

УДК 624.014.2

**К расчету на общую устойчивость центрально  
сжатых элементов согласно СНиП II-23–81\*  
и ТКП EN 1993-1-1**

Таймасов А.Н.

(Научный руководитель – Надольский В.В.)

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь

**Введение**

Сравнительно недавно вступили в силу новый строительный нормативный документы ТКП EN, среди которых выделим требования по проектированию соединений металлических конструкций ТКП EN 1993-1-1. В связи с его принятием имеют место некоторые различия и несоответствия при сравнении с действовавшим нормативным документом СНиП II-23–81\*. Целью настоящей работы является сравнение требований по расчету на устойчивость центрально сжатых элементов по указанным двум нормативным документам.

**Теоретические предпосылки.**

Потеря устойчивости – достижение системой такого состояния, при котором первоначальная форма её равновесия становится неустойчивой. Поведение стержня под нагрузкой характеризуется графиком, представленным на рисунке 1. Вначале с ростом нагрузки стержень сохраняет прямолинейную форму – устойчивое состояние. При достижении критической нагрузки  $N = N_{cr}^I$  стержень начинает резко выпучиваться. Дальнейший (небольшой) рост внешней нагрузки будет сопровождаться быстрым увеличением поперечного прогиба стержня  $f$ . После достижения максимальной нагрузки – второй критической силы  $N = N_{cr}^{II}$  – стержень теряет несущую способность (неустойчивое состояние). Точно охарактеризовать понятия устойчивое и неустойчивое состояния можно с использованием энергетических принципов, в основе которых лежит равенство приращений работ, совершаемых внешними и внутренними силами на возможном перемещении  $\delta A_e = \delta A_i$ .

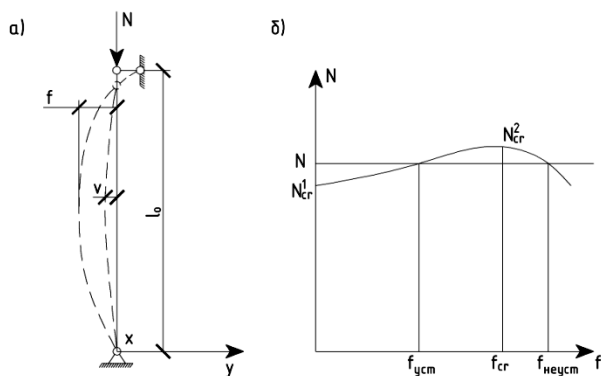


Рисунок 1 – Работа центрально-сжатого стержня:  
*a* – расчетная схема; *б* – зависимость между нагрузкой и прогибом стержня

Решив данное равенство можно определить критические напряжения по Эйлеру:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2 \cdot A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} . \quad (1)$$

До сих пор рассматривался идеально прямой стержень с нагрузкой, приложенной строго по оси. В реальных конструкциях таких условий практически не существует. Ось стержня всегда имеет некоторые искривления, конструктивное оформление концов сжатых стержней не может обеспечить идеальную центровку сжимающей силы и т.д., что приводит к заметному снижению критических напряжений. Учет влияния указанных факторов осуществляется введением в расчет некоторого эквивалентного эксцентриситета сжимающей силы  $e_0$ . Этот эксцентриситет зависит от многих случайных факторов: технологии изготовления, транспортировки, монтажа, конструктивного решения стержня и его узлов и т.д.

На не прямолинейность стержней также существенное влияние оказывают остаточные напряжения. Они могут быть распределены в сечении по-разному, как показано на рисунке. Остаточные напряжения в сочетании с напряжениями от сжатия вызывают уменьше-

ние поперечного сечения и эффективная площадь способная сопротивляться осевой нагрузке, следовательно, снижается.

### Расчет по методике СНиП II-23-81\*.

#### Базовые положения определения $\varphi$ .

Требования по проверке устойчивости центрально-сжатых элементов установлены на основе расчета внецентренно-сжатых стержней с учетом влияния формы поперечного сечения, начального искривления оси, случайного эксцентриситета сжимающей силы, а также соединительных элементов (для сквозных стержней).

При решении поставленной задачи был рассмотрен внецентренно-сжатый стержень, схема которого приведена на рисунке 2.

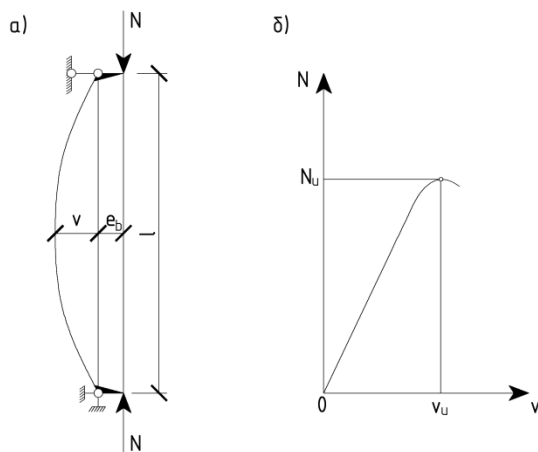


Рисунок 2 – К расчету сжатых стержней:

а – расчетная схема; б – кривая состояния равновесия

При этом решение выполнялось в предположении малости перемещений по деформированной схеме с учетом пластических деформаций. А значение расчетной несущей способности принято равным предельному значению сжимающей силы  $N_u$ , которая может быть воспринята элементом. Форма изогнутой оси принималась по полуволне синусоиды.

