

УДК 691.7

*КОСЫХ ПАВЕЛ АНДРЕЕВИЧ, аспирант,
paolo_07@list.ru
Пермский национальный исследовательский политехнический
университет,
614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29*

СРАВНЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье описан подход определения несущей способности легких стальных тонкостенных конструкций на основе компьютерного моделирования по деформированной схеме. Проведены расчеты двух принципиально различающихся конфигураций профилей: традиционного С-образного профиля и модифицированного профиля «Атлант». Выполнено сравнение полученных результатов, а также проанализирована их «чувствительность» к различным входным параметрам (толщина металла, высота стенки профиля и т. д.).

Ключевые слова: легкие стальные тонкостенные конструкции; компьютерное моделирование; ANSYS; профиль «Атлант».

*PAVEL A. KOSYKH, Research Assistant,
paolo_07@list.ru
Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomol'skii Ave., 614990, Perm, Russia*

COMPUTER SIMULATION OF BEARING CAPACITY OF LIGHT-WEIGHT STEEL SLENDER SECTIONS OF DIFFERENT CONFIGURATION

The paper presents the methods of detecting the bearing capacity of light-weight steel slender sections using computer simulation. Two different configurations of slender sections are described: the traditional C-type section and the modified type ATLANT section. The results obtained are compared and their sensitivity to different input parameters (thickness, altitude, etc.) is analyzed in this paper.

Keywords: light-weight steel slender section; computer simulation; ANSYS, ATLANT.

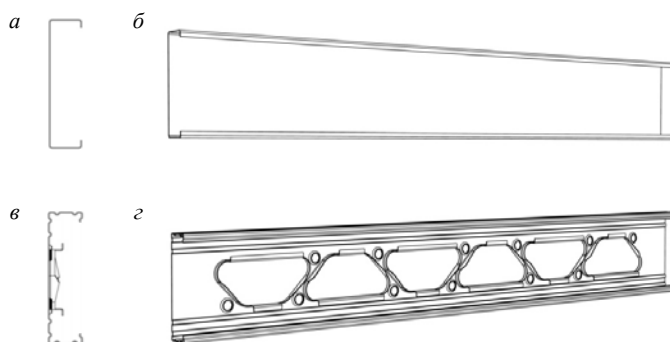
Введение

Новая строительная система ЛСТК (легкие стальные тонкостенные конструкции) развивается в течение последних 10 лет в странах СНГ, в том числе и в России. Такие конструкции применяются при строительстве малоэтажных жилых, гражданских и универсальных производственных зданий (рис. 1).



Рис. 1. Здание по технологии ЛСТК

Нередко конструкции из ЛСТК применяются в составе традиционных строительных систем, например для устройства покрытий, надстройки мансардных этажей существующих и новых строений [1]. Основным несущим элементом системы является стоечный сплошной С-образный (рис. 2, *а*, *б*) тонкостенный (толщиной 1,0–3,0 мм) профиль, не лишенный ряда серьезных недостатков.

Рис. 2. Поперечное сечение С-образного профиля (*а*); традиционный С-образный профиль (*б*); поперечное сечение профиля «Атлант» (*в*); профиль «Атлант» (*г*)

В силу незначительной толщины профиля по сравнению с характерными размерами поперечного сечения традиционный С-образный профиль подвержен влиянию местной потери устойчивости, появление которой, в свою очередь, не определяет момент исчерпания несущей способности элемента, но значительно ее снижает. Также по причине относительно высокой теплопроводности стали металлический профиль служит мостиком холода и существенно снижает теплосопротивление ограждающих конструкций и температуру на их внутренней поверхности [2, 3]. Развитием технологии ЛСТК стало появление модифицированных профилей, конфигурация которых позволяет снизить влияние ранее описанных негативных факторов. Такими являются и профили «Атлант» (рис. 2, *в*, *г*). Их отличительная особенность – наличие вырезов на стенке профиля, благодаря которым: 1) исключена ранняя местная потеря устойчиво-

сти стенки и, как следствие, повышена несущая способность; 2) снижено влияние профиля на теплосоппротивление ограждающих конструкций; 3) возможна скрытая прокладка инженерных сетей.

