

# 9. Расчет железобетонных элементов по второй группе предельных состояний

## 9.1. Расчет на образование трещин, нормальных к продольной оси элементов

### 9.1.1. Центрально растянутые элементы

### 9.1.2. Изгибаемые, внецентренно сжатые и внецентренно

### 9.1.2. Изгибаемые, внецентренно сжатые и внецентренно растянутые элементы

### 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

## 9.2. Расчет по деформациям

### 9.2.1. Общие сведения

### 9.2.2. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных

### 9.2.2. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках без трещин

### 9.2.3. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных

## 9.1. Расчет на образование трещин, нормальных к продольной оси элементов

Расчеты по предельным состояниям второй группы включают:

- расчет по образованию трещин;
- расчет по раскрытию трещин;
- расчет по деформациям.

Его производят, когда необходимо обеспечить отсутствие трещин (конструкции, находящиеся под давлением жидкости или газов, испытывающие воздействие радиации и т.п.), а также как вспомогательный при расчете по раскрытию трещин и по деформациям.

Расчет бетонных и железобетонных конструкций по образованию трещин следует производить из условия, по которому усилия, напряжения или деформации в конструкциях от различных воздействий не должны превышать соответствующих их предельных значений, воспринимаемых конструкцией при образовании трещин.

## 9.1.1. Центральные растянутые элементы

Расчет заключается в проверке условия, что трещины в сечениях, нормальных к продольной оси элемента, не образуются, если продольная сила от действия внешней нагрузки  $N$  не превосходит внутреннего продольного усилия в сечении перед образованием трещин  $N_{crc}$ , т. е.  $N \leq N_{crc}$ . Продольное усилие определяют по напряжениям, возникающим в материалах перед образованием трещин.

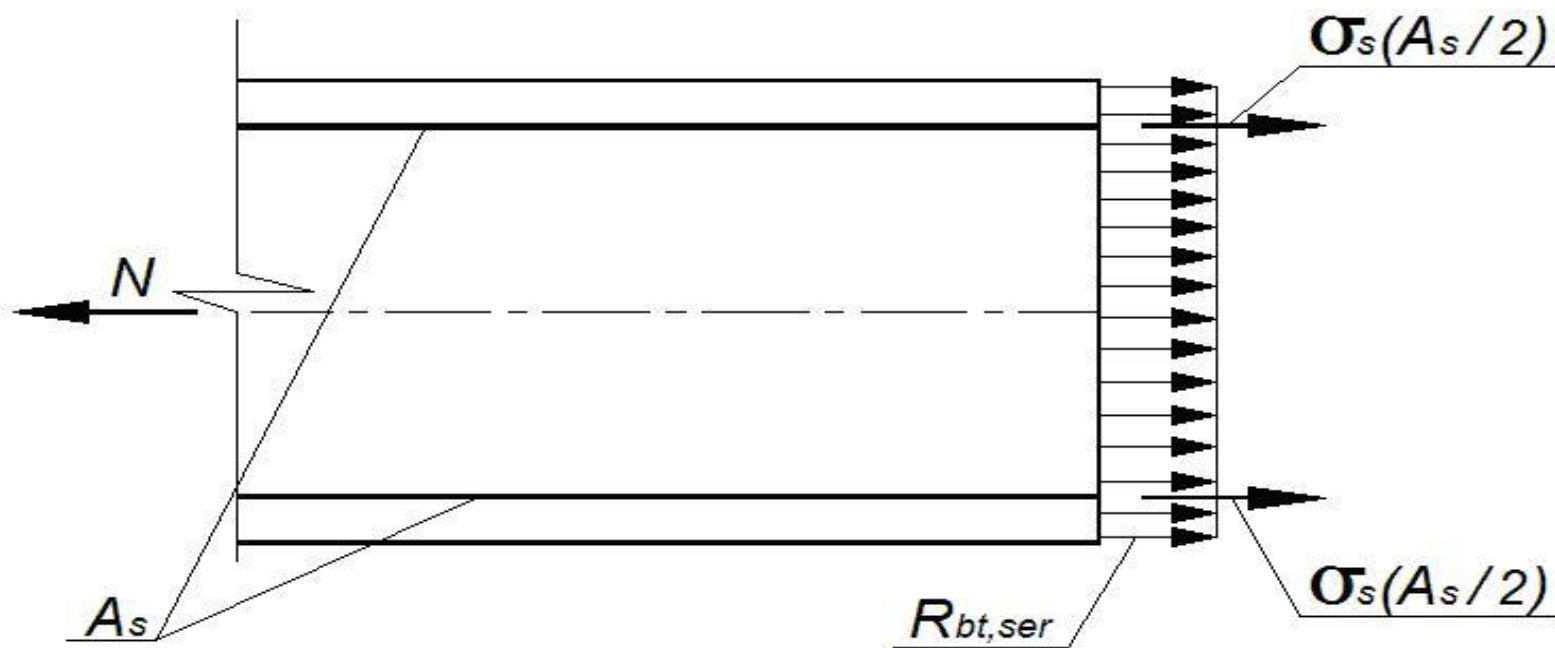


Рис. 9.1. К расчету по образованию трещин в центрально-растянутых элементах

## 9.1.1. Центральные растянутые элементы

Из рассмотрения расчетной схемы можно записать

$$N_{crc} = R_{bt,ser} A_b + \sigma_s A_s. \quad (9.1)$$

Из условия совместности деформаций:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_s; \quad (9.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b}; \quad \sigma_b = R_{bt,ser}; \\ E_b' = \nu \cdot E_b \cong 0,5E_b; \\ \varepsilon_b = \frac{2R_{bt,ser}}{E_b}; \quad \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}; \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad \sigma_s = \varepsilon_s E_s = \varepsilon_b E_s = \frac{2R_{bt,ser}}{E_b} E_s = 2\alpha R_{bt,ser}. \quad (9.3)$$

С учетом этого формула приводится к виду:

$$N_{crc} = R_{bt,n} A_b + 2\alpha R_{bt,n} A_s = R_{bt,n} (A_b + 2\alpha A_s). \quad (9.4)$$

