

$$Q \leq Q_{b \max} = 2,5R_{bt}bh_0, \quad (6.12)$$

то разрушения не произойдет, и по соображениям прочности устанавливать поперечную арматуру нет необходимости.

Если же условие (6.12) не выполняется, то следует предусмотреть установку арматуры и выполнить ее расчет, для того чтобы подобрать необходимые размеры поперечного сечения арматурных элементов.

### 6.3. ПРОЧНОСТЬ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ НА ДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ НАГРУЗОК

Расчет по наклонному сечению на действие поперечных сил согласно СП 52-101-2003, п. 6.2.34, производится на основе уравнения равновесия внешних и внутренних поперечных сил, действующих в наиболее опасном наклонном сечении. Таковым является сечение, расположенное вблизи опоры. Если рассмотреть ближайшую к опоре наклонную трещину (см. рис. 6.3, а), то условие прочности записывается в виде

$$Q \leq Q_{bs} = Q_b + Q_{sw}, \quad (6.13)$$

где  $Q$  — поперечная сила в наклонном сечении, определяемая от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения; при этом учитывается наиболее опасное загрузение в пределах наклонного сечения.

Поперечная сила  $Q_{sw}$ , воспринимаемая поперечной арматурой в наклонном сечении, равна сумме сил от каждого из пересекающих трещину арматурных элементов:

$$Q_{sw} = \sum R_{sw}A_{sw}. \quad (6.14)$$

Здесь  $R_{sw}$  — расчетное сопротивление элементов поперечной арматуры.

Если поперечные стержни на участке длины наклонной трещины расположены равномерно и достаточно близко друг от друга, то поперечную арматуру можно считать непрерывно распределенной по длине элемента. Тогда

$$Q_{sw} = q_{sw}c_0, \quad (6.15)$$

где  $c_0$  — длина проекции опасной наклонной трещины на продольную ось элемента;  $q_{sw}$  — усилие в поперечной арматуре на единицу длины элемента, равное

$$q_{sw} = R_{sw}A_{sw}/s_w, \quad (6.16)$$

$s_w$  — шаг размещения поперечной арматуры.

Проверка условия (6.13) в общем случае выполняется для ряда наклонных сечений, близких к наиболее опасному, и различных значений параметра  $c = c_0 + a$ , равного расстоянию от вершины наклонного поперечного сечения бетона до ближайшей опоры. При этом длина  $c$  не превышает, во-первых, расстояние от опоры до сечения с максимальным изгибающим моментом, а во-вторых, расстояние  $3h_0$ .

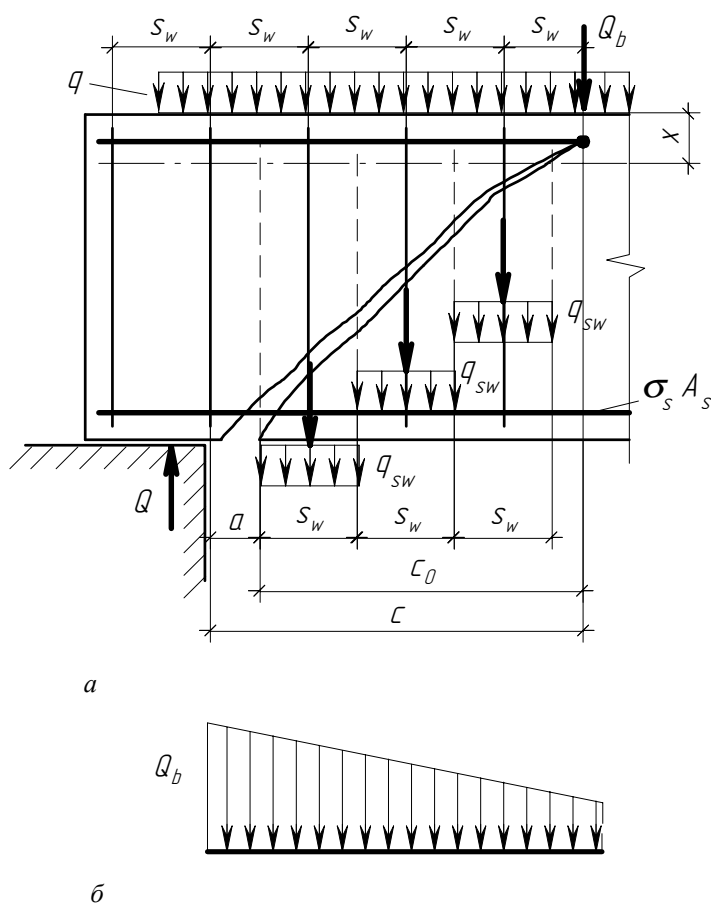


Рис. 6.3

Для нахождения длины проекции наклонного сечения  $c_0$ , по которому проходит трещина, запишем выражение для общей поперечной нагрузки  $Q_{bs}$ , равной сумме поперечных сил  $Q_b$  и  $Q_{sw}$ , воспринимаемых соответственно бетоном сжатой зоны и пересекающими наклонную трещину поперечными арматурными элементами, и усилия от внешней распределенной нагрузки  $q(c_0 + a)$ :

