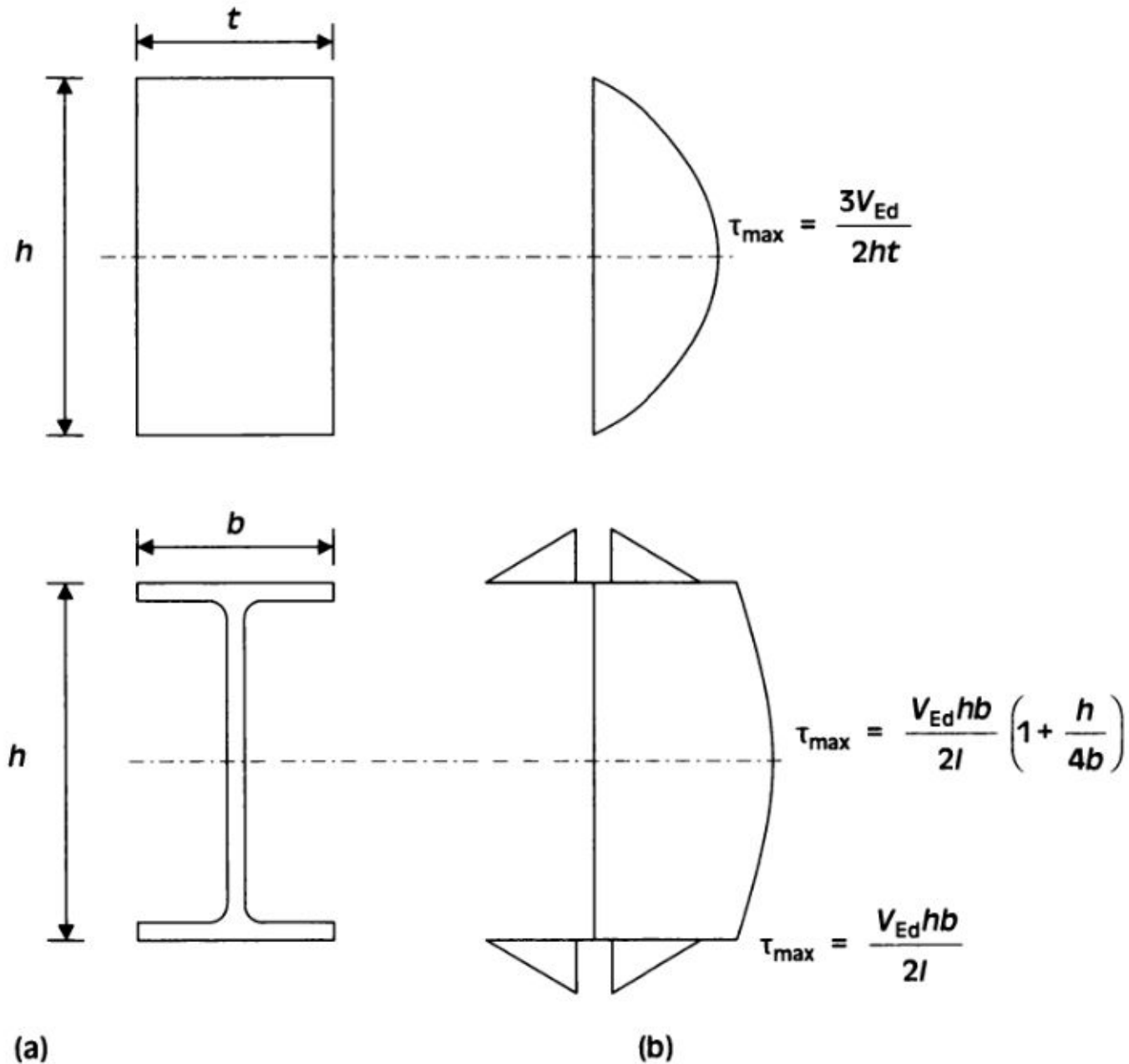


Сдвиг. Кручение

СДВИГ



Распределение напряжений сдвига в балках прямоугольного и двутаврового сечения от действия поперечной силы V_{Ed} : а – поперечное сечение; б – эпюра касательных напряжений

