

**Основные положения расчета железобетонных элементов
на действие поперечных сил
по СНБ 5.03-01-02 и ТКП EN 1992-1-1-2009**

Лалов Д.В., Семижон А.С.

(Научный руководитель – Шилов А.Е.)

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Расчет на действие поперечных сил является неотъемлемой частью при проектировании железобетонных конструкций. Поэтому с течением времени разрабатываются новые и совершенствуются старые методы расчета. На сегодняшний момент в Республике Беларусь действует два нормативных документа по расчету железобетонных конструкций: СНБ 5.03-01-02 и ТКП EN 1992-1-1-2009. Каждый из них предоставляет методы расчета на действие поперечных сил.

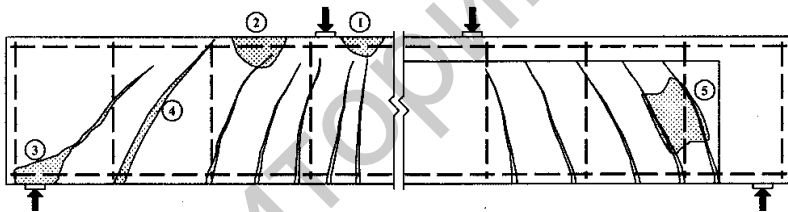


Рисунок 1. Разрушение изгибаемой балки по наклонному сечению

Разрушение изгибаемой балки по наклонному сечению может происходить по одной из следующих форм:

Форма I. По сжатой зоне (1,2 рис. 1).

Форма II. Разрушение по растянутой зоне. (3, рис. 1)

Форма III. Разрушение по диагональной наклонной трещине. (4, рис. 1).

Форма IV. Разрушение по наклонной сжатой полосе бетона между наклонными трещинами. (5, рис. 1).

Согласно этим формам, на которых основаны методы расчета по прочности наклонных сечений, существует несколько упрощенных моделей, среди которых:

а) общая деформационная модель для наклонных сечений;

б) модель «ферменной аналогии»;

в) модель наклонных сечений.

Отметим, что метод наклонных сечений приведен только в СНБ. В ТКП EN 1992-1-1-2009 метод не используется. Примечательным является и то, что в большинстве случаев именно этот метод используется белорусскими проектировщиками.

Расчет железобетонных элементов по прочности на действие поперечных сил при отсутствии вертикальной и (или) наклонной (отогнутой) арматуры, производится из условия: $V_{sd} \leq V_{Rd,ct}$, где расчетная поперечная сила $V_{Rd,ct}$ по СНБ 5.03.01-02 [1] определяется:

$$V_{Rd,ct} = \left[0,12k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{2}{3}} - 0,15\sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d.$$

По ТКП EN-1992-1-1 [2] расчетное значение сопротивления поперечной силе определяется по формуле:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{2}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d, \text{ где } k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,$$

d – в мм; $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$, $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c > (-0,2f_{cd})$, МПа по [1]

и $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2f_{cd}$, по [2].

Продольная сила в поперечном сечении от воздействия нагрузки или предварительного напряжения по [1] $N_{Ed} < 0$, по [2] $N_{Ed} > 0$. Коэффициент $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$ по национальному приложению РБ. В нормативном документе [2] k_1 рекомендуется принимать равным 0.15, в СНБ коэффициент принят с обратным знаком и равен -0.15 .

Минимальные значения $V_{Rd,ct,min} = [0,4f_{ctd} - 0,15\sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$ [1]

и $V_{Rd,c} = [v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$ [2] отличаются значениями $0.4f_{ctd}$ и v_{min} , которое определяется по формуле (6.3N) [2]:

$$v_{min} = 0,035k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}.$$

Для однопролетных предварительно напряженных элементов без поперечной арматуры сопротивление поперечной силе в зонах, которые не имеют трещин вследствие изгиба, необходимо ограничить пределом прочности бетона при растяжении. Для таких сечений со-

противление поперечной силе рассчитывается следующим образом:

$$V_{rd,c} = \frac{I b_w}{s} \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}}$$

где σ_{cp} – средние сжимающие напряжения, вызванные действием продольного усилия от нагрузки или усилием предварительного напряжения. Расчет ведется по формулам:

– в СНБ $\sigma_{cp} = (N_{Ed} - A_s \cdot f_{yd}) / A_c$;

– в ТКП EN $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$

Таким образом, при сравнении формул замечаем, что в источнике 2 не учитывается напряжение, воспринимаемое арматурой.

В нормативных документах указано, что, если расчетное сечение располагается на расстоянии $0,5d \leq x(a_v [2]) < 2d$ от грани опоры, его прочность на действие перерезывающей силы следует проверять по формуле: $V_{rd,ct} = \left[0,12k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{2d}{x}\right) - 0,15\sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d$, не превышающим $V_{rd,ct,max} = 0,5b_w \cdot d \cdot v \cdot f_{ctd}$.

