



УДК 624.074.415.624.072.2

© В. А. Кравчук, 2011

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ СТАЛЬНЫХ БАЛОК В КАЧЕСТВЕ РИГЕЛЕЙ КАРКАСА ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ

Кравчук В. А. – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции», тел. 37-51-82, e-mail: Kravchuk@mail.khstu.ru (ТОГУ)

Изучается возможность применения предварительно напряженных балок в качестве опорных элементов пологих монолитных оболочек. Рассмотрен расчет дополнительного выгиба стальной предварительно напряженной балки; представлены расчетные зависимости, позволяющие выполнить проверку прочности и устойчивости ее стенки.

Possible application of prestressed beams as cross-bars for smooth monolithic envelopes is considered. An additional curvature of a prestressed steel beam has been calculated. Predicted dependencies with which one may check its wall's strength and stability are given.

Ключевые слова: предварительно напряженная балка, дополнительный выгиб, дополнительный момент, эквивалентная равномерно распределенная нагрузка, критические напряжения, устойчивость стенки.

Дополнительные предварительные нормальные напряжения.

Как известно [1], на стадии предварительного напряжения стальные балки получают выгиб f_0 , противоположный прогибу от внешних нагрузок.

$$f_0 = M_0 l^2 / 8EI_{zt} \quad (1)$$

где: M_0 – момент усилий предварительного напряжения в исходном элементе (тавре); l – пролет балки; EI_{zt} – жесткость исходного элемента ($EI_{zt} = EI_z / 1,987$); EI_z – жесткость двутавра.

Величина выгиба $f_0 \approx l/400$.

Применение предварительно напряженных балок (ПНБ) в качестве ригелей стального каркаса и устройство по ним монолитного безреберного покрытия позволяет создать монолитные пологие оболочки, обладающие повышенной несущей способностью по сравнению с плоскими перекрытиями. Однако устройство перекрытий по ПНБ, имеющим обратный выгиб

$f_0 \approx l / 400$, будет создавать слишком пологие оболочки (вспарушенные плиты) практически приближающиеся к плоским плитам..

Для придания плите на основе ПНБ конфигурации пологой оболочки, после изготовления конструкции необходимо увеличить ее начальный выгиб. Достичь желаемого результата можно дополнительным пригрузением балки усилиями, увеличивающими ее начальный выгиб. При этом предварительные сжимающие нормальные напряжения σ_{fv} в «верхнем» пояском листе готовой балки будут снижаться; предварительные нормальные растягивающие напряжения σ_{wv} в «верхней» зоне стенки и соответствующие сжимающие напряжения в «нижней» зоне σ_{wn} будут увеличиваться. «Нижний» поясной лист нагружен только дополнительными нормальными напряжениями.

Такое напряженное состояние стенки ПНБ создаст очаги пластических деформаций в зонах, находящихся у поясных листов. Однако упругие деформации материала поясных листов, изготовленных из высокопрочной стали, будут сдерживать рост пластически деформаций стенки. В процессе работы ПНБ на внешние нагрузки очаги пластичности будут «закрывать» и несущая способность предварительно напряженных дополнительно выгнутых балок снижаться не будет.

Напряженное состояние ПНБ на стадии ее догружения представлено на рис. 1.

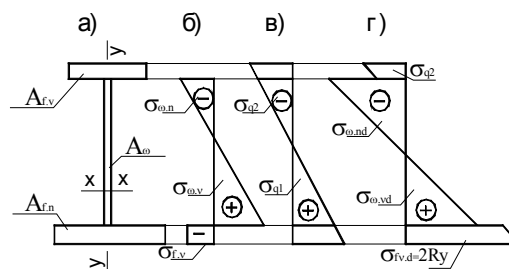


Рис. 1. Эпюры нормальных напряжений: а – схема балки; б – нормальные напряжения в поперечном сечении балки перед догружением; в – эпюра догружающих напряжений; г – суммарная эпюра нормальных напряжений в сечении ПНБ

Из [1] известно, что в процессе предварительного напряжения исходного элемента (тавра) в «верхнем» пояском листе получены сжимающие нормальные напряжения $\sigma_{fv} = -R_y / (2K + 1)$; в «верхней» зоне стенки $\sigma_{wv} = 2R_y K / (2K + 1)$; в «нижней» зоне стенки получены сжимающие нормальные $\sigma_{wn} = -R_y / (2K + 1)$ $K = 1,175$ – коэффициент асимметрии сечения [1].



