

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФГБОУ ВПО
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра металлических конструкций и испытаний сооружений

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЁННОЙ БАЛКИ**

**Практикум по курсовому проектированию по дисциплине
«Металлические конструкции».**

Для студентов направления подготовки 08.04.01 - «Строительство».

**Магистерская программа «Теория и проектирование несущих и
ограждающих конструкций зданий и сооружений».**

Казань 2016

Практикум по курсовому проектированию по дисциплине «Металлические конструкции». Для студентов направления подготовки 08.04.01 - «Строительство». Магистерская программа «Теория и проектирование несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений» / Сост.: Ефимов О.И., Вахтель Р.Р., Казань: КГАСУ, 2016.- 20с.

В данном практикуме изложены вопросы проектирования предварительно напряжённых балок. Рассмотрена балка с расположением высокопрочной затяжки вдоль нижней полки. Практикум предназначен для курсового проектирования по дисциплине «Металлические конструкции». Для студентов направления подготовки 08.04.01 - «Строительство». Магистерская программа «Теория и проектирование несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений».

Рецензент: дтн., профессор Кузнецов И.Л.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Исходные данные для проектирования.....	4
2. Компоновка сечения предварительно напряжённой стальной балки.	6
3. Назначение усилия предварительного натяжения высокопрочной затяжки и её длины.	14
4. Проверка приемлемости принятого сечения предварительно напряжённой балки.	15
4.1. Определение усилия самонатяжения высокопрочной затяжки.....	15
4.2. Максимальные уровни нормальных напряжений в крайних фибрах сечения балки и уровень нормальных напряжений в затяжке.	17
4.3. Деформативность предварительно напряжённой балки.....	19
5. Литература.....	20

Введение

Путем обеспечения ненаступления II группы предельных состояний большепролётных балочных конструкций является применение того или иного способа регулирования усилий. Здесь чаще всего используется предварительное напряжение балки посредством установки на неё натягиваемых высокопрочных затяжек, располагаемых вдоль растянутой полки. При этом, нормативное временное сопротивление материала высокопрочных затяжек превышает аналогичный показатель материала балки в 3÷5 раз.

Так как высокопрочная затяжка принимает на себя выполнение большей части функций нижней полки балки, значительно сокращаются размеры последней и, как следствие, снижение материалоемкости балки в целом.

Область применения предварительно напряжённых балок – большепролётные стропильные конструкции перекрытий и покрытий.

1. Исходные данные для проектирования.

В рамках курсового проектирования следует разработать стропильную, свободно опёртую на колонны, предварительно напряжённую балку покрытия.

Исходные данные для проектирования выбираются по указаниям таблиц 1.1 и 1.2. По таблице 1.2 в соответствии двум последним цифрам номера зачётной книжки выбирается четырёхзначный шифр, затем из таблицы 1.1 по этому шифру устанавливаются индивидуальные исходные данные.

Таблица 1.1.

Исходные данные для проектирования

Порядковый номер цифры в шифре	Наименование исходного параметра	Цифра шифра		
		1	2	3
1	Пролёт (м)	12	15	18
2	Сталь балки по ГОСТ 27772	C255	C275	C345
3	Снеговой район	IV	V	VI
4	Нормативная нагрузка от собственного веса вышележащих конструкций(кг/м ²)*	200	250	300

* - коэффициент надёжности по этой нагрузке $\gamma_f=1,1$.

Общие данные для проектирования: климатический район строительства П4; материал рёбер, направляющих колец и упоров высокопрочной затяжки балки - С245 по ГОСТ 27772; материал проволок каната высокопрочной затяжки выбирается самостоятельно (см. прим. к табл. 2.2); шаг стропильных балок - бм; в местах крепления прогонов, устанавливаемых с шагом 3м, верхний пояс стропильной балки закреплён от смещения из её плоскости; применять ручную электродуговую сварку по ГОСТ 5264.

Таблица 1.2.

Выбор шифра для таблицы 1.1.

