



Томский государственный архитектурно-строительный университет

Кафедра
«Железобетонные и каменные конструкции»

Дисциплина
«Железобетонные конструкции»
Курс лекций

**Тема 4. Расчет сжатых железобетонных элементов
прямоугольного профиля по прочности**

Лекция 11. Расчет прочности сжатых элементов

Составитель: В. В. Родевич

Вопросы:

1. Общие сведения о сжатых железобетонных элементах\
2. Конструктивные особенности сжатых элементов с гибкой продольной арматурой и хомутами
3. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов прямоугольного профиля со случайным эксцентриситетом
4. Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного профиля при больших эксцентриситетах
5. Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного профиля при малых эксцентриситетах
6. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов по СП 63.13330-2012
7. Расчет закладных деталей

1. Общие сведения о сжатых железобетонных элементах

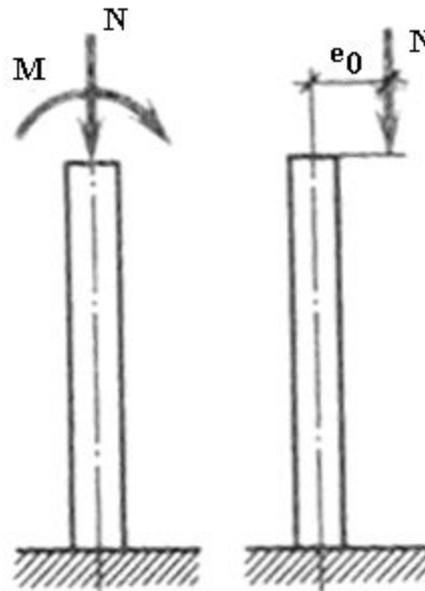
сжатые элементы – элементы, на которые действуют сжимающие силы

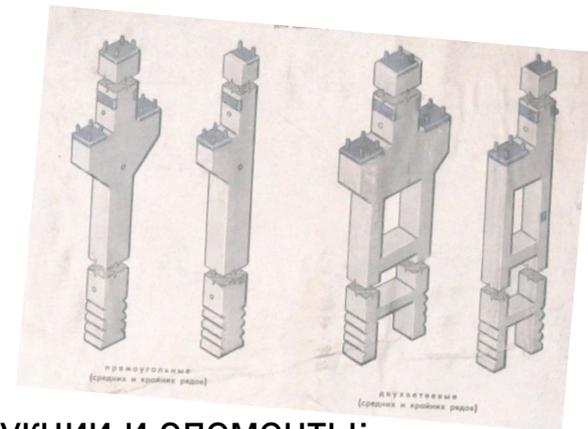
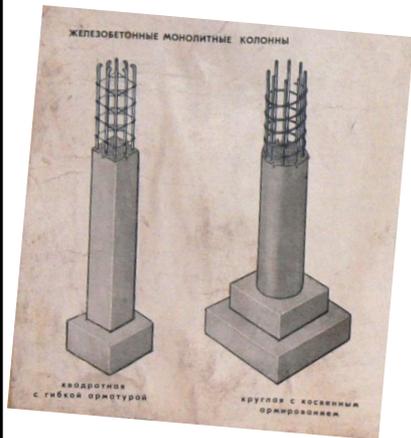
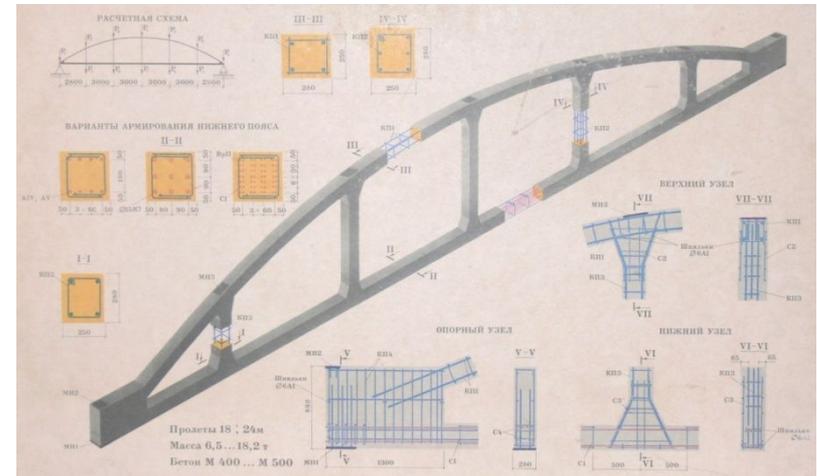
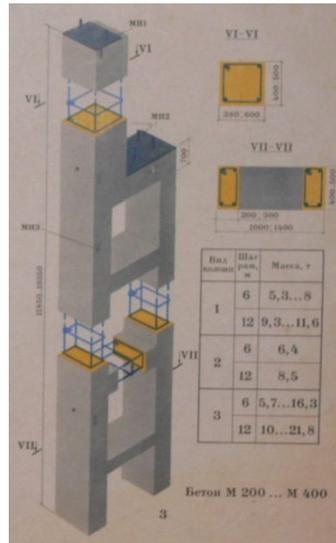
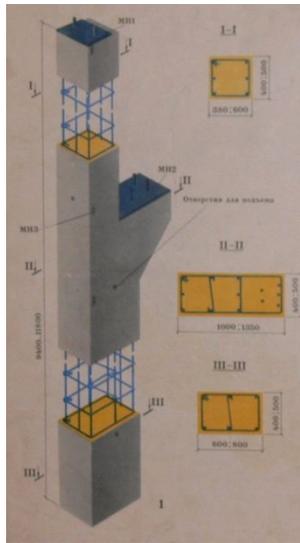
Центрально сжатые элементы – элементы, в которых сжимающие силы действуют по оси элемента.

