

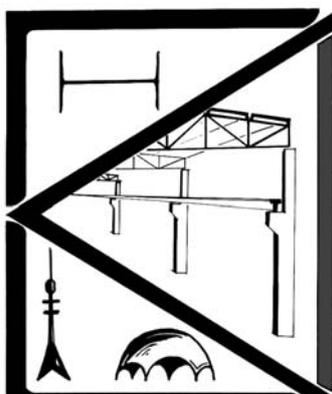
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения»

# ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специальности 1-70 02 01  
«Промышленное и гражданское строительство»*

**Часть 1**



Могилев 2015

УДК 69.059  
ББК 38.7  
Ж 51

Рекомендовано к опубликованию  
Центром менеджмента качества образовательной деятельности  
ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Одобрено кафедрой «Строительные конструкции, здания и соору-  
жения» «7» октября 2014 г., протокол № 2

Составитель канд. техн. наук Ю. Г. Москалькова

Рецензент канд. техн. наук, доц. И. В. Лесковец

Приведены расчеты изгибаемых элементов железобетонных конст-  
рукций по сопротивлению сечений, нормальных к продольной оси элемен-  
та прямоугольного и таврового профиля. Содержат теоретический матери-  
ал, алгоритмы и примеры расчета железобетонных элементов согласно по-  
ложениям Еврокода 2.

Учебное издание

## ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Часть 1

Ответственный за выпуск	С. Д. Семенюк
Технический редактор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 115 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 24.01.2014.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2015

# 1 Расчет сопротивления сечений, нормальных к продольной оси железобетонных изгибаемых элементов (альтернативная модель)

## 1.1 Элементы прямоугольного сечения с одиночной арматурой

Для получения расчетных зависимостей необходимо рассмотреть распределение напряжений по сечению однопролетной статически определимой балки. С этой целью в ней проводят сечение, отбросив правую часть, заменяют ее действие внутренними силами (рисунок 1.1).

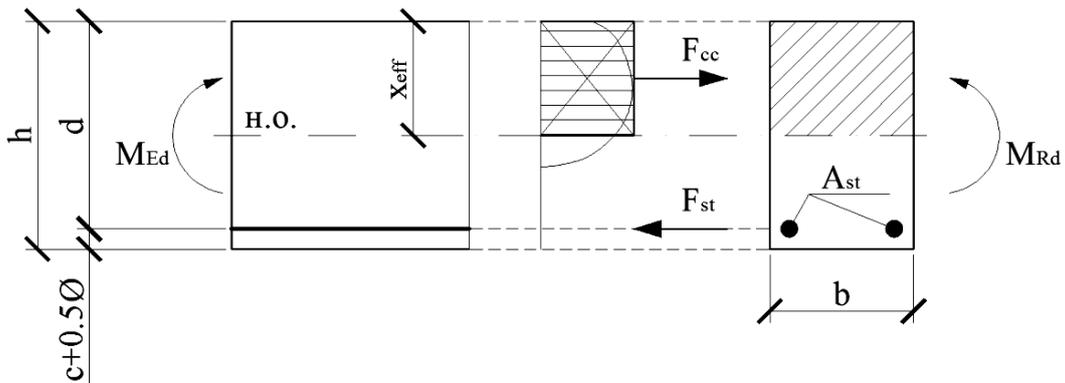


Рисунок 1.1 – Расчетное сечение балки с одиночным армированием

Так как действительные законы распределения напряжений по сечению сложны, принимают следующие упрощения: напряжения в бетоне в предельном состоянии принимают равными расчетному сопротивлению  $f_{cd}$ , а арматуры –  $f_{yd}$ .

При этом действительную криволинейную эпюру напряжений в бетоне сжатой зоны заменяют на эквивалентную прямоугольную (альтернативная модель, метод предельных усилий). То есть может приниматься равномерное распределение напряжений по высоте эффективной сжатой зоны сечения, как показано на рисунке 1.2.

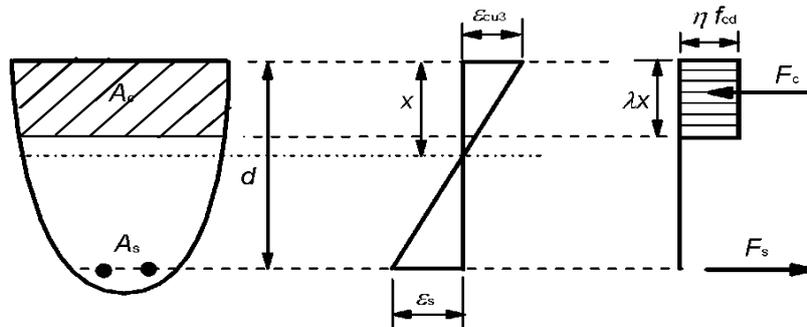


Рисунок 1.2 – Равномерное распределение напряжений по высоте эффективной сжатой зоны сечения

Значение коэффициента  $\lambda$  для определения эффективной высоты сжатой зоны сечения и значение коэффициента  $\eta$  для определения эффективной прочности следуют из условий:

– для  $f_{ck} \leq 50$  МПа

$$\lambda = 0,8; \quad (1.1)$$

– для  $50 < f_{ck} \leq 90$  МПа

$$\lambda = 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}; \quad (1.2)$$

– для  $f_{ck} \leq 50$  МПа

$$\eta = 1,0; \quad (1.3)$$

– для  $50 < f_{ck} \leq 90$  МПа

$$\eta = 1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200}, \quad (1.4)$$

где  $f_{ck}$  – нормативное сопротивление бетона сжатию.

Если ширина сжатой зоны сечения уменьшается по направлению к более сжатой грани сечения, то значение  $\eta f_{cd}$  следует уменьшить на 10 %.

Прочность сечения элемента будет обеспечена, если расчетный момент от внешней нагрузки не превысит расчетного момента внутренних усилий относительно центра тяжести сечения растянутой арматуры или центра тяжести бетона сжатой зоны, т. е.

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}; \quad (1.5)$$

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = F_{cc} \cdot \left( d - \frac{x_{eff}}{2} \right) = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot \left( d - \frac{x_{eff}}{2} \right); \quad (1.6)$$

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}^c = f_{yd} \cdot A_{st} \left( d - \frac{x_{eff}}{2} \right), \quad (1.7)$$

где  $F_{cc}$  – равнодействующая усилий в бетоне сжатой зоны;

$b$  – ширина сечения балки;

$\alpha$  – коэффициент условий работы бетона,  $\alpha = 1,0$ ;

$x_{eff}$  – условная эффективная высота сжатой зоны бетона;

$f_{cd}$  – расчетная прочность бетона осевому сжатию;

$d$  – рабочая высота сечения,  $d = h - c^*$ ;

$c^*$  – расстояние от центра тяжести рабочей арматуры до нижней грани сечения;

$h$  – высота сечения балки;

$A_{st}$  – площадь растянутой арматуры;

$f_{yd}$  – расчетное сопротивление ненапрягаемой арматуры;

$M_{Rd}^c$  – расчетный момент внутренних усилий относительно центра тяжести сжатой зоны бетона.

Высота условной сжатой зоны бетона  $x_{eff}$  определяется из условия равенства нулю суммы проекций всех сил на продольную ось элемента (см. рисунок 1.1).

$$F_{cc} = F_{st}, \quad (1.8)$$

где  $F_{st}$  – равнодействующая усилий в растянутой арматуре.

$$f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} = A_{st} \cdot f_{yd}; \quad (1.9)$$

$$x_{eff} = \frac{f_{yd} \cdot A_{st}}{f_{cd} \cdot b}. \quad (1.10)$$

Особенности напряженно-деформированного состояния сечения в расчетах характеризует относительная высота сжатой зоны сечения  $\xi$ , которая определяется как отношение высоты условной сжатой зоны сечения к рабочей высоте:

$$\xi = \frac{x_{eff}}{d} = \frac{f_{yd} \cdot A_{st}}{f_{cd} \cdot b \cdot d} = \rho \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}, \quad (1.11)$$

где  $\rho$  – коэффициент армирования,  $\rho = \frac{A_{st}}{b \cdot d}$ .

В расчетной практике часто используют также понятие процент армирования –  $\rho\% = \rho \cdot 100\%$ .

Значение относительной высоты сжатой зоны сечения, вводимое в расчеты, не должно превышать граничной относительной высоты  $\xi_{lim}$ , т. к. при  $\xi > \xi_{lim}$  разрушение элемента начинается со сжатой зоны бетона, что опасно.

Значение граничной высоты сжатой зоны  $\xi_{lim}$ , при которой предельное состояние элемента наступает одновременно с достижением в растянутой арматуре  $f_{yd}$ , определяется по формуле

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)}, \quad (1.12)$$

где  $\omega$  – характеристика сжатой зоны бетона,

$$\omega = k_c - 0,008 \cdot f_{cd}, \quad (1.13)$$

$k_c$  – коэффициент; для тяжелого бетона  $k_c = 0,85$  [2];

$\sigma_{s,lim}$  – напряжение в арматуре; для ненапрягаемой арматуры  $\sigma_{s,lim} = f_{yd}$ ;

$\sigma_{sc,u}$  – предельное напряжение в арматуре сжатой зоны сечения,  $\sigma_{sc,u} = 500$  МПа.

При выполнении условия  $\xi < \xi_{lim}$  разрушение сечения происходит пластически – по первому случаю третьей стадии напряженно-деформированного состояния (н. д. с.). Арматура, расположенная в растянутой зоне, первой достигает предела текучести  $f_{yd}$ .

Если выполняется условие  $\xi = \xi_{lim}$ , то предела прочности достигают одновременно бетон и арматура.

Разрушение сечения будет происходить по бетону сжатой зоны при условии, что  $\xi > \xi_{lim}$ , и называться хрупким (третья стадия н. д. с, случай 2), а элементы – переармированными, т. к. содержат избыточное количество арматуры.

Прочность конструкции определяется предельными усилиями в сжатом бетоне и растянутой арматуре при  $\xi > \xi_{lim}$  (или  $x_{eff} < x_{eff,lim}$ ).

Для упрощения практических расчетов формулу (1.5) преобразуют, подставляя в уравнение  $M_{Rd}$  (относительно центра тяжести арматуры)  $x_{eff} = \xi \cdot d$ :

$$M_{Rd} = f_{cd} \cdot b \cdot d \cdot \xi (d - 0,5\xi \cdot d) = f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \cdot \xi (1 - 0,5\xi). \quad (1.14)$$

В расчеты вводятся новые обозначения: характеристика сжатой зоны сечения  $\alpha_m$  и относительное плечо пары сил  $\eta$ :

$$\alpha_m = \xi (1 - 0,5\xi); \quad (1.15)$$

$$\eta = \frac{Z}{d} = 1 - 0,5\xi = 0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{\alpha_m}{C_0}}, \quad (1.16)$$

где  $Z$  – плечо пары сил  $F_{cc}$  и  $F_{st}$ ;

$C_0 = \omega_c / K_2 = 0,81/0,416 = 1,947$  – для бетонов классов по прочности на сжатие С12/15–С50/60 [2].

Расчет предельного момента производится по формуле

$$M_{Rd} = \alpha_m \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2. \quad (1.17)$$

Расчет сечений:

– относительной высоты сжатой зоны сечений

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m}; \quad (1.18)$$

– рабочей высоты сечения

$$d = \sqrt{\frac{M_{Rd}}{\alpha_m f_{cd} b}}. \quad (1.19)$$

Аналогично преобразуется уравнение (1.6) (подставляется  $x_{eff} = \xi \cdot d$ ):

$$\begin{aligned}
 M_{Rd} &= A_{st} \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,5x_{eff}) = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,5\xi \cdot d) = \\
 &= A_{st} \cdot f_{yd} \cdot d \cdot (1 - 0,5\xi) = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot d \cdot \eta.
 \end{aligned}
 \tag{1.20}$$

Принимается  $M_{Ed} = M_{Rd}$ .

Тогда площадь растянутой арматуры

$$A_{st} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot \eta \cdot d}. \tag{1.21}$$

Величины  $\alpha_m$ ,  $\xi$  и  $\eta$  взаимосвязаны друг с другом, и, зная одну из них, можно найти любую другую.

