

# РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ ВТОРОЙ ГРУППЫ

## РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАСКРЫТИЮ ТРЕЩИН

Расчет железобетонных элементов производят по непродолжительному раскрытию трещин и продолжительному раскрытию трещин.

Непродолжительное раскрытие трещин определяют от совместного действия постоянных и временных (длительных и кратковременных) нагрузок;

Продолжительные - только от постоянных и временных длительных нагрузок.

# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАСКРЫТИЮ ТРЕЩИН

Расчет по раскрытию трещин производят из условия

$$a_{crc} \leq a_{crc,ult}$$

где  $a_{crc}$  - ширина раскрытия трещин от действия внешней нагрузки;

$a_{crc,ult}$  - предельно допустимая ширина раскрытия трещин.

# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАСКРЫТИЮ ТРЕЩИН

Значения  $a_{crc,ult}$  принимают равными:

а) из условия сохранности арматуры (для любых конструкций):

0,3 мм - при продолжительном раскрытии трещин;

0,4 мм - при непродолжительном раскрытии трещин;

## РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАСКРЫТИЮ ТРЕЩИН

б) из условия ограничения проницаемости конструкций (для конструкций, подверженных непосредственному давлению жидкостей, газов, сыпучих тел)

0,2 мм - при продолжительном раскрытии трещин;

0,3 мм - при непродолжительном раскрытии трещин.

## РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАСКРЫТИЮ ТРЕЩИН

- Расчет по раскрытию трещин не производится, если соблюдается условие:

$$M \leq M_{crc},$$

где  $M$  - момент от внешней нагрузки относительно оси, нормальной к плоскости действия момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента; при этом учитываются все нагрузки (постоянные и временные) с коэффициентом надежности по нагрузке  $\gamma_f = 1$ ;

$M_{crc}$  - момент, воспринимаемый нормальным сечением элемента при образовании трещин.

Для центрально растянутых элементов условие по образованию трещин:

$$N \leq N_{crc},$$

где  $N_{crc}$  - продольное растягивающее усилие, воспринимаемое элементом при образовании трещин.

## ***ЦЕНТРАЛЬНО-РАСТЯНУТЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ***

Усилие  $N_{crc}$  при образовании трещин в центрально растянутых элементах определяют по формуле:

$$N_{crc} = R_{bt,ser} A + 20 A_s,$$

где  $20(МПа)$  - напряжение во всей арматуре перед образованием трещин в бетоне.

Относительная деформация бетона  $\varepsilon_{bt,max}$  равна:

$$\varepsilon_{bt,ult} = \left( 15 - 5 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) \cdot 10^{-5},$$

