

УДК 624.046, 624.072, 004.942

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-33-44

© А. И. Гарипов, старший научный сотрудник
(ООО «Научно-исследовательский и проектный
институт „Эксплуатационный ресурс конструкций“,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: azat.i.garipov@gmail.com

© A. I. Garipov, Senior Researcher
(Research and Design Institute
«Structures serviceability reserve», Ltd,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: azat.i.garipov@gmail.com

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ПРОВЕРКИ ПРОЧНОСТИ ЛСТК

THE IMPROVED ENGINEERING APPROACH TO RESISTANCE VERIFICATION OF LSTWS

Предложен усовершенствованный инженерный метод проверки прочности легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК). В формулах используются геометрические характеристики полного сечения и коэффициенты снижения предельных усилий из-за потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения. Показана зависимость коэффициентов от параметров формы сечения. Выявлен недостаток прочности спаренных стенка к стенке U-, C- и Σ -профилей при внецентренном сжатии в плоскости меньшей жесткости. Выявлены резервы прочности при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом. Усовершенствованный инженерный метод учитывает эти особенности и хорошо сходится с результатами исследований прочности по фактически редуцированному сечению. Приведены требования к сортаментам, выполнение которых обеспечивает эффективное использование метода.

Ключевые слова: местная устойчивость, устойчивость формы сечения, редукция сечения, эффективное поперечное сечение, прочность, осевое сжатие, изгиб, внецентренное сжатие.

The paper proposes an improved engineering approach to resistance verification of light steel thin-walled structures (LSTWS). The formulas use the geometric characteristics of the gross cross section and the factors of the ultimate forces' reduction due to the local buckling and the distortional buckling. The relationship between these factors and section shape parameters is shown. There is revealed a lack of strength in coupled wall-to-wall U-, C-, and Σ -profiles under eccentric compression in the plane of lower stiffness. Resistance reserves under eccentric compression and biaxial bending are found. The improved engineering approach takes into account these features and converges well with the research results obtained from the actual reduction of the section. Cross-section tables requirements are given, the fulfillment of which ensures the effective use of the presented approach.

Keywords: local buckling, distortional buckling, section reduction, effective cross section, strength, axial compression, bending, eccentric compression.

Введение

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) применяются в строительстве с середины прошлого века в США [1] и со второй половины прошлого века в Великобритании и других странах Европы [2].

Особенностью работы ЛСТК является потеря местной устойчивости в упругой стадии до достижения предельного состояния

по критериям прочности и общей устойчивости [3]. Для учета закритической работы пластинок при расчете ЛСТК используют концепцию эффективной ширины, сформулированную Карманом [4]. Развивая его идеи и используя теорию устойчивости Тимошенко, Винтер разработал основы теории расчета ЛСТК [3, 5]. Дальнейшие исследования были посвящены учету усиления пластин

отгибами [6] и связанной с этим потерей устойчивости формы сечения, учету влияния потери местной устойчивости на общую устойчивость [7] и другим вопросам работы отдельных пластинок в составе стержня. Существует также метод «конечных полос» [8], позволяющий выявить все формы потери устойчивости, но концепция эффективной ширины является сегодня главенствующей: ее надежность подтверждена многочисленными экспериментальными исследованиями и расчетами.

В России ЛСТК нашли свое применение в строительстве не так давно. Российские научные исследования в этой области посвящены экспериментальному и расчетному подтверждению методики расчета ЛСТК [9–10], разработке методов расчета прочности и устойчивости по фактически редуцированному сечению [11–13], совершенствованию инженерной методики расчета [14]. Наиболее эффективным сегодня является «обратный» метод расчета прочности и устойчивости, сформулированный Г. И. Белым в работе [15]. «Обратный» метод получил свое развитие применительно к ЛСТК в работах [16–17].

Особенностью метода является необходимость поиска НДС в сечении, отвечающего заданным условиям загрузки. Для этого в работе [16] предлагается перебирать все возможные деформированные состояния в сечении, а в работе [18] — подбирать искомое состояние исходя из результата расчета в первом приближении. В работе [19] предложено использовать эффективный метод бисекции для поиска требуемого НДС, что возможно и в задачах устойчивости, как показано в работе [20]. «Обратный» метод в сочетании с поиском НДС по методу бисекции использовался для изучения устойчивости решетчатых конструкций [21], прочности поврежденных элементов [22] и прочности в упругопластической стадии при многопараметрическом нагружении [23].

1. Нормативная методика расчета ЛСТК

Действующие в России нормы¹ проектирования ЛСТК заимствуют методику расчета норм Евросоюза². Проверка прочности в соответствии с действующей методикой выполняется по редуцированным геометрическим характеристикам поперечного сечения. Редукция сечения рассчитывается либо отдельно (при действии разных силовых факторов), либо совместно (при действии определенного их сочетания).

Аналитический расчет редуцированных геометрических характеристик весьма сложен и включает итерационные шаги, так как положение главных центральных осей и, как следствие, распределение напряжений в сечении зависят от редукции по толщине и ширине различных элементов сечения (стенки, полки, отгибы и т. д.), а редукция зависит от распределения напряжений. Определение фактической редукции (редукции по фактическому распределению напряжений в сечении) при совместном действии сочетания усилий на практике представляется возможным только с использованием специализированного программного обеспечения.

Для раздельного действия усилий редуцированные геометрические характеристики могут быть рассчитаны производителем профиля и приведены в сортаменте, в то время как для случая совместного действия усилий это не представляется возможным.

