

УДК 621.01:531.8

DOI:10.46960/62045_2020_4_42

А.И. Уваров

ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЯ ШВЕЛЛЕРНОГО ПРОФИЛЯ ПУТЕМ СОВМЕСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТЕНКИ И ПОЛОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена потеря устойчивости стержня швеллерного профиля путем совместного деформирования стенки и полок, называемая искажением формы сечения. Показана аналогия данного типа деформирования с формой потери устойчивости длинной пластины с опорами, смещенными от продольных кромок. Получена зависимость, аппроксимирующая результаты численных расчетов для данной пластины. Сопоставление расчетов по полученной зависимости с численными расчетами потери устойчивости стержня швеллерного профиля показали хорошее совпадение. Предложенная расчетная зависимость может быть использована для расчетной оценки устойчивости для данного типа потери устойчивости.

Ключевые слова: устойчивость швеллера, пластинчатая форма, искажение формы сечения.

Балки швеллерного профиля выпускаются промышленностью и находят применение в транспортном машиностроении, в частности, в судостроении и конструкциях грузовых автомобилей [1,2]. При использовании балок швеллерного профиля в качестве элементов конструкции они могут подвергаться сжатию, в связи с чем актуальной задачей становится расчет на устойчивость. Потеря устойчивости стержней швеллерного профиля может происходить по формам различного типа [3]. Различают формы с искривлением оси, которые принято называть Эйлеровыми [4], формы с искривлением оси и закручиванием поперечного сечения [5], формы с деформацией полок и стенки профиля как пластин. В настоящей работе рассмотрена потеря устойчивости путем совместного деформирования стенки и полок, называемая искажением формы сечения.

Качественный анализ формы потери устойчивости

Рассмотрим поперечное сечение стержня швеллерного профиля с одинаковой толщиной стенки и полок t .

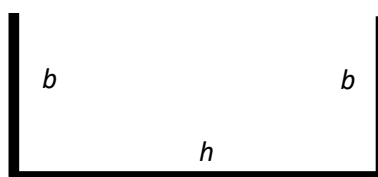


Рис. 1. Профиль швеллера

Швеллер можно считать состоящим из трех пластин: пластины с опорами вдоль длинных кромок шириной h (стенка) и двух пластин с одной свободной кромкой шириной b (полки). Потеря устойчивости каждой из них приводит к потере устойчивости стержня. С целью анализа данного типа потери устойчивости был выполнен ряд численных расчетов. Их результаты показали, что пластины полок и стенки не деформируются независимо друг от друга. В местах соединения они всегда поворачиваются вокруг оси стержня на один и тот же угол. Схема деформации поперечного сечения швеллера представлена на рис. 2.

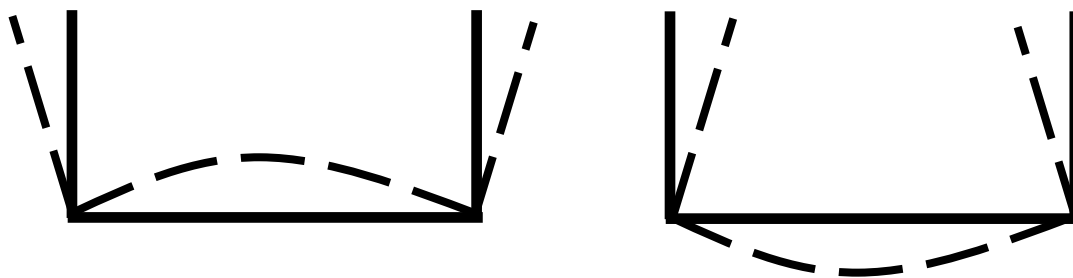


Рис. 2. Схема деформации поперечного сечения швеллера

Форма потери устойчивости, полученная в результате численного расчета (вид вдоль стержня), показана на рис. 3.

