УДК 69.04

Абдурахмонов А.Х.
Студент-специалист
VI курс, институт «Строительства и архитектуры»
ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет»
Россия, г. Москва

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ ПРИ СТЕСНЕННОМ КРУЧЕНИИ

Аннотация. *Эффективное использование материальных ресурсов, повышение качества продукции, снижение стоимости и материалоемкости в строительных конструкциях за счет внедрения современных методов расчета и применения новых конструктивных решений является важной задачей. Тонкостенные стержни открытого профиля – двутавры, швеллеры, Z-образные профили и т.п. широко используются в металлических конструкциях. Определение несущей способности таких стержней с учётом особенностей работы современных пространственных конструкций представляет значительный практический интерес. В статье представлены результаты численных исследований устойчивости центрально сжатого стального двутаврового стержня в упругой и пластической стадии работы материала. Результаты получены для профиля, у которого местная устойчивость стенки и полок обеспечена.*

Ключевые слова: *Тонкостенный стержень, устойчивость, несущая способность, стесненное кручение, бимомент, пластическая стадия работы, коэффициент устойчивости.*

Keywords: *Thin-walled rod, stability, bearing capacity, constrained torsion, bimoment, plastic stage, coefficient of stability.*

Annotation. *Efficient use of material resources, improvement of product quality, reduction of cost and material in building structures by introduction of*

modern methods of calculation and application of new constructive solutions is an important Task. Thin bars of open profile-I-beams, channels, Z-shaped profiles, etc. are widely used in metal constructions. The determination of the bearing capacity of such rods taking into account the peculiarities of modern spatial structures is of considerable practical interest. The article presents the results of numerical studies of the stability of the centrally compressed steel I-beam rod in the elastic and plastic stages of the material. The results are obtained for the profile, in which the local stability of the wall and shelves is ensured.

Введение

В строительных металлических конструкциях широко применяются тонкостенные стержни открытого профиля (двутавры, швеллеры, Z-образные профили и т.п.). Особенностью работы тонкостенных стержней является появление дополнительных нормальных и касательных напряжений при стеснённом кручении [1]. Дополнительные напряжения от кручения влияют на несущую способность как изгибаемых, так и сжатых стержней [2]. Для сжатых тонкостенных стержней отсутствуют нормативные методики расчёта устойчивости при их кручении. Для разработки методики расчёта устойчивости центрально сжатых стержней при упругой и пластической работе материала проведены численные исследования работы тонкостенных стержней открытого профиля при стеснённом кручении.

Для исследования устойчивости успешно используются расчёты конечноэлементных моделей, достоверность результатов которых оценивается теоретически и экспериментально.

На первом этапе исследования отрабатывалась методика расчёта устойчивости на примере центрально сжатого стержня.

Описание исследования

Цель данного теоретического исследования заключается в разработке уточненных методик расчета устойчивости двутавровых стержней при совместном действии продольной силы и бимомента.

Согласно действующим нормам по проектированию стальных конструкций [3] расчет на устойчивость центрально сжатых элементов выполняется по следующей формуле:

$$\frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1,$$

где φ –коэффициент устойчивости при центральном сжатии, определяется по зависимости

$$\varphi = 0{,}5(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39{,}48\bar{\lambda}^2})/\bar{\lambda}^2;$$

А – площадь поперечного сечения; R_y –расчетное сопротивление стали по пределу текучести; γ_c –коэффициент условий работы конструкций.

Коэффициент δ выражается из формулы

$$\delta = 9{,}87\left(1 - \alpha + \beta\bar{\lambda}\right) + \bar{\lambda}^2,$$

где α и β –коэффициенты определяемые согласно таблице свода правил [3] в зависимости от типа сечения. В нашем случае $\alpha = 0{,}04$, $\beta = 0{,}09$.

$\bar{\lambda}$ –условная гибкость стержня ($\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R_y/E}$, $E = 2{,}06 \cdot 10^4$кН/см^2 –модуль упругости стали).

Результаты выполненного теоретического расчета согласно действующим нормам приведены в таблице 2 для разных гибкостей.

Построение сетки конечных элементов является одним из наиболее важных этапов анализа по методу МКЭ. В вычислительных комплексах существует как автоматический, так и ручной методы построения сетки конечных элементов. Как правило, ручной метод построения с упорядоченной сеткой является более точным и надежным. Немаловажным фактором расчета методом МКЭ является выбор типов и размеров конечных элементов. Практика расчетов показывает, что сравнительно мелкая сетка требуется там, где имеет место быть концентрация напряжений (резкое изменение форм сечений, местные ослабления в конструкциях, сварные стыки и т.п.). В то время как крупное разбиение сетки применяется в

участках с плавно и равномерно переходящими напряжениями или относительными деформациями. Стоит отметить, что точность результатов при расчете уменьшается, если существенно различаются между собой размеры конечных элементов исследуемой конструкции. Инженерный опыт расчета в программных комплексах показывает, что нет единой «формулы» для выбора разбиения сетки конечных элементов. Выбор сетки в зависимости от поставленной задачи является уникальной. Поэтому анализируя несколько вариантов разбиения сетки КЭ выбран наиболее оптимальный с относительно небольшой погрешностью.

