22 с.

10. Косоруков В.А. Влияние случайных погнутостей сжатых стержней стальных стропильных ферм на их несущую способность : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 12 с.

11. Опланчук А.А. Несущая способность стержней ферм из уголков с местными дефектами : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1983. 241 с.

12. Корчак М.Д. О влиянии местных начальных искривлений пояса на устойчивость решетчатого стержня // Совершенствование развития норм проектирования стальных строительных конструкций. 1981. С. 119–127.

13. Асташкин М.В. Напряженно-деформированные и предельные состояния в сечениях стержневых элементов стальных конструкций при общем случае статического нагружения : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2003. 130 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. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-5. EDN FCYLVLT.

15. Ведерникова А.А. Численно-аналитический расчет устойчивости внецентренно сжатых трубобетонных стержней круглого и квадратного сечения // Вестник СевКавГТИ. 2017. № 3 (30). С. 112–118. EDN ZSIVVL.

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

17. Смирнов М.О. Совершенствование обратного численно-аналитического метода расчета ЛСТК на устойчивость при внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 46–52. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52. EDN TDGIAI.

18. Смирнов М.О. Совершенствование методики определения редуцированных сечений стержней из холодногнутых профилей при однопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 60–67. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67. EDN NXYLAC.

19. 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. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-16-30. EDN MPRVNX.

20. Zhang Z., Xu S., Wang Y., Nie B., Wei T. Local and post-buckling behavior of corroded axially-compressed steel columns // Thin-Walled Structures. 2020. Vol. 157. P. 107108. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107108

21. Kullashi G., Siriwardane S.C., Attaya M.A. Lateral torsional buckling capacity of corroded steel beams: A parametric study // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1201. Issue 1. P. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012038

Поступила в редакцию 28 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 7 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Григорий Иванович Белый — доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 272945; office@erkon.ru;

Егор Андреевич Матвеев — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1169062; egormatveev7798@gmail.com.

Вклад авторов:

Белый Г.И. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, вывод формул, написание исходного текста, итоговые выводы.

Матвеев Е.А. — проведение расчетов и сопоставительного анализа, написание текста и подготовка изображений.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Di Sarno L., Majidian A., Karagiannakis G. The effect of atmospheric corrosion on steel structures: a state-of-the-art and case-study. *Buildings*. 2021; 11(12):571. DOI: 10.3390/buildings11120571
2. Zhao Z., Zhang N., Wu J., Gao Y., Sun Q. Shear capacity of steel plates with random local corrosion. *Construction and Building Materials*. 2020; 239:117816. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117816
3. Kong Z., Jin Y., Hossen G.M.S., Hong S., Wang Y., Vu Q.V. et al. Experimental and theoretical study on mechanical properties of mild steel after corrosion. *Ocean Engineering*. 2022; 246:110652. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110652
4. Bely G.I. Calculation of elastic-plastic thin-walled rods according to a spatially deformable scheme. *Construction Mechanics of Structures*. 1983; 40-48. (rus.).
5. Stegachev P.B. *Study of issues of assessing the operational condition of steel roof trusses : abstract of thesis. dis. ... cand. tech. sci.* Leningrad, 1982; 27. (rus.).
6. Sotnikov N.G. *Strength and stability of elements of steel structures from paired corners having general and local defects and damages : abstract of thesis. dis. ... cand. tech. sci.* Leningrad, 1987; 28. (rus.).
7. Rodikov N.N. *Stability of compressed core elements of structures made of open profiles : dis. ... cand. tech. sci.* Leningrad, 1987; 27. (rus.).
8. Lacussa K.S.E. *Strength and spatial stability of rods made from single angles : abstract of thesis. dis. ... cand. tech. sci.* St. Petersburg, 1993; 26. (rus.).
9. Munkueva E.M. *Strength and stability of elements of cross-section steel structures having general and local defects and damages : dis. ... cand. tech. sci.* St. Petersburg, 1999; 22. (rus.).
10. Kosorukov V.A. *The influence of random bends of compressed rods of steel trusses on their load-bearing capacity : dis. ... cand. tech. sci.* Moscow, 1975; 12. (rus.).
11. Oplanchuk A.A. *Load-bearing capacity of truss rods made from angles with local defects : dis. ... cand. tech. sci.* Novosibirsk, 1983; 241. (rus.).
12. Korchak M.D. On the influence of local initial curvatures of the belt on the stability of a lattice rod. *Improving the development of design standards for steel building structures*. 1981; 119-127. (rus.).
13. Astashkin M.V. *Stress-strain and limit states in sections of rod elements of steel structures in the general case of static loading : dis. ... cand. tech. sci.* St. Petersburg, 2003; 130. (rus.).
14. Bely G.I. “Reverse” method of calculating steel structure rod elements reinforced under load by increasing cross sections. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83):46-55. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46. EDN FCYLVT. (rus.).
15. Vedernikova A.A. Numerical and analytical calculation of stability of non-centrally compressed round and square tube concrete rods. *Bulletin of SevKavGTI*. 2017; 3(30):112-118. EDN ZSIVVL. (rus.).
16. Smirnov M.O. *Strength and stability of rod elements of structures made of cold-formed profiles with an actually reduced cross-section : dis. ... cand. tech. sci.* St. Petersburg, 2021; 157. (rus.).
17. Smirnov M.O. Improvement of the inverse numerical-analytical method for calculating the light steel thin-walled structures for stability under eccentric compression. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 1(84):46-52. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52. EDN TDGIAI. (rus.).
18. Smirnov M.O. Improving the methodology for determining reduced cross-sections of rods from cold-formed profiles at one-parameter loading. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 2(79):60-67. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67. EDN NXYLAC. (rus.).
19. Bely G.I., Garipov A.I. Post-limit stress-strain states of steel structure elements in cross-sections. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 4(93):16-30. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-16-30. EDN MPRVNX. (rus.).
20. Zhang Z., Xu S., Wang Y., Nie B., Wei T. Local and post-buckling behavior of corroded axially-compressed steel columns. *Thin-Walled Structures*. 2020; 157:107108. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107108
21. Kullashi G., Siriwardane S.C., Atteya M.A. Lateral torsional buckling capacity of corroded steel beams: A parametric study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1201(1):012038. DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012038

Received August 28, 2023.

Adopted in revised form on September 27, 2023.

Approved for publication on February 7, 2024.

BIONOTES: **Grigory I. Belyy** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor-consultant of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 272945; office@erkon.ru;

Egor A. Matveev — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1169062; egormatveev7798@gmail.com.

Contribution of the authors:

Grigory I. Belyy — scientific supervising, research concept, development of methodology, derivation of formulas, writing of the source text, final conclusions.

Egor A. Matveev — carrying out calculations and comparative analysis, writing text and preparing images.

The authors declare that there is no conflict of interest.