Из-за несовершенства геометрических форм элементов конструкции, неоднородности бетона центральное сжатие в чистом виде не наблюдается, а происходит внецентренное сжатие с так называемыми **случайными эксцентриситетами**.

$$e_a \geq \begin{cases} \frac{1}{600} \cdot \Delta_0 \\ \frac{1}{30} \cdot h \\ 10 \text{ мм} \end{cases}$$

Внецентренно сжатые элементы – элементы, в которых расчетные продольные сжимающие силы N действуют с эксцентриситетом продольного усилия e_0 по отношению к вертикальной оси элемента или на которые одновременно действуют осевая продольная сжимающая сила N и изгибающий момент M .



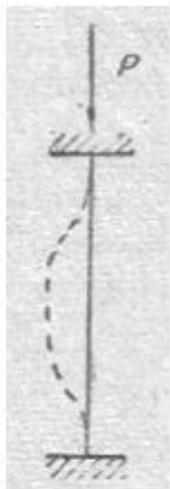


Сжатые железобетонные конструкции и элементы:

- сборные колонны одноэтажных промышленных зданий с мостовыми кранами;
- монолитные колонны; - сборные колонны многоэтажных промышленных зданий
- верхний пояс и стойки безраскосных ферм;
- верхний пояс, сжатые раскосы и стойки раскосных ферм;

Расчетная длина элемента ℓ_0

зависит от закрепления его концов и принимается.



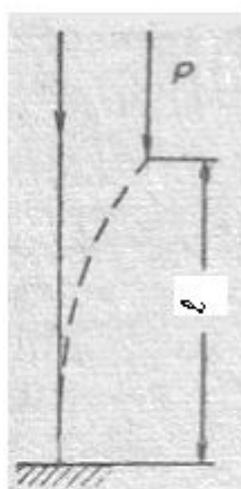
$$\ell_0 = 0,5 \cdot \ell$$



$$\ell_0 = 0,7 \cdot \ell$$



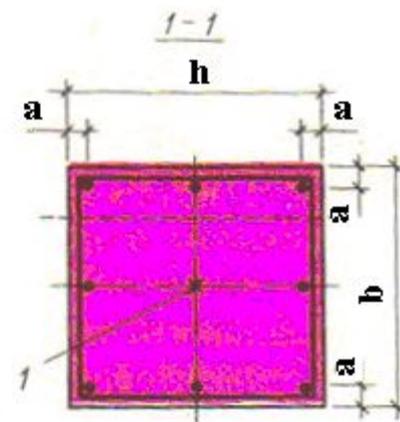
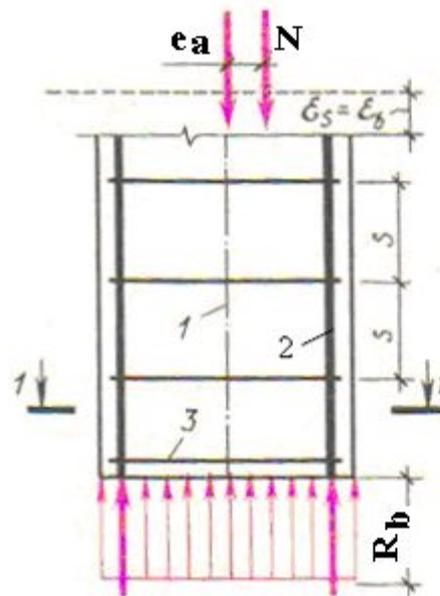
$$\ell_0 = \ell$$