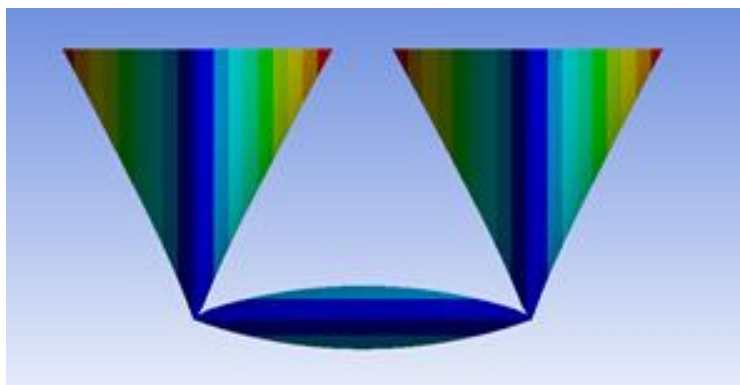


Рис. 3. Форма потери устойчивости швеллера

Все три пластины деформируются совместно, образуя одну длинную пластину, имеющую два продольных излома вдоль линий соединения полок и стенки. Вдоль этих линий вертикальные и горизонтальные перемещения отсутствуют. Стенка ограничивает перемещения полок в плоскости стенки, а полки, в свою очередь, ограничивают перемещения стенки в плоскостях полок. Можно считать, что в этих местах расположены шарнирные опоры.

Широко известно аналитическое решение об устойчивости сжатой длинной пластины, продольные кромки которой имеют свободные жесткие опоры, препятствующие перемещению перпендикулярно срединной поверхности [4]. При этом форма потери устойчивости в поперечном направлении содержит одну полуволну синусоиды. Результат численного расчета длинной пластины на виде вдоль длинной кромки показывает форму потери устойчивости, представленную на рис. 4.

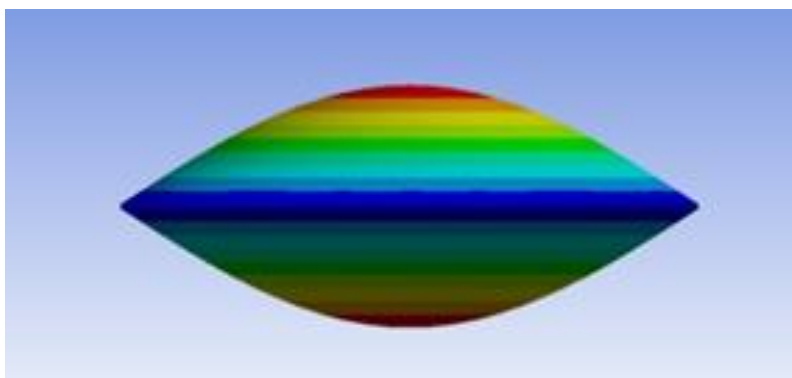


Рис. 4. Форма потери устойчивости пластины с опорами по кромкам

На рис. 5 представлена форма потери устойчивости, полученная в результате численного расчета при смещении опор от длинных кромок внутрь.

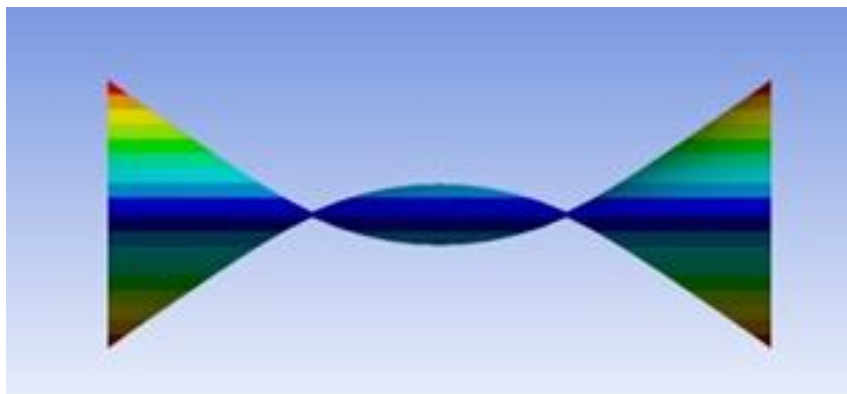


Рис. 5. Форма потери устойчивости пластины с опорами, смещенными от кромок

Полуволна синусоиды смещена в сторону вогнутости так, чтобы на опорах отсутствовали перемещения. Данная форма сходна с формой потери устойчивости швеллера: в точках опор на поперечном сечении пластины и в точках соединения полок и стенки швеллера отсутствуют перемещения. Отмеченное сходство позволяет предположить, что критическое напряжение швеллера и пластины шириной $(h + 2b)$ с опорами, смещенными на величину b от кромок, одинаковы с точностью, достаточной для инженерных расчетов. Справедливость данного предположения была подтверждена численными расчетами.

