

2. УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПЕРЕКРЫТИЯ

Требуется усилить железобетонную балку (ригель) перекрытия (рис. 2.1) в связи с увеличением временной нагрузки. Требуемый коэффициент усиления $k=M_1/M=2.123$

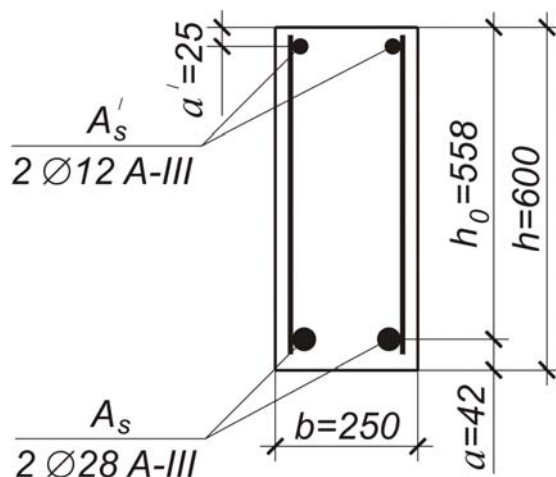


Рис. 2.1. Сечение существующей железобетонной балки

Исходные данные. Ригель разрезной пролетом $l=6$ м, сечением $b \times h = 250 \times 600$ мм. Бетон тяжелый, подвергнутый тепловой обработке, класса В20 ($R_b = 11,5$ МПа; $R_{bt} = 0,9$ МПа; $R_{b,ser} = 15,0$ МПа; $R_{bt,ser} = 1,40$ МПа; $E_b = 24,0 \cdot 10^3$ МПа, см. [4, табл. 13, 12, 18]); нижняя рабочая продольная арматура стержневая $2\text{Ø}28\text{A-III}$ ($R_s = 365$ МПа; $E_s = 20 \cdot 10^4$ МПа; $A_s = 1232$ мм²); верхняя – $2\text{Ø}12\text{A-III}$ ($R_{sc} = 365$ МПа; $A'_s = 226$ мм²).

Выявляем необходимость усиления балки.

• Определяем расчетную нагрузку на 1 м длины ригеля. Нагрузка считается равномерно распределенной. Ширина грузовой площади равна шагу колонн в продольном направлении (пролету плит) $B = l_1 = 6$ м. Подсчет нагрузок на 1 м² перекрытия приведен в примере расчета усиления плиты с круглыми пустотами (см. табл. 1.1).

Расчетная нагрузка:

✓ постоянная от перекрытия

$$g_{\text{пер}} = q \cdot B = 4,26 \cdot 6,0 = 25,56 \text{ кН / м ;}$$

✓ временная

$$v_{\text{пер}} = v \cdot B = 15,0 \cdot 6,0 = 90,0 \text{ кН / м ;}$$

✓ от массы ригеля

$$g_{\text{риг}} = \gamma_f \cdot \rho \cdot b \cdot h = 1,1 \cdot 25 \cdot 0,25 \cdot 0,6 = 4,125 \text{ кН / м};$$

✓ полная

$$q_1 = 25,56 + 90,0 + 4,125 = 119,68 \text{ кН / м}.$$

Расчетный пролет ригеля среднего пролета

$$l_0 = l - h_k - \frac{c}{2} = 6,0 - 0,3 - \frac{0,15}{2} = 5,625 \text{ м},$$

где $h_k = 300 \text{ мм}$ – размер сечения колонны (по заданию); $c = 150 \text{ мм}$ – вылет скрытой консоли.

• Вычисляем расчетный максимальный изгибающий момент в ригеле от действия полной нагрузки:

$$M_1 = \frac{q_1 \cdot l_0^2}{8} = \frac{119,68 \cdot 5,625^2}{8} = 473,34 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

• Находим несущую способность ригеля в пролете (рис. 2.2), выполняя расчет по предельным усилиям.