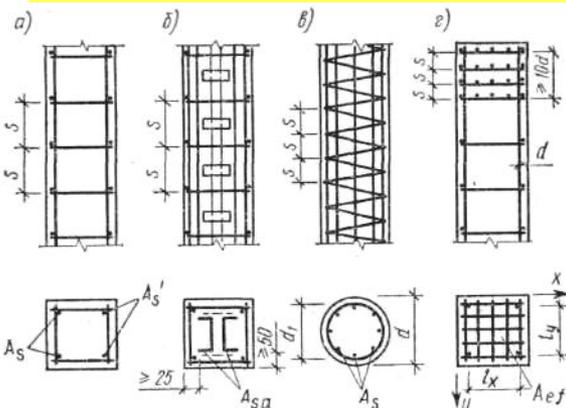
$$\ell_0 = 2 \cdot \ell$$

Расчетная схема внецентренно сжатого элемента при случайном эксцентриситете e_a

- 1 – геометрическая ось элемента;
- 2 – продольная арматура;
- 3 – хомуты

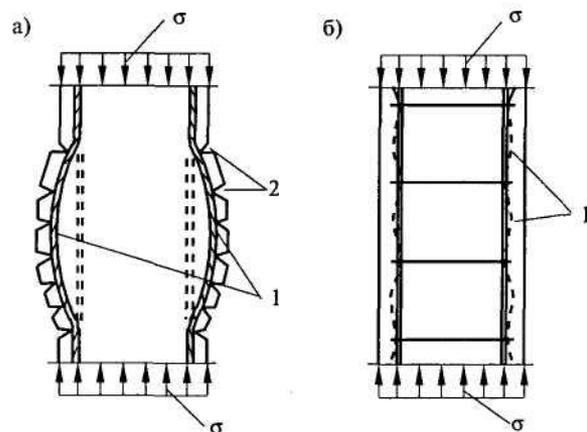


2. Конструктивные особенности сжатых элементов с гибкой продольной арматурой и хомутами



Поперечное сечение сжатых элементов, как правило, принимают: при малых эксцентриситетах — квадратное, круглое, кольцевое, при больших — прямоугольное, двутавровое. Элементы квадратного и прямоугольного сечений просты в изготовлении, но более материалоемки. Размеры поперечного сечения определяют расчетом и в целях унификации принимают кратными 50 мм, если размер сечения не превышает 500 мм, и кратным 100 мм — при больших размерах.

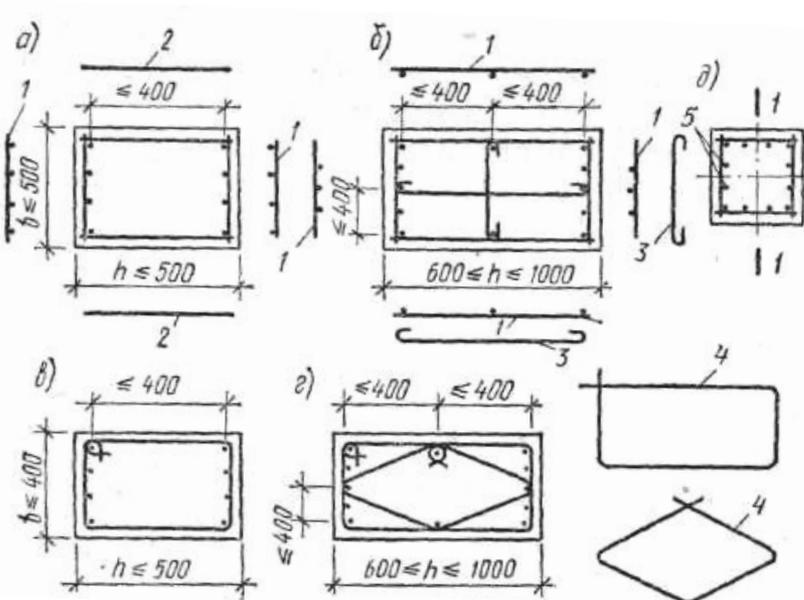
В зависимости от особенностей армирования сжатые элементы различают: 1. по виду продольного армирования: а) с гибкой продольной арматурой и хомутами (рис. а); б) с жесткой (несущей) продольной арматурой (рис., б); 2. по виду поперечного армирования: с обычным поперечным армированием (хомутами) (см. рис., а); с косвенной арматурой, учитываемой в расчете (рис. в, г).