Для элемента с предварительным напряжением:

$$N_{crc} = R_{bt,ser} (A_b + 2\alpha A_s) + P, \quad (9.5)$$

где  $P$  – усилие обжатия,  $P = (\sigma_{sp} - \sigma_{loc}) A_s. \quad (9.6)$

## 9.1.2. Изгибаемые, внецентренно сжатые и внецентренно растянутые элементы

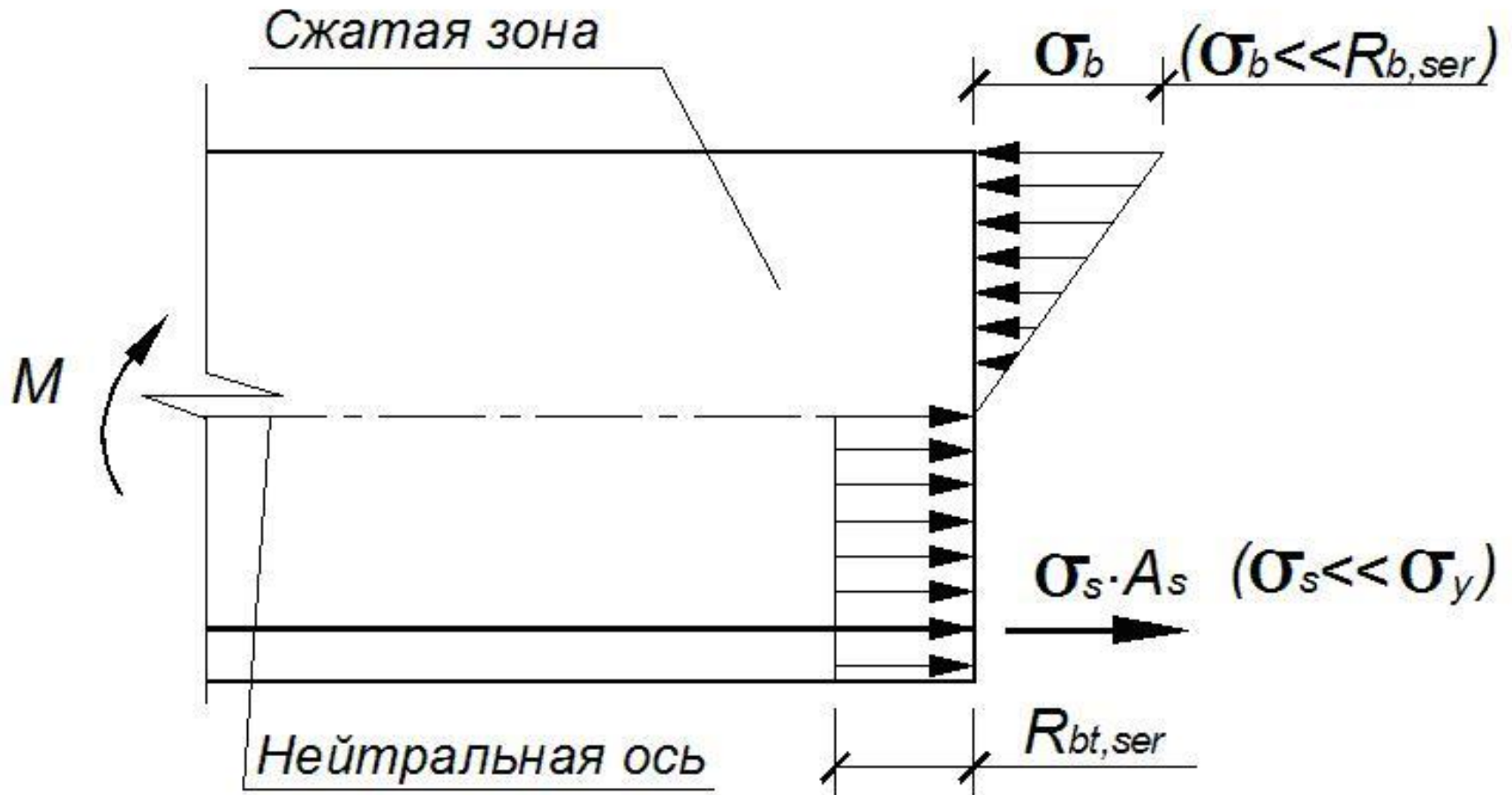


Рис. 9.2. К расчету по образованию трещин в изгибаемых элементах

## 9.1.2. Изгибаемые, внецентренно сжатые и внецентренно растянутые элементы

Расчет заключается в проверке условия, что трещины в сечениях, нормальных к продольной оси элемента, не образуются, если момент внешних сил  $M$  не превосходит момента внутренних усилий в сечении непосредственно перед образованием трещин, т. е.  $M \leq M_{crc}$ .

1 случай: элементы без предварительного напряжения.

$M_{crc}$  находят, используя известную формулу сопротивления материалов для вычисления нормальных напряжений:

$$M_{crc} = \sigma_b W; \quad (9.7)$$

$$\sigma_b = R_{bt,ser}; \quad (9.8) \quad W = W_{pl}; \quad (9.9) \quad W_{pl} = \gamma \cdot W_{red}, \quad (9.10)$$

здесь  $W_{pl}$  – упруго-пластический момент сопротивления;  
 $\gamma$  – коэффициент, зависящий от формы сечения;  
 $W_{red}$  – момент сопротивления приведенного сечения.

Окончательная формула имеет вид:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl}. \quad (9.11)$$

## 9.1.2. Изгибаемые, внецентренно сжатые и внецентренно растянутые элементы

2 случай: элементы с предварительным напряжением.

Задачу определения напряженно – деформированного состояния сечения в стадии I перед образованием трещин от совместного действия внешней нагрузки и усилия обжатия приближенно решают как линейную задачу внецентренного сжатия, применяя принцип независимого действия сил.