$$Q_{bs} = Q_b + Q_{sw} + q(c_0 + a). \quad (6.17)$$

Здесь  $q$  – равномерно распределенная внешняя нагрузка.

Входящая в (6.17) сила  $Q_{sw}$ , воспринимаемая поперечной арматурой в наклонном сечении, определяется выражением (6.15), а значение реактивной силы  $Q_b$ , как следует из рис. 6.3, а, равно

$$Q_b = \frac{M_b}{c}, \quad (6.18)$$

где  $M_b$  — момент, воспринимаемый бетоном. Поскольку рассматривается крайняя трещина, то в формуле (6.18) оправданно заменить  $c$  на  $c_0$ , так что:

$$Q_b = \frac{M_b}{c_0}; \quad (6.19)$$

Тогда формула (6.17) для суммарной поперечной нагрузки  $Q_{bs}$  записывается в виде

$$Q_{bs} = q(c_0 + a) + q_{sw}c_0 + \frac{M_b}{c_0}. \quad (6.20)$$

Как следует из принципа наименьшего действия, если механическая система находится в равновесии, то потенциальная энергия деформаций этой системы должна быть минимальной. В рассматриваемом случае задачу нахождения минимума функции потенциальной энергии деформации можно свести к определению минимума поперечной силы  $Q_{bs}$ , т. е. найти такое значение  $c_0$ , при котором  $Q_{bs}$  достигает минимального значения. Исходя из этого, можно определить угол наклона трещины, для которого поперечная сила будет минимальна.

Для нахождения значения  $c_0$ , при котором функция  $Q_{bs}$  достигает экстремума, нужно продифференцировать  $Q_{bs}$  по  $c_0$  и приравнять результат дифференцирования к нулю:

$$\frac{dQ_{bs}}{dc_0} = 0.$$

Производная  $\frac{dQ_{bs}}{dc_0}$ , как следует из (6.20), равна

$$\frac{dQ_{bs}}{dc_0} = q + q_{sw} + \frac{M_b}{c_0^2}. \quad (6.21)$$

Приравнивая правую часть (6.21) к нулю и выражая  $c_0$ , получаем

$$c_0 = \sqrt{\frac{M_b}{q_{sw} + q}}. \quad (6.22)$$

Подставляя полученное значение  $c_0$ , справедливое при условии  $h_0 < c_0 < 2h_0$ , в формулу для поперечной силы (6.20), запишем

$$Q_{bs} = 2\sqrt{M_b(q_{sw} + q)} + qa. \quad (6.23)$$

Из (6.23) видно, что минимум функции  $Q_{bs}$  достигается при  $a = 0$ , что соответствует  $c = c_0$ , т. е. трещине, расположенной вблизи опоры. Наименьшее значение поперечной силы равно

$$Q_{\min} = Q_{bs} = 2\sqrt{M_b(q_{sw} + q)}. \quad (6.24)$$

При выводе формулы (6.24) предполагалось, что действующая на балку распределенная нагрузка постоянна по величине. Если помимо постоянной составляющей нагрузка имеет и переменную часть, то расчет в формуле (6.24) выполняется по эквивалентной нагрузке  $q_l$ , которая представляется в виде суммы постоянной и переменной частей, причем величина переменной части уменьшается в два раза:

$$q_l = q + q_v / 2. \quad (6.25)$$

#### 6.4. ДОПУСКАЕМАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ НАГРУЗКА, ВОСПРИНИМАЕМАЯ БЕТОНОМ

Согласно (6.18) наибольшее поперечное усилие  $Q_{b\max}$ , которое воспринимается бетоном, определяется как

$$Q_{b\max} = \frac{M_{b\max}}{c}, \quad (6.26)$$

С другой стороны, для  $Q_{b\max}$  справедливо выражение (6.11). Приравняв правые части (6.26) и (6.11), запишем выражение для наибольшего момента, который может быть воспринят бетоном:

$$M_{b\max} = 2,5R_{bt}bh_0c. \quad (6.27)$$

Размер трещины можно считать пропорциональным высоте поперечного сечения, а именно

$$c = \gamma h_0. \quad (6.28)$$

Преобразуем (6.26) с учетом (6.27) и (6.28) к виду

$$Q_{b \max} = \frac{2,5R_b b h \cdot \gamma h_0}{c} \quad (6.29)$$

Как указано в СП 52-101-2003, п. 6.2.34, часть внешней нагрузки, которая может быть воспринята бетоном, по аналогии с (6.29) вычисляется по формуле

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} R_b b h^2}{c}, \quad (6.30)$$

причем

$$Q_{b \min} = 0,5R_{bt} b h_0 < Q_b < Q_{b \max} = 2,5R_{bt} b h_0. \quad (6.31)$$

Входящий в (6.30) коэффициент  $\varphi_{b2}$  равен

$$\varphi_{b2} = 1,5. \quad (6.32)$$

Тогда окончательное выражение для воспринимаемой бетоном поперечной нагрузки (6.30) приобретает вид

$$Q_b = \frac{1,5R_b b h^2}{c}. \quad (6.33)$$

В свою очередь воспринимаемый бетоном момент, учитывая (6.15), (6.30) и (6.33), равен

$$M_b = Q_b c = \varphi_{b2} R_{bt} b h_0^2 = 1,5R_{bt} b h_0^2. \quad (6.34)$$

Формулу (6.34) можно использовать для определения предельно допустимого расстояния между поперечными стержнями, т. е. шага арматуры  $s_{w \max}$ . Очевидно, что шаг будет максимальным при  $c = s_{w \max}$ , тогда из (6.34) получаем

$$s_{w \max} = \frac{\varphi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{Q_b} = \frac{1,5R_{bt} b h_0^2}{Q_b}. \quad (6.35)$$

### 6.5. РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ АРМАТУРЫ

Определим величину нагрузки  $Q_{sw}$ , которая воспринимается поперечной арматурой. Как показано в п. 6.3, если поперечные стержни на участке длины наклонной трещины расположены равномерно и достаточно близко друг от друга, то поперечную арматуру можно считать непрерывно распределенной по длине элемента, так что для  $Q_{sw}$  справедлива формула (6.15):

$$Q_{sw} = q_{sw} c_0.$$

В СП 52-101-2003, п. 6.2.34, предлагается уточнить это выражение введением коэффициента  $\varphi_{sw} = 0,75$ . Тогда

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} q_{sw} c_0 = 0,75 q_{sw} c_0. \quad (6.36)$$

Выражение (6.36) с учетом (6.13) дает возможность записать формулу для вычисления интенсивности усилий в поперечной арматуре:

$$q_{sw} = \frac{Q - Q_b}{0,75 c_0}. \quad (6.37)$$

Как видно из (6.22), размер  $c_0$  зависит от  $q_{sw}$ , поэтому прямая подстановка (6.22) в (6.37) не приведет к явному выражению для интенсивности  $q_{sw}$ . Одним из путей решения этой проблемы является выполнение расчета в частном случае для граничной точки, т. е. в предположении  $c_0 = 2h_0$ . Тогда (6.37) можно переписать как

$$q_{sw} = \frac{Q - Q_b}{1,5h_0}. \quad (6.38)$$

Разумеется, строгое выражение для  $q_{sw}$  получается в результате решения системы уравнений (6.37) и (6.22). Однако при практическом проектировании рекомендуется использовать приближенные аналитические выражения, речь о которых пойдет ниже.

Площадь сечения поперечной арматуры находим из (6.16):

$$A_{sw} = \frac{q_{sw} S_w}{R_{sw}}, \quad (6.39)$$

где  $q_{sw}$  определяется по формуле (6.38).

Заметим, что поперечная арматура не всегда является обязательной. Как указано в СП 52-101-2003, п. 6.2.34, учет поперечной арматуры можно не проводить, если выполнено следующее условие:

$$q_{sw} < 0,25 R_{bt} b. \quad (6.40)$$

При высоте балочного элемента  $h = 150$  мм и соблюдении условия (6.12) применение поперечной арматуры не рекомендуется. Если высота балки 300 мм и более, то поперечные хомуты, независимо от результатов расчета, следует располагать равномерно по всей длине балки. При условии  $150 \text{ мм} < h < 300 \text{ мм}$  поперечную арматуру можно использовать только на наиболее напряженных участках, а именно вблизи опор.

