

ПРИМЕНЕНИЕ ПОСТНАПРЯЖЕНИЯ В МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЯХ

ЗМИТРОВИЧ М. А., ЗВЕРЕВ В. Ф.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Усилие предварительного напряжения не остается постоянным во времени в результате потерь, начинающихся практически с момента натяжения арматурных элементов и развивающихся в течение всего периода эксплуатации конструкции. Интенсивность потерь предварительного напряжения является максимальной в начальный период после передачи усилия обжатия.

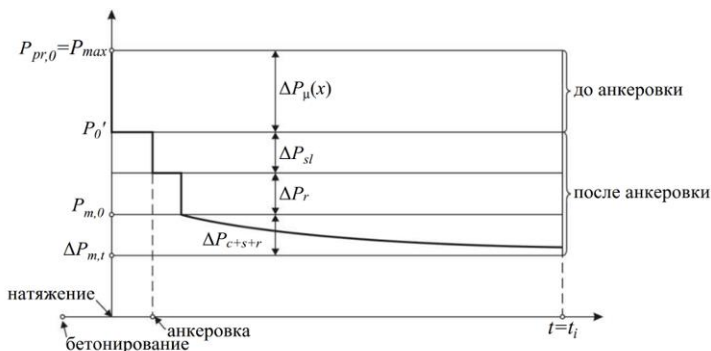


Рис. 1. Потери предварительного напряжения при натяжении арматуры на бетон

Можно условно выделить две группы потерь предварительного напряжения в зависимости от этапов его создания в конструкции:

- первые потери, происходящие в процессе изготовления конструкции и обусловленные, главным образом, технологией натяжения арматурных элементов;
- вторые потери, обусловленные, главным образом, реологическими свойствами материалов, происходящие после передачи усилия обжатия и развивающиеся во времени в процессе эксплуатации конструкции.

К первым потерям при изготовлении конструкции с натяжением арматуры на бетон относятся:

- потери на трение канатов о стенки каналобразователей или пластиковой оболочки $\Delta P_{\mu}(x)$;
- потери на проскальзывание каната на анкере ΔP_{sl} ;
- потери натяжения ранее натянутых канатов после натяжения последующих за счет упругой деформации бетона ΔP_r .

Вторые потери, развивающиеся после передачи усилия обжатия:

- потери за счет усадки бетона;
- потери за счет ползучести бетона;
- потери за счет релаксации напрягаемой арматуры.

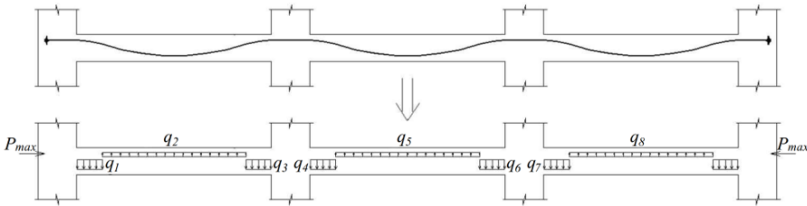


Рис. 2. Моделирование преднапряжения в перекрытии

Первые потери

Потери на трение канатов о стенки каналобразователей или пластиковой оболочки

Потери за счет трения напрягаемой арматуры о стенки каналов (оболочки) могут быть вычислены по следующей формуле:

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{max} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot (\theta + kx)}), \quad (1)$$

где x – расстояние от точки приложения усилия натяжения (активного анкера) до точки, в которой измеряются потери. Расстояние x должно быть измерено по оси каната, но, как правило, при расчете протяженных конструкций небольшой высоты расстояние x может быть с достаточной точностью измерено как длина проекции каната на плоскость (т.е. расстояние измеряется без учета изгибов каната); P_{max} – усилие в точке приложения силы; $e \approx 2,71$ – основание натуральных логарифмов; μ – коэффициент трения, зависящий от типа системы преднапряжения; k – коэффициент «вихляния» каната. Как правило коэффициенты μ и k определяются по техническим условиям поставщика той или иной системы преднапряжения.

θ – сумма угловых отклонений каната (пучка) в рад. Углы суммируются по модулю независимо от знака.