В процессе догружения ПНБ следует добиться, чтобы суммарные нормальные напряжения в «верхнем» пояском листе были равны $\sigma_{g1} = 2R_y$ (σ_{g1} – эксплуатационные напряжения в догружаемой ПНБ).

При этом в «верхней» зоне стенки напряжения окажутся равными:

$$\sigma_{wvd} = 2R_y - \sigma_{wv} = 2R_y - R \frac{2K}{(2K+1)} = 2R_y \frac{(K+1)}{(2K+1)}. \quad (2)$$

Напряжения в «нижней» зоне ПНБ:

$$\sigma_{fn.d} = \sigma_{g2}; \quad \sigma_{wn.d} = \sigma_{g2} + \sigma_{wn}. \quad (3)$$

Учитывая понятие асимметрии сечения $K = \sigma_{g1} / \sigma_{g2}$ и принимая во внимание, что $K = 1,175$, эксплуатационное нормальное напряжение в «нижней» зоне ПНБ будет равно:

$$\sigma_{g2} = \sigma_{g1} / K = 2R_y / K = 1,7R_y. \quad (4)$$

Следовательно, нормальные напряжения в «нижней» зоне стенки ПНБ с учетом ее догружения окажутся равными:

$$\sigma_{wn.d} = 2R_y / K + R_y \frac{K}{(2K+1)} = R_y \frac{2+K(4+K)}{K(2K+1)}. \quad (5)$$

Момент внешних нагрузок, создающий дополнительный выгиб $f_{0,d}$, должен быть равным:

$$M_{0,d} = W_{zv} \cdot 2R_y = 2R_y \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{AKh}{(K+1)} = 1,333 \cdot \frac{AKR_y h}{(K+1)}, \quad (6)$$

где: W_{zv} – момент сопротивления верхней зоны ПНБ.

Указанный момент создаст дополнительный выгиб:

$$f_{0,d} = \frac{5}{24} \cdot \frac{M_{0,d} l^2}{EI_z} = 0,416656 \cdot \frac{R_y}{E} \cdot \frac{l^2 (K+1)}{h}. \quad (7)$$

В процессе создания дополнительного выгиба возникает вероятность появления в приопорной зоне ПНБ больших касательных напряжений, которые в совокупности с возросшими нормальными напряжениями могут создать дополнительные очаги пластичности в стенке балки. Для оценки напряженно-деформированного состояния ПНБ определим эквивалентную дополнительному прогибу равномерно распределенную нагрузку.

Основанием для поиска может быть равенство:

$$ql^2 / 8 = 1,3333 \cdot AKR_y h / (K+1),$$

из которого следует, что:

$$q_{экс} = 10,6664 \cdot \frac{AKR_y h}{l^2 (K+1)}. \quad (8)$$

Сдвигающее усилие, соответствующее равномерно распределенной эквивалентной нагрузке, оказывается равным:

$$Q_{\text{эKB}} = 5,3332 \cdot \frac{AKR_y h}{l \cdot (K + 1)}. \quad (9)$$

В таком случае касательное напряжение:

$$\tau_{\text{эKB}} = Q_{\text{эKB}} / A = 5,3332 \cdot \frac{KR_y h}{l \cdot (K + 1)}. \quad (10)$$

Как известно, приведенные напряжения определяются зависимостью:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{\text{wв.д}}^2 + 3\tau_{\text{эKB}}^2} \leq 1,15 \cdot R_y \gamma_c, \quad (11)$$

а местная устойчивость стенки проверяется по формуле:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{cp}}}{\sigma_{\text{cr}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\text{cp}}}{\tau_{\text{cr}}}\right)^2} \leq \gamma_c, \quad (12)$$

где: $\sigma_{\text{cp}}, \tau_{\text{cp}}$ – средние нормальные и касательные напряжения; $\sigma_{\text{cr}}, \tau_{\text{cr}}$ – критические нормальные и касательные напряжения.

Средние нормальные σ_{cp} и касательные τ_{cp} определяются между центрами тяжести полуэпюр максимальных моментов M_x и поперечных нагрузок Q_x (рис. 2).