Предлагаемая аналитическая зависимость для расчета критических напряжений

Для длинной пластины шириной $(h + 2b)$ с шарнирными опорами по длинным краям, в соответствии с точным аналитическим решением, величина критического напряжения равна:

$$\sigma = 4 \frac{D}{t} \left(\frac{\pi}{h + 2b} \right)^2, \quad (1)$$

где $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Введем параметр, характеризующий относительную ширину полок швеллера и размещение продольных опор пластины:

$$\beta = \frac{b}{h + 2b}.$$

Формулу для расчета критических напряжений для длинной пластины шириной $(h + 2b)$ с шарнирными опорами, смещенными на величину b от длинных кромок, и для швеллера запишем в виде:

$$\sigma_\beta = k(\beta) 4 \frac{D}{t} \left(\frac{\pi}{h + 2b} \right)^2, \quad (2)$$

где $k(\beta)$ – безразмерный коэффициент, зависящий от положения опор.

Для определения зависимости $k(\beta)$ выполнена серия численных расчетов по определению величины критических напряжений для длинной пластины шириной $(h + 2b)$ с шарнирными опорами, смещенными на величину b от длинных кромок при варьировании пара-

метра β в пределах от 0 до 0,4. Результаты вычислений аппроксимированы полиномом следующего вида:

$$k(\beta) = -24434\beta^6 + 32990\beta^5 - 15785\beta^4 + 3090,4\beta^3 - 222,32\beta^2 + 11,649\beta + 1 \quad (3)$$

Данная аппроксимирующая зависимость представлена графически на рис. 6.

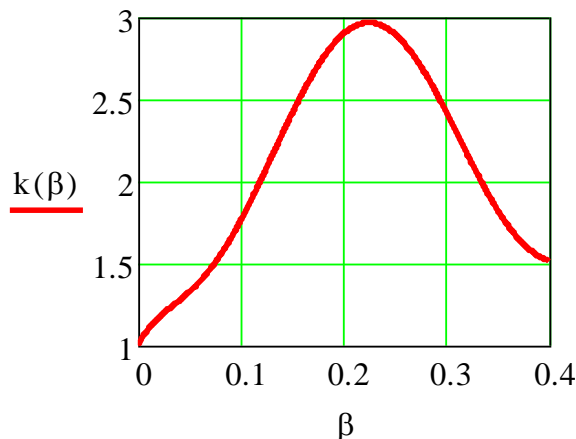


Рис. 6. Аппроксимирующая зависимость безразмерного коэффициента $k(\beta)$, полученная на основании численных расчетов пластин со смещенными кромками

Сопоставление численных и аналитического расчетов величины критического напряжения для швеллера

Формула (2) с использованием зависимости (3), полученной при численных расчетах пластин со смещенными опорами, применена для расчета величины критического напряжения стержня швеллерного профиля. Выполнены численные расчеты стержней с высотой стенки 100 мм и длиной 2000 мм с вариацией ширины полки и толщины профиля. Результаты численных расчетов сопоставлены с расчетами по формуле (2) с использованием аппроксимирующей зависимости (3). Сопоставление приведено в табл. 1.

Таблица 1.
Сопоставление численных и аналитического расчетов

t , мм	b , мм	Критические напряжения по результатам численного расчета, МПа	Критические напряжения по ф (2), (3), МПа	Относительное расхождение, %
0,7	80	11,9	12,16	2,43%
1,4	80	47,3	48,63	2,68%
2	80	96,3	99,25	3,00%
3	80	215,2	223,31	3,63%
0,7	60	19,5	19,91	2,17%
1,4	60	77,6	79,65	2,54%
2	60	157,7	162,56	3,00%
3	60	351,5	365,76	3,89%

Расхождение результатов расчетов составляет порядка 2-4 %, что является приемлемой погрешностью.

Выводы

Предложенная расчетная зависимость для определения критического напряжения сжатого швеллера при потере устойчивости путем совместного деформирования стенки и полок показала хорошее совпадение с результатами численных расчетов и может быть использована для расчетной оценки устойчивости для данного типа потери устойчивости.

Библиографический список

1. ГОСТ 8278-83 Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент (с Изменениями № 1, 2). [Электронный документ]. Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200005116> (Дата обращения 3.10.2020).
2. ГОСТ Р 55411-2013 Профили гнутые из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. [Электронный документ]. Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200101994/> (Дата обращения 3.10.2020).
3. Eurocode 3: Design of steel structures. – Part 1–3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. [Электронный документ]. Режим доступа <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.3.2006.pdf> (Дата обращения 3.10.2020).
4. Вольмир, А.С. Устойчивость упругих систем [Текст] / А.С. Вольмир. – М., Физматгиз, 1963. – 880 с.
5. Кузьмин, Н.Л. Расчет конструкций из тонкостенных стержней и оболочек [Текст] / Н.Л. Кузьмин, П.А. Лукаш, И.Е. Милейковский. – М., Госстройиздат. 1960, – 264 с.