УДК 539.4

© Д. А. Простакишина, аспирант
© Н. Д. Корсун, канд. техн. наук, доцент
(Тюменский индустриальный университет)
E-mail: prostakishinada@tyuiu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-1-82-86

© D. A. Prostakishina, post-graduate student
© N. D. Korsun, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Industrial University of Tyumen)
E-mail: prostakishinada@tyuiu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ С УЧЕТОМ НАЧАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ НЕСОВЕРШЕНСТВ

NUMERICAL MODELING OF A COMPOSITE SECTION ELEMENT FROM THIN-WALLED PROFILES TAKING INTO ACCOUNT THE INITIAL GEOMETRIC IMPERFECTIONS

Рассмотрен процесс численного моделирования элемента составного симметричного сечения из тонкостенных сигма-профилей с учетом начальных геометрических несовершенств, работающего в условиях продольной сжимающей силы с изгибом. При численном моделировании основным критерием истощения несущей способности при внецентренном сжатии является потеря устойчивости по одной из форм. Однако для тонкостенных элементов потеря местной устойчивости не означает полное истощение несущей способности, так как элемент продолжает нести нагрузку, но в меньшей степени. Поэтому моделирование проведено в два этапа: вначале в упругой постановке определены возможные формы потери устойчивости, после чего выполнен расчет по деформированной схеме с учетом видов несовершенств.

Ключевые слова: стальные тонкостенные профили, начальные геометрические несовершенства, механические свойства стали.

The article describes the process of numerical simulation of a composite symmetric section element made of thin-walled Sigma profiles operating under conditions of longitudinal compressive force with bending, taking into account the initial geometric imperfections. At numerical modeling, the main criterion of the load-bearing capacity exhaustion in case of eccentric compression is the stability loss in one of the forms. However, for thin-walled elements, the loss of local stability does not mean that the load-bearing capacity is completely exhausted, since the element continues to carry the load, but to a lesser extent. Therefore, simulation was carried out in two stages: initially, in the elastic formulation, the possible buckling modes were determined, afterwards, there was made calculation on the deformed pattern taking into account possible imperfections.

Keywords: thin-walled steel profiles, initial geometric imperfections, mechanical properties of steel.

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) — это профили, изготавливаемые путем холодного гнутья тонколистового проката. Данные элементы являются эффективным и высокотехнологичным конструктивным решением множества вопросов строительной отрасли [1].

Однако тонкостенные профили имеют ряд особенностей, влияющих на их напряженно-деформированное состояние, в связи с чем использование данных конструкций на территории России регламентируется отдельным Сво-

дом правил¹, в основу которого положен европейский стандарт². Несмотря на введение узкоспециализированного нормативного документа, основным способом оценки реального поведения тонкостенных конструкций по-прежнему остаются экспериментальные данные и опирающиеся на них трудоемкие расчеты.

¹ СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. М.: Минстрой России, 2016. 124 с.

² EN 1993-1-3:2004. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: European Committee for Standardisation, 2004. 125 p.

Ранее была опубликована статья, в которой решалась задача о возможных неблагоприятных случаях искривления элемента и влияния данных искривлений на НДС стержня составного симметричного сечения в условиях действия продольной силы с изгибом, с применением аналитического метода [2]. Полученные результаты позволили провести количественный анализ напряжений, возникающих при пространственной работе элемента. При этом задача комплексного анализа поведения конструкции при продольно-поперечном изгибе с учетом влияния начальных геометрических несовершенств осталась актуальной.

В данной публикации отражено решение вышепоставленной задачи, в частности разобран механизм и получены результаты моделирования элемента составного симметричного сечения из сигма-профилей в условиях пространственной работы с учетом начальных геометрических несовершенств.

Численный эксперимент ставился на основании анализа изученных публикаций отечественных и зарубежных исследователей [3–8]. Авто-

рами данных публикаций проводилось моделирование тонкостенных элементов С-образного и составных сечений, работающих в условиях осевого сжатия. Учитываемые начальные несовершенства были определены экспериментальным путем. В зависимости от детальности проработки и механизма численного эксперимента погрешность результатов составила от 5 до 20 % в сравнении с аналитическими методами расчета.

Объектом исследования является элемент симметричного сечения из двух сигма-профилей размерами сечения $h \times b \times c \times t = 300 \times 80 \times 20,5 \times 2$ мм (рис. 1, а), длиной 4,5 м. Закрепление элемента в плоскости действия момента принято шарнирное по концам стержня, а из плоскости действия момента дополнительно через 1,5 м по длине симитировано раскрепление прогонами (рис. 1, б).