Формулы справедливы при  $\xi \leq \xi_{lim}$  и  $\alpha_m \leq \alpha_{m,lim}$ .

При  $\xi > \xi_{lim}$  (переармированное сечение) расчеты можно производить, заменяя  $x_{eff}$  на  $x_{eff,lim}$ , т. е.  $x_{eff} = \xi_{lim} \cdot d$ .

Пользуясь полученными формулами, можно решать следующие основные задачи трех типов: определять площадь растянутой арматуры  $A_{st}$ ; осуществлять подбор размеров поперечного сечения элементов  $b$ ,  $h$  и площадь арматуры  $A_{st}$ , проверять несущую способность сечения.

### **Задача первого типа**

Известны размеры  $b$  и  $h$ , класс бетона  $C$  и класс арматуры  $S$ , а также изгибающий момент  $M_{Ed}$ . Подобрать необходимое количество арматуры.

#### ***Алгоритм расчета задачи первого типа***

1 По заданному классу бетона и арматуры определяем расчетные прочностные характеристики материалов:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c}, \tag{1.22}$$

где  $f_{cd}$  – расчетная прочность бетона на сжатие;

$f_{ck}$  – нормативная прочность бетона на сжатие;

$\gamma_c$  – частный коэффициент безопасности по бетону,  $\gamma_c = 1,5$  [1, таблица 2.1N];

$\alpha_{cc}$  – коэффициент, учитывающий влияние длительных эффектов на прочность и неблагоприятных эффектов в результате неблагоприятного способа приложения нагрузки,  $\alpha_{cc} = 1,0$ .

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \tag{1.23}$$

где  $f_{yd}$ ,  $f_{yk}$  – расчетное и нормативное сопротивления арматуры соответственно;

$\gamma_s$  – частный коэффициент безопасности по арматуре,  $\gamma_s = 1,15$  [1, таблица 2.1N].

2 Ориентировочно, с учетом требований [1, п. 4.1.1, таблица 4.4N], задаемся размерами защитного слоя бетона и размерами диаметра арматурных стержней.

3 Устанавливаем расстояние от нижней грани элемента до равнодействующей усилий растянутой арматуры.

4 Определяем рабочую высоту сечения  $d$ , мм, по формуле  $d = h - c - 0,5\emptyset$ .

5 Преобразовав формулу (1.17), получаем значение коэффициента  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}, \quad (1.24)$$

где  $M_{Ed}$  – момент от внешней нагрузки относительно равнодействующей усилий в растянутой арматуре, кН·м.

6 По формуле (1.18) определяем значение относительной высоты сжатой зоны  $\xi$ .

7 Граничную высоту сжатой зоны сечения  $\xi_{lim}$  находим по формуле (1.7).

8 Сравниваем полученные значения относительной высоты сжатой зоны  $\xi$  с ее граничным значением  $\xi_{lim}$ .

При  $\xi < \xi_{lim}$  по формуле (1.16) определяем значение относительного плеча пары сил  $\eta$ .

9 Используя формулу (1.21), рассчитываем необходимую площадь продольной растянутой арматуры.

10 С учетом нормативных требований [1, п. 9.2.1.1] вычисляем минимальную площадь арматуры  $A_{st}$  по формуле

$$A_{st,min} = \rho_{min} \cdot b \cdot d, \quad (1.25)$$

где  $\rho_{min}$  – минимальный процент армирования для изгибаемых элементов,  $\rho_{min} = 0,13\%$  [1].

11 За окончательный результат принимаем большее из двух значений пп. 8 и 9 и подбираем арматурные стержни или проволоку согласно сортаменту арматурной стали (таблица А.1).

12 Если условия п. 7 не выполняются, т. е.  $\xi > \xi_{lim}$ , то необходимо увеличить размеры сечения, изменить класс бетона или арматуры и снова повторить расчет.

**Пример 1**

*Дано:* балка прямоугольного сечения с размерами  $b = 300$  мм;  $h = 600$  мм. Бетон тяжелый класса C20/25. Арматура класса S500 (стержневая). Изгибающий момент  $M_{Ed}$ , действующий в сечении, равен  $150$  кН·м.

Определить площадь продольной арматуры  $A_{st}$ .

*Решение*

Для бетона класса C20/25 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 25}{1,5} = 13,33 \text{ МПа.}$$

Нормативное сопротивление арматуры может быть принято по таблице Б.1.

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

Ориентировочно задаемся расстоянием от нижней грани сечений до центра тяжести растянутой арматуры  $s^*$  таким образом, чтобы обеспечить минимальный защитный слой бетона  $c = 15$  мм (классы XC1, S4), т. е.  $s^* = c + 0,5\emptyset$ .

Принимаем  $s^* = 40$  мм. Тогда рабочая высота сжатой зоны бетона

$$d = h - c = 600 - 40 = 560 \text{ мм.}$$

Определяем значение коэффициента  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{150 \cdot 10^6}{13,3 \cdot 300 \cdot 560^2} = 0,120.$$

Зная величину  $\alpha_m$ , устанавливаем значения относительной высоты сжатой зоны  $\xi$  и относительного плеча внутренней пары сил  $\eta$ :

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,12} = 0,128;$$

$$\eta = 1 - 0,5\xi = 1 - 0,5 \cdot 0,128 = 0,936.$$

Определяем граничное значение относительной высоты сжатой зоны  $\xi_{lim}$ :

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = \frac{0,743}{1 + \frac{435}{500} \cdot \left(1 - \frac{0,743}{1,1}\right)} = 0,579,$$

где  $\omega = 0,85 - 0,008f_{cd} = 0,85 - 0,008 \cdot 13,33 = 0,743$ ;

$$\begin{aligned}\sigma_{sc,u} &= 500 \text{ МПа}; \\ \sigma_{s,lim} &= f_{yd} = 435 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Поскольку выполняется условие  $\xi = 0,128 < \xi_{lim} = 0,579$ , необходимая площадь сечения продольной растянутой арматуры

$$A_{st} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot \eta \cdot d} = \frac{150 \cdot 10^6}{435 \cdot 0,936 \cdot 560} = 657,9 \text{ мм}^2.$$

Минимально допустимая площадь рабочей арматуры для изгибаемых элементов

$$A_{st,min} = \rho_{min} \cdot b \cdot d = 0,0013 \cdot 300 \cdot 560 = 218,4 \text{ мм}^2.$$

Так как  $A_{st} > A_{st,min}$ , подбираем стержни по площади  $A_{st} = 657,9 \text{ мм}^2$ . По сортаменту арматуры (см. таблицу А.1) принимаем два стержня диаметром 18 мм и один стержень диаметром 14 мм класса S500 с площадью  $A_{st} = 662,9 \text{ мм}^2$ .

Процент переармирования

$$\rho = \frac{662,9 - 657,9}{657,9} \cdot 100 \% = 0,8 \%,$$

что находится в пределах допустимого отклонения, равного 5 %.

### **Задача второго типа**

Известны изгибающий момент  $M_{Ed}$ , класс арматуры С и класс арматурной стали S. Подобрать размеры сечения  $b$  и  $h$  и определить необходимую площадь продольной арматуры  $A_{st}$ .

#### ***Алгоритм расчета задач второго типа***

1 Определяем расчетные характеристики бетона и арматуры (аналогично п. 1 из алгоритма расчета задач первого типа).

2 С учетом требований [1] задаемся оптимальным процентом армирования  $\rho$  и по формуле (1.11) рассчитываем значение относительной высоты сжатой зоны  $\xi$ .

3 Используя формулу (1.24), рассчитываем значение коэффициента  $\alpha_m$ .

4 Задавшись размером ширины сечения  $b$ , по формуле (1.14) определяем рабочую высоту сечения  $d$ .

5 Ориентировочно приняв значение  $c^*$ , находим высоту сечения ( $h = d + c^*$ ) и округляем ее до значения, кратного 50 или 100 мм.

6 Снова определяем рабочую высоту принятого сечения:  $d = h - c^*$ .

7 Используя формулу (1.24) по полученному значению рабочей высоты сечения  $d$  (п. 6), рассчитываем значение коэффициента  $\alpha_m$ .

8 По значению  $\alpha_m$  снова определяем  $\xi$  по формуле (1.18).

9 Необходимую площадь продольной растянутой арматуры находим по формуле

$$A_{st} = \xi \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}. \quad (1.26)$$

### **Пример 2**

*Дано:* полка сборной ребристой панели покрытия, которая испытывает действие изгибающего максимального момента в пролете 0,6 кН·м.

Плита изготовлена из тяжелого бетона класса С25/30. Полка армируется проволокой S500 диаметром 4 мм.

Определить размеры сечения полки и площадь сечения продольной рабочей арматуры.

### *Решение*

Определяем расчетные характеристики бетона и арматуры.

Для бетона класса С25/30 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 25}{1,5} = 16,67 \text{ МПа.}$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

Учитывая, что минимальный пролет армирования для изгибаемых элементов равен 0,13 %, назначаем процент армирования полки плиты  $\rho = 0,5$  %, тогда

$$\xi = \rho \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 0,005 \cdot \frac{435}{1 \cdot 16,67} = 0,130.$$

Определяем значение коэффициента  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \xi(1 - 0,5\xi) = 0,130 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,130) = 0,122.$$

Так как в статическом расчете полка плиты представляет собой многопролетную неразрезную балку, то ширину расчетной полосы  $b$  принимаем равной 1000 мм.

Рассчитываем рабочую высоту полки плиты:

$$d = \sqrt{\frac{M_{Rd}}{\alpha_m \cdot f_{cd} \cdot b}} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 10^6}{0,122 \cdot 16,67 \cdot 1000}} = 17,2 \text{ мм.}$$

Полная высота полки с учетом толщины защитного слоя  $s = 20$  мм и  $0,5$  диаметра рабочей арматуры:

$$h = 17,2 + 20 + 0,5 \cdot 4 = 39,2 \text{ мм.}$$

Окончательно принимаем высоту полки плиты  $40$  мм (кратно  $10$  мм, в соответствии с конструктивными требованиями [3, таблица 11.3]). Тогда рабочая высота сечения полки  $d = 0,5h = 0,5 \cdot 40 = 20$  мм, т. к. сетка укладывается посередине сечения.

Используя  $b = 1000$  мм,  $h = 40$  мм,  $d = 20$  мм, определяем значение коэффициента  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} = \frac{0,6 \cdot 10^6}{16,67 \cdot 1000 \cdot 20^2} = 0,090.$$

По значению  $\alpha_m$  рассчитываем относительную высоту сжатой зоны  $\xi$  и граничную относительную высоту сжатой зоны  $\xi_{lim}$ :

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,090} = 0,095;$$

$$\omega = 0,85 - 0,008f_{cd} = 0,85 - 0,008 \cdot 16,67 = 0,717;$$

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = \frac{0,717}{1 + \frac{435}{500} \cdot \left(1 - \frac{0,717}{1,1}\right)} = 0,550.$$

Так как  $\xi = 0,095 < \xi_{lim} = 0,550$ , то определяем площадь растянутой арматуры

$$A_{st} = \xi \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0,095 \cdot 1000 \cdot 20 \cdot \frac{16,67}{435} = 72,81 \text{ мм}^2.$$

Значение относительного плеча пары сил

$$\eta = 1 - 0,5\xi = 1 - 0,5 \cdot 0,095 = 0,953.$$

Вычисляем площадь продольной арматуры:

$$A_{st} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot \eta \cdot d} = \frac{0,6 \cdot 10^6}{435 \cdot 0,953 \cdot 20} = 72,4 \text{ мм}^2.$$

По сортаменту арматуры принимаем проволочную арматуру в количестве  $6$  шт. диаметром  $4$  мм класса  $S500$  с шагом  $S = 200$  мм.

### Задача третьего типа (обратная)

Известен изгибающий момент  $M_{Ed}$ , размеры сечения  $b$  и  $h$ , площадь продольной рабочей арматуры  $A_{st}$ , класс бетона  $C$  и класс арматурной стали  $S$ . Проверить несущую способность элемента, т. е. определить изгибающий момент, который может быть воспринят сечением, и сравнить его с действующим моментом.