Описание модели

Для определения критической нагрузки была создана расчетная модель в программном комплексе ANSYS [4]. При создании конечно-элементной модели с целью учета местной потери устойчивости сечения были использованы оболочечные элементы (SHELL181). Поперечное сечение элемента представляет собой открытый С-образный профиль с высотой стенки H , шириной фланцев B , длиной «губы» C (рис. 3). Толщина металла t . В продольном направлении профиль имеет длину L .

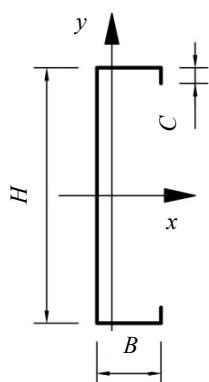


Рис. 3. Сечение профиля

На расчетную модель наложены следующие граничные условия: в опорном сечении запрещены перемещения (ux , uy , uz) и кручение вокруг продольной оси профиля ($rotz$); на противоположном конце запрещены перемещения в плоскости поперечного сечения (ux , uy) и кручение вокруг продольной оси профиля ($rotz$). Условно расчетная схема изображена на рис. 4.

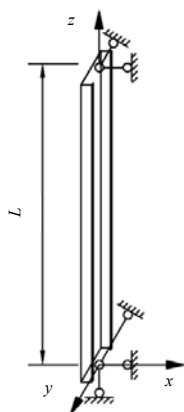


Рис. 4. Расчетная схема

При наложении граничных условий узлы поперечных сечений были дополнительно связаны между собой, а также с узлом, находящимся в центре тяжести сечения, посредством элемента MPC184 в формулировке rigid beam [5]. Благодаря такому подходу в процессе деформирования опорное и «силовое» сечения остаются плоскими. Это даёт возможность накладывать граничные условия непосредственно на узел в центре тяжести.

При моделировании нагружения на свободный конец профиля прикладывалось перемещение по направлению к опорному сечению. В процессе расчета отслеживалась реакция в опорном сечении R_z . За предельное значение сжимающей осевой нагрузки принималось значение опорной реакции, соответствующее точке перегиба на графике «опорная реакция – перемещение свободного конца» (рис. 5). Эта точка соответствует моменту потери устойчивости, вызванной сменой формы равновесного состояния.

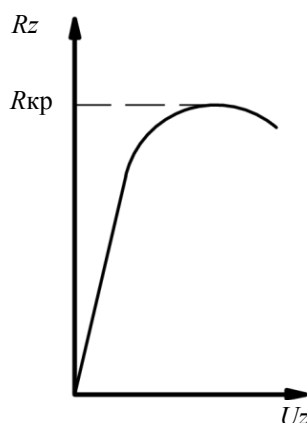


Рис. 5. К определению критической силы

Для описания упругопластической работы была использована диаграмма стали 08пс. Параметры, необходимые для описания диаграммы, были получены по результатам проведенных нами натурных испытаний стандартных образцов на растяжение. Их значения: модуль упругости E – 215 ГПа, предел текучести R_y – 400 МПа, временное сопротивление R_u – 566 МПа. В программный комплекс ANSYS данная диаграмма была занесена через модель материала MISO (Multilinear isotropic hardening).

Начальные несовершенства

Оценка несущей способности профилей осуществлялась на основе расчета по деформированной схеме [6]. Для ее создания в модель вносились начальные геометрические несовершенства.

В силу того, что конструкция подвержена двум видам потери устойчивости: общей и местной, в модель вводилось соответственно два вида начальных несовершенств (рис. 6, а, б).

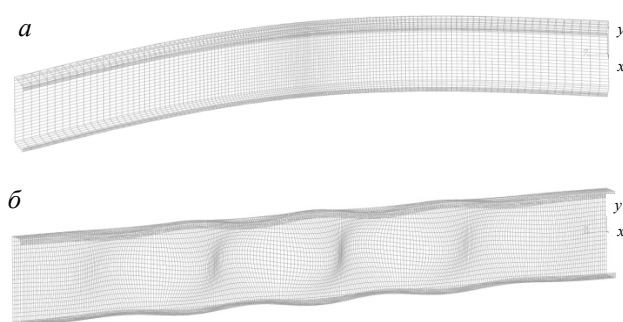
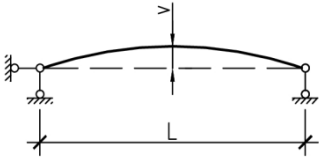
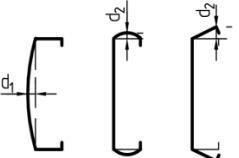


Рис. 6. Формы начальных несовершенств:
a – общего, *б* – местного

Вид начальных несовершенств определялся на основе линейного расчета на устойчивость в расчетном комплексе ANSYS (ANTYPE, BUCKLE). Линейный расчет на устойчивость служил лишь средством для определения формы потери устойчивости, которая далее вносилась в расчетную схему с определенным масштабным коэффициентом. Масштабный коэффициент подбирался таким образом, чтобы внесенные начальные несовершенства соответствовали рекомендуемым значениям, которые выбирались согласно нормативным документам [7] и публикациям [8, 9] (табл. 1).