Рассмотрена работа шарнирно-опертого по концам стержня, загруженного продольной сжимающей силой. На левом конце стержень закреплен от продольных и поперечных перемещений, на правом только от поперечных перемещений. Поворот сечений относительно продольной оси на опорах стержня исключён, депланация сечения на опорах свободная. На правом конце стержень нагружен сжимающей продольной силой N. Сила приложена центрально. Для провоцирования потери устойчивости, задана возмущающая поперечная сила P, приложенная в плоскости наибольшей изгибной жесткости равная 1/1000 от N в среднем сечении. Расчетная схема представлена на рис. 2. Объектом исследования была выбрана прокатная двутавровая балка профиля 10Б1 по СТО АСЧМ 20-93. Класс стали - С245.

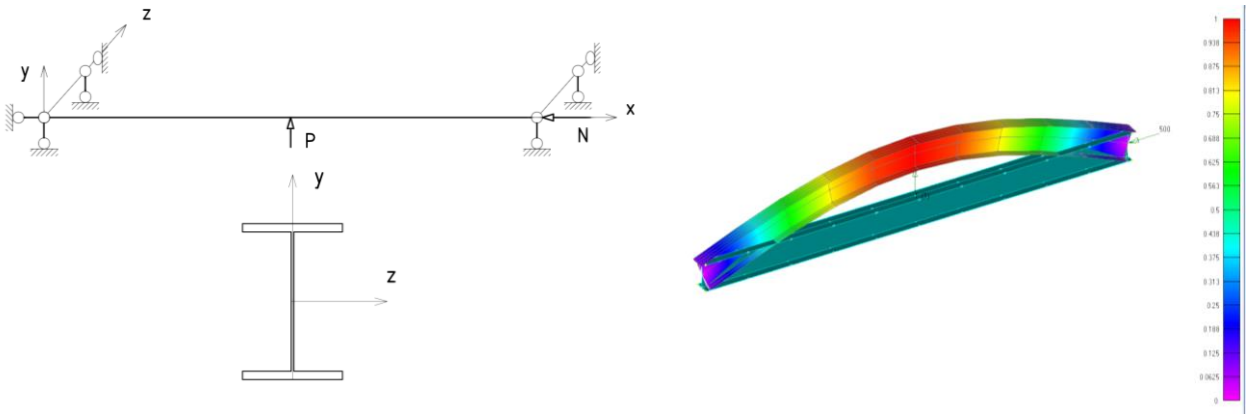

Рис. 2. Расчетная схема стержня

Численный расчет устойчивости выполнялся с использованием вычислительного комплекса Femap v11.4.2 (NX Nastran) в геометрически и физически нелинейной постановке [4]. При верификации комплекса было рассмотрено несколько вариантов сетки разбиения конечно-элементной модели со следующими значениями разбиения элементов балки:

Вариант 1: Полка – 2 по ширине, стенка – 1 по ширине, по длине стержня – 10;

Вариант 2: Полка – 4 по ширине, стенка – 2 по ширине, по длине стержня – 10;

Вариант 3: Полка – 4 по ширине, стенка – 2 по ширине, по длине стержня – 15.

Моделируется стержень конечными элементами оболочки. При выборе диаграммы работы стали учтены результаты ранее проведённых исследований [5]. Для учёта пластической работы стали были использованы две диаграммы работы материала – диаграмма стали из действующих норм, и билинейная диаграмма работы стали.