### 6.6. РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ

Рассмотрим частный случай нагружения, когда нагрузка на единицу длины балки постоянна и отлична от нуля,  $q \neq 0$ . При этом для расчета интенсивности поперечной арматуры, которая выражается через интенсивность усилий в поперечной арматуре  $q_{sw}$ , можно пользоваться формулой (6.38), которая дает удовлетворительные результаты, если выполняется условие

$$Q_b \leq \frac{2M_b}{h_0} - Q. \quad (6.41)$$

Здесь под  $Q$  понимается максимальная поперечная сила, т. е. сила в опорном сечении.

В противном случае, т. е. при условии

$$Q_b > \frac{2M_b}{h_0} - Q, \quad (6.42)$$

расчет интенсивности усилий в поперечной арматуре рекомендуется проводить по приведенной в [7, п. 3.33] формуле

$$q_{sw} = \frac{Q^2 - Q_b^2}{3M_b}. \quad (6.43)$$

Видно, что в граничном случае, т. е. при  $Q + Q_b = \frac{2M_b}{h_0}$ , выражения (6.38) и (6.43) тождественно совпадают:

$$q_{sw} = \frac{Q^2 - Q_b^2}{3M_b} = \frac{(Q - Q_b)(Q + Q_b)}{3M_b} = \frac{(Q - Q_b) \frac{2M_b}{h_0}}{3M_b} = \frac{Q - Q_b}{1,5h_0}. \quad (6.44)$$

Если выполняется условие  $Q_b < R_{bt}bh_0$ , то интенсивность  $q_{sw}$  предлагается определять следующим образом [7, п. 3.33]:

$$q_{sw} = \frac{Q - 0,5R_{bt}bh_0 - 3hq}{1,5h_0}. \quad (6.45)$$

При конструировании железобетонных элементов с поперечной арматурой расчет ее поперечного сечения выполняется для участка вблизи опоры. На этом участке арматура устанавливается с шагом  $s_{w1}$ . В пролетных участках шаг размещения поперечной арматуры  $s_{w2}$  увеличивается.

Длина приопорного участка, т. е. расстояние до границы, разделяющей участки поперечной арматуры разной интенсивности — понятие несколько условное. Однако для большей определенности приведем рекомендованные в [7, п. 3.33] формулы, позволяющие конкретизировать эту величину:

- при  $\Delta q_{sw} \leq q_l$

$$l_{wl} = c - \frac{M_b / c + 0,75q_{sw1}c_0 - Q + q_l c}{\Delta q_{sw}}, \quad (6.46)$$

где  $\Delta q_{sw} = 0,75(q_{sw1} - q_{sw2})$ ;  $c = \sqrt{\frac{M_b}{q_l - \Delta q_{sw}}} \leq 3h_0$ .

- при  $\Delta q_{sw} > q_l$

$$l_{wl} = \frac{Q_b - (Q_{b,\min} + 1,5q_{sw2}h_0)}{\Delta q_{sw}}. \quad (6.47)$$

**Пример 6.1.** *Определить размеры поперечного сечения и шаг поперечной арматуры (хомутов) для свободно опертой балки прямоугольного поперечного сечения, нагруженной равномерно распределенными постоянной и переменной нагрузками.*

**Дано:** длина пролета балки  $l = 9$  м;

полная равномерно распределенная нагрузка на балку  $q = 60$  кН/м;

временная распределенная на балку внешняя нагрузка  $q_v = 20$  кН/м;

размеры поперечного сечения балки:  $b = 300$  мм,  $h = 600$  мм;

толщина защитного слоя  $a = a' = 50$  мм;

балка изготовлена из бетона класса В20 ( $R_b = 11,5$  МПа,  $R_{bt} = 0,9$  МПа);

в качестве поперечных стержней используются сварные хомуты,

изготовленные из арматуры класса А240 ( $R_s = 215$  МПа,  $R_{sw} = 170$  МПа).

**Решение.** Рабочая высота сечения равна

$$h_0 = h - a = 600 - 50 = 550 \text{ мм.}$$

Поскольку в рассматриваемом случае ширина балки превышает 150 мм, то, согласно приведенным в п. 3.4.2 рекомендациям, в поперечном сечении балки требуется разместить не менее двух плоских сварных хомутов.

