

1.2.4.1. Определение потерь предварительного напряжения

1.2.4.1.1. Прямые (первые) потери усилия предварительного напряжения

При определении прямых потерь $\Delta P_{i(x)}$ учитываются следующие потери [5, п. 5.10.4]:

- потери от перепада температуры при тепловой обработке изделия ΔP_t ;
- потери от проскальзывания в анкерном устройстве ΔP_{sl} ;
- потери от релаксации напрягаемой арматуры ΔP_r ;
- потери от упругих деформаций бетона ΔP_{el} .

Примечание

В EN 1992-1-1 классификация потерь предварительного напряжения несколько отличается от классификации, принятой в стандарте РФ [14]. В EN 1992-1-1 потери делятся на кратковременные и зависящие от времени. Потери от релаксации арматуры при передаче усилия преднапряжения на бетон и упругие деформации бетона отнесены к прямым (первым) потерям.

Потери от перепада температуры арматуры и анкеров при тепловой обработке изделия

При отсутствии данных по температурному перепаду потери определяются по [14, п. 9.1.4].

Потери от температурного перепада при нагреве бетона (при отсутствии точных данных допускается принимать $\Delta t = 65^\circ$):

$$\Delta \sigma_{sp2} = 1,25 \Delta t = 1,25 \cdot 65 = 81 \text{ МПа};$$

$$\Delta P_t = 81 \cdot 2945 / 10^3 = 238,5 \text{ кН}.$$

Потери от проскальзывания в анкерном устройстве

При отсутствии данных о конструкции анкерных устройств потери определяются по [14, п. 9.1.6].

Потери от деформации анкеров натяжных устройств

$$\Delta \sigma_{sp4} = \frac{\Delta l}{l} E_s = \frac{2}{2 \cdot 10^4} \cdot 2 \cdot 10^5 = 20 \text{ МПа},$$

где Δl – обжатие анкеров или смещение стержня в зажимах анкеров. При отсутствии данных допускается принимать $\Delta l = 2$ мм; $l = 20$ м – расстояние между наружными гранями упоров (длина стенда).

$$\Delta P_{sl} = 20 \cdot 2945 / 10^3 = 58,9 \text{ кН}.$$

Потери от кратковременной релаксации напрягаемой арматуры

В соответствии с [5, п. 3.3.2(6)] для горячекатаной арматуры потери принимаются равными 4 % от максимального напряжения растяжения в арматуре за вычетом прямых потерь, возникающих в процессе напряжения (потерь от проскальзывания в анкерах и перепада температуры).

$$\Delta\sigma_{sp1} = 0,04(\sigma_{p,max} - \Delta\sigma_{sp2} - \Delta\sigma_{sp4}) = 0,04(511 - 81 - 20) = 16,4 \text{ МПа};$$

$$\Delta P_r = 16,4 \cdot 2945 / 10^3 = 48,3 \text{ кН.}$$

Потери от упругих (мгновенных) деформаций бетона

Потери от деформации бетона в общем случае определяются следующим образом [5, формула (5.44)]:

$$\Delta P_{el} = A_p E_p \sum \frac{j \Delta\sigma_{c(t)}}{E_{cm(t)}},$$

где $\Delta\sigma_{c(t)}$ – изменение напряжения в бетоне на уровне центра тяжести напрягающих элементов в момент времени t ;

$j = (n - 1)/2n$ – коэффициент, где n – число идентичных напрягающих элементов, натягиваемых последовательно. Приближенно j может быть принято равным 0,5;

1 – для изменений, вызванных постоянными воздействиями, примененными после предварительного напряжения.

В рассматриваемом случае для балки заводского изготовления, подвергнутой тепловой обработке, сжимающие напряжения на уровне центра тяжести напрягаемой арматуры в момент обжатия бетона допускается определять для приведенного сечения балки с постоянным отношением модулей упругости арматуры и бетона

$$\alpha = E_p / E_{cm} = (2 \cdot 10^5) / (0,33 \cdot 10^5) = 6,06,$$

где $E_p = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости арматуры [14, п. 6.2.12]; $E_{cm} = 33$ ГПа = $= 33 \cdot 10^3$ МПа – значение модуля упругости бетона в возрасте 28 суток [5, табл. 3.1].

Для мгновенных деформаций бетона изменение напряжения в бетоне на уровне центра тяжести напрягающих элементов можно определить по формуле

$$\Delta\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{M}{W} = \frac{P}{A_{red}} + \frac{P y_p^2}{I_{red}} = \frac{1064,9}{224946,7} + \frac{1064,9 \cdot 560,9^2}{5,52 \cdot 10^{10}} = 0,0109 \text{ кН/мм}^2 =$$

$$= 10,9 \text{ МПа,}$$

где P – начальное усилие предварительного натяжения за вычетом потерь от температурного перепада, проскальзывания в анкерном устройстве и кратковременной релаксации арматуры,

$$P = P_{m0(x)} - \Delta P_t - \Delta P_{sl} - \Delta P_r = 1410,6 - 238,5 - 58,9 - 48,3 = 1064,9 \text{ кН};$$

$A_{red} = 224946,7 \text{ мм}^2$ – площадь приведенного сечения; $y_p = 560,9 \text{ мм}$ – расстояние от центра тяжести приведенного сечения до центра напрягаемой арматуры; $I_{red} = 5,52 \cdot 10^{10} \text{ мм}^4$ – момент инерции приведенного сечения;

$$\Delta P_{el} = 2945 \cdot 2 \cdot 10^2 \cdot \frac{1 \cdot 10,9}{33 \cdot 10^3} = 194,6 \text{ кН.}$$

1.2.4.1.2. Потери усилия предварительного напряжения, зависящие от времени (вторые потери)

Потери предварительного напряжения рассчитываются с учетом двух эффектов, приводящих к снижению напряжения [5, п. 5.10.6 (1)]:

- уменьшение относительных деформаций, вызванных деформацией бетона из-за ползучести и усадки при постоянных нагрузках ΔP_{c+s+r} ;
- уменьшение напряжения в стали из-за релаксации при растяжении.