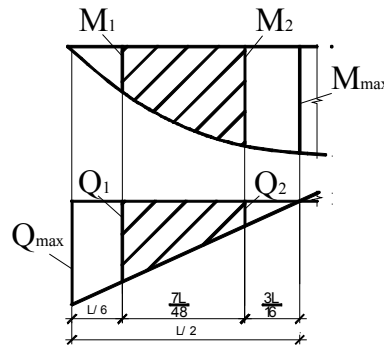


Рис. 2. Средние значения внешних усилий

Среднее значение момента внешних нагрузок:

$$M_{\text{sr}} = (M_1 + M_2) / 2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{ql^2}{12} - \frac{ql^2}{72} \right) + \left(\frac{15ql^2}{96} - \frac{225ql^2}{4608} \right) \right] = 0,08843ql^2 \quad (13)$$

Средние нормальные напряжения:

$$\sigma_{\text{sr}} = M_{\text{sr}} / W_{\text{xv}} = 0,1326 \frac{ql^2 (K + 1)}{AKh}. \quad (14)$$

Средняя поперечная нагрузка:



$$Q_{sr} = 0,5 \left[\frac{15ql}{96} + \frac{3ql}{16} \right] = 0,171875 \cdot ql. \quad (15)$$

Средние сдвигающие напряжения:

$$\tau_{sr} = Q_{sr} / A = 0,171875 \cdot \frac{ql}{A}. \quad (16)$$

Критические нормальные и касательные напряжения в догруженных предварительно напряженных балках определяются зависимостями, приведенными в СНиП II-23-81*. При определении указанных напряжений следует учитывать, что в поясах предварительно напряженных балок применена сталь, расчетное сопротивление которой в два раза превышает соответствующее сопротивление материала стенки. Это означает, что возможные пластические деформации материала стенки будут сдерживаться упругими деформациями материала поясных листов и, следовательно, в соответствии с диаграммой Прандтля, максимальные нормальные напряжения в стенке не будут превышать предела текучести материала стенки.

Проверка критических напряжений по п. 7.4.* СНиП II-23-81* позволяет установить, что местная устойчивость стенки предварительно напряженной балки в процессе ее догрузки будет обеспечена.

Приведенные напряжения, вычисленные по зависимости (11), меньше допустимых на 30,8 %.

Выгиб $f_{o,d}$, полученный на стадии догрузки предварительно напряженной балки, может быть сохранен при условии, что по балке будет установлено некоторое анкерное устройство. Роль его может выполнить швеллер, присоединенный к «верхнему» поясу ПНБ, позволяющий увеличить геометрических параметров сечения элемента.

Поскольку балки будут выполнять роль диафрагм пологих оболочек, необходимо обеспечить сцепление верхнего пояса балки с бетоном покрытия оболочки. Верхний пояс ПНБ усилим швеллером с дополнительными ребрами жесткости, которые будут выполнять роль шпонок.

Геометрические размеры и параметры ПНБ, усиленной швеллером, показаны на рис. 3.

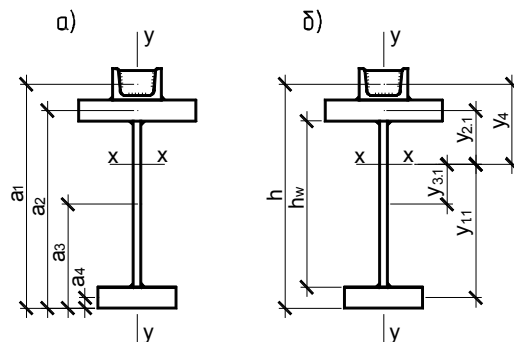


Рис. 3. Параметры сечения догруженной и усиленной ПНБ



Центр тяжести сечения ПНБ:

$$y_{\text{ит}} = \frac{A_{\text{shv}}a_1 + A_{\text{fv}}a_2 + A_{\text{w}}a_3 + A_{\text{fn}}a_4}{\sum A}. \quad (17)$$

Момент инерции сечения балки:

$$I_{\text{zd}} = A_{\text{shv}}y_4^2 + A_{\text{fv}}y_{2.1}^2 + A_{\text{fn}}y_{1.1}^2 + A_{\text{w}}y_{3.1}^2 + A_{\text{w}}h_w^2/12. \quad (18)$$

Моменты сопротивления сечения балки:

1 крайней верхней зоны сечения:

$$W_{\text{zvd}} = I_{\text{zd}} / y_4, \quad (19)$$

2 крайней нижней зоны сечения:

$$W_{\text{znd}} = I_{\text{zd}} / y_{1.1}. \quad (20)$$

Дополнительный момент M_{od} , вычисляемый формулой (6), будет пытаться вернуть в исходное положение усиленную и дополнительно изогнутую ПНБ. При этом в балке возникнет выгиб:

$$f_{02.d} = M_{od}l^2 / 8EI_{0d} \quad (21)$$

Окончательный выгиб предварительно напряженной балки вычисляется формулой:

$$\sum f_{03d} = f_o + (f_{o2d} - f_{o3d}). \quad (22)$$

При формировании окончательного выгиба $\sum f_{03d}$ момент M_{od} следует рассматривать как внешнее усилие, приложенное по концам стержня. Следовательно, нормальные напряжения в любом сечении по длине ПНБ могут быть вычислены формулами:

1 в верхней зоне ПНБ:

$$\sigma_{xv} = -M_{od} / W_{\text{zvd}}, \quad (23)$$

2 в нижней зоне ПНБ:

$$\sigma_{xn} = M_{od} / W_{\text{znd}}. \quad (24)$$

Окончательные напряжения в соответствующих сечениях предварительно напряженной балки на стадии ее изготовления определяются выражениями:

$$-\sigma_{\text{shv}} = -\sigma_{xv} = -M_{od} / W_{\text{zvd}}; \quad (25)$$

1 в верхнем пояском листе

$$\sigma_{\text{fv.2}} = 2R_y - M_{od} / W_{\text{zvd}}; \quad (26)$$

2 в верхней зоне стенки

$$\sigma_{\text{wv.2}} = \sigma_{\text{wv.1}} - M_{od} / W_{\text{zvd}}; \quad (27)$$

3 в нижней зоне стенки

$$\sigma_{\text{wn.2}} = -\sigma_{\text{fn.d}} + M_{od} / W_{\text{znd}}; \quad (28)$$

4 в нижнем пояском листе



$$\sigma_{fn.2} = -\sigma_{fn.d} + \sigma_{g2}. \quad (29)$$

Заметим, что напряжения по выражениям (26)...(29) противоположны по направлению напряжения, вызванного внешними нагрузками и, следовательно, будут повышать несущую способность предварительно напряженной балки. Причем чем выше уровень указанных напряжений, тем больше предполагаемый эффект.

В неблагоприятном напряженном состоянии находится присоединенный к верхнему поясу швеллер. Под действием внешних эксплуатационных нагрузок в нем могут возникнуть напряжения, близкие к пределу текучести. Однако это не представляет опасности для снижения несущей способности предварительно напряженной балки, поскольку продольные деформации швеллера равны соответствующим упругим деформациям поясного листа из высокопрочной стали.

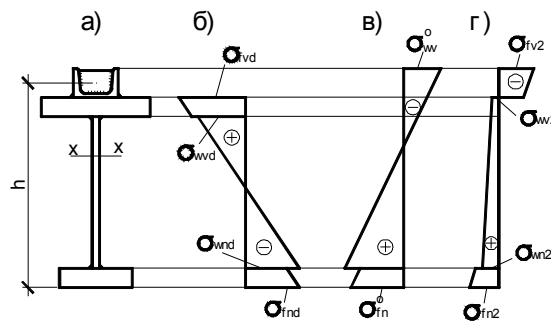


Рис. 4. Нормальные напряжения в догруженной ПНБ на стадии ее изготовления: а – схема сечения ПНБ; б – нормальные напряжения догружения балки; в – нормальные напряжения от обратного упругого выгиба; г – суммарные напряжения

Напряжения в ПНБ на стадии изготовления и выгиб f_o , полученный при этом [1], дополнительные напряжения и выгиб ПНБ по формулам (4)...(7), а также окончательный выгиб и нормальные напряжения по зависимостям (22)...(29) представлены на рис. 4.

Видно, что по поперечному сечению догруженной предварительно напряженной балки формируются нормальные напряжения, растягивающие все сечение, и только швеллер, присоединенный к верхнему поясу ПНБ, оказывается сжат.

Можно ожидать, что при нагружении ПНБ внешней нагрузкой большая часть ее поперечного сечения будет находиться в весьма благоприятном напряженном состоянии, а применение таких балок в качестве диафрагм полых оболочек позволит создать монолитные перекрытия (покрытия), обеспечивающие жесткость каркаса и снижение его массы.



Библиографические ссылки

1. *Кравчук В. А.* Конструкции, предварительно напряженные без затяжек. Оптимальное проектирование. – Хабаровск: Изд-во Хабаровского гос. техн. ун-та, 2010.
2. *СНиП II-23-81**. Стальные конструкции. Госстрой России, ГУП ЦПК, 1999.