6.2.6 Сдвиг

(1) Расчетное усилие сдвига V_{Ed} в каждом поперечном сечении должно удовлетворять условию

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0, \quad (6.17)$$

где $V_{c,Rd}$ — расчетное сопротивление сдвигу поперечного сечения. При расчете в пластической стадии $V_{c,Rd}$ принимают равным расчетному сопротивлению сдвига поперечного сечения в пластической стадии $V_{pl,Rd}$, определяемому по (2). При упругом расчете $V_{c,Rd}$ принимают равным расчетному сопротивлению сдвига в упругой стадии, определяемому по (4) и (5).

(2) При отсутствии кручения расчетное сопротивление сдвигу в пластической стадии равно

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}, \quad (6.18)$$

где A_v — площадь сдвига.

Предел текучести стали на срез составляет примерно $1/\sqrt{3}$ от предела текучести на растяжение.

(3) Площадь сдвига A_v допускается принимать следующим образом:

а) для прокатных двутавровых сечений, нагрузка параллельна стенке,

$$A - 2bt_f + (t_w + 2r) \cdot t_f, \text{ но не менее } \eta h_w t_w;$$

б) для прокатных швеллерных сечений, нагрузка параллельна стенке,

$$A - 2bt_f + (t_w + r) \cdot t_f;$$

с) для тавровых сечений, нагрузка параллельна стенке:

— для прокатных тавровых сечений

$$A - bt_f + (t_w + 2r) \cdot \frac{t_f}{2};$$

— для сварных тавровых сечений

$$t_w \cdot \left(h - \frac{t_f}{2} \right);$$

д) для сварных двутавровых и коробчатых сечений, нагрузка параллельна стенке,

$$\eta \cdot \sum (h_w t_w);$$

е) для сварных двутавровых и коробчатых сечений, нагрузка параллельна полкам,

$$A - \sum(h_w t_w);$$

ф) для прямоугольных замкнутых сечений из листового проката постоянной толщины:

— нагрузка параллельна высоте сечения

$$Ah/(b + h);$$

— нагрузка параллельна ширине сечения

$$Ab/(b + h);$$

г) для круглых замкнутых сечений из листового проката и труб постоянной толщины

$$\frac{2A}{\pi},$$

где A — площадь поперечного сечения;

b — ширина сечения;

h — высота сечения;

h_w — высота стенки;

r — радиус сопряжения полки со стенкой;

t_f — толщина полки;

t_w — толщина стенки (если толщина стенки не постоянна, t_w следует принимать равной минимальной толщине);

η — см. EN 1993-1-5.

Примечание — Значение η с запасом допускается принимать равным 1,0.

е) для сварных двутавровых и коробчатых сечений, нагрузка параллельна полкам,

$$A - \sum(h_w t_w);$$

ф) для прямоугольных замкнутых сечений из листового проката постоянной толщины:

— нагрузка параллельна высоте сечения

$$Ah/(b + h);$$

— нагрузка параллельна ширине сечения

$$Ab/(b + h);$$

г) для круглых замкнутых сечений из листового проката и труб постоянной толщины

$$\frac{2A}{\pi},$$

где A — площадь поперечного сечения;

b — ширина сечения;

h — высота сечения;

h_w — высота стенки;

r — радиус сопряжения полки со стенкой;

t_f — толщина полки;

t_w — толщина стенки (если толщина стенки не постоянна, t_w следует принимать равной минимальной толщине);

η — см. EN 1993-1-5.

Примечание — Значение η с запасом допускается принимать равным 1,0.