При этом момент, воспринимаемый нормальным сечением элемента перед образованием трещин  $M_{crc}$  рекомендуется находить по приближенному способу ядровых моментов:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} + M_{rp}, \quad (9.12)$$

где  $M_{rp} = P(e_{op} + r_b)$  - момент усилия обжатия  $P$  относительно оси, проходящей через условную ядровую точку, наиболее удаленную от растянутой зоны;  
 $W_{pl}$  - упругопластический момент сопротивления железобетонного сечения по растянутой зоне в предположении, что продольная сила отсутствует;  
 $e_{op}$  - эксцентриситет усилия обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения;  
 $r_b$  - расстояние от ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, до центра тяжести приведенного сечения.

## 9.1.2. Изгибаемые, внецентренно сжатые и внецентренно растянутые элементы

Для изгибаемых предварительно напряженных и внецентренно сжатых элементов, а также внецентренно растянутых при  $N \leq P$ :

$$r_b = \varphi_n \frac{W_{red}}{A_{red}}; \quad (9.13)$$

$$0,7 \leq \varphi_n = 1,6 - \frac{\sigma_b}{R_{b,ser}} \leq 1, \quad (9.14)$$

где  $W_{red}$  - упругий момент сопротивления приведенного сечения по растянутой зоне;

$A_{red}$  - площадь приведенного сечения.

Для практических расчетов обычно принимается:

$$\frac{\sigma_b}{R_{b,ser}} \approx 0,8. \quad (9.15)$$

Тогда коэффициент  $\varphi_n = 0,8$ .



### 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

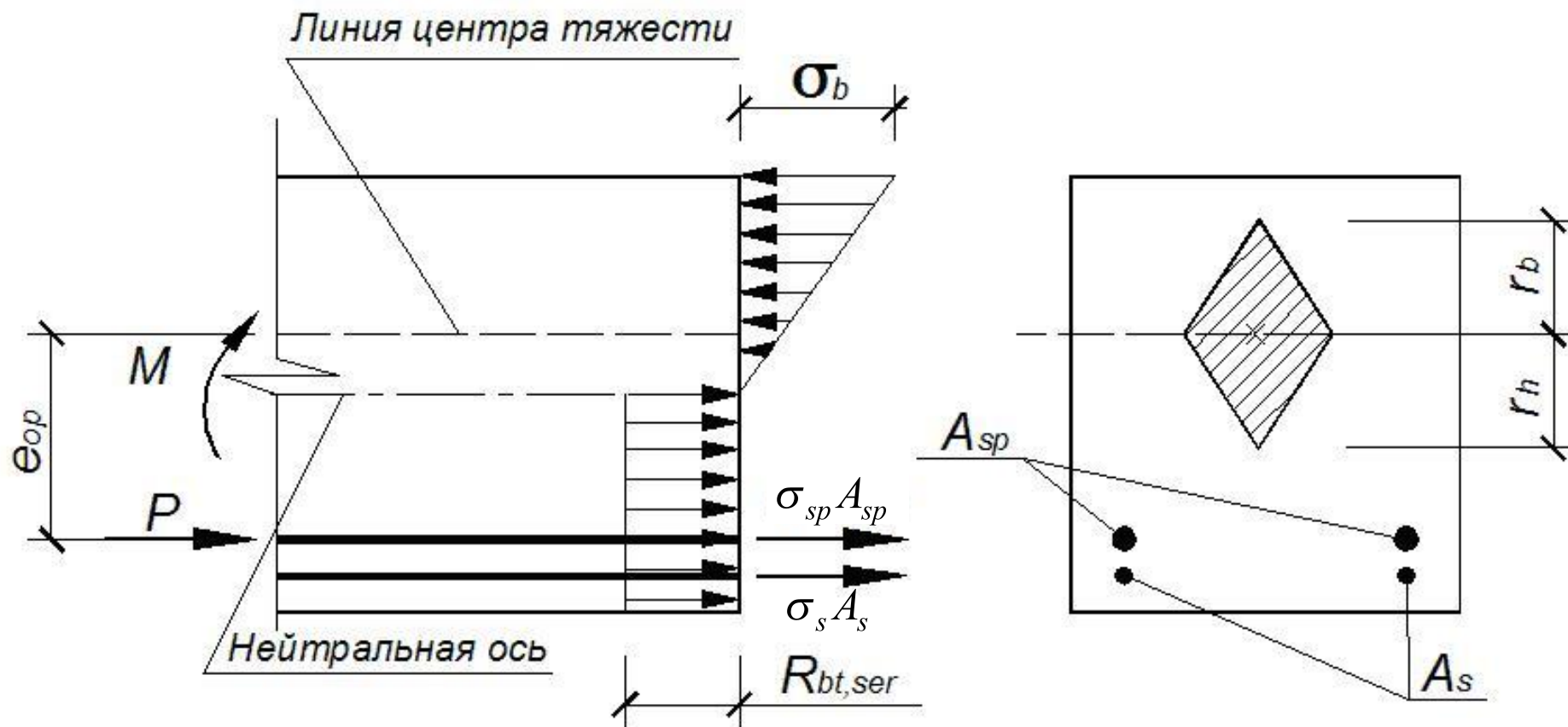


Рис. 9.3. К расчету по раскрытию трещин в элементах

### 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

После образования трещин в растянутых зонах железобетонных элементов при дальнейшем увеличении нагрузки происходит раскрытие трещин – II стадия НДС.

Расчет железобетонных конструкций по раскрытию трещин производят из условия, по которому ширина раскрытия трещин в конструкции от различных воздействий не должна превышать предельно допустимых значений, устанавливаемых в зависимости от требований, предъявляемых к конструкции, условий ее эксплуатации, воздействия окружающей среды и характеристик материалов с учетом особенностей коррозионного поведения арматуры.

Сущность расчета сводится к определению ширины раскрытия трещин  $a_{crc}$ , сравнению её с предельно допускаемой шириной  $[a_{crc}]$  и определению условий (геометрические размеры, армирование, величина предварительного напряжения и др.), соблюдение которых необходимо для ограничения ширины трещин.

