

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ИЗГИБНОЙ ФОРМЕ

INFLUENCE OF DEFECTS AND DAMAGES ON THE BENDING STABILITY OF STEEL STRUCTURE MEMBERS

Рассматривается устойчивость стержневых элементов стальных конструкций, имеющих искривление оси и местные повреждения. Решение задачи выполняется обратным численно-аналитическим методом, в котором используется неограниченно упругая модель элемента с эквивалентным догружением фиктивными силами, учитывающими физическую нелинейность и обобщенное повреждение в виде выреза. При этом начальное искривление оси заменяется эквивалентным эксцентриситетом продольной силы. На примере расчета двутаврового элемента колонного типа показано, что повреждение, находящееся в наиболее напряженной зоне, существенно снижает устойчивость. Так, при ослаблении полки на 7,4 и 11,1 % от общей площади сечения устойчивость снижается на 16,0–23,4 %, что в 1,5–2,2 раза больше площади ослабления.

Ключевые слова: устойчивость по изгибной форме поврежденного элемента, обратный численно-аналитический метод, пластическая деформация, местные повреждения, начальное искривление оси.

The paper considers the stability of rod elements of steel structures with axis curvature and local damage. The problem is solved by the inverse numerical-analytical method, which uses an unrestricted elastic model of the element with equivalent loading by fictitious forces that take into account physical nonlinearity and generalized damage in the form of a notch. In this case, the initial curvature of the axis is replaced by an equivalent eccentricity of the longitudinal force. On the example of calculation of an I-beam element of column type it is shown that the damage located in the most stressed zone significantly reduces the stability. Thus, at weakening of the flange by 7.4% and 11.1% of the total section area, the stability is reduced by 16.0%...23.4%, which is 1.5...2.2 times more than the area of weakening.

Keywords: bending stability of the damaged element, inverse numerical-analytical method, plastic deformation, local damage, initial axis curvature.

Введение

В ходе строительства и эксплуатации строительных объектов несущие конструкции приобретают многочисленные дефекты и повреждения [1–3], что приводит к снижению их несущей способности. Стальные конструкции, как правило, являются более повреждаемыми из-за их тонкостенности. Практика обследования показала, что к наиболее распространенным дефектам и повреждениям следует отнести пространственные искривления оси элементов, расцентровку узлов, местные погнутости составляющих стержень пластинок [4–7] (рис. 1, а), а также

коррозионные повреждения как общего, так и местного характера (рис. 1, б), приводящие к утонению пластинок (s^* , t^*), вызывающему потерю их устойчивости [8–10]. Кроме того, ослабления сечения, такие как вырезы, вырывы и истирания, также существенно снижают несущую способность элементов. В целях унификации подхода местная погибь и коррозионное повреждение, как предложено в работе [11], могут быть сведены к эквивалентному вырезу (рис. 1, в).

Эти приобретенные несовершенства, как указано в работе [11], значительно ускоряют физический износ стальных конструкций,

приводя их к ограниченно работоспособному состоянию, а в некоторых случаях к эксплуатационной непригодности. Для предотвращения этих случаев необходимо исследовать влияние перечисленных повреждений на несущую способность.

В данной статье для решения задачи устойчивости поврежденных элементов используется обратный численно-аналитический метод [12–15]. При этом влияние начального искривления оси стержня в плоскости изгиба, согласно [11], учитывается эквивалентным эксцентриситетом продольной силы.

Решение задачи устойчивости поврежденного элемента по изгибной форме

Перечисленные механические, коррозионные и другие виды повреждений, как правило, нарушают симметрию сечения (см. рис. 1), что затрудняет рассмотрение устойчивости по изгибной форме в плоскости симметрии. В работе [16] при определении влияния несимметричных повреждений было показано, что последние (одиночные) с площадью $A_{0,f}$ могут снижать прочность несколько больше, чем симметричные (двойные) с общей площадью ослабления $2A_{0,f}$.

Учитывая изложенное в работах [11, 12], в расчетной схеме выделенного из конструкции по расчетной длине $l_{ef,x} = \mu_x \cdot l$ двутаврового элемента предусмотрим симметричное повреждение площадью $2A_{0,f}$ (рис. 2), ис-

ключающее влияние изгибно-крутильных перемещений на устойчивость. В соответствии с нормативным методом расчета¹ загрузим шарнирно закрепленный стержень (отсутствует угол закручивания концевых сечений) моделируется действием продольной силы N^0 с равными концевыми эксцентриситетами в плоскости большей жесткости $e_{y*}^0 = e_y^0 + e_f^0$. При этом e_y^0 определяется по максимальному моменту $e_y^0 = M_{x,max}^0 / N^0$, а e_f^0 принимается эквивалентным начальному искривлению оси [11]. Если начальное искривление оси оказывает разгружающее действие, тогда $e_f^0 = 0$.