Потеря устойчивости арматуры в сжатом железобетонном элементе:

а) при отсутствии поперечной арматуры;
б) при наличии поперечной арматуры (хомутов);
1 — выпучивание продольной арматуры;

2 — разрушение бетона

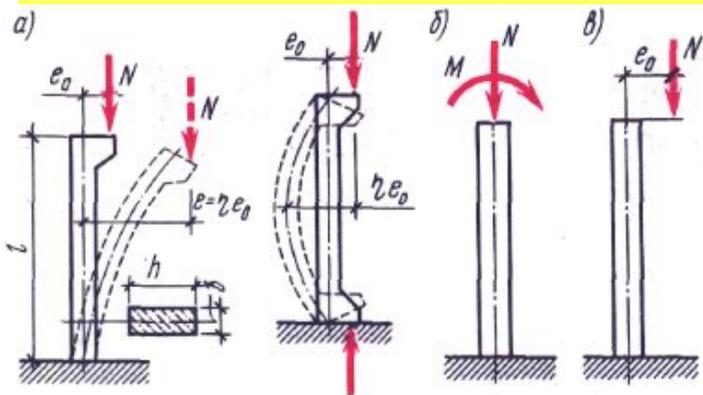


а, б, д — сварными каркасами; в, г — вязаными; / — сварные каркасы; 2 — соединительные стержни; 3 — шпильки; 4 — вязанные хомуты; 5 — промежуточные стержни; 1—1 — плоскость, в которой лежит эксцентриситет еа

Чтобы обеспечить качественное бетонирование, сборные и монолитные колонны сечением менее 250X250 мм применять не рекомендуется. Для колонн обычно применяют бетон классов В 15...30. Арматура сжатых элементов состоит из продольных и поперечных стержней (хомутов), расположенных, как правило, на равных расстояниях друг от друга. Продольная арматура ставится по расчету и воспринимает часть нагрузки, действующей на элемент. Хомуты, в основном, предназначены для обеспечения проектного положения арматуры и для предотвращения выпучивания продольных стержней при действии внешней нагрузки. Кроме того, хомуты препятствуют развитию поперечных деформаций элемента, тем самым несколько повышая сопротивляемость бетона сжатию.

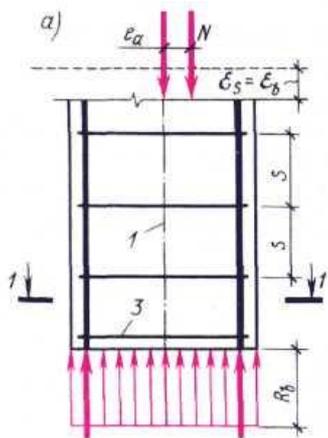
Расположение продольной арматуры может быть симметричным ($A_s = A'_s$) относительно центра тяжести сечения и несимметричным ($A_s \neq A'_s$). Симметричное армирование применяют в элементах с малым эксцентриситетом и при действии моментов двух знаков, близких по величине. Оно проще в изготовлении, но при больших эксцентриситетах менее экономично. Насыщение поперечного сечения сжатых элементов продольной арматурой оценивают коэффициентом (процентом) армирования. При этом принимают в элементах со случайным эксцентриситетом $\mu = (A_s + A'_s) / (bh)$, а в элементах с расчетным эксцентриситетом $\mu = A_s / (bh_0)$, и $\mu' = A'_s / (bh_0)$. Оптимальный процент армирования по экономическим соображениям принимают $\mu = 1...2\%$, Минимальный устанавливают в зависимости от гибкости элемента; он обеспечивает восприятие не учитываемых расчетом воздействий (температурных, усадочных и др.) и предотвращает хрупкое разрушение при образовании трещин. В элементах с расчетным эксцентриситетом $\mu\%$, $\mu_{\min} = 0,05...0,25\%$, а в элементах со случайным эксцентриситетом увеличивается вдвое. Сжатые элементы обычно проектируют с ненапрягаемой арматурой. Предварительно напряженную арматуру целесообразно применять при значительных эксцентриситетах и большой гибкости. В последнем случае предварительное напряжение создает лучшие условия работы элементов в период изготовления и монтажа, когда они работают на изгиб. Ненапрягаемая арматура колонн изготавливается в виде сварных каркасов, вязаные каркасы менее индустриальны и применяются относительно редко. Для продольной рабочей арматуры целесообразно использовать горячекатаные стали классов А-III, Ат-III и А-II диаметром не более 40 мм и не менее: в сборных элементах — 16 мм, в монолитных — 12 мм. Стержни диаметром более 40 мм трудно обрабатываются, а менее 12... 16 мм не обеспечивают достаточной жесткости каркасов при их монтаже. Применение арматуры классов Ат-IV, Ат-V, А-V диаметром до 32 мм допускается в вязаных каркасах при наличии косвенного армирования, повышающего деформативность элемента. Для удобства бетонирования и обеспечения надежного сцепления арматуры с бетоном расстояние в свету между продольными стержнями принимают: при вертикальном бетонировании не менее 50 мм; при бетонировании в горизонтальном положении не менее 25 мм для нижней арматуры и не менее 30 мм для верхней и в обоих случаях не менее диаметра стержня. Максимально допустимое расстояние - 400 мм. Если расстояние превышает 400 мм, то следует установить дополнительные стержни диаметром не менее 12 мм. Колонны сечением 400X400 мм можно армировать четырьмя стержнями. Если плоские каркасы противоположных граней колонны имеют промежуточные продольные стержни, то последние по крайней мере через один и не реже чем через 400 мм связывают между собой с помощью шпилек. Шпильки не ставят при ширине грани колонны ≤ 500 мм, если число стержней у этой грани не превышает 4. Поперечную арматуру в сжатых элементах устанавливают конструктивно. Расстояние между хомутами назначают: при $R_{sc} \leq 400$ МПа — не более 500 мм и 20d в сварных каркасах или 15d в вязаных; при $R_{sc} > 450$ МПа — не более 400 мм и 15d в сварных каркасах или 12d в вязаных. В местах стыкования рабочих стержней внахлестку без сварки, а также если общее насыщение элемента продольной арматурой превышает 3 %, хомуты устанавливают не реже чем через 300 мм и 10d. Диаметр поперечных стержней в сварных каркасах назначают по условиям свариваемости, а в вязаных — не менее 5 мм и 0,25d. Для поперечной арматуры используют класс Вр-I, А-I, А-III.

3. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов прямоугольного профиля со случайным эксцентриситетом



Под внецентрично сжатыми (колонны, перегородки и стены зданий, элементы ферм и арок) принимают элементы, в которых расчетные продольные сжимающие силы действуют с начальным эксцентриситетом e_0 по отношению к вертикальной оси элемента или на которые одновременно действуют осевая продольная сжимающая сила и изгибающий момент M .

Величину случайного эксцентриситета e_0 принимают не менее: $1/600$ длины элемента или длины части элемента (между точками закрепления); $1/30$ высоты сечения и не менее $e_0 \geq 10$ мм.



В общем случае расчет элементов со случайным эксцентриситетом производится как для внецентрично сжатых элементов. Однако для элементов прямоугольного сечения при расчетной длине $l_0 \leq 20h$ и симметричной Арматуре классов А-I, А-II, А-III допускается расчет с использованием Формулы центрального сжатия. Условие прочности

$$N \leq N_{cu} = \eta \varphi [R_b A + R_{sc} (A_s + A'_s)]$$

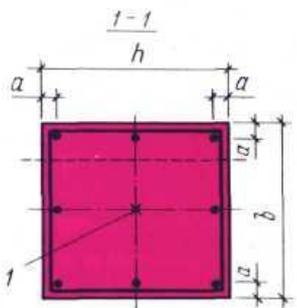
$$A = h_{col} \cdot b_{col}$$

$$A_{s,tot} = A_s + A'_s$$

$$\varphi = \varphi_b + 2(\varphi_{sb} - \varphi_b) \alpha_s \leq \varphi_{sb}$$

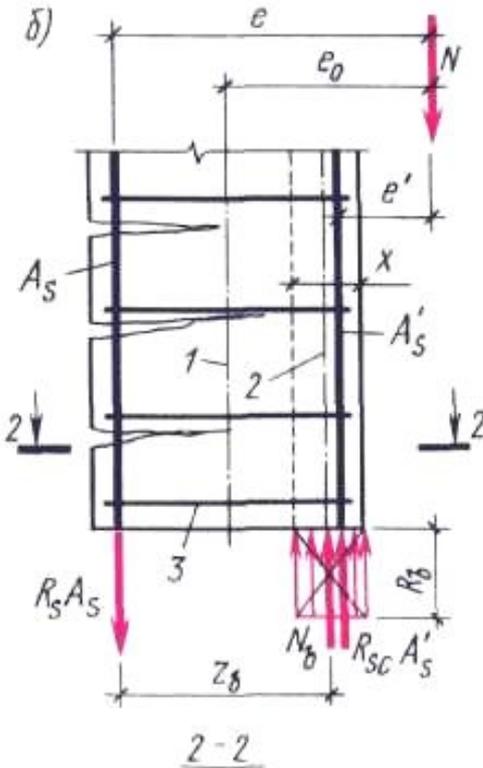
$$\alpha_s = R_{sc} A_{s,tot} / (R_b A)$$

$$\mu = A_{s,tot} / A$$



$$A_{s,tot} = \frac{N}{\varphi \cdot R_{sc}} - \frac{R_b \cdot A}{R_{sc}}$$

4. Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного профиля при больших эксцентриситетах



