



# Определение кривизны железобетонных элементов.

Для элементов **без предварительного напряжения** полную кривизну определяют по формуле:

- для участков **без трещин** в растянутой зоне

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 + \left(\frac{1}{r}\right)_2$$

где  $(1/r)_1$  и  $(1/r)_2$  – кривизны соответственно от непродолжительного действия кратковременных нагрузок и от продолжительного действия постоянных и временных нагрузок

- для участков **с трещинами**

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 - \left(\frac{1}{r}\right)_2 + \left(\frac{1}{r}\right)_3$$

где:

$(1/r)_1$  – кривизна от непродолжительного действия всех нагрузок, на которые производят расчет по деформациям;

$(1/r)_2$  – кривизна от непродолжительного действия постоянных и длительных нагрузок;

$(1/r)_3$  – кривизна от продолжительного действия постоянных и длительных нагрузок.

Для **предварительно напряженных** элементов полную кривизну определяют по формуле:

- для участков **без трещин** в растянутой зоне:

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 + \left(\frac{1}{r}\right)_2 - \left(\frac{1}{r}\right)_3$$

где  $(1/r)_1$  и  $(1/r)_2$  – кривизны соответственно от непродолжительного действия кратковременных нагрузок и от продолжительного действия постоянных и длительных нагрузок.

$(1/r)_3$  – кривизна от непродолжительного действия усилия предварительного обжатия  $P$  (т.е. при действии  $M = P \cdot e_{op}$ ).

- для участков **с трещинами**

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 - \left(\frac{1}{r}\right)_2 + \left(\frac{1}{r}\right)_3$$

где  $(1/r)_1$  – кривизна от непродолжительного действия всех нагрузок, на которые производят расчет по деформациям;

$(1/r)_2$  – кривизна от непродолжительного действия постоянных и длительных нагрузок;

$(1/r)_3$  – кривизна от продолжительного действия постоянных и длительных нагрузок.

На участках элемента **без трещин** кривизну определяют как для сплошного приведенного сечения в стадии I напряженно-деформированного состояния:

$$\chi = \frac{1}{r} = \frac{M}{B_{np}}$$

где  $B_{np}$  – жесткость приведенного сечения (при продолжительном действии нагрузки с учетом ползучести бетона).

$$B_{np} = E_{b1} \cdot I_{red}$$

$I_{red}$  – момент инерции приведенного поперечного сечения, включающего в себя площадь поперечного сечения только сжатой зоны бетона и площади сечения сжатой и растянутой арматуры, умноженные на коэффициент приведения арматуры к бетону