(4) Для проверки на сдвиг в упругой стадии $V_{c,Rd}$ допускается применять следующее условие для критической точки поперечного сечения, если только обеспечена местная устойчивость согласно EN 1993-1-5:2006 (раздел 5):

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0, \quad (6.19)$$

где τ_{Ed} допускается вычислять по формуле

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t}, \quad (6.20)$$

здесь V_{Ed} — расчетное усилие сдвига;

S — статический момент сдвигаемой части сечения относительно центральной оси;

I — момент инерции поперечного сечения;

t — толщина сечения в рассматриваемой точке.

Примечание — Проверка (4) предусматривает запас прочности, т. к. она исключает ограниченное развитие пластических деформаций сдвига, которое допускается при упругом расчете (см. (5)). Поэтому ее следует применять только в тех случаях, когда невозможна проверка на основе $V_{c,Rd}$ в соответствии с условием (6.17).

(5) Для двутавровых сечений касательные напряжения в стенке допускается принимать равными

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w}, \text{ если } \frac{A_f}{A_w} \geq 0,6, \quad (6.21)$$

где A_f — площадь сечения одной полки;

A_w — площадь поперечного сечения стенки; $A_w = h_w t_w$.

(6) Кроме того, сопротивление сдвигу следует определять с учетом потери местной устойчивости стенки, не подкрепленной ребрами жесткости, согласно EN 1993-1-5:2006 (раздел 5), если

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}, \quad (6.22)$$

значение η см. в EN 1993-1-5:2006 (раздел 5).

Примечание — Значение η с запасом допускается принимать равным 1,0.


(7) Отверстия для крепежных деталей не учитывают при проверке сопротивления сдвигу, за исключением проверки прочности на сдвиг зон сопряжения, как указано в EN 1993-1-8.

(8) При совместном действии усилия сдвига и крутящего момента сопротивления сдвигу в пластической стадии $V_{pl,Rd}$ должно быть уменьшено согласно требованиям 6.2.7(9).

Кручение

Крутящий момент может возникнуть в двух случаях: из-за приложенного крутящего момента (чистое кручение) или от поперечной нагрузки, приложенной с эксцентриситетом относительно центра сдвига поперечного сечения (кручение плюс изгиб). В строительных конструкциях наиболее часто встречается последний случай, а чистое кручение достаточно редко. Поэтому в ТКП EN 1993-1-1-2009* представлено много информации о кручении, действующем совместно с другими факторами (изгибом, сдвигом и осевым усилием).

Расчетный внутренний крутящий момент T_{Ed} состоит из двух компонент: крутящего момента Сен-Венана $T_{t,Ed}$ и крутящего момента при стесненном кручении $T_{w,Ed}$.




Кручение по Сен-Венану – это равномерное кручение, когда изменение угла закручивания по длине элемента постоянно. В этом случае продольные деформации искажения сечений (сопутствующие кручению) также постоянны, и приложенный крутящий момент воспринимается единственным распределением касательных напряжений в поперечном сечении.

Стесненное кручение возникает в случае, когда изменение угла закручивания по длине элемента не постоянно; тогда говорят, что элемент находится в состоянии неравномерного кручения. Такое неравномерное кручение может возникать в результате неравномерного воздействия нагрузки (т.е. изменения крутящего момента по длине элемента) или из-за отсутствия продольных связей, противодействующих деформациям искажения. При неравномерном кручении имеют место нормальные продольные напряжения и дополнительные касательные напряжения.



Следовательно, следует учитывать три типа напряжений:

- касательные напряжения $\tau_{t,Ed}$ от свободного кручения Сен-Венана,
 - касательные напряжения $\tau_{w,Ed}$ от стесненного кручения,
 - продольные нормальные напряжения $\sigma_{w,Ed}$, связанные с искажениями сечений.
- 

6.2.7 Кручение

(1) Для элементов, подвергающихся кручению, для которых деформацией сечения можно пренебречь, расчетное значение суммарного крутящего момента T_{Ed} в каждом поперечном сечении должно удовлетворять условию

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1,0, \quad (6.23)$$

где T_{Rd} — расчетное сопротивление кручению поперечного сечения.