Случай 1 – $x \leq \xi_R h_0$. Величину ξ_R определяют также, как для изгибаемых элементов. Характер разрушения таких элементов близок к характеру разрушения изгибаемых элементов (справедливы все предпосылки, которые относятся к изгибаемым элементам с двойным армированием). В стадии Ia напряженно-деформированного состояния (см. стадии НДС при изгибе) в растянутой зоне образуются нормальные трещины, а в стадии **IIIa** — наступает плавное разрушение элементов, при этом напряжения в растянутой и сжатой арматуре и в бетоне сжатой зоны сечения достигают своих предельных значений: R_s, R_{sc}, R_b т. е. разрушение наступает при одновременном исчерпании несущей способности бетона и арматуры сжатой зоны сечения и растянутой арматуры. При этом элементы следует проектировать так, чтобы соблюдалось условие $x \geq a'$, иначе арматура A'_s будет находиться за пределами бетона сжатой зоны и прочность ее не будет использоваться. Поэтому при $x < a'$ в расчетных уравнениях принимают $A'_s = 0$.

Расстояние от продольной силы до центра тяжести арматуры A_s $e = e_0 + 0,5h - a$. Прочность нормального сечения внецентренно сжатых элементов, разрушающихся по случаям 1, считают обеспеченной, если момент от внешних нагрузок M меньше или равен моменту внутренних сил M_u ($M \leq M_u$), взятых, например, относительно центра тяжести растянутой (или слабо сжатой) арматуры A_s

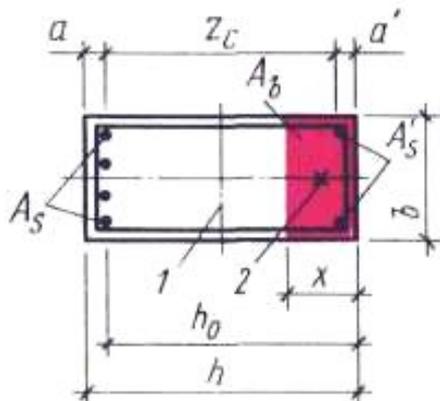
$$N \cdot e \leq M_b + M_{sc} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$$

$$x = \frac{N - R_{sc} A'_s + R_s A_s}{R_b b}$$

$$N = N_b + N'_s - N_s = R_b b x + R_{sc} A'_s - R_s A_s$$

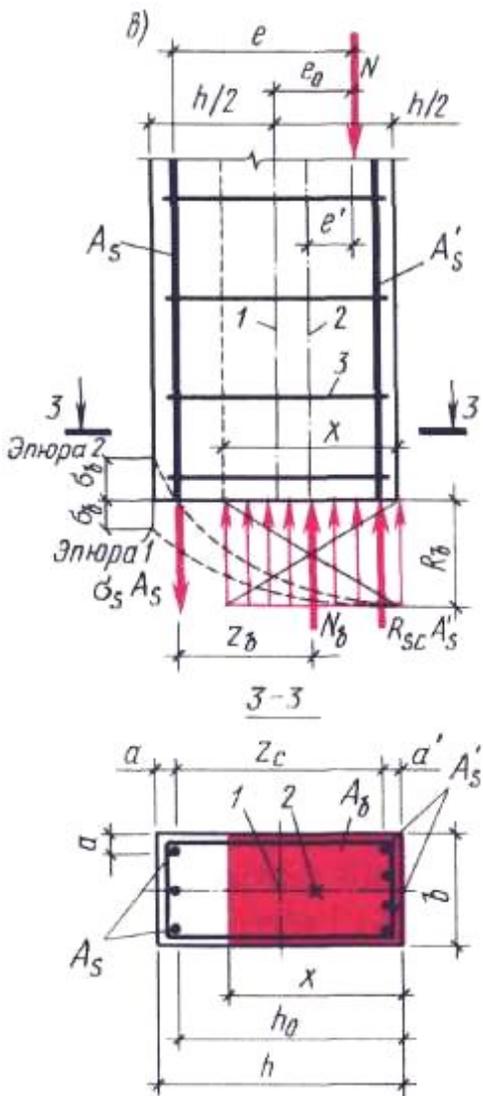
$$A'_s = \frac{N e - \alpha_R R_b b h_0^2}{R_{sc} (h_0 - a')}$$

$$A_s = \frac{R_b b \xi_R h_0 + R_{sc} A'_s - N}{R_s}$$



5. Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного профиля при малых эксцентриситетах