Обратим внимание, что в [2] вводится коэффициент $\beta = a_v/2d$. Данное понижение может применено при определении V_{Ed} . Таким образом, перенеся коэффициент в часть с расчетным значением поперечной силы, получим следующую формулу:

$$V_{rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \cdot \left(\frac{2d}{a_v}\right)$$

Расчет железобетонных элементов конструкций с поперечной арматурой по ТКП EN 1992-1-1-2009 основывается на ферменной модели (рис. 2).

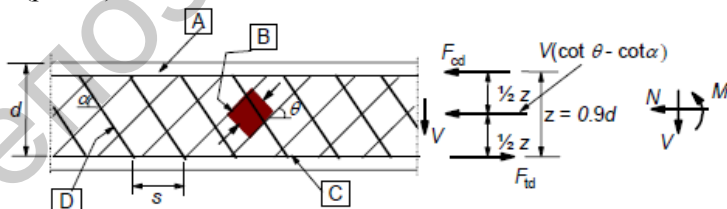


Рисунок 2. Расчет железобетонных элементов конструкций с поперечной арматурой по ТКП EN 1992-1-1-2009

Модель представляет собой ферму, состоящую из верхнего сжатого А и нижнего растянутого С поясов, воспринимающих соответ-

ственно равнодействующую сжимающих и растягивающих напряжений в арматуре. Пояса соединены сжатыми бетонными В и растянутыми D подкосами, которые представляют поперечную арматуру.

Согласно нормам [2] расчет следует производить из условия: $V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$, где V_{Ed} – расчетное значение поперечного усилия, $V_{Rd,s}$ – расчетная поперечная сила, воспринимаемая сечением.

Для элементов с вертикальной поперечной арматурой V_{Rd} принимается как меньшее из значений, рассчитанных по формулам:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z f_{yw} \cot \theta;$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta},$$

где A_{sw} – площадь сечения поперечной арматуры, s – расстояние между хомутами, v_1 – коэффициент понижения прочности бетона, учитывающий влияние наклонных трещин.

Если расчетное значение напряжения в поперечной арматуре – менее $0,8f_{ck}$, то значение v_1 может быть определено:

$$v_1 = 0,6 \quad \text{для } f_{ck} \leq 60 \text{ МПа,}$$

$$v_1 = 0,9 - f_{ck}/200 > 0,5 \quad \text{для } f_{ck} \geq 60 \text{ МПа.}$$

Рекомендуемое значение α_{cw} по нормам [2] принимается следующим:

– для конструкций без предварительного напряжения;

$$1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \quad \text{для } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25f_{cd};$$

$$1,25 \quad \text{для } 0,25f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5f_{cd};$$

$$2,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \quad \text{для } 0,5f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0f_{cd}.$$

где σ_{cp} – среднее сжимающее напряжение в бетоне с положительным знаком от расчетного значения продольной силы. Данная модель практически эквивалентна расчёту железобетонных элементов по прочности на основе стержневой модели источника [1].

Расчет на действие поперечной силы для обеспечения прочности по наклонной трещине

Проверку прочности железобетонных элементов на действие поперечной силы на основе модели наклонных сечений производят

по сжатой и растянутой зонам наклонного сечения трещины независимо друг от друга.

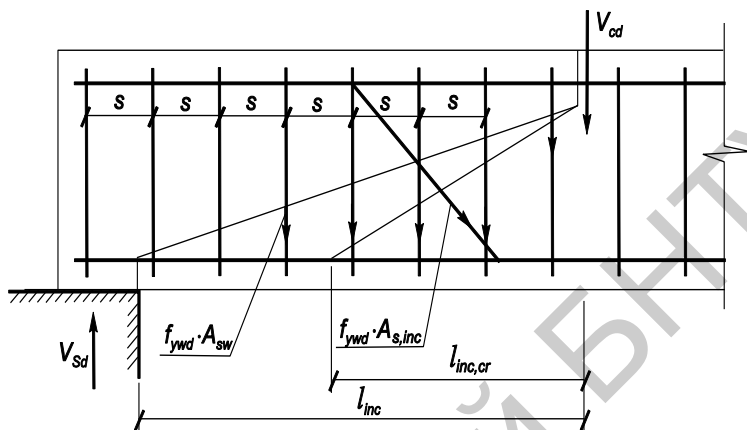


Рисунок 3. Схема к определению прочности сечений, наклонных к продольной оси/ на действие поперечной силы