Максимальная поперечная нагрузка в опорном сечении балки равна

$$Q = ql / 2 = 60 \cdot 9 / 2 = 270 \text{ кН.}$$

Поскольку максимальная нагрузка возникает в приопорном участке, то расчет выполняем именно для этого участка балки, полагая  $c = c_0$ .

Величина момента, который может быть воспринят бетоном, согласно (6.34) вычисляется как

$$M_b = 1,5R_{bt}bh_0^2 = 1,5 \cdot 0,9 \cdot 300 \cdot 550^2 = 1,23 \cdot 10^8 \text{ Н}\cdot\text{мм}.$$

Эквивалентную нагрузку  $q_l$ , равную сумме постоянной и длительно действующей частей, определяем по формуле (6.25):

$$q_l = q - 0,5q_v = 60 - 0,5 \cdot 20 = 50 \text{ кН/м} = 50 \text{ Н/мм}.$$

Поперечную силу  $Q_b$ , которая может быть воспринята бетоном, рассчитываем по формуле (6.23), полагая  $q_{sw} = 0$ . Такое предположение вызвано тем, что согласно (6.43) и (6.44) интенсивность поперечных усилий  $q_{sw}$  в свою очередь зависит от  $Q_b$ , а это сильно затрудняет определение величины  $Q_b$  в явном виде. Тогда

$$Q_b = 2\sqrt{M_b q_l} = 2\sqrt{1,23 \cdot 10^8 \cdot 50} = 157 \text{ кН}.$$

Проверяем выполнение условия (6.41):

$$\frac{2M_b}{h_0} - Q = \frac{2 \cdot 1,23 \cdot 10^8}{550} - 270 \cdot 10^3 = 177 \text{ кН} > Q_b = 157 \text{ кН}.$$

Следовательно, расчет интенсивности поперечных усилий ведем по формуле (6.38), а именно

$$q_{sw} = \frac{Q - Q_b}{1,5h_0} = \frac{(270 - 157) \cdot 10^3}{1,5 \cdot 550} = 137 \text{ Н/мм}.$$

Максимально допускаемое значение шага можно определить по формуле (6.35):

$$s_{w\max} = \frac{1,5R_{bt}bh_0^2}{Q_b} = \frac{1,5 \cdot 0,9 \cdot 300 \cdot 550^2}{157 \cdot 10^3} = 780 \text{ мм}.$$

В соответствии с приведенными в п. 3.4.2 рекомендациями предельное значение шага размещения поперечной арматуры на участке вблизи опоры не должно превышать  $0,5h_0 = 0,5 \cdot 550 = 275$  мм. На удаленных от опор участках поперечная арматура устанавливается реже, в этом случае предельное значение шага таково: не более  $0,75h_0 = 0,75 \cdot 550 = 413$  мм. Поскольку полученное расчетным путем значение  $s_{w\max}$  выходит за предельно допускаемую границу, то на участке вблизи опоры шаг хомутов полагаем равным  $s_{w1} = 250$  мм, а на пролетном участке —  $s_{w2} = 350$  мм.

Переходим теперь к расчету площади поперечного сечения хомутов. Для этого воспользуемся формулой (6.39), так что

$$A_w = \frac{q_{sw} s_{w1}}{R_{sw}} = \frac{137 \cdot 250}{170} = 201 \text{ мм}^2.$$

По полученному значению площади поперечного сечения хомутов с помощью таблицы 5.4 подбираем их диаметр:  $2d_s 5A240$ .

Тогда согласно (6.39) интенсивность поперечных усилий вблизи опоры и в пролете соответственно равна

$$q_{sw1} = \frac{A_w R_{sw}}{s_{w1}} = \frac{201 \cdot 170}{250} = 136,7 \text{ Н/мм};$$

$$q_{sw2} = \frac{A_w R_{sw}}{s_{w2}} = \frac{201 \cdot 170}{350} = 97,6 \text{ Н/мм}.$$

В заключение проверим выполнение условия (6.40):

$$q_{sw1} = 136,7 \text{ Н/мм} > 0,25 \cdot 0,9 \cdot 300 = 67,5 \text{ Н/мм};$$

$$q_{sw2} = 97,6 \text{ Н/мм} > 67,5 \text{ Н/мм}.$$

Следовательно, учет поперечной арматуры в данном случае был действительно необходим.

Длину участка вблизи опоры с интенсивностью усилий  $q_{sw1}$  можно рассчитать по формулам (6.46) и (6.47).