Случай 2 – $x > \xi_R h_0$. Случай 2 объединяет два варианта напряженного состояния элемента: когда все сечение сжато (эпюра 1) или когда часть сечения слабо растянута (эпюра 2). В обоих вариантах разрушение элемента наступает вследствие исчерпания несущей способности бетона сжатой зоны и сжатой арматуры. При этом прочность растянутой арматуры не доиспользуется, напряжения в ней остаются низкими. В целях упрощения расчетов действительные эпюры сжимающих напряжений] или 2 в небольшое снижение запаса прочности заменяют прямоугольной эпюрой с ординатой R_b . В элементах, разрушающихся по случаю 1, напряжение в растянутой арматуре принимают равным R_s , а разрушающихся по случаю 2 — равным $\sigma_s < R_s$ если она растянута, и R_{sc} если арматура сжата. Напряжения в сжатой арматуре получают из условия, что в стадии разрушения деформации бетона и арматуры, благодаря сцеплению их, одинаковы. В стадии Ia напряженно-деформированного состояния (см. стадии НДС при изгибе) в растянутой зоне образуются нормальные трещины, а в стадии IIIб — наступает хрупкое разрушение элементов, при этом напряжения в растянутой и сжатой арматуре и в бетоне сжатой зоны сечения достигают своих предельных значений: σ_s , R_{sc} , R_b т. е. разрушение наступает при исчерпании несущей способности бетона и арматуры сжатой зоны сечения.



Расстояние от продольной силы до центра тяжести арматуры A_s $e = e_0 + 0,5h - a$. Прочность нормального сечения внецентренно сжатых элементов, разрушающихся по случаям 2, считают обеспеченной, если момент от внешних нагрузок M меньше или равен моменту внутренних сил M_u ($M \leq M_u$), взятых, например, относительно центра тяжести растянутой (или слабо сжатой) арматуры A_s

$$N \cdot e \leq M_b + M_{sc} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$$

$$N = N_b + N'_s - N_s = R_b b x + R_{sc} A'_s - \sigma_s A_s$$

$$x = \frac{N - R_{sc} A'_s + \sigma_s A_s}{R_b b}$$

$$\sigma_s = \left[\frac{2(1-\xi)}{1-\xi_R} - 1 \right] R_s$$

6. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов по СП 63.13330-2012

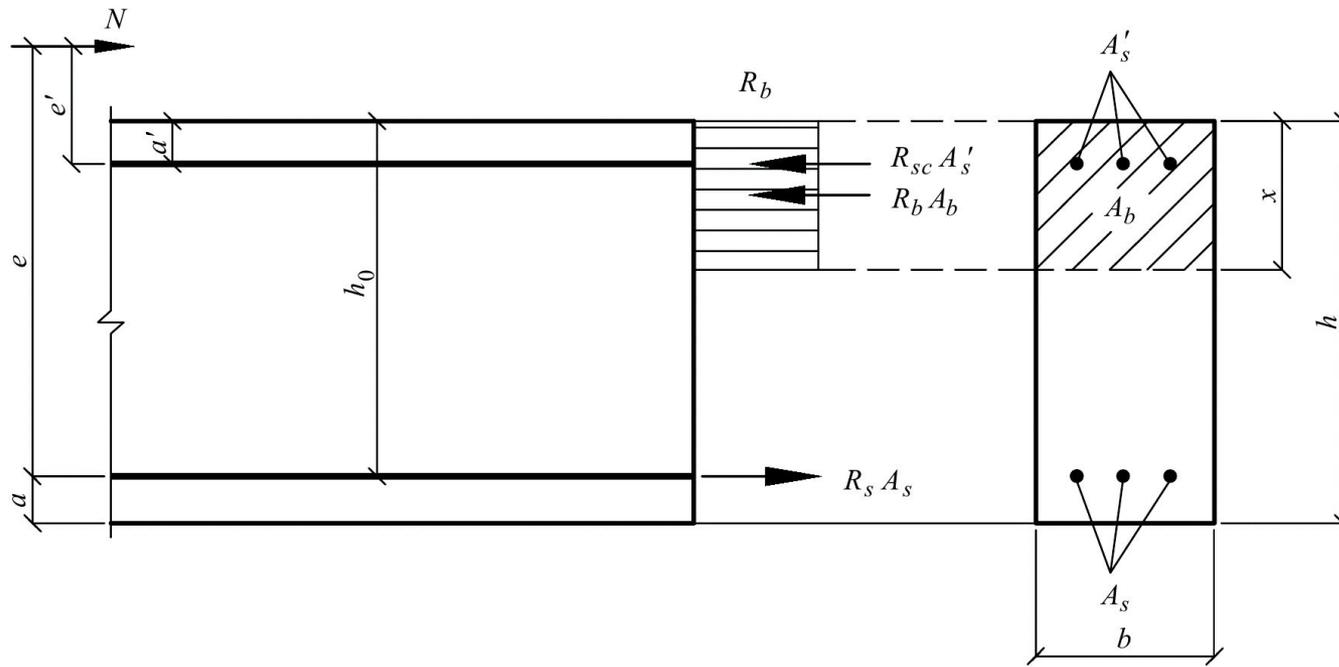


Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси внецентренно сжатого железобетонного элемента, при расчете его по прочности

Условие прочности

$$N \cdot e \leq R_b \cdot b \cdot x(h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s (h_0 - a'),$$