#### Алгоритм расчета задач третьего типа

- 1 Определяем расчетные характеристики бетона и арматуры по заданным классам, используя коэффициенты безопасности  $\gamma_c$  и  $\gamma_s$ .
- 2 Находим рабочую высоту сечения  $d$ .
- 3 По формуле (1.11) рассчитываем значение  $\xi$ .
- 4 Граничную высоту сжатой зоны бетона  $\xi_{lim}$  определяем по формуле (1.12) и сравниваем ее со значением  $\xi$ .
- 5 При  $\xi < \xi_{lim}$  по формуле (1.15) находим значение  $\alpha_m$ .
- 6 Изгибающий момент  $M_{Rd}$ , который может быть воспринят сечением, рассчитываем по формуле (1.17) и сравниваем его с заданным изгибающим моментом  $M_{Ed}$ . Если  $M_{Ed} \leq M_{Rd}$ , то несущая способность сечения обеспечена.

#### Пример 3

Дано: балка прямоугольного сечения с размерами  $b = 200$  мм;  $h = 500$  мм, бетон тяжелый класса C20/25. Арматура класса S500. Площадь растянутой арматуры  $A_{st} = 804$  мм<sup>2</sup> (четыре стержня диаметром 16 мм). Изгибающий момент  $M_{Ed} = 120$  кН·м. Сжатая арматура установлена по конструктивным соображениям.

Проверить прочность сечения.

#### Решение

Для бетона класса C20/25 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20}{1,5} = 13,33 \text{ МПа.}$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

Ориентировочно задаемся расстоянием от нижней грани сечений до центра тяжести растянутой арматуры  $s^*$  таким образом, чтобы обеспечить минимальный защитный слой бетона  $s = 15$  мм (классы XC1, S4), т. е.

$$c^* = c + 0,5\emptyset.$$

Принимаем  $c^* = 50$  мм. Тогда рабочая высота сжатой зоны бетона

$$d = h - c = 500 - 50 = 450 \text{ мм.}$$

Рассчитываем значение относительной высоты сжатой зоны сечения:

$$\xi = \frac{f_{yd} \cdot A_{st}}{f_{cd} \cdot b \cdot d} = \frac{435 \cdot 804}{13,33 \cdot 200 \cdot 450} = 0,292.$$

Определяем значение граничной высоты сжатого сечения:

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot f_{cd} = 0,85 - 0,008 \cdot 13,33 = 0,743;$$

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = \frac{0,743}{1 + \frac{435}{500} \left(1 - \frac{0,743}{1,1}\right)} = 0,579.$$

Так как  $\xi = 0,292 < \xi_{lim} = 0,579$ , то разрушение происходит в результате достижения рабочей арматурой предела текучести.

Определяем значение  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \xi(1 - 0,5\xi) = 0,292(1 - 0,5 \cdot 0,292) = 0,249.$$

Находим величину изгибающего момента, воспринимаемого сечением балки:

$$M_{Rd} = \alpha_m \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 = 0,207 \cdot 13,33 \cdot 200 \cdot 450^2 \cdot 10^{-6} = 134,4 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Поскольку выполняется условие  $M_{Rd} = 134,4 \text{ кН}\cdot\text{м} > M_{Ed} = 120 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , то прочность сечения обеспечена.

## ***1.2 Изгибаемые элементы прямоугольного сечения с армированием в сжатой и растянутой зонах (с двойной арматурой)***

Изгибаемые элементы, содержащие, помимо растянутой арматуры  $A_{st}$ , арматуру  $A_{sc}$ , расположенную в сжатой зоне сечения, неэкономичны по расходу металла, поэтому их рассчитывают в следующих проектных ситуациях:

– при ограниченной высоте сечения, когда необходимо усиление сжатой зоны бетона. Такая необходимость выясняется после определения  $x_{eff}$ ,  $\xi$  и  $\alpha_m$  в предположении однозначного армирования при несоблюдении условия  $\xi < \xi_{lim}$ ;

– при наличии знакопеременного момента;

– в случае, когда арматуру в сжатой зоне сечения устанавливают по конструктивным соображениям (монтажные стержни) для образования каркасов, и она может учитываться в расчетах.

Расчетная схема элементов с двойным армированием представлена на рисунке 1.3.

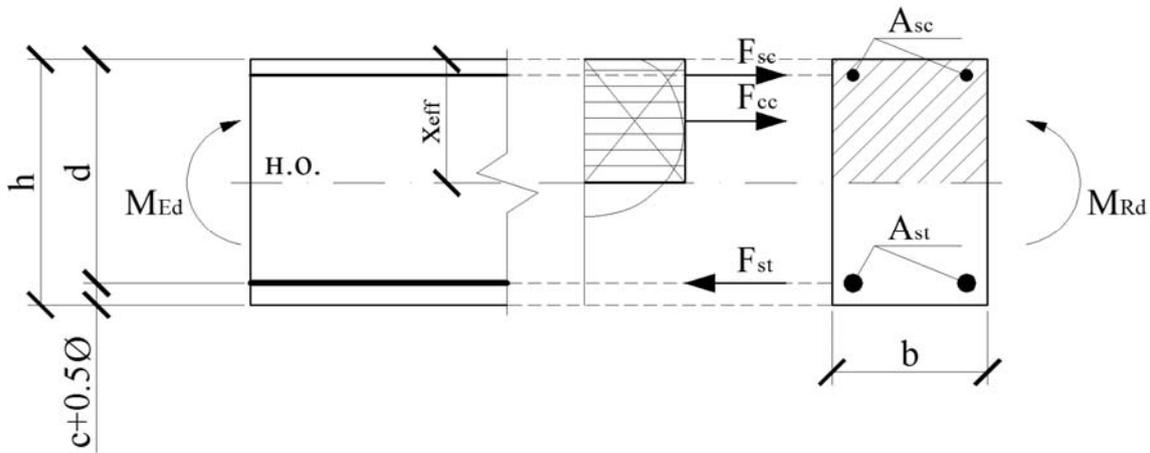


Рисунок 1.3 – Расчетная схема элемента с двойным армированием

Прочность сечения элемента с двойным армированием будет обеспечена, если расчетный момент от внешней нагрузки  $M_{Ed}$  не превысит расчетного момента внутренних усилий относительно центра тяжести растянутой арматуры:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = F_{cc}(d - 0,5x_{eff}) + F_{sc}(d - c_1), \quad (1.27)$$

где  $F_{sc}$  – равнодействующая усилий в сжатой арматуре;

$c_1$  – расстояние от сжатой грани сечения до центра тяжести сжатой арматуры.

Формулы для расчета сечений элементов с двойной арматурой получены из тех же условий, что и для элементов с одиночной арматурой. В соответствии с расчетной схемой условие прочности изгибаемого элемента в предельном состоянии имеет вид:

$$\begin{aligned} M_{Ed} \leq M_{Rd} &= f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \left( d - \frac{x_{eff}}{2} \right) + f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1) = \\ &= \alpha_m \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 + f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1), \end{aligned} \quad (1.28)$$

а уравнение проекции всех сил на горизонтальную ось –

$$f_{yd} \cdot A_{st} = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} + f_{yd} \cdot A_{sc}. \quad (1.29)$$

Согласно (1.28)

$$x_{eff} = \frac{f_{yd} \cdot A_{st} - f_{yd} \cdot A_{sc}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b}; \quad (1.30)$$

$$\xi = \frac{x_{\text{eff}}}{d} = \frac{f_{yd} \cdot A_{st} - f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{cd} \cdot b \cdot d}. \quad (1.31)$$

Площадь сечения сжатой арматуры определяем по следующей зависимости:

$$A_{sc} = \frac{M_{Ed} - \alpha_m \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2}{f_{yd} (d - c_1)}. \quad (1.32)$$

Требуемую площадь сжатой арматуры  $A_{sc}$  получаем из формулы (1.32) в предположении полного использования сжатой зоны бетона, т. е.  $\alpha_m = \alpha_{m,\text{lim}}$  или  $x_{\text{eff}} = x_{\text{lim}}$ . Поэтому, заменив в уравнении (1.32)  $\alpha_m$  на  $\alpha_{m,\text{lim}}$ , найдем  $A_{sc}$  по формуле

$$A_{sc} = \frac{M_{Ed} - \alpha_{m,\text{lim}} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2}{f_{yd} (d - c_1)}. \quad (1.33)$$

При отрицательном значении  $A_{sc}$  или равном нулю арматуру в сжатой зоне можно не устанавливать.

Если площадь сжатой арматуры  $A_{sc}$ , установленной в сечении (по конструктивным соображениям), близка к значению, вычисленному по формуле (1.33), то расчет площади растянутой арматуры производят при полученном расчетном значении  $A_{sc}$ . Если же площадь установленной сжатой арматуры существенно превышает расчетную, дальнейший расчет производят при большем значении  $A_{sc}$ . Площадь растянутой арматуры  $A_{st}$  получают из условия (1.29), принимая  $x_{\text{eff}} = x_{\text{lim}} = \xi_{\text{lim}} \cdot d$ :

$$A_{st} = \frac{f_{cd} \cdot b \cdot \xi_{\text{lim}} \cdot d + f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{yd}}. \quad (1.34)$$

Формулами (1.33) и (1.34) можно пользоваться при  $x_{\text{eff}} > 1,1c_1$ . В противном случае сжатая арматура окажется вблизи нейтральной оси и напряжения в ней будут ниже  $f_{yd}$  сжатой арматуры.

При расчете элементов с двойной арматурой могут встретиться два типа задач: определение площади сжатой и растянутой арматуры; проверка несущей способности сечения.

### Задача первого типа

По заданным размерам сечения  $b \times h$ , расчетному изгибающему моменту  $M_{Ed}$ , классу бетона и арматуры определить площадь сжатой и растянутой арматуры.

#### Алгоритм расчета задач первого типа

- 1 Определяем расчетные характеристики бетона и арматуры.
- 2 Находим рабочую высоту сечения  $d$ , предварительно задавшись размерами  $c^*$  и  $c_1$ , с учетом толщины защитного слоя бетона и диаметров рабочей арматуры.
- 3 По формуле (1.12) рассчитываем относительную высоту сжатой зоны  $\xi_{lim}$ .
- 4 Подставляя в формулу (1.15) значение  $\xi_{lim}$  вместо  $\xi$ , определяем величину  $\alpha_{m,lim}$ .
- 5 По формуле (1.33) находим значение площади сжатой арматуры  $A_{sc}$ .
- 6 Если  $A_{sc}$ , полученная в результате расчета, близка по значению фактической площади арматуры (установлена арматура по конструктивным соображениям), то площадь растянутой арматуры  $A_{st}$  рассчитываем по формуле (1.34).
- 7 Если расчетная площадь сжатой арматуры  $A_{sc}$  меньше фактической, то площадь растянутой арматуры  $A_{st}$  получаем по формуле (1.34), подставляя вместо  $\xi_{lim}$  действительное значение  $\xi$ . Значение  $\alpha_m$ , по которому определяется  $\xi$ , можно найти из формулы (1.32):

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed} - A_{sc} \cdot f_{yd} (d - c_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}. \quad (1.35)$$

В практических расчетах необходимость в сжатой арматуре  $A_{sc}$  выявляется только в ходе расчета, поэтому решение задачи начинают по алгоритму расчета задачи первого типа для одиночного армирования. Если  $\alpha_m > \alpha_{m,lim}$  и увеличение размеров сечения невозможно или нецелесообразно, переходят к двойному армированию согласно вышеуказанному алгоритму.

#### Пример 4

Дано: балка прямоугольного сечения с размерами  $b = 200$  мм,  $h = 500$  мм. Бетон тяжелый класса C12/15, арматура класса S500. Изгибающий момент  $M_{Ed} = 180$  кН·м.

Определить площадь сечения растянутой  $A_{st}$  и сжатой  $A_{sc}$  арматур.

*Решение*

Определяем расчетные характеристики бетона и арматуры.