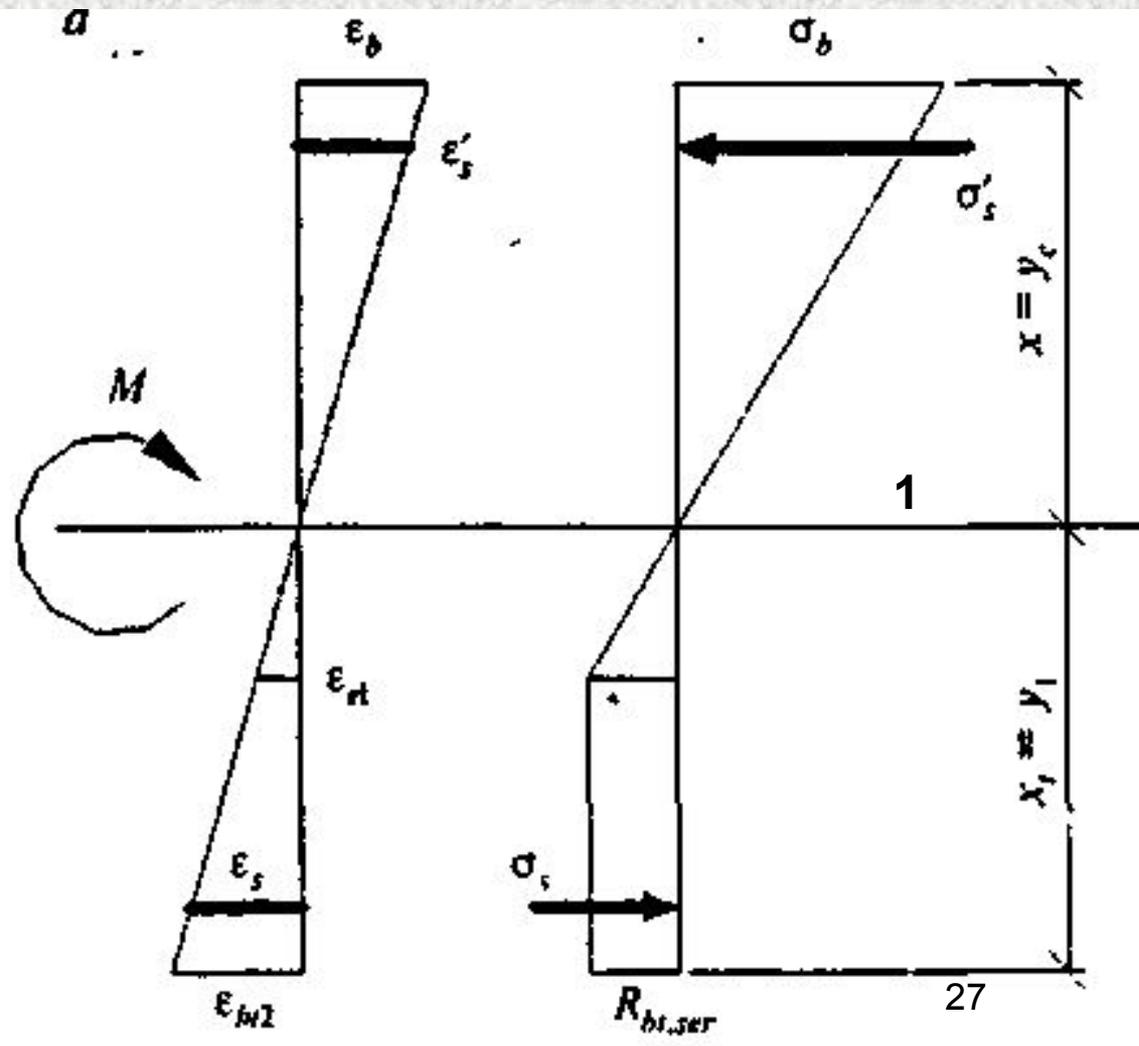
где при  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$   $\varepsilon_{bt,ult} = 10 \cdot 10^{-5} = 10^{-4}$ ,

$\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – деформации бетона

на противоположных сторонах сечения.

$$\sigma_s = \varepsilon_{bt,ult} \cdot E_s = 10^{-4} \cdot 20 \cdot 10^4 = 20 \text{ МПа}.$$

# РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН



1 - уровень центра тяжести приведенного поперечного сечения

Схема напряженно-деформированного состояния сечения элемента при действии изгибающего момента  $M$

# РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН

$$M \leq M_{cr},$$

Изгибающий момент  $M_{cr}$  при образовании трещин определяется на основе деформационной модели с учетом неупругих деформаций растянутого бетона.

Допускается определять момент  $M_{crc}$  без учета неупругих деформаций бетона как для сплошного упругого тела по формуле:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W,$$

Если  $a_{crc} > a_{crc,ult}$ , то момент образования трещин следует определять с учетом неупругих деформаций бетона.

$W$  - момент сопротивления приведенного сечения для крайнего растянутого волокна бетона:

$$W = \frac{I_{red}}{y_t},$$

где  $I_{red}$  – момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести :

$$I_{red} = I + I_s \alpha + I'_s \alpha,$$

где  $I, I_s, I'_s$  – моменты инерции соответственно бетона, растянутой и сжатой арматуры;

$\alpha = E_s / E_b$  – коэффициент приведения арматуры к бетону;

$y_t$  – расстояние от наиболее растянутого волокна бетона до центра тяжести приведенного сечения элемента.

*Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани элемента*

$$y_t = S_{red} / A_{red} ,$$

*где  $S_{red}$  – статический момент полного приведенного поперечного сечения относительно растянутой грани;*

