

УДК 624.014.2

УПРОЩЕННАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЖАТЫХ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

к.т.н. Семко В.А., аспирант Прохоренко Д.А.

*Полтавский национальный технический университет
имени Юрия Кондратюка*

Постановка проблемы в общем виде и анализ состояния вопроса.

Строительство зданий и сооружений с использованием холодногнутых и холоднокатаных легких стальных тонкостенных (ЛСТ) профилей все активнее развивается в странах СНГ, в том числе и в Украине. Расчет элементов такого типа имеет ряд особенностей по сравнению с традиционными горячекатаными профилями, вызванных характерной тонкостенностью их сечений [5].

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Процедура расчета эффективных геометрических характеристик тонкостенных профилей требует достаточно больших затрат времени [1,2,4]. Определение эффективного сечения каждого отдельно взятого тонкостенного профиля при изгибе и/или сжатии требует вычисления нескольких десятков величин.

В то же время, при проектировании каркасов конструкций зданий и сооружений, необходимо подбирать значительное количество сечений профилей. При этом часто возникает необходимость в изменении конструктивной схемы, подборе и сравнении нескольких вариантов, оптимизации конструктивного решения и так далее. Это приводит к изменению параметров профилей (длины, условий закрепления, наличия связей и т.п.) и нагрузок, и, вследствие этого, к необходимости нового подбора сечений.

Также, после учета возможности потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения профиля, его эффективное сечение может сильно уменьшаться, в результате чего несущая способность и /или жесткость профиля может оказаться недостаточной для заданных условий. Либо наоборот, запас прочности профиля окажется слишком большим, что приведет к нерациональным расходам стали.

Изложение основного материала. Решением такой проблемы может быть расчет нескольких сечений профилей и выбора оптимального варианта. Но в силу отсутствия общепринятого сортамента, а также технологической возможности создания почти неограниченного количества типоразмеров профилей, такая задача существенно усложняется. Так, для наиболее распространенных С- и Z-образных холодноформованные профилей, можно варьировать толщину листа, высоту стенки, ширину полок, ширину загибов, радиусгиба и марку стали. То есть, для приближения к оптимальному варианту сечения профиля необходимо многократно выполнить трудоемкий расчет.

Для облегчения данной задачи при помощи метода многофакторной регрессии было выполнено исследование зависимостей эффективных

характеристик сечений профилей от их основных параметров с целью получения инженерной методики приближенного определения эффективных характеристик.

Была поставлена задача установить эмпирические зависимости степени эффективности сечения (с учетом возможности потери локальной устойчивости и устойчивости формы сечения) от геометрических и прочностных характеристик полного сечения сжатых профилей.

С целью упрощения расчета исходных данных, в рамках работы был разработан программный комплекс для расчета эффективных характеристик сечений тонкостенных профилей при воздействии центрального сжатия. По методике Еврокод [4] были определены коэффициенты (далее – «коэффициенты эффективности»), отражающие соотношение эффективной площади сечения стальных холодноформованных профилей к полным:

$$\beta_A = A_{eff} / [t(h_g + 2b_g + 2c_g - 4r)]; \quad (1)$$

В расчет принимались наиболее часто используемые в строительстве профили С-образного сечения. Исследовалась совокупность профилей с геометрическими размерами, диапазон которых ограничивался в основном предельными соотношениями, приведенным в таблице 5.1 [4] (для которых возможен расчет по данному нормативу), а также логическими условиями. Так как вычисления исходных данных и коэффициентов регрессии выполнялся при помощи программного комплекса, были приняты в расчет следующие диапазоны параметров профилей (рис. 1):

- толщина профиля:

$$0,3 \text{ мм} \leq t \leq 13,0 \text{ мм}; \quad (2)$$

- высота стенки профиля по наружному обмеру:

$$20 \text{ мм} \leq h_g \leq 750 \text{ мм}, \text{ но } 10t \leq h_g \leq 300t; \quad (3)$$

- ширина полок по наружному обмеру:

$$10 \text{ мм} \leq b_g \leq 400 \text{ мм}, \text{ но } 10t \leq b_g \leq 60t, b_g \leq h_g; \quad (4)$$

- ширина краевых отгибов полок по наружному обмеру:

$$5 \text{ мм} \leq c_g \leq 200 \text{ мм}, \text{ но: } 0,2b_g \leq c_g \leq 0,6b_g, c_g \leq 0,5h_g; \quad (5)$$

- радиусгиба: $5 \text{ мм} \leq r \leq 35 \text{ мм}$, но:

$$r \leq c_g - t/2, r \leq (b_g - t)/2, r < 8400t/f_{yb} \text{ (при } E = 2,1 \times 10^6 \text{ МПа)}; \quad (6)$$