Допустимая ширина раскрытия трещин зависит от категории требований к трещиностойкости элементов и определяется по СНиП.

Ширину раскрытия нормальных трещин определяют как произведение средних относительных деформаций арматуры на участке между трещинами и длины этого участка.

### 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

Средние относительные деформации арматуры между трещинами определяют с учетом работы растянутого бетона между трещинами.

Относительные деформации арматуры в трещине определяют из условно упругого расчета железобетонного элемента с трещинами с использованием приведенного модуля деформации сжатого бетона, установленного с учетом влияния неупругих деформаций бетона сжатой зоны, или по нелинейной деформационной модели.

Расстояние между трещинами определяют из условия, по которому разность усилий в продольной арматуре в сечении с трещиной и между трещинами должна быть воспринята усилиями сцепления арматуры с бетоном на длине этого участка.

Ширину раскрытия нормальных трещин следует определять с учетом характера действия нагрузки (повторяемости, длительности и т.п.) и вида профиля арматуры.

Согласно нормам 1985 г. ширину раскрытия нормальных трещин определяли по эмпирической формуле:

$$a_{cr} = \delta \varphi_e \eta \frac{\sigma_s}{E_s} 20(3,5 - 100\mu) \sqrt[3]{d}, \quad (9.16)$$

## 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

где  $\delta$  - коэффициент, учитывающий вид силового воздействия: для изгибаемых и внецентренно сжатых элементов  $\delta = 1$ , для растянутых элементов  $\delta = 1,2$ ;

$\varphi_e$  - коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки:

- при учете кратковременных нагрузок и непродолжительного действия постоянных и длительных  $\varphi_e = 1$ ,
- при учете продолжительного действия постоянных и длительных нагрузок, а также при многократно повторяющейся нагрузке  $\varphi_e = 1,2 \div 2,5$  (в зависимости от вида бетона);

$\eta$  - коэффициент, характеризующий напряжения сцепления арматуры с бетоном ( $\eta = 1$  - для стержней периодического профиля;  $\eta = 1,2$  - для проволоки периодического профиля и канатов;  $\eta = 1,3$  - для гладких стержней;  $\eta = 1,4$  - для гладкой проволоки);

$\sum (A_{sp} + A_s)$  - площадь всей продольной арматуры в поперечном сечении; для изгибаемых и внецентренно сжатых элементов приращение напряжений в растянутой арматуре определяют из условия  $\sum M = 0$  относительно оси, проходящей через точку приложения усилий в сжатой зоне сечения.

### 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

$\sigma_s$  - напряжение в стержнях крайнего ряда продольной арматуры или приращение напряжений от действия внешней нагрузки (при наличии предварительного напряжения).

Эта формула достаточно проста и удобна для использования. Однако она не учитывает влияние ряда важных факторов на ширину раскрытия трещин, таких как расстояние между трещинами, зависящее от сцепления арматуры с бетоном, напряженно-деформированное состояние элемента и др.

В новой редакции СНиП (СП 63.13330.2012) ширину раскрытия трещин определяют исходя из предпосылок, выдвинутых в теории трещинообразования В.К. Мурашева, а в дальнейшем развитых Я.М. Немировским и др. учеными. Согласно этой теории ширина раскрытия трещин  $a_{crc}$  определяется из условия «Удлинение растянутой зоны бетона по оси арматуры плюс раскрытие трещин должно равняться удлинению арматуры на длине участка между трещинами», т.е.

$$\varepsilon_{sm} \cdot l_s = \varepsilon_{bt,m} \cdot l_s + a_{crc}, \quad (9.17)$$

где  $l_s$  - расстояние между смежными нормальными трещинами

## 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

Из данного условия получена формула:

$$a_{crc} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_s, \quad (9.18)$$

где  $\varphi_1$  - коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки, принимаемый равным:

1,0 – при непродолжительном действии нагрузки;

1,4 – при продолжительном действии нагрузки;

-  $\varphi_2$  коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры, принимаемый равным:

0,5 – для арматуры периодического профиля и канатной;

0,8 – для гладкой арматуры;

-  $\varphi_3$  коэффициент, учитывающий характер нагружения, принимается равным:

1,0 – для элементов изгибаемых и внецентренно сжатых;

1,2 – для растянутых элементов.

### 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

Значение  $\sigma_s$  в растянутой арматуре изгибаемых элементов допускается определять по формуле

$$\sigma_s = \frac{M}{z_s A_s}, \quad (9.19)$$

где  $z_s$  - расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне элемента.

Для элементов прямоугольного, таврового (с полкой в сжатой зоне) и двутаврового поперечного сечения допускается значение  $z_s$  принимать равным  $0,8h_0$ .

При действии изгибающего момента  $M$  и продольной силы  $N$

$$\sigma_s = \frac{N(e_s \pm z_s)}{z_s A_s}, \quad (9.20)$$

где  $e_s$  - расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до точки приложения продольной силы  $N$  с учетом эксцентриситета, равного  $M/N$ .

Для элементов прямоугольного, таврового (с полкой в сжатой зоне) и двутаврового поперечного сечения допускается значение  $z_s$  принимать равным  $0,7h_0$ .

## 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

Значение  $\sigma_s$  в растянутой арматуре изгибаемых предварительно напряженных элементов допускается определять по формуле

$$\sigma_s = \frac{M - N_p \cdot (z - e_{sp})}{z \cdot A_s}, \quad (9.21)$$

где  $z$  - расстояние от центра тяжести арматуры, расположенной в растянутой зоне, до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне элемента;

$e_{sp}$  - расстояние от центра тяжести той же арматуры до точки приложения усилия  $N_p$ .

Для элементов прямоугольного поперечного сечения при отсутствии (или без учета) сжатой арматуры значение  $z$  определяют по формуле

$$z = h_0 - \frac{x_N}{3}, \quad (9.22)$$

где  $x_N$  - высота сжатой зоны.

Для элементов прямоугольного, таврового (с полкой в сжатой зоне) и двутаврового поперечного сечения допускается значение  $z$  принимать равным  $0,7h_0$ .