Предпоследняя цифра номера зачётной книжки	Последняя цифра номера зачётной книжки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
1	3111	3211	3333	3232	3131	3312	2222	2113	1312	1211	
2	3312	3222	3332	3231	3123	2322	2221	3211	1311	1133	
3	2232	2213	2223	3223	3122	2321	2213	2111	1233	1132	
4	1131	1232	3323	2131	3121	2313	2211	1333	3331	2112	
5	1221	2231	1112	3221	1112	2312	2133	1332	1231	1123	
6	3122	1331	3321	3213	3112	2311	2132	3233	1223	1122	
7	3211	3231	3313	3212	3111	2233	3322	1323	1222	2322	
8	2112	1332	2133	2323	2333	3332	2123	1322	3113	1113	
9	1312	1321	3311	2213	2332	2231	2122	3331	1213	1112	
0	2313	2221	3233	3132	2331	2223	2121	1313	1212	2312	

2. Компоновка сечения предварительно напряжённой стальной балки.

При компоновке будущей предварительно напряжённой стальной балки следует использовать несимметричное двутавровое сечение с более развитым верхним поясом (см. рис.2.1.).

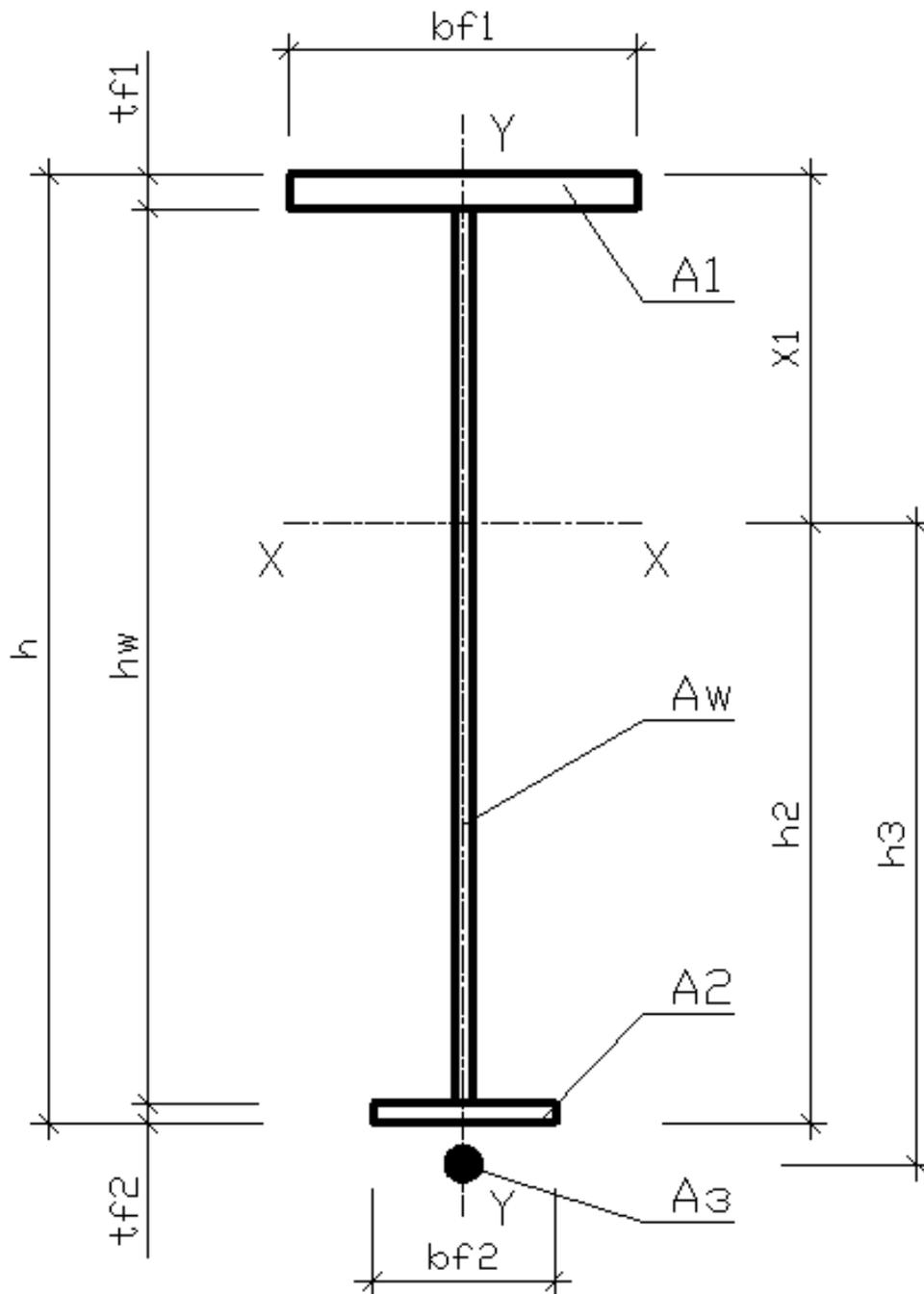


Рис.2.1. Сечение предварительно напряжённой балки.