Для бетона класса С12/15 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 12}{1,5} = 8 \text{ МПа.}$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

С учетом толщины защитного слоя бетона и предполагаемых диаметров арматурных стержней назначаем  $c^* = 30$  мм и  $c_1 = 25$  мм. Рабочая высота сечения

$$d = h - c = 500 - 30 = 470 \text{ мм.}$$

По формуле (1.7) определяем значение относительной высоты сжатой зоны:

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot 8 = 0,786;$$

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = \frac{0,786}{1 + \frac{435}{500} \left(1 - \frac{0,786}{1,1}\right)} = 0,630.$$

Вычисляем величину  $\sigma_{m,lim}$ :

$$\sigma_{m,lim} = \xi_{lim} (1 - 0,5\xi_{lim}) = 0,630 (1 - 0,5 \cdot 0,630) = 0,432.$$

Рассчитываем площадь сжатой арматуры:

$$A_{sc} = \frac{M_{Ed} - \alpha_{m,lim} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2}{f_{yd} (d - c_1)} = \frac{180 \cdot 10^6 - 0,432 \cdot 8 \cdot 200 \cdot 470^2}{435 (470 - 25)} = 141,1 \text{ мм.}$$

Принимаем по сортаменту (см. таблицу А.1) два стержня диаметром 10 мм с  $A_{sc} = 157 \text{ мм}^2$ . Площадь растянутой арматуры

$$A_{st} = \frac{f_{cd} \cdot b \cdot \xi_{lim} \cdot d + f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{yd}} = \frac{8 \cdot 200 \cdot 0,630 \cdot 470 + 435 \cdot 157}{435} = 1246,1 \text{ мм}^2.$$

Принимаем два стержня диаметром 25 мм с  $A_s = 982 \text{ мм}^2$  и один стержень диаметром 20 мм с  $A_s = 314,2 \text{ мм}^2$ .

Полная площадь растянутой арматуры

$$A_{st} = 982 + 314,2 = 1296,2 \text{ мм}^2.$$

## Задача второго типа

Известны размеры сечения элемента  $b \times h$ , площадь сечения всей арматуры  $A_{s,tot} = A_{st} + A_{sc}$ , классы бетона и арматуры, а также расчетный изгибающий момент  $M_{Ed}$ . Проверить прочность сечения.

### Алгоритм расчета задач второго типа

- 1 Определяем расчетные характеристики бетона и арматуры.
- 2 С учетом диаметра рабочей арматуры и толщины защитного слоя бетона назначаем величину  $c^*$  и  $c_1$ , находим рабочую высоту сечения  $d$ .
- 3 По формуле (1.31) из условия равновесия всех сил на продольную ось сечения рассчитываем значение относительной высоты сжатой зоны  $\xi$ .
- 4 Определяем  $x_{eff} = \xi \cdot d$  и при  $x_{eff} > 1,1c_1$  по формуле (1.35) находим значение  $\alpha_m$ .
- 5 Предельный момент, воспринимаемый сечением относительно центра растянутой арматуры, рассчитываем по формуле (1.28).
- 6 Если условие  $M_{Ed} \leq M_{Rd}$  выполняется, то прочность сечения обеспечена. В противном случае необходимо увеличить класс бетона или арматуры или увеличить размеры сечения.

### Пример 5

Дано: балка прямоугольного сечения с размерами  $b = 300$  мм,  $h = 600$  мм. Бетон тяжелый класса C25/30, арматура класса S500. Площадь растянутой арматуры  $A_{st} = 1847$  мм<sup>2</sup> (три стержня диаметром 28 мм) и площадь сечения сжатой арматуры  $A_{sc} = 402$  мм<sup>2</sup> (два стержня диаметром 16 мм). Изгибающий момент  $M_{Ed} = 300$  кН·м.

Проверить прочность сечения.

### Решение

Для бетона класса C25/30 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 25}{1,5} = 16,67 \text{ МПа.}$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

С учетом толщины защитного слоя бетона и заданных диаметров арматурных стержней назначаем  $c = 40$  мм и  $c_1 = 30$  мм. Рабочая высота сечения

$$d = h - c = 600 - 40 = 560 \text{ мм.}$$

Определим значение относительной высоты сжатой зоны сечения:

$$\xi = \frac{f_{yd} \cdot A_{st} - f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{cd} \cdot b \cdot d} = \frac{435(1847 - 402)}{16,67 \cdot 300 \cdot 560} = 0,224.$$

Условная высота сжатой зоны сечения

$$x_{eff} = \xi \cdot d = 0,224 \cdot 560 = 125,4 \text{ мм.}$$

Так как  $x_{eff} = 125,4 \text{ мм} > 1,1c_1 = 1,1 \cdot 30 = 33 \text{ мм}$ , то в расчете следует учитывать сжатую арматуру.

Определяем значение  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \xi(1 - 0,5 \xi) = 0,224(1 - 0,5 \cdot 0,224) = 0,199.$$

Предельный момент, воспринимаемый сечением:

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= \alpha_m \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 + f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1) = \\ &= 0,199 \cdot 16,67 \cdot 300 + 560^2 + 402 \cdot 435 \cdot (560 - 30) = 404,8 \text{ кН}\cdot\text{м.} \end{aligned}$$

Так как выполняется условие  $M_{Rd} = 404,8 \text{ кН}\cdot\text{м} > M_{Ed} = 300 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , то прочность сечения обеспечена.

### ***1.3 Изгибаемые элементы таврового сечения***

Тавровый профиль сечения железобетонных элементов встречается наиболее часто, т. к. является более экономичным по расходу материала по сравнению с прямоугольным сечением. Однако при большой ширине полки участки свесов, удаленные от ребра, менее напряженные, чем вблизи ребер. Поэтому при расчете элементов, имеющих полку в сжатой зоне сечения, следует ограничивать значение ее расчетной ширины  $b'_f$  из условия, что размер свеса полки в каждую сторону от ребра должен быть не более  $1/6$  пролета элемента и не более:

- при наличии поперечных ребер или при  $h'_f \geq 0,1h$  половины расстояния в свету между продольными ребрами;
- при отсутствии поперечных ребер или при расстоянии между ними большем, чем расстояние между продольными ребрами, и при  $h'_f < 0,1h - 6h'_f$ ;
- при консольных свесах полки и условию, что:
  - а)  $h'_f \geq 0,1h -$  не более  $6h'_f$ ;
  - б)  $0,05h \leq h'_f \leq 0,1 -$  не более  $3h'_f$ ;
  - в)  $h'_f < 0,05h -$  свесы не учитываются.

При расчете изгибаемых элементов по прочности сечений, нормальных к продольной оси, следует соблюдать условие  $x_{eff} \leq \xi_{lim} \cdot d$ . В случае, когда площадь растянутой арматуры по конструктивным соображениям или из расчета по предельным состояниям второй группы принята большей, чем это требуется для соблюдения условия  $x_{eff} \leq \xi_{lim} \cdot d$ , расчет следу-



положение нижней границы сжатой зоны (положение нейтральной оси), используется неравенство

$$M_{Ed} \leq f_{cd} \cdot b'_f \cdot h'_f (d - 0,5h'_f). \quad (1.36)$$

При наличии расчетной или конструктивной арматуры в сжатой зоне сечения неравенство (1.36) принимает вид:

$$M_{Ed} \leq M'_f = f_{cd} \cdot b'_f \cdot h'_f (d - 0,5h'_f) + f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1), \quad (1.37)$$

где  $M'_f$  – момент, воспринимаемый полкой таврового сечения при условии, что вся она сжата.

Если внешний расчетный момент  $M_{Ed}$  меньше момента  $M'_f$ , воспринимаемого полкой, то нейтральная линия проходит в полке (первый случай расчета).

Если условие (1.36) или (1.37) не выполняется, т. е.  $M_{Ed} > M'_f$ , то нейтральная линия пересекает ребро (второй случай расчета). Исходные расчетные уравнения для второго случая получают из условия равновесия системы усилий и сил на продольную ось элемента:

$$\begin{aligned} M_{Ed} &\leq f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} (d - 0,5x_{eff}) + f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b) (d - 0,5h'_f) = \\ &= f_{cd} \cdot b \cdot \xi \cdot d (d - 0,5 \cdot \xi \cdot d) + f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b) (d - 0,5h'_f) = \\ &= \alpha_m \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 + f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b); \end{aligned} \quad (1.38)$$

$$f_{yd} \cdot A_{st} = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} + f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b) = f_{cd} \cdot b \cdot \xi \cdot d + f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b). \quad (1.39)$$

По формуле (1.38) находим  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed} - f_{cd} (b'_f - b) \cdot h'_f (d - 0,5h'_f)}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}. \quad (1.40)$$

По формуле (1.39) определяем площадь растянутой арматуры  $A_{st}$ :

$$A_{st} = \frac{f_{cd} [b \cdot \xi \cdot d + h'_f (b'_f - b)]}{f_{yd}}. \quad (1.41)$$

При расчете элементов таврового сечения в основном встречаются два типа задач.

### **Задача первого типа**

По заданным размерам сечения, расчетному изгибающему моменту и классам бетона и арматуры определить площадь сечения растянутой  $A_{st}$  и сжатой  $A_{sc}$  арматур.

### Алгоритм расчета задач первого типа

1 Определяем расчетные характеристики бетона и арматуры, как и при решении задач с элементами прямоугольных сечений.

2 Задаемся или определяем значения  $c$  и  $c_1$ .

3 Рассчитываем рабочую высоту сечения  $d$ .

4 Проверяем условия (1.36) и (1.37). При соблюдении этих условий сечение рассчитывается как прямоугольное шириной  $b'_f$  и высотой  $h$  в соответствии с формулами (1.21)–(1.25). Если условие (1.36) или (1.37) не соблюдается, то по формуле (1.40) определяем значение  $\alpha_m$ .

5 По формуле (1.12) находим  $\xi_{lim}$  и связанную с ней величину  $\alpha_{m,lim}$ .

6 При  $\alpha_m < \alpha_{m,lim}$  сжатая арматура по расчету не требуется.

7 Необходимую площадь сечения продольной арматуры вычисляем по формуле (1.41) с учетом минимального процента армирования.

8 Если условие пункта 7 не выполняется, т. е.  $\alpha_m > \alpha_{m,lim}$ , то предварительно определяем площадь сжатой арматуры  $A_{sc}$  с учетом минимального армирования по формуле

$$A_{sc} = \frac{M_{Ed} - \alpha_{m,lim} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 - f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b)(d - 0,5h'_f)}{f_{yd} (d - c_1)}. \quad (1.42)$$

9 Значение  $\alpha_m$  при условии двойного армирования рассчитываем по формуле

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed} - f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b)(d - 0,5h'_f) - f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}. \quad (1.43)$$

10 По формуле (1.18) находим относительную высоту сжатой зоны сечения  $\xi$ .

11 Определяем значение площади сечения растянутой арматуры  $A_{st}$  по формуле

$$A_{st} = \frac{f_{cd} \cdot \xi \cdot b \cdot d + f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b) + f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{yd}}. \quad (1.44)$$

#### Пример 6

Дано: балка таврового сечения  $b'_f = 1500$  мм,  $h'_f = 40$  мм;  $h = 400$  мм;  $b = 200$  мм. Бетон тяжелый С25/30. Арматура S500 (стержневая). Изгибающий момент, действующий в сечении,  $M_{Ed} = 220$  кН·м. Сжатая арматура в расчете не учитывается ( $A_{sc} = 0$ );  $c^* = 40$  мм.

Определить площадь сечения растянутой арматуры  $A_{st}$ .

*Решение*

Для бетона класса С25/30 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 25}{1,5} = 16,67 \text{ МПа.}$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

Рабочая высота сечения

$$d = 400 - 40 = 360 \text{ мм.}$$

Проверяем по (1.36) расположение нейтральной оси сечения:

$$\begin{aligned} M'_f &= f_{cd} \cdot b'_f \cdot h'_f (d - 0,5h'_f) = \\ &= 16,67 \cdot 1500 \cdot 40(360 - 0,5 \cdot 40)10^{-6} = 340,1 \text{ кН}\cdot\text{м}; \\ M'_f &= 340,1 \text{ кН}\cdot\text{м} > M_{Ed} = 220 \text{ кН}\cdot\text{м,} \end{aligned}$$

Следовательно, нейтральная ось проходит в пределах полки (первый случай расчета).