### 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

Значение базового расстояния между трещинами  $l_s$  определяют по формуле

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s} d_s. \quad (9.23)$$

И принимают не менее  $10 d_s$  и  $10$  см и не более  $40 d_s$  и  $40$  см.

Здесь  $A_{bt}$  - площадь сечения растянутого бетона;

-  $A_s$  - площадь сечения растянутой арматуры;

-  $d_s$  - номинальный диаметр арматуры.

Значение  $A_{bt}$  принимают равным площади сечения при ее высоте в пределах не менее  $2a$  и не более  $0,5h$ .

Значение коэффициента  $\psi_s$  определяют по формуле

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{\sigma_{s,crc}}{\sigma_s}, \quad (9.24)$$

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

$\sigma_s$  - то же, при действии рассматриваемой нагрузки.

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

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}}{M}. \quad (9.25)$$

## 9.1.3. Расчет на раскрытие трещин, нормальных к продольной оси элементов

Расчет по раскрытию трещин производят из условия

$$a_{crc} \leq a_{crc,ult}, \quad (9.26)$$

где  $a_{crc}$  - ширина раскрытия трещин от действия внешней нагрузки;  
 $a_{crc,ult}$  - предельно допустимая ширина раскрытия трещин.

Ширину продолжительного раскрытия трещин определяют по формуле:

$$a_{crc} = a_{crc1}, \quad (9.27)$$

а ширину непродолжительного раскрытия трещин - по формуле:

$$a_{crc} = a_{crc1} + a_{crc2} - a_{crc3}, \quad (9.28)$$

где  $a_{crc1}$  - ширина раскрытия трещин от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок;

$a_{crc2}$  - ширина раскрытия трещин от непродолжительного действия постоянных и временных (длительных и кратковременных) нагрузок;

$a_{crc3}$  - ширина раскрытия трещин от непродолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

Если теоретическая величина  $a_{crc} > a_{crc,ult}$ , то увеличивают усилие предварительного обжатия бетона  $R$ , повышают класс бетона или увеличивают размеры поперечного сечения элемента.

## 9.2.1. Общие сведения

Расчет по деформациям железобетонных конструкций также необходим, как и расчет по прочности или трещиностойкости.

Сущность расчета по деформациям сводится к определению величин деформации, которые могут иметь место в элементах проектируемых конструкций в процессе их длительной эксплуатации и сравнения полученных данных с допустимыми предельными величинами.

Например, расчет железобетонных элементов по прогибам производят из условия

$$f \leq f_{ult}, \quad (9.29)$$

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

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

Для участков изгибаемых, внецентренно растянутых элементов значения прогибов определяют по их кривизнам.

В общем случае для случаев преимущественно изгибных деформаций, прогиб определяют по формуле:

$$f = \int_0^l \overline{M}_x \cdot \left( \frac{1}{r} \right)_x \cdot dx, \quad (9.30)$$

## 9.2.1. Общие сведения

где  $\overline{M}_x$  - изгибающий момент в сечении  $x$  от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения элемента по длине пролета  $l$ ;  
 $(1/r)_x$  - полная кривизна элемента в сечении  $x$  от внешней нагрузки, при которой определяют прогиб.

Из курса сопротивления материалов известно, что кривизна элементов при их изгибе определяется как частное от деления изгибающего момента на их жесткость:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{D}, \quad (9.31)$$

где  $M$  - момент внешних сил или момент от усилия обжатия  $P$ :

$$M_p = P \cdot e_{op}. \quad (9.32)$$

Жесткость рассматриваемого сечения железобетонного элемента определяют по общим правилам сопротивления материалов:

- для сечения без трещин - как для условно упругого сплошного элемента;
- для сечения с трещинами - как для условно упругого элемента с трещинами (принимая линейную зависимость между напряжениями и деформациями).

## 9.2.1. Общие сведения

Влияние неупругих деформаций бетона учитывают с помощью приведенного модуля деформаций бетона, а влияние работы растянутого бетона между трещинами с помощью приведенного модуля деформаций арматуры.

Расчет деформаций железобетонных конструкций с учетом трещин производят в тех случаях, когда расчетная проверка на образование трещин показывает, что трещины образуются.

В противном случае производят расчет деформаций как для железобетонного элемента без трещин.

Для участков изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов, в растянутых зонах которых в стадии эксплуатации нормальные трещины не образуются, либо они закрыты, кривизну определяют как для сплошного упругого тела по стадии 1 НДС.

В этих случаях максимальный прогиб определяется по формуле:

$$f = S \cdot l^2 \cdot \frac{1}{r}, \quad (9.33)$$

где  $S$  - коэффициент, зависящий от расчетной схемы элемента и вида нагрузки, определяемый по правилам строительной механики (при действии равномерно распределенной нагрузки его значения принимают равным 5/48);

$1/r$  - полная кривизна в сечении с наибольшим изгибающим моментом.

## 9.2.2. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках без трещин

Для элементов постоянного по длине сечения, работающих без трещин, прогибы определяют по общим правилам строительной механики, но при этом учитывают неупругие деформации и ползучесть бетона.

В расчетах используются величина изгибной жесткости приведенного поперечного сечения, определяемая по формуле:

$$D = E_{b1} \cdot I_{red}, \quad (9.34)$$

где  $E_{b1}$  - модуль деформации сжатого бетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки;

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

Момент инерции  $I_{red}$  определяют по формуле:

$$I_{red} = I + I_s \cdot \alpha + I'_s \cdot \alpha, \quad (9.35)$$

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;

## 9.2.2. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках без трещин

$\alpha$  - коэффициент приведения арматуры к бетону,

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{b1}}. \quad (9.36)$$

Значение модуля деформации бетона находят следующим образом:

- при непродолжительном действии кратковременной нагрузки:

$$E_{b1} = 0,85 \cdot E_b; \quad (9.37)$$

- при продолжительном действии постоянной и длительной нагрузки:

$$E_{b1} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}}, \quad (9.38)$$

где  $\varphi_{b,cr}$  - коэффициент ползучести, зависящий от класса бетона и относительной влажности воздушной среды, в которой происходит эксплуатация рассчитываемой конструкции.

Полная кривизна предварительно напряженного изгибаемого элемента, работающего без трещин в растянутой зоне, определяется как алгебраическая сумма кривизн:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_{sh,t}} + \frac{1}{r_{lt}} - \frac{1}{r_{cp}} - \frac{1}{r_{csc}}, \quad (9.39)$$

## 9.2.2. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках без трещин

где  $1/r_{sh,t}$  - кривизна элемента от кратковременной нагрузки;  
 $1/r_{lt}$  - кривизна от постоянной и длительно действующих нагрузок;  
 $1/r_{cp}$  - кривизна элемента, вследствие выгиба при обжатии;  
 $1/r_{crc}$  - кривизна элемента вследствие ползучести при действии усилий обжатия.

Кривизну  $1/r_{crc}$  принимают равной тангенсу угла наклона эпюры деформаций:

$$\frac{1}{r_{csc}} = \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_b'}{h_0}. \quad (9.40)$$

Здесь  $\varepsilon_b$  и  $\varepsilon_b'$  – деформации бетона, вызванные ползучестью, на уровне центра тяжести растянутой арматуры и крайнего сжатого волокна бетона:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_6 + \sigma_9}{E_s}; \quad (9.41)$$

$$\varepsilon_b' = \frac{\sigma_6' + \sigma_9'}{E_s}. \quad (9.42)$$

Потери напряжений от усадки и ползучести бетона вычисляются на уровне центра тяжести растянутой арматуры ( $\sigma_6$  и  $\sigma_9$ ) и крайнего сжатого волокна ( $\sigma_6'$  и  $\sigma_9'$ ).



## 9.2.2. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках без трещин

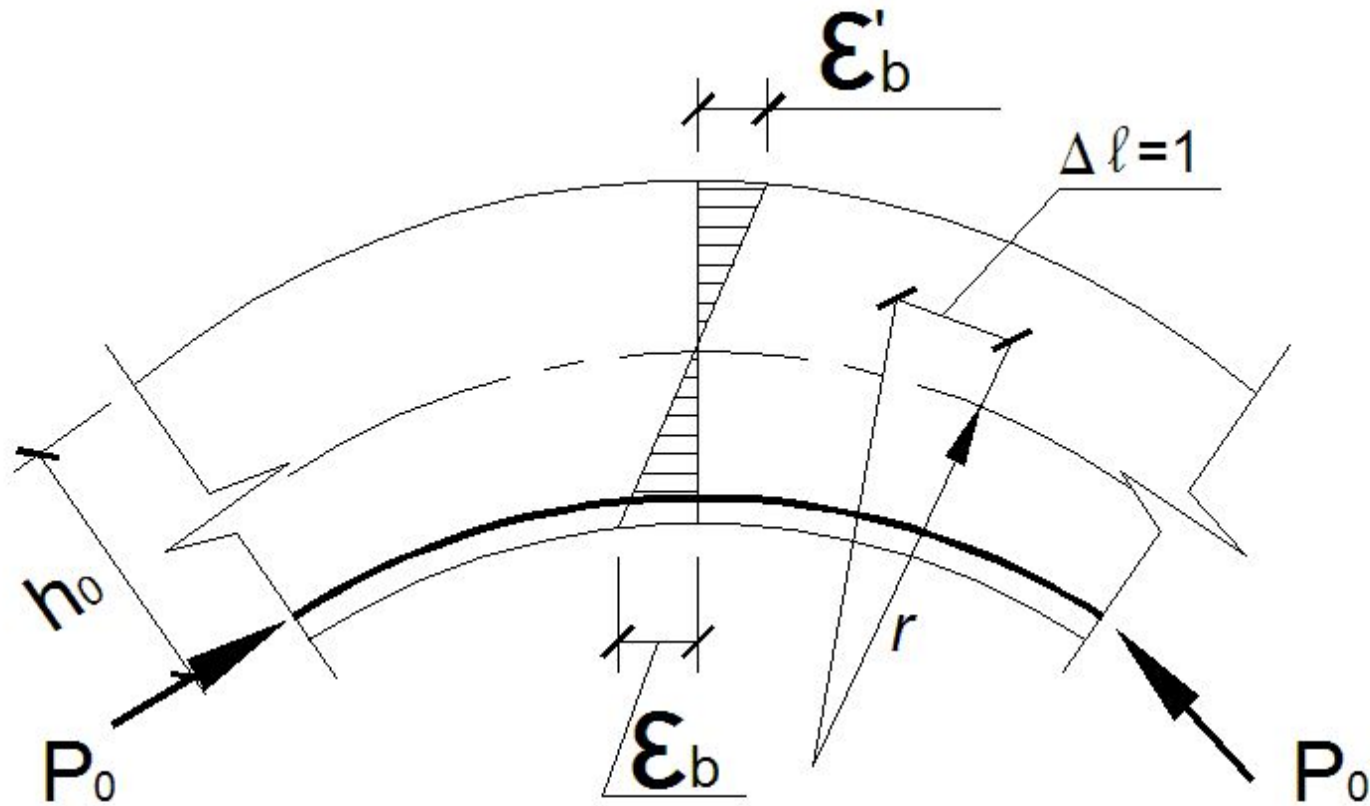


Рис. 9.4. Определение кривизны оси элемента от ползучести при действии усилия обжатия

### 9.2.3. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках с трещинами. Определение прогиба.

При определении кривизны элемента в этом случае за основу принимают вторую стадию НДС, то есть образование и раскрытие трещин в растянутой зоне.

Общее деформированное состояние определяют средними деформациями и средним радиусом кривизны, так как прогибы определяют работу элементов в целом.

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

- сечения после деформирования остаются плоскими (действует гипотеза плоских сечений);
- работу растянутого бетона в сечении с нормальной трещиной не учитывают;
- работу растянутого бетона на участке между смежными нормальными трещинами учитывают посредством коэффициента  $\psi_s$ .