*$A_{red}$  – площадь приведенного сечения;*

$$S_{red} = S + S_s \alpha + S'_s \alpha ,$$

$$A_{red} = A + A_s \alpha + A'_s \alpha ,$$

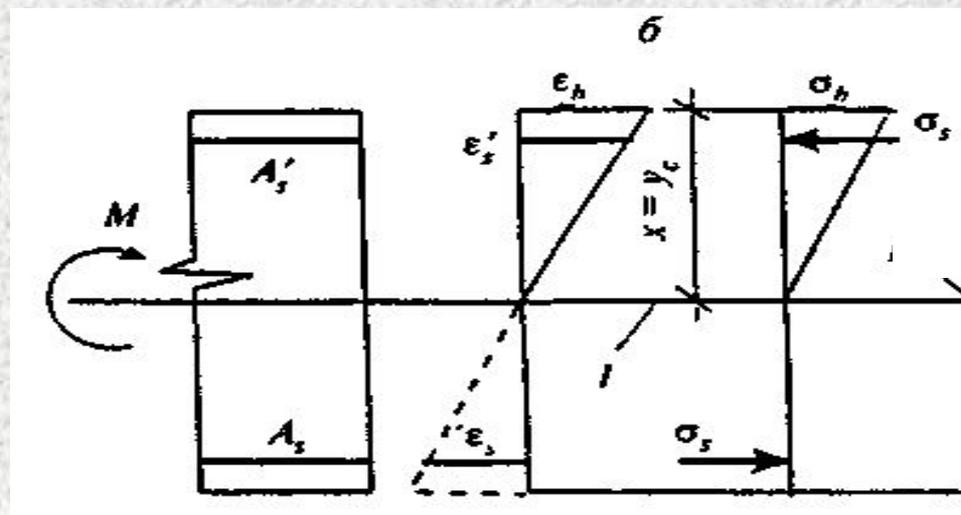
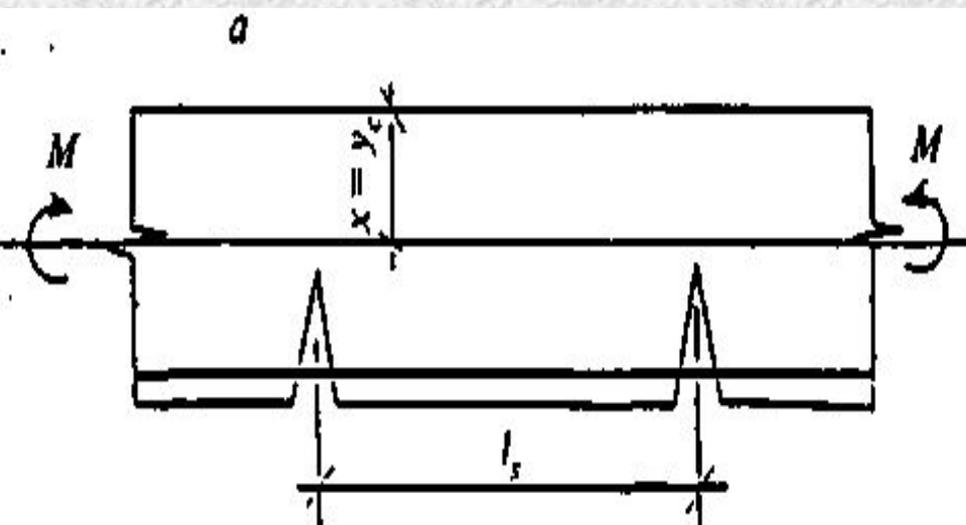
# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН

Для прямоугольных, тавровых и двутавровых сечений при действии момента в плоскости оси симметрии момент образования трещин с учетом неупругих деформаций растянутого бетона допускается определять с заменой значения  $W$  на  $W_{pl} = W\gamma$

Таблица

Сечение	Коэффициент $\gamma$
Прямоугольное	1,30
Тавровое с полкой, расположенной в сжатой зоне	1,30

# Расчет ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента



1- уровень центра тяжести приведенного поперечного сечения

Схема напряженно-деформированного состояния элемента с трещинами при действии изгибающего момента (а, б)

# ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

Ширину раскрытия нормальных трещин определяют по формуле:

$$a_{crc} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_s,$$

где:

$\sigma_s$  – напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки;

$l_s$  – базовое (без учета влияния вида поверхности арматуры) расстояние между смежными нормальными трещинами;

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

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

$\varphi_1$  – коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки:

1,0 – при непродолжительном действии нагрузки;

1,4 – при продолжительном действии нагрузки;

$\varphi_2$  – коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры, принимаемым равным:

0,5 – для арматуры периодического профиля;

0,8 – для гладкой арматуры;

$\varphi_3$  – коэффициент, учитывающий характер нагружения, принимаемым равным:

1,0 – для изгибаемых и внецентренно сжатых;

1,2 – для растянутых элементов.