Потери предварительного напряжения за счет проскальзывания канатов на анкере

При использовании цанговой фиксации канатной арматуры на анкерах, при производстве натяжения при передаче усилия натяжения с домкрата на анкер происходит так называемая «посадка» цанги в посадочное конусное отверстие, за счет которой происходит незначительное геометрическое укорочение натянутого каната и соответственно падение усилия преднапряжения. Величина посадки конуса и соответствующее укорочение каната регламентируются производителем системы предварительного напряжения и, как правило, находятся в диапазоне 2-6 мм (2 мм при натяжении каната домкратами с гидравлической запрессовкой цанг). Как правило, при расчете используется параметр посадки конуса, равный 4 мм.

Потери преднапряжения за счет проскальзывания имеют наибольшее значение в точке натяжения и далее «компенсируются» действием трения.

Существует два основных случая распределения потерь за счет проскальзывания каната, зависящих от величины проскальзывания, трения и длины элемента.

Величину потерь ΔP_{sl} можно вычислить на основании геометрического укорочения каната в результате посадки цанги.

$$x = \sqrt{\delta/\beta \cdot \varepsilon_{p_0}}, \quad (2)$$

где δ – величина посадки цанги; β – усредненное значение потерь на трение на 1 погонный метр каната, равное

$$\beta = \mu \cdot \left(\frac{\theta}{x} + k \right); \quad (3)$$

ε_{p_0} – исходное относительное удлинение каната, равное

$$\varepsilon_{p_0} = \frac{P_{max}}{A_{sp} \cdot E_{sp}}, \quad (4)$$

где E_{sp} – модуль упругости напрягаемой арматуры; A_{sp} – площадь сечения напрягаемого каната.

$$\Delta P_{sl} = P_{max} \cdot 2 \sqrt{\frac{\delta \cdot \beta}{\varepsilon P_0}} \quad (5)$$

Потери предварительного напряжения за счет упругого обжатия бетона

Как правило, железобетонный элемент армируется группой напрягаемых элементов, напрягаемых последовательно, не одновременно. Напрягаемым элементом может быть отдельный моностренд, в таком случае натяжение производится поочередно для каждого каната, или многопрядевые напрягаемые пучки, в таком случае канаты в пучке напрягаются одновременно, пучки же напрягаются последовательно. После натяжения каждого каната (пучка) происходит упругое обжатие (укорочение) бетона, приводящее к снижению усилий предварительного напряжения в ранее натянутых пучках (канатах).

Величина относительного укорочения бетона может быть выражена как

$$\varepsilon_c = \frac{P_{max}}{A_c \cdot E_c}, \quad (6)$$

где E_c – минимальный модуль упругости бетона на момент производства работ по преднапряжению; A_c – площадь обжимаемого бетонного сечения;

$$\Delta P_r = A_{sp} \cdot \varepsilon_c \cdot E_{sp}. \quad (7)$$

Усилие предварительного напряжения с учётом первых потерь вычисляется по формуле:

$$P_{m,0} = P_{max} - \Delta P_1, \quad (8)$$

где

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\mu}(x) + \Delta P_{sl} + \Delta P_r. \quad (9)$$

Вторые потери

Реологические потери, вызванные ползучестью и усадкой бетона, а также длительной релаксацией напряжений в стали напрягающего элемента следует определять по формуле 5.46 [1]:

$$\Delta P_{c+s+r} = A_{sp} \cdot \Delta \sigma_{p,c+s+r} = A_{sp} \cdot \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c, QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2\right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)]}; \quad (10)$$

Определение усадочной деформации ε_{cs}

Полная относительная деформация усадки состоит из двух составляющих частей: относительной деформации усадки при высыхании (испарении влаги) и относительной деформации аутогенной усадки. Относительная деформация усадки при высыхании развивается медленно, так как она зависит от условий миграции воды через затвердевший бетон. Относительная деформация аутогенной усадки развивается во время твердения бетона: большая ее часть образуется в первые сутки после укладки бетона. Относительная деформация аутогенной усадки является линейной функцией прочности бетона. Особенно ее следует учитывать в тех случаях, когда бетонная смесь укладывается на затвердевший бетон. Значение полной относительной деформации усадки ε_{cs} :

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}, \quad (11)$$

где ε_{cs} – полная относительная деформация усадки;

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), $\varepsilon_{cd,0} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$. Значение относительной деформации $\varepsilon_{cd,0}$ может быть принято из таблицы 3.2 [1] (ожидаемые средние значения с коэффициентов вариации около 30%). Формула для определения $\varepsilon_{cd,0}$ приведена в приложении В [1].