Предмет исследования — напряженно-деформированное состояние объекта исследования при действии осевой силы и изгибающего момента с учетом начальных геометрических несовершенств.

Рис. 1. Объект исследования: а — геометрические размеры профиля, форма сечения; б — расчетная схема

При численном моделировании основным критерием истощения несущей способности при внецентренном сжатии является потеря устойчивости по одной из форм. Однако для тонкостенных элементов потеря местной устойчивости не означает полное истощение несущей способности, так как элемент продолжает нести нагрузку, но в меньшей степени. Поэтому моделирование проводилось в два этапа: вначале в упругой постановке были определены возможные формы потери устойчивости, после чего проводился расчет по деформированной схеме с учетом видов несовершенств.

В численном эксперименте были рассмотрены 17 образцов: эталонный образец без начальных несовершенств (рис. 2, а), образец с местными несовершенствами (рис. 2, б), несовершенствами формы (рис. 2, в), деформациями по длине в плоскости изгиба (рис. 2, г), деформациями по длине из плоскости изгиба (рис. 2, д) и комбинациями видов несовершенств, из которых самым значимым оказалось сочетание деформации формы сечения и деформации по длине из плоскости изгиба (рис. 2, е).

Изначально модели сечения вычерчиваются в программном комплексе Autodesk AutoCAD с привязкой к началу координат для дальнейшего удобного использования, отрезками необходимой длины для получения узлов в месте их пересечения, файлы сохраняются в формате *.dxf. После импорта сечения назначаются узлы между элементами сечения и копируются на необходимую высоту, при этом несовершенства вводятся путем перемещения отдельных узлов. Для моделирования стойки использовался 4-узловой пластинчатый элемент с соотношением сторон 1:1, назначались толщина пластины и физико-механические характеристики для материала «сталь».

Численный эксперимент проводился для 17 КЭ-моделей по однотипной методике, предусматривающей предварительный расчет модели на устойчивость в упругой постановке для определения шести форм потери устойчивости и выбора преобладающей формы. Исходя из предварительного расчета был сделан вывод, что у исследуемого образца происходит потеря местной устойчивости отгибов, полок и стенки сжатой зоны сечения.

Рис. 2. Образцы элементов для численного моделирования

Следующим этапом в модель вводились местные деформации, качественно и количественно равные полученным при предварительном расчете, тем самым имитировалась работа сжатой зоны после потери местной устойчивости отдельных участков сечения, и расчет на устойчивость проводился заново. На рис. 3, а виден прирост сжимающих напряжений после деформирования, что подтверждает адекватность модели.

Моделирование начальных несовершенств задавалось с учетом допусков при изготовлении согласно ГОСТ 23188–2012. На рис. 3, б представлены результаты моделирования образца с начальными искривлениями по длине в плоскости изгиба: видно, что потеря устойчивости происходит практически для всех частей сечения.

Рис. 3. Поля напряжений и распределение напряжений по сечению: а — с учетом потери местной устойчивости; б — с учетом потери местной устойчивости и деформациями по длине элемента

Проведенный численный эксперимент показал, что наиболее существенное влияние на НДС тонкостенного элемента симметричного сечения при внецентренном сжатии оказывают начальные искривления элемента в плоскости изгиба. В таблице представлен сравнительный анализ максимальных напряжений сжатой зоны сечения, расположенного в средней трети по длине образца, при поэтапном нагружении для трех расчетных случаев: 1) до потери местной устойчивости; 2) с учетом потери устойчивости пластинок для элементов без начальных несовершенств и 3) с общими начальными несовершенствами в плоскости действия момента.

Недеформированный образец № 1 принят за эталонный. Нагружение образца производилось поэтапно таким образом, чтобы степень нагружения сжатой зоны недеформированного образца увеличивалась от $0,15R_y$ до $0,9R_y$. В зависимости от степени нагружения образца происходит прирост напряжений сжатой зоны в случаях учета потери местной устойчивости отдельных пластин и начальных несовершенств в плоскости действия момента, прирост напряжений для случая 2 составляет до 84 %, для случая 3 — до 157 %. Таким образом, степень нагруженности образца при учете начальных несовершенств, равная расчетному сопротивлению материала R_y , соответствует $0,51R_y$ для недеформированного образца, в то время как расчет по деформированной схеме без учета начальных искривлений дает аналогичное соотношение при $0,7R_y$.