Методика практических расчетов центрально сжатых элементов приведена с использованием коэффициентов устойчивости при цен-

тральном сжатии  $\varphi$  (коэффициентов продольного изгиба), которые вычислены в зависимости от условной гибкости  $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y/E}$  и приняты равными  $\varphi = N_u/(A \cdot R_y)$ .

Значения коэффициентов  $\varphi$  определялись на основании двух методик:

– с учетом начальных несовершенств  $e_b$  (расчет как внецентренно сжатого стержня) по формуле

$$e_b = \frac{i}{20} + \frac{l}{750}; \quad (2)$$

– по методу Эйлера с введением коэффициента надежности  $\gamma_c = 1,3$

$$\varphi = \frac{\pi^2}{1,3 \cdot \bar{\lambda}^2}. \quad (3)$$

Полученные таким образом значения коэффициентов  $\varphi$  для различных форм поперечных сечений были осреднены и аппроксимированы с помощью формул (8)–(10) СНиП II-23–81\*, на основании которых для различных значений расчетных сопротивлений  $R_y$  была составлена таблица 72 СНиП II-23–81\*.

### **Последовательность расчета.**

- 1) Определяем геометрические характеристики сечения;
- 2) Определяем радиусы инерции сечения  $i_x = \sqrt{I_x/A}$  и  $i_y = \sqrt{I_y/A}$ ;
- 3) Определяем гибкости элемента  $\lambda_x = l_x/i_x$  и  $\lambda_y = l_y/i_y$ ;
- 4) Выбираем наибольшее значение гибкости;
- 5) По таблице 72 СНиП II-23–81\* определяем коэффициент  $\varphi(\lambda; R_y)$ ;
- 6) По формуле (7) СНиП II-23–81\*  $N/(\varphi \cdot A) \leq R_y \cdot \gamma_c$  выполняем проверку устойчивости.

## Расчет по методике ТКП EN 1993-1-1.

### Базовые положения коэффициента $\chi$ .

Базовыми положениями для определения понижающего коэффициента  $\chi$  послужили результаты более 1000 тестов элементов с различными типами поперечных сечений, с различными значениями гибкостей (от 55 до 160), на основании которых были построены кривые потери устойчивости, которые показаны на рисунке (3).

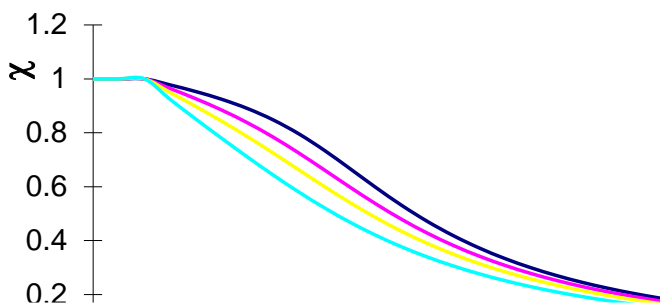


Рисунок 3 – Кривые потери устойчивости

Согласно ТКП EN 1993-1-1 кривые потери устойчивости могут быть вычислены математически:

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \left[ \varphi^2 - \bar{\lambda}^2 \right]^{0,5}} \leq 1, \quad (4)$$

где

$$\varphi = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \leq 1. \quad (5)$$

По таблице (6.2) ТКП EN 1993-1-1 берется значение понижающего коэффициента  $\chi$  являющегося функцией от гибкости  $\bar{\lambda}$ .

Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства  $\alpha$ , зависит от формы поперечного сечения элемента, относительно какой оси происходит потеря устойчивости (ось  $y$  или  $z$ ), метода изготовления сжатых элементов.

### Учет потери местной устойчивости.

Классы 1,2,3 поперечного сечения не подвержены местной потере устойчивости и отсюда расчётное сопротивление сжатию принимается за расчётное сопротивление пластической деформации:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}. \quad (6)$$

Для 4 класса поперечного сечения местная потеря устойчивости в одном или нескольких элементах поперечного сечения ограничивает сжимающую нагрузку и таким образом расчётное сопротивление сжатию ограничивается расчётным сопротивлением местной устойчивости:

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M0}, \quad (7)$$

где  $A_{eff}$  – площадь эффективного поперечного сечения.

### Последовательность расчета.

- 1) По таблице 5.2 определяем класс поперечного сечения (1,2,3,4);
- 2) Выбираем кривую потери устойчивости по таблице 6.2;
- 3) Определяем коэффициент  $\alpha$ , учитывающий начальные несовершенства, по таблице 6.1;
- 4) Определяем условную гибкость в зависимости от класса сечения:

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad - \text{ для поперечных сечений классов 1,2 и 3;}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{cr}}{i} \cdot \frac{\sqrt{A_{eff}/A}}{\lambda_1} \quad - \text{ для поперечных сечений класса 4;}$$

- 5) Определяем значение понижающего коэффициента  $\chi$ :

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \left[ \varphi^2 - \bar{\lambda}^{-2} \right]^{0.5}} \leq 1 \text{ при } \chi \leq 1,0, \quad (8)$$

где  $\varphi = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^{-2} \right] \leq 1$ ;

б) Определяем несущую способность сжатого элемента по устойчивости:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \text{ – для поперечных сечений классов 1,2,3;}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \text{ – для поперечных сечений класса 4.}$$

### Сравнение коэффициентов $\phi$ по СНиП П-23–81\* и $\chi$ по ТКП EN 1993-1-1.