В результате статического расчета балки устанавливаются расчетный изгибающий момент M_p и расчетная перерезывающая сила Q_p . При этом приблизительные нормативные значения нагрузки от собственного веса самой балки можно назначить по эмпирической формуле

$$g_6 = \frac{M_0 \psi \rho}{0,3hR_y (10^3)} \text{ (кН / м)}, \quad (2.1)$$

Здесь: M_0 – максимальный изгибающий момент в балочном аналоге от суммарного действия всех погонных расчётных нагрузок, кроме нагрузки от собственного веса самой балки; ψ – конструктивный коэффициент для предварительно напряжённых балок принимаемый в интервале 1,15÷1,25; R_y – в МПа; ρ – плотность стали в кН/м² (см. табл. Г.10 [1]); на данном этапе высота балки $h \approx (1/30 \div 1/20)L$; L – пролёт балки.

Параметр, характеризующий используемые материалы, определяется соотношением

$$\mu = \frac{E_3 R_y}{E R_{dh}}, \quad (2.2)$$

где: E – модуль упругости материала самой балки (см. табл. Г.10 [1]); R_y – расчетное сопротивление сжатию, растяжению и изгибу материала полка самой балки назначенное по пределу текучести (см. табл. Б.5 [1]); E_3 – модуль упругости материала высокопрочной затяжки (см. табл. Г.10 [1]); R_{dh} – расчетное сопротивление растяжению материала высокопрочной затяжки (см. п. 6.8 [1] и прим. к табл. 2.2.). Для большинства применяемых предварительно-напряженных стальных балок I-го класса диапазон изменения этого параметра от 0,1 до 0,4.

В таблице 2.1 приведены наиболее рациональные значения показателя асимметрии двутаврового сечения самой балки

$$B = \frac{h_2}{h_1} = \frac{W_1}{W_2} \quad (2.3)$$

и параметра «С», характеризующего рациональность самого сечения. Здесь W_1 и W_2 моменты сопротивлений крайних фибр соответственно верхней и нижней полок относительно центральной оси «Х-Х».

Таблица 2.1.

Рациональные значения параметров «В» и «С» в случае загрузки балки равномерно распределенной нагрузкой

μ	$\gamma_{f1}=\gamma_{f2}=1$		$\gamma_{f1}=1,1 \quad \gamma_{f2}=0,9$	
	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
0,1	1,83	0,344	1,69	0,329
0,2	1,98	0,357	1,80	0,341
0,3	2,16	0,371	1,95	0,354
0,4	2,36	0,384	2,12	0,367

Здесь γ_{f1} и γ_{f2} – коэффициенты надёжности по нагрузке для нагрузки от предварительного напряжения: γ_{f2} – используется при расчёте элементов конструкции, в которых предварительное напряжение создаёт поле напряжений обратное по знаку полю напряжений от эксплуатационной нагрузки; γ_{f1} – используется при расчёте элементов конструкции, в которых предварительное напряжение создаёт поле напряжений, совпадающее по знаку полю напряжений от эксплуатационной нагрузки. При постоянном автоматическом инструментальном контроле над создаваемым усилием предварительного напряжения $\gamma_{f1}=\gamma_{f2}=1$, в противном случае $\gamma_{f1}=1,1$ и $\gamma_{f2}=0,9$.

По критерию минимума веса балки, площадь ее поперечного сечения должна составлять

$$A = \sqrt[3]{\frac{M_p^2}{C^2 R_y^2 \lambda_w}}, \quad (2.4)$$

где $\lambda_w = \frac{h_w}{t_w}$ – гибкость стенки балки, принимаемая в пределах от 80 до 200.

При предварительном назначении гибкости стенки следует иметь в виду, что принятие меньших ее значений дает сечение меньшей высоты, «устойчивую» стенку, но и больший вес балки.