Проверка устойчивости ЛСТК в соответствии с действующей методикой определяется прочностью наиболее нагруженного сечения при расчете с учетом эффектов второго порядка, поэтому усилия, полученные из статического расчета, не совпадают с усилиями, для которых выполняется проверка прочности. При этом расчет критических сил производят без учета изменения жест-

¹ СП 260.1325800.2023. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2023.

² EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.

кости (по геометрическим характеристикам полного сечения), а гибкость уменьшают, так как предельная продольная сила, воспринимаемая редуцированным сечением, ниже. Таким образом, в расчете устойчивости в любом случае используются геометрические характеристики как полного, так и редуцированного сечения.

Для проверки прочности и устойчивости ЛСТК предлагается использовать усовершенствованный инженерный метод, разработанный с целью упростить расчет и одновременно уточнить получаемые результаты. При разработке метода использовались те же принципы, что заложены в основной нормативный документ³ по расчету стальных конструкций. Настоящая публикация посвящена только вопросам прочности, но введенные параметры используются и в формулах коэффициентов устойчивости, что будет представлено в следующих публикациях автора.

2. Эффективный численный метод определения редуцированных геометрических характеристик сечения

Алгоритмы расчета редуцированных геометрических характеристик при действии заданных N , M_x и M_y (рис. 1, а), содержащие итерационное определение положения центра тяжести и соответствующее ему распределение напряжений, обладают медленной сходимостью и требуют значительных вычислительных затрат. При исследовании предельных состояний во много раз более эффективным является так называемый «обратный» метод «Сечение», который применительно к ЛСТК может быть сформулирован следующим образом: для любого заданного деформированного состояния в сечении $\varepsilon(x, y)$ при условии, что $\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_y = R_y/E$, однозначно определяется напряженное состояние $\sigma(x, y) = E\varepsilon(x, y)$ и редуцированная площадь сечения A_{ef} , интегрируя напря-

жения по которой получим действующие в центральных осях полного сечения усилия

$$N = \oint_{A_{ef}} \sigma \cdot dA_{ef}, \quad (1)$$

$$M_x = \oint_{A_{ef}} \sigma \cdot y \cdot dA_{ef}, \quad (2)$$

$$M_y = \oint_{A_{ef}} \sigma \cdot x \cdot dA_{ef}. \quad (3)$$

Интегралы (1)–(3) можно определить численными методами. Исследуя огибающие предельных состояний при действии N и M_y для симметричных относительно плоскости изгиба сечений, удобно записать деформированное состояние в виде

$$\varepsilon = \varepsilon_y \left(t + (1 - |t|) \frac{x}{x^*} \right), \quad (4)$$

где x^* — координата наиболее нагруженного волокна; $t \in [-1; 1]$ — варьируемый параметр.

Варьируя параметр t между значениями $t = -1$ (осевая растягивающая деформация) и $t = 1$ (осевая сжимающая деформация), получаем предельные деформированные состояния при действии N и M_y в разных соотношениях, что достаточно для построения графика предельных состояний. Для получения заданного соотношения между N и M_y необходимо численными методами решить нелинейное уравнение с одним неизвестным

$$N(t) = N_{req}, \quad (5)$$

где N_{req} — значение продольной силы, для которого определяется предельное состояние.

Например, предельный изгибающий момент $M_{y,u} = M_y(t_1)$ определяется при значении параметра t_1 , который получим при $N_{req} = 0$.

Одним из наиболее эффективных является метод бисекции, дающий решение с погрешностью 1 % не более, чем за семь итераций; с погрешностью 0,1 % — не более, чем за 10 итераций. Для более сложных случаев загрузки или несимметричных сечений есть несколько вариантов получения заданных соотношений усилий:

³ СП 16.13330.2017. Конструкции стальные. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: Минстрой России, 2023.

- перебор всех возможных вариантов деформированного состояния и выбор тех, что отвечают заданным соотношениям усилий;
- решение нелинейной задачи с двумя и более неизвестными численными методами;
- построение такого алгоритма, при котором каждый раз решается уравнение с одним неизвестным на заранее известном интервале по методу бисекции.

В рамках настоящего исследования НДС при действии одного усилия определялись аналитически и численно, при действии двух и более усилий — численно.

3. Проверка прочности при раздельном действии усилий

Расчет прочности ЛСТК по предлагаемому методу допускается выполнять в центральных осях, даже если они не являются главными. Обозначения центральных осей и положительные направления действующих усилий показаны на рис. 1, а.

В общем случае проверку прочности при действии одного усилия предлагается выполнять по формуле

$$\frac{F}{rG_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (6)$$

где F — расчетное значение силового фактора (продольной силы, изгибающего момента); $r = \frac{G_{ef}}{G_g}$ — коэффициент редукиции сечения; G_{ef} — соответствующая силовому фактору геометрическая характеристика редуцированного поперечного сечения; G_g — то же, для полного сечения; R_y — расчетное сопротивление стали; γ_c — коэффициент условий работы.

Формула (6) является аналогом формулы (7.6) действующих норм¹ с учетом введенного коэффициента редукиции $r \leq 1$. Этот коэффициент характеризует снижение предельного значения усилия за счет потери местной устойчивости, что соответствует логике проверки прочности из основного нормативного документа³ по расчету стальных конструкций: используется формула, соответствующая упругой (линейной) работе, а нелинейные эффекты учитываются коэффициентом к несущей способности. Так, при проверке прочности стальных балок 2-го и 3-го классов³ используются коэффициенты учета упругопластической (нелинейной) стадии работы $c_{x(y)}$.