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s} d_s, \quad 10d_s \leq l_s \leq 100 \text{ мм}, \quad 40d_s \geq l_s \leq 400 \text{ мм},$$

$A_{bt}$  - площадь сечения растянутого бетона.

При этом высота растянутой зоны бетона принимается  $\geq 2a$  и  $\leq 0,5h$ .

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

- Для прямоугольных, тавровых и двутавровых сечений высоту растянутой зоны бетона допускается определять по формуле с учетом указанных ограничений:

$$y = y_t k, \quad y_t = \frac{S_{red}}{A_{red}},$$

— где  $y_t$  - высота растянутой зоны бетона, определяемая как для упругого материала при коэффициенте приведения арматуры к бетону

$$\alpha = E_s / E_b;$$

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

$k$  - поправочный коэффициент, равный:

- для прямоугольных сечений и тавровых с полкой в сжатой зоне - **0,90**;
- для двутавровых (коробчатых) сечений и тавровых с полкой в растянутой зоне - **0,95**.

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

Значение коэффициента  $\psi_s$  определяют по формуле

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{\sigma_{s,crc}}{\sigma_s},$$

где  $\sigma_{s,crc}$  - напряжение в продольной растянутой арматуре в сечении сразу после образования нормальных трещин.

Если  $\sigma_{s,crc} > \sigma_s$  принимают  $\psi_s = 0,2$ .

Для изгибаемых элементов значение коэффициента  $\psi_s$  допускается определять по формуле:

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}}{M} \geq 0,2.$$

# ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

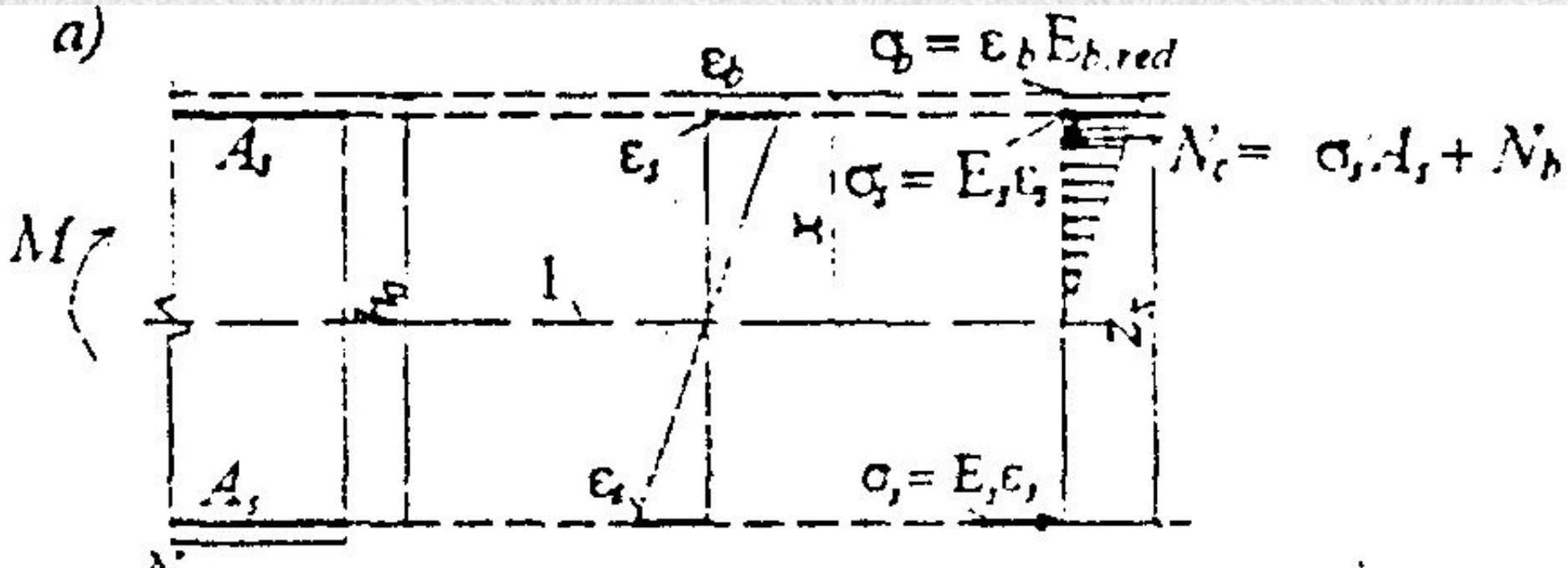


Рис. Схемы напряженно-деформированного состояния элементов с трещинами при действии: изгибающего момента (а)  
 1 - уровень центра тяжести приведенного сечения

# ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

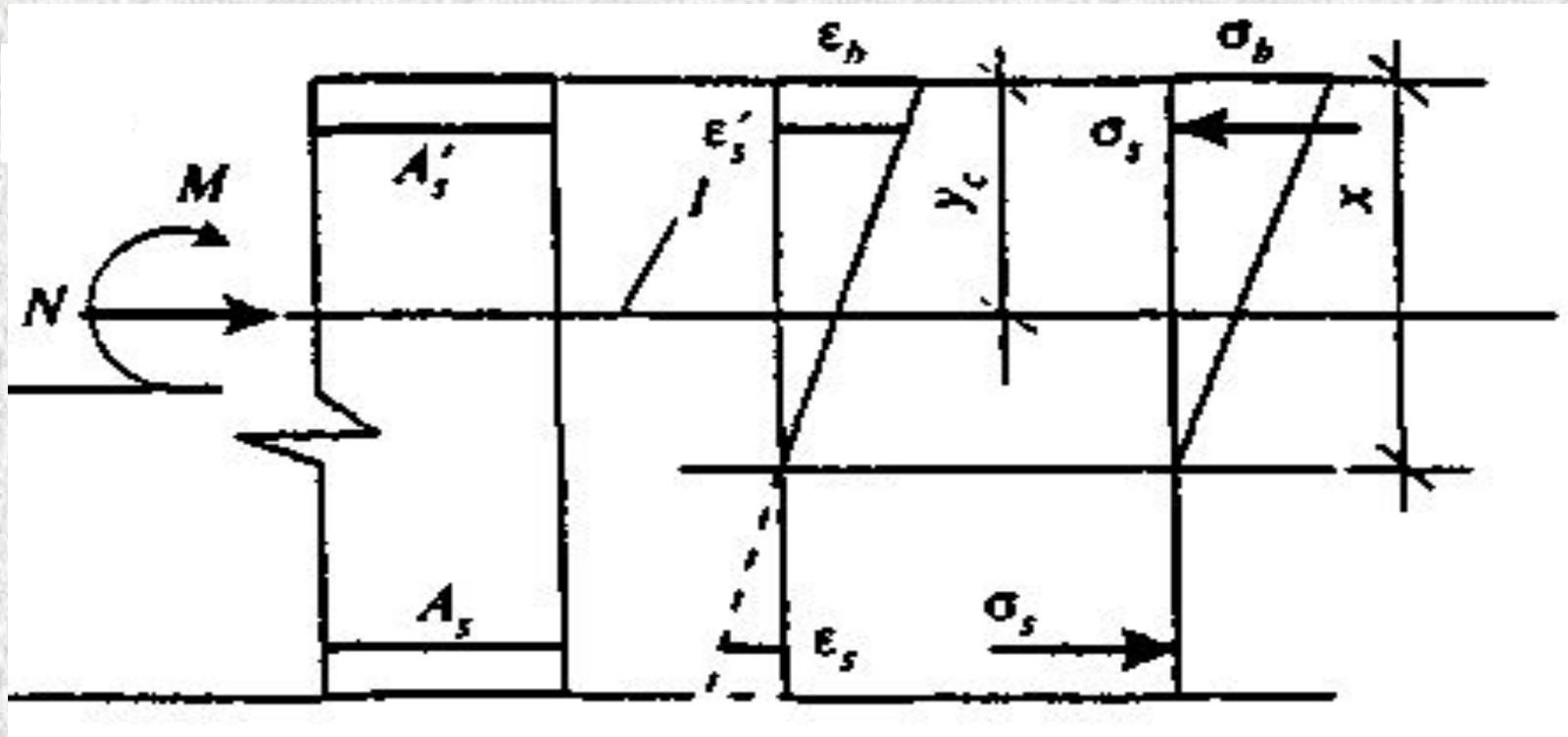


Рис. Схемы напряженно-деформированного состояния элементов с трещинами при действии: внецентренного сжатия  
*I* -уровень центра тяжести приведенного сечения

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

Для центрально растянутых элементов значение коэффициента  $\sigma_s$  определяют по формуле

$$\sigma_s = \frac{N}{A_s},$$

Значение напряжения  $\sigma_s$  в растянутой арматуре изгибаемых элементов определяют по формуле

$$\sigma_s = \frac{M(h_0 - x)}{I_{red}} \alpha_{s1}, \quad \alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}},$$