Сечение рассчитываем как прямоугольное шириной  $b'_f = 1500$  мм и высотой  $h = 400$  мм.

По формуле (1.24), заменяя  $b$  на  $b'_f$ , определяем  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b'_f \cdot d^2} = \frac{220 \cdot 10^6}{16,67 \cdot 1500 \cdot 360^2} = 0,068.$$

Зная величину  $\alpha_m$ , рассчитываем значения  $\xi$  и  $\eta$ :

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,068} = 0,070;$$

$$\eta = 1 - 0,5\xi = 1 - 0,5 \cdot 0,070 = 0,965.$$

Находим значение  $\xi_{lim}$ :

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot 16,67 = 0,717;$$

$$\xi_{lim} = \frac{0,717}{1 + \frac{435}{500} \left(1 - \frac{0,717}{1,1}\right)} = 0,550.$$

Так как  $\xi = 0,08 < \xi_{lim} = 0,544$ , то требуемая площадь растянутой арматуры

$$A_{st} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot \eta \cdot d} = \frac{220 \cdot 10^6}{435 \cdot 0,965 \cdot 360} = 1455,8 \text{ мм}^2.$$

Принимаем три стержня диаметром 25 мм класса S500 с  $A_{st} = 1473 \text{ мм}^2$  и устанавливаем их в ребре таврового сечения.

Процент переармирования

$$\rho = \frac{1473 - 1455,8}{1455,8} \cdot 100 \% = 1,2 \% < 5 \%.$$

### **Пример 7**

*Дано:* элемент таврового сечения с размерами  $b'_f = 400 \text{ мм}$ ;  $h'_f = 120 \text{ мм}$ ;  $h = 600 \text{ мм}$ ;  $b = 200 \text{ мм}$ . Класс бетона C12/15, класс арматуры S500. Расчетный изгибающий момент  $M_{Ed} = 200 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  $c^* = 50 \text{ мм}$ .

Определить площадь сечения растянутой арматуры  $A_{st}$ .

### *Решение*

Для бетона класса C12/15 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 12}{1,5} = 8 \text{ МПа}.$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа}.$$

Рабочая высота сечения

$$d = h - c = 600 - 50 = 550 \text{ мм}.$$

Проверяем расположение нейтральной оси в сечении.

Момент, воспринимаемый полкой таврового сечения, в предположении, что вся она сжата:

$$\begin{aligned} M'_f &= f_{cd} \cdot b'_f \cdot h'_f (d - 0,5h'_f) = \\ &= 8 \cdot 400 \cdot 120(550 - 0,5 \cdot 120) 10^{-6} = 188,2 \text{ кН}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

$$M'_f = 188,2 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_{Ed} = 200 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

следовательно, нейтральная ось пересекает ребро (второй случай расчета).

Определяем значение  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed} - f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b)(d - 0,5h'_f)}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} =$$

$$= \frac{200 \cdot 10^6 - 8 \cdot 120(400 - 200)(550 - 0,5 \cdot 120)}{8 \cdot 200 \cdot 550^2} = 0,219.$$

По значению  $\alpha_m$  рассчитываем  $\xi$ :

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,219} = 0,250.$$

Находим значение  $\xi_{lim}$ :

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot 8 = 0,786;$$

$$\xi_{lim} = \frac{0,786}{1 + \frac{435}{500} \left(1 - \frac{0,786}{1,1}\right)} = 0,630.$$

$$\alpha_{m,lim} = \xi_{lim}(1 - 0,5\xi_{lim}) = 0,630(1 - 0,5 \cdot 0,630) = 0,432.$$

Так как  $\alpha_m = 0,219 < \alpha_{m,lim} = 0,432$ , то разрушение произойдет в результате достижения растянутой рабочей арматурой предела текучести (пластически), т. е. сжатая арматура по расчету не требуется.

Определяем площадь сечения растянутой арматуры:

$$A_{st} = \frac{f_{cd} [\xi b d + (b'_f - b)h'_f]}{f_{yd}} =$$

$$= \frac{8 [0,250 \cdot 200 \cdot 550 + (400 - 200) \cdot 120]}{435} = 947,1 \text{ мм}^2.$$

Принимаем два стержня диаметром 25 мм с  $A_s = 982 \text{ мм}^2$ .

Процент переармирования

$$\rho = \frac{982 - 947,1}{947,1} \cdot 100 \% = 3,7 \% < 5 \%.$$

### Пример 8

Дано: балка таврового сечения с размерами  $b'_f = 1200 \text{ мм}$ ;  $h'_f = 40 \text{ мм}$ ,  $h = 400 \text{ мм}$ ;  $b = 200 \text{ мм}$ . Бетон тяжелый класса С25/30. Арматура класса S500 (стержневая). Изгибающий момент  $M_{Ed} = 420 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  $c^* = 40 \text{ мм}$ .

Определить необходимую площадь сечения арматуры.

*Решение*

Для бетона класса С25/30 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 25}{1,5} = 16,67 \text{ МПа.}$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

Рабочая высота сечения при назначенном  $c^* = 40$  мм

$$d = h - c^* = 400 - 40 = 360 \text{ мм.}$$

Определяем расположение нейтральной оси сечения:

$$\begin{aligned} M'_f &= f_{cd} \cdot b'_f \cdot h'_f (d - 0,5h'_f) = \\ &= 16,67 \cdot 1200 \cdot 40(360 - 0,5 \cdot 40)10^{-6} = 272,1 \text{ кН}\cdot\text{м.} \end{aligned}$$

Так как  $M'_f = 272,1 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_{Ed} = 420 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , то нейтральная линия проходит в ребре сечения (второй случай расчета).

Рассчитываем значение  $\alpha_m$ :

$$\begin{aligned} \alpha_m &= \frac{M_{Ed} - \alpha \cdot f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b)(d - 0,5h'_f)}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2} = \\ &= \frac{420 \cdot 10^6 - 1 \cdot 16,67 \cdot 40(1200 - 200)(360 - 0,5 \cdot 40)}{1 \cdot 16,67 \cdot 200 \cdot 360^2} = 0,447. \end{aligned}$$

Находим значение  $\xi_{lim}$ :

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot 16,67 = 0,717;$$

$$\xi_{lim} = \frac{0,717}{1 + \frac{435}{500} \left(1 - \frac{0,717}{1,1}\right)} = 0,550.$$

$$\alpha_{m,lim} = \xi_{lim}(1 - 0,5\xi_{lim}) = 0,550(1 - 0,5 \cdot 0,550) = 0,399.$$

Так как  $\alpha_m = 0,447 > \alpha_{m,lim} = 0,399$ , то сжатая арматура требуется по расчету.

Принимаем расстояние от верхней грани сечения до центра тяжести сжатой арматуры  $s_1 = 30$  мм, тогда значение площади сечения сжатой арматуры  $A_{sc}$ :

$$A_{sc} = \frac{M_{Ed} - \alpha_{m,lim} \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd} - f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b)(d - 0,5h'_f)}{f_{yd} (d - c_1)} =$$

$$= \frac{420 \cdot 10^6 - 0,399 \cdot 200 \cdot 360^2 \cdot 16,67 - 16,67 \cdot 40(1200 - 200)(360 - 0,5 \cdot 40)}{435(360 - 30)} =$$

$$= 145,5 \text{ мм}^2.$$

По конструктивным соображениям в сечении установлена  $A_{sc} = 226 \text{ мм}^2$  (два стержня диаметром 12 мм), что больше  $145,5 \text{ мм}^2$ . Дальнейший расчет выполняем при  $A_{sc} = 226 \text{ мм}^2$ .

Определяем значение  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed} - f_{cd} \cdot h'_f (b'_f - b)(d - 0,5h'_f) - f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} =$$

$$= \frac{420 \cdot 10^6 - 16,67(1200 - 200) 40(360 - 0,5 \cdot 40) - 435 \cdot 226(360 - 30)}{16,67 \cdot 200 \cdot 360^2} = 0,372.$$

Рассчитываем относительную высоту сжатой зоны  $\xi$ :

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,372} = 0,494.$$

Находим площадь сечения растянутой арматуры:

$$A_{st} = \frac{f_{cd} \cdot \xi \cdot b \cdot d + f_{cd} (b'_f - b) h'_f + f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{yd}} =$$

$$= \frac{16,67 \cdot 0,494 \cdot 200 \cdot 360 + 16,67(1200 - 200) 40 + 435 \cdot 226}{435} = 3121 \text{ мм}^2.$$

Принимаем четыре стержня диаметром 32 мм с  $A_s = 3217 \text{ мм}^2$ .

Процент перearмирования

$$\rho = \frac{3217 - 3121,9}{3121,9} 100 \% = 3,05 \% < 5 \%.$$

### Задача второго типа

Известны размеры сечения  $b \times h$ , площадь сечения всей арматуры, классы материалов, а также действующий изгибающий момент  $M_{Ed}$ . Проверить прочность сечения.

### Алгоритм расчета задач второго типа

1 Решение аналогично п. 1 алгоритма расчета задач первого типа элементов таврового сечения.

2 Решение аналогично п. 2 алгоритма расчета задач первого типа элементов таврового сечения.

3 Решение аналогично п. 3 алгоритма расчета задач первого типа элементов таврового сечения.

4 Решение аналогично п. 4 алгоритма расчета задач первого типа элементов таврового сечения.

5 Если условие (1.36) выполняется, то по формуле (1.10) определяем значение условной высоты сжатой зоны так же, как для прямоугольного сечения с размерами  $b'_f$  и  $h$ :

$$x_{\text{eff}} = \frac{A_{\text{st}} \cdot f_{\text{yd}}}{f_{\text{cd}} \cdot b'_f}. \quad (1.45)$$

6 Учитывая, что  $\xi = x_{\text{eff}}/d$ , находим значение  $\xi$  и соответствующую ей величину  $\alpha_m$ .

7 По формуле (1.12) рассчитываем  $\xi_{\text{lim}}$  и соответствующую ей  $\alpha_{m,\text{lim}}$ .

8 Изгибающий момент  $M_{\text{Rd}}$ , который может воспринимать сечение, определяем по формуле

$$M_{\text{Rd}} = \alpha_m \cdot f_{\text{cd}} \cdot b'_f \cdot d^2. \quad (1.46)$$

9 При выполнении условия  $M_{\text{Ed}} \leq M_{\text{Rd}}$  прочность сечения обеспечена.

10 Если условие (1.36) не выполняется, то нейтральная линия сечения проходит в ребре и высоту условной сжатой зоны  $x_{\text{eff}}$  определяем из уравнения (1.39), т. е.

$$x_{\text{eff}} = \frac{A_{\text{st}} \cdot f_{\text{yd}} - f_{\text{cd}} \cdot (b'_f - b) \cdot h'_f}{f_{\text{cd}} \cdot b}. \quad (1.47)$$

11 Затем, аналогично пп. 6 и 7, определяем значения величин  $\xi$ ,  $\xi_{\text{lim}}$ ,  $\alpha_m$  и  $\alpha_{m,\text{lim}}$ . Сравниваем  $\alpha_m$  и  $\alpha_{m,\text{lim}}$ . При  $\alpha_m < \alpha_{m,\text{lim}}$  сжатая арматура не требуется.

Значение изгибающего момента, воспринимаемого сечением  $M_{\text{Rd}}$ , находим по формуле

$$M_{\text{Rd}} = \alpha_m \cdot f_{\text{cd}} \cdot b \cdot d^2 + f_{\text{cd}} \cdot h'_f (b'_f - b) (d - 0,5h'_f). \quad (1.48)$$

Если  $M_{\text{Rd}} > M_{\text{Ed}}$ , то прочность сечения обеспечена.

При наличии арматуры  $A_{\text{sc}}$  в сжатой зоне сечения, т. е. при двойном армировании, в расчетных формулах (1.45)–(1.48) появляются соответствующие ей значение  $A_{\text{sc}} \cdot f_{\text{yd}}$  и момент  $A_{\text{sc}} \cdot f_{\text{yd}}(d - c_1)$ , как и в формулах для прямоугольного сечения с двойным армированием.