$$\alpha_{sl} = \frac{E_s}{E_{b,red}}$$

$E_{b1}$  – модуль деформации сжатого бетона



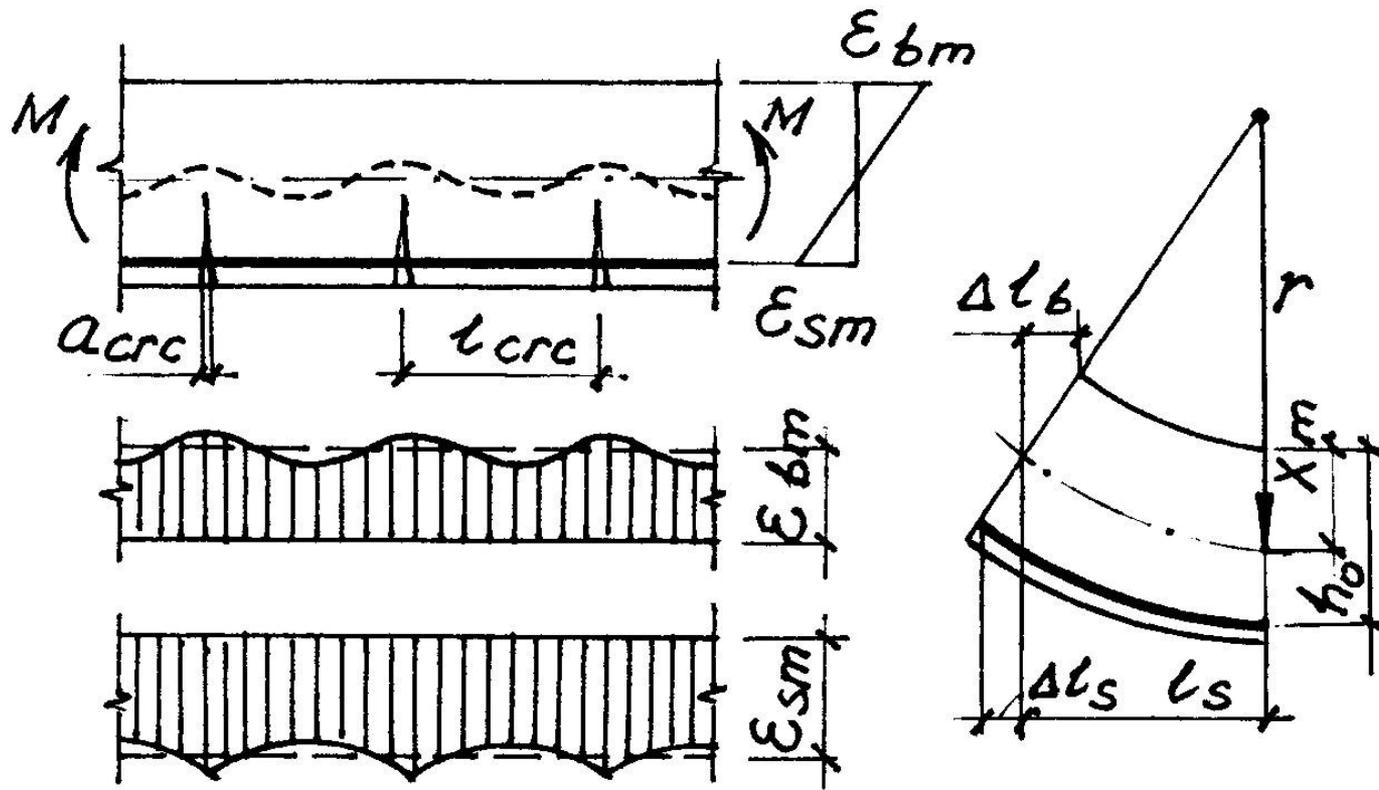
при непродолжительном действии нагрузки

при продолжительном действии нагрузки

$$E_{b1} = 0.85 \cdot E_b$$

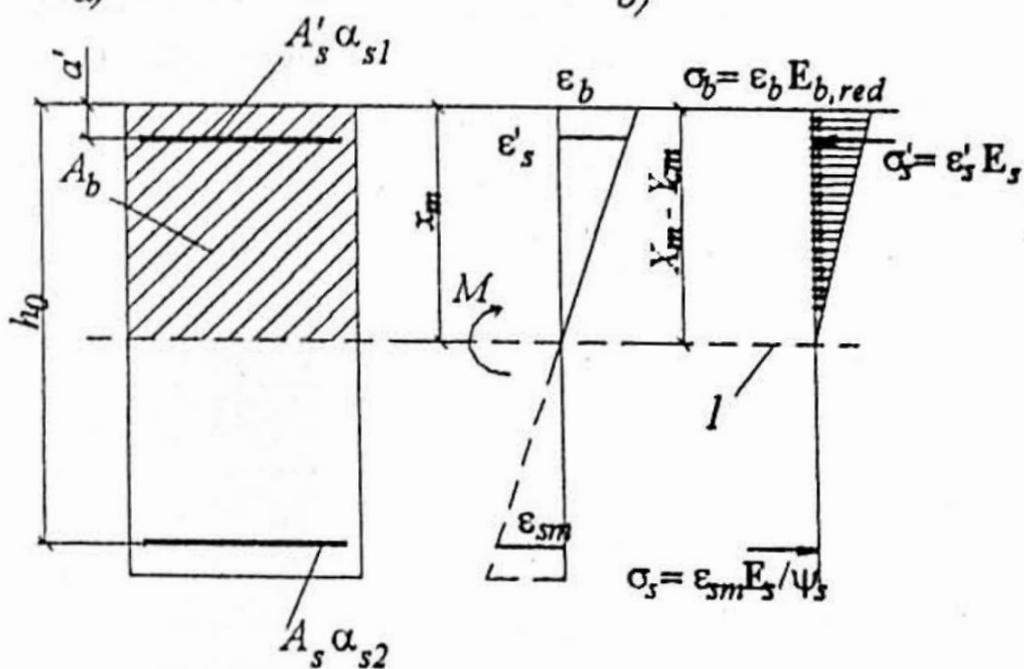
$$E_{b1} = \frac{E_b}{1 + \phi_{b,cr}}$$

$\phi_{b,cr}$  - коэффициент ползучести бетона



На участках, где образуются **нормальные трещины**, элемент работает в **стадии II**. Общее деформированное состояние определяют через **средние** деформации бетона, **средние** деформации арматуры и для **среднего** положения нейтральной оси.