### 6.7. МЕТОДИКА УПРОЩЕННОГО РАСЧЕТА ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ

Как указано в СП 52-101-2003, допускается производить расчет наклонных сечений исходя из условия прочности, записанного для определения возникающей от внешней нагрузки поперечной силы не в этом наклонном сечении, а в нормальном:

$$Q_1 \leq Q_{b1} + Q_{sw1}, \quad (6.48)$$

где  $Q_1$  — поперечное усилие, возникающее в нормальном сечении вследствие действия внешней нагрузки;  $Q_{b1}$  — часть поперечной силы, которая может быть принята бетоном;  $Q_{sw1}$  — нагрузка на поперечную арматуру. Величины  $Q_{b1}$  и  $Q_{sw1}$  равны

$$Q_{b1} = 0,5 R_b b h_0; \quad (6.49)$$

$$Q_{sw1} = q_{sw} h_0. \quad (6.50)$$

Расчеты следует производить для ряда нормальных поперечных сечений, наиболее опасных с точки зрения прочности (т. е. наиболее нагруженных поперечной нагрузкой). Если нормальное сечение расположено вблизи одной из опор на расстоянии  $c < 2,5h_0$ , то значение  $Q_{b1}$ , полученное по формуле (6.49), необходимо умножить на коэффициент  $\frac{2,5h_0}{c}$ , однако при этом должно выполняться условие  $Q_{b1} \leq 2,5R_{bt}bh_0$ .

### 6.8. РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ СИЛ

Рассмотрим действие на железобетонную балку поперечной сосредоточенной силы, линия действия которой расположена на расстоянии  $c < 3h_0$  от опоры.

Условие прочности в этом случае записывается в форме (6.13), где  $Q_b$  и  $Q_{sw}$  вычисляются по формулам (6.30) и (6.36):

$$Q_b = \frac{1,5R_{bt}bh_0^2}{c}; \quad Q_{sw} = 0,75q_{sw}c_0.$$

Введем далее обозначение  $\alpha_{sw} = c/h_0 < 3$  и положим  $c = c_0$ , поскольку рассматриваем участок вблизи опоры. Тогда выражение (6.51) переписывается в виде

$$Q = \frac{1,5R_{bt}bh_0}{\alpha_{sw}} + 0,75q_{sw}\alpha_{sw}h_0. \quad (6.51)$$

Разрешая (6.51) относительно интенсивности поперечных усилий  $q_{sw}$ , получаем

$$q_{sw} = R_{bt}b \frac{n_{sw} - 1,5/\alpha_{sw}}{0,75q_{sw}\alpha_{sw}}; \quad n_{sw} = \frac{Q}{R_{bt}bh_0}. \quad (6.52)$$

Поскольку  $h_0 < c_0 < 2h_0$ , то формула (6.52) дает наиболее удовлетворительные результаты в диапазоне  $n_{sw} \leq \frac{1,5}{\alpha_{sw}} + 0,19\alpha_{sw}$ .

В противном случае, как рекомендуется в [7, п. 3.33], выражение для  $q_{sw}$  следует записывать в виде

$$q_{sw} = 0,25R_{bt}b \frac{\frac{1,5}{\alpha_{sw}} + 0,19\alpha_{sw}}{n_{sw}}. \quad (6.53)$$

Пусть теперь на балку действует группа сосредоточенных поперечных сил, например, изображенные на рис. 6.4 силы  $F_1$  и  $F_2$ , линии действия которых распо-

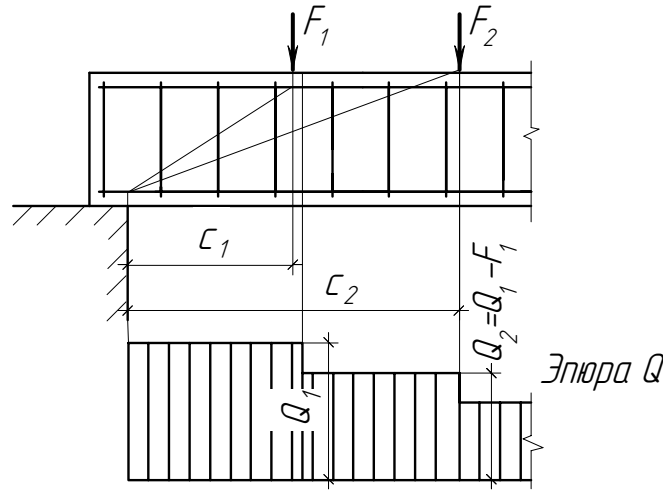


Рис. 6.4

ложены на расстояниях  $c_1$  и  $c_2$  от опоры, причем ни одно из этих расстояний не превышает  $3h_0$ . Интенсивность поперечной арматуры при этом определяется для каждого из участков. Формулы (6.52) и (6.53) применительно к  $i$ -му участку переписываются в виде:

- при  $n_{sw,i} \leq \frac{1,5}{\alpha_{sw,i}} + 0,19\alpha_{sw,i,\min}$

$$q_{sw,i} = R_{bt} b \frac{n_{sw,i} - 1,5 / \alpha_{sw,i}}{0,75 q_{sw} \alpha_{sw,i,\min}}; \quad n_{sw,i} = \frac{Q_i}{R_{bt} b h_0}. \quad (6.54)$$

- при  $n_{sw,i} > \frac{1,5}{\alpha_{sw,i}} + 0,19\alpha_{sw,i,\min}$

$$q_{sw,i} = 0,25 R_{bt} b \frac{\frac{1,5}{\alpha_{sw,i}} + 0,19\alpha_{sw,i,\min}}{n_{sw,i}}. \quad (6.55)$$

Здесь  $\alpha_{sw,i,\min}$  — минимальное из значений  $\alpha_{sw,i}$  и 2.

**Пример 6.2.** Подобрать поперечную арматуру для балки прямоугольного поперечного сечения, нагруженной сосредоточенными силами так, как показано на рис. 6.4.

**Дано:** размеры поперечного сечения балки:  $b = 300$  мм,  $h = 500$  мм;  
 толщина защитного слоя  $a = a' = 40$  мм;  
 балка изготовлена из бетона класса В20 ( $R_b = 11,5$  МПа,  $R_{bt} = 0,9$  МПа);  
 поперечная арматура изготовлена из стали класса А240 ( $R_s = 215$  МПа,

$R_{sw} = 170$  МПа);

внешние сосредоточенные силы  $F_1$  и  $F_2$  приложены на расстоянии  $c_1 = 1200$  мм и  $c_2 = 2400$  мм;

внутренние поперечные силы:  $Q_1 = 150$  кН,  $Q_2 = 140$  кН.

**Решение.** Рабочая высота сечения равна

$$h_0 = h - a' = 500 - 40 = 460 \text{ мм.}$$

Разобьем решение задачи на два этапа.

На *первом этапе* рассчитаем интенсивность поперечных усилий в окрестности точки приложения силы  $F_1$ , как это описано в п. 6.8.

Вначале вычислим параметры  $\alpha_{sw,1}$  и  $\alpha_{sw,1,\min}$  и  $n_{sw,1}$ .

$$\alpha_{sw,1} = \frac{c_1}{h_0} = \frac{1200}{460} = 2,6; \quad \alpha_{sw,1,\min} = \min(\alpha_{sw,1}, 2) = 2;$$

$$n_{sw,1} = \frac{Q_1}{R_{bt} b h_0} = \frac{150 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 300 \cdot 460} = 1,2.$$

Проверим выполнение условий применимости формул (6.54) и (6.56):

$$\frac{1,5}{\alpha_{sw,i}} + 0,19\alpha_{sw,1,\min} = \frac{1,5}{2,6} + 0,19 \cdot 2,0 = 0,96 < n_{sw,i} = 1,2.$$

Отсюда следует, что интенсивность поперечных усилий нужно вычислять по формуле (6.55):

$$q_{sw,1} = 0,25 R_{bt} b \frac{\frac{1,5}{\alpha_{sw,1}} + 0,19\alpha_{sw,1,\min}}{n_{sw,1}} = 0,25 \cdot 0,9 \cdot 300 \frac{\frac{1,5}{2,6} + 0,19 \cdot 2,0}{1,2} = 53,8 \text{ Н/мм.}$$

На *втором этапе* аналогичным образом рассчитаем интенсивность усилий в окрестности точки приложения силы  $F_2$ .

$$\alpha_{sw,2} = \frac{c_2}{h_0} = \frac{2400}{460} = 5,22 > 3, \text{ следовательно, полагаем } \alpha_{sw,2} = 3;$$

$$\alpha_{sw,2,\min} = \min(\alpha_{sw,2}, 2) = 2; \quad n_{sw,2} = \frac{Q_2}{R_{bt} b h_0} = \frac{140 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 300 \cdot 460} = 1,13.$$

Проверка выполнения условий применимости формул (6.54) и (6.56):

$$\frac{1,5}{\alpha_{sw,2}} + 0,19\alpha_{sw,2,\min} = \frac{1,5}{3} + 0,19 \cdot 2,0 = 0,88 < n_{sw,2} = 1,13,$$