**Пример 9**

*Дано:* балка таврового поперечного сечения с размерами  $b'_f = 500$  мм;  $h'_f = 80$  мм;  $h = 600$  мм;  $b = 200$  мм. Бетон тяжелый класса С20/25. Арматура класса S400 с тремя стержнями диаметром 20 мм с  $A_{st} = 942$  мм<sup>2</sup>, установленная в ребре сечения. Изгибающий момент, действующий на балку,  $M_{Ed} = 150$  кН·м.

Проверить прочность таврового сечения.

*Решение*

Для бетона класса С20/25 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 20}{1,5} = 13,33 \text{ МПа.}$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

Назначаем  $c^* = 50$  мм.

Рабочая высота сечения с учетом толщины защитного слоя бетона и половины диаметра арматуры

$$d = h - c^* = 600 - 50 = 550 \text{ мм.}$$

Согласно условию (1.36) устанавливаем расположение нейтральной оси сечения:

$$\begin{aligned} M_{Ed} = 150 \text{ кН}\cdot\text{м} &\leq M'_f = f_{cd} \cdot b'_f \cdot h'_f (d - 0,5h'_f) = \\ &= 13,33 \cdot 500 \cdot 80(550 - 0,5 \cdot 80)10^{-6} = 271,9 \text{ кН}\cdot\text{м.} \end{aligned}$$

Следовательно, нейтральная ось сечения проходит в полке.

Расчет производим по первому случаю.

Определяем высоту условной сжатой зоны сечения:

$$x_{eff} = \frac{A_{st} \cdot f_{yd}}{f_{cd} \cdot b'_f} = \frac{942 \cdot 435}{13,33 \cdot 500} = 61,5 \text{ мм.}$$

Тогда относительная высота сжатой зоны сечения

$$\xi = \frac{x_{eff}}{d} = \frac{61,5}{550} = 0,11.$$

Находим значение  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \xi(1 - 0,5\xi) = 0,11(1 - 0,5 \cdot 0,11) = 0,104.$$

Значение  $\xi_{lim}$  рассчитываем по формуле (1.12). Из примера 3 при аналогичных прочностных характеристиках материалов принимаем  $\xi_{lim} = 0,562$ .

Зная  $\xi_{lim}$ , величину  $\alpha_{m,lim}$  определяем так же, как и  $\alpha_m$ :

$$\alpha_{m,lim} = \xi_{lim}(1 - 0,5\xi_{lim}) = 0,562(1 - 0,5 \cdot 0,562) = 0,404.$$

Так как  $\alpha_m = 0,104 < \alpha_{m,lim} = 0,404$ , сжатая арматура по расчету не требуется.

Определяем момент, который может быть воспринят сечением:

$$M_{Rd} = \alpha_m \cdot f_{cd} \cdot b'_f \cdot d^2 = 0,104 \cdot 1 \cdot 13,33 \cdot 500 \cdot 550^2 \cdot 10^{-6} = 209,7 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Т. к.  $M_{Ed} = 150 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_{Rd} = 209,7 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , следовательно, прочность сечения обеспечена.

### **Пример 10**

*Дано:* балка таврового сечения с размерами  $b'_f = 500 \text{ мм}$ ;  $h'_f = 40 \text{ мм}$ ;  $h = 600 \text{ мм}$ ;  $b = 200 \text{ мм}$ ,  $c^* = 40 \text{ мм}$ . Класс бетона С16/20. Арматура растянутой зоны сечения (два стержня диаметром 25 мм) класса S500 с  $A_{st} = 982 \text{ мм}^2$ . Изгибающий момент, действующий на сечение от внешней нагрузки,  $M_{Ed} = 420 \text{ кН}\cdot\text{м}$ .

Проверить прочность таврового сечения.

### *Решение*

Для бетона класса С16/20 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 16}{1,5} = 10,67 \text{ МПа}.$$

Для арматуры класса S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа}.$$

С учетом половины диаметра арматуры и толщины защитного слоя бетона определяем рабочую высоту сечения:

$$d = h - c = 600 - 40 = 560 \text{ мм}.$$

Устанавливаем нахождение нейтральной линии сечения:

$$\begin{aligned} M_{Ed} &= f_{cd} \cdot b'_f \cdot h'_f(d - 0,5h'_f) = \\ &= 10,67 \cdot 500 \cdot 40(560 - 0,5 \cdot 40)10^{-6} = 115,2 \text{ кН}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

Так как  $M_{Ed} = 420 \text{ кН}\cdot\text{м} > M_{Rd} = 115,2 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , то нейтральная ось проходит в ребре (второй случай расчета).

Определяем условную эффективную высоту сжатой зоны бетона:

$$x_{\text{eff}} = \frac{A_{\text{st}} f_{\text{yd}} - f_{\text{cd}} h'_f (b'_f - b)}{f_{\text{cd}} b} = \frac{982 \cdot 435 - 10,67 \cdot 40 (500 - 200)}{10,67 \cdot 200} = 140,2 \text{ мм.}$$

Если значение  $x_{\text{eff}}$  известно, то рассчитываем значения  $\xi$  и  $\alpha_m$ :

$$\xi = \frac{x_{\text{eff}}}{d} = \frac{140,2}{560} = 0,250;$$

$$\alpha_m = \xi(1 - 0,5\xi) = 0,250(1 - 0,5 \cdot 0,250) = 0,219.$$

Находим значение  $\xi_{\text{lim}}$ :

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot 10,67 = 0,765;$$

$$\xi_{\text{lim}} = \frac{0,765}{1 + \frac{435}{500} \left(1 - \frac{0,765}{1,1}\right)} = 0,605;$$

$$\alpha_{m,\text{lim}} = \xi_{\text{lim}}(1 - 0,5\xi_{\text{lim}}) = 0,605(1 - 0,5 \cdot 0,605) = 0,422.$$

Так как  $\alpha_m = 0,219 < \alpha_{m,\text{lim}} = 0,422$ , то сжатая арматура по расчету не требуется.

Момент, воспринимаемый тавровым сечением:

$$\begin{aligned} M_{\text{Rd}} &= \alpha_m \cdot f_{\text{cd}} \cdot b \cdot d + f_{\text{cd}} \cdot h'_f (b'_f - b)(d - 0,5h'_f) = \\ &= 0,219 \cdot 10,67 \cdot 500 \cdot 560^2 + 10,67 \cdot 40 (500 - 200)(560 - 0,5 \cdot 40) = \\ &= 435540864 \text{ Н}\cdot\text{мм} = 435,5 \text{ кН}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

Так как  $M_{\text{Ed}} = 420 \text{ кН}\cdot\text{м} < M_{\text{Rd}} = 435,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , то прочность сечения обеспечена.

## 2 Упрощенная деформационная модель сопротивления сечений, нормальных к продольной оси железобетонного изгибаемого элемента

Если расчетное сечение работает в области деформирования 1 и 2, арматура в растянутой зоне используется полностью и разрушения следует ожидать по «растянутой зоне». В области 1а, характерной для слабоармированных элементов (когда коэффициент продольного армирования, определяемый как отношение площади арматуры к площади бетонного сечения, приближается к минимальному), либо когда предельное сопротивление элемента, обусловленное прочностными характеристиками бетона и геометрическими размерами сечения, существенно превышает величину действующих усилий, относительные деформации сжатого бетона не достигают предельных значений, т. е. бетон полностью не используется. Область деформирования 3 описывает переход через граничное состояние сечения, когда прочность бетона используется полностью, но растянутая арматура (менее сжатая) не достигает предельных относительных деформаций. В этом случае разрушение сечения следует ожидать по «сжатой зоне» в результате достижения предельных деформаций бетона. Помимо того, что названный случай приводит к неэкономичному проектированию конструкций, он является опасным, т. к. ведет к быстрому хрупкому разрушению сечения по сжатому бетону.

Очевидно, что наиболее рациональной расчетной ситуацией при проектировании изгибаемых, внецентренно-сжатых и внецентренно-растянутых элементов (работающих с двузначной эпюрой деформаций), является такая, при которой сечение с заданными геометрическими размерами, прочностными и деформационными характеристиками материалов и количеством армирования работает в области деформирования 2. Область деформирования 4 относится к работе сжатых элементов при однозначной эпюре деформаций, когда относительные деформации в менее сжатой арматуре  $\varepsilon_{st}$  достигают предельных значений (при сжатии).

Стадии деформирования железобетонных элементов подробно описаны в [2, п. 6.1].

Основные особенности упрощенной деформационной модели по сравнению с методом предельных усилий (альтернативной моделью) следующие.

Критерием исчерпания прочности железобетонной конструкции по нормальному сечению при использовании деформационной расчетной модели принято условие достижения деформациями сжатого бетона  $\varepsilon_{cc}$  или растянутой арматуры  $\varepsilon_{st}$  их предельных значений (т. е. сравниваются деформации, а не усилия). При этом предельные деформации бетона  $\varepsilon_{cu,2}$  при расчете прочности не должны превышать для центрально-сжатых сечений 2,0 ‰; для изгибаемых и внецентренно-сжатых сечений при двузначной

эпюре напряжений 3,5 %.

Если выполняется условие

$$\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{cu,2}, \quad (2.1)$$

то напряжения в растянутой арматуре достигают расчетного сопротивления (при этом нет необходимости усиливать сжатую зону). Тогда площадь растянутой арматуры находят из условия равновесия продольных сил

$$F_{cc} = F_{st}, \quad (2.2)$$

где  $F_{cc}$  – равнодействующая усилий в сжатом бетоне.

Для прямоугольного сечения площади сжатой и растянутой арматуры определяются соответственно по формулам:

$$A_{sc} = \frac{M_{Ed} - \alpha_{m,lim} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2}{k_{s2} \cdot f_{yd} (d - c_1)}; \quad (2.3)$$

$$A_{st} = \frac{\xi \cdot \omega_c \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d + k_{s2} \cdot f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{yd}}. \quad (2.4)$$

Коэффициент  $\alpha_m$  при наличии сжатой арматуры, установленной по расчету:

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed} - k_{s2} \cdot f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}. \quad (2.5)$$

Для таврового сечения равнодействующая усилий в сжатом бетоне определяется по формуле

$$F_{cc} = f_{cd} [C_0 \cdot b \cdot d (1 - \eta + \omega_c (b_{eff} - b) h'_f)]. \quad (2.6)$$

Тогда площадь растянутой арматуры

$$A_{st} = \frac{f_{cd} [\omega \cdot b \cdot d + \omega_c (b_{eff} - b) h'_f]}{f_{yd}}, \quad (2.7)$$

где

$$\omega = C_0 (1 - \eta). \quad (2.8)$$

В случае, если условие (2.1) не выполняется, первоначально находят площадь арматуры в сжатой зоне  $A_{sc}$  по формуле

$$A_{sc} = \frac{M_{Ed} - \omega_c \cdot f_{cd} \cdot h'_f (b_{eff} - b) (d - 0,5h'_f) - \alpha_{m,lim} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2}{k_{s2} \cdot f_{yd} (d - c_1)}. \quad (2.9)$$

В этом случае площадь растянутой арматуры рассчитывается по формуле

$$A_{st} = \frac{f_{cd} [\omega \cdot b \cdot d + \omega_c (b_{eff} - b) h'_f] + k_{s2} \cdot f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{yd}}, \quad (2.10)$$

где  $k_{s2}$  – коэффициент перехода к значению напряжений в сжатой арматуре ( $\sigma_{sc} = k_{s2} f_{yd}$ ); принимаем  $k_{s2} = 1$  при  $\varepsilon_{sc} \geq \varepsilon_{sy}$ ,  $k_{s2} = \varepsilon_{sc} / \varepsilon_{sy}$  при  $\varepsilon_{sc} < \varepsilon_{sy}$ .