Принятие ее больших значений приводит к большей высоте балки, меньшему ее весу, но и к «неустойчивой» стенке, для обеспечения местной устойчивости которой потребуются (что следует ожидать) поперечные, а при $\lambda_w \geq 180$ и продольные ребра жесткости.

Для получения наиболее рационального решения желательно следующее распределение этой площади (2.4) по элементам сечения:

- площадь поперечного сечения стенки

$$A_w = mA; \quad (2.5)$$

- площадь поперечного сечения верхней полки

$$A_1 = A\left(\frac{B}{B+1} - \frac{m}{2}\right); \quad (2.6)$$

- площадь поперечного сечения нижней полки

$$A_2 = A\left(\frac{1}{B+1} - \frac{m}{2}\right). \quad (2.7)$$

Здесь m – параметр, характеризующий распределение материала в сечении, который в рациональных конструктивных решениях предварительно-напряженных балок имеет значение 0,55. При этом предпочтительные значения площади поперечного сечения высокопрочной затяжки и высоты сечения самой балки определяются выражениями

$$A_3 = \frac{R_y}{R_{dh}}(A_1 - A_2), \quad (2.8)$$

$$h = \sqrt{Am\lambda_w}. \quad (2.9)$$

Полученные площади поперечных сечений элементов балки дают лишь общее представление о распределении материала по сечению. Завершающим этапом компоновки сечения является назначение конкретных размеров сечений верхней и нижней полок, стенки и затяжки.

В первую очередь устанавливаются размеры стенки. Ориентируясь на высоту сечения балки h (2.9), назначают такую высоту стенки $h_w \approx h - (40 \div 50 \text{ мм})$, которая бы соответствовала ширине листовой стали по ГОСТ 82-70 «Сталь широкополосная универсальная» или по ГОСТ 19903-74* «Сталь горячекатаная толстолистовая». При использовании последней следует учитывать отходы на строжку кромок.

Если $t_w \leq 25 \text{ мм}$, отходы составляют 10 мм. Далее устанавливается минимально возможная толщина стенки из условия обеспечения её прочности при работе на срез

$$t_w \geq 1,5 \frac{Q_p}{h_w R_s \gamma_c}, \quad (2.10)$$

При принятии размеров верхней полки руководствуются следующим:
из конструктивных соображений $b_{f1} \geq 250 \text{ мм}$;

- из-за неравномерного распределения нормальных напряжений по ширине полки $b_{f1} \leq 600 \text{ мм}$;
- из соображений по обеспечению устойчивости плоской формы изгиба балки в стадии эксплуатации $b_{f1} \geq \frac{1}{5} h$;
- из соображений по обеспечению местной устойчивости свеса полки при упругой работе материала в стадии эксплуатации

$$\frac{b_{f1} - t_w}{2t_{f1}} \leq 0,5 \sqrt{\frac{E}{R_y}};$$

- из конструктивных соображений $t_{f1} \geq t_w$;
- из условия свариваемости полки со стенкой $t_{f1} \leq 3t_w$;
- сортаментом на горячекатаную широкополосную универсальную листовую сталь по ГОСТ 82-70*.

Аналогично, при принятии размеров нижней полки учитывают следующее:

- из конструктивных соображений $b_{f2} \geq 220 \text{ мм}$;
- из-за неравномерного распределения нормальных напряжений по ширине полки $b_{f2} \leq 600 \text{ мм}$;
- из соображений по обеспечению местной устойчивости свеса полки при упругой работе материала в стадии создания предварительного напряжения (когда эта полка испытывает сжатие)

$$\frac{b_{f2} - t_w}{2t_{f2}} \leq 0,5 \sqrt{\frac{E}{R_y}};$$

- из конструктивных соображений $t_{f2} \geq t_w$;
- из условия свариваемости полки со стенкой $t_{f2} \leq 3t_w$;
- сортамент на горячекатаную широкополосную универсальную листовую сталь по ГОСТ 82-70*.

По площади поперечного сечения затяжки из ГОСТ-ов 3064, 7669, 14954 подбирается подходящий канат (см. таблицу 2.2).

Таблица 2.2.