Решение деформационной задачи обратным численно-аналитическим методом [12] будем проводить на неограниченно упругой модели элемента с постоянной жесткостью. На рис. 3, а показано нагружение элемента упругими продольной силой N^* и изгибающим моментом M_x^* .

Развитие пластических деформаций в наиболее нагруженном сечении изначально неповрежденного элемента считаем распространенным по всей длине стержня (в запас устойчивости), что позволяет учесть физическую нелинейность с помощью эквивалентной фиктивной силы $N_{\phi 1}^0$, действующей

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

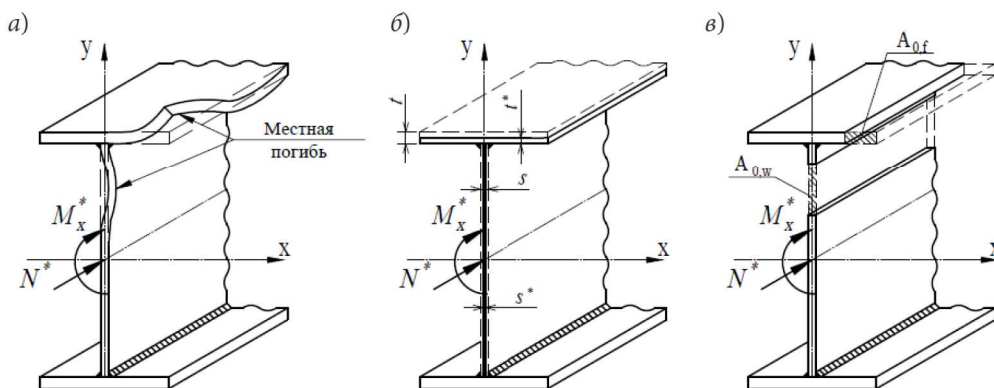


Рис. 1. Схема действующих усилий: а — в сечении с местной погибью; б — потеря местной устойчивости при коррозионном повреждении; в — местные вырезы (ослабления) — эквивалентное редуцированное сечение

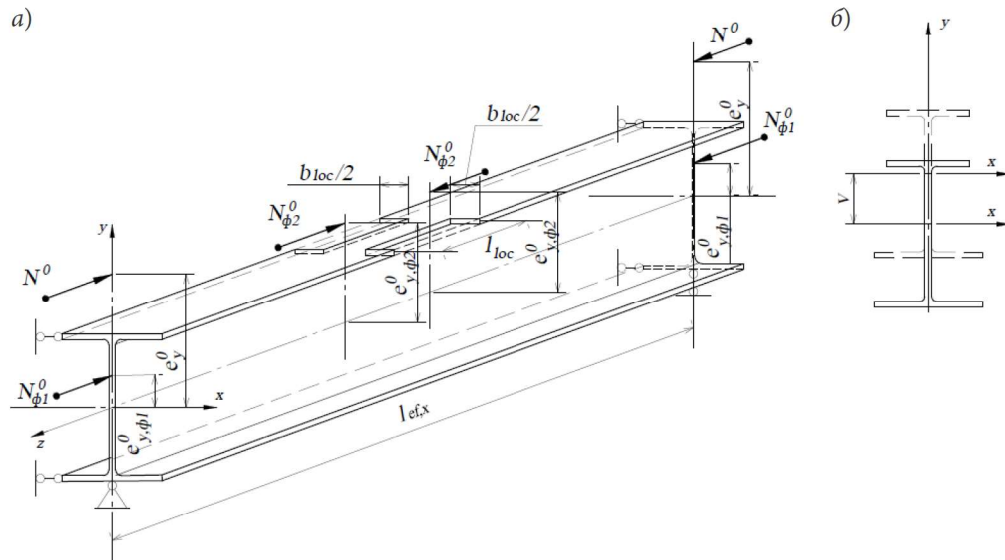


Рис. 2. Расчетная модель стержня: а — схема нагружения; б — схема деформирования

на торцах (рис. 3, б) с эксцентриситетом $e_{y, \phi 1}^0$ ($M_{x, \phi 1}^0 = N_{\phi 1}^0 \cdot e_{y, \phi 1}^0$).

Поврежденный средний участок, представляющий собой вырез длиной l_{loc} с общей шириной b_{loc} (рис. 3, в), заменяется на неповрежденный (рис. 3, г) с эквивалентным догружением силой $N_{\phi 2}^0$ с $e_{y, \phi 2}^0$ ($M_{x, \phi 2}^0 = N_{\phi 2}^0 \cdot e_{y, \phi 2}^0$).

Используя обратный численно-аналитический метод расчета, представленный в работе [15], и нормативные¹ расчетные модели неограниченно упругого стержневого элемента, можно определить параметры общего нагружения $\varphi_{ex}^{loc} = N^0 / A \cdot R_y$ и $m_x^0 = \frac{e_{y, \phi 1}^0}{\rho_x}$ на торцах элемента.