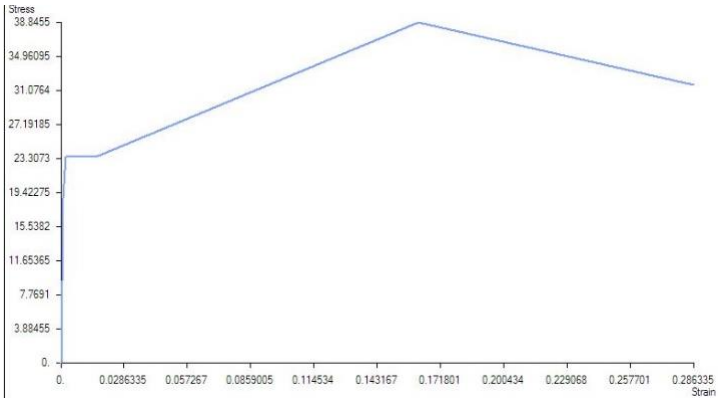

Рис.4. Нормативная диаграмма работы стали

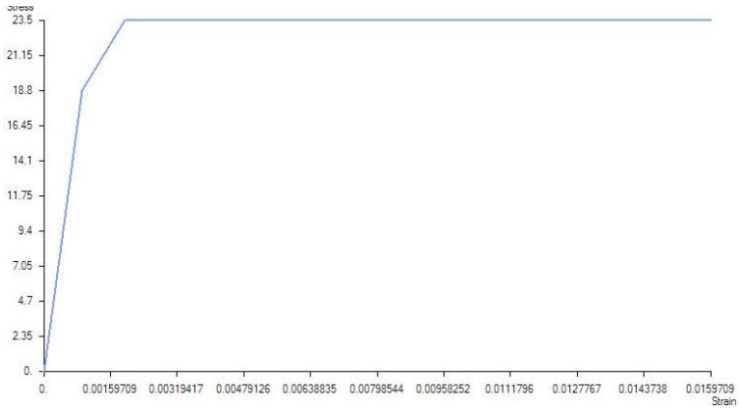

Рис.5. Билинейная диаграмма работы стали

Установлено, что разница в результатах мало зависит от выбранной диаграммы, однако время расчёта при использовании билинейной диаграммы меньше.

Результаты расчета при различной сетке разбиения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение результатов в зависимости от разбиения сетки КЭ

№ п/п	**Сетка разбиения (количество элементов)**			$\boldsymbol{N_{cr}}$ **(по нормам)**	$\boldsymbol{N_{cr}}$ **(Femap)**	$\left(\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{N_{cr}^{\text{тест}}}}{\boldsymbol{N_{cr}^{\text{теор}}}}\right)\cdot\mathbf{100\%}$
	Стенка	*Полки*	*По длине*			
Гибкость стержня $\lambda = 120$						
1	1	2	10	**103,44**	114,85	11,027
2	**2**	**4**	**10**		**101,83**	**-1,556**
3	4	6	15		96,434	-6,773
Гибкость стержня $\lambda = 40$						
1	1	2	10	**211,86**	267,068	26,06
2	**2**	**4**	**10**		**211,443**	**-0,197**
3	4	6	15		203,06	-4,154

Установлено, что наилучшие результаты при обеих гибкостях получены при 2 варианте сетки разбиения с незначительным отклонением критической силы от нормативного значения (наибольшая разность составила 1,36 % в сторону запаса прочности). В варианте 3 с более густой сеткой, сходимость уменьшается, так как размеры элементов между собой существенно разные для дальнейшего анализа был выбран 2 вариант сетки разбиения конечно-элементной модели балки.

В таблице 2 выполнен сравнительный анализ значения критических нагрузок от действия продольной силы для диапазона гибкостей 40…120,

при которых происходит потеря устойчивости. Нелинейный расчет выполнен с использованием нормативной (рис. 4) диаграммы работы стали.

Таблица 2. Сравнение результатов от действия продольной силы

Гибкость стержня					
40	**60**	**80**	**100**	**110**	**120**
N_{cr}, кН **(СП 16.13330.2011)**					
211,86	191,26	163,48	131,82	116,9	103,44
N_{cr}^{Femap}, кН **(Упругопластическая диаграмма работы)**					
211,443	190,43	162,17	130,22	115,49	102,03
$(1 - \frac{N_{cr}^{Femap}}{N_{cr}^{СП}}) \cdot 100\%$					
0,197	0,434	0,99	1,214	1,206	1,36

Проведённые численные исследования позволили установить параметры сетки разбиения, позволяющие получать достоверные результаты. Выявлена возможность использования нормативной или билинейной диаграмм работы стали для учёта пластической работы материала. С учётом полученных результатов на втором этапе исследования будет численно и экспериментально изучена устойчивость центрально сжатых тонкостенных стержней открытого профиля при действии бимомента, вызванного стеснённым кручением.

Литература:

1. Кручение металлических балок. Теоретические и экспериментальные исследования и практические приемы расчета. Бычков Д.В., Мрощинский А.К., Власов В.З. (ред.) - М.-Л.: Гостстройиздат, 1944. — 260 с.

2. Туснин А.Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Московский государственный строительный университет. Москва, 2004. 37 с.

3. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Изменением N 1).

4. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2003, 448с.

5. Tusnin A.R., Prokić M. Bearing capacity of steel l-sections under combined bending and torsion actions taking into account plastic deformations. Journal of Applied Engineering Science. 2014. T. 12. № 3. C. 179-186.