Расчет железобетонных элементов с поперечной арматурой на действие поперечной силы (рис. 3) для обеспечения прочности по наклонной трещине должен производиться по наиболее опасному наклонному сечению исходя из условия $V_{Sd} \leq V_{Rd}$, где V_{Rd} – поперечное усилие, воспринимаемое наклонным сечением. $V_{Rd} = V_{cd} + V_{sw} + V_{s,inc}$. Здесь V_{cd} – поперечное усилие, воспринимаемое бетоном над вершиной наклонной трещины; V_{sw} – сумма проекций на нормаль к продольной оси элемента предельных усилий в поперечных стержнях (хомутах), пересекающих опасную наклонную трещину; $V_{s,inc}$ – сумма проекций на нормаль к продольной оси элемента предельных усилий в отгибах, пересекающих опасную наклонную трещину.

Поперечное усилие V_{cd} , воспринимаемое бетоном, определяется по формуле:

$$V_{cd} = \frac{\eta_{c2} \cdot (1 + \eta_f + \eta_N) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d^2}{l_{inc}},$$

где l_{inc} – длина проекции наиболее опасного наклонного сечения на продольную ось элемента; η_{c2} – коэффициент, учитываю-

щий влияние вида бетона ($\eta_{c2} = 2,0$ – для тяжелого, $\eta_{c2} = 1,7$ – мелкозернистого бетона); η_f – коэффициент, учитывающий влияние сжатых полок в тавровых и двутавровых элементах. Коэффициент η_N учитывает влияние продольных сил. Положительное влияние продольных сжимающих сил не учитывается, если они создают изгибающие моменты, одинаковые по знаку с моментами от действия поперечной нагрузки. Однако при действии продольных растягивающих сил значение коэффициента η_f принимается по формуле: $\eta_f = -0,2 \frac{N_{sd}}{f_{ctd} \cdot b_w \cdot d} \leq 0,8$.

Для предварительно напряженных элементов в формулу вместо N_{sd} подставляется усилие предварительного обжатия N_{pd} . Значение $(1 + \eta_f + \eta_N)$ во всех случаях принимать не более 1,5. При этом $V_{cd} \geq \eta_{c3} \cdot (1 + \eta_f + \eta_N) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$.

Длина $l_{inc,cr}$ проекции опасной наклонной трещины на продольную ось элемента определяется из минимума выражения $(V_{cd} + V_{sw} + V_{s,inc})$, где в формулу при определении значения V_{cd} вместо l_{inc} подставляется $l_{inc,cr}$. Полученное значение $l_{inc,cr}$ принимается не более $2d$ и не более значения l_{inc} , а также не менее d , если $l_{inc} > d$.

Для элементов с поперечной арматурой в виде хомутов, нормальных к продольной оси элемента и имеющих постоянный шаг в пределах рассматриваемого наклонного сечения, значение $l_{inc,cr}$ соответствует минимуму выражения $(V_{cd} + V_{sw})$ и определяется по

формуле: $l_{inc,cr} = \frac{\sqrt{\eta_{c2} \cdot (1 + \eta_f + \eta_N) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d^2}}{v_{sw}}$, где v_{sw} – усилие в хомутах на единицу длины элемента.

Для таких элементов поперечное усилие V_{sw} определяется по формуле: $V_{sw} = v_{sw} \cdot l_{inc,cr}$. При этом для хомутов, устанавливаемых по расчету, должно выполняться условие: $v_{sw} = \frac{\eta_{c3} \cdot (1 + \eta_f + \eta_N) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d}{2}$

При расчете железобетонных элементов с поперечной арматурой должна быть обеспечена прочность по наклонной полосе между наклонными трещинами по формуле: $V_{sd} \leq V_{Rd,max}$, где $V_{Rd,max} = 0,3 \eta_{wl} \cdot \eta_{cl} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$. Коэффициент η_{wl} учитывает влияние хомутов, нормальных к продольной оси элемента.

Резюмируя, отметим: разрушение по наклонному сечению может происходить по одной из 4 форм, которые легли в основу методов расчёта. Большинство таких расчётов выполняется с применением модели наклонных сечений, которая отсутствует в источнике [2].

Таким образом, рассмотрев методы расчета железобетонных элементов на действие поперечных сил, можем сделать вывод, что нормативный источник [1] дает большую свободу инженерам при проектирования конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНБ 5.03.01-02. «Бетонные и железобетонные конструкции».- Мн.: Стройтехнорм, 2003г. – 274 с.
2. ТКП EN 1992-1-1-2009, «Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций». – Мн.:Стройтехнорм, 2010 г. – 208с.
3. «Железобетонные конструкции. Основы теории, расчёта и конструирования» (под ред. Пецольда Т.М. и Тура В.В.). – Брест: изд. БГТУ, 2003 – 380 с.