Обратное решение деформационных задач, как отмечалось в работе [11], по изгибной форме проводим по заданному i -му деформированному состоянию в наиболее нагруженном сечении ($\bar{z} = 0,5$) с максимальной относительной деформацией $\bar{\varepsilon}_{max, i} = \varepsilon_{max, i} \cdot E / R_y$, которая в задачах устойчивости, в зависимости от гибкости элемента, может находиться в пределах $0,8 < \bar{\varepsilon}_{max, i} < 4$. При этом малым значениям условной гибко-

сти $\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{R_y / E}$ задают большие значения $\bar{\varepsilon}_{max, i}$, а большим — меньшие.

Деформированное i -е состояние, как было предложено в [11], моделируем действием упругих усилий N_i^* , $M_{x, i}^*$ (см. рис. 3, а), соответствующих неограниченно упругой работе материала. Тогда в безразмерных параметрах напряженное и деформированное состояние можно представить в одном виде:

$$\bar{\sigma}_i^*(\bar{y}) = \bar{\varepsilon}_i^*(\bar{y}) = \varphi_{ex, i}^* (1 + m_{x, i}^* \bar{y}), \quad (1)$$

где $\varphi_{ex, i}^* = \bar{\varepsilon}_{max, i} (1 + m_{x, i}^*)^{-1}$; $\varphi_{ex, i}^* = N_i^* / A \cdot R_y$; $m_{x, i}^* = M_{x, i}^* / N_i^* \rho_x$; $\bar{y} = y / y^*$, y^* — координаты наиболее напряженных волокон; A — площадь неослабленного сечения.

Используя (1) и алгоритм «Сечение», с учетом диаграммы работы стали $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$ (рис. 4, а) [11] определяем:

• параметры фактически действующей силы $\varphi_{ex}^{loc} = N^0 / A \cdot R_y$ с деформационным относительным эксцентриситетом m_x :

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{ex}^{loc} &= \varphi^* \left(\bar{A}_{ef} - m_x^* \frac{\rho_x}{y^*} \bar{S}_x \right); \\ m_x &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{ex}^{loc}} \left(-\bar{S}_x + m_x^* \frac{\rho_x}{y^*} \bar{I}_{x, ef} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

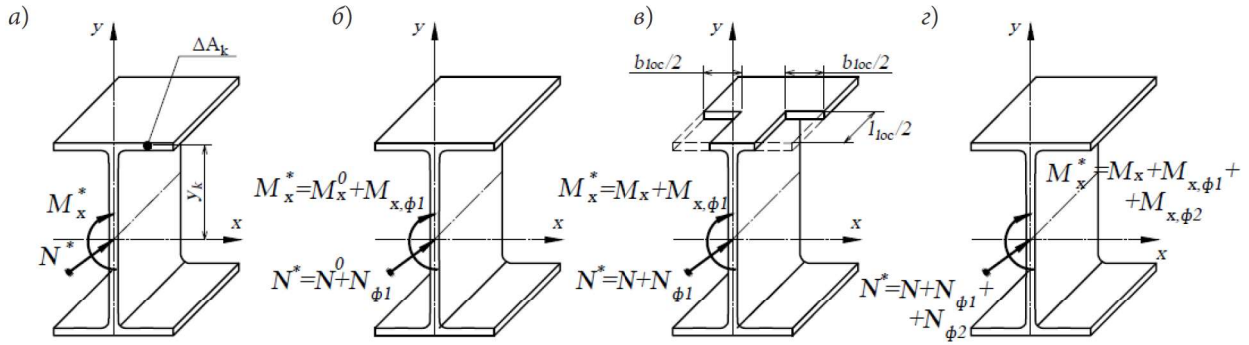


Рис. 3. Расчетные схемы загрузки: а — упругие усилия; б — фактически действующие и фиктивные усилия на торцах элемента; в — фактически действующие и фиктивные усилия в поврежденном сечении; з — то же в неповрежденном наиболее нагруженном сечении

где

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_{ef} &= 1 - \bar{A}_{pl} - \bar{A}_{loc}; \\ \bar{A}_{pl} &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ск}) \Delta \bar{A}_k; \quad \bar{A}_{loc} = \sum_{k=1}^{n_b} \bar{E}_{ск} \Delta \bar{A}_k; \\ \bar{S}_x &= \bar{S}_{x,pl} + \bar{S}_{x,loc}; \\ \bar{S}_{x,pl} &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ск}) \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k; \quad \bar{S}_{x,loc} = \sum_{k=1}^{n_b} \bar{E}_{ск} \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k; \\ \bar{I}_{x,ef} &= \frac{I_x}{\rho_x^2 A} - \bar{I}_{x,pl} - \bar{I}_{x,loc}; \\ \bar{I}_{x,pl} &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ск}) \tilde{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k; \quad \bar{I}_{x,loc} = \sum_{k=1}^{n_b} \bar{E}_{ск} \tilde{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$\bar{A}_{pl}$, $\bar{A}_{loc}$ — площадь ослабления сечения развитием пластических деформаций и вырезом соответственно; $\bar{S}_{x,pl}$, $\bar{S}_{x,loc}$ — относительные статические моменты соответствующих ослаблений; $\bar{I}_{x,pl}$ и $\bar{I}_{x,loc}$ — относительные моменты инерции ослабления развитием пластических деформаций и площади выреза соответственно; $\tilde{y}_k = y_k / \rho_x$; $\bar{E}_{ск} = \tan \alpha$ — относительный секущий модуль (см. рис. 4, а); n — число площадок ΔA_k полного сечения; n_b — число площадок ΔA_k сечения выреза;