Стоит отметить, что геометрические характеристики редуцированных сечений

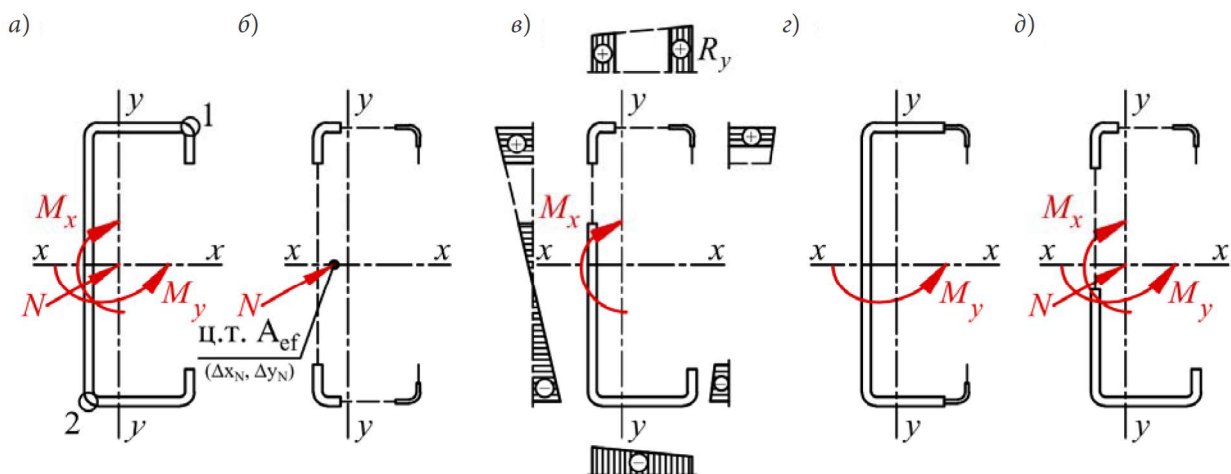


Рис. 1. Схемы к расчету С-профиля: а — обозначение центральных осей, усилий и характерных точек; б — схема редукиции при действии N ; в — схема редукиции при действии M_x и соответствующее распределение напряжений в пластинах; г — схема редукиции при действии M_y ; д — схема редукиции при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом

используются только для определения соответствующих коэффициентов редукиции r . Значения коэффициентов редукиции зависят от формы поперечного сечения, его размеров и предела текучести стали и определяются при однопараметрических нагружениях. Таким образом, коэффициенты могут быть приведены для каждого конкретного профиля в сортаменте для каждой из восьми марок стали, предусмотренных нормами¹.

Проверку прочности при центральном растяжении и сжатии предлагается выполнять по формуле

$$\frac{N}{r_z A_{g,n} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (7)$$

где r_z — коэффициент редукиции сечения при действии N , принимаемый: $r_z = 1$ при растяжении, $r_z = \frac{A_{ef}}{A_g}$ при сжатии; $A_{g,n}$ — площадь полного (нередуцированного) поперечного сечения нетто (т. е. с учетом ослабления отверстиями и/или вырезами); A_g — то же, брутто; A_{ef} — площадь редуцированного поперечного сечения.

Формула (7) является аналогом формул (8.1) и (8.2) действующих норм¹ с учетом введенного обозначения r_z . При определении площади A_{ef} нормальные напряжения в любой точке сечения принимаются равными $\sigma = R_y$. Если сечение несимметричное, оказывается, что сила $N_u = A_{ef} R_y$ приложена в центре тяжести эффективного сечения A_{ef} (см. рис. 1, б), координаты которого в центральных осях полного сечения обозначим Δx_N и Δy_N . Так как расчет производится для усилий в центральных осях, необходимо учитывать дополнительные моменты $\Delta M_{x,N} = -N \cdot \Delta y_N$ и $\Delta M_{y,N} = -N \cdot \Delta x_N$ и проверку прочности выполнять по формуле (9) вне зависимости от величины основных действующих изгибающих моментов M_x и M_y .

Проверку прочности при раздельном действии изгибающих моментов предлагается выполнять по формуле

$$\frac{M_{x(y)}}{r_{x(y)} W_{g,n,x(y)} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (8)$$

где $r_{x(y)} = \frac{W_{ef,x(y)}}{W_{g,x(y)}}$ — коэффициент редукиции сечения при действии $M_{x(y)}$; $W_{g,x(y)}$ — момент сопротивления полного (нередуцированного) поперечного сечения брутто; $W_{ef,x(y)}$ — момент сопротивления редуцированного поперечного сечения брутто; $W_{g,n,x(y)}$ — момент сопротивления полного (нередуцированного) поперечного сечения нетто (с учетом ослабления отверстиями).

Формула (8) является аналогом формул (8.24) и (8.25) действующих норм¹ с учетом введенного обозначения $r_{x(y)}$. В общем случае несимметричного сечения произведение $r_{x(y)} W_{g,n,x(y)}$ определяется для каждой опасной точки сечения. Если сечение имеет хотя бы одну ось симметрии, можно рассматривать две опасные точки, как показано на рис. 1, а. В формуле (8) учтено ослабление сечения отверстиями, что соответствует общей методологии расчета прочности (см. формулу (41) основного нормативного документа³).

Моменты сопротивления $W_{ef,x(y)}$ определяются аналитически или численно при раздельном действии моментов $M_{x(y)}$ (см. рис. 1, в, г), при этом учитывается влияние смещения центра тяжести и угла наклона главных центральных осей редуцированного сечения на распределение напряжений (см. рис. 1, в).

