УДК 624.072.2.014.2-413:624.014.2

© Д. С. Боровский, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: dmitrii.borovskii.sk@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-36-41

© D. S. Borovskii, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: dmitrii.borovskii.sk@gmail.com

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ УСИЛИВАЕМЫХ ПОД НАГРУЗКОЙ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

STRENGTH CALCULATION OF REINFORCED UNDER LOAD STEEL ROD STRUCTURES ELEMENTS WITH MULTI-PARAMETER LOADING

Рассмотрена методика расчета усиленных под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций открытого профиля на прочность при многопараметрическом нагружении. Для сокращения объема вычислений используется «обратный» ход решения задачи прочности с использованием алгоритма «Сечение» в безразмерных параметрах. По предельному состоянию стержня в наиболее нагруженном сечении по заданным относительным эксцентриситетам определяются фактически действующие усилия с учетом упруго-пластической работы материала.

Ключевые слова: расчет на прочность, усиление металлических конструкций, усиление под нагрузкой, внецентренное сжатие.

The article considers the methodology for structural analysis of reinforced under load open-section steel structure elements for strength with multi-parameter loading. In order to reduce the volume of calculations, the reverse course of solving the strength problem is proposed using the «Section» algorithm in dimensionless parameters. According to the limit state of the rod in the most loaded main section and given relative eccentricities, real acting forces are determined taking into account the elastic-plastic performance of the section.

Keywords: structural analysis for strength, steel structure reinforcement, under load reinforcement, eccentric compression.

Реконструкция и техническое перевооружение промышленных предприятий, проводимые в настоящее время, как правило, связаны с увеличением эксплуатационных нагрузок на физически изношенные конструкции, что требует их усиления. Классификация приемов и методов усиления стальных конструкций приведена в монографиях М. Н. Лашенко [1–3]. В условиях действующего производства усиление практически проводится, когда конструкции находятся под нагрузкой. Поэтому проектирование и расчет их усиления следует выполнять с учетом негативного влияния сварочных процессов усиления на несущую способность. Этой проблеме было посвящено достаточное количество исследований, среди которых следует отметить исследования Б. И. Десятова [4], И. С. Реброва [5], И. К. Ро-

дионова [6] и др. Практические методы расчета были предложены М. Р. Бельским и А. Н. Лебедевым [7], А. В. Столбовым [8] и др., затем они были обобщены в монографиях И. С. Реброва [9, 10]. Однако в этих работах и в пособии по усилению¹ расчет на прочность за пределами упругости рассматривается по модели шарнира пластичности, что противоречит действующим нормам проектирования СП 16.13330.2017².

В настоящей статье на основе «обратного» метода расчета [11] исследуется прочность по критерию ограниченных пластических деформаций $\bar{\epsilon}_{lim,p} = \epsilon_{lim,p} E / R_y = 3$ ($\bar{\epsilon}_{max} = 4$) усиленного стержневого элемента способом увеличения сечения, находящегося под нагрузкой.

¹ Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП-II-2381*). М.: Стройиздат, 1989. 159 с.

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. М., 2017. 139 с.

Первоначальная схема усиления назначается в результате расчета упругого неусиленного стержневого элемента по наиболее неблагоприятным комбинациям усилий, полученных в результате статического расчета конструкций при действии расчетных нагрузок. Элементы усиления рационально размещать вблизи перенапряженных зон, установленных в результате упомянутого статического расчета. Общее сечение усиленного элемента должно обладать осью симметрии во избежание неблагоприятного влияния дополнительных усилий, возникающих в процессе сварочных работ.

Следуя методу [11], рассмотрим усиленный с двух сторон (см. заштрихованные площадки на рис. 1) неограниченно упругий стержневой элемент, в сечении которого действуют: продольная сила N , изгибающие в двух главных плоскостях моменты M_x , M_y и поперечная сила Q_y в плоскости симметрии, влияние которой можно учесть на завершающем этапе расчета согласно СП 16.13330.2017².

С целью практического применения решение проводится в безразмерных параметрах, в соответствии с которым общим параметром загрузки принимается коэффициент продольной силы $\varphi = N/(R_{y0}A)$. Тогда предельное состояние в сечении упругого стержня по $\bar{\mu}_{lim} = 4$ примет вид:

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

Рис. 1. Общее нагружение силовыми факторами

где $\varphi = 4(1 + m_x + m_y)^{-1}$; $\bar{x} = x/x_*$; $\bar{y} = y/y_*$; $m_x = M_x/(N\rho_x)$; $m_y = M_y/(N\rho_y)$; $\rho_x = W_{xc}/A$; $\rho_y = W_{yc}/A$; W_{xc} , W_{yc} — моменты сопротивления наиболее напряженного волокна усиленного элемента с координатами x_* , y_* .

