

# ТЕМА 4. УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МАШИН

## ЛЕКЦИЯ № 15. УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МАШИН

### Вопросы, изложенные в лекции

- 1 Упругие элементы. Назначение, классификация, область применения. Общие сведения.
- 2 Спиральные пружины. Классификация. Материалы. Пружины растяжения, сжатия, кручения.
- 3 Торсионные валы.

# Упругие элементы машин. Общие сведения

**Упругие элементы** – детали высокой податливости, которые накапливают энергию деформации и либо используют ее в исполнительных механизмах, либо рассеивают в демпферах и амортизаторах. Их работа основана на способности изменять свою форму под воздействием внешней нагрузки и восстанавливать ее в первоначальном виде после снятия этой нагрузки.

## **Классификация:**

**Пружины** – упругие элементы, выполненные из металла и предназначенные для создания (восприятия) сосредоточенной силовой нагрузки.

**Торсионы** – упругие элементы, выполненные из металла (обычно в форме вала) и предназначенные для создания (восприятия) сосредоточенной моментной нагрузки.

**Мембраны** – упругие элементы, выполненные из металла и предназначенные для создания (восприятия) распределенной по их поверхности силовой нагрузки (давления).

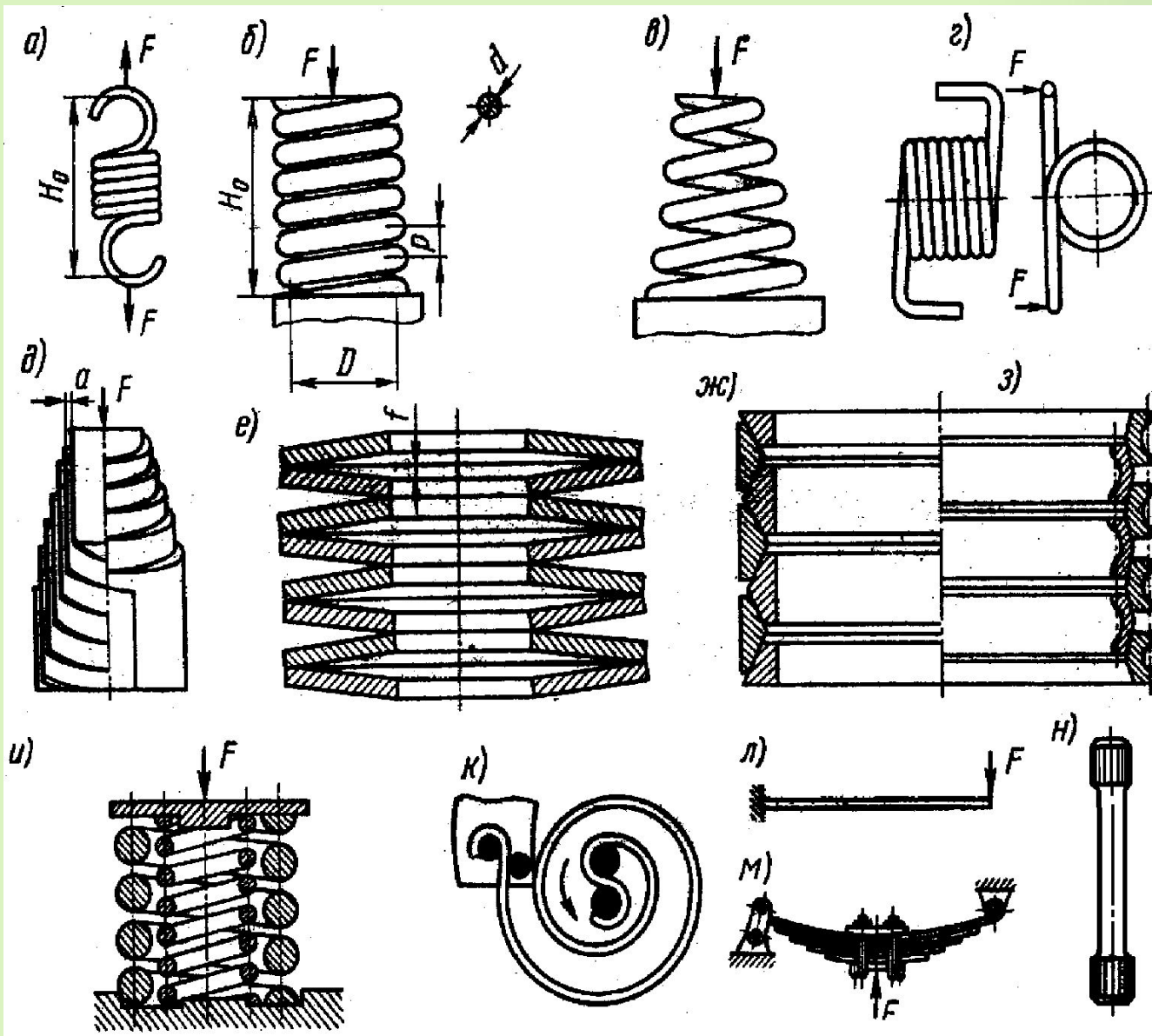
**Резиновые амортизаторы (сайлент-блоки).**

# Упругие элементы машин. Общие сведения

## Функции упругих элементов в машинах и механизмах:

- 1) создавать постоянно действующие усилия для силового замыкания кинематических пар (кулачковые механизмы, муфты фрикционные, кулачковые и др., стопоры, защелки и т.п.);
- 2) обеспечивать отсутствие зазора в кинематических парах механизмов с целью повышения их кинематической точности (например, в составных зубчатых колесах приборов);
- 3) предохранять механизмы от разрушения под воздействием чрезмерных нагрузок при ударах и вибрациях (рессоры, пружины, амортизаторы);
- 4) накапливать энергию в процессе деформации под действием внешней нагрузки и отдавать ее при восстановлении исходной формы (часовая пружина в механических часах, боевая пружина стрелкового оружия);
- 5) выполнять преобразование нагрузки в перемещение при использовании в качестве чувствительных элементов приборов (водоизмерительные приборы, приборы для измерения крутящего момента, давления, разрежения и т.п.)

# Упругие элементы машин. Классификация



**Рисунок 1 –  
Некоторые упругие  
элементы машин:**

- спиральные -
- а) растяжения,
- б) сжатия,
- в) коническая сжатия,
- г) кручения;
- д) телескопическая ленточная сжатия;
- е) наборная тарельчатая;
- ж, з) кольцевые;
- и) составная сжатия;
- к) спиральная;
- л) изгиба;
- м) рессора (наборная изгиба);
- н) торсионный валик

# Упругие элементы машин. Классификация

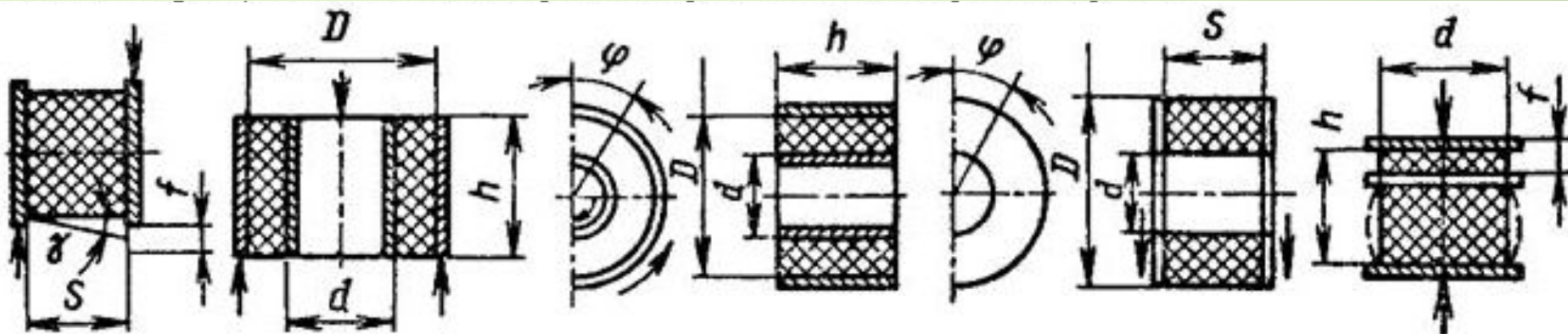


Рисунок 2 – Резиновые упругие элементы

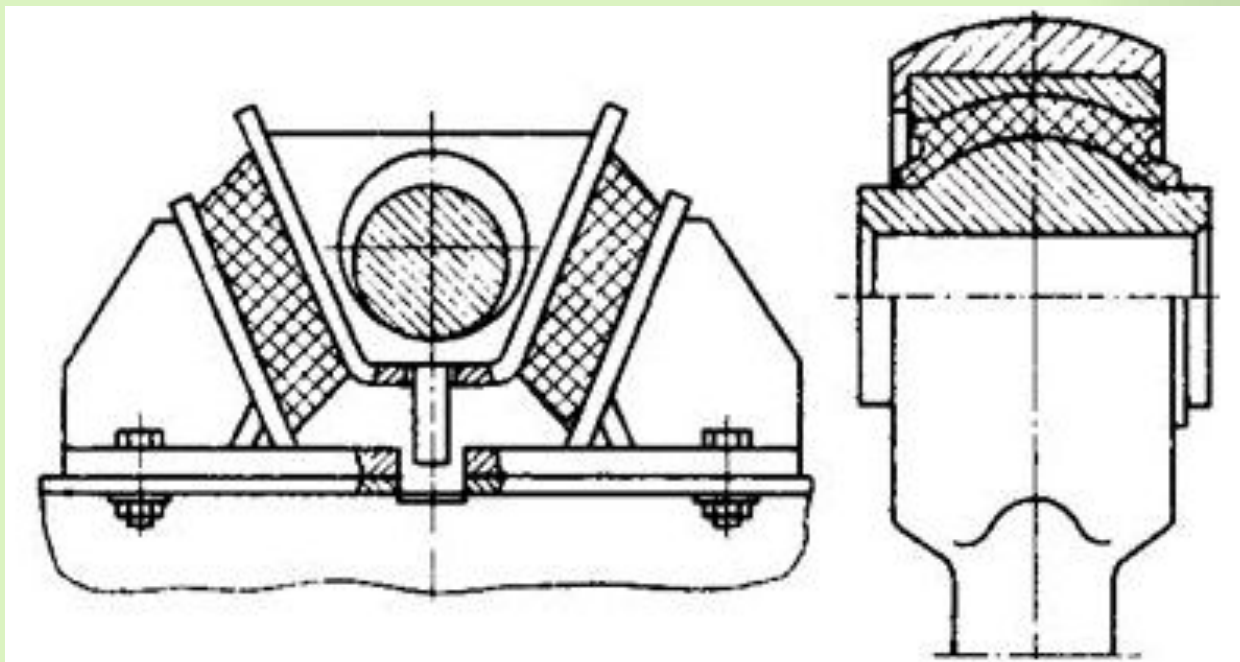


Рисунок 3 – Упругая опора вала



# Упругие элементы машин. Классификация

- 1) По виду создаваемой (воспринимаемой) нагрузки: **силовые** (пружины, амортизаторы, демпферы) – воспринимают сосредоточенную силу; **моментные** (моментные пружины, торсионы) – сосредоточенный крутящий момент (пару сил); **воспринимающие распределенную нагрузку** (мембраны давления, сильфоны, трубки Бурдона и т.п.).
- 2) По виду материала, использованного для изготовления упругого элемента: **металлические** (стальные, стальные нержавеющие, бронзовые, латунные пружины, торсионы, мембраны, сильфоны, трубки Бурдона) и **неметаллические**, изготовленные из резин и пластмасс (демпферы и амортизаторы, мембраны).
- 3) По виду основных напряжений, возникающих в материале упругого элемента в процессе его деформации: **растяжения-сжатия** (стержни, проволоки), **кручения** (винтовые пружины, торсионы), **изгиба** (пружины изгиба, рессоры).
- 4) По форме связи нагрузки, действующей на упругий элемент, с его деформацией: **линейные** (график нагрузка-деформация представляет прямую линию) и **нелинейные** (график нагрузка-деформация непрямолинейен).
- 5) По конструктивной форме: **спиральные цилиндрические (витые)**, одно- и многожильные, **конические, бочкообразные; тарельчатые, кольцевые, плоские, рессоры** (многослойные пружины изгиба), **торсионы** (пружинные валы), **фигурные** и т.п.
- 6) По способу изготовления: **витые, точеные, штампованные, наборные** и т.п.

# Спиральные пружины. Классификация. Материалы

Навиваются из проволоки круглого, квадратного и прямоугольного сечения.

## По назначению:

## По направлению навивки:

- пружины сжатия (рисунок 4, а);
- пружины растяжения (рисунок 4, б);
- пружины кручения (рисунок 4, в).

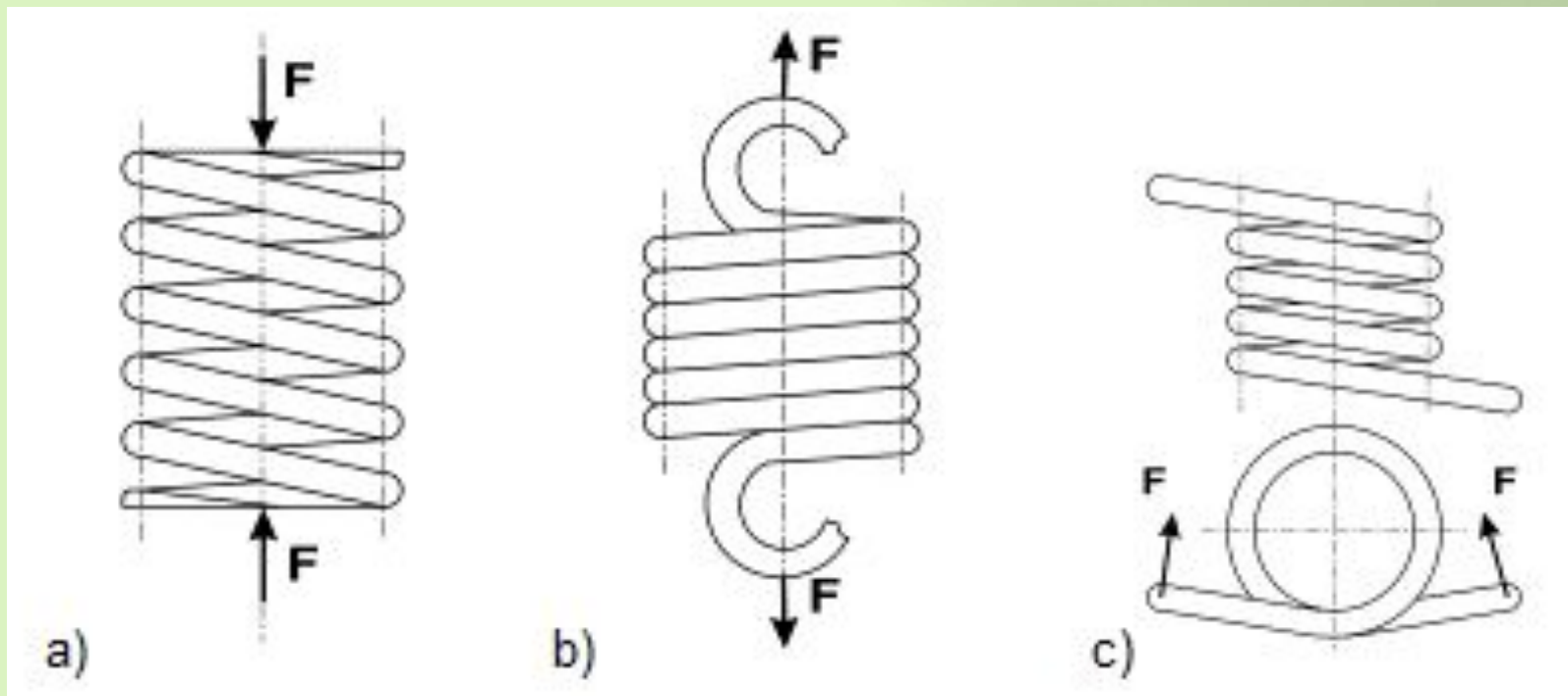


Рисунок 4 – Спиральные пружины

# Спиральные пружины. Классификация. Материалы

## Металлические пружины изготавливаются:

-из углеродистых сталей с содержанием углерода 0,5...1,1 %. Сталь 65, 70, 75. Применяются для изготовления пружин, диаметр проволоки которых не превышает 10 мм.

-и легированных сталей. Сталь 60С2, 50ХФА. Для пружин, работающих в условиях переменных во времени высоких напряжений, а также в случаях, если диаметр проволоки пружины более 20 мм.

Механические свойства пружинных сталей в значительной степени зависят от химического состава и размеров поперечного сечения проволоки (рисунок 5).

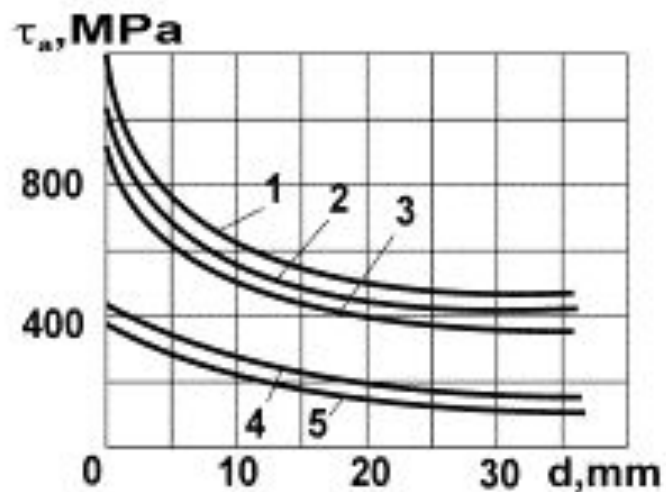


Рис. 10.2.2

- 1 – вольфрамовая и рояльная сталь;
- 2 – хромо-ванадиевая термообработанная сталь;
- 3 – углеродистая, закаленная в масле сталь;
- 4 – фосфорная бронза;
- 5 – проволока из специальной латуни.

Рисунок 5 – Зависимость прочности пружины от состава и диаметра проволоки



# Спиральные пружины. Классификация. Материалы

## Способы изготовления:

- 1 Навивка в холодном состоянии на оправку. При  $D/d > 4$ .
- 2 Навивка в горячем состоянии до температуры пластичности металла. При  $D/d < 4$ , а также при  $d > 10$  мм.

Стальные пружины ответственного назначения, работающие в условиях циклических нагрузок после термической подвергают **дробеструйной обработке.**

Заключительная операция – нанесение покрытия (никелирование, хромирование, цинкование и т.д.) с целью **предупреждения коррозии.**

Материал	Предел прочности на растяжение $\sigma_b$ , МПа	Предел прочности сдвига $\tau_s$ , МПа
Углеродистые стали	1000÷1150	800÷1000
Рояльная проволока	2000÷3000	1200÷1800
Холоднокатаная пружинная проволока	1000÷2800	600÷1600
Марганцовистая сталь	650÷700	350÷400
Хромо-ванадиевая сталь	1300	1100
Коррозионно-стойкая сталь	1100	800
Кремнистые стали	1300÷1800	1200÷1600
Хромо-марганцовистая сталь	1300	1200
Сталь, легированная никелем и кремнием	1800	1600
Сталь, легированная вольфрамом и кремнием	1900	1700
Сталь, легированная вольфрамом, кремнием и ванадием	1900	1700

**Таблица 1** – Основные механические характеристики наиболее распространенных материалов упругих пружин

# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

## 1 Конечные витки

Для правильной работы большое значение имеет конструкция конечных витков. Их форма должна отвечать следующим условиям:

- поверхность контакта между конечными витками и опорными деталями должна быть плоской и перпендикулярной оси пружины во избежание точечного приложения нагрузки;
- площадка контакта должна по возможности представлять собой полное кольцо во избежание внецентренного приложения нагрузки;
- конструкция конечных витков должна обеспечивать правильное центрирование пружины в опорных деталях.