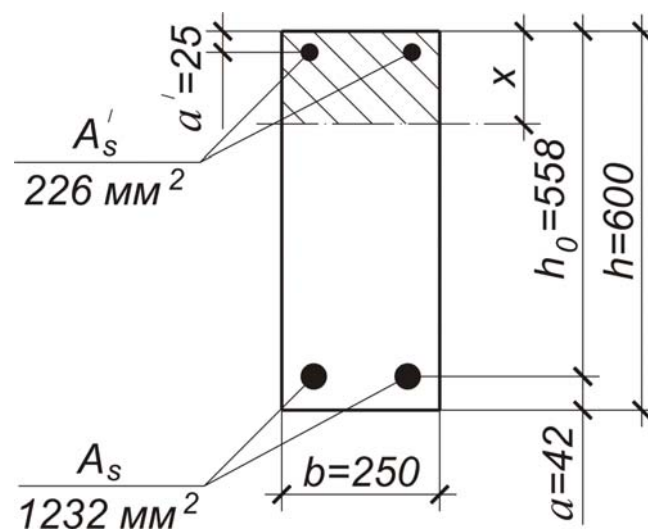


Рис. 2.2. Расчетное нормальное сечение ригеля в пролете

Рабочая высота сечения ригеля

$$h_0 = h - a = 600 - 42 = 558 \text{ мм},$$

где

$$a = a_{3,\min} + \frac{d_s}{2} = 28 + \frac{28}{2} = 42 \text{ мм}.$$

Высота сжатой зоны сечения

$$x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b} = \frac{365 \cdot 1232 - 365 \cdot 226}{11,5 \cdot 0,9 \cdot 250} = 141,9 \text{ мм.}$$

Относительная высота сжатой зоны сечения

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{141,9}{558} = 0,254.$$

Значение $\xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{R_s}{700}} = \frac{0,8}{1 + \frac{365}{700}} = 0,526 > \xi = 0,254.$

Несущая способность нормального сечения

$$M = R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a') = 11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,25 \cdot 0,142 \times \\ \times (0,558 - 0,5 \cdot 0,1419) + 365 \cdot 10^3 \cdot 226 \cdot 10^{-6} \cdot (0,558 - 0,025) = 222,93 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

• Проверяем условие

$$M \geq M_1; \quad 222,93 \text{ кН} \cdot \text{м} < 473,34 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Условие не выполняется; следовательно, необходимо усилить ригель в пролете. Требуемый коэффициент усиления

$$k = \frac{M_1}{M} = \frac{473,34}{222,93} = 2,123. \quad (222,93 \cdot 2,123 = 473,34)$$

2.1. Усиление балки подведением упругой опоры

Выполняем расчет усиления балки подведением дополнительной упругой опоры (упругая опора создается на основе металлической балки) (рис. 2.3).

Перед выполнением работ по усилению ригель максимально разгружают.

1. Определяем величину расчетной погонной нагрузки, прикладываемой к существующей конструкции после ее усиления:

$$q_1 - g = 119,68 - 29,68 = 90,0 \text{ кН / м,}$$

где g – расчетная нагрузка, при которой выполняются работы по усилению.

Если полностью разгрузить ригель, оставив только постоянную нагрузку от конструкций перекрытия, получим:

$$g = g_{\text{пер}} + g_{\text{риг}} = 25,56 + 4,125 = 29,68 \text{ кН / м.}$$

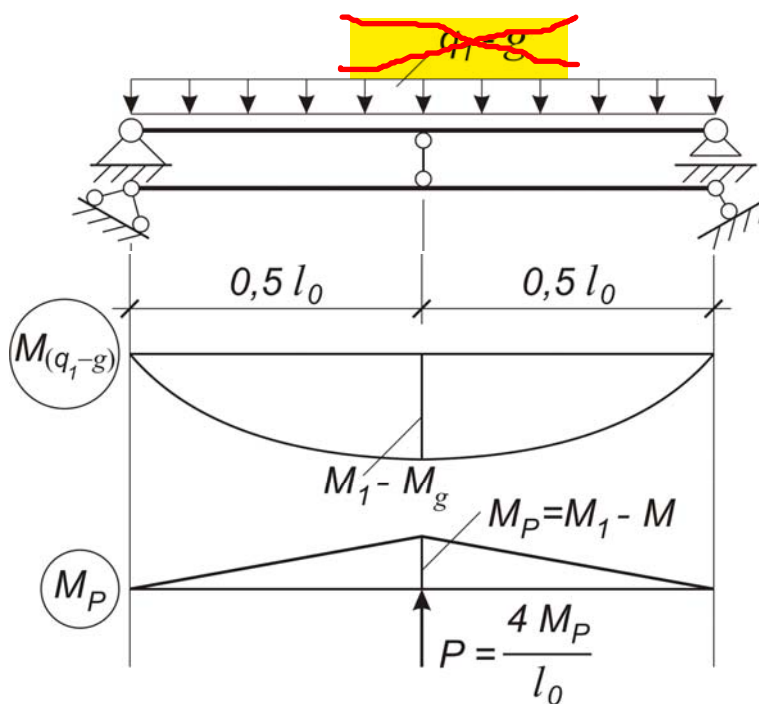


Рис. 2.3. Расчетная схема ригеля после усиления.
Эпюры изгибающих моментов в существующей железобетонной балке

2. Вычисляем расчетный изгибающий момент в характерном сечении балки (в месте расположения упругой опоры) после разгрузки:

$$M_g = \frac{g \cdot l_0^2}{8} = \frac{29,68 \cdot 5,625^2}{8} = 117,39 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

3. Определяем превышение расчетного изгибающего момента от полной действующей нагрузки q_1 над предельным моментом, воспринимаемым нормальным сечением:

$$M_p = M_1 - M = 473,34 - 222,93 = 250,41 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

4. Находим требуемую реакцию упругой опоры:

$$P = \frac{4M_p}{l_0} = \frac{4 \cdot 250,41}{5,625} = 178,07 \text{ кН.}$$

5. Определяем кривизну железобетонной балки от нагрузки $(q_1 - g)$, прикладываемой после усиления, рассматривая работу балки с трещинами.