4. Проверка прочности при сжатии с изгибом в одной плоскости

Проверку прочности при сжатии с изгибом в одной плоскости предлагается выполнять по формуле

$$\frac{N}{r_z A_{g,n} R_y \gamma_c} + \frac{M_{x(y)} + \Delta M_{x(y)}}{r_{x(y)} W_{g,n,x(y)} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (9)$$

где $\Delta M_x = -N \cdot \Delta y$, $\Delta M_y = -N \cdot \Delta x$ — дополнительные изгибающие моменты от смещения центра тяжести редуцированного сечения; $\Delta x = \Delta x_N + \Delta x_H$, $\Delta y = \Delta y_N$ — учитываемые эксцентриситеты; Δx_H — дополнительный экс-

центриситет для спаренных стенка к стенке U-, C- и Σ -профилей.

Формула (9), в отличие от формулы (8.33) действующих норм¹, применяется только при совместном действии продольной силы и одного изгибающего момента. Действительно, как показано на рис. 2, а, связь N и M_x в предельных состояниях по прочности хорошо аппроксимируется линейной зависимостью.

Что касается совместного действия N и M_y , в формуле (9) учитывается дополнительный эксцентриситет Δx_H , отражающий характерную особенность спаренных стенка к стенке U-, C- и Σ -профилей и других «двутапировых» профилей: при действии сжимающей силы, близкой по значению к предельной, приложение незначительного изгибающего момента M_y приводит к значительному смещению Δx центра тяжести редуцированного сечения. На рис. 2, б показана огибающая предельных состояний по прочности при действии N и M_y , полученная по фактическому распределению напряжений, а также две аппроксимирующие зависимо-

сти: нормативная без учета Δx_H и предлагаемая с учетом Δx_H .

Результаты приведены для профиля с параметрами формы $\alpha_f = \frac{b_f}{h_w} = 0,5$; $\alpha_c = \frac{h_c}{b_f} = 0,2$ (размеры обозначены на рис. 2) из стали с расчетным сопротивлением $R_y = 330$ МПа для различных значений условной гибкости стенки $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$. Красным цветом выделены области, в пределах которых прочность не обеспечена при выполнении требований действующих норм. Для спаренных U-профилей с параметрами $\bar{\lambda}_w = 3$ и $\alpha_f = 0,25$ влияние Δx_H приводит к снижению предельной продольной силы на 23,4 % по отношению к величине $r_z A_{g,n} R_y$.

Из формулы (9) следует, что продольная сила в предельном состоянии ограничена величиной

$$N \leq N_a(M_y) = N_u \frac{M_{y,u} - M_y}{M_{y,u} + N_u (\Delta x_N + \Delta x_H)}, \quad (10)$$

где $N_a(M_y)$ — линейная аппроксимирующая функция; $N_u = r_z A_{g,n} R_y \gamma_c$ — предельная про-

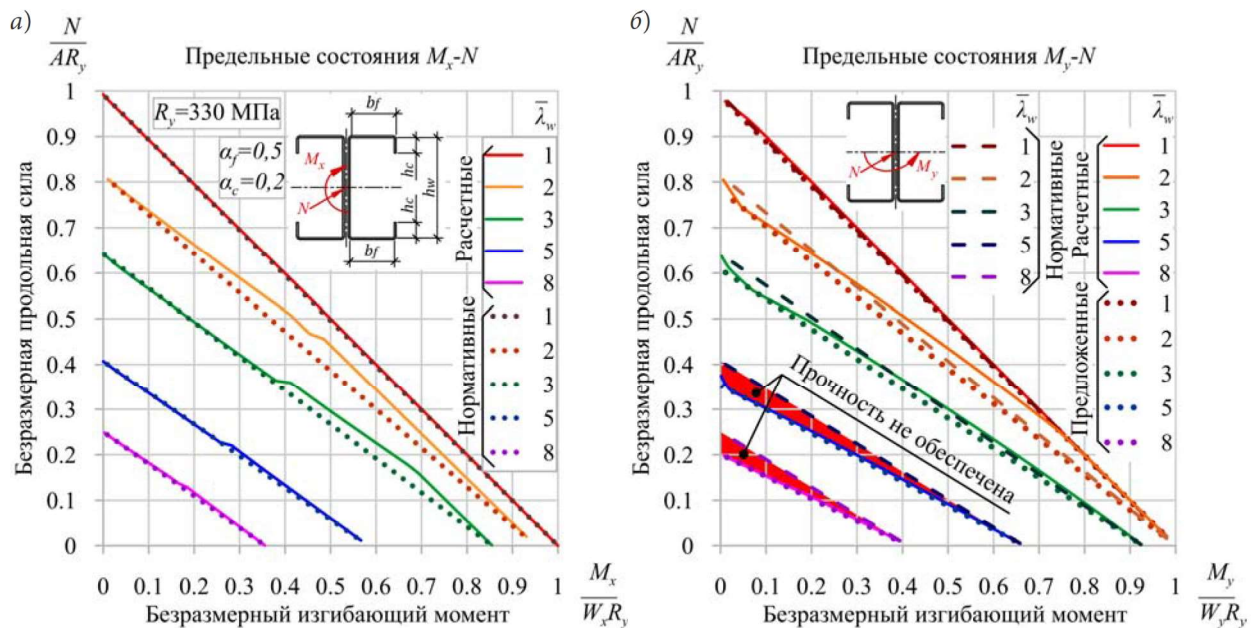


Рис. 2. Огибающие предельных состояний по прочности спаренных стенка к стенке C-профилей: а — при действии N и M_x ; б — при действии N и M_y

дольная сила при однопараметрическом нагружении; $M_{y,u} = r_y W_{g,n,y} R_y \gamma_c$ — предельный изгибающий момент при однопараметрическом нагружении.