Определение предельного состояния за пределом упругости с учетом начального нагружения¹ $\beta = \sigma_{max,n}/R_{y0}$ по соответствующему деформированному состоянию (1) проведем с разбиснением сечения усиленного стержня n_0 и элементов усиления n_y дискретных площадок ΔA_{k0} и ΔA_{ky} с координатами центра тяжести x_{k0} , y_{k0} и x_{ky} , y_{ky} соответственно (см. рис. 1). При этом воспользуемся унифицированной диаграммой работы стали $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$, соответствующей расчетному сопротивлению усиленного стержня R_{y0} (см. сплошную линию на рис. 2), на которую наложим диаграмму, соответствующую расчетному сопротивлению элементов усиления R_{yy} в предположении, что $R_{yy} > R_{y0}$ (пунктирная линия). Затем, обращаясь к алгоритму «Сечение» [11], определяем фактический коэффициент продольной силы φ_{ef} и его относительные эксцентриситеты:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{ef} &= \varphi(\bar{A}_{ef} - m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c) \\ m_{x,ef} &= (-\bar{y}_c + m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{x,ef}^2 - m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{xy,ef}^2) \times \\ &\quad \times (\bar{A}_{ef} - m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c)^{-1} \\ m_{y,ef} &= (-\bar{x}_c - m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{xy,ef}^2 + m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{y,ef}^2) \times \\ &\quad \times (\bar{A}_{ef} - m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c)^{-1} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Получив (2), практический метод расчета на прочность можно свести к виду:

Рис. 2. Унифицированная диаграмма работы стали с R_{y0}

$$\frac{1}{\gamma_c R_y c_p} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{\beta_\tau I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1, \quad (3)$$

где

$$c_p = \varphi_{ef} (1 + m_{x,ef} + m_{y,ef}) > 1. \quad (4)$$

В (3) коэффициент c_p учитывает развитие пластических деформаций при совместном действии N, M_x, M_y с относительными эксцентриситетами $m_{x,ef}, m_{y,ef}$ по (2).

Коэффициент β_τ в (3), согласно СП 16.13330.2017² характеризует влияние поперечной силы Q_y (при $0,5R_s \leq \tau \leq 0,9R_s$) на прочность за пределом упругости.

На рис. 3–5 приведено сравнение коэффициентов c_p , полученных согласно методу [11] для

неусиленных сечений, с действующими нормами проектирования². На рис. 6–8 приведены значения c_p для различных соотношений площадей полки и стенки неусиленного сечения $A_0 = 2A_f + A_w$ при различных отношениях площадей элементов усиления к неусиленному сечению $\bar{A}_y = A_y / A_0$ в случае одностороннего и двустороннего симметричного усиления. На рис. 9 показан характер изменения значений c_p для различных соотношений площадей усиления верхней и нижней полки $\bar{A}_{y1} = A_{y1} / (A_{y1} + A_{y2})$ при неизменной общей площади усиления $\bar{A}_y = A_y / A_0 = 0,2 \dots 0,4$.

Рис. 3. Сравнение коэффициентов $c_p, m_{y,ef} = 0; m_{x,ef} \neq 0$ для $A_f / A_w = 0,25 \dots 1,0$ с нормами²

Рис. 4. Сравнение коэффициентов $c_p, m_{y,ef} = 0; m_{x,ef} \neq 0$ для $A_f / A_w = 2,0$ с нормами²

Рис. 5. Сравнение коэффициентов $c_p, m_{y,ef} \neq 0; m_{x,ef} \neq 0$ для $A_f / A_w = 0.5$ с нормами²

Рис. 6. Коэффициент $c_p, m_{y,ef} = 0; m_{x,ef} \neq 0$ для $A_f / A_w = 0.25 \dots 1.0$ при различных отношениях A_y / A_0

Рис. 7. Коэффициент $c_p, m_{y,ef} = 0; m_{x,ef} \neq 0$ для $A_f / A_w = 0.25 \dots 1.0$ при $A_y / A_0 = 0 \dots 0.4$

Рис. 8. Коэффициент c_p , $m_{y,ef} \neq 0$; $m_{x,ef} \neq 0$ для $A_f / A_w = 0,5$, $A_y / A = 0,2$ Рис. 9. Коэффициент c_p , $m_{x,ef} > 5$ для $A_f / A_w = 0,5$ при различных $\overline{A_{y1}}$; $A_y / A_0 = 0,2 \dots 0,4$

Выводы

Получен ряд значений коэффициентов c_p , учитывающих развитие пластических деформаций при решении задач прочности по критерию максимальной относительной деформации $\bar{\epsilon}_{lim} = 4$ при совместном действии усилий (продольной силы и изгибающих моментов как в плоскости большей жесткости сечения, так и из этой плоскости) при использовании «обратного» численно-аналитического метода [11].

Решение задач прочности для неусиленного бисимметричного сечения при совместном действии продольной силы и изгибающего момента $m_{x,ef}$ в плоскости большей жесткости сечения по-

казало хорошую сходимость результатов расчета при использовании метода [11] с существующими нормами проектирования СП 16.13330.2017. При этом выявлены незначительные (около 5 %) резервы несущей способности при расчете по существующим нормам.