Таблица 1

Значения начальных несовершенств

Эскиз	Значение
	$v = L_p / 750 + i / 20$
	$d_1 = 0,006 H$ $d_2 = t$

Остаточные напряжения

Следует отметить, что процесс холодного формования вносит значительный вклад в распределение и величину остаточных напряжений. Наряду с остаточными напряжениями в областях со значительными пластическими деформациями (углыгиба и т. п.) наблюдается эффект упрочнения стали (повышение предела текучести). В силу недостаточных знаний о величине и распределении этих двух факторов был выбран консервативный подход, рассматривающий данные величины полностью взаимоисключающими друг друга.

Сравнительный анализ

На основе описанной ранее расчетной модели производился расчет двух конфигураций профилей: а) традиционного С-образного профиля; б) профиля «Атлант». В ходе расчетов варьировались следующие характеристики: высота стенки H – 152, 203 мм; ширина фланцев B – 41,3, 50,8 мм; толщина металла t – 1,0, 1,5, 2,0 мм; длина профиля L – 0,5, 1,5, 2,75, 4,0 м. Все расчеты велись в программном комплексе ANSYS с дальнейшей статистической обработкой результатов в постпроцессоре PDS (Probabilistic Design System). В ходе обработки за «входные» параметры были выбраны ранее оговоренные геометрические характеристики, за переменный «выходной» параметр был принят коэффициент Δ :

$$\Delta = \frac{F_{кр}^A - F_{кр}^C}{F_{кр}^C} 100\%, \quad (1)$$

где $F_{кр}^C$ – значение критической силы для традиционного С-образного профиля; $F_{кр}^A$ – значение критической силы для аналогичной конфигурации профиля «Атлант».

Целью расчетов являлось подтверждение повышенной несущей способности профиля «Атлант» по сравнению с традиционным С-образным профилем, а также нахождение основных входных параметров, влияющих на это превышение.

На основе регрессионного анализа была получена формула для оценки введенного параметра Δ (все размеры приведены в метрах):

$$\Delta = 10,2 - 6,43t_{sc} + 6,11H_{sc} + 1,03B_{sc} - 4,38L_{sc} + 2,16L_{sc}^2 + 2,49t_{sc}H_{sc} + 0,46t_{sc}L_{sc}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} t_{sc} &= 2438t - 3,66; & H_{sc} &= 41,8H - 7,76; \\ B_{sc} &= 223B - 10,6; & L_{sc} &= 0,76L - 1,66. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициент детерминации для данной функции регрессии составил $R^2 = 0,96$, что свидетельствует о высокой степени тождественности полученной зависимости. В формуле (2) вместо натуральных используются «кодированные» значения «входных» параметров – t_{sc} , B_{sc} , L_{sc} , H_{sc} [10]. Благодаря такой замене выравниваются интервалы варьирования отдельных факторов, что в свою очередь позволяет оценивать степень влияния «входных» параметров на значение параметра Δ . Оценка влияния осуществляется по соответствующим коэффициентам формулы (2) при интересующем «входном» параметре. Проанализировав формулу (2), можно прийти к выводу, что решающее значение имеет толщина металла. Причем с увеличением параметра t коэффициент Δ понижается. Это объясняется тем, что с ростом толщины металла снижается

гибкость стенки сплошного профиля, а с ней и область, подверженная местной потере устойчивости. В связи с этим отверстия профиля «Атлант» теряют свое функциональное назначение (снижение влияния местной потери устойчивости) и, более того, могут быть классифицированы как ослабления, что приводит к снижению несущей способности по сравнению с традиционным С-образным профилем. Обратная зависимость также существует между параметром Δ и длиной профиля L . Это явление объясняется тем, что с увеличением длины профиля уменьшается влияние местной потери устойчивости – на первый план выходит общая потеря устойчивости. Стоит отметить, что положительная зависимость наблюдается между параметром Δ и высотой стенки H , а также шириной фланцев B . Это объясняется геометрическими особенностями профиля «Атлант». Данные зависимости подкрепляются графиками распределения значений параметра Δ (рис 7, а–г). На каждом графике построена линия тренда, по уклону которой можно судить о степени влияния того или иного «входного» параметра.