Эксцентриситет Δx_H является единственным параметром аппроксимирующей функции $N_a(M_y)$ и определяется из условия $N_a(M_y) \leq N(M_y)$, где $N(M_y)$ — действительная связь усилий в предельном состоянии, при любых значениях $M_y \in [0; M_{y,u}]$. Эксцентриситет Δx_H может быть вычислен для каждого конкретного поперечного сечения и приведен в сортаменте. Значение эксцентриситета Δx_H можно в запас прочности принимать из расчета на действие только изгибающего момента M_y .

5. Проверка прочности при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом

Проверку прочности при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом предлагается выполнять по формуле

$$\left(\frac{M_x + \Delta M_x}{r_{x,N} W_{g,n,x} R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_y + \Delta M_y}{r_{y,N} W_{g,n,y} R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (11)$$

где $p = \sqrt{\frac{1}{r_x}}$, $q = \sqrt{\frac{1}{r_y}}$ — коэффициенты учета фактической редукиции при косом изгибе; $r_{x(y),N} = r_{x(y)} \left(1 - \frac{N}{N_u} \right)$ — коэффициенты редукиции при совместном действии N и $M_{x(y)}$.

Формула (11) предлагается впервые. В этой формуле учитывается тот факт, что схема редукиции сечения при учете фактического распределения напряжений от совместного действия N , M_x и M_y отличается от линейной комбинации схем редукиции при раздельном действии усилий, как показано на рис. 1, д. Степени p и q определяют выпуклость огибающих $M_x - M_y$ предельных состояний по прочности подобно тому, как степень n в формуле (105) основного нормативного документа³ по расчету стальных конструкций определяет выпуклость огибающих $N - M_x$ и $N - M_y$ в упругопластической

стадии работы. Продольная сила N учитывается коэффициентами $r_{x(y),N}$, поэтому формула (11) справедлива для любых значений $N \in [0; N_u]$.

Предлагаемые формулы для степеней p и q обеспечивают переход к линейной связи между M_x и M_y в отсутствие редукиции и дают лучшую сходимость (рис. 3) результатов расчета по формуле (11) с результатами расчета по фактически редуцированному сечению, чем формула (8.33) действующих норм¹, если геометрические характеристики редуцированного сечения определены при раздельном действии усилий. Красным цветом (см. рис. 3) отмечены области, в пределах которых прочность ЛСТК не обеспечена требованиями действующих норм; зеленым — резервы прочности, которые учитываются применением формулы (11). Так, например, при действии $N = 0,2N_u$ предельные изгибающие моменты составляют $M_x = 0,45M_{x,u}$, $M_y = 0,45M_{y,u}$, т. е. выявлен резерв прочности $N/N_u + M_x/M_{x,u} + M_y/M_{y,u} - 1 = 0,1$, или 10 %.

Значения степеней p и q получены для спаренных С- и Σ -профилей, в то время как спаренные U-профили работают хуже при данном нагружении. Для спаренных U-профилей и других типов сечений, работа которых при трехпараметрическом нагружении не исследована, в запас прочности рекомендуется принимать $p = q = 1$.

Стоит также отметить: если хотя бы один из двух действующих изгибающих моментов возникает за счет действия поперечной силы, при смещении центра изгиба редуцированного сечения возникает бимомент, влияние которого на несущую способность требует дополнительных исследований, в связи с чем следует принимать в таких случаях $p = q = 1$.

6. Аппроксимация коэффициентов редукиции

Анализ зависимости коэффициентов редукиции r от формы, размеров и расчетного сопротивления стали R_y для спаренных U-, С- и Σ -профилей показал, что хорошую ап-