Сокращённый перечень стальных канатов

Диаметр каната, мм	Расчётная площадь сечения всех проволок, мм²	Расчётный вес 1000м каната, кг	Диаметр каната, мм	Расчётная площадь сечения всех проволок, мм²	Расчётный вес 1000м каната, кг
Канаты одинарной свивки типа ТК конструкции 1x37 (1+6+12+18) по ГОСТ 3064					
Коэффициент понижения разрывного усилия каната по отношению к суммарному разрывному усилию проволок 0,81÷0,85					
12	84,26	719	20	228,74	1956
12,5	94,44	806	21	262,51	2240
14	116,89	993,6	22	298,52	2550
15,5	141,37	1200	24	337,03	2875
17	168,17	1425	27	420,84	3590
18,5	197,29	1685			
Канаты двойной свивки типа ЛК конструкции 6x36 (1+7+7/7+14)+7x7 (1+6) по ГОСТ 7669					
Коэффициент понижения разрывного усилия каната по отношению к суммарному разрывному усилию проволок 0,75÷0,8					
28	373,25	3495	45,5	991,84	9045
30	422,76	3890	49	1163,04	10600
32,5	487,48	4445	52	1304,05	11850
35,5	580,11	5290	57	1520,73	13900
36,5	646,37	5895	61,5	1782,25	16250
39	716,29	6530	64	1880,27	17148
41	796,83	7265	68	2058,71	18775
42	843,9	7965	72	2316,38	21125

Канаты двойной свивки типа ЛК конструкции 6x19 (1+6+6/6+14)+7x7 (1+6) по ГОСТ 14954					
Коэффициент понижения разрывного усилия каната по отношению к суммарному разрывному усилию проволок 0,81÷0,85					
8	29,68	272,5	23	247,17	2265
8,8	35,7	327,5	25	279,27	2560
9,7	42,3	388	27	337,27	3090
11	53,58	491,5	29,5	404,55	3705
12	61,92	568	31	449,85	4125
12,5	70,91	650,5	33	497,7	4565
14	86,36	792	36	589,81	5410
15	100,48	921,5	38,5	674,88	6190
16,5	121,24	1115	41	768,45	7050
18	143,99	1320	46,5	988,71	9065
19	165,68	1520	49,5	1117,11	10250
20,5	192,11	1765	55	1379,27	12650
22	217,06	1990			

Примечание - для канатов типа ТК и ЛК нормативное временное сопротивление проволок составляет:

$R_{un}=120\text{кГ/мм}^2$; $R_{un}=140\text{кГ/мм}^2$; $R_{un}=160\text{кГ/мм}^2$; $R_{un}=170\text{кГ/мм}^2$; $R_{un}=180\text{кГ/мм}^2$; $R_{un}=190\text{кГ/мм}^2$; $R_{un}=200\text{кГ/мм}^2$.

3. Назначение усилия предварительного натяжения высокопрочной затяжки и её длины.

Усилие предварительного натяжения высокопрочной затяжки «Х» назначается из условия обеспеченной устойчивости нижнего пояса балки из её плоскости на стадии создания предварительного напряжения. Условие устойчивого состояния нижней полки из плоскости балки может быть представлено в виде неравенства

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_{f1} X}{A} + \frac{\gamma_{f1} X h_3}{W_2} \leq \varphi R_y \gamma_c \quad (3.1)$$

Здесь: A – по (2.4); W_2 – момент сопротивления крайних фибр нижней полки балки; φ – коэффициент устойчивости нижней полки из плоскости балки как центрально сжатого с шарнирно закреплёнными концами стержня с гибкостью $\lambda_{f2y}=40\div 50$.

Коэффициент устойчивости устанавливается по табл. Д.1. [1] в зависимости от типа сечения (см. табл. 7 [1]) и условной гибкости

$$\bar{\lambda}_{f2y} = \lambda_{f2y} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$$

Так как высокопрочная затяжка пропускается сквозь направляющие кольца, закреплённые на нижнем поясе, из значения λ_{f2y} можно получить максимально возможное расстояние между кольцами «а». Так как

$$\lambda_{f2y} = \frac{1,2a}{i_{f2y}}, \text{ то } a \leq \frac{\lambda_{f2y} i_{f2y}}{1,2}$$

Здесь коэффициент 1,2 учитывает то, что направляющее кольцо неплотно обхватывает канат высокопрочной затяжки.