Верификация результатов численного моделирования проводилась сравнением с результатами, полученными путем аналитического расчета по методу эффективной ширины [2]. Итоговая погрешность составила 5–15 % в зависимости от степени нагруженности образца, что сопоставимо с погрешностью, полученной дру-

Анализ напряжений в сечении элемента

Этап нагружения	Случай 1		Случай 2		Случай 3	
	Напряжения		Напряжения		Напряжения	
	МПа	%	МПа	%	МПа	%
1	47	100	69	147	81	172
2	176	100	229	130	346	197
3	241	100	311	129	482	200
4	322	100	594	184	829	257

гими исследователями [3–8], и свидетельствует о возможности применения данной методики.

В результате выполнения данной работы можно сделать вывод о необходимости учета начальных несовершенств профилей при исследовании работы элементов, а также необходимости учета местной потери устойчивости пластин сжатой зоны. Численное моделирование отдельных элементов позволяет избегать трудоемких расчетов по методу эффективной ширины и при этом проводить комплексный анализ качественного и количественного поведения тонкостенных элементов, учитывая влияние их основных особенностей, дублируя натурный эксперимент.

Библиографический список

1. Рыбаков В. А. Применение полусдвиговой теории В. И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 21 с.
2. Корсун Н. Д., Простакишина Д. А. Анализ НДС составного сечения из тонкостенных профилей с учетом начальных геометрических несовершенств // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2018. № 4 (39). С. 83–88.
3. Schafer B. W. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses // *Journal of Constructional Steel Research*. 1998. Vol. 47. Pp. 193–210.
4. Roy K., Tina Chui Huon Ting, Hieng Ho Lau, James B. P. Lim. Vol.nlinear behaviour of back-to-back gapped built-up cold-formed steel channel sections under compression // *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 147. Pp. 257–276.
5. Ye J., Jun Ye, Seyed Mohammad Mojtabaei, Iman Hajirasouliha. Local-flexural interactive buckling of standard and optimized cold-formed steel columns // *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 144. Pp. 106–118.
6. Young B., Yan J. Finite element analysis and design of fixed-ended plain channel columns // *Finite Elem. Anal. Des.* 2002. Vol. 38 (6). Pp. 549–566.
7. Young B. Design of channel columns with inclined edge stiffeners // *Journal of Constructional Steel Research*. 2004. Vol. 60 (2). Pp. 183–197.
8. Назмеева Т. В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошно-

го и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 5 (40). С. 44–51.

References

1. Rybakov V. A. *Primenenie polusdvigovoy teorii V. I. Slivkera dlya analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem tonkostennykh stержney*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Application of V. I. Slivker's half-displacement theory for analysis of the stress-strain state of thin-wall rod systems. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2012, 21 p.
2. Korsun N. D., Prostakishina D. A. *Analiz NDS sostavnogo secheniya iz tonkostennykh profiley s uchetom nachal'nykh geometricheskikh nesovershenstv* [Analysis of the stress-strain state (SSS) of a composite cross-section of thin-walled profiles, taking into account the initial geometric imperfections]. *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN – Academic Bulletin of the Ural Sri project RAASN*, 2018, no. 4 (39), pp. 83–88.
3. Schafer B. W. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, 1998, no 47, pp. 193–210.
4. Roy K., Tina Chui Huon Ting, Hieng Ho Lau, James B. P. Lim. Nonlinear behaviour of back-to-back gapped built-up cold-formed steel channel sections under compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, no 147, pp. 257–276.
5. Ye J., Jun Ye, Seyed Mohammad Mojtabaei, Iman Hajirasouliha. Local-flexural interactive buckling of standard and optimized cold-formed steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, no 144, pp. 106–118.
6. Young B., Yan J. Finite element analysis and design of fixed-ended plain channel columns. *Finite Elem. Anal. Des.* 2002, no 38 (6), pp. 549–566.
7. Young B. Design of channel columns with inclined edge stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, no. 60 (2), pp. 183–197.
8. Nazmeeva T. V. *Nesushchaya sposobnost' szhatykh stal'nykh tonkostennykh elementov sploshnogo i perforirovannogo secheniya iz kholodnognutogo S-profilya* [Load-bearing capacity of compressed steel thin-walled elements of continuous and perforated cross-section made of cold-bent S-profile]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal – Engineering and construction journal*, 2013, no. 5 (40), pp. 44–51.