- базовый предел текучести стали:

$$200 \text{ МПа} \leq f_{yb} \leq 750 \text{ МПа}. \quad (8)$$

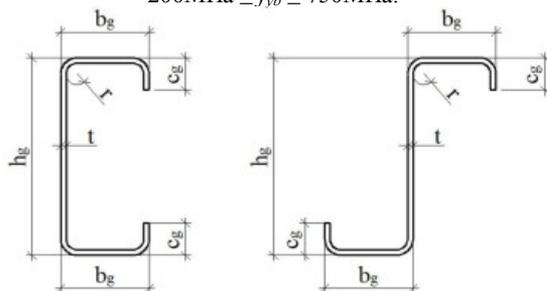


Рис. 1. Исходные геометрические параметры профилей

При предварительных расчетах уравнений регрессий было определено, что наибольшие погрешности полученных зависимостей проявляются при предельных значениях отдельных факторов (на границах их диапазона). Для исследования законов изменения коэффициентов эффективности использовалась выборка с несколько расширенными интервалами параметров профилей. Общее количество типоразмеров профилей, для которых определялись коэффициенты эффективности, составила 1120890 штук. После получения коэффициентов регрессий при дальнейшем анализе рассматривались профили, входящие в диапазон, приведенный выше (всего 579550 наблюдений).

Для полученных матриц с помощью программного комплекса Statistica 10 [3] составлялись уравнения многофакторной регрессии нескольких типов, из которых выбирался вариант, дающий наименьшие максимальные отклонения от теоретических значений коэффициентов эффективности.

Анализ зависимостей средних значений абсолютных отклонений коэффициентов от теоретических показал, что такие отклонения значительно больше для случаев с малыми (до 4 мм) значениями толщины профиля. Поэтому решено было рассмотреть различные варианты сужения диапазонов параметров для уменьшения максимальных и минимальных погрешностей. В результате сужения характеристики точности регрессий значительно улучшились. Так, разница между максимальными и минимальными значениями абсолютных отклонений сократилась для всех вариантов с 0,67-0,71 до 0,33-0,38, коэффициент вариации составил 7-9,4%, а средняя относительная погрешность не превышала 3,9%.

Однако диапазоны применения полученных зависимостей не позволяли рассчитывать профили толщиной 0,5-3,5 мм. Поэтому аналогичным образом были рассмотрены отдельно зависимости для профилей толщиной 0,5-3,5 мм, удовлетворяющие заданным в начале исследования параметрам.

Основываясь на полученных зависимостях, была предложена упрощенная инженерная методика предварительного определения эффективных геометрических характеристик холодноформованных сжатых С- и Z-образных профилей. Методику предлагается использовать для «экспресс» подбора сечений ЛСТ профилей и/или предварительной оценки несущей способности холодноформованных элементов при заданных уровнях нагрузки.

Согласно предложенной методике, несущая способность центрально-сжатого С- или Z-образного профиля с неполностью эффективным сечением, геометрические размеры которого удовлетворяют требования [4] и таблицы 1, предварительно определяется по формуле:

$$N'_{c,Rd} = A'_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0} \quad (9)$$

где A'_{eff} – предварительное значение эффективной площади сечения:

$$A'_{eff} = t(\beta_A - \Delta)(h_g + 2b_g + 2c_g - 4r); \quad (10)$$

$$\begin{cases} \beta_A = \beta_A^I \text{ при } 0,5\text{мм} \leq t < 3,5\text{мм}; \\ \beta_A = \beta_A^{II} \text{ при } 3,5\text{мм} \leq t \leq 11,0\text{мм}; \\ \text{но } 0 \leq \beta_A \leq 1. \end{cases} \quad (11)$$

$$\beta_A^I = 0,823 + \left(\frac{281275t - 30777t^2 - 2249h_g -}{-1726b_g + 4207c_g - 881,4f_{yb} + 1004r} \right) \times 10^{-6} + \quad (12)$$

$$+ \left(1169h_g^2 + 3147b_g^2 - 21460c_g^2 + 501f_g^2 - 16070r^2 \right) \times 10^{-9};$$

$$\beta_A^{II} = 0,945 + \left(\frac{107363t - 3845t^2 - 1724h_g -}{-885b_g + 2463c_g - 813f_{yb} + 774r} \right) \times 10^{-6} + \quad (13)$$

$$+ \left(1116h_g^2 + 857b_g^2 - 6911c_g^2 + 431f_g^2 - 14131r^2 \right) \times 10^{-9}.$$

Табл. 1

Диапазоны применения регрессий

| Диапазон при t , мм | Параметр | | | | | |
|-----------------------|------------|---------|------------|------------|----------------|----------|
| | h_g , мм | h_g/t | b_g , мм | c_g , мм | f_{yb} , МПа | r , мм |
| 0,5..3,5 | 50..650 | 20..300 | 30..200 | 10..100 | 200..750 | 1..35 |
| 3,5..11,0 | 50..750 | 10..300 | 50..400 | 10..200 | 200..450 | 1..15 |