На практике, усилие предварительного натяжения затяжки создаётся несколько большим с учётом релаксации каната затяжки и податливости анкерных устройств за счёт обмятия

$$X_k = \frac{X}{0,95} + \Delta_a \frac{A_3 E_3}{l_3} \quad (3.2)$$

Здесь: 0,95 - коэффициент релаксации каната затяжки; $\Delta_a=2\text{мм}$ – податливость анкерных устройств с прокладками; l_3 – длина высокопрочной затяжки.

Для определения длины затяжки следует установить «теоретическое место обрыва затяжки» путём поиска расположения таких сечений балочного аналога, до которых его несущая способность достаточна (см. рис. 3.1.), что определяется решением квадратного уравнения (2.3).

$$M_z = \frac{qL}{2} z - \frac{qz^2}{2} = W_2 R_y \gamma_c \quad (3.3)$$

Здесь q – полная расчётная погонная нагрузка на балку.

Для повышения надёжности работы балки, при изготовлении найденное значение « z » уменьшается на 500мм.

4. Проверка приемлемости принятого сечения предварительно напряжённой балки.

4.1. Определение усилия самонатяжения высокопрочной затяжки.

Как правило, в проектное положение балка устанавливается с уже созданным предварительным напряжением. При приложении к такой балке полной эксплуатационной нагрузки усилие натяжения затяжки увеличивается. Приращение усилия натяжения затяжки « X_1 » называется «усилием самонатяжения затяжки».

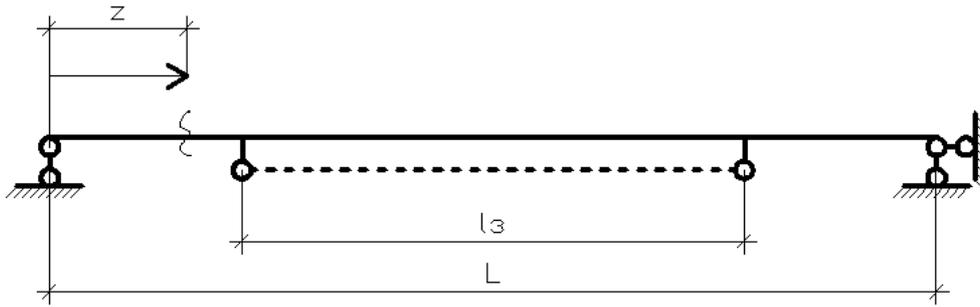


Рис. 3.1. Расчётная схема балочного аналога.

Используя принцип независимости действия сил (принцип суперпозиций), рассмотрим балку, содержащую ненапрянутую затяжку и нагруженную полной эксплуатационной нагрузкой.

Исходная система (см. рис. 4.1.а) один раз статически неопределима. Раскрытие статической неопределимости здесь наиболее просто реализуется «методом сил». Основная система «метода сил» представлена на рис. 4.1.б, где рассечена затяжка. Каноническое уравнение «метода сил»

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0, \quad (4.1)$$

где: δ_{11} – взаимное сближение (удаление) концов разрушенной затяжки при действии на основную систему $X_1=1$ (см. рис. 3.1.в)

$$\delta_{11} = \sum \int_{l_3} \frac{\overline{N}_{li}^2}{E_i A_i} dl + \int_{l_3} \frac{\overline{M}_1^2}{EJ_x} dl; \quad (4.2)$$

Δ_{1p} - взаимное сближение (удаление) концов разрушенной затяжки при действии на основную систему нагрузки q (см. рис. 3.1.в), г)

$$\Delta_{1p} = \int_{l_3} \frac{\overline{M}_1 M_p}{EJ_x} dl. \quad (4.3)$$

Решение уравнения (4.1) и определяет X_1 .

4.2. Максимальные уровни нормальных напряжений в крайних фибрах сечения балки и уровень нормальных напряжений в затяжке.