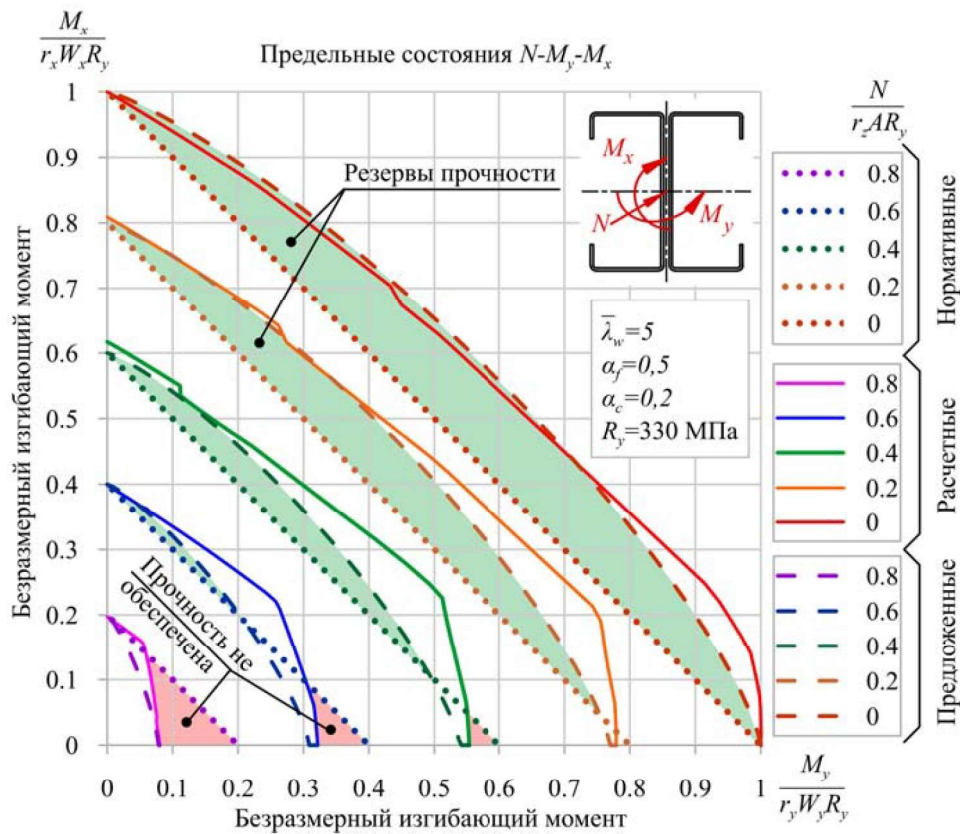


Рис. 3. Огибающие предельных состояний по прочности спаренных стенка к стенке С-профилей при действии N , M_x и M_y

проксимацию $r = f(h, b, t, \dots, R_y)$ можно получить лишь для простейшего сечения — У-профилей. Коэффициенты редукции для такого сечения определяются всего двумя параметрами: условной гибкостью стенки $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ (где h_w — высота стенки, t — толщина профиля, E — модуль упругости стали) и коэффициентом формы сечения $\alpha_f = b_f / h_w$ (где b_f — ширина полки).

Коэффициенты редукции сечения из спаренных С-профилей зависят как от $\bar{\lambda}_w$ и α_f , так и от $\alpha_c = h_c / b_f$ (где h_c — высота отгиба полки). Что же касается Σ -профилей, их коэффициенты редукции, кроме прочего, зависят от параметров усиления стенки $\alpha_{s1} = h_1 / h_2$, $\alpha_{s2} = h_2 / h_w$, $\alpha_k = k / h_2$ (где h_1 , h_2 , k — размеры усиления, рис. 4).

Если рассматривать также несимметричные варианты С- и Σ -профилей, количе-

ство параметров становится еще больше. На рис. 4 показан характер зависимости коэффициентов редукции r_x при действии момента M_x для спаренного Σ -профиля от основного параметра $\bar{\lambda}_w$ при постоянных значениях прочих параметров. Точки перегиба на графиках коэффициента r_x соответствуют появлению новых участков редукции пластин, составляющих стержень.

7. Требования к сортаментам

Для эффективного использования предложенного инженерного метода сортаменты профилей ЛСТК должны содержать следующие геометрические характеристики полного сечения: A , I_x , I_y , i_x , i_y , W_x , W_y , S_x , S_y , причем для несимметричных сечений $W_{x(y)}$ определяется для каждой опасной точки. Для решения задач устойчивости также понадобятся секториальный момент инерции I_ω , координаты центра изгиба x_a , y_a , момент инерции

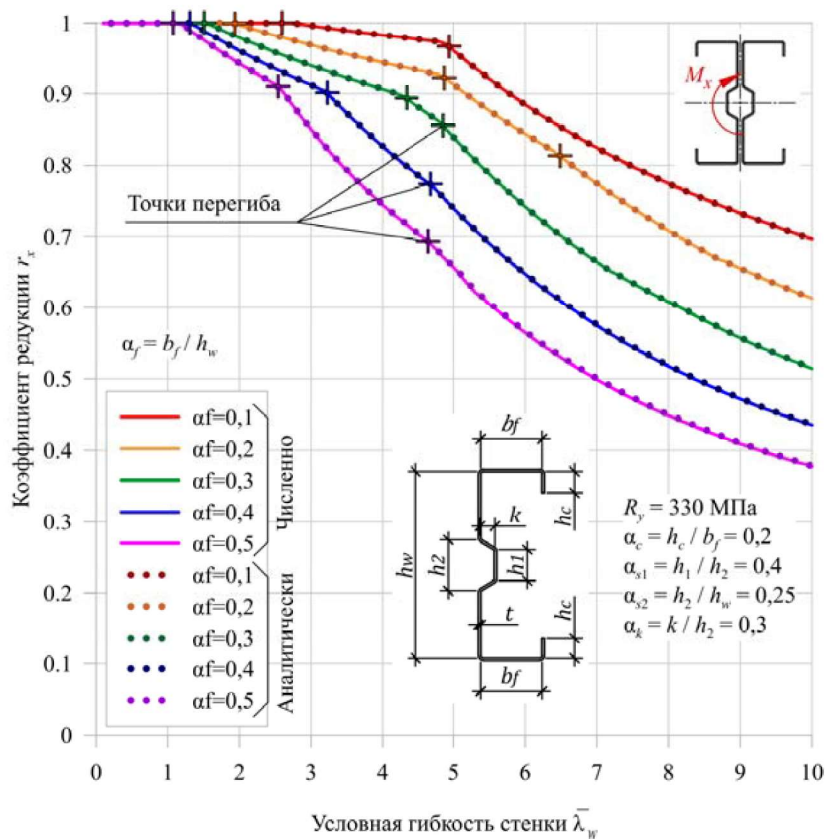


Рис. 4. Графики коэффициента редукции r_x для спаренного стенки к стенке Σ -профиля

чистого кручения I_k , а также специальные характеристики:

$$\beta_x = \frac{1}{2I_y} \oint (x^2 + y^2) y dA - y_a, \quad (12)$$

$$\beta_y = \frac{1}{2I_x} \oint (x^2 + y^2) x dA - x_a. \quad (13)$$

Кроме того, сортаменты должны содержать коэффициенты редукции: r_x , r_y , r_z и эксцентриситеты Δx_N , Δy_N , причем для несимметричных сечений $r_{x(y)}$ определяются для каждой опасной точки. Параметры редукции должны быть указаны для каждой марки стали, используемой заводом-изготовителем, или — в запас местной устойчивости — для наиболее высокой марки.

Для профилей, используемых как одиночно, так и в составе спаренного сечения, геометрические характеристики и параметры редукции должны быть указаны в двух ва-

риантах. Для спаренных стенки к стенке U-, C- и Σ -профилей и других «двутавровых» сечений необходимо рассчитывать и указывать в сортаменте дополнительный эксцентриситет Δx_H .

Выводы

Предложен усовершенствованный инженерный метод расчета ЛСТК. Он позволяет определить все необходимые для расчета сечения параметры редукции по однопараметрическим загрузкам. Эти параметры для каждого конкретного профиля и марки стали могут быть приведены в сортаменте. Имея геометрические характеристики полного сечения и значения параметров редукции, инженер, используя формулы (7)–(9) и (11), получает оценку прочности, близкую к расчету по фактическому распределению напряжений.

В формулах учитываются нелинейные эффекты, которые ранее можно было оценить

только по фактическому распределению напряжений. Так, учет дополнительного эксцентриситета Δx_H для «двухтавровых» ЛСТК может приводить к снижению предельной сжимающей нагрузки на 23,4 %. С другой стороны, при сжатии с двухосным эксцентриситетом метод позволяет учитывать увеличение несущей способности по критерию прочности приблизительно на 10 % в сравнении с линейным расчетом.

Библиографический список

1. Scalzi J. B. Light-gage cold-formed structures // IABSE congress report. 1968. № 8. Pp. 137–145. URL: <https://doi.org/10.5169/seals-8698>
2. Kenedi R. M., Chilver A. H., Griffin E. Cold formed sections in Britain: research and its application to design // IABSE publications. 1960. № 20. Pp. 137–150. URL: <https://doi.org/10.5169/seals-17557>
3. Winter G. Light-gauge (thin-walled) steel structures for buildings in the United States of America // IABSE congress report. 1952. № 4. Pp. 523–538. URL: <https://doi.org/10.5169/seals-5048>
4. Kármán T. von., Sechler E. E., Donnell L. H. The Strength of Thin Plates in Compression // Transactions, Applied Mechanics Division, ASME. 1932. № 54 (2). Pp. 53–57.
5. Winter G. Performance of thin steel compression flanges // IABSE congress report. 1948. № 3. Pp. 137–148. URL: <https://doi.org/10.5169/seals-4005>
6. Reiss M., Chilver A. H. Computation of the postbuckling strength of thin-walled sections // IABSE congress report. 1968. № 8. Pp. 299–309. URL: <https://doi.org/10.5169/seals-8762>
7. DeWolf J., Pekoz T., Winter G. Interaction of postcritical plate buckling with overall column buckling of thin-walled members // IABSE congress report. 1972. № 9. Pp. 91–100. URL: <https://doi.org/10.5169/seals-9547>
8. Cheung M. S., Cheung Y. K. Analysis of curved box girder bridges by finite strip method // IABSE publications. 1971. № 31. Pp. 1–19. URL: <https://doi.org/10.5169/seals-24205>
9. Зверев В. В., Жидков К. Е., Семенов А. С., Сотникова И. В. Экспериментальные исследования рамных конструкций из холодногнутых профилей повышенной жесткости // Научный вестник Воронежского гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2011. № 4 (24). С. 20–24.
10. Подзоров А. В., Зверев В. В., Тезиков Н. Ю., Жидков К. Е., Карманов И. В. Редуцирование площади поперечного сечения тонкостенного стального профиля при центральном сжатии // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6 (263). С. 24–28.
11. Астахов И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2006. 123 с.
12. Кузнецов А. Ю. Напряженно-деформированные и предельные состояния в сечениях стержневых элементов из холодногнутых оцинкованных профилей // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 56–60.
13. Кузнецов А. Ю. Влияние потери местной устойчивости на общую устойчивость сжатого с двухосным эксцентриситетом стержневого элемента // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 3 (38). С. 63–69.
14. Белый Г. И., Смирнов М. О. Совершенствование инженерной методики расчета на прочность стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 1 (78). С. 72–81. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-1-72-81.
15. Белый Г. И. «Обратный» метод расчета усиленных под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 46–55. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55.
16. 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.
17. 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. DOI 10.33622/0869-7019.2021.03.57-68.
18. 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. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-26-35.
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.
20. 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. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-5-5-19.
21. Белый Г. И., Лобовский М. О. Устойчивость ветвей решетчатых элементов стальных конструкций //

Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2 (97). С. 18–29. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-18-29.

22. 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.

23. Белый Г. И., Гаринов А. И. Совершенствование расчета элементов стальных конструкций на прочность при общем нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 8. С. 24–33. DOI 10.33622/0869-7019.2024.08.24-33.

References

1. Scalzi J. B. Light-gage cold-formed structures. *IABSE Congress Report*, 1968, no. 8, pp. 137–145. Available at: <https://doi.org/10.5169/seals-8698>.