Развитие во времени относительной деформации усадки, обусловленной высыханием (испарением влаги), определяется из выражения:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}, \quad (12)$$

где k_h – коэффициент, который зависит от приведенного размера сечения h_0 , принимаемый по таблице 3.3 [1].

$$\beta_{ds}(t, t_0) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}}, \quad (13)$$

где t – возраст бетона на рассматриваемый период, сут;

t_s – возраст бетона на начало усадки высыхания (или набухания). Обычно это соответствует окончанию срока ухода за бетоном, сут;

h_0 – приведенный размер поперечного сечения, мм,
 $h_0 = 2 \cdot A_c / u$,

здесь A_c – площадь поперечного сечения бетона;

u – периметр части площади поперечного сечения, подвергающейся высыханию (испарению влаги).

Относительная деформация аутогенной усадки определяется по формуле

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty), \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}), \quad (16)$$

здесь t приведено в сутках.

Определение коэффициента ползучести

Следует отметить, что на ползучесть бетона оказывает влияние степень зрелости бетона (начальная прочность) при первоначальном приложении нагрузки, а также продолжительность нагружения и величина нагрузки.

Коэффициент ползучести $\varphi(t, t_0)$ связан с касательным модулем упругости E_c , который может быть принят равным $1,05E_{cm}$. Если особая точность не требуется, то в качестве предельной характеристики ползучести $\varphi(\infty, t_0)$ может быть принято значение, приведенное на рисунке 3.1 [1], при условии, что бетон в момент времени, соответствующий приложению нагрузки, $t=t_0$, не подвергается сжимающим напряжениям, большим чем $0,45f_{ck}(t_0)$.

Деформация ползучести бетона $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ в возрасте $t=\infty$, при постоянном напряжении сжатия σ_c , приложенном во время $t=t_0$, рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_{c0}}. \quad (17)$$

Если напряжения сжатия бетона в возрасте t_0 превышает значение $0,45f_{ck}(t_0)$, то, как правило, следует учитывать нелинейную ползучесть. В этих случаях нелинейный условный коэффициент ползучести определяется по формуле:

$$\varphi_{ni}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \exp(1,5 \cdot (k_\sigma - 0,45)), \quad (18)$$

где $\varphi_{ni}(\infty, t_0)$ – нелинейный условный коэффициент ползучести, вводимый взамен $\varphi(\infty, t_0)$;

k_σ – отношение «напряжение – прочность» $\sigma_c / f_{ck}(t_0)$, где σ_c – напряжение сжатия, а $f_{ck}(t_0)$ – характеристическая прочность бетона в момент времени, соответствующий нагружению.

Значения, приведенные на рисунке 3.1 [1], действительны при температуре окружающей среды от минус 40°С до 40°С и средней относительной влажности воздуха от RH=40% до RH=100%.

Определение потерь предварительного напряжения от релаксации стали

В [1] определены три класса релаксации:

- класс 1: проволока или канат – нормальная релаксация;
- класс 2: проволока или канат – низкая релаксация;
- класс 3: горячекатаные или улучшенные стержни.