Нормальное максимальное напряжение в верхней полке предварительно напряжённой балки

$$\sigma_{1\max} = \left| -\frac{\gamma_{f1}X + X_1}{A} - \frac{M_{\max}}{W_1} + \frac{h_3(\gamma_{f2}X + X_1)}{W_1} \right| \leq R_y \gamma_c. \quad (4.4)$$

Нормальное максимальное напряжение в нижней полке предварительно напряжённой балки

$$\sigma_{2\max} = -\frac{\gamma_{f2}X + X_1}{A} + \frac{M_{\max}}{W_2} - \frac{h_3(\gamma_{f2}X + X_1)}{W_2} \leq R_y \gamma_c. \quad (4.5)$$

Если неравенство (4.4) или (4.5) не выполняется, значит, в соответствующей полке появляется текучесть, что недопустимо в балках I-го класса. Сечение балки следует корректировать в сторону увеличения этой полки. Если же, наоборот, неравенство (4.4) или (4.5) выполняется с «запасом» более 5%, сечение балки следует корректировать в сторону уменьшения этой полки.

Нормальное максимальное напряжение в затяжке опосредственно оценивается по разрывному усилию в канате затяжки

$$\gamma_{f1}X + X_1 \leq \frac{N_{\text{разр}}}{\gamma_m} \quad (4.6)$$

Здесь: $N_{\text{разр}}$ – нормативное разрывное усилие каната (см. табл. 2.2); γ_m – коэффициент надёжности по материалу (см. п. 6.9 [1]).