• параметры фиктивной силы $\Phi_{\phi 1} = N_{\phi 1}^0 / A \cdot R_y$ с $m_{x,\phi 1}^0$, учитывающие влияния физической нелинейности [11]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\phi 1} &= \Phi^* \left(\bar{A}_{pl} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,pl} \right); \\ m_{x,\phi 1}^0 &= \frac{\Phi^*}{\Phi_{\phi 1}} \left(\bar{S}_{x,pl} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,pl} \right); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

• параметры фиктивной силы $\Phi_{\phi 2} = N_{\phi 2}^0 / A \cdot R_y$ с $m_{x,\phi 2}^0$, учитывающие влияние симметричного выреза:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\phi 2} &= \Phi^* \left(\bar{A}_{loc} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,loc} \right); \\ m_{x,\phi 2}^0 &= \frac{\Phi^*}{\Phi_{\phi 2}} \left(\bar{S}_{x,loc} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,loc} \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В соответствии с методом [11] определим напряженное состояние в наиболее напряженном сечении при совместном действии фактической N_i^0 и фиктивных сил $N_{\phi 1,i}^0$ и $N_{\phi 2,i}^0$, имеющих соответствующие параметры: $\Phi_{ex,i}^{loc}$ — по (2), $\Phi_{\phi 1,i}$ — по (4) и $\Phi_{\phi 2,i}$ — по (5).

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_i(\bar{y}) &= \Phi_{ex,i}^* + \Phi_{ex,i}^{loc} \times \\ &\times \left[\left(m_{x,i}^0 + m_{x,\phi 1,i}^0 \frac{\Phi_{ex,\phi 1,i}}{\Phi_{ex,i}^{loc}} \right) K_{d,x1,i} + \right. \\ &\quad \left. + m_{x,\phi 2,i}^0 \frac{\Phi_{ex,\phi 2,i}}{\Phi_{ex,i}^{loc}} K_{d,x2,i} \right] \bar{y}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Phi_{ex,i}^* = \Phi_{ex,i}^{loc} + \Phi_{ex,\phi 1,i} + \Phi_{ex,\phi 2,i};$$

$$\begin{aligned} K_{d,x1,i} &= 1 + \frac{\Phi_{ex,i}^{loc} \bar{\lambda}_x^2}{8} \times \\ &\times \left(1 - \frac{\Phi_{ex,i}^{loc} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right)^{-1} \left(1 + 0,032 \frac{\Phi_{ex,i}^{loc} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right); \\ K_{d,x2,i} &= 1 + \frac{\Phi_{ex,i}^{loc} \bar{\lambda}_x^2}{8} \left(1 - \frac{\Phi_{ex,i}^{loc} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right)^{-1} \times \end{aligned}$$

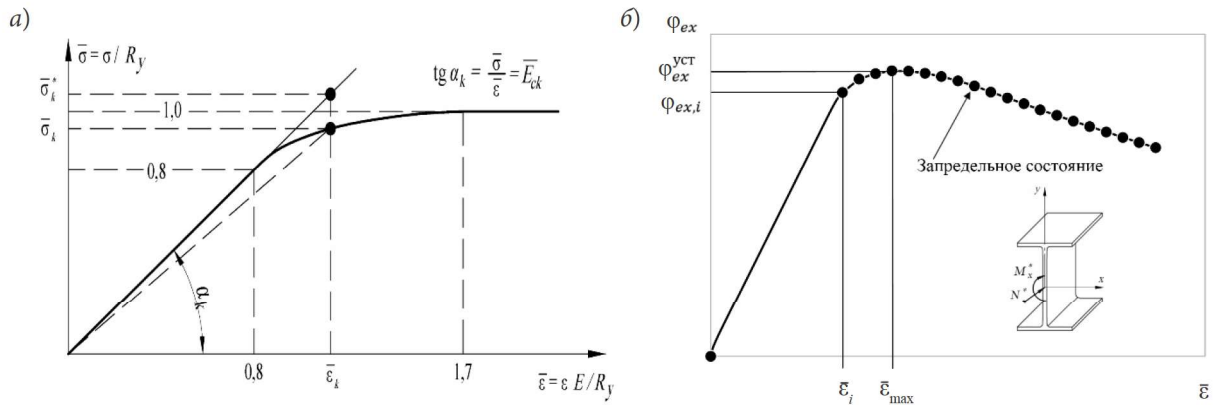


Рис. 4. Графики: а — унифицированный работы стали; б — зависимости коэффициента продольной силы от максимальной относительной деформации при $m_{x,i}^0 = \text{const}$

$$\times \left[\left(\frac{l_{loc}}{l} \right)^2 \left(\frac{2l}{l_{loc}} - 1 \right) \left(1 - \frac{\varphi_{ex,i}^{loc} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right) + \right. \\ \left. + 1,032 \frac{\varphi_{ex,i}^{loc} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \sin \frac{\pi l_{loc}}{2l} \right]. \quad (7)$$

В (6) неизвестным остается только концевой относительный эксцентриситет m_x^0 силы N^0 с параметром φ_{ex}^{loc} , который можно определить при сопоставлении напряженных состояний (1) и (6):

$$\bar{\varepsilon}_{max,i} = \varphi_{ex,i}^* + \varphi_{ex,i}^{loc} \times \\ \times \left[\left(m_{x,i}^0 + m_{x,\phi 1,i}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 1,i}}{\varphi_{ex,i}^{loc}} \right) K_{d,x1,i} + \right. \\ \left. + m_{x,\phi 2,i}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 2,i}}{\varphi_{ex,i}^{loc}} K_{d,x2,i} \right] \bar{y}, \quad (8)$$

тогда

$$m_{x,i}^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i} - \varphi_{ex,i}^*}{\varphi_{ex,i}^{loc} K_{d,x1,i}} - m_{x,\phi 1,i}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 1,i}}{\varphi_{ex,i}^{loc}} \times \\ \times \left(1 + \frac{m_{x,\phi 2,i}^0 \varphi_{ex,\phi 2,i} K_{d,x2,i}}{m_{x,\phi 1,i}^0 \varphi_{ex,\phi 1,i} K_{d,x1,i}} \right). \quad (9)$$

Поиск предельной силы, определяющей устойчивость элемента $\varphi_{ex}^{уст}$, идет по мере роста i -х деформированных состояний в самом нагруженном сечении ($\bar{\varepsilon}_{max,i} = 0,8 + \Delta \bar{\varepsilon} \cdot i$; $\Delta \bar{\varepsilon} = 3,2/n$; $i = 1, 2, \dots, n$) в случае удержания относительного концевого эксцентриситета продольной силы N^0 (φ_{ex}^{loc}) постоянным ($m_{x,i}^0 = \text{const}$). На рис. 4, б показана

зависимость $\varphi_{ex,i}^{loc}$ от $\bar{\varepsilon}_i$. Видно, что коэффициенты устойчивости определяются максимальным значением $\varphi_{ex}^{уст} = \max(\varphi_{ex,i}^{loc})$.

Влияние повреждения на устойчивость стержневого элемента

Используя предложенную модель внецентренно сжатого стержня и математический аппарат, определим коэффициент потери устойчивости поврежденного элемента. Результаты расчетов коэффициентов потери устойчивости поврежденного φ_{ex}^{loc} и неповрежденного φ_{ex} стального двутаврового элемента в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}_x$ и относительного эксцентриситета m_x^0 при соотношении площади полки и стенки $\alpha_f = A_f / A_w = 1,0$ (колонный двутавр) приведены на рис. 5. Из графиков видно, что ослабление наиболее напряженной полки площадью, составляющей 7,4 % (см. рис. 5, а) и 11,1 % (см. рис. 5, б) от общей площади, снижает устойчивость в пределах 11,3–16,4 % и 16,0–23,4 % соответственно, что в 1,5–2,2 раза больше площади ослабления. Большие значения относятся к меньшим условным гибкостям элемента $\bar{\lambda}_x$, а меньшие — к большим. Стоит отметить также, что кратное увеличение длины повреждения l_{loc} оказывает незначительное влияние на устойчивость стального элемента.

Для проверки достоверности используемого обратного численно-аналитического метода расчета сопоставим полученные ре-