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E_{b,red} \cdot I_{red}}$$



Приведенное поперечное сечение (а) и схема напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента с трещинами при расчете его по деформациям (б)

$I$  – уровень центра тяжести приведенного сечения

$I_{red}$  – момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести.

Определяется по общим правилам сопротивления упругих материалов. Учитывается площадь поперечного сечения **только сжатой зоны бетона** и площади сечения сжатой арматуры с коэффициентом приведения  $\alpha_{s1}$  и растянутой арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону  $\alpha_{s2}$ .

$$I_{red} = I_b + I_s \cdot \alpha_{s2} + I'_s \cdot \alpha_{s1}$$

$I_b, I_s, I'_s$  - моменты инерции площадей сечения соответственно сжатой зоны бетона, растянутой и сжатой арматуры относительно центра тяжести приведенного без учета бетона растянутой зоны поперечного сечения.

Высоту сжатой зоны бетона определяют из решения уравнения:

$$S_b = \alpha_{s2} \cdot S_s - \alpha_{s1} \cdot S'_s$$

где  $S_b, S_s$  и  $S'_s$  – статические моменты соответственно сжатой зоны бетона, площадей растянутой и сжатой арматуры относительно нейтральной оси.

Для прямоугольных тавровых и двутавровых сечений высоту сжатой зоны можно определить по формуле:

$$x = h_0 \cdot \left[ \sqrt{z^2 + 2 \cdot \left( \mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1} \cdot \frac{a'}{h_0} + \mu'_f \cdot \frac{h'_f}{2 \cdot h_0} \right)} - z \right]$$

где  $z = \mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1} + \mu'_f$        $\mu_s = \frac{A_s}{b \cdot h_0}$ ;       $\mu'_s = \frac{A'_s}{b \cdot h_0}$ ;       $\mu'_f = \frac{(b'_f - b) \cdot h'_f}{b \cdot h_0}$

$E_{b,red}$  – приведенный модуль деформации сжатого бетона, принимаемый равным:

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,ser}}{\varepsilon_{b1,red}}$$

Значения коэффициентов приведения для **сжатой** арматуры :  $\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}}$ ;

Для **растянутой** арматуры  $\alpha_{s2} = \frac{E_s}{\psi_s \cdot E_{b,red}}$ ;

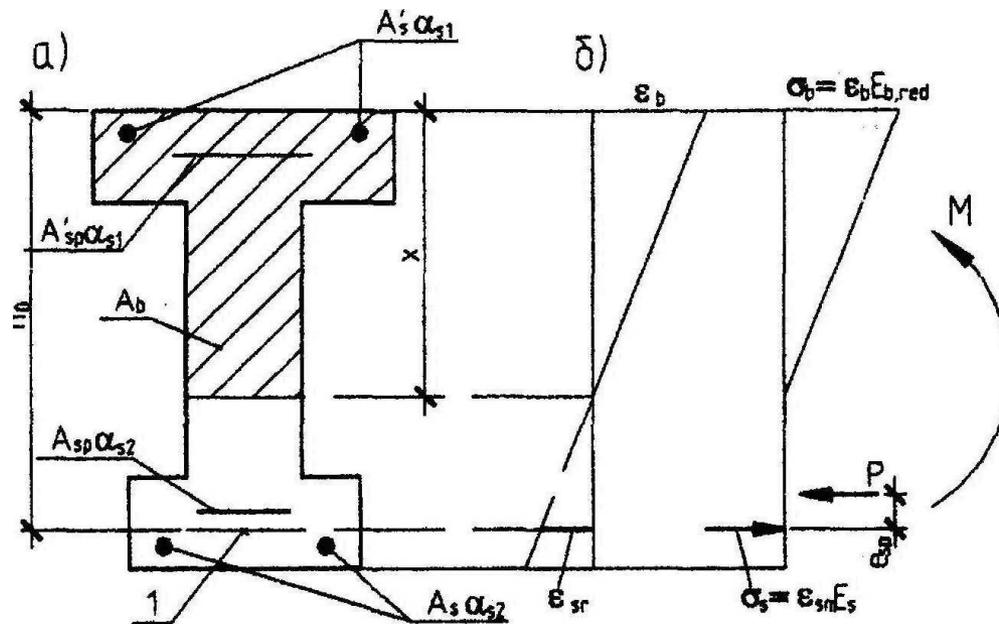
$\psi_s$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами.