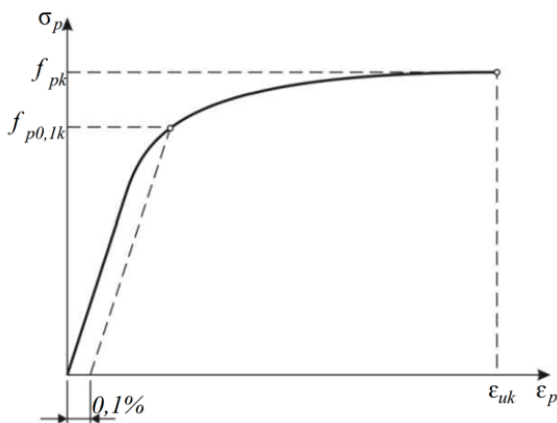


Рис. 3. Общий вид и параметрические точки фактической диаграммы деформирования проволоки и канатов (по результатам испытаний)

Расчет потерь от релаксации в напрягаемой арматуре осуществляется, как правило, на основе значения ρ_{1000} – потерь от релаксации, %, через 1000 ч с момента натяжения при средней температуре 20°С.

Значение ρ_{1000} приводится как процентная доля начального напряжения и определено для начального напряжения, равного

$0,7f_p$, где f_p является фактическим пределом прочности на растяжение образцов напрягаемой стали. При проектировании применяется характеристический предел прочности на растяжение f_{pk} , и это значение учтено в последующих формулах.

Значения для ρ_{1000} могут быть приняты равными: 8% – для класса 1; 2,5 % – для класса 2 и 4% – для класса 3, или взяты из соответствующего свидетельства (сертификата).

Потери от релаксации могут быть приняты из испытательных сертификатов производителя или определены как процентная доля изменения предварительного напряжения по сравнению с начальным предварительным напряжением, определяемая по одной из приведенных ниже формул.

Формулы 19 и 20 могут применяться соответственно для проволок и канатов с нормальной релаксацией и арматуры с низкой релаксацией соответственно, тогда как формула 21 может применяться для горячекатаных и улучшенных стержней.

$$\text{Класс 1} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{6,7\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}; \quad (19)$$

$$\text{Класс 2} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}; \quad (20)$$

$$\text{Класс 3} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{8,0\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}, \quad (21)$$

где $\Delta\sigma_{pr}$ – абсолютное значение потерь предварительного напряжения в результате релаксации;

σ_{pi} – абсолютное значение начального напряжения
 $\sigma_{pi} = \sigma_{pm0}$;

t – время после натяжения, ч;

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}}, \quad (22)$$

Долговременные (окончательные) значения потерь от релаксации могут быть рассчитаны для интервала времени $t=500\,000$ ч (т.е. примерно 57 лет).

Потери от релаксации чувствительны к изменению температуры стали.

Усилие предварительного напряжения с учётом всех потерь вычисляется по формуле:

$$\Delta P_{m,t} = P_{m,0} - \Delta P_{c+s+r}. \quad (23)$$

Анализ произведенных расчётов потерь предварительного напряжения монолитных постнапряженных конструкций позволяет сформировать нижеприведенную диаграмму, в которой показана доля каждого вида потерь.

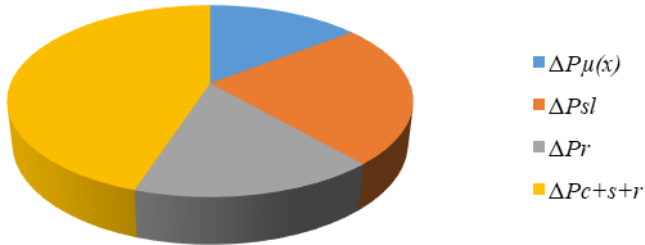


Рис. 4. Доля каждого вида потерь предварительного напряжения

Как видно из вышеприведенных зависимостей, методика определения потерь предварительного напряжения по [1] весьма точна и позволяет получить корректное значение усилия предварительного напряжения для дальнейшего расчета конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009* (02250). Еврокод 2 / М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2015. – 205 с.
2. Портаев, Д. В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий / Д. В. Портаев. – М.: Изд-во ассоциации строит. вузов, 2011. – 247 с.
3. Латыш, В. В. Технология предварительного напряжения монолитных железобетонных конструкций в построечных условиях: учеб. пособие / В. В. Латыш, С. Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2006. – 53 с.
4. Леонович, С. Н. Технология предварительного напряжения железобетонных конструкций в построечных условиях / С. Н. Леонович, И. И. Передков, А. И. Сидорова. – Минск: БНТУ, 2018. – 279 с.