Для определения потерь, зависящих от времени, в сечении на расстоянии x при действии постоянных нагрузок рекомендуется упрощенная зависимость [5, формула (5.46)]

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \Delta \sigma_{p,c+s+r} = A_p \frac{\epsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \sigma_{c, QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2 \right) [1 + 0,8 \varphi(t, t_0)]},$$

где $\Delta \sigma_{p,c+s+r}$ – абсолютное значение изменения напряжения в напрягаемой арматуре в результате ползучести, усадки и релаксации в момент времени t ; $A_p = 2945 \text{ мм}^2$ – площадь сечения напрягаемой арматуры; $A_c = 207100 \text{ мм}^2$ – площадь бетонного сечения балки; I_c – момент инерции бетонного сечения балки.

Для поперечного сечения балки на рис. 6 расстояние от верхней грани балки до центра тяжести сечения

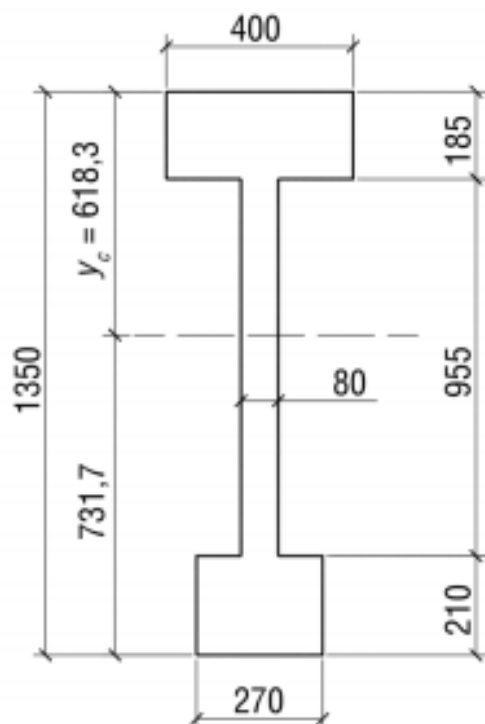


Рис. 6. Расчетное сечение балки (сечение x-x по рис. 1)

$$y_c = \frac{400 \cdot 185(185/2) + 80 \cdot 955(955/2 + 185) + 270 \cdot 210(1350 - 210/2)}{207100} = 618,3 \text{ мм};$$

$$I_c = \frac{400 \cdot 185^3}{12} + 400 \cdot 185(618,3 - 185/2)^2 + \frac{270 \cdot 210^3}{12} + 270 \cdot 210(731,7 - 210/2)^2 + \frac{80 \cdot 955^3}{12} + 80 \cdot 955 \left(\left(\frac{955}{2} + 185 \right) - 618,3 \right)^2 = 4,91 \cdot 10^{10} \text{ мм}^4;$$

z_{cp} – расстояние между центрами тяжести бетонного сечения элемента и напрягаемой арматурой, $z_{cp} = 1350 - 618,3 - 122,5 = 609,2$ мм; ϵ_{cs} – относительная деформация усадки, определенная согласно [4, п. 3.1.4 (6)] как абсолютное значение:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca}$$

ϵ_{cd} – относительная деформация бетона усадки, обусловленная высыханием (испарением влаги); ϵ_{ca} – относительная деформация аутогенной усадки.

Предельное значение относительной деформации усадки, обусловленной высыханием (испарением влаги), $\epsilon_{cd,0} = k_h \epsilon_{cd,0}$. Значение относительной деформации $\epsilon_{cd,0}$ допускается принимать по [5, табл. 3.2]. Для бетона класса 30/37 при относительной влажности воздуха 60 % по интерполяции $\epsilon_{cd,0} = 0,435 \cdot 10^{-3}$.

Развитие во времени относительной деформации усадки, обусловленной высыханием, определяется по [5, формула (3.9)]:

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) k_h \epsilon_{cd,0},$$

где k_h – коэффициент, зависящий от приведенного размера сечения h_0 , принимаемый по [5, табл. 3.3],

$$\text{при } h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 \cdot 207100}{3880} = 106,8 \text{ мм имеем } k_h = 0,989,$$

здесь $A_c = 400 \cdot 185 + 270 \cdot 210 + 955 \cdot 80 = 207100 \text{ мм}^2$ – площадь поперечного сечения бетона; $u = 2(1350 + 400 + 270 - 80) = 3880 \text{ мм}$ – периметр части площади поперечного сечения, подвергающейся высыханию;

$$\beta_{ds}(t, t_0) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}} = \frac{(18250 - 3)}{(18250 - 3) + 0,04 \sqrt{106,8^3}} = 0,9976,$$

где t – возраст бетона на рассматриваемый период, $t = 18250$ суток (соответствует времени эксплуатации конструкции 50 лет); t_s – возраст бетона на начало усадки высыхания (или набухания), соответствующий окончанию срока ухода за бетоном. Для балки заводского изготовления принимается 3 суток.

$$\epsilon_{cd}(t) = 0,9976 \cdot 0,989 \cdot 0,435 \cdot 10^{-3} = 0,4292 \cdot 10^{-3}.$$

Относительная деформация аутогенной усадки определяется по [5, формула (3.11)]: