

---

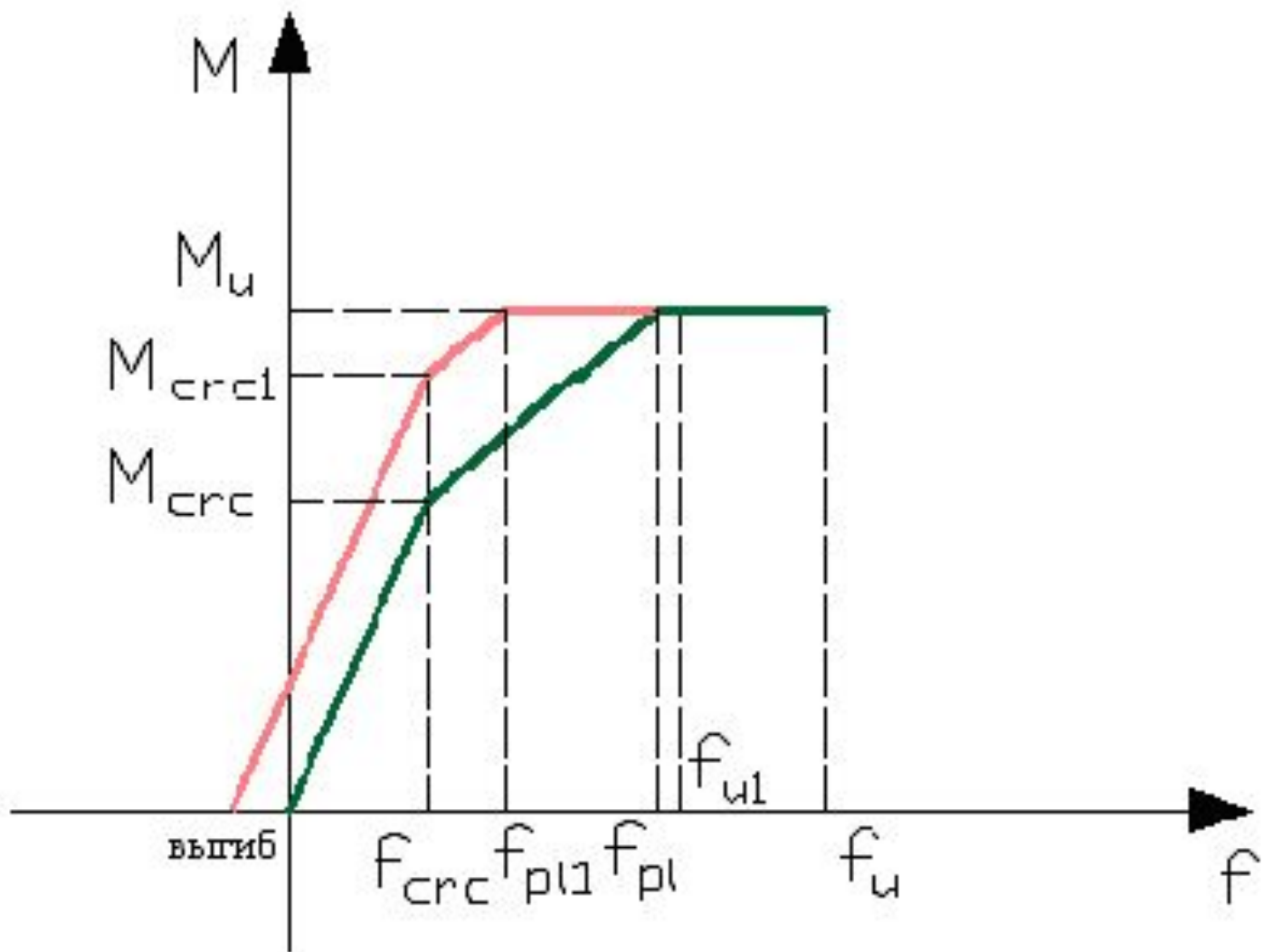
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ  
КОНСТРУКЦИЯХ**

# 1. Сущность преднапряжения

## *Предварительно напряженные элементы –*

*железобетонные элементы, в которых до приложения нагрузок, в процессе их изготовления, искусственно создается внутреннее напряженное состояние (самонапряжение), заключающееся в значительном обжатии бетона путем растяжения арматуры.*

Предварительное напряжение применяется преимущественно в тех элементах, в которых при нагрузках возникают растягивающие напряжения. В отдельных случаях целесообразно применять преднапряжение в центрально и внецентренно сжатых элементах, в частности в гибких колоннах, где оно обеспечивает необходимую трещиностойкость на период транспортирования и монтажа, а также предотвращает потерю устойчивости элемента.



**Рис. 6.1. Сущность преднапряжения**

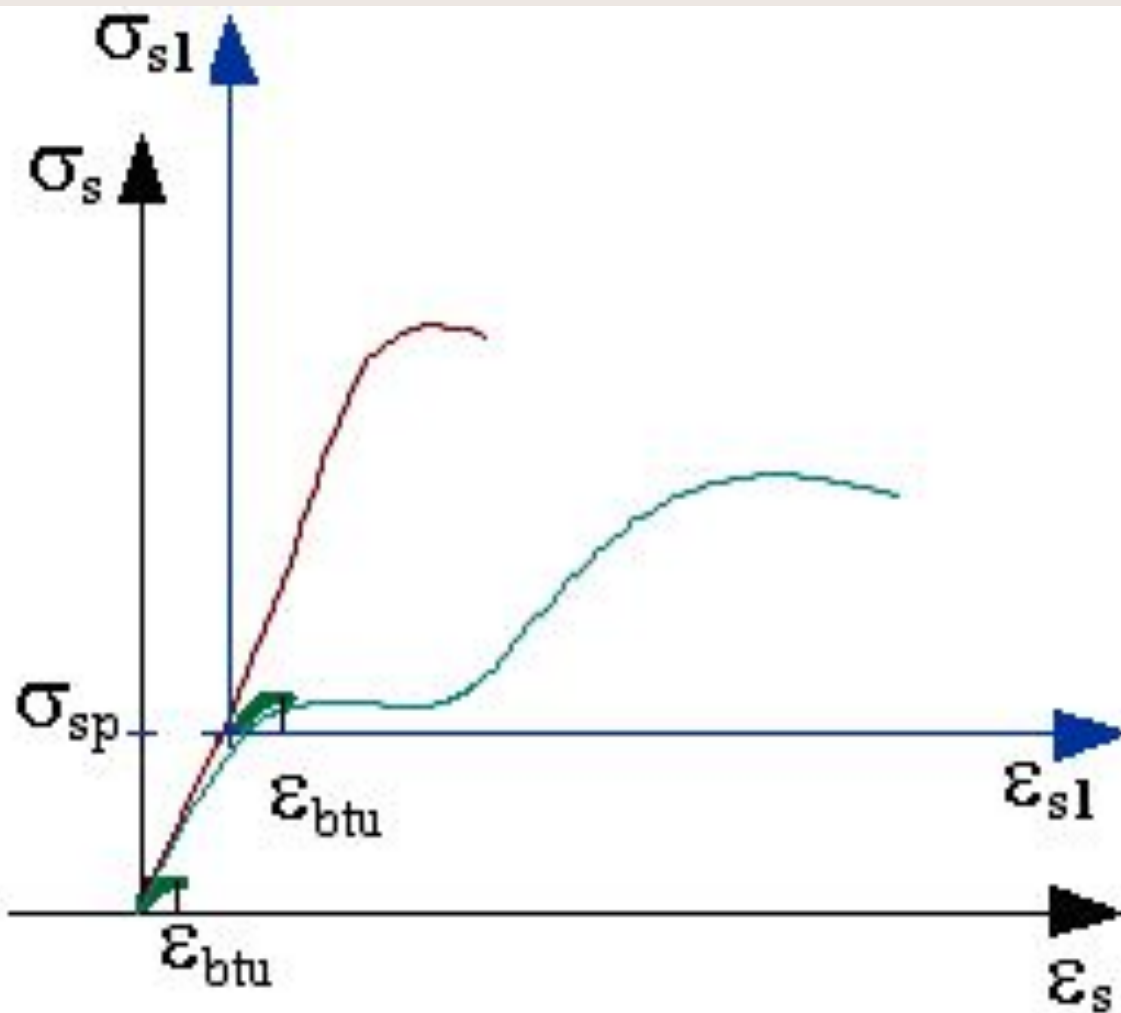


Рис. 6.2. Диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  для ненапрягаемой, напрягаемой сталей и растянутого бетона

Предварительное напряжение элементов повышает **трещиностойкость, жесткость, выносливость** конструкций при работе под воздействием многократно повторяющихся нагрузок, позволяет применять **высокопрочную арматуру** при полном использовании ее механических свойств.

Но само по себе преднапряжение **НЕ** повышает несущую способность.



**Рис. 6.3. Зависимость стоимости арматурной стали от ее прочности**

Предварительное напряжение может создаваться 2-мя способами:

1. натяжением арматуры на упоры;
2. натяжением арматуры на бетон

*Суть натяжения арматуры на упоры (рис. 4.4).*

Арматура натягивается и закрепляется на особых упорах стендов, форм. После бетонирования и приобретения бетоном достаточной прочности арматура освобождается с удерживающих устройств и, стремясь восстановить свою первоначальную длину, обжимает бетон.

Напряжения в арматуре контролируются до обжатия бетона.

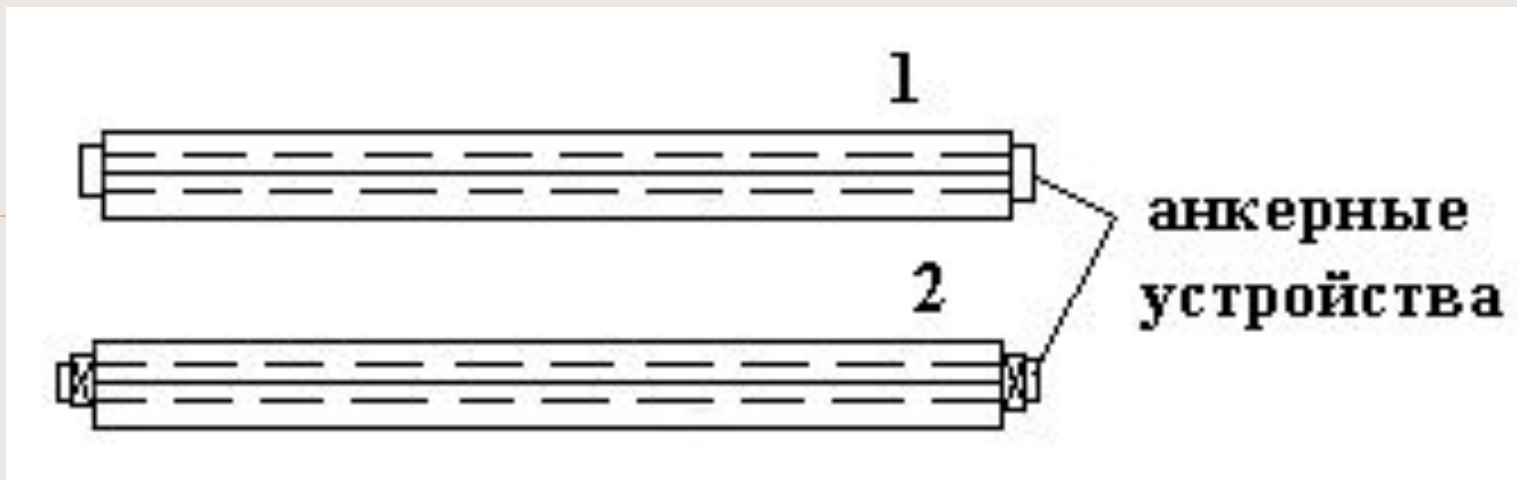


**Рис. 6.4. Натяжение арматуры на упоры**  
**1. до обжатия;**  
**2. после обжатия**

### *Суть натяжения арматуры на бетон (рис.4.5).*

Сначала изготавливают бетонный или слабоармированный элемент. Для укладки рабочей арматуры в нем предусматривают каналы или пазы. После отвердения бетона арматура натягивается с передачей реактивных усилий непосредственно на бетон и при помощи анкеров удерживается в напряженном состоянии. Для создания сцепления арматуры с бетоном и защиты арматуры от коррозии каналы и пазы заполняют под давлением цементным тестом или раствором. Напряжения в арматуре контролируют по окончанию обжата бетона.





**Рис. 6.5. Натяжение арматуры на бетон**  
**1. до обжатия бетона;**  
**2. после обжатия бетона**

Натяжение арматуры может быть выполнено 3 способами:

**1. механическим** (домкратами, намоточными машинами и т.п.).

**2. электротермическим.**

Арматура, нагретая и удлиненная за счет пропуска электротока, закрепляется на упорах. Поскольку арматура при остывании свободно не сокращается, в ней возникают растягивающие напряжения.

Этот способ распространен в России. Он надежен, малотрудоемок и был экономичен при централизованной экономике.

**3. электротермомеханическим** (комбинированным).

Здесь полностью исключают обрыв арматуры, т.к. усилие механического натяжения не более 20-30% от общего усилия натяжения.

Помимо 3-х способов натяжения арматуры распространен также физико-механический способ натяжения, т.е. самонапряжение, при котором используется свойство бетонов, изготовленных на расширяющемся цементе. При расширении бетона в процессе твердения арматура удлиняется, и таким образом, создается предварительное напряжение. Такой способ технологически прост в применении.

Натяжение на бетон осуществляют *механическим способом*.

При натяжении на упоры применяют стержневую арматуру, высокопрочную проволоку и арматурные канаты;

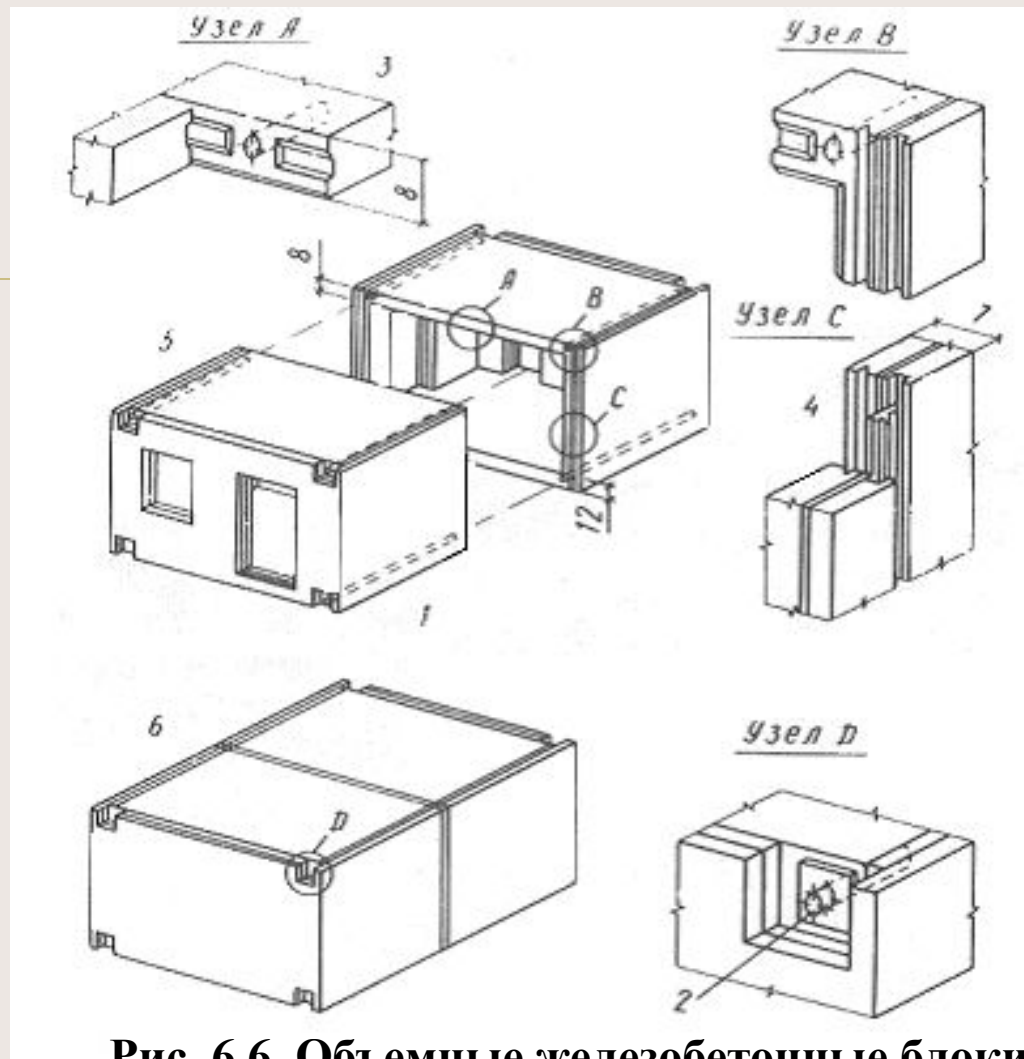
при натяжении на бетон – преимущественно высокопрочную проволоку и арматурные канаты.

Арматурные канаты и проволоку небольшого диаметра можно натягивать на упоры форм или бетон непрерывной намоткой.

В Италии изготавливаются полузамкнутые объемные блоки, применяемые для строительства жилых зданий. Блоки выпускают двух типов: крайние и средние. Толщина вертикальных стен блоков 7 см, нижней плиты 12 см и верхней 8 см.

Отличительной особенностью данного решения является сбор на заводе квартир целиком из изготовленных блоков. Квартиры могут быть однокомнатными, двух- или трех комнатными с санузлами. Стенки и плиты блоков армируют сварными сетками и отдельными стержнями.

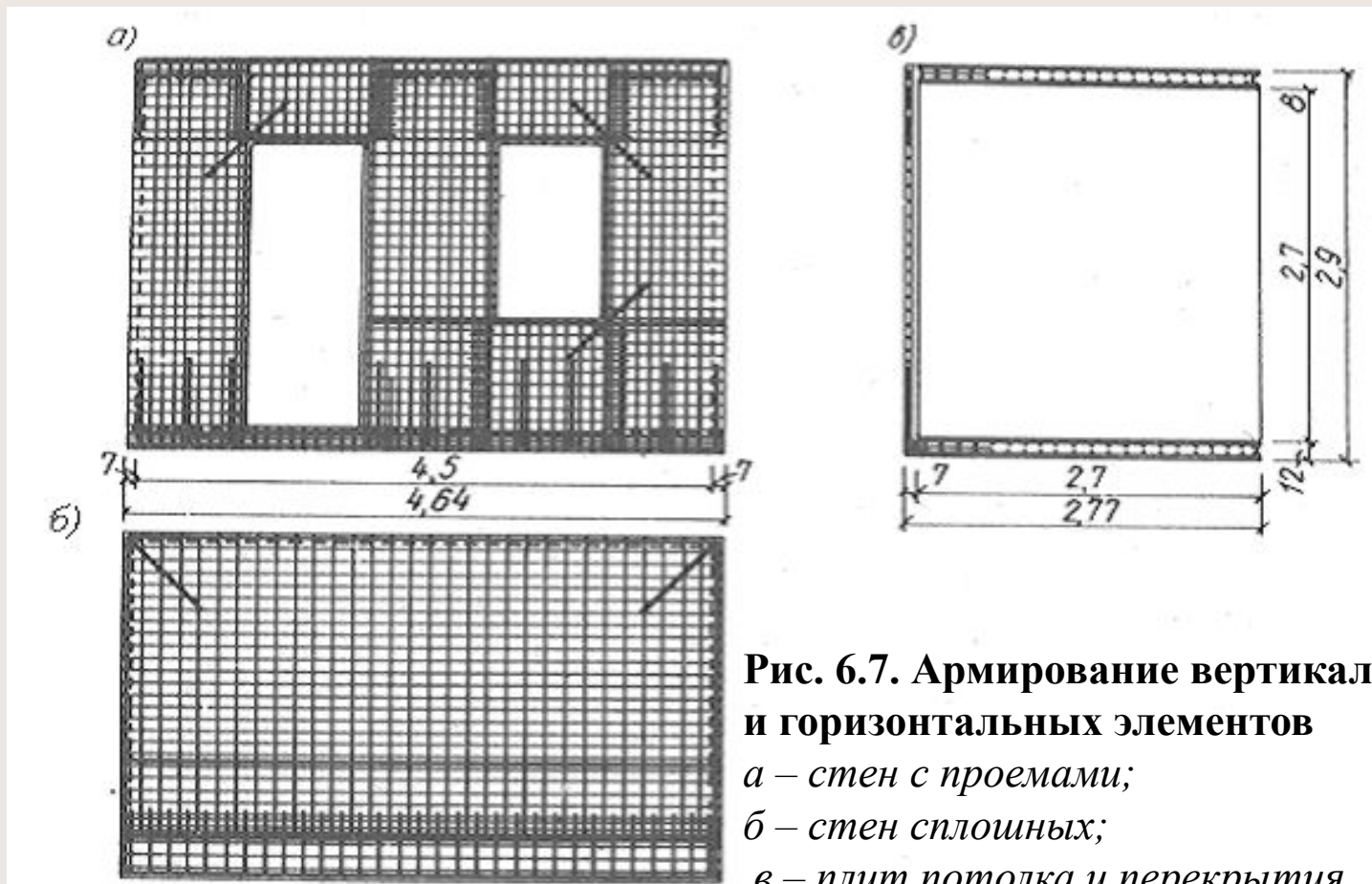
В толще стен и плит блоков размещают электроосветительную и сантехническую проводку. Изготовленные блоки при укрупнительной сборке склеивают по кромкам стенки и плит эпоксидной смолой, а затем стягивают с помощью канатной арматуры, проходящей сквозь каналы, предусмотренные в двух нижних и двух верхних углах каждого блока и натягиваемой на бетон. Прочность бетона в блоках соответствует В 40. В каналы после закрепления натянутой арматуры нагнетается цементный раствор. Такое здание обладает повышенной сейсмостойкостью, несмотря на отсутствие свариваемых закладных деталей.



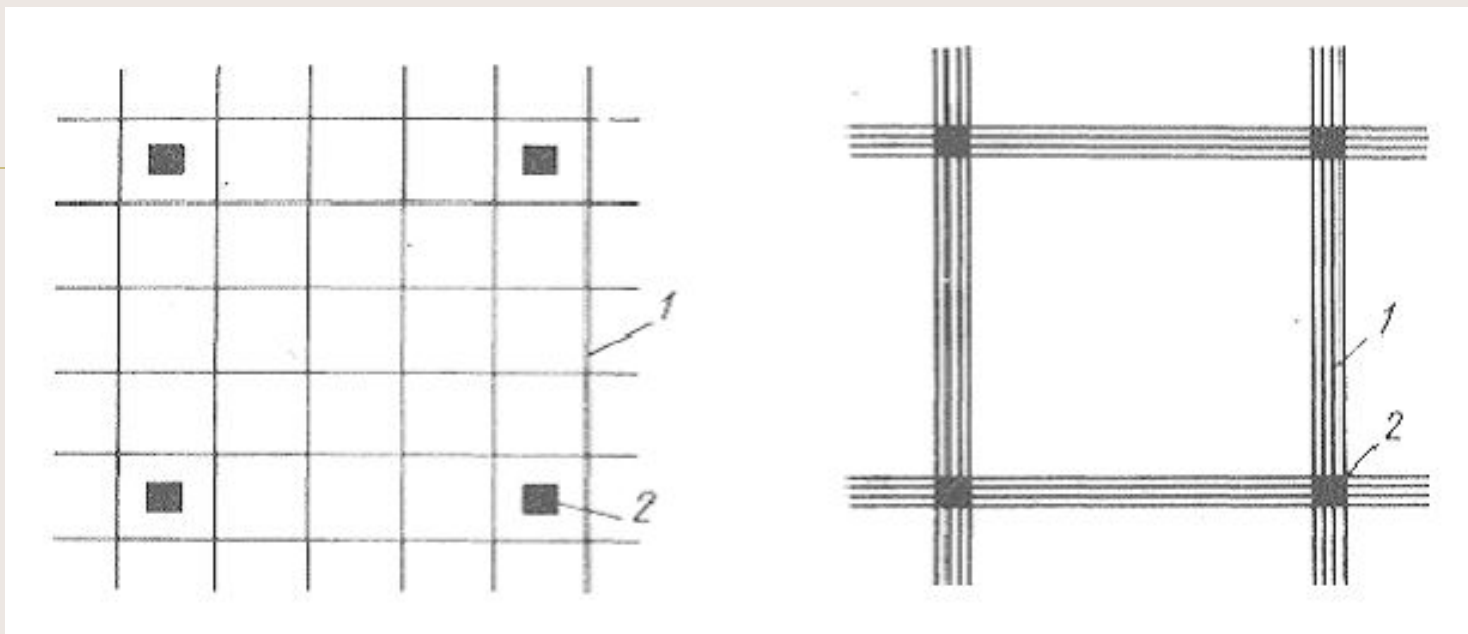
**Рис. 6.6. Объемные железобетонные блоки**

*1 – канал для напрягаемой арматуры; 2 – концевой закрепление напрягаемой арматуры; 3 – соединение потолочных плит смежных блоков; 4 – соединение стеновых элементов блоков; 5 – блоки перед соединением; 6 – соединительные блоки*

Применение напрягаемой арматуры с натяжением на бетон позволяет уменьшить прогибы и исключить появление трещин, максимально использовать прочностные свойства высокопрочных сталей, увеличить шаг колонн, т.е. пролет плит, и увеличить нагрузку на перекрытия.

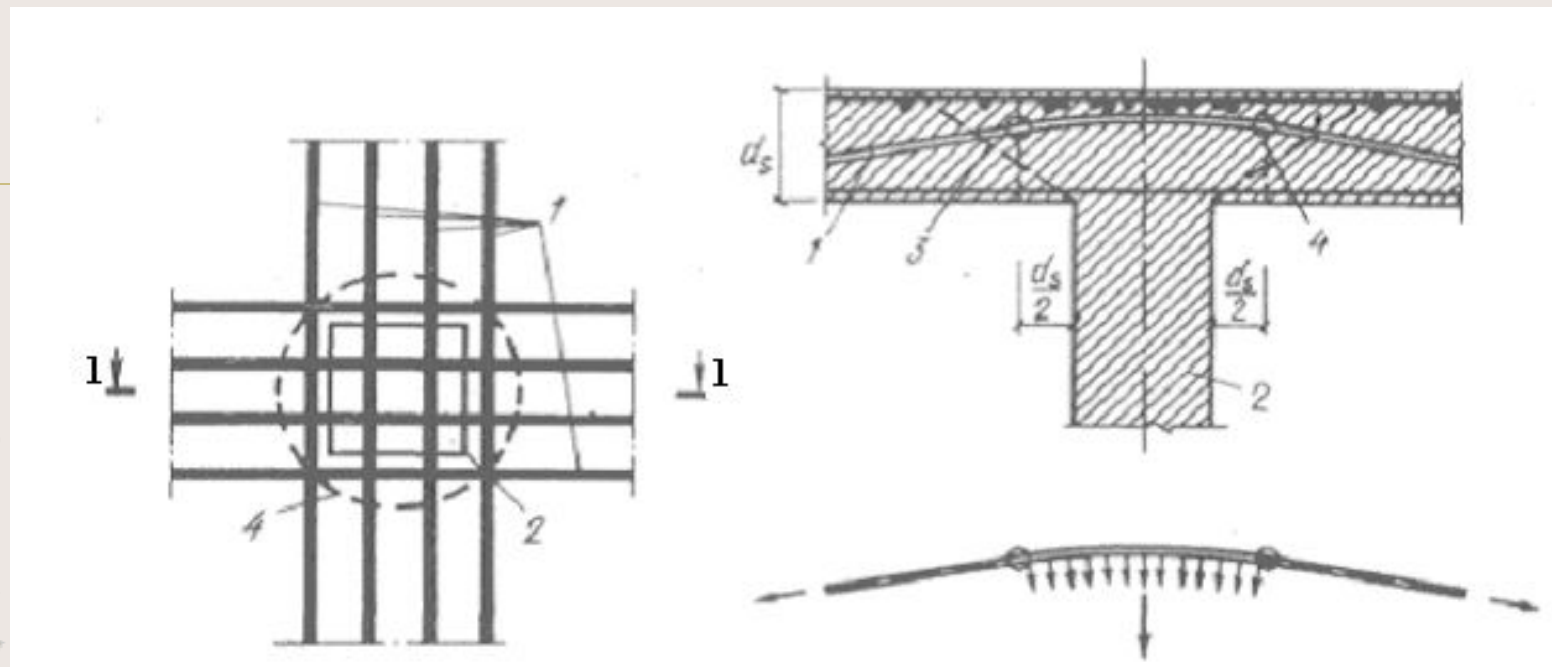


**Рис. 6.7. Армирование вертикальных и горизонтальных элементов**  
*а – стен с проемами;*  
*б – стен сплошных;*  
*в – плит потолка и перекрытия*



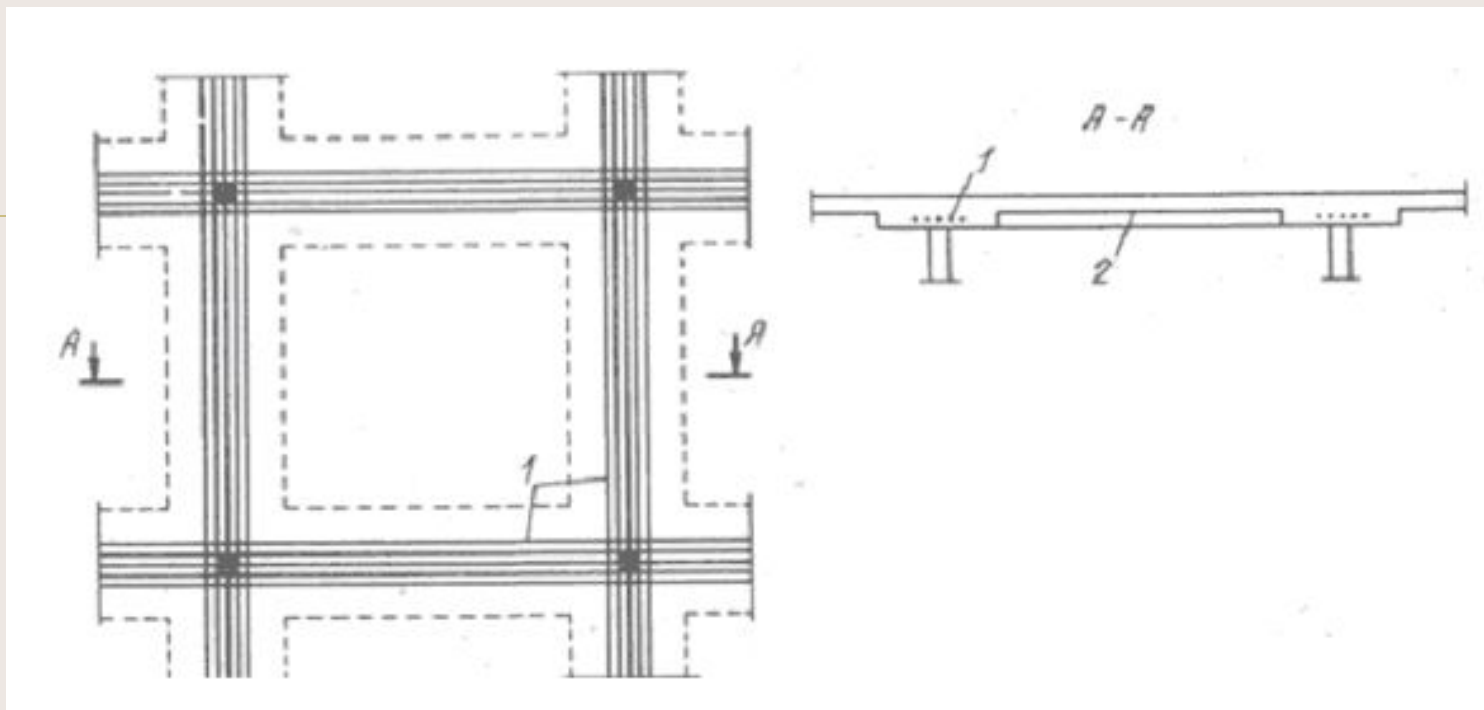
**Рис. 6.8. Размещение напрягаемой арматуры в монолитной плите перекрытия**

*1 – напрягаемая арматура; 2 – колонны*



**Рис. 6.9. Расположение напрягаемой арматуры над колонной**  
*1 – канатная арматура; 2 – колонна; 3 – линия конуса продавливания;  
 4 – линия цилиндрической поверхности разрушения*





**Рис. 6.10. Кессонные углубления в плите перекрытия**  
1 – напрягаемая арматура; 2 – углубления в плите

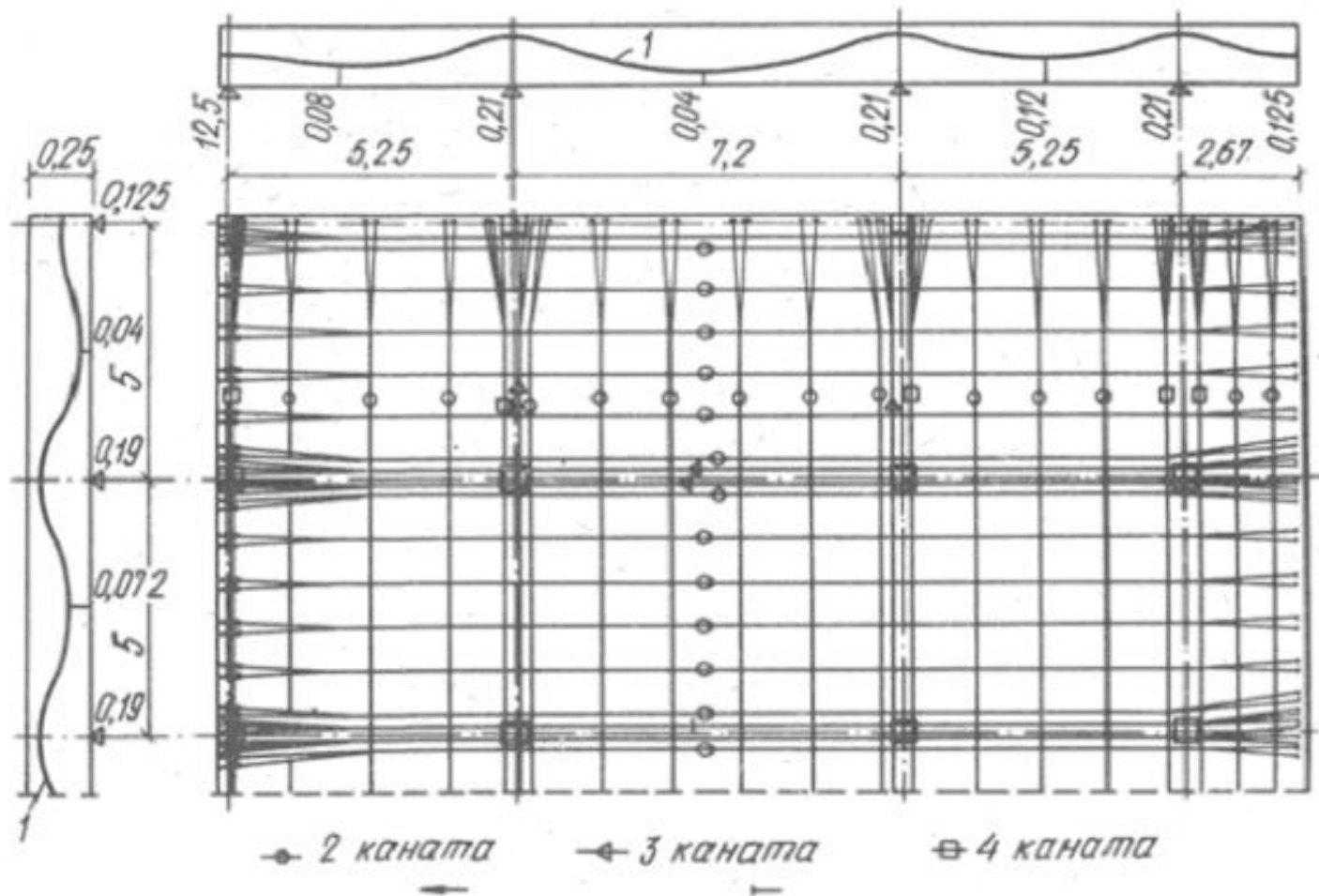


Рис. 6.11. Изображение арматуры в двух направлениях

## 2. Расчетные подходы

$$\sigma_{sp} + p \leq R_{s,ser} ;$$

$$\sigma_{sp} - p \geq 0,3R_{s,ser}$$

где  $\sigma_{sp}$  – растягивающее напряжение напрягаемой арматуры;

$$R_{s,ser} = R_{sn} = R_s^{95} = \sigma_{0.2}^{95}$$

$p$  – допустимые отклонения предварительного напряжения, МПа

При механическом способе натяжения арматуры  $p = 0,05\sigma_{sp}$

При электротермическом или электротермомеханическом способах

$$p = 30 + \frac{360}{\boxtimes} (\text{МПа}) \quad \boxtimes \text{ — длина натягиваемого стержня (расстояние между наружными гранями упоров).}$$

Максимальные предварительные напряжения арматуры ограничены в связи с опасностью обрыва при натяжении или развития недопустимых неупругих деформаций.

Минимальные напряжения приняты из условия обеспечения проектного положения натягиваемой арматуры и ограничения чрезмерного раскрытия трещин в бетоне (в случае их образования).

При расчете предварительно напряженных элементов следует учитывать потери предварительного напряжения арматуры.

### 3. Потери предварительного напряжения

Таблица 6.1

№	Факторы, вызывающие потери предварительного напряжения	При натяжении арматуры на упоры	При натяжении арматуры на бетон
<i>Первые потери (до обжатия бетона)</i>			
1	Релаксация напряжений арматуры ( $\sigma_1$ меняется в зависимости от способа натяжения)	$\sigma_1$	—
2	Температурный перепад (разность температур натянутой арматуры в зоне нагрева и устройства, воспринимающего усилия натяжения при прогреве бетона)	$\sigma_2$	—

Продолжение табл. 6.1

3	Деформации анкеров, расположенных у натяжных устройств	$\sigma_3$	+
4	Трение арматуры	об огибающие устройства	о стенки каналов
5	Деформация стальной формы при изготовлении преднапряженных железобетонных конструкций	$\sigma_5$	-
6	Быстронатекающая ползучесть (когда убираем упоры, арматура стремится вернуться в исходное положение. В этом момент и происходит быстронатекающая ползучесть)	$\sigma_6$	-

Продолжение табл. 6.1

<i>Вторые потери (после обжатия бетона)</i>		
Релаксация арматуры	-	$\sigma_7$
Усадка бетона	$\sigma_8$ Для классов бетона В40, В50, В60	$\sigma_8$ Для классов бетона В30, В35, В40
Ползучесть бетона	$\sigma_9$	$\sigma_9$
Смятие бетона под витками спиральной или кольцевой арматуры (при диаметре конструкции до 3 м)	-	$\sigma_{10}$
Деформация обжатия стыков между блоками (для конструкций, состоящих из блоков)	-	$\sigma_{11}$

Стадия обжатия

$$\sigma_{sp} - \sigma_I$$

Стадия эксплуатации

$$\sigma_{sp} - \sigma_I - \sigma_{II}$$

Полные значения первых потерь предварительного напряжения арматуры определяют по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp(1)} = \sum_{i=1}^4 \Delta\sigma_{spi}$$

где  $i$  – номер потерь предварительного напряжения.

Полные значения первых и вторых потерь предварительного напряжения арматуры определяют по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp(2)} = \sum_{i=1}^6 \Delta\sigma_{spi}$$

При проектировании конструкций полные суммарные потери  $\Delta\sigma_{sp(2)j}$  для арматуры, расположенной в растянутой при эксплуатации зоне сечения элемента, следует принимать не менее 100 МПа.



## 4. Коэффициент точности натяжения

$\gamma_{sp}$  относится к IV группе коэффициентов надежности метода расчета сечений по предельным состояниям:

$$\gamma_{sp} = 1 \pm \Delta\gamma_{sp}$$

Знак «+» принимают для учета преднапряжения для стадий изготовления и монтажа элемента.

Знак «-» принимают для стадии эксплуатации.

$\Delta\gamma_{sp} = 0,1$  - при механическом способе натяжения арматуры,

$\Delta\gamma_{sp} > 0,1$  - при электротермическом и электротермомеханическом способе

$\Delta\gamma_{sp} = 0$  - при определении потерь предварительного напряжения арматуры, а также при расчете по раскрытию трещин и по деформациям

Начальное контролируемое напряжение в арматуре при натяжении на упоры:

$$\sigma_{con1} = \sigma_{sp} - \sigma_3 - \sigma_4$$

$\sigma_3$  - потери от деформации анкеров,

$\sigma_4$  - потери от трения об огибающие приспособления.



**Рис. 6.13. Контролируемое напряжение в арматуре при натяжении на упоры**

Начальное контролируемое напряжение в арматуре при натяжении на бетон:

$$\sigma_{con2} = \sigma_{sp} - \alpha \cdot \sigma_{bp}$$

если напрягаемая арматура ставится в сжатой зоне, то

$$\sigma'_{con2} = \sigma'_{sp} - \alpha \cdot \sigma'_{bp}$$

где  $\sigma_{bp} = \frac{P}{A_{red}} \pm \frac{P \cdot e_0 \cdot y_{sp}}{I_{red}}; \quad \sigma'_{bp} = \frac{P}{A_{red}} \pm \frac{P \cdot e_0 \cdot y'_{sp}}{I_{red}};$

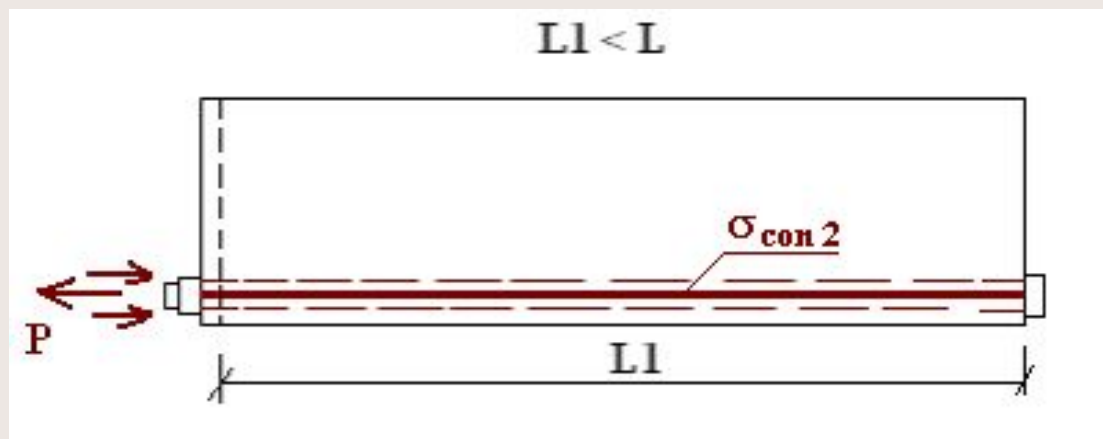


Рис. 6.14. Контролируемое напряжение в арматуре при натяжении на бетон

Для элементов с напрягаемой арматурой без анкеров на длине зоны передачи напряжений  $l_p$  значения  $\sigma_{sp}$  ( $\sigma'_{sp}$ )

снижают умножением их на отношение  $\frac{l_x}{l_p}$ ,

где

$l_x$  — расстояние от начала зоны передачи напряжений до рассматриваемого сечения;

$l_p$  — длина зоны передачи напряжений, т.е. расстояние от торца образца до сечения, в котором деформации арматуры бетона вблизи арматурного стрежня становятся одинаковыми.

Длину  $l_p$  рассчитывают по формуле 11 СНиП 2.03.01-84\*:

$$l_p = \left( \omega_p - \frac{\sigma_{sp}}{R_{bp}} + \lambda_p \right) d$$

## 5. Усилие предварительного обжатия бетона.

$$P = \sigma_{sp} \cdot A_{sp} + \sigma'_s \cdot A'_s - \sigma_s \cdot A_s - \sigma'_{sp} \cdot A'_{sp}$$

$$e_{op} = \frac{\sigma_{sp} \cdot A_{sp} \cdot y_{sp} + \sigma'_s \cdot A'_s \cdot y'_s - \sigma'_{sp} \cdot A'_{sp} \cdot y'_{sp} - \sigma_s \cdot A_s \cdot y_s}{P}$$

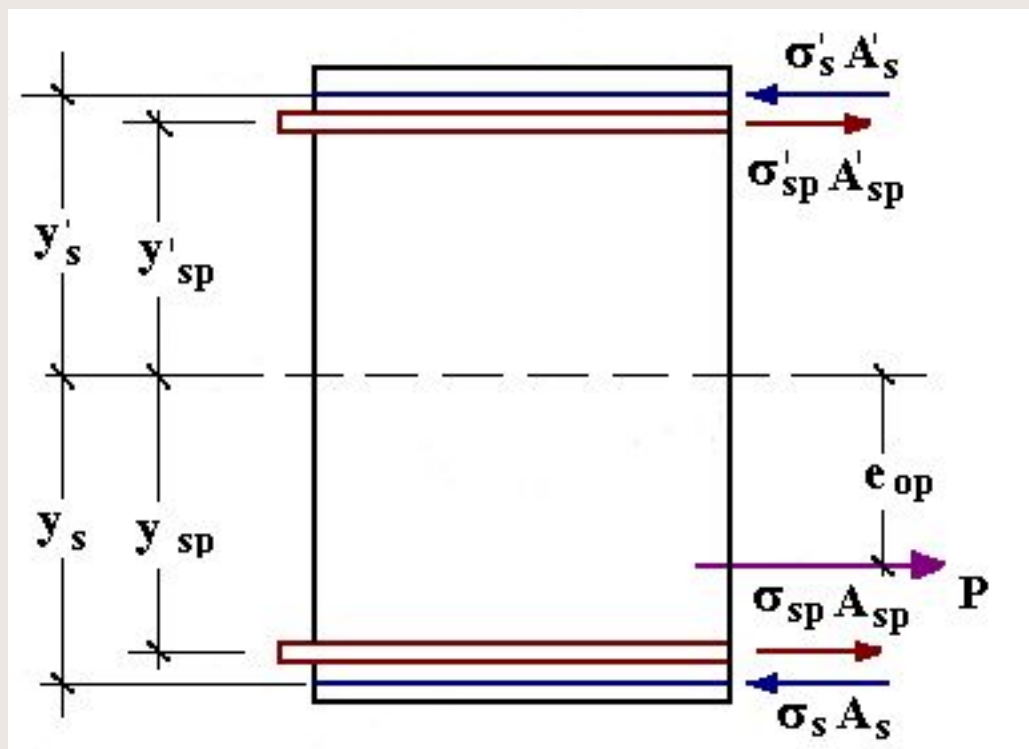


Рис. 6.15. Схема усилий предварительного напряжения в арматуре в поперечном сечении железобетонного элемента

В упрощенной постановке напряжения в бетоне при обжатии определяют в предположении упругой работы сечения и линейной эпюры напряжений:

$$\sigma_{bp} = \frac{P}{A_{red}} \pm \frac{P \cdot e_{op} \cdot y_i}{I_{red}}$$

По СП 52-102-2004 напряжения в бетоне  $\sigma_{bp}$  определяют

$$\sigma_{bp} = \frac{P_{(1)}}{A_{red}} \pm \frac{P_{(1)} \cdot e_{op} \cdot y}{I_{red}} \pm \frac{M \cdot y}{I_{red}}$$

где  $P_{(1)}$  – усилие предварительного обжатия с учетом первых потерь;

$M$  – изгибающий момент от внешней нагрузки, действующей в стадии обжатия (собственный вес элемента);

$e_{op}$  – эксцентриситет усилия относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$y$  – расстояние от центра тяжести приведенного сечения до рассматриваемого волокна.

Длину зоны передачи предварительного напряжения на бетон для арматуры без дополнительных анкерующих устройств определяют по формуле:

$$l_p = \frac{\sigma_{sp} \cdot A_s}{R_{bond} \cdot u_s}$$

где  $\sigma_{sp}$  – предварительное напряжение в напрягаемой арматуре с учетом первых потерь;

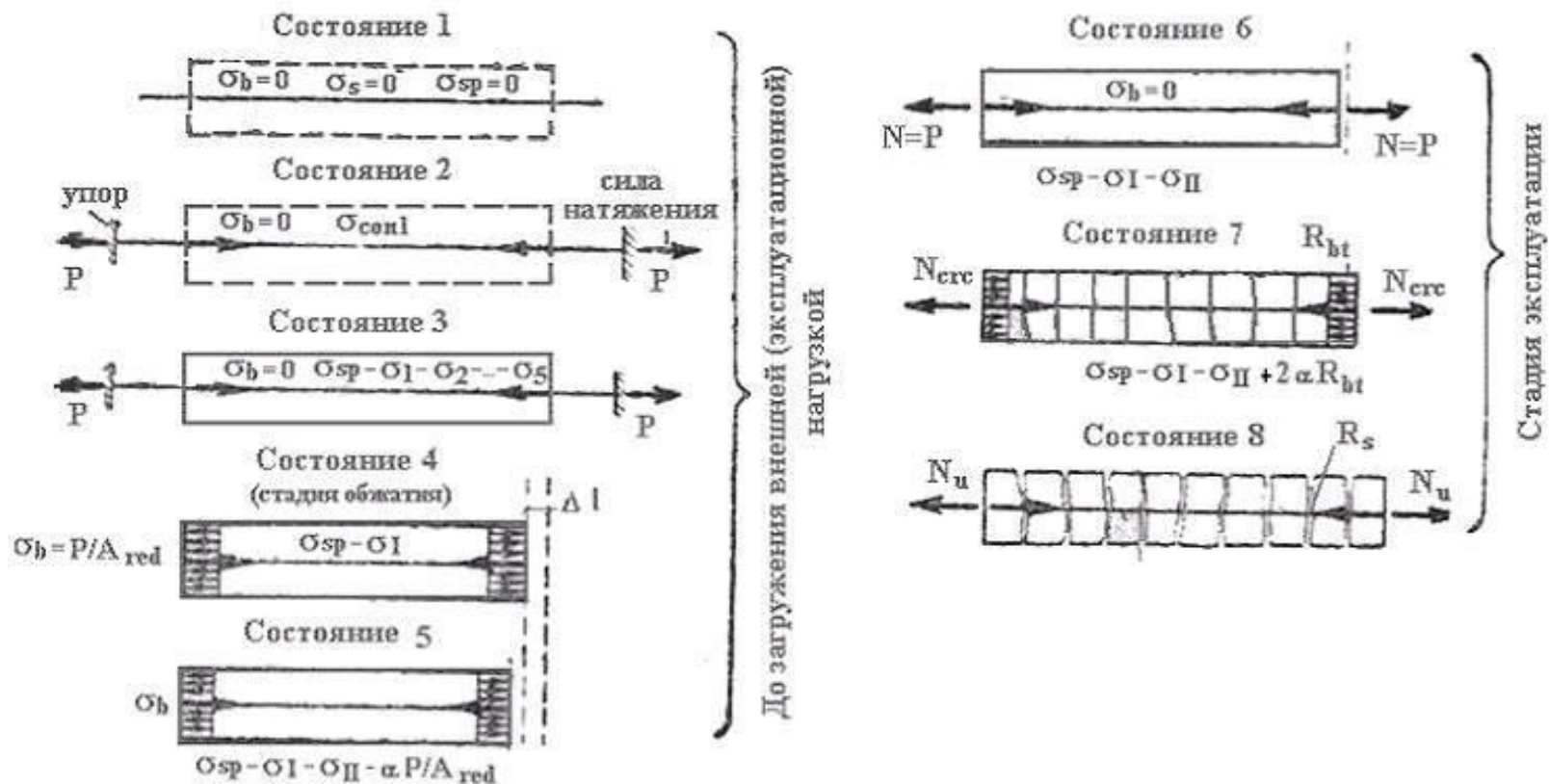
$R_{bond}$  – сопротивление сцепления напрягаемой арматуры с бетоном, отвечающее передаточной прочности бетона;

$$R_{bond} = R_{bt} \cdot \eta$$

$\eta$  – коэффициент, учитывающий влияние вида поверхности арматуры (1,7 ÷ 2,5);

$A_s, u_s$  – площадь и периметр стержня арматуры.

