

МОДЕЛИ ПРОЧНОСТЬ И МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БАЛОК С ГИБКОЙ СТЕНКОЙ

STRENGTH AND LOCAL STABILITY MODELS OF THIN-WALLED GIRDER

д.т.н., проф. Волкова В.Е. (Национальный горный университет, г. Днепропетровск), аспирант Ковальчук А.А. (Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Днепропетровск)

Dr. Professor Volkova V.E. (National Mining University, Dnepropetrovsk), postgraduate Koval'chuk G.O. (Dnepropetrovsk National University of the Railway Transport named after acad. V. Lazaryan, Dnepropetrovsk)

Аннотация

Рассмотрены инженерные методы расчета на прочность и местную устойчивость балок с гибкой стенкой, применяемые в нормативных документах Украины и Европы. Выполнен анализ расчетных моделей и представлено сравнение основных параметров моделей.

Summary

The engineering design methods of strength and local stability of thin-walled girder which are used in the normative documents of Ukraine and Europe were considered. The analysis of design models was done and comparison of general model's parameters is carried out.

Введение

Основной особенностью балок с гибкой стенкой является их способность воспринимать нагрузку и после потери устойчивости. Это явление исследовалось в работах Г. Вагнера, В.И. Стригунова, Б. М. Броуде [1]. В основе современных норм проектирования балок с гибкой стенкой заложен метод К. Баслера.

Ниже приведено сравнение расчетных моделей и методик проектирования балок с гибкой стенкой, используемые в нормативных документах Украины [2,3] и Европы [4,5].

Расчет балок с гибкой стенкой согласно ДБН В.2.6-163:2010 и СНиП II-23-81*

Согласно нормативным документам Украины [2,3] балки симметричного двутаврового сечения с относительной гибкостью стенки $\bar{\lambda}_w < 6$ рассчитываются в пределах упругих деформаций, а локальные неупругие деформации в стенке учитываются увеличением расчетного сопротивления на 15%. Балки с относительной гибкостью от 6 до 13 относятся к балкам с гибкой стенкой, их расчет выполняется с учетом закритической стадии работы стенки.

В соответствии с ДБН [3] конструкции разделены на классы в зависимости от принятого напряженно-деформированного состояния. Балки с гибкой стенкой не выделены в отдельный класс конструкций, однако могут быть отнесены ко второму классу, допуская упруго-пластическую работу на отдельных участках конструкции.

В СНиП [2] приведены требования по проектированию балок с гибкой стенкой, укрепленные поперечными ребрами жесткости.

Прочность таких балок необходимо проверять по формуле

$$(M/M_u)^4 + (Q/Q_u)^4 \leq 1, \quad (1)$$

где M и Q – расчетные значения момента и поперечной силы в рассматриваемом сечении; M_u и Q_u – предельные значения момента и поперечной силы, определяется по формулам:

$$M_u = R_y A_w^2 \left[\frac{A_f}{th} + \frac{0,85}{\bar{\lambda}_w} \left(1 - \frac{1}{\bar{\lambda}_w} \right) \right], \quad (2)$$

$$Q_u = R_s A_w \left[\frac{\tau_{cr}}{R_s} + 3,3 \left(1 - \frac{\tau_{cr}}{R_s} \right) \frac{\beta\mu}{1 + \mu^2} \right], \quad (3)$$

A_w и A_f – площади сечений стенки и поясов; τ_{cr} – критическое касательное напряжение для балок с гибкостью до 6; $\beta = c_o/a$ – коэффициент, учитывающий геометрические параметры отсека стенки [6], работающего в закритической стадии; $\mu = a/h$ – соотношение размеров отсека.

Предельное значение поперечной силы состоит из поперечной силы критической нагрузки $Q_{u1} = A_w \tau_{cr}$ и дополнительной силы,

возникающей в закритической стадии $Q_{u2} = 3,3(R_s A_w - \tau_{cr} A_w) \frac{\beta\mu}{1 + \mu^2}$.

Из этого следует, что влияние поперечных ребер жесткости на предельное значение поперечной силы характеризуется их шагом и зависит от геометрических размеров отсека.

Расчет балок с гибкой стенкой согласно EN 1993-1-1 и EN 1993-1-5

В нормативных документах EN [4] выделены четыре класса поперечных сечений, их классификация зависит от соотношения ширины и толщины рассматриваемого элемента в его сжатой зоне, а также от предела текучести материала.

Поперечное сечение балки с гибкой стенкой, допускает потерю местной устойчивости, которая происходит перед достижением предела текучести. Данная особенность поведения стенки балки с гибкой стенкой, позволяет отнести их к 4 классу поперечных сечений согласно EN 1993-1-1 [4, 5.5.1].

В расчете поперечного сечения 4 класса используется эффективная ширина сжатых частей, определяемая согласно EN [5] по формуле

$$A_{c,eff} = \rho A_c, \quad (4)$$

где ρ - понижающий коэффициент зависящий от условной гибкости пластины $\lambda_p = \sqrt{f_y / \sigma_{cr}}$.

Характеристики эффективного поперечного сечения учитываются в расчете, снижая несущую способность балки.

Так согласно EN [4] для определения расчетного значения несущей способности на изгиб поперечного сечения 4 класса в формуле (5) используется $W_{eff,min}$ - минимальный момент сопротивления эффективного поперечного сечения.

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min}}{\gamma_{M0}} \quad (5)$$

Расчет несущей способности на сдвиг, учитывающий потерю местной устойчивости стенки в EN [5] определяется по формуле:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (6)$$

где $V_{bw,Rd}$ - сопротивление сдвигу стенки; $V_{bf,Rd}$ - сопротивление сдвигу поясов; γ_{M1} - частный коэффициент безопасности; η - коэффициент для площади сдвига (согласно EN [4] $\eta = 1, 2$ для сортов стали до S460).

В поперечном сечении двутавровой балки на сдвиг преимущественно работает стенка балки, поэтому для анализа несущей способности на сдвиг рассмотрим первое слагаемое в формуле (6), которое определяется по формуле:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (7)$$

где χ_w – коэффициент потери устойчивости при сдвиге, который зависит от конструктивного решения опорной части балки (табл. 5.1. в [4]).

Особое внимание необходимо уделить приопорному участку балки подверженного сдвигу. В EN приведена классификация конструктивных решений опорных частей балки: без элементов жесткости на опоре, с жестко опорной частью, с гибкой опорной частью.

Хотя в отечественных нормах не учитывается влияние конструкции опорного узла на значение предельной поперечной нагрузки, Руководство [7] рекомендует устройство дополнительного ребра жесткости в опорной зоне для балок с гибкой стенкой на расстоянии $60 - 80t_w$ от опоры. Таким образом, для расчета согласно EN необходимо принимать конструктивное решение с жесткой опорной частью. В таком случае опорная часть балки рассчитывается как короткая балка, воспринимающая продольные напряжения в плоскости стенки. При этом условие по расположению дополнительного ребра $e > 0,1/h_w$ соблюдается.

Есть альтернативный способ расчета балок с гибкой стенкой согласно EN. После потери местной устойчивости балки с гибкой стенкой, предпочтительнее выполнять анализ второго порядка, учитывающий влияние деформаций конструкции. В таком случае проверка устойчивости балок необходимо производить с учетом несовершенств. Используя форму потери устойчивости конструкции в упругой стадии можно получить «начальные» общие и местные несовершенства для анализа второго порядка. Данный метод расчета требует внимательного анализа и дальнейшего изучения.

Результаты

Рассмотрим приопорный участок в котором стенка балки воспринимает преимущественно поперечную силу. В таком случае, к основным параметрам моделей прочности и местной устойчивости балок с гибкой стенкой относится условная гибкость стенки,

предельное и критическое значения поперечной силы, возникающей в крайнем отсеке балки.