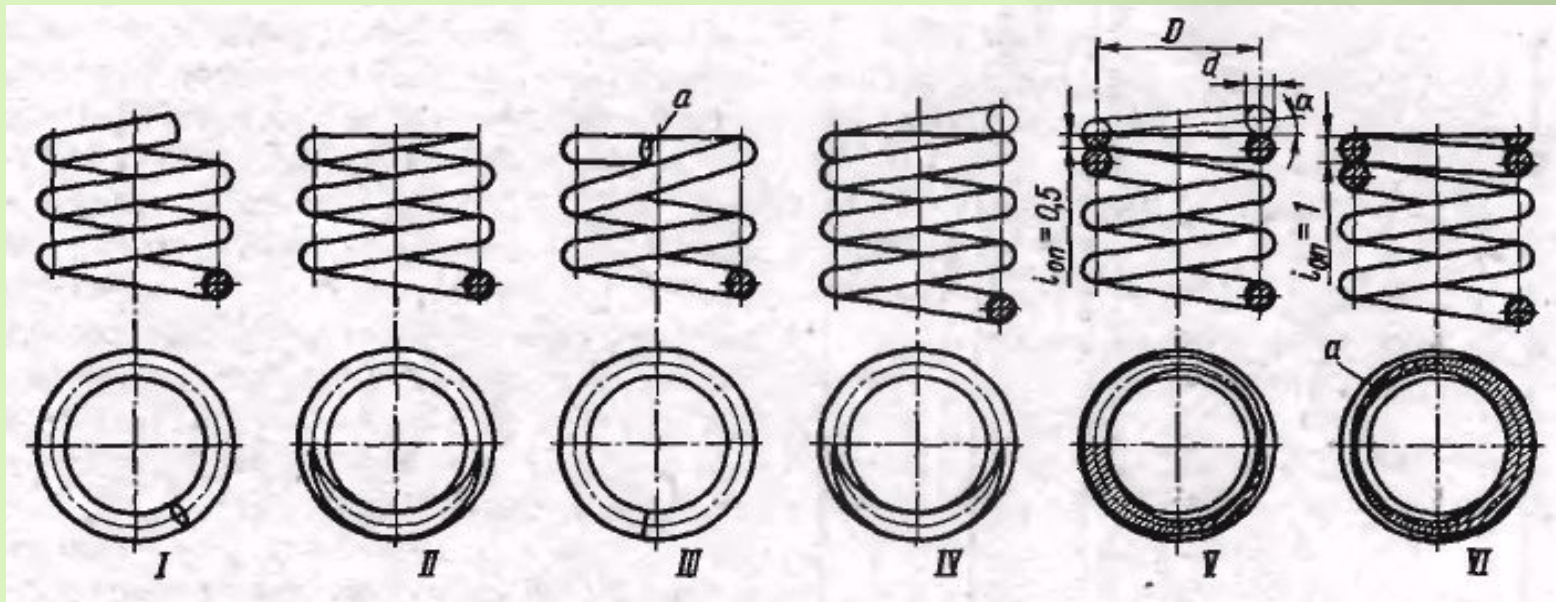
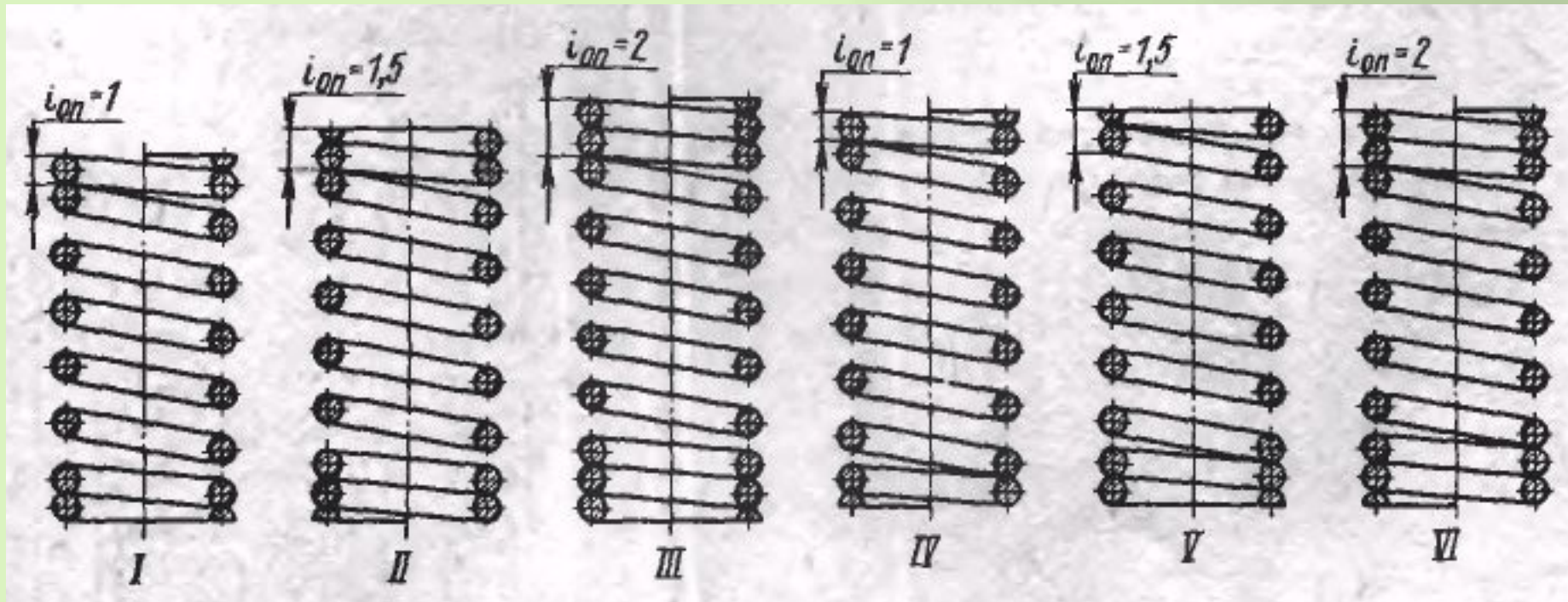


Рисунок 6 – Способы заправки концов пружины

# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

Осаженные витки практически не участвуют в работе пружины и не влияют на ее рабочие характеристики. Их называют **нерабочими** (**опорными**) витками в отличие от **рабочих** витков, подвергающихся деформации под нагрузкой. Опорные витки не совершают перемещений относительно поверхностей, на которые опирается пружина.