Вычисляем следующие параметры.

✓ Момент образования трещин без учета неупругих деформаций растянутого бетона

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W = R_{bt,ser} \cdot \frac{J_{red} \cdot 2}{h} = 1,4 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,00533 \cdot 2}{0,6} = 24,87 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $J_{red} = \frac{b \cdot h^3}{12} + \alpha \cdot A_s \cdot (0,5h - a)^2 + \alpha \cdot A'_s \cdot (0,5h - a')^2 = \frac{0,25 \cdot 0,6^3}{12} +$

$$+ 8,33 \cdot 1232 \cdot 10^{-6} \cdot (0,5 \cdot 0,6 - 0,042)^2 + 8,33 \cdot 226 \cdot 10^{-6} \cdot (0,5 \cdot 0,6 - 0,025)^2 = 0,00533 \text{ м}^4;$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b} = \frac{20 \cdot 10^4}{24 \cdot 10^3} = 8,33.$$

✓ Приведенный модуль деформации растянутой арматуры с учетом влияния растянутого бетона между трещинами

$$E_{s,red} = \frac{E_s}{\psi_s} = \frac{20 \cdot 10^4}{0,944} = 21,19 \cdot 10^4 \text{ МПа},$$

где $\psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crc}}{(M_1 - M_g)} = 1 - 0,8 \cdot \frac{24,87}{(473,34 - 117,39)} = 0,944.$

✓ Приведенный модуль деформации сжатого бетона

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,ser}}{\epsilon_{b1,red}} = \frac{15,0}{2,8 \cdot 10^{-3}} = 5357,1 \text{ МПа},$$

где $\epsilon_{b1,red} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ — относительная деформация бетона при продолжительном действии нагрузки и относительной влажности воздуха окружающей среды $W = 40-75 \%$ [2, табл. 5.6].

Определяем момент инерции приведенного поперечного сечения балки относительно его центра тяжести (рис. 2.4):

$$J_{red} = J_b + J_s \cdot \alpha_{s2} + J'_s \cdot \alpha_{s1}.$$

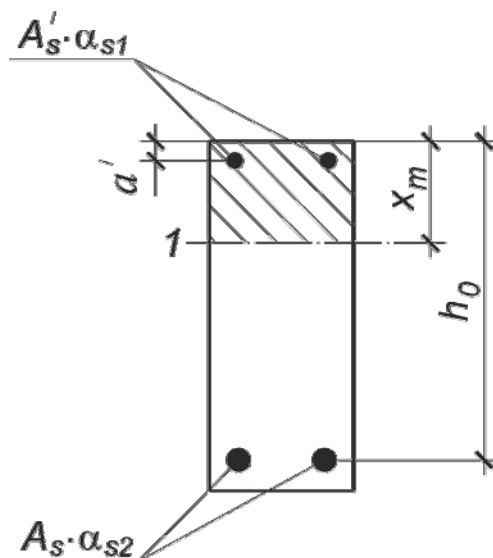


Рис. 2.4. Приведенное поперечное сечение балки:
1 – уровень центра тяжести приведенного сечения
без учета растянутой зоны бетона

Предварительно находим значения коэффициентов приведения арматуры к бетону:

– для сжатой арматуры

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}} = \frac{20 \cdot 10^4}{5357,1} = 37,33;$$

– для растянутой арматуры

$$\alpha_{s2} = \frac{E_{s,red}}{E_{b,red}} = \frac{21,19 \cdot 10^4}{5357,1} = 39,55.$$

Вычисляем высоту сжатой зоны поперечного сечения:

$$x_m = h_0 \cdot \left[\sqrt{(\mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1})^2 + 2 \cdot \left(\mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1} \cdot \frac{a'}{h_0} \right)} - (\mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1}) \right] =$$

$$= 558 \cdot \left[\sqrt{(0,00883 \cdot 39,55 + 0,00162 \cdot 37,33)^2 + 2 \cdot \left(0,00883 \cdot 39,55 + 0,00162 \cdot 37,33 \cdot \frac{25}{558} \right)} - (0,00883 \cdot 39,55 + 0,00162 \cdot 37,33) \right] = 292,5 \text{ мм},$$