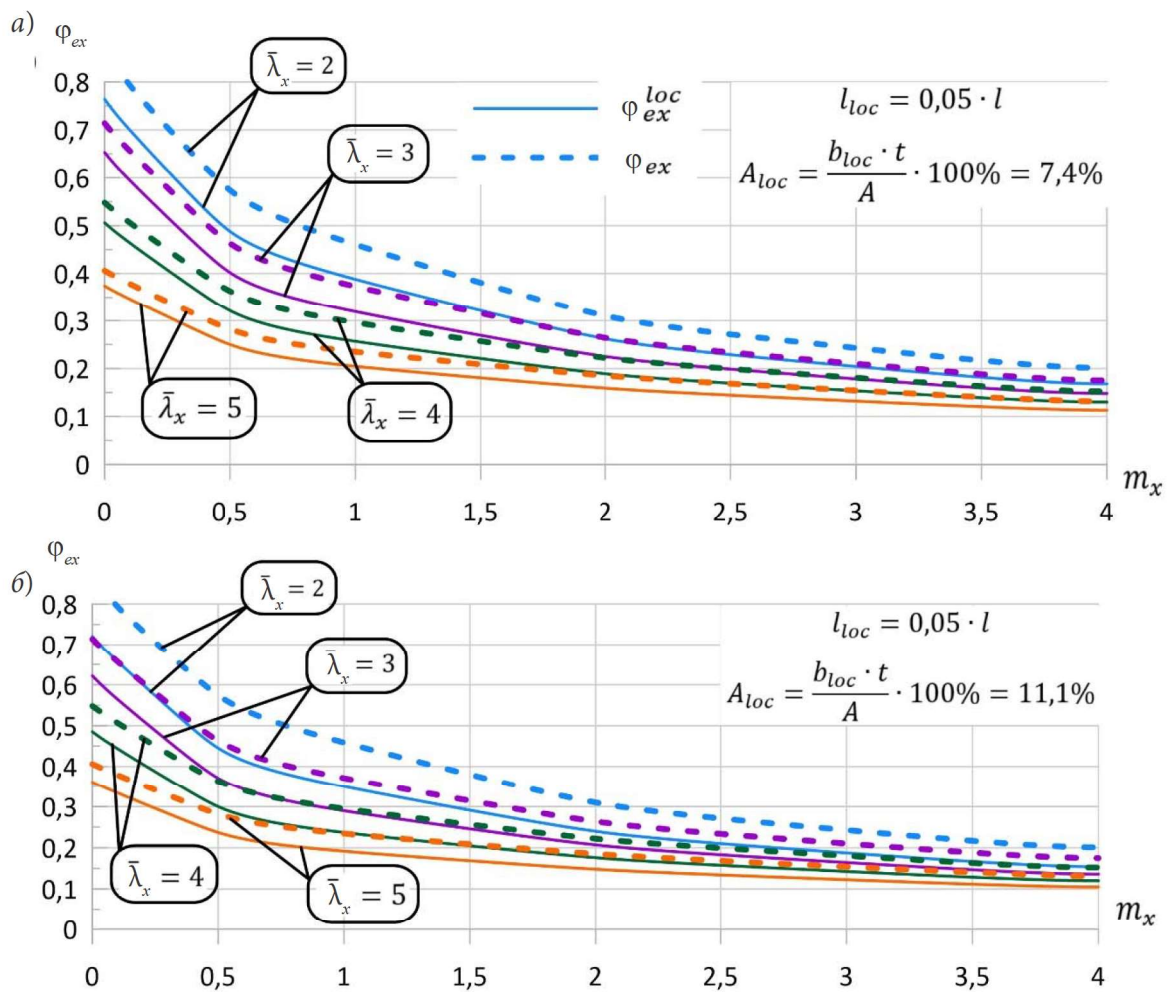


Рис. 5. График зависимости коэффициента устойчивости поврежденного и неповрежденного элемента от m_x и $\bar{\lambda}_x$ при: а — $A_{loc} = 7,4\%$; б — $A_{loc} = 11,1\%$

зультаты с расчетами методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS (см. таблицу).

Сравнение результатов свидетельствует о вполне достоверном решении задачи устойчивости поврежденных элементов. Наибольшее расхождение составляют 6,33 %, его можно объяснить тем, что в обратном численно-аналитическом методе развитие пластических деформаций в наиболее нагруженном неповрежденном сечении распространяется по всей длине стержня.

С целью разработки практических рекомендаций покажем влияние ослаблений с общей шириной b_{loc} ($A_{loc} = b_{loc} \cdot t / A$) и длиной

l_{loc} (см. рис. 3, в) на устойчивость стержневого элемента, выраженного в виде коэффициента $K_{loc} = \varphi_{ex}^{loc} / \varphi_{ex}$ (рис. 6).

Из анализа графиков, представленных на рис. 6, видно, что при увеличении условной гибкости элемента $\bar{\lambda}_x$ влияние ослабления сечения на устойчивость по изгибной форме снижается.

Выводы

1. Обратный численно-аналитический метод обобщен для решения задач устойчивости поврежденных вырезом элементов, имеющих к тому же начальное искривление оси.