Отношение числа рабочих витков пружины к общему числу опорных витков не должно быть меньше 3.



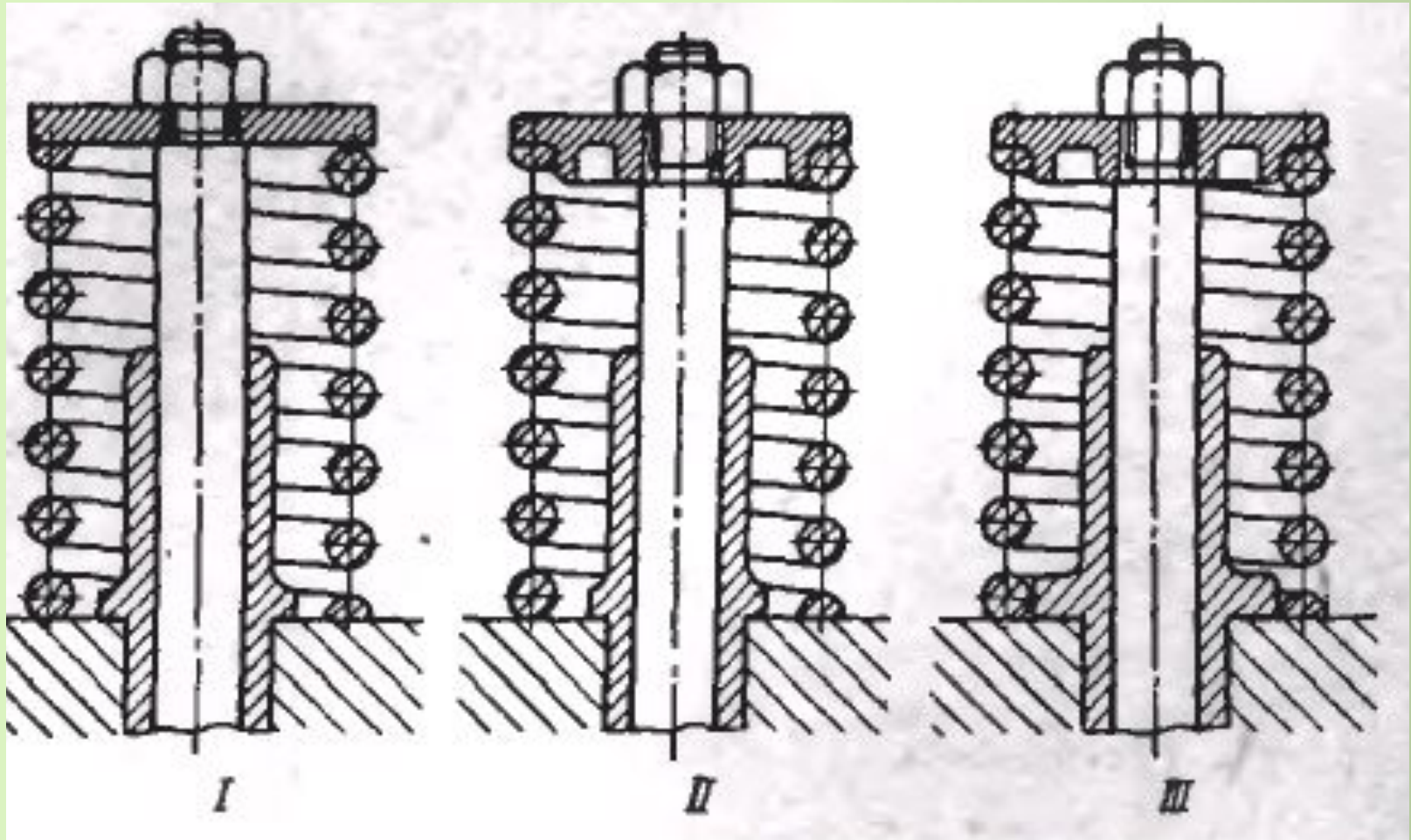
**Рисунок 7** – Пружины сжатия с числом опорных витков от 1 до 2



# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

## 2 Центрирование

При установке пружина должна быть надежно центрирована с обоих торцов.