тогда по формуле (6.55) получаем

$$q_{sw,2} = 0,25 R_{bt} b \frac{\frac{1,5}{\alpha_{sw,2}} + 0,19\alpha_{sw,2,\min}}{n_{sw,2}} = 0,25 \cdot 0,9 \cdot 300 \frac{\frac{1,5}{3,0} + 0,19 \cdot 2,0}{1,13} = 52,5 \text{ Н/мм.}$$

Из двух полученных значений интенсивности поперечных усилий,  $q_{sw,1} = 53,8$  Н/мм и  $q_{sw,2} = 52,5$  Н/мм, в качестве интенсивности  $q_{sw}$  выбираем наибольшее, а именно

$$q_{sw} = 53 \text{ Н/мм.}$$

Задаемся величиной диаметра хомутов, выбирая его равным  $d_s = 8$  мм, т. е. получаем 2d<sub>s</sub>8A240. По таблице 5.4 определяем, что площадь сечения арматуры при этом равна  $A_{sw} = 101$  мм<sup>2</sup>. Далее по формуле (6.39) определяем шаг расположения поперечной арматуры:

$$s_w = \frac{A_{sw} R_{sw}}{q_{sw}} = \frac{101 \cdot 170}{53} = 324 \text{ мм.}$$

Напомним, что, как указано в п. 3.4.2, по конструктивным соображениям на шаг поперечной арматуры накладывается ряд ограничений: предельное значение шага размещения поперечной арматуры на участке вблизи опоры принимаются не более  $0,5h_0 = 0,5 \cdot 460 = 230$  мм и не более 300 мм. Исходя из этих рекомендаций, принимаем величину шага на при опорном участке равной  $s_{w1} = 200$  мм, а на пролетном —  $s_{w2} = 300$  мм.

Выполним пересчет фактической интенсивности на каждом из этих участков:

- на участке вблизи опоры

$$q_{w1} = \frac{A_{sw} R_{sw}}{s_{w1}} = \frac{101 \cdot 170}{200} = 85,9 \text{ Н/мм.}$$

- на пролетном участке

$$q_{w2} = \frac{A_{sw} R_{sw}}{s_{w2}} = \frac{101 \cdot 170}{300} = 57,2 \text{ Н/мм.}$$

Эту же задачу можно решить, задавая шаг поперечной арматуры и определяя необходимое значение ее диаметра.

### 6.9. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ НА ДЕЙСТВИЕ МОМЕНТОВ

Если при действии на железобетонный элемент внешнего момента не обеспечивается необходимая прочность, в наклонном сечении может появиться трещина (рис. 6.5). Прочность наклонного сечения на действие моментов проверяется по условию

$$M \leq M_s + M_{sw}, \quad (6.56)$$

где  $M$  — момент в наклонном сечении от действия всех внешних сил, приложенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения, относительно крайней точки этого сечения (в качестве крайней принимается точка  $O$ , расположенная

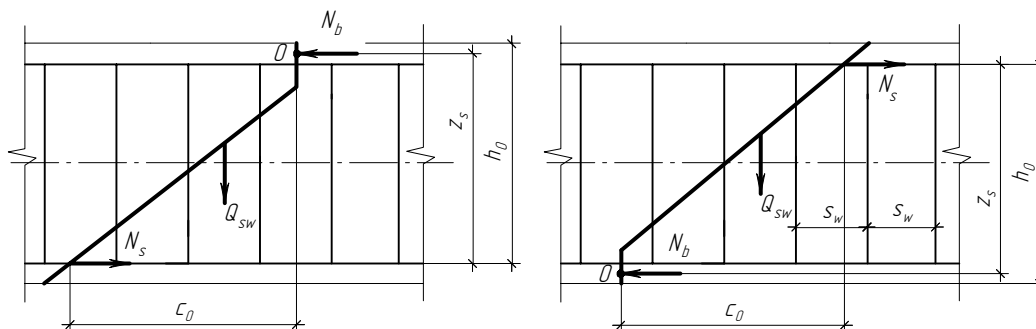


Рис. 6.5

в зоне сжатия с противоположной стороны от продольной растянутой арматуры;  $M_s$  — момент, воспринимаемый пересекающей наклонное сечение продольной арматурой, относительно противоположного конца этого сечения, т. е. точки  $O$ ;  $M_{sw}$  — момент, воспринимаемый поперечной арматурой, пересекающей наклонное сечение, относительно точки  $O$ .