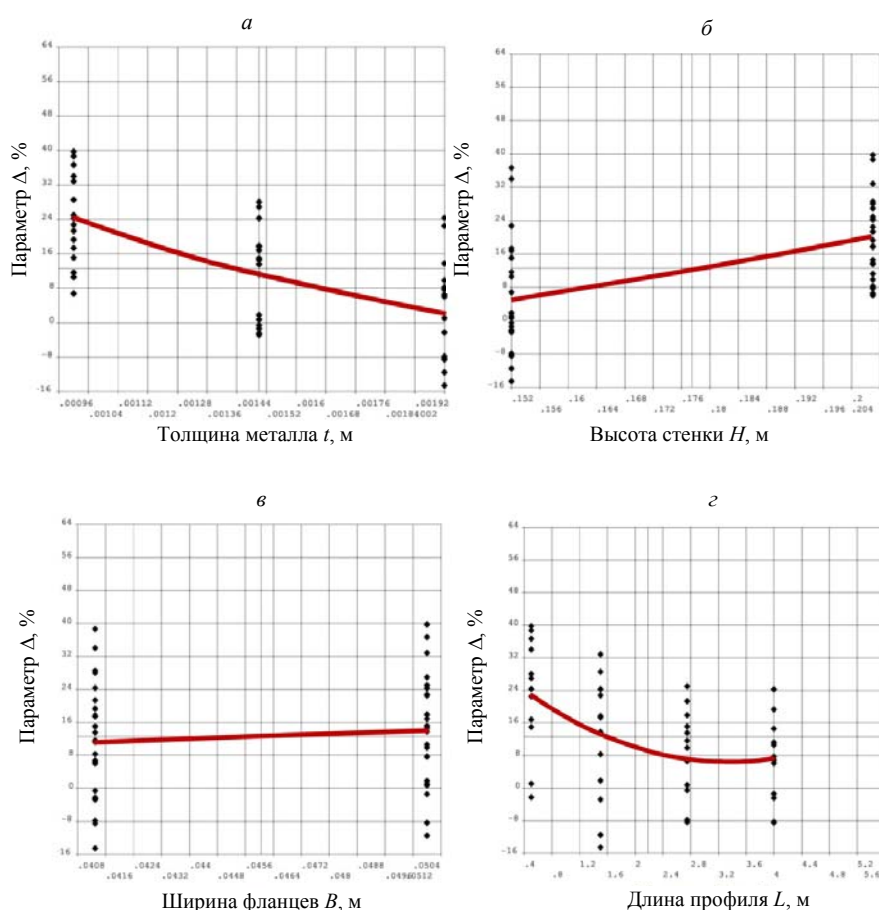


Рис. 7. Зависимость параметра Δ от:

а – толщины металла t ; б – высоты стенки H ; в – ширины фланцев B ; г – длины профиля L

На рис. 8 представлена относительная частота параметра Δ . Большинство его значений положительны, т. е. несущая способность профиля «Атлант» выше несущей способности традиционного С-образного профиля. Диапазон изменения параметра Δ составляет от 40 до -15% , среднее значение $-12,6\%$.