Для сравнения моделей по нормативным документам Украины и Европы принят коэффициент несущей способности K_Q , равный отношению предельного значения поперечной силы к его расчетному значению:

$$K_Q = Q_{\text{предел}} / Q_{\text{расчет}} \quad (8)$$

где $Q_{\text{предел}}$ – предельное значение поперечной силы в рассматриваемом сечении; $Q_{\text{расчет}} = R_s \cdot A_w$ – расчетное значение поперечной силы.

На рисунке 4 представлен график сравнения коэффициента K_Q в зависимости от условной гибкости стенки. Соотношение размеров отсека принято $a/h_w = 1$.

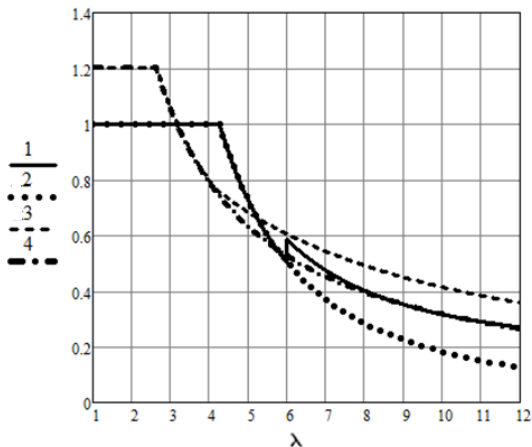


Рисунок 4. Зависимость коэффициента K_Q от условной гибкости стенки:

- 1 – по СНиП для балок с гибкой стенкой,
- 2 – по СНиП для обычных балок,
- 3 – по EN при наличии жесткой опорной части,
- 4 – по EN при гибкой опорной части.

Плавность изменяется при $\lambda = 6$, наблюдается многозначность коэффициента несущей способности K_Q .

В диапазоне от 7 до 12 значения коэффициента K_Q по Руководству [6,7] и EN [5] близки, в случае жесткого решения опорного узла.

Для балок с гибкой опорной частью значение коэффициента несущей способности выше при гибкости в диапазоне 4-12 чем для балок с жесткой опорной частью.

Зависимости используемые для вычисления критической нагрузки балок с обычной стенкой дает заниженные значения коэффициента K_Q в диапазоне гибкости от 6 до 12 по сравнению с значениями полученными по методике Руководства [7] для балок с гибкой стенкой. Отметим, что для $\lambda = 12$ коэффициент K_Q для балок с обычной стенкой составляет 60% от K_Q для балок с гибкой стенкой.

Список литературы:

1. Броуде, Б. М. О закритическом поведении гибких стенок стальных стержней [Текст] / Б. М. Броуде // Строительная механика и расчет сооружений. – 1976. – С. 7 – 12.
2. СНиП II-23-81*. Строительные нормы и правила. Часть II. Нормы проектирования. Глава 23. Стальные конструкции [Текст]. – [Действующий с 14 августа 1981 г.]. – М. : Центральный институт типового проектирования, 1991. – 96 с.
3. ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення монтажу [Текст]. – Чинні від 2011-12-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с.
4. EN 1993-1-1:2003. EUROCODE 3. Design of Steel Structures. Part 1.1 : General rules and rules for buildings / European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2003. – 90 p.
5. EN 1993-1-5:2003. EUROCODE 3. Design of Steel Structures. Part 1.5 : Plated structural elements / European Committee for Standardization CEN, Brussels, 2003. – 53 p.
6. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») [Текст] / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстрой СССР, 1989. – 148 с.
7. Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок. – М/ : ЦНИИПроектстальконструкция Госстроя СССР, 1977. – 28 с.
8. Перельмутер А. В. Устойчивость равновесие конструкций и родственные проблемы [Текст]. Том 3 / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М. : Издательство СКАД СОФТ, 2011. – 400 с.