Можно определять эти коэффициенты приведения по упрощенным формулам:

$$\alpha_{s2} = \frac{\alpha_{s1}}{\psi_s};$$

$\alpha_{s1} = \frac{300}{R_{b,ser}}$  - при непродолжительном действии нагрузки;

$\alpha_{s1} = \frac{560}{R_{b,ser}}$  - при продолжительном действии нагрузки и нормальной влажности окружающего воздуха ( $w = 40...75\%$ );



Приведенное поперечное сечение (а) и схема напряженно деформированного состояния изгибаемого предварительно напряженного элемента с трещинами (б) при расчете его по деформациям  
 1 - центр тяжести арматуры растянутой зоны

Для **предварительно напряженных** элементов полную кривизну определяют по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M - P \cdot e_{op}}{D}$$

где  $M$  - изгибающий момент от внешней нагрузки;

$P$  и  $e_{op}$  - усилие предварительного обжатия и его эксцентриситет относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$D$  - изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента, определяемая как для внецентренно сжатого усилием предварительного обжатия элемента с учетом изгибающего момента от внешней нагрузки.

Для прямоугольных, тавровых и двутавровых элементов без предварительного напряжения можно проводить расчет по упрощенной формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M - \phi_2 b h^2 R_{bt,ser}}{\phi_1 E_s A_s h_0^2}$$

$\phi_1$  - определяется по табл. 4.5 Пособия к СП 63.13330.2012 в зависимости от величин:

$$\mu \alpha_{s1} = \frac{A_s}{b h_0} \alpha_{s1}; \mu'_f = \frac{(b'_f - b) h'_f}{b h_0} + \frac{A'_s}{b h_0} \alpha_{s1}$$

$\phi_2$  - определяется по табл. 4.6 Пособия к СП 63.13330.2012 в зависимости от величин:

$$\mu \alpha_{s1} = \frac{A_s}{b h_0} \alpha_{s1}; \mu'_f = \frac{(b'_f - b) h'_f}{b h_0} + \frac{A'_s}{b h_0} \alpha_{s1}; \mu_f = \frac{(b_f - b)}{b h} h_f; \alpha_{s1} = \frac{300}{R_{bn}}$$

Полная кривизна:

$$\frac{1}{r} = \frac{P}{S_{red} \cdot E_{b,red}}$$

где  $S_{red}$  – статический момент приведенного поперечного сечения относительно **нейтральной оси**

$E_{b,red}$  – приведенный модуль деформации сжатого бетона, который вычисляется как для элементов без предварительного напряжения.

Высоту сжатой зоны  $x$  определяют из решения уравнения:

$$\frac{I_{red}}{S_{red}} = \frac{M}{P} \pm e_{sp} - (h_0 - x)$$

где  $I_{red}$  – момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его **нейтральной оси**,

$e_{sp}$  – расстояние от точки приложения усилия обжатия  $P$  до центра тяжести растянутой арматуры

Для **прямоугольных, тавровых и двутавровых** элементов можно проводить расчет по упрощенной формуле при:

$$h'_f \leq 0.3 \cdot h \quad \text{и} \quad a'_s < 0.2 \cdot h_0$$

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{\varphi_c \cdot b \cdot h_0^3 \cdot E_{b,red}}$$

Коэффициент  $\varphi_c$  определяется в зависимости от  $\varphi_f$ ,  $\mu \cdot \alpha_{s2}$ ,  $e_s/h$

$$e_s = \frac{M}{P} \pm e_{sp}$$

$$\mu = \frac{A_s + A_{sp}}{b \cdot h_0};$$

$$\delta = 0.5 \cdot \frac{h'_f}{h_0};$$

$$\varphi_f = \frac{(b'_f - b) \cdot h'_f + (A'_{sp} + A_s) \cdot \alpha_{s1}}{b \cdot h_0}$$