2. Выявлено снижение устойчивости повреждениями, находящимися в наиболее на-

Отношение $1 - \varphi_{ex,МКЭ}^{loc} / \varphi_{ex}^{loc}$ для двутаврового сечения при $l_{loc} = 0,05 \cdot l$

m_x	$\bar{\lambda}_x$							
	2		3		4		5	
	$A_{loc} = 7,4 \%$	$A_{loc} = 11,1 \%$	$A_{loc} = 7,4 \%$	$A_{loc} = 11,1 \%$	$A_{loc} = 7,4 \%$	$A_{loc} = 11,1 \%$	$A_{loc} = 7,4 \%$	$A_{loc} = 11,1 \%$
0,5	-4,10	-5,17	-4,23	-5,66	-4,05	-6,00	-4,00	-6,33
2	-3,05	-2,92	-2,22	-3,38	-1,06	-5,11	-1,89	-4,05
4	-0,60	-0,65	-1,35	0,00	-0,77	-3,33	-0,88	-1,90

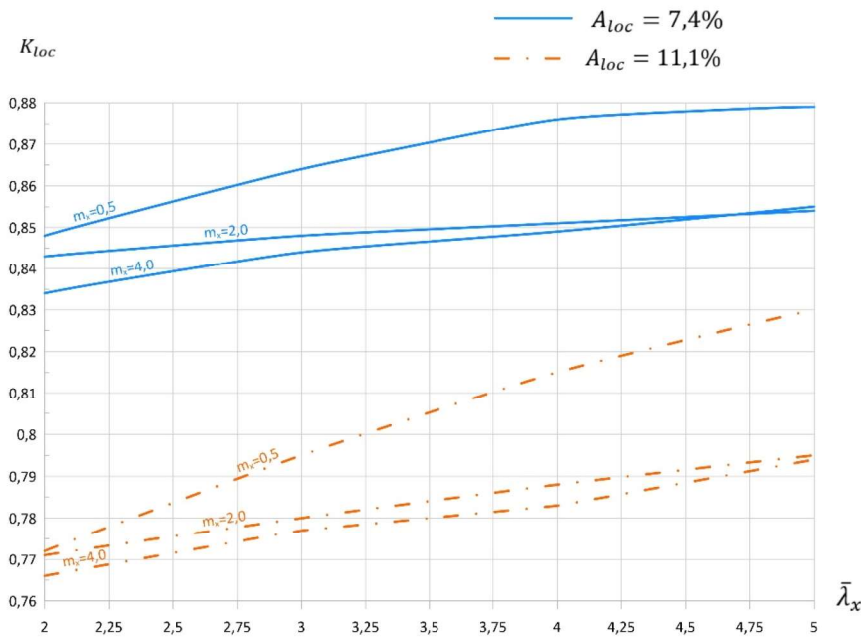


Рис. 6. График зависимости коэффициента K_{loc} , учитывающего влияние ослабления на устойчивость по изгибной форме, от λ_x при $l_{loc} = 0,05 \cdot l$

пряженной зоне, которое может быть больше в 1,5–2,2 раза, чем площадь ослабления.

3. Увеличение длины локального повреждения l_{loc} в 2–3 раза практически не оказывает влияния на устойчивость.

4. Полученные значения коэффициента K_{loc} , учитывающего влияние повреждений на устойчивость по изгибной форме, могут быть использованы для расчета устойчивости поврежденного элемента. Расчет удобно производить по формуле (109) СП 16.13330.2017¹ как для неповрежденного элемента с добавлением коэффициента K_{loc} [14]:

$$\frac{N}{K_{loc} \varphi_{ex} A R_y \gamma_c} \leq 1.$$

Библиографический список

- Мамин А. Н., Кодыш Э. Н., Еришов М. Н., Бобров В. В., Рэуцу А. В. Реставрация водонапорной башни Нижне-Выксунского завода // Строительство и реконструкция. 2019. № 1 (81). С. 67–75.
- Ведяков И. И., Гукова М. И., Фарфель М. И., Корякишин Д. Ю., Кашин О. В. Обследование высотной части павильона «Космос» в городе Москве // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 13 октября 2017 г. СПб.: Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого, 2017. С. 30–40.
- Яровой С. Н., Дорофеев Е. Ю. Опыт обследования большепролетных покрытий Дворца спорта в Харькове // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VIII Междунар. науч.-

практ. конф. Санкт-Петербург, 13 октября 2017 г. СПб.: Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого, 2017. С. 212–221.

4. Saad-Eldeen S., Garbatov Y., Soares C. G. Ultimate strength analysis of highly damaged plates // *Marine Structures*. 2016. Vol. 45. Pp. 63–85.

5. Raviprakash A. V., Prabu B., Alagumurthi N. Residual ultimate compressive strength of dented square plates // *Thin-Walled Structures*. 2012. Vol. 58. Pp. 32–39.

6. Paik J. K., Lee J. M., Lee D. H. Ultimate strength of dented steel plates under axial compressive loads // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003. Vol. 45, no. 3. Pp. 433–448.

7. Ao L., Wu H., Wang D., Wu W. Evaluation on the residual ultimate strength of stiffened plates with central dent under longitudinal thrust // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 202 (2). 107167.

8. Zhongwei Z., Ni Z., Jinjia W., Youran G., Qingwei S., Seung-Eock K. Shear capacity of steel plates with random local corrosion // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 239. 117816.