N – продольная сила от внешней нагрузки;

e – расстояние от точки приложения продольной силы N до центра тяжести сечения растянутой или наименее сжатой (при полностью сжатом сечении элемента) арматуры, равное

$$e = e_0 \cdot \eta + \frac{h_0 - a'}{2}$$

η – коэффициент, учитывающий влияние продольного изгиба (прогиба) элемента на его несущую способность

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$$

где N – продольная сила от внешней нагрузки;

N_{cr} – условная критическая сила, определяемая по формуле

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot D}{l_0^2}$$

D – жесткость железобетонного элемента в предельной по прочности стадии, определяемая согласно указаниям расчета по деформациям;

l_0 – расчетная длина элемента

Допускается значение D определять по формуле

$$D = k_b E_b I + k_s E_s I_s$$

Высоту сжатой зоны x определяют:

а) при $\xi = \frac{x}{h_0} \leq \xi_R$

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b}$$

б) при $\xi = \frac{x}{h_0} > \xi_R$

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b + \frac{2R_s \cdot A_s}{h_0(1 - \xi_R)}}$$

Расчет по прочности прямоугольных сечений внецентренно сжатых элементов с арматурой, расположенной у противоположных в плоскости изгиба сторон сечения, при эксцентриситете продольной силы

$$e_0 \leq \frac{h}{30} \quad \text{и гибкости} \quad \frac{l_0}{h} \leq 20$$

допускается производить из условия

$$N \leq N_{ult}$$

$$N_{ult} = \varphi \cdot \left(R_b \cdot A + R_{sc} \cdot A_{s,tot} \right).$$

j – коэффициент, принимаемый при длительном действии нагрузки по таблице 8.1 в зависимости от гибкости элемента; при кратковременном действии нагрузки значения j определяют по линейному закону, принимая $j=0,9$ при $\frac{l_0}{h} = 10$ и $j=0,85$ при $\frac{l_0}{h} = 20$

Т а б л и ц а 8.1

Класс бетона	j при l_0/h , равном			
	6	10	15	20
B20 – B55	0,92	0,9	0,83	0,7
B60	0,91	0,89	0,80	0,65
B80	0,90	0,88	0,79	0,64

7. Расчет закладных деталей

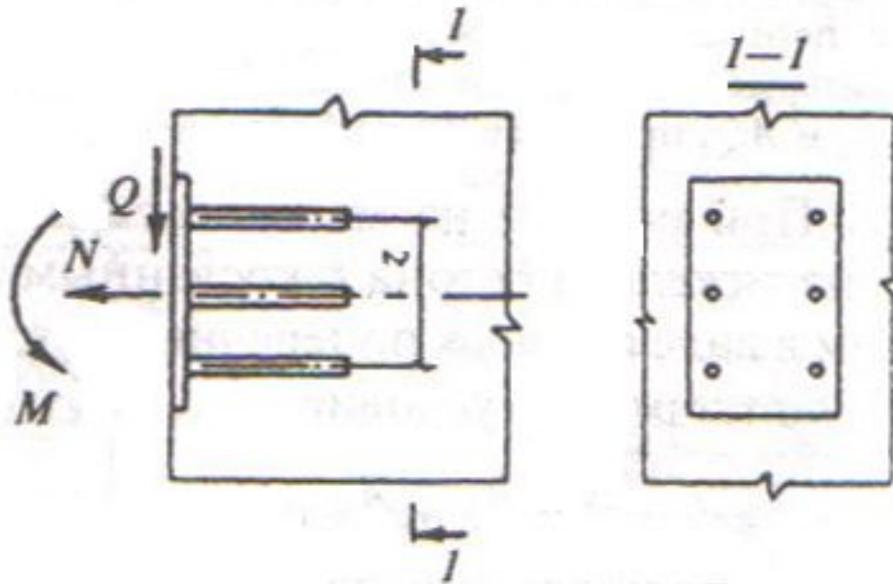


Схема усилий,
действующих на закладную
деталь

Расчет анкеров, приваренных втавр к плоским элементам стальных закладных деталей на действие изгибающих моментов, нормальных и сдвигающих сил от статической нагрузки, расположенных в одной плоскости симметрии закладной детали должен производиться по формуле

$$A_{an} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{N_{an}^2 + \left(\frac{Q_{an}}{\lambda \cdot \delta} \right)^2}}{R_s}$$

A_{an} — суммарная площадь поперечного сечения анкеров наиболее напряженного ряда;

N_{an} — наиболее растягивающее усилие в одном ряду анкеров;

Q_{an} — сдвигающее усилие, приходящееся на один ряд анкеров;

λ, δ — коэффициенты, рассчитываемые в зависимости от характеристик бетона и арматуры.