При этом железобетонный элемент рассматривают как условно упругий, принимая для него линейную зависимость между напряжениями и деформациями.

Влияние неупругих деформаций бетона учитывают с помощью приведенного модуля деформаций, а влияние работы растянутого бетона между трещинами - с помощью приведенного модуля деформаций арматуры.

### 9.2.3. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках с трещинами. Определение прогиба.

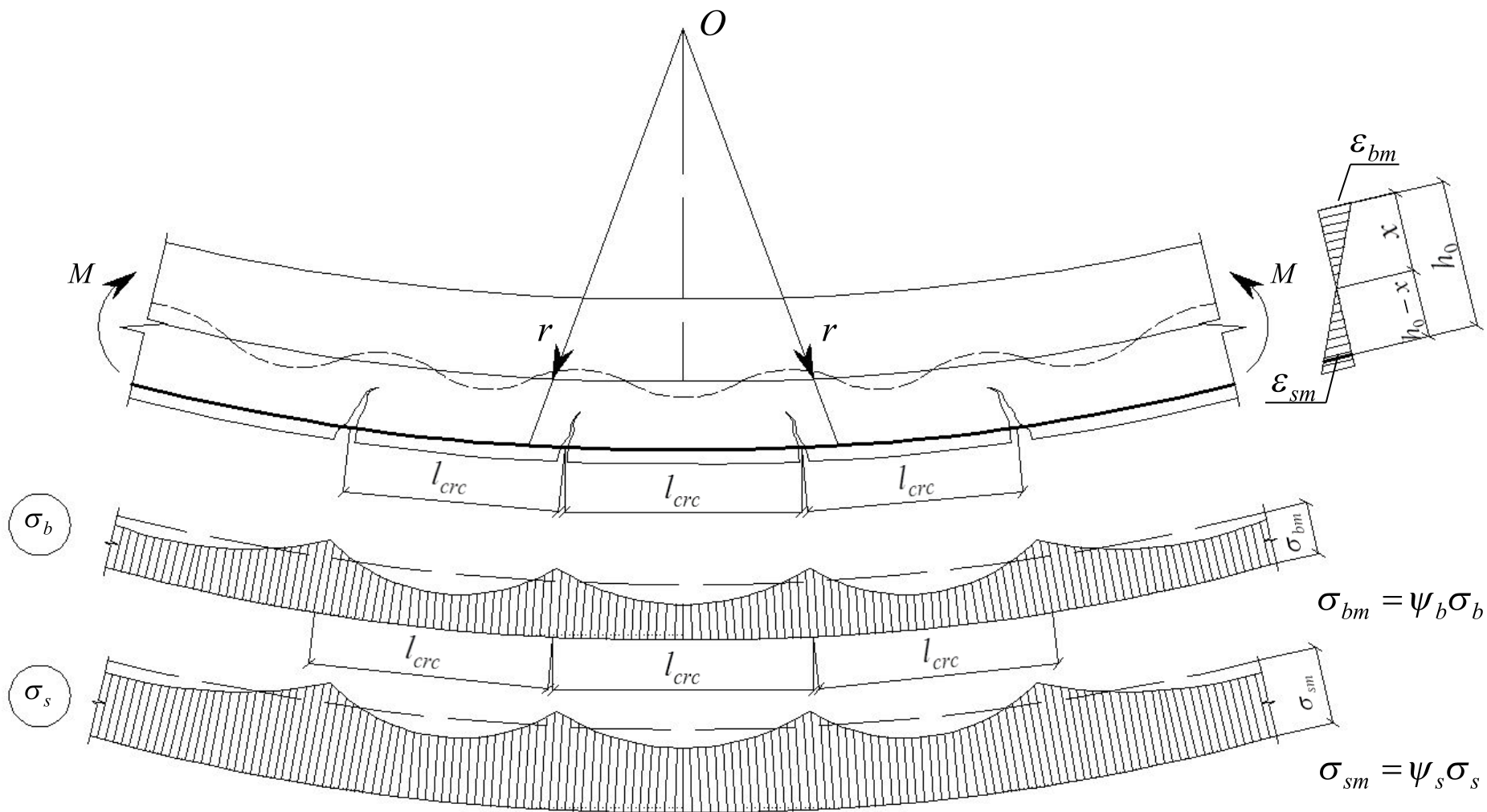


Рис. 9.5. Определение кривизны оси при изгибе элемента

### 9.2.3. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках с трещинами. Определение прогиба.

При принятии таких допущений величину жесткости железобетонного элемента на участках с трещинами можно определить по формуле:

$$D = E_{b,red} \cdot I_{red}, \quad (9.43)$$

в которой  $E_{b,red}$  - приведенный модуль деформации бетона, значение которого можно вычислить по зависимости:

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,n}}{\varepsilon_{b1,red}}. \quad (9.44)$$

Относительные деформации бетона при непродолжительном действии нагрузки принимают равными  $\varepsilon_{b1,red} = 0,0015$ , а при продолжительном определяют по таблицам.

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента  $I_{red}$  находят как сумму трех моментов инерции:

$$I_{red} = I_b + \alpha_{s2} \cdot I_s + \alpha_{s1} \cdot I'_s, \quad (9.45)$$

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;

$\alpha_{s1}$  и  $\alpha_{s2}$  - коэффициенты приведения сжатой и растянутой арматуры к бетону.

### 9.2.3. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках с трещинами. Определение прогиба.

Полная кривизна изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых железобетонных элементов на участках с трещинами в растянутой зоне определяется по формуле:

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 - \left(\frac{1}{r}\right)_2 + \left(\frac{1}{r}\right)_3, \quad (9.46)$$

где  $(1/r)_1$  - кривизна от непродолжительного действия всей нагрузки, на которую производят расчет по деформациям;

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

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

Для предварительно напряженных элементов каждую из составляющих полной кривизну от соответствующих нагрузок вычисляют по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M - N_p \cdot e_{0p}}{D}, \quad (9.47)$$

### 9.2.3. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках с трещинами. Определение прогиба.

где  $M$  - изгибающий момент от внешней нагрузки;

$N_p$  и  $e_{op}$  - усилие предварительного обжатия, определенное с учетом всех потерь в напрягаемой арматуре, и его эксцентриситет относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента.