2. Kenedi R. M., Chilver A. H., Griffin E. Cold formed sections in Britain: research and its application to design. *IABSE Publications*, 1960, no. 20, pp. 137–150. Available at: <https://doi.org/10.5169/seals-17557>.

3. Winter G. Light-gauge (thin-walled) steel structures for buildings in the United States of America. *IABSE Congress Report*, 1952, no. 4, pp. 523–538. Available at: <https://doi.org/10.5169/seals-5048>.

4. Kármán T. von., Sechler E. E., Donnel L. H. The Strength of Thin Plates in Compression. *Transactions, Applied Mechanics Division*, ASME, 1932, no. 54 (2), pp. 53–57.

5. Winter G. Performance of thin steel compression flanges. *IABSE Congress Report*, 1948, no. 3, pp. 137–148. Available at: <https://doi.org/10.5169/seals-4005>.

6. Reiss M., Chilver A. H. Computation of the post buckling strength of thin-walled sections. *IABSE Congress Report*, 1968, no. 8, pp. 299–309. Available at: <https://doi.org/10.5169/seals-8762>.

7. DeWolf J., Pekoz T., Winter G. Interaction of post critical plate buckling with overall column buckling of thin-walled members. *IABSE Congress Report*, 1972, no. 9, pp. 91–100. Available at: <https://doi.org/10.5169/seals-9547>.

8. Cheung M. S., Cheung Y. K. Analysis of curved box girder bridges by finite strip method. *IABSE Publications*, 1971, no. 31 pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.5169/seals-24205>.

9. Zverev V. V., Zhidkov K. E., Semenov A. S., Sotnikova I. V. *Eksperimental'nye issledovaniya ramnykh konstruktsiy iz kholodnogutykh profiley povyshennoy zhestkosti* [Experimental studies of frame structures from cold-formed profiles of increased rigidity]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gos. arkh.-stroit. un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura – Scientific Bulletin of Voronezh*

State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture, 2011, no. 4 (24), pp. 20–24.

10. Podzorov A. V., et al. *Redutsirovanie ploshchadi poperechnogo secheniya tonkostennogo stal'nogo profilya pri tsentral'nom szhatii* [Reduction of the cross-sectional area of a thin-walled steel profile under central compression]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Structural mechanics and structural design*, 2015, no. 6 (263), pp. 24–28.

11. Astakhov I. V. *Prostranstvennaya ustoychivost' elementov konstruktsiy iz kholodnogutykh profiley*. Diss. kand. tekhn. nauk [Spatial stability of structural elements from cold-formed profiles. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2006, 123 p.

12. Kuznetsov A. Yu. *Napryazhenno-deformirovannyye i predel'nye sostoyaniya v secheniyakh sterzhnevyykh elementov iz kholodnogutykh otsinkovannykh profiley* [Stress-strain and limit states in sections of rod elements from cold-formed galvanized profiles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 2 (37), pp. 56–60.

13. Kuznetsov A. Yu. *Vliyanie poteri mestnoy ustoychivosti na obshchuyu ustoychivost' szhatogo s dvukhosnym eksstentsiteto sterzhnevoogo elementa* [Influence of local stability loss on the general stability of a compressed rod element with biaxial eccentricity]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 3 (38), pp. 63–69.

14. Belyi G. I., Smirnov M. O. *Sovershenstvovanie inzhenernoy metodiki rascheta na prochnost' sterzhnevyykh elementov legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsiy* [Improvement of engineering methodology for strength calculation of rod elements of light steel thin-walled structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 1 (78), pp. 72–81. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-1-72-81.

15. Belyi G. I. «Obratniy» metod rascheta usilivaemykh pod nagruzkoy sterzhnevyykh 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. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55.

16. Smirnov M. O. *Sovershenstvovanie obratnogo chislenno-analiticheskogo metoda rascheta LSTK na ustoychivost' pri vnestsentrennom szhatii* [Perfection of the inverse numerical-analytical method of calculation of LSTWS on stability at off-center compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 1 (84), pp. 46–52. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52.

17. Belyi 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. DOI 10.33622/0869-7019.2021.03.57-68.

18. Belyi 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. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-26-35.

19. Belyi G. I., Garipov A. I. *Zapredel'nye napryazhenno-deformirovannyye sostoyaniya v poperechnykh secheniyakh elementov stal'nykh konstruktsiy* [Superlimiting stress-strain state of steel structure elements in cross-sections]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 4 (93), pp. 16–30. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-4-16-30.

20. Belyi G. I., Garipov A. I. *Zapredel'naya nesushchaya sposobnost' sterzhnevykh elementov stal'nykh konstruktsiy posle poteri obshchey ustoychivosti* [Superlimiting 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. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-5-5-19.

21. Belyi G. I., Lobovskiy M. O. *Ustoychivost' vetvey reshetchatykh elementov stal'nykh konstruktsiy* [Stability of branches of steel structure lattice elements]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 2 (97), pp. 18–29. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-18-29.

22. Belyi G. I., Matveev E. A. *Sovershenstvovanie metoda rascheta povrezhdennykh elementov stal'nykh konstruktsiy* [Improvement of the method of calculating damaged elements of steel structures]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2024, vol. 19, no. 4, pp. 544–556. DOI 10.22227/1997-0935.2024.4.544-556.

23. Belyi G. I., Garipov A. I. *Sovershenstvovanie rascheta elementov stal'nykh konstruktsiy na prochnost' pri obshchem zagruzhении* [Improvement of calculation of of steel structure elements for strength at general loading]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2024, no. 8, pp. 24–33. DOI 10.33622/0869-7019.2024.08.24-33.