Для неусиленного моносимметричного сечения с развитой верхней полкой при совместном действии продольной силы и изгибающего момента $m_{x,ef}$ в плоскости большей жесткости решение показало значительные (около 20 %) резервы несущей способности при соотношении $A_f / A_w = 2,0$ и значительных относительных эксцентриситетах ($m_{x,ef} > 5$), однако при соотноше-

нии $A_f / A_w = 0,5$ и малых относительных эксцентриситетах ($m_{x,ef} < 3$) наблюдается значительное (около 20 %) завышение несущей способности при расчете по существующим нормам.

При расчете бисимметричного сечения при совместном действии продольной силы и изгибающего момента $m_{x,ef}$ в плоскости наибольшей жесткости и из этой плоскости $m_{y,ef}$ выявлены значительные (до 30 %) резервы несущей способности в случае малых относительных эксцентриситетов в плоскости большей жесткости $m_{x,ef} < 5$ и значительных эксцентриситетов из этой плоскости $m_{y,ef} = 3...7$, при этом расчет в случае малых эксцентриситетов $m_{y,ef} = 0,5$ показал хорошую сходимость и незначительные резервы несущей способности (около 7 %) при расчете по нормам СП 16.13330.2017.

Библиографический список

1. Лащенко М. Н. Усиление металлических конструкций. М.; Л.: Госстройиздат, 1954. 155 с.
2. Лащенко М. Н. Регулирование напряжений в металлических конструкциях. Л.; М.: Стройиздат, 1966. 190 с.
3. Лащенко М. Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений. Л.: Стройиздат, 1969. 182 с.
4. Десятов Б. И. Исследование работы усиляемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 11 с.
5. Ребров И. С. К расчету стержневых систем, усиленных под нагрузкой // Изв. вузов. Сер. «Строительство и архитектура». 1979. № 1. С. 52–57.
6. Родионов И. К. Влияние технологических параметров сварки на работу сжатых, усиляемых увеличением сечения стержней стальных стропильных ферм, находящихся под нагрузкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1980. 23 с.
7. Бельский М. Р., Лебедев А. Н. Усиление стальных конструкций. Киев: Будивельник, 1981. 116 с.
8. Столбов А. В. Работа и расчет стальных балок, усиливаемых под нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1984. 248 с.
9. Ребров И. С. Работа сжатых элементов стальных конструкций, усиленных под нагрузкой. Л.: Стройиздат, 1976. 176 с.
10. Ребров И. С. Усиление стержневых металлических конструкций. Л.: Стройиздат, 1988. 288 с.
11. 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.

References

1. Lashchenko M. N. *Usilenie metallicheskih konstruktсий* [Strengthening of metal structures]. Moscow; Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1954, 155 p.
2. Lashchenko M. N. *Regulirovanie napryazheniy v metallicheskih konstruktсийah* [Regulation of stresses in metal structures]. Moscow; Leningrad, Stroyizdat Publ., 1966, 190 p.
3. Lashchenko M. N. *Avarii metallicheskih konstruktсий zdaniy i sooruzheniy* [Accidents taking place at metal structures of buildings and structures]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1969, 182 p.
4. Desyatov B. I. *Issledovanie raboty usilyaemyh pod nagruzkoj elementov svarnyh stal'nyh ferm. Avtoref. diss. kand. tehn. nauk* [Investigation of the work of elements of welded steel trusses reinforced under load. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1969, 11 p.
5. Rebrov I. S. *K raschetu sterzhnevyyh sistem, usilennyh pod nagruzkoj* [On the calculation of rod systems reinforced under load]. *Izv. vuzov. Ser. «Stroitel'stvo i arhitektura» – News of higher Schools. Ser. "Construction and Architecture"*, 1979, no. 1, pp. 52–57.
6. Rodionov I. K. *Vliyanie tehnologicheskikh parametrov svarki na rabotu szhatykh, usilyaemyh uvelicheniem secheniya sterzhney stal'nyh stropil'nykh ferm, nahodyashchihsya pod nagruzkoj. Avtoref. diss. kand. tehn. nauk* [Influence of technological parameters of welding on the operation of compressed, reinforced by increasing the cross-section of the rods of steel trusses under load. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1980, 23 p.
7. Bel'skiy M. R., Lebedev A. N. *Usilenie stal'nykh konstruktсий* [Strengthening of steel structures]. Kiev, Budivelnik Publ., 1981, 116 p.
8. Stolbov A. V. *Rabota i raschet stal'nykh balok, usilivaemykh pod nagruzkoj. Diss. kand. tehn. nauk* [Work and calculation of steel beams reinforced under load. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1984, 248 p.
9. Rebrov I. S. *Rabota szhatykh elementov stal'nykh konstruktсий, usilennyh pod nagruzkoj* [Operation of compressed elements of steel structures reinforced under load]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1976, 176 p.
10. Rebrov I. S. *Usilenie sterzhnevyyh metallicheskih konstruktсий* [Strengthening of rod metal structures]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1988, 288 p.
11. Belyy G. I. «Obratniy» metod rascheta usilivaemykh pod nagruzkoj sterzhnevyyh elementov stal'nykh konstruktсий putem uvelicheniya secheniy [«Reverse» method of calculating steel structure rod elements reinforced under load by increasing cross sections]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 6 (83), pp. 46–55.