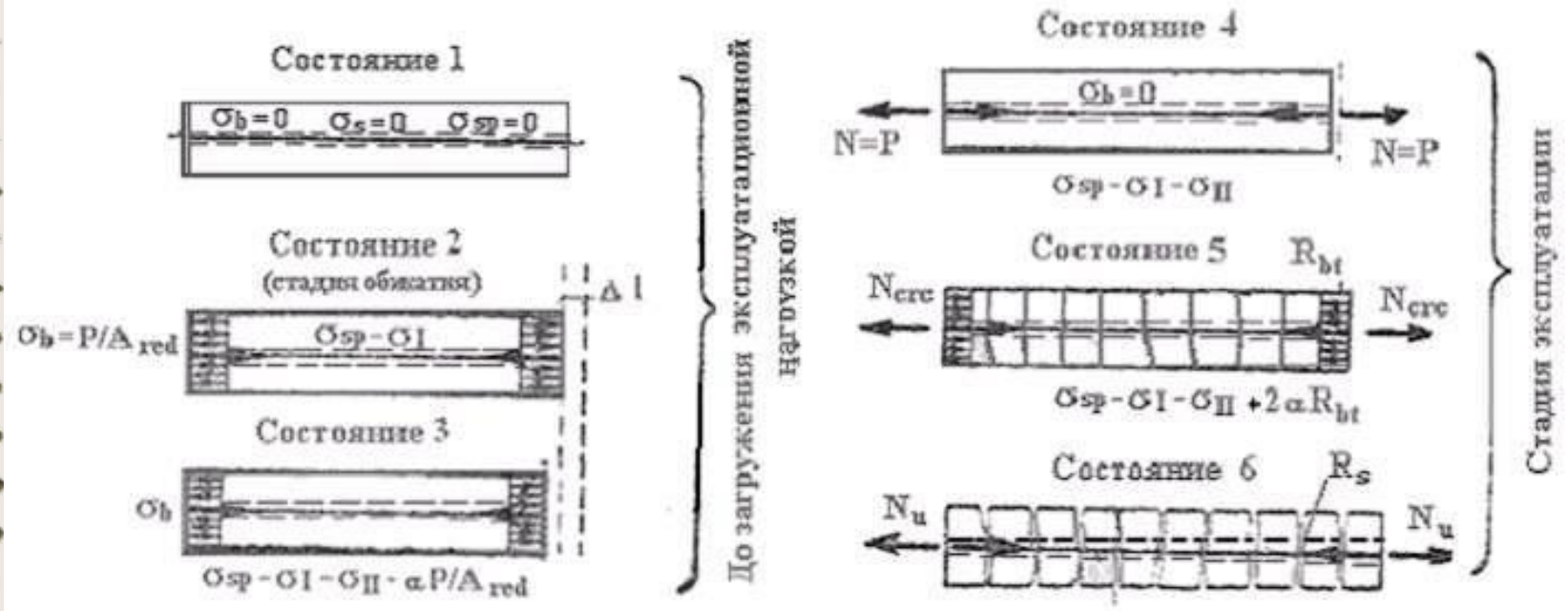
## Стадии деформирования центрально растянутого элемента при натяжении арматуры на упоры



**Рис. 6.16. Последовательность изменения напряжений в предварительно напряженном центрально-растянутом элементе при натяжении на упоры**