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,ser}}{\varepsilon_{b1,red}}, \quad \varepsilon_{b1,red} = 15 \cdot 10^{-4}$$

$I_{red}$ ,  $x$  – момент инерции и высота сжатой зоны приведенного поперечного сечения, определяемые с учетом площади сечения только сжатой зоны бетона, площадей сечения растянутой и сжатой арматуры (при  $\alpha_{s2} = \alpha_{s1}$ )

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

Высота сжатой зоны определяется из решения уравнения:

$$S_b = \alpha_{s1} (S_s - S'_s),$$

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

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЭЛЕМЕНТА

Для тавровых, сечений высоту сжатой зоны определяют по формуле:

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

$$\text{где } z = \mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu'_f;$$

$$\mu_s = \frac{A_s}{bh_0}; \quad \mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0}; \quad \mu_f = \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0}.$$

Для сжатой арматуры

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}}$$

Для растянутой арматуры

$$\alpha_{s2} = \frac{E_{s,red}}{E_{b,red}}, \quad E_{s,red} = \frac{E_s}{\psi_s}$$

# РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ДЕФОРМАЦИЯМ

Расчет по деформациям следует производить на действие:

- постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок при ограничении деформаций технологическими или конструктивными требованиями;
- постоянных и временных длительных нагрузок при ограничении деформаций эстетическими требованиями.

# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ПРОГИБАМ

Расчет железобетонных элементов по прогибам производят из условия:

$$f \leq f_{ult},$$

где  $f$  - прогиб железобетонного элемента от действия внешней нагрузки;

$f_{ult}$  - значение предельно допустимого прогиба железобетонного элемента.

Прогибы железобетонных конструкций определяют по общим правилам строительной механики в зависимости от изгибных, сдвиговых и осевых деформационных характеристик железобетонного элемента в сечениях по его длине (кривизн, углов сдвига и т.д.).

В тех случаях, когда прогибы железобетонных элементов в основном зависят от изгибных деформаций, значения прогибов определяют по жесткостным характеристикам.

Для элементов постоянного сечения (плит, однопролетная балка) прогиб определяется в сечении с максимальным моментам по формуле:

$$f = \rho_m l_0^2 \cdot \left(\frac{1}{r}\right),$$

где  $\rho_m$  зависит от расчетной схемы и вида нагрузки;  $\left(\frac{1}{r}\right)$  -

а) для элементов или участков элемента, где в растянутой зоне не образуются нормальные к продольной оси трещины;

б) для элементов или участков элемента, где в растянутой зоне имеются трещины.

Элементы или участки элементов рассматривают без трещин, если трещины не при действии полной нагрузки, включающей постоянную, временную длительную и кратковременную нагрузки.

Кривизну железобетонных элементов с трещинами и без трещин можно также определять на основе деформационной модели.

Полную кривизну изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов определяют по формулам:

для участков без трещин в растянутой зоне

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

где  $\left(\frac{1}{r}\right)_1$ ,  $\left(\frac{1}{r}\right)_2$  - кривизны соответственно от непродолжительного действия кратковременных нагрузок и от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

Полную кривизну изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов определяют по формулам:

для участков с трещинами в растянутой зоне

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

где  $\left(\frac{1}{r}\right)_1$  - кривизна от непродолжительного действия всей нагрузки, на которую производят расчет по деформациям;

$\left(\frac{1}{r}\right)_2$  - кривизна от непродолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок;

$\left(\frac{1}{r}\right)_3$  - кривизна от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

Кривизну железобетонных элементов  $\left(\frac{1}{r}\right)$  от действия соответствующих нагрузок определяют по формуле

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \left(\frac{M}{D}\right),$$

где  $M$  - изгибающий момент от внешней нагрузки (с учетом момента от продольной силы  $N$ ) относительно оси, нормальной плоскости действия изгибающего момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$D$  - изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по формуле

$$D = E_{b1} \cdot I_{red},$$

где  $E_{b1}$  - модуль деформации сжатого бетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки и с учетом наличия или отсутствия трещин;

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Кривизну железобетонных элементов  $\left(\frac{1}{r}\right)$  от действия соответствующих нагрузок определяют по формуле

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \left(\frac{M}{D}\right),$$

где  $M$  - изгибающий момент от внешней нагрузки (с учетом момента от продольной силы  $N$ ) относительно оси, нормальной плоскости действия изгибающего момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$D$  - изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по формуле

$$D = E_{bl} \cdot I_{red},$$

где  $E_{bl}$  - модуль деформации сжатого бетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки и с учетом наличия или отсутствия трещин;

$I_{red}$  - момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести, определяемый с учетом наличия или отсутствия трещин.