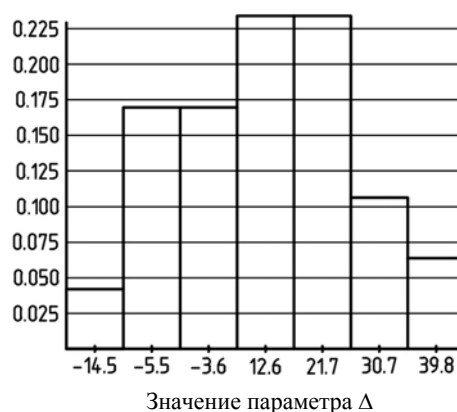


Рис. 8. Относительная частота параметра Δ

Выводы

На основе описанной в работе расчетной модели выполнена серия расчетов по определению критической силы двух конфигураций тонкостенных профилей: а) традиционного С-образного профиля; б) профиля «Атлант». По результатам расчета проведен многопараметрический сравнительный анализ, который установил преимущество профиля «Атлант» над традиционным С-образным профилем по несущей способности в среднем на $12,6\%$ в исследуемом диапазоне входных параметров. По результатам анализа влияния «входных» параметров установлено, что использование профиля «Атлант» целесообразно при относительно небольших расчетных длинах из плоскости профиля (до $1,5$ м), а также толщин металла (до $1,5$ мм). В указанных диапазонах среднее значение параметра Δ составляет $23,7\%$. Если учесть одинаковую металлоемкость двух профилей, то применение профиля «Атлант» будет иметь положительный экономический эффект.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубев, К.В. Проблемы использования новых технологий малоэтажного домостроения / К.В. Голубев, К.А. Федотов // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2003. – № 3. – С. 23–30.
2. Кашеварова, Г.Г. Анализ влияния легких стальных тонкостенных профилей на тепло-сопротивление ограждающих конструкций / Г.Г. Кашеварова, А.И. Бурков, П.А. Косых // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 6. – С. 62–68.
3. Kashevarova, G. Influence Analysis of Cold Formed Steel Members on Thermal Characteristics of Building Envelopes / G. Kashevarova, P. Kosykh // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 670–671 (2014). – P. 466–473. – Условия доступа : <http://www.scientific.net/AMM.670-671.466>.

4. Кашеварова, Г.Г. Определение несущей способности легких стальных тонкостенных конструкций на основе компьютерного моделирования / Г.Г. Кашеварова, П.А. Косых // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 10(2) 85–92 (2014).
5. Gunalan, S. Cold-formed steel columns subject to local buckling at elevated temperatures / S. Gunalan, Y. Bandula Heva and M. Mahendran // *Steel Innovations Conference*. – 2013. – Christchurch, New Zealand 21–22 February 2013.
6. *Eurocode 3: Design of steel structures*. – Part 1–1: General structural rules.
7. *Пособие по проектированию стальных конструкций* (к СНиП II-23–81*).
8. Schafer, B.W. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses / B.W. Schafer, T. Peköz // *Journal of Constructional Steel Research* 47 (1998).
9. Rondal, J., Dubina, D., Ungureanu, V. Imperfections and computational modelling of cold-formed steel members.
10. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1976.

REFERENCES

1. Golubev K.V., Fedotov K.A. Problemy ispol'zovaniya novykh tekhnologii maloetazhnogo domostroeniya [Advanced technologies of low-rising house-building]. *PNRPU Urbanity Bulletin*. 2003. No. 3. Pp. 23–30. (rus)
2. Kashevarova G.G., Burkov A.I., Kosykh P.A. Analiz vliyaniya legkikh stal'nykh tonkostennykh profilei na teplosoprotivlenie ogradhdayushchikh konstrukttsii [The analysis of light-weight steel sections affected by thermal resistance of walls]. *Stroit. mekh. i raschet sooruzhenii*. 2014. No. 6. Pp. 62–68. (rus)
3. Kashevarova G.G., Kosykh P.A. Influence analysis of cold formed steel members on thermal characteristics of building envelopes. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 670–671. Pp. 466–473.
4. Kashevarova G.G., Kosykh P.A. Opredelenie nesushchei sposobnosti legkikh stal'nykh tonkostennykh konstrukttsii na osnove komp'yuternogo modelirovaniya [Computer simulation of bearing capacity of light-weight steel structures]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2014. No. 10. Pp. 85–92. (rus)
5. Gunalan S., Bandula-Heva D., Mahendran M. Cold-formed steel columns subject to local buckling at elevated temperatures. *Proc. 'Steel Innovations Conference'*. Christchurch, New Zealand, 21–22 February 2013.
6. *Eurocode 3: Design of steel structures*. Pt. 1–1: General structural rules.
7. *Пособие по проектированию стальных конструкций* [Steel structure manual]. (СНиП II-23–81*). (rus)
8. Schafer B.W., Peköz T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, 1998. No. 47.
9. Rondal J., Dubina D., Ungureanu V. Imperfections and computational modelling of cold-formed steel members.
10. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii [Experimental search for optimum conditions]. Moscow : Nauka Publ., 1976. (rus)