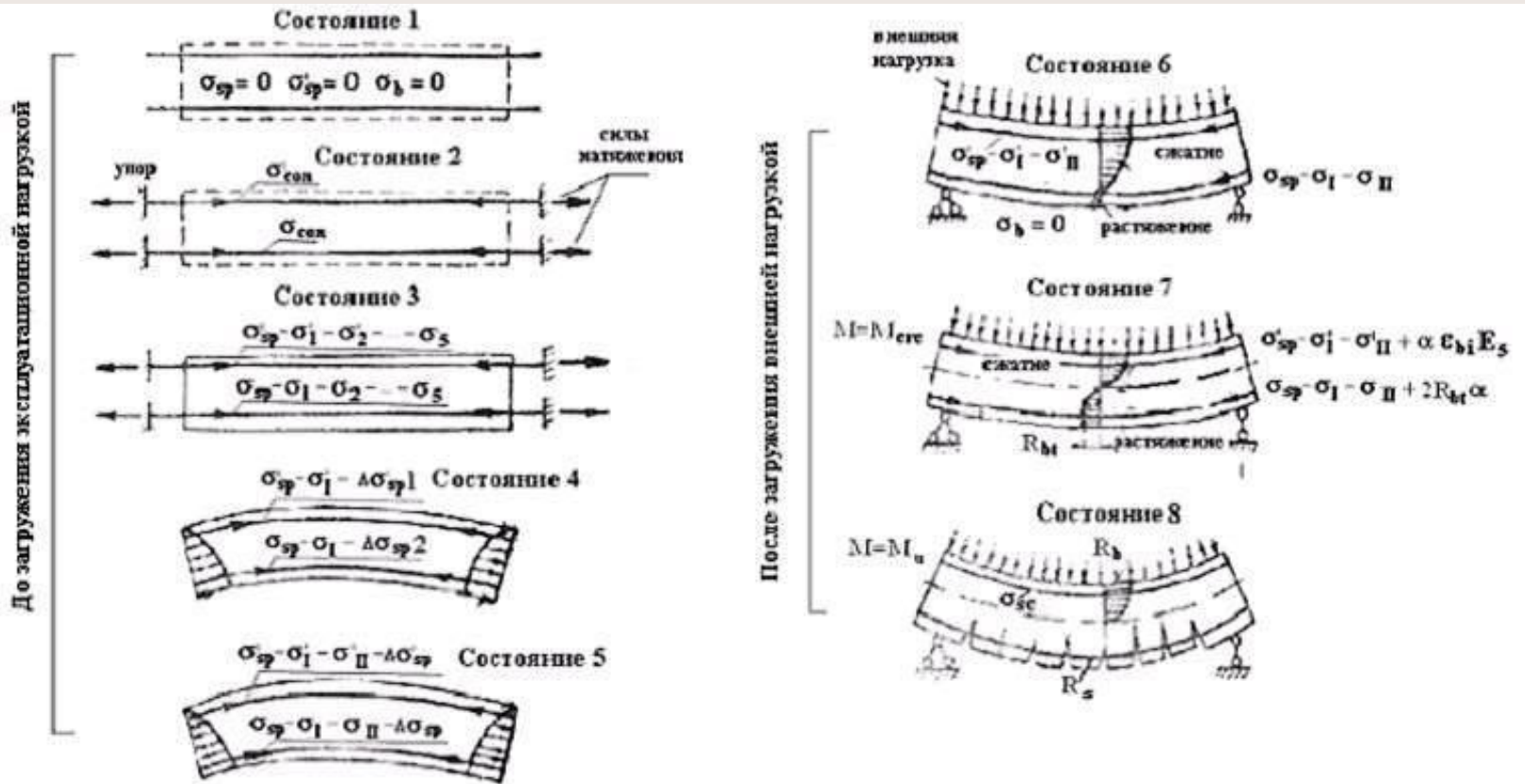


## Стадии деформирования центрально растянутого элемента при натяжении арматуры на бетон



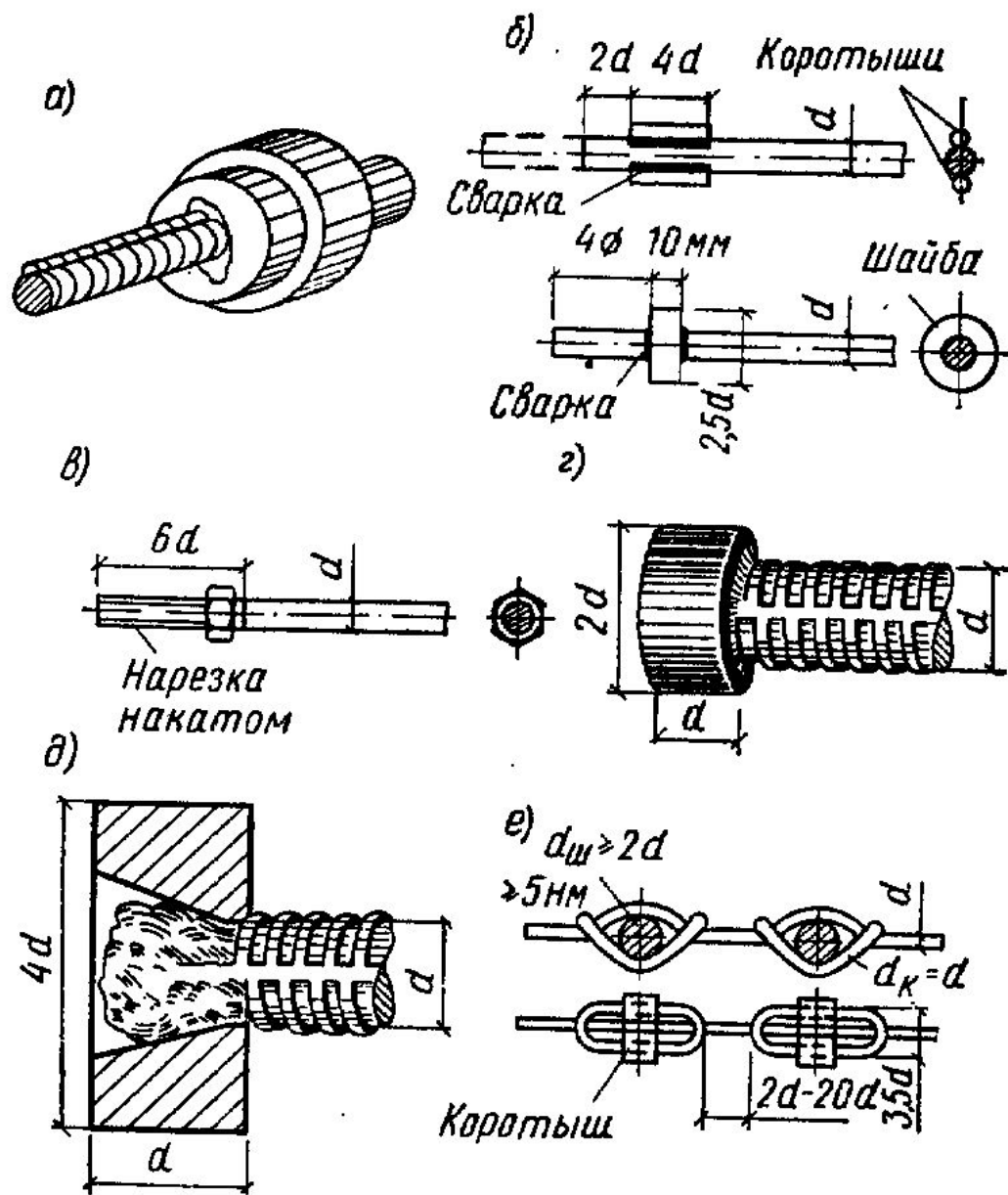
**Рис. 6.17. Последовательность изменения напряжений в предварительно напряженном центрально-растянутом элементе при натяжении на бетон**

## Стадии деформирования предварительно напряженного элемента при изгибе

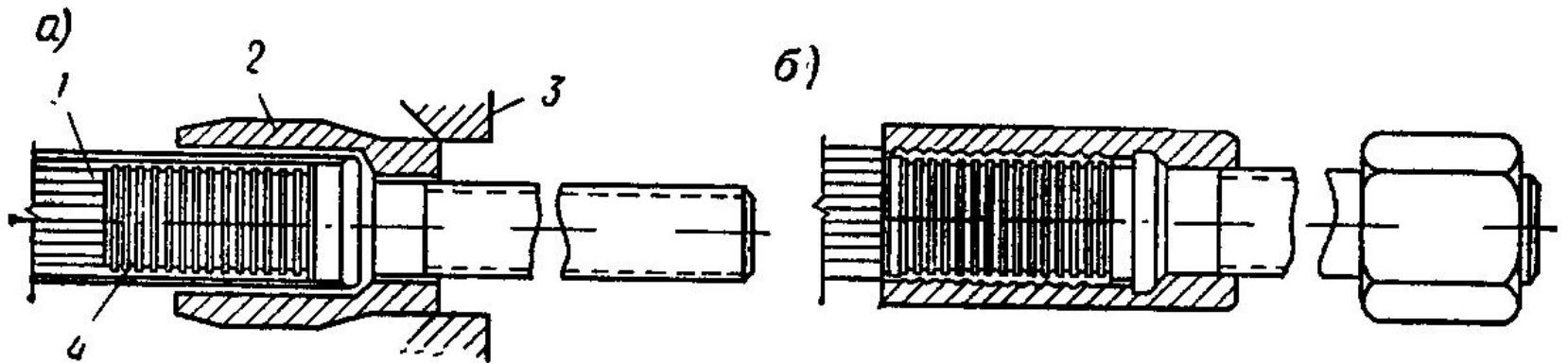


**Рис. 6.18. Последовательность изменения напряжений в предварительно напряженном элементе при натяжении на упоры**

## 7. Анкеровка напрягаемой арматуры

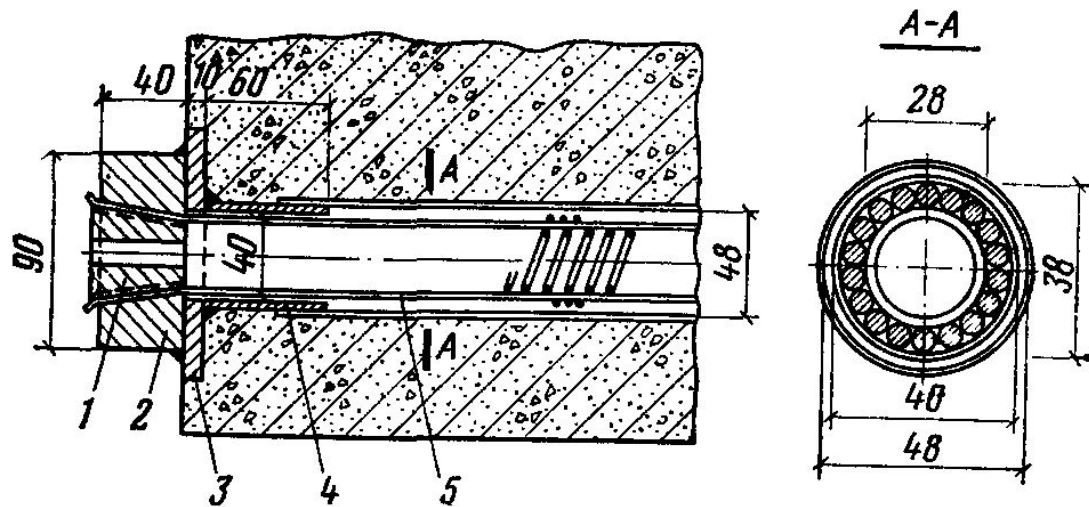


*a* – цанговый захват для канатов и стержней;  
*б* – коротыши и шайбы, приваренные к стержням;  
*в* – гайка на нарезке конца стержня с накатом;  
*г* – высаженная головка правильной формы;  
*д* – высаженная головка с втулкой;  
*е* – петли и коротыши для анкерования гладкой высокопрочной проволоки.



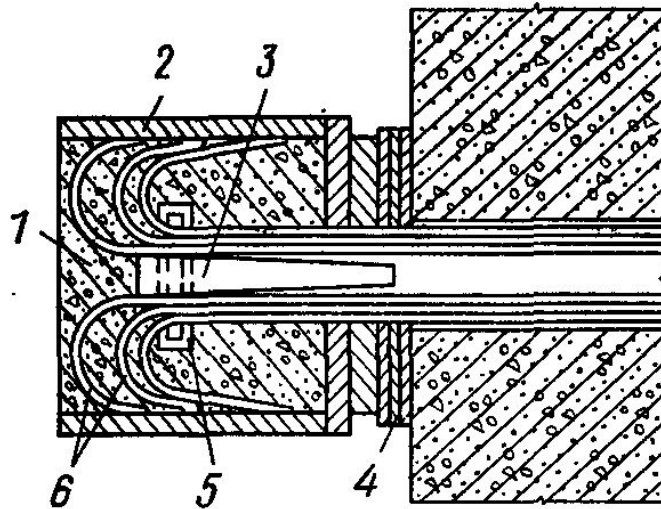
**Рис. 1.32. Гильзовый анкер**

*а* — до запрессовки пучка; *б* — после запрессовки; 1 — пучок;  
2 — гильза; 3 — обжимное кольцо; 4 — стержень с нарезкой



Анкер с колодкой и конической пробкой для закрепления однорядного арматурного пучка (натяженне на бетон домкратом двойного действия)

1 — коническая пробка; 2 — колодка; 3 — стальная плита; 4 — патрубок; 5 — арматурный пучок



Анкер стаканного типа для закрепления мощного арматурного пучка (натяженне на бетон)

1 — бетон, запрессованный в анкер, обеспечивающий заделку пучка; 2 — стальной стакан с приваренным дном; 3 — стальной стержень; 4 — стальные шайбы; 5 — кольцо; 6 — крюки на концах проволок