## *Жесткость железобетонного элемента на участке без трещин в растянутой зоне*

Жесткость железобетонного элемента  $D$  на участке без трещин определяют по формуле:

$$D = E_{b1} \cdot I_{red}$$

Значения модуля деформации бетона принимают равными:

- при непродолжительном действии нагрузки

$$E_{b1} = 0,85 \cdot E_b,$$

- при продолжительном действии нагрузки

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

$\varphi_{b,cr}$  – характеристика ползучести бетона, принимают по таблице 6.12 СНиП 52-01-2003 АР (2012г.).

## Жесткость железобетонного элемента на участке без трещин в растянутой зоне

Момент инерции  $I_{red}$  приведенного поперечного сечения элемента относительно его центра тяжести определяют как для сплошного тела по общим правилам сопротивления упругих элементов с учетом всей площади сечения бетона и площадей сечения арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону  $\alpha$ .

$$I_{red} = I + I_s \cdot \alpha + I'_s \cdot \alpha,$$

где  $I$  - момент инерции бетонного сечения относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$I_s, I'_s$  - моменты инерции площадей сечения соответственно растянутой и сжатой арматуры относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

## *Жесткость железобетонного элемента на участке без трещин в растянутой зоне*

$\alpha$  - коэффициент приведения арматуры к бетону,

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{b1}}.$$

Значение  $I$  определяют по общим правилам расчета геометрических характеристик сечений упругих элементов.

Допускается определять момент инерции  $I_{red}$  без учета арматуры.

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Жесткость железобетонного элемента на участках с трещинами в растянутой зоне определяют с учетом следующих положений:

- сечения после деформирования остаются плоскими;
- напряжения в бетоне сжатой зоны определяют как для упругого тела;
- работу растянутого бетона в сечении с нормальной трещиной не учитывают;
- работу растянутого бетона на участке между смежными нормальными трещинами учитывают посредством коэффициента  $\psi_s$ .

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Жесткость железобетонного элемента  $D$  на участках с трещинами определяют по формуле

$$D = E_{b1} \cdot I_{red}$$

и принимают не более жесткости без трещин.

Значения модуля деформации сжатого бетона  $E_{b1}$  принимают равными значениям приведенного модуля деформации  $E_{b,red}$ , определяемых по формуле

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

## Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне

Жесткость железобетонного элемента  $D$  на участках с трещинами определяют по формуле

$$D = E_{b1} \cdot I_{red}$$

и принимают не более жесткости без трещин.

Значения модуля деформации сжатого бетона  $E_{b1}$  принимают равными значениям приведенного модуля деформации  $E_{b,red}$ , определяемых по формуле

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

Значения относительных деформаций  $\varepsilon_{b1,red}$  принимают:

для тяжелого бетона при непродолжительном действии нагрузки  $\varepsilon_{b1,red} = 0,0015$ ;

для тяжелого бетона при продолжительном действии нагрузки по таблице 6.10 СНиП 52-01-2003 АР (2012г.).

# Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне

Жесткость железобетонного элемента  $D$  на участках с трещинами определяют по формуле

$$D = E_{b1} \cdot I_{red}$$

и принимают не более жесткости без трещин.

Значения модуля деформации сжатого бетона  $E_{b1}$  принимают равными значениям приведенного модуля деформации  $E_{b,red}$ , определяемых по формуле

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

Значения относительных деформаций  $\varepsilon_{b1,red}$  принимают:

для тяжелого бетона при непродолжительном действии нагрузки  $\varepsilon_{b1,red} = 0,0015$ ;

для тяжелого бетона при продолжительном действии нагрузки по таблице 6.10 СНиП 52-01-2003 АР (2012г.).

Значения  $R_b$ ,  $\varepsilon_{b2}$  принимают как в п.6.1.20 СНиП 52-01-2003 АР (2012г.). при расчетных сопротивления бетона  $R_{b.ser}$  для соответствующих нагрузок (непродолжительного и продолжительного действия).