9. Zhengyi K., Golder Md Sabbir H., Shaozheng H., Yan W., Quang-Viet V., Viet-Hung T., Qinglin T. Experimental and theoretical study on mechanical properties of mild steel after corrosion // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 246 (2). 110652.

10. 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. No. 11 (12). 571.

11. Белый Г. И. К расчету устойчивости элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями // *Вестник гражданских инженеров*. 2024. № 3 (104). С. 25–35.

12. 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.

13. 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.

14. Белый Г. И., Гарипов А. И. Запредельная несущая способность стержневых элементов стальных конструкций после потери общей устойчивости // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 5 (94). С. 5–19.

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., Матвеев Е. А. Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2024. № 4 (19). С. 544–556.

Reference

1. Mamin A. N., Kodysh E. N., Ershov M. N., Bobrov V. V., Reutsu A. V. *Restavratsiya vodonapornoy bashni Nizhne-Vyksunskogo zavoda* [Restoration of the water tower of the Nizhne-Vyksun plant]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and Reconstruction*, 2019, no. 1 (81), pp. 67–75.

2. Vedyakov I. I., Gukova M. I., Farfel' M. I., Konyashin D. Yu., Kashin O. V. *Obsledovanie vysotnoy chasti pavil'ona «Kosmos» v gorode Moskve* [Survey of the high-rise part of the pavilion “Cosmos” in Moscow]. *Obsledovanie zdaniy isooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya. Trudy VIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Sankt-Peterburg, 13 oktyabrya 2017 g.* [Survey of buildings and structures: problems and solutions. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference St. Petersburg, October 13, 2017.]. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskiy politekhn. un-t Petra Velikogo Publ., 2017, pp. 30–40.

3. Yarovoy S. N., Dorofeev E. Yu. *Opyt obsledovaniya bol'sheproletnykh pokrytiy Dvortsa sporta v Khar'kove* [Experience of inspection of large-span coverings of the Palace of Sports in Kharkov]. *Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya. Mat-ly VIII mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Sankt-Peterburg, 13 oktyabrya 2017 g.* [Inspection of buildings and structures: problems and solutions. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference St. Petersburg, October 13, 2017.]. St. Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great Publ., 2017, pp. 212–221.

4. Saad-Eldeen S., Garbatov Y., Soares C. G. Ultimate strength analysis of highly damaged plates. *Marine Structures*, 2016, vol. 45, pp. 63–85.

5. Raviprakash A. V., Prabu B., Alagumurthi N. Residual ultimate compressive strength of dented square plates. *Thin-Walled Structures*, 2012, vol. 58, pp. 32–39.

6. Paik J. K., Lee J. M., Lee D. H. Ultimate strength of dented steel plates under axial compressive loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2003, vol. 45, no. 3, pp. 433–448.

7. Ao L., Wu H., Wang D., Wu W. Evaluation on the residual ultimate strength of stiffened plates with central dent under longitudinal thrust. *Ocean Engineering*, 2020, vol. 202 (2), 107167.

8. Zhongwei Z., Ni Z., Jinjia W., Youran G., Qingwei S., Seung-Eock K. Shear capacity of steel plates with random local corrosion. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 239, 117816.

9. Zhengyi K., Golder Md Sabbir H., Shaozheng H., Yan W., Quang-Viet V., Viet-Hung T., Qinglin T. Experimental and theoretical study on mechanical properties of mild

steel after corrosion. *Ocean Engineering*, 2022, vol. 246 (2), 110652.

10. 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, no. 11 (12), p. 571.

11. Beliy G. I. *Kraschetu ustoychivosti elementov stal'nykh konstruktsiy s defektami i povrezhdeniyami* [To calculation of stability of elements of steel structures with defects and damages]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2024, no. 3 (104), pp. 25–35.

12. Beliy G. I. «Obratniy» metod rascheta usilivaemykh pod nagruzkoy sterzhnevykh elementov stal'nykh konstruktsiy putem uvelicheniya secheniy [“Reverse” 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.

13. Beliy G. I., Smirnov M. O. *Obratniy chislenno-analiticheskiy metod rascheta legkikh stal'nykh tonkostennykh sterzhnevykh elementov* [Inverse numerical and 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.

14. Beliy G. I., Garipov A. I. *Zapredel'naya nesushchaya sposobnost' sterzhnevykh elementov stal'nykh konstruktsiy posle poteri obshchey ustoychivosti* [Ultimate load-bearing capacity of rod elements of steel structures after loss of general stability]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 5 (94), pp. 5–19.

15. Beliy G. I., Vedernikova A. A. *Issledovanie prochnosti i ustoychivosti trubobetonnykh elementov konstruktsiy obratnym chislenno-analiticheskim metodom* [Investigation 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. Beliy G. I., Matveev E. A. *Sovershenstvovanie metoda rascheta povrezhdennykh elementov stal'nykh konstruktsiy* [Improvement of the method of calculation of the damaged elements of steel structures]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2024, no. 4 (19), pp. 544–556.