(2) Суммарный крутящий момент T_{Ed} в любом поперечном сечении должен рассматриваться как сумма двух внутренних составляющих:

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed}, \quad (6.24)$$

где $T_{t,Ed}$ — расчетное значение внутреннего крутящего момента Сен-Венана;


$T_{w,Ed}$ — расчетное значение внутреннего крутящего момента при стесненном кручении.

(3) Значения $T_{t,Ed}$ и $T_{w,Ed}$ в любом поперечном сечении допускается определять по T_{Ed} с помощью упругого расчета, исходя из характеристик сечения элемента, условий закрепления и распределения нагрузок вдоль элемента.

(4) Следует учитывать следующие напряжения, возникающие при кручении:

— касательные напряжения $\tau_{t,Ed}$, вызванные крутящим моментом Сен-Венана $T_{t,Ed}$;


— нормальные напряжения $\sigma_{w,Ed}$, вызванные бимоментом B_{Ed} , и касательные напряжения $\tau_{w,Ed}$, вызванные стесненным кручением $T_{w,Ed}$.



В зависимости от классификации поперечного сечения, расчет на сопротивление кручению может быть выполнен в пластической стадии согласно п. 6.2.7(6) или в упругой стадии с применением критерия текучести (п. 6.2.1(5)).

(5) Для проверки в упругой стадии допускается применять критерий текучести по 6.2.1(5).

(6) Для определения сопротивления поперечного сечения изгибающему моменту в пластической стадии, при наличии кручения, следует учитывать только эффекты от V_{Ed} , получаемые в результате статического расчета (см. (3)).



П. 6.2.7(7) допускает упрощение расчета элементов, подверженных кручению. Для элементов замкнутого поперечного сечения (таких как цилиндрические и прямоугольные трубы), обладающие очень большой жесткостью на кручение, преобладает крутящий момент Сен-Венана, и стесненное кручение можно не рассматривать. И наоборот, в случае незамкнутых сечений, таких как балочные и широкополочные двутавры, имеющих низкую жесткость на кручение, можно проигнорировать крутящий момент Сен-Венана.

(7) С целью упрощения в элементах замкнутого поперечного сечения влиянием стесненного кручения можно пренебречь. В элементах открытого поперечного сечения, таких как двутавр, влиянием кручения Сен-Венана также можно пренебречь.

Для случая совместного действия усилия сдвига и крутящего момента в п. 6.2.7(9) определено расчетное (редуцированное) пластическое сопротивление поперечного сечения сдвигу $V_{pl,T,Rd}$, и его значение должно быть больше, чем расчетное перерезывающее усилие V_{Ed} .

Значение $V_{pl,T,Rd}$ можно получить с помощью следующих формул:

— для двутавров

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} \cdot V_{pl,Rd}; \quad (6.26)$$

— для швеллеров

$$V_{pl,T,Rd} = \left[\sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} - \frac{\tau_{w,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} \right] \cdot V_{pl,Rd}; \quad (6.27)$$

— для замкнутых сечений

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} \right] \cdot V_{pl,Rd}; \quad (6.28)$$

где $V_{pl,Rd}$ определяют по 6.2.6.

Для случая совместного действия усилия сдвига и крутящего момента в п. 6.2.7(9) определено расчетное (редуцированное) пластическое сопротивление поперечного сечения сдвигу $V_{pl,T,Rd}$, и его значение должно быть больше, чем расчетное перерезывающее усилие V_{Ed} .

Значение $V_{pl,T,Rd}$ можно получить с помощью следующих формул:

— для двутавров

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} \cdot V_{pl,Rd}; \quad (6.26)$$

— для швеллеров

$$V_{pl,T,Rd} = \left[\sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} - \frac{\tau_{w,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} \right] \cdot V_{pl,Rd}; \quad (6.27)$$

— для замкнутых сечений

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} \right] \cdot V_{pl,Rd}, \quad (6.28)$$

где $V_{pl,Rd}$ определяют по 6.2.6.