Составляющие полной кривизны при расчете изгибаемых предварительно напряженных элементов, допускаются определять по величине жесткости, вычисленной исходя из параметров растянутой арматуры:

$$\frac{1}{r} = \frac{M - N_p \cdot z_p}{E_{s,red} \cdot A_s \cdot z(h_0 - x_N)}, \quad (9.48)$$

где  $z_p$  и  $z$  - расстояние от точки приложения усилий обжатия  $N_p$  и центра тяжести растянутой арматуры  $A_s$  до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне;

$x_N$  - высота сжатой зоны с учетом влияния предварительного обжатия.

Значения  $z_p$  и  $z$  допускается определять, принимая расстояние от точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне до наиболее сжатого волокна сечения, равным  $0,3h_0$ .

### 9.2.3. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках с трещинами. Определение прогиба.

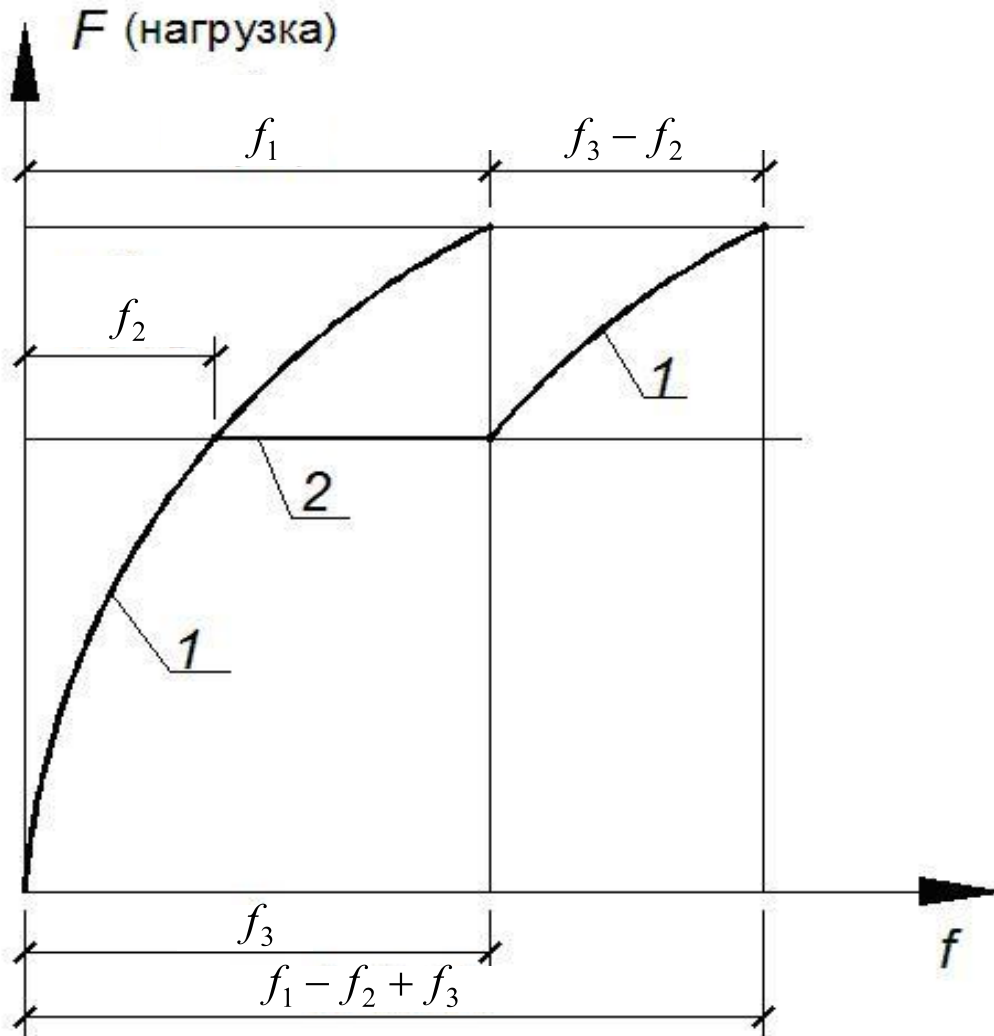


Рис. 9.6. Прогиб железобетонного элемента при действии кратковременной и длительной нагрузок



1 – прогиб кратковременный;  
2 – прогиб длительный

### 9.2.3. Кривизна оси при изгибе и жесткость железобетонных элементов на участках с трещинами. Определение прогиба.

Прогибы элементов покрытий должны быть такими, чтобы, несмотря на их наличие, был обеспечен уклон кровли не менее  $1/200$  в одном из направлений

Прогибы элементов конструкций не ограничиваются исходя из эстетико-психологических требований, если не ухудшают внешний вид конструкций (например, мембранные покрытия, наклонные козырьки, конструкции с провисающим или приподнятым нижним поясом), если элементы конструкций скрыты от обзора или находятся над помещениями с непродолжительным пребыванием людей (например, трансформаторных подстанций, чердаков).

Предельные прогибы элементов конструкций покрытий и перекрытий, ограничиваемые исходя из технологических, конструктивных и физиологических требований, следует отсчитывать от изогнутой оси, соответствующей состоянию элемента в момент приложения нагрузки, от которой вычисляется прогиб, а ограничиваемые исходя из эстетико-психологических требований - от прямой, соединяющей опоры этих элементов.

Для элементов конструкций зданий и сооружений, предельные прогибы и перемещения которых не оговорены нормативными документами, вертикальные и горизонтальные прогибы и перемещения от постоянных, длительных и кратковременных нагрузок не должны превышать  $1/150$  пролета или  $1/75$  вылета консоли.