В случае, когда нейтральная ось сечения располагается в стенке таврового сечения, высоту сжатой зоны  $x_{eff}$  (в предположении достижения предельных деформаций сжатым бетоном и растянутой арматурой) определяют из условия равновесия в сечении продольных усилий:

$$x_{eff} = \frac{A_{st} \cdot f_{yd} - A_{sc} \cdot k_{s2} \cdot f_{yd} - \omega_c \cdot f_{cd} (b_{eff} - b) h'_f}{\omega_c \cdot f_{cd} \cdot b}. \quad (2.11)$$

Граничное значение высоты сжатой зоны

$$x_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{cu}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\frac{f_{yd}}{E_s} + \varepsilon_{cu}}. \quad (2.12)$$

Граничное значение коэффициента

$$\alpha_{m,lim} = \omega_c \cdot \xi_{lim} (1 - K_2 \cdot \xi_{lim}) = \omega_c \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{cu}} \right) \left[ 1 - K_2 \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{cu}} \right) \right]. \quad (2.13)$$

Для бетонов классов по прочности на сжатие C12/15–C50/60  $\omega_c = 0,81$ ,  $K_2 = 0,416$  [2].

Коэффициент  $\alpha_m$  показывает, в какой области деформирования работает рассчитываемое сечение при заданных геометрических размерах и прочностных характеристиках бетона и арматуры (таблица В.1). Если коэффициент  $\alpha_m$  попадает в ту часть таблицы, где не выполняется условие (2.1), т. е.  $x_{eff} > x_{lim}$  (для заданных классов бетона и арматуры) необходимо либо изменить исходные параметры бетонного сечения (геометрические размеры сечения  $b$  и  $h$ , класс бетона), либо дополнительно установить арматуру в сжатой зоне сечения.

Если  $x_{eff} \leq x_{lim}$ , т. е. выполняется условие (2.1), предельный момент относительно растянутой арматуры

$$M_{Rd} = \omega_c \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} + \omega_c \cdot f_{cd} \cdot h'_f (b_{eff} - b) \left( d - \frac{h'_f}{2} \right) + k_{s2} \cdot f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1). \quad (2.14)$$

В случае, если рассчитанное значение коэффициента  $\xi$  попадает в область, где не выполняется условие (2.1), т. е.  $x_{eff} > x_{lim}$  (сечение переармировано), расчет допускается производить с некоторым запасом, прини-

мается  $\alpha_m = \alpha_{m,lim}$ .

### Пример 1

Дано: прямоугольное сечение с размерами  $b = 300$  мм,  $h = 600$  мм,  $c^* = 40$  мм. Бетон тяжелый класса C12/15, арматура класса S500. Изгибающий момент, действующий в сечении,  $M_{Ed} = 240$  кН·м.

Определить площадь продольной арматуры  $A_{st}$ .

### Решение

Для бетона класса C12/15 находим расчетное сопротивление  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{12}{1,5} = 8 \text{ МПа.}$$

Для арматуры S500 – расчетное сопротивление  $f_{yd}$ :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ МПа.}$$

Рабочая высота сжатой зоны бетона

$$d = h - c^* = 600 - 40 = 560 \text{ мм.}$$

Определяем значение коэффициента  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} = \frac{240 \cdot 10^6}{8 \cdot 300 \cdot 560^2} = 0,319.$$

Находим граничную величину коэффициента  $\alpha_{m,lim}$ :

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{435}{2 \cdot 10^5} \cdot 10^{-3} = 2,18 \text{ ‰};$$

$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{cu2}} = \frac{3,5}{2,18 + 3,5} = 0,616;$$

$$\alpha_{m,lim} = \omega_c \cdot \xi_{lim} (1 - K_2 \cdot \xi_{lim}) = 0,81 \cdot 0,616 (1 - 0,416 \cdot 0,616) = 0,371.$$

Так как  $\alpha_m = 0,319 < \alpha_{m,lim} = 0,371$ , растянутая арматура достигает предельных деформаций.

Плечо пары сил

$$\eta = \frac{z}{d} = 0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{\alpha_m}{C_0}} = 0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{0,319}{1,947}} = 0,793.$$

Требуемая площадь рабочей арматуры

$$A_{st} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot z} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot \eta \cdot d} = \frac{240 \cdot 10^6}{435 \cdot 0,793 \cdot 560} = 1242 \text{ мм}^2.$$

Принимаем четыре стержня диаметром 20 мм с  $A_s = 1256 \text{ мм}^2$ .

Выполним этот расчет с использованием таблицы В.1.

При  $\alpha_m = 0,319$  устанавливаем, что деформированное состояние сечения соответствует области 2, т. е. растянутая арматура достигает предельных деформаций.

При  $\alpha_m = 0,319$  находим величину  $\eta = 0,792$ .

Тогда требуемая площадь рабочей арматуры

$$A_{st} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot \eta \cdot d} = \frac{240 \cdot 10^6}{435 \cdot 0,792 \cdot 560} = 1242 \text{ мм}^2.$$

Принимаем четыре стержня диаметром 20 мм с  $A_s = 1256 \text{ мм}^2$ .

### Пример 2

*Дано:* Прямоугольное сечение с размерами:  $b = 300 \text{ мм}$ ,  $h = 700 \text{ мм}$ ,  $c^* = 50 \text{ мм}$ ,  $d' = 30 \text{ мм}$ . Бетон класса C25/30 ( $f_{ck} = 25 \text{ МПа}$ ,  $f_{cd} = 16,67 \text{ МПа}$ ). Арматура класса S500 ( $f_{yk} = 500 \text{ МПа}$ ,  $f_{yd} = 435 \text{ МПа}$ ,  $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ). Изгибающий момент  $M_{Ed} = 800 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

Определить площадь растянутой арматуры.

### Решение

Рабочая высота сжатой зоны бетона

$$d = h - c^* = 700 - 50 = 650 \text{ мм}.$$

Определяем значение коэффициента  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} = \frac{800 \cdot 10^6}{16,67 \cdot 300 \cdot 650^2} = 0,378.$$

Рассчитываем граничную величину коэффициента  $\alpha_{m,lim}$ :

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{435}{2 \cdot 10^5} \cdot 10^{-3} = 2,18 \text{ ‰};$$

$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{cu2}} = \frac{3,5}{2,18 + 3,5} = 0,616;$$

$$\alpha_{m,lim} = \omega_c \cdot \xi_{lim} (1 - K_2 \cdot \xi_{lim}) = 0,81 \cdot 0,616 (1 - 0,416 \cdot 0,616) = 0,371.$$

Так как  $\alpha_m = 0,378 > \alpha_{m,lim} = 0,371$ , требуется установка сжатой арматуры по расчету.

Принимаем  $k_{s2} = 1$  (полное использование сжатой арматуры).

Требуемая площадь арматуры в сжатой зоне

$$A_{sc} = \frac{M_{Ed} - \alpha_{m,lim} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2}{k_{s2} \cdot f_{yd} (d - c_1)} = \frac{800 \cdot 10^6 - 0,371 \cdot 16,67 \cdot 300 \cdot 650^2}{1 \cdot 435(650 - 30)} = 59,72 \text{ мм}^2.$$

Конструктивно принимаем два стержня диаметром 12 мм с  $A_s = 226 \text{ мм}^2$ .

Определяем величину относительного изгибающего момента, воспринимаемого сжатой зоной бетона:

$$\alpha_m = \frac{M_{Ed} - k_{s2} \cdot f_{yd} \cdot A_{sc} (d - c_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} = \frac{800 \cdot 10^6 - 1 \cdot 435 \cdot 226(650 - 30)}{16,67 \cdot 300 \cdot 650^2} = 0,350.$$

Относительная высота сжатой зоны

$$\xi = \frac{\eta}{K_2} = \frac{0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{\alpha_m}{C_0}}}{K_2} = \frac{0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{0,350}{1,947}}}{0,416} = 0,565.$$

Тогда требуемая площадь рабочей арматуры

$$A_{st} = \frac{\xi \cdot \omega_c \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d + k_{s2} \cdot f_{yd} \cdot A_{sc}}{f_{yd}} =$$

$$= \frac{0,565 \cdot 0,810 \cdot 16,67 \cdot 300 \cdot 650 + 1 \cdot 435 \cdot 226}{435} = 3644,9 \text{ мм}^2.$$

Принимаем два стержня диаметром 36 мм с  $A_s = 2036 \text{ мм}^2$  и два стержня диаметром 32 мм с  $A_s = 1609 \text{ мм}^2$ . Принятая площадь рабочей арматуры  $A_{st} = 2036 + 1609 = 3645 \text{ мм}^2$ .

### **Пример 3**

*Дано:* тавровое сечение с размерами  $h = 400 \text{ мм}$ ,  $h'_f = 50 \text{ мм}$ ,  $b'_f = 800 \text{ мм}$ ,  $b = 200 \text{ мм}$ ,  $d = 360 \text{ мм}$ . Бетон тяжелый класса C25/30 ( $f_{ck} = 25 \text{ МПа}$ ,  $f_{cd} = 16,67 \text{ МПа}$ ), арматура класса S500 ( $f_{yk} = 500 \text{ МПа}$ ,  $f_{yd} = 435 \text{ МПа}$ ). Момент, действующий в сечении,  $M_{Ed} = 130 \text{ кН}\cdot\text{м}$ .

Определить площадь растянутой арматуры.

### **Решение**

Для сечения с одиночным армированием проверяем условие, определяющее положение нейтральной оси.

Предполагаем, что нейтральная ось проходит по нижней грани пол-

ки, и определяем область деформирования для прямоугольного сечения шириной  $b'_f$ :

$$\xi = \frac{h'_f}{d} = \frac{50}{360} = 0,139 < \xi_{\text{lim}} = 0,616.$$

По таблице В.1 устанавливаем, что сечение находится в стадии деформирования 1а.

По формулам из таблицы В.2 находим величину изгибающего момента, воспринимаемого бетоном сечения, расположенным в пределах высоты полки:

$$\begin{aligned} M_{\text{Rd},f} &= \alpha_m \cdot f_{\text{cd}} \cdot b'_f \cdot d^2 = \frac{1,25\xi^2 (3\xi^2 - 12\xi + 4)}{(1-\xi)^2} f_{\text{cd}} \cdot b'_f \cdot d^2 = \\ &= \frac{1,25 \cdot 0,139^2 (3 \cdot 0,139^2 - 12 \cdot 0,139 + 4)}{(1 - 0,139)^2} 16,67 \cdot 800 \cdot 360^2 \cdot 10^{-6} = 134,6 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Так как  $M_{\text{Ed}} = 130 \text{ кН} \cdot \text{м} < M_{\text{Rd},f} = 134,6 \text{ кН} \cdot \text{м}$ , нейтральная ось расположена в полке. Поэтому дальнейший расчет производим как для прямоугольного сечения шириной  $b'_f = 800 \text{ мм}$  с рабочей высотой  $d = 360 \text{ мм}$ .

Определяем значение коэффициента  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \frac{M_{\text{Ed}}}{f_{\text{cd}} \cdot b \cdot d^2} = \frac{130 \cdot 10^6}{16,67 \cdot 800 \cdot 360^2} = 0,075.$$

При  $\alpha_m = 0,075$  по таблице В.1 находим величину  $\eta = 0,951$ .

Тогда требуемая площадь рабочей арматуры

$$A_{\text{st}} = \frac{M_{\text{Ed}}}{f_{\text{yd}} \cdot \eta \cdot d} = \frac{130 \cdot 10^6}{435 \cdot 0,951 \cdot 360} = 872,9 \text{ мм}^2.$$

Принимаем два стержня диаметром 25 мм с  $A_s = 982 \text{ мм}^2$ .