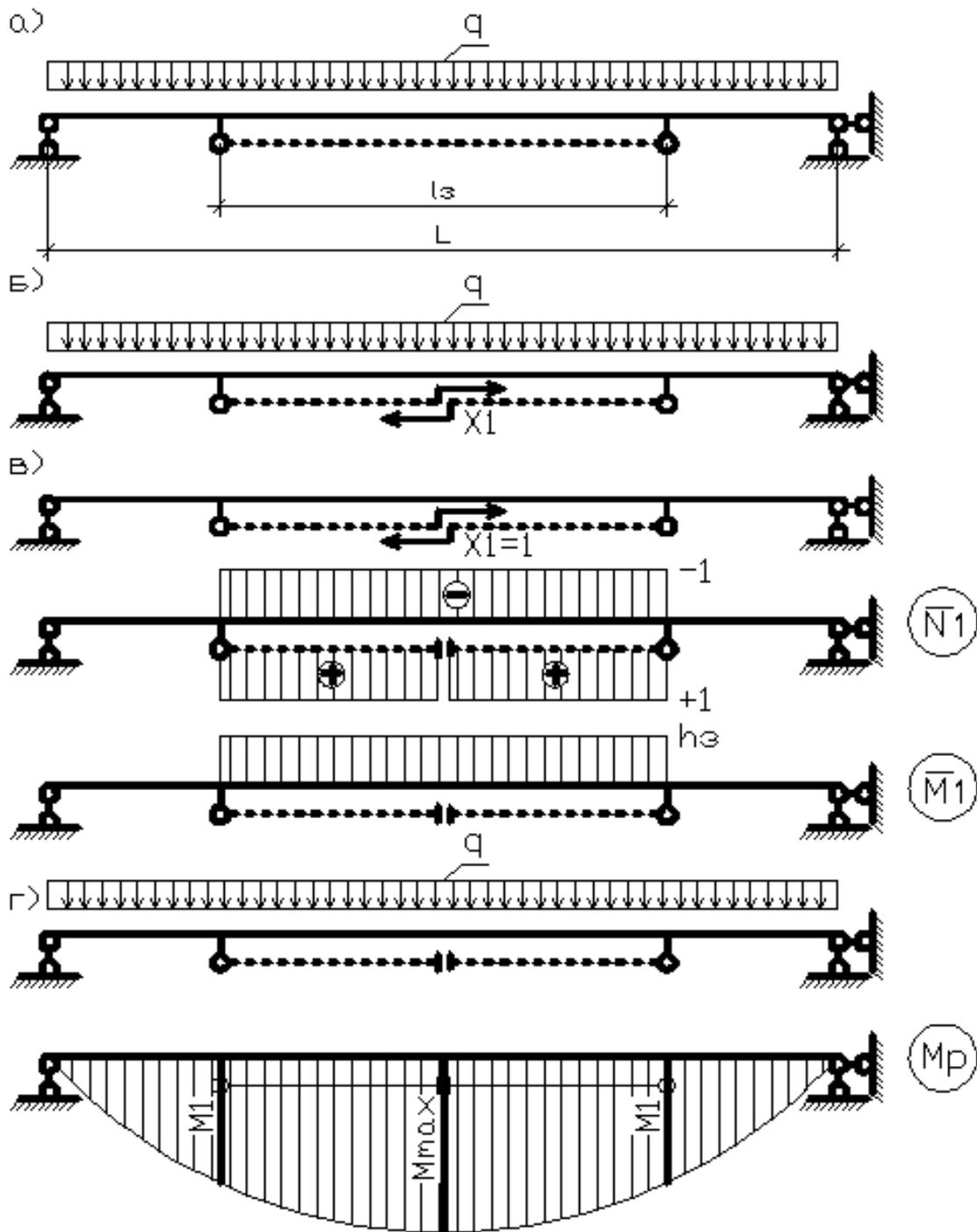


Рис. 4.1. К расчёту предварительно напряжённой балки «методом сил»: а) – исходная система; б) – основная система «метода сил»; в) – загрузка основной системы единичным усилием в затяжке и соответствующие эпюры внутренних усилий.

4.3. Деформативность предварительно напряжённой балки.

На рис.4.2. представлено загрузку основной системы единичным грузом по направлению искомых перемещений для использования в дальнейшем «формулы Мора».

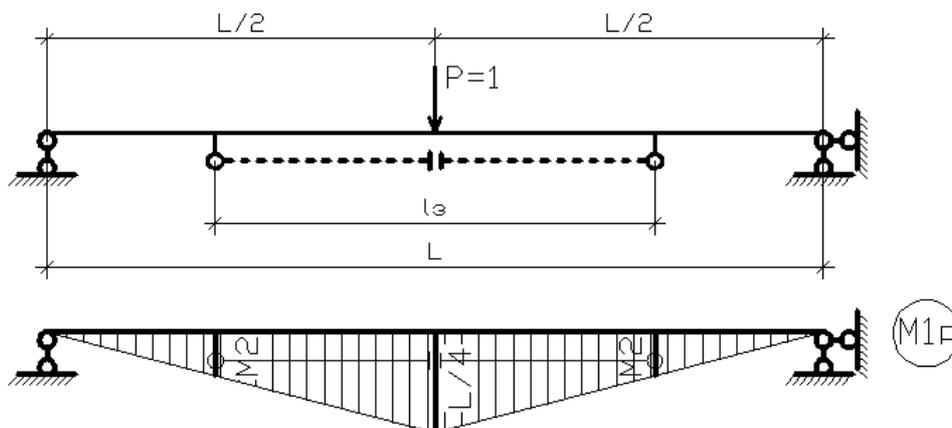


Рис. 4.2. К определению деформативности балки.

Полный прогиб балки может быть представлен в виде

$$\begin{aligned}
 f &= f_q + f_{X+X_1} = \int_L \frac{M_p'' M_{1p}}{EJ_x} dl + \int_{l_s} \frac{(X + X_1) \bar{M}_1 M_{1p}}{EJ_x} dl = \\
 &= \frac{5}{384} \frac{q_{н.п.} L^4}{EJ_x} + \int_{l_s} \frac{(X + X_1) \bar{M}_1 M_{1p}}{EJ_x} \leq [f]
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

где: M_p'' – значения эпюры изгибающих моментов в балочном аналоге при действии на него суммарной нормативной погонной нагрузки $q_{н.п.}$ с учётом пониженной нормативной нагрузки от снега (4/8); $[f]$ – допустимое значение прогиба балки, устанавливаемое по указаниям табл. Е.1 [2].

$$q_{н.п.} = \gamma_n (g_n + 0,7x0,7s)B
 \tag{4.8}$$

Здесь: g_n – нормативная нагрузка от собственного веса вышележащих конструкций; s – расчётное значение снеговой нагрузки, принимаемое для заданного снегового района по указаниям п. 10.1 и таблицы 10.1 [2] в предположении, что коэффициенты c_e , c_t и μ равны 1; B – шаг стропильных балок; γ_n – коэффициент надёжности по ответственности (см. табл.2 [4]).

5. Литература.

1. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*, Москва 2011.
2. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*, Москва 2011.
3. Беленя Е.И. Предварительно напряжённые несущие металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1975.
4. ГОСТ Р 54257-2010 «Надежность строительных конструкций и оснований», Москва 2011.