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Значения относительных деформаций  $\varepsilon_{b2}$  для тяжелого, мелкозернистого и напрягающего бетонов принимают:

при непродолжительном действии нагрузки:

для бетонов класса по прочности на сжатие В60 и ниже  $\varepsilon_{b2} = 0,0035$ ;

для высокопрочных бетонов класса по прочности на сжатие В70-В100  $\varepsilon_{b2}$  принимается по линейному закону от 0,0033 при В70 до 0,0028 при В100;

при продолжительном действии нагрузки - по таблице 6.10 СНиП 52-01-2003 АР (2012г.) .

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента  $I_{red}$  относительно его центра тяжести определяют по общим правилам сопротивления упругих элементов с учетом площади сечения бетона только сжатой зоны, площадей сечения сжатой арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону  $\alpha_{s1}$  и растянутой арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону  $\alpha_{s2}$

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

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента  $I_{red}$  относительно его центра тяжести определяют по общим правилам сопротивления упругих элементов с учетом площади сечения бетона только сжатой зоны, площадей сечения сжатой арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону  $\alpha_{s1}$  и растянутой арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону  $\alpha_{s2}$

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

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

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Значения коэффициентов приведения арматуры к бетону принимают равными:

для сжатой арматуры

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}}$$

для растянутой арматуры

$$\alpha_{s2} = \frac{E_{s,red}}{E_{b,red}}$$

где  $E_{b,red}$  - приведенный модуль деформации сжатого бетона, определяемый по формуле (6.9) при непродолжительном и продолжительном действии

нагрузки, заменяя  $R_b$  на  $R_{b,ser}$

## Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне

Значения коэффициентов приведения арматуры к бетону принимают равными:

для сжатой арматуры

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}}$$

для растянутой арматуры

$$\alpha_{s2} = \frac{E_{s,red}}{E_{b,red}}$$

где  $E_{b,red}$  - приведенный модуль деформации сжатого бетона, определяемый по формуле (6.9) при непродолжительном и продолжительном действии

нагрузки, заменяя  $R_b$  на  $R_{b,ser}$

$E_{s,red}$  - приведенный модуль деформации растянутой арматуры, определяемый с учетом влияния работы растянутого бетона между трещинами по формуле

$$E_{s,red} = \frac{E_s}{\psi_s}$$

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

$E_{s,red}$  - приведенный модуль деформации растянутой арматуры, определяемый с учетом влияния работы растянутого бетона между трещинами по формуле

$$E_{s,red} = \frac{E_s}{\psi_s}$$

Значения коэффициента  $\psi_s$  определяют по формуле

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{M_{crс}}{M}$$

Допускается принимать  $\psi_s = 1$  и, следовательно,  $\alpha_{s2} = \alpha_{s1}$ . А если условие  $f \leq f_{ult}$  не удовлетворяется, расчет производят с учетом коэффициента  $\psi_s$ .

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Значения  $I_s$  и  $I'_s$  определяют по общим правилам сопротивления материалов, принимая расстояние от наиболее сжатого волокна бетона до центра тяжести

приведенного (с коэффициентами приведения  $\alpha_{s1}$  и  $\alpha_{s2}$ ) поперечного сечения без учета бетона растянутой зоны (рисунок 8.19);

для изгибаемых элементов  $y_{cm} = x_m$ ,

где  $x_m$  - средняя высота сжатой зоны бетона, учитывающая влияние работы растянутого бетона между трещинами.

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Значения  $I_b$  и  $y_{cm}$  определяют по общим правилам расчета геометрических характеристик сечений упругих элементов.

Для изгибаемых элементов положение нейтральной оси (средняя высота сжатой зоны бетона) определяют из уравнения

$$S_{b0} = \alpha_{s2}S_{s0} - \alpha_{s1}S'_{s0}$$

где  $S_{b0}$ ,  $S_{s0}$ ,  $S'_{s0}$  - статические моменты соответственно сжатой зоны бетона, растянутой и сжатой арматуры относительно нейтральной оси.

## *Жесткость железобетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне*

Для прямоугольных сечений только с растянутой арматурой высоту сжатой зоны определяют по формуле

$$x_m = h_0 \left( \sqrt{(\mu_s \cdot \alpha_{s2})^2 + 2\mu_s \cdot \alpha_{s2}} - \mu_s \cdot \alpha_{s2} \right),$$

где  $\mu_s = \frac{A_s}{bh_0}$