## Список литературы

- 1 **ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250)**. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва РБ, 2010. – Ч. 1–1. – 191 с.
- 2 Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования : курс лекций / Под ред. Т. М. Пецольда, В. В. Тура. – Брест : БГТУ, 2003. – 380 с.
- 3 **СНБ 5.03.01-02**. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2003. – 139 с.
- 4 **СНБ 5.03.01-02**. Бетонные и железобетонные конструкции (изменение № 1). – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2004. – 31 с.
- 5 **СНБ 5.03.01-02**. Бетонные и железобетонные конструкции (изменение № 3). – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2006. – 6 с.
- 6 **СНБ 5.03.01-02**. Бетонные и железобетонные конструкции (изменение № 4). – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2007. – 4 с.
- 7 **СНБ 5.03.01-02**. Бетонные и железобетонные конструкции (изменение № 5). – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2009. – 14 с.
- 8 **СНиП 2.01.07-85**. Нагрузки и воздействия. – М. : Стройиздат, 1986. – 49 с.
- 9 **Тур, В. В.** Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил / В. В. Тур, А. А. Кондратчик. – Брест : БГТУ, 2000. – 400 с.
- 10 **Байков, В. Н.** Железобетонные конструкции. Общий курс / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – М. : Стройиздат, 1985. – 767 с.
- 11 **Гольшев, А. Б.** Проектирование железобетонных конструкций : справ. пособие / А. Б. Гольшев. – Киев : Будівельник, 1990. – 496 с.
- 12 **Дрозд, Я. Н.** Предварительно напряженные железобетонные конструкции / Я. Н. Дрозд, Г. П. Пастушков. – Минск : Выш. шк., 1984. – 250 с.
- 13 **Попов, Н. Н.** Проектирование и расчет железобетонных и каменных конструкций / Н. Н. Попов, А. В. Забегаев. – М. : Высш. шк., 1989. – 320 с.

## Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Сортамент арматуры

Номинальный диаметр стержня, мм	Расчетная площадь поперечного сечения стержня, мм <sup>2</sup> , при числе стержней									Теоретическая масса 1 м длины стержня
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
4	12,6	25,1	37,7	50,2	62,8	75,4	87,9	1005	113	0,092
5	19,6	39,3	58,9	78,5	98,2	177,8	137,5	157,1	176,7	0,144
6	28,3	57	85	113	141	170	198	270	254	0,322
8	50,3	101	151	201	251	302	352	402	453	0,395
10	78,5	157	236	314	393	471	550	628	707	0,617
12	113,1	226	339	452	565	679	792	905	1018	0,888
14	153,9	308	462	616	769	923	1077	1231	1385	1,208
16	201,1	402	603	804	1005	1206	1407	1608	1810	1,578
18	254,5	509	763	1018	1272	1527	1781	2036	2290	1,998
20	314,2	628	942	1256	1571	1885	2199	2513	2828	2,466
25	490,9	982	1473	1963	2454	2945	3436	3927	4418	3,84
28	615,8	1232	1847	2463	3079	3685	4310	4926	5542	4,83
32	800,3	1609	2413	3217	4021	4826	5630	6434	7238	6,31
36	1017,9	2036	3054	4072	5089	6107	7125	8143	9161	7,99
40	1256,6	2513	3770	5027	6283	7540	8796	10053	11310	9,865
45	1590,4	3181	4771	6362	7952	9542	11133	12723	14313	12,49
50	1963,5	3927	5891	7854	9818	11781	13745	15708	17672	15,41
55	2376	4752	7128	9504	11880	14256	16632	19008	21384	18,65
60	2827	5654	8481	11308	14135	16962	19789	22616	25443	22,19
70	3848	7696	11544	15392	19240	23088	26936	30754	34632	30,21
80	5027	10055	15081	20108	25135	30162	35190	40216	45243	39,45

## Приложение Б (справочное)

Таблица Б.1 – Характеристики ненапрягаемой арматуры

Класс арматуры	Номинальный диаметр	Вид поверхности	$k = f_{tk}/f_{yk}$	Нормативное сопротивление $f_{yk}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Расчетное сопротивление поперечной арматуры $f_{ywd}$ , Н/мм <sup>2</sup>	
S240	5,5–40	Гладкая	1,08	240	174	157*
S500	4–5	Гладкая и периодического профиля	1,05	500	333	300*
		Периодического профиля	1,05	500	348	313*
S500	25–40	Периодического профиля	1,05	500	333	—

## Приложение В (справочное)

Таблица В.1 – Значения  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\alpha_m$  для расчета железобетонных элементов по I ПС

Область деформирования	Коэффициент				Относительная деформация, ‰	
	$\xi = x/d$	$\omega_c \xi$	$\eta = z/d$	$\alpha_m$	сжатия в бетоне $\varepsilon_c (+)$	растяжения в арматуре $\varepsilon_{st} (+)$
1	2	3	4	5	6	7
Область 1a	0,02	0,002	0,993	0,002	0,20	10,0
	0,04	0,008	0,986	0,008	0,42	10,0
	0,06	0,017	0,979	0,017	0,64	10,0
	0,08	0,030	0,972	0,029	0,87	10,0
	0,10	0,045	0,965	0,044	1,11	10,0
	0,12	0,063	0,957	0,061	1,36	10,0
	0,14	0,083	0,949	0,079	1,63	10,0
	0,16	0,104	0,940	0,098	1,90	10,0
Верхний предел для области 1a	0,167	0,111	0,938	0,104	2,00	10,0
Область 1b	0,18	0,125	0,931	0,117	2,20	10,0
	0,20	0,147	0,922	0,135	2,50	10,0
	0,22	0,168	0,912	0,153	2,82	10,0
	0,24	0,189	0,902	0,171	3,16	10,0
Верхний предел для области 1b	0,259	0,211	0,892	0,187	3,50	10,0
Область 2	0,26	0,212	0,892	0,188	3,50	9,96
	0,28	0,227	0,884	0,200	3,50	9,00
	0,30	0,243	0,875	0,213	3,50	8,17
	0,32	0,259	0,867	0,225	3,50	7,44
	0,34	0,275	0,859	0,236	3,50	6,79
	0,36	0,291	0,850	0,248	3,50	6,22
	0,38	0,308	0,842	0,259	3,50	5,71
	0,40	0,324	0,834	0,270	3,50	5,25
	0,42	0,340	0,825	0,281	3,50	4,83
	0,44	0,356	0,817	0,291	3,50	4,45
	0,46	0,372	0,809	0,301	3,50	4,11
	0,48	0,388	0,800	0,311	3,50	3,79
	0,50	0,405	0,792	0,321	3,50	3,50
	0,52	0,421	0,784	0,330	3,50	3,23
	0,54	0,437	0,775	0,339	3,50	2,98
	0,56	0,453	0,767	0,348	3,50	2,75
0,58	0,469	0,759	0,356	3,50	2,53	
0,60	0,486	0,750	0,364	3,50	2,33	
Граничное значение для арматуры S240	0,769	0,622	0,680	0,423	3,50	1,05

Окончание таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7
Граничное значение для области 2 при арматуре S400	0,656	0,531	0,727	0,386	3,50	1,835
Граничное значение для области 2 при арматуре S500	0,627	0,508	0,739	0,375	3,50	2,085
	0,617	0,500	0,743	0,372	3,50	2,175
Область 3 при арматуре S240, область 3 при арматуре S500	0,78	0,631	0,675	0,426	3,50	0,99
	0,80	0,648	0,667	0,432	3,50	0,87
	0,82	0,664	0,659	0,437	3,50	0,77
	0,84	0,680	0,651	0,442	3,50	0,67
	0,86	0,696	0,642	0,447	3,50	0,57
	0,88	0,712	0,634	0,452	3,50	0,48
	0,90	0,729	0,626	0,456	3,50	0,39
	0,92	0,745	0,617	0,460	3,50	0,30
	0,94	0,761	0,609	0,463	3,50	0,22
Область 2 при арматуре S240, область 3 при арматуре S500	0,66	0,540	0,722	0,390	3,50	1,75
	0,68	0,550	0,717	0,395	3,50	1,65
	0,70	0,567	0,709	0,402	3,50	1,50
	0,72	0,583	0,701	0,408	3,50	1,36
	0,74	0,599	0,692	0,415	3,50	1,23
	0,76	0,615	0,684	0,421	3,50	1,11
Граничное значение для арматуры S240	0,769	0,622	0,680	0,423	3,50	1,05
Область 3 при арматуре S240, область 3 при арматуре S500	0,96	0,777	0,601	0,467	3,50	0,15
	0,98	0,793	0,592	0,470	3,50	0,07
	1,00	0,810	0,584	0,473	3,50	0,00
	1,02	0,826	0,576	0,476	3,50	-0,07
	1,04	0,842	0,568	0,478	3,50	-0,13
	1,06	0,858	0,560	0,480	3,50	-0,20
	1,08	0,874	0,550	0,481	3,50	-0,26
	1,10	0,890	0,543	0,483	3,50	-0,32
	1,12	0,907	0,534	0,484	3,50	-0,38
	1,14	0,923	0,525	0,485	3,50	-0,43

Таблица В.2 – Основные зависимости для расчета железобетонных элементов прямоугольного сечения по упрощенному методу с использованием параболически линейной диаграммы деформирования бетона

Статия	Диапазон изменения относительной высоты сжатой зоны $\xi$	Кривая деформирования $\varepsilon_c$ , %	Напряжения $\sigma_c$ крайнего сжатого волокна при $\varepsilon_c$ , %	Относительная деформация растянутой арматуры $\varepsilon_{s1}$ , %	Относительная деформация сжатой арматуры $\varepsilon_{s2}$ , %	Параметры усиления в бетоне сжатой зоны			Относительный момент $\alpha_m = \frac{M_{\text{ред}}}{bd^2f_{\text{cd}}}$
						Коэффициент полноты эпюры напряжений $\omega_c$	Относительное усилие $\omega_c \xi = \frac{F_{\text{cc}}}{bdf_{\text{cd}}}$	Относительное плечо $\eta = z/d$	
Ia	$\xi \leq \frac{1}{6}$	$10 \frac{\xi}{1-\xi}$	$f_{\text{cd}} \varepsilon_c \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{4}\right)$	10	$10 \frac{\xi - c_1/d}{1-\xi}$	$\frac{5\xi \left(1 - \frac{8}{3}\xi\right)}{(1-\xi)^2}$	$\frac{5\xi^2 \left(1 - \frac{8}{3}\xi\right)}{(1-\xi)^2}$	$\frac{3\xi^2 - 12\xi + 4}{4 \left(1 - \frac{8}{3}\xi\right)}$	$\frac{1,25\xi^2 (3\xi^2 - 12\xi + 4)}{(1-\xi)^2}$
Ib	$\frac{1}{6} < \xi \leq \frac{7}{27}$	$10 \frac{\xi}{1-\xi}$	$f_{\text{cd}}$	10	$10 \frac{\xi - c_1/d}{1-\xi}$	$\frac{16-\xi}{15\xi}$	$\frac{16\xi - 1}{15}$	$1 - \frac{8,55\xi^2 - 1,1\xi + 0,05}{16\xi - 1}$	$1,14\xi - 0,57\xi^2 - 0,07$
II	$\frac{7}{27} < \xi \leq \frac{7}{2\varepsilon_{\text{sy}} + 7}$	3,5	$f_{\text{cd}}$	$3,5 \frac{1-\xi}{\xi}$	$3,5 \frac{\xi - c_1/d}{\xi}$	$\frac{17}{21}$	$\frac{17}{21} \xi$	$1 - \frac{99}{238} \xi$	$\frac{17}{21} \xi - \frac{33}{98} \xi^2$
III	$\frac{7}{2\varepsilon_{\text{sy}} + 7} < \xi \leq \beta_h$	3,5	$f_{\text{cd}}$	$3,5 \frac{1-\xi}{\xi}$	$3,5 \frac{\xi - c_1/d}{\xi}$	$\frac{17}{21}$	$\frac{17}{21} \xi$	$1 - \frac{99}{238} \xi$	$\frac{17}{21} \xi - \frac{33}{98} \xi^2$
IV	$\xi > \beta_h$	$\frac{14\xi}{7\xi - 3\beta_h}$	$f_{\text{cd}}$	$\frac{14(\xi - 1)}{7\xi - 3\beta_h}$	$\frac{14 \left(\xi - \frac{c_1}{d}\right)}{7\xi - 3\beta_h}$	$1 - p_4 \frac{4}{21}$ , где $p_4 = \left(\frac{4\beta_h}{7\xi - 3\beta_h}\right)^2$	$\beta_h \left(1 - p_4 \frac{4}{21}\right)$	$1 - \frac{\beta_h}{2} \cdot \frac{1 - p_4}{1 - p_4} \cdot \frac{16}{49} \frac{1 - p_4}{4}$	$\beta_h \left[ \frac{\beta_h - p_4}{2} - p_4 \left( \frac{4}{21} - \frac{8}{49} \beta_h \right) \right]$