Коэффициент Δ может приниматься согласно двух предпосылок: при необходимости более точного расчета, $\Delta = 0$, при этом для некоторых случаев возможны отклонения предварительно определенной площади сечения до 14,5% в запас или до 23,3% в опасную сторону. Также возможно, во избежание возможности получения значительной погрешности в опасную сторону, принимать $\Delta = 0,126$ (при $0,5\text{мм} \leq t < 3,5\text{мм}$) либо $\Delta = 0,183$ (при $3,5\text{мм} \leq t \leq 11,0\text{мм}$). Во втором случае, значения эффективной площади сечения профиля можно рассчитать с запасом от -5% до +28,2%. То есть, значение коэффициента выбрано таким образом, чтобы сместить общую погрешность не более уровня инженерной точности (5%) в опасную сторону.

Расчетная прочность сечения на сжатие $N_{c,Rd}$ определяется исходя из предположения, что нагрузка приложена в центре тяжести эффективного сечения. В случае, когда коэффициент $\beta_A = 1,0$, т.е. сечение полностью эффективно, несущая способность определяется по формуле (6.3) [4] на основе полной площади сечения профиля A_g , определенной для идеализированного сечения с учетом угловгиба согласно п.5.1 [4].

С целью оценки точности предложенной методики, был выполнен расчет значений эффективной площади для нескольких сечений ЛСТ профилей. и проведено сравнение полученных результатов с теоретическими по методике [4] (табл. 2). Как видно из таблицы, предложенная методика позволяет достаточно точно предварительно определять значение эффективной площади сечения рассмотренных часто применяемых ЛСТ профилей.

Табл. 2

Сравнение результатов расчетов по предложенной методике с теоретическими

| t , мм | h_g , мм | h_g/t | b_g , мм | c_g , мм | f_{yb} , МПа | r , мм | A'_{eff} , мм ² | A_{eff} , мм ² | $\frac{A_{eff}}{A'_{eff}}$ |
|-------------|---------------|---------|---------------|---------------|-------------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1 | 90 | 40 | 15 | 2,5 | 280 | 1 | 127,2 | 134,6 | 1,06 |
| 1,5 | 100 | 60 | 20 | 3 | 350 | 1,5 | 261,0 | 268,3 | 1,03 |
| 2 | 150 | 70 | 20 | 3 | 380 | 2 | 420,9 | 422,8 | 1,00 |
| 2,5 | 175 | 70 | 25 | 4 | 380 | 2,5 | 613,9 | 623,2 | 1,02 |
| 3 | 200 | 60 | 20 | 4 | 320 | 3 | 766,9 | 763,9 | 1,00 |
| 5 | 300 | 100 | 40 | 8 | 235 | 5 | 2231,7 | 2285,3 | 1,02 |
| 8 | 350 | 150 | 50 | 10 | 320 | 8 | 4963,4 | 4998,2 | 1,01 |
| 1 | 90 | 40 | 15 | 2,5 | 280 | 1 | 127,2 | 134,6 | 1,06 |

По результатам выполненной работы можно сделать следующие **выводы**:

1. Разработан программный комплекс, реализующий методику Еврокод по расчету эффективных геометрических характеристик сжатых ЛСТ профилей С-и Z-образного сечения.

2. Исследованы эмпирические зависимости геометрических характеристик эффективных сечений холодноформованных стальных профилей от их параметров.

3. Разработана упрощенная инженерная методика предварительного расчета эффективных геометрических характеристик ЛСТ профилей С- и Z-образного сечения при осевом сжатии. Максимальные отклонения полученных соотношений эффективной и полной площади от теоретического составили от -5% до +28,2%.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Gherzi A. Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members / A. Gherzi, R. Landolfo, F. M. Mazzolani. – New York: Spoon Press, 2002. – 174 p.
- Yu W.-W. Cold-formed steel design : fourth edition / Wei-Wen Yu, R.A. LaBoube. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2010. – 491 p.
- Боровиков В.П. STATISTICA – Статистический анализ и обработка данных в среде Windows / Боровиков В.П., Боровиков И.П. – М., 1998. – 592 с.
- ДСТУ-Н EN 1993-1-3:2012. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів і профільованих листів (EN 1993-1-3:2006 IDT). – Київ : Мінрегіон, 2012. – 220 с.
- Семко В.О. До розрахунку стиснутих тонкостінних гнутих металевих елементів / В.О. Семко, Д.А. Прохоренко // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – К. : Техніка, 2009. – Вып. 90. – С. 254–262.