где

$$\mu_s = \frac{A_s}{b \cdot h_0} = \frac{1232}{250 \cdot 558} = 0,00883;$$

$$\mu'_s = \frac{A'_s}{b \cdot h_0} = \frac{226}{250 \cdot 558} = 0,00162.$$

$$J_{red} = \left[\frac{0,25 \cdot 0,2925^3}{12} + 0,25 \cdot 0,2925 \cdot \left(\frac{0,2925}{2} \right)^2 \right] + \\ + 39,55 \cdot 1232 \cdot 10^{-6} \cdot (0,558 - 0,2925)^2 + \\ + 37,33 \cdot 226 \cdot 10^{-6} \cdot (0,2925 - 0,025)^2 = 0,006124 \text{ м}^4.$$

Кривизну железобетонной балки от действия нагрузки $(q_1 - g)$ определяем по формуле

$$\left(\frac{1}{r} \right) = \frac{(M_1 - M_g)}{D} = \frac{473,34 - 117,39}{32806,88} = 0,010850 \frac{1}{\text{м}},$$

где D – изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента,

$$D = E_{b,red} \cdot J_{red} = 5357,1 \cdot 10^3 \cdot 0,006124 = 32806,88 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

6. Определяем кривизну железобетонной балки от реакции упругой опоры P , рассматривая работу балки без трещин:

$$\left(\frac{1}{r} \right)^* = -\frac{M_p}{D} = -\frac{250,41}{33663,16} = -0,007439 \frac{1}{\text{м}},$$

где $D = E_{b1,red} \cdot J_{red} = 6315,79 \cdot 10^3 \cdot 0,00533 = 33663,16 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$;

здесь $J_{red} = 0,00533 \text{ м}^4$ (п. 5); E_{b1} – модуль деформации сжатого бетона, при продолжительном действии нагрузки принимаемый равным

$$E_{b1} = E_{b\tau} = \frac{E_b}{1 + \phi_{b,cr}} = \frac{24 \cdot 10^3}{1 + 2,8} = 6315,79 \text{ МПа},$$

где $\phi_{b,cr} = 2,8$ – коэффициент ползучести для бетона класса В20 и относительной влажности воздуха окружающей среды $W = 40\text{--}75\%$ [2, табл. 5.5].

7. Вычисляем прогиб железобетонной балки в характерном сечении от совместного действия нагрузки $(q_1 - g)$ и реакции упругой опоры P :

$$f = \left(\frac{1}{r} \right) \cdot \frac{5}{48} \cdot l_0^2 + \left(\frac{1}{r} \right)^* \cdot \frac{1}{12} \cdot l_0^2 = (0,01085) \cdot \frac{5}{48} \cdot 5,625^2 + (-0,007439) \cdot \frac{1}{12} \cdot 5,625^2 = \\ = 0,016 \text{ м} < f_{\text{lim}} = \frac{1}{200} \cdot l = 0,03 \text{ м}.$$

Прогиб балки принять приближённо $0,53 f_{\text{lim}} = 0,53 \times 0,03 = 0,016 \text{ м}$.

8. Определяем момент инерции балки усиления из условия равенства прогибов железобетонной и металлической балок в характерном сечении. Балку усиления (подпирающую балку) выполняем, используя прокатный профиль из стали С245 ($E_{s1} = 2,06 \cdot 10^5$ МПа).

$$J_{x,1} = \frac{M_p \cdot l_0^2}{12} \cdot \frac{1}{E_{s1} \cdot f} = \frac{250,41 \cdot 5,625^2}{12} \cdot \frac{1}{2,06 \cdot 10^5 \cdot 10^3 \cdot 0,016} = 0,00020032 \text{ м}^4 = 20032 \text{ см}^4.$$

Принимаем двутавр №45 по ГОСТ 8239–89 ($J_{x,f} = 27696 \text{ см}^4$) либо два двутавра №36 ($J_{x,f} = 2 \cdot 13380 = 26760 \text{ см}^4$). Или два швеллера

Эффективность усиления ригеля можно существенно повысить, если металлическую подпирающую балку (конструкцию усиления) включить в работу после ее предварительного нагружения силой, подобранной таким образом, чтобы компенсировать недостаточную жесткость сечения этой балки, одновременно обеспечивая ее совместную работу с ригелем [19, п. 3.2].

• Работы по усилению ригеля подведением дополнительной упругой опоры выполняются в следующей последовательности:

✓ устраиваются опоры под конструкцию усиления (металлическую балку) в виде отдельных стоек или консолей, привариваемых к стальной обвязке колонн;

✓ максимально разгружается перекрытие в зоне усиления ригеля;

✓ монтируется в проектное положение и закрепляется конструкция усиления;

✓ включается в работу конструкция усиления путем забивки стальных клиньев (пластин со скошенными поверхностями) враспор с ригелем.