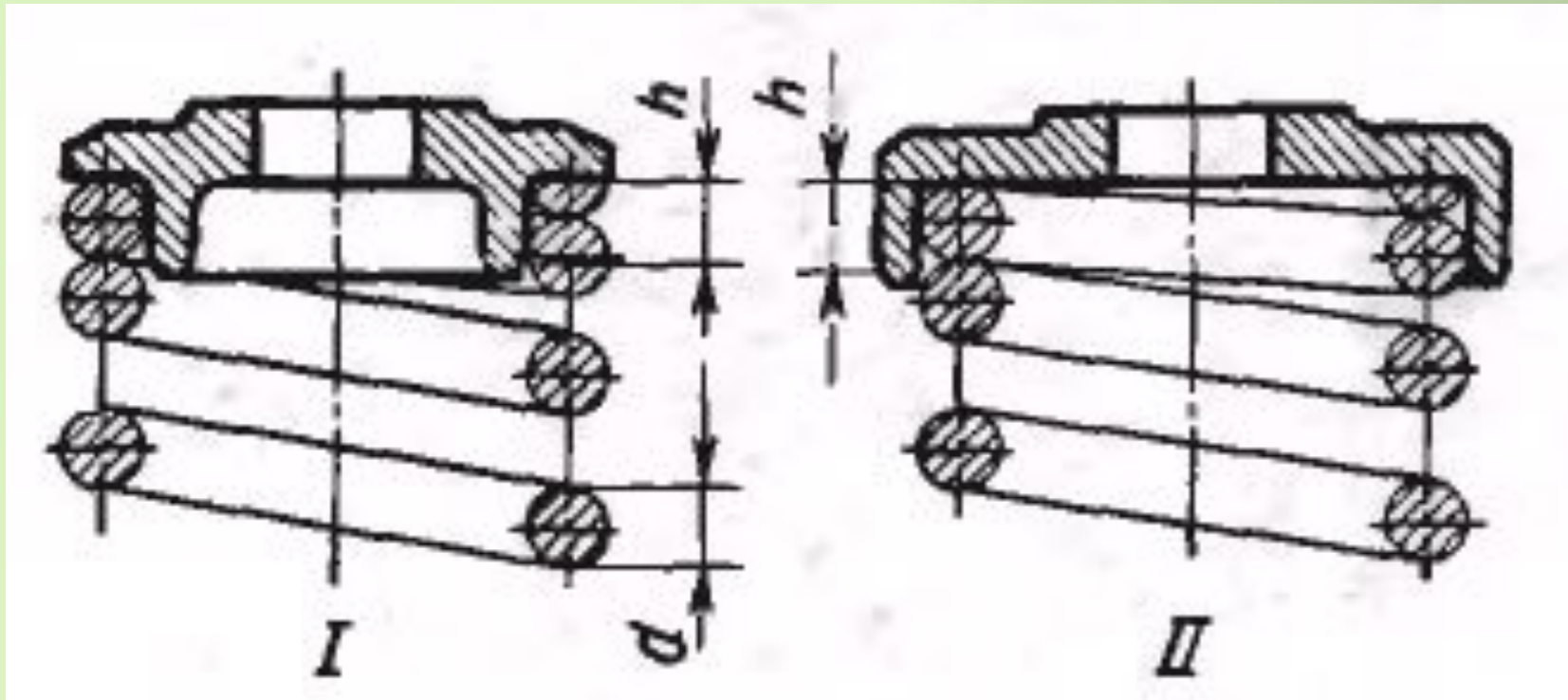


**Рисунок 8** – Центрирование пружин: I, II – неправильно; III - правильно

# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

Центрирование обычно производят по внутренней поверхности витков (рисунок 9, I). Центрирование по наружной поверхности (рисунок 9, II) применяют только при расположении пружины в охватывающих деталях – гильзах, стаканах.

Высота центрирующего пояска  $h$  должна быть не меньше  $d$  (диаметр проволоки), чтобы обеспечить центрирование по полной окружности пружины.



**Рисунок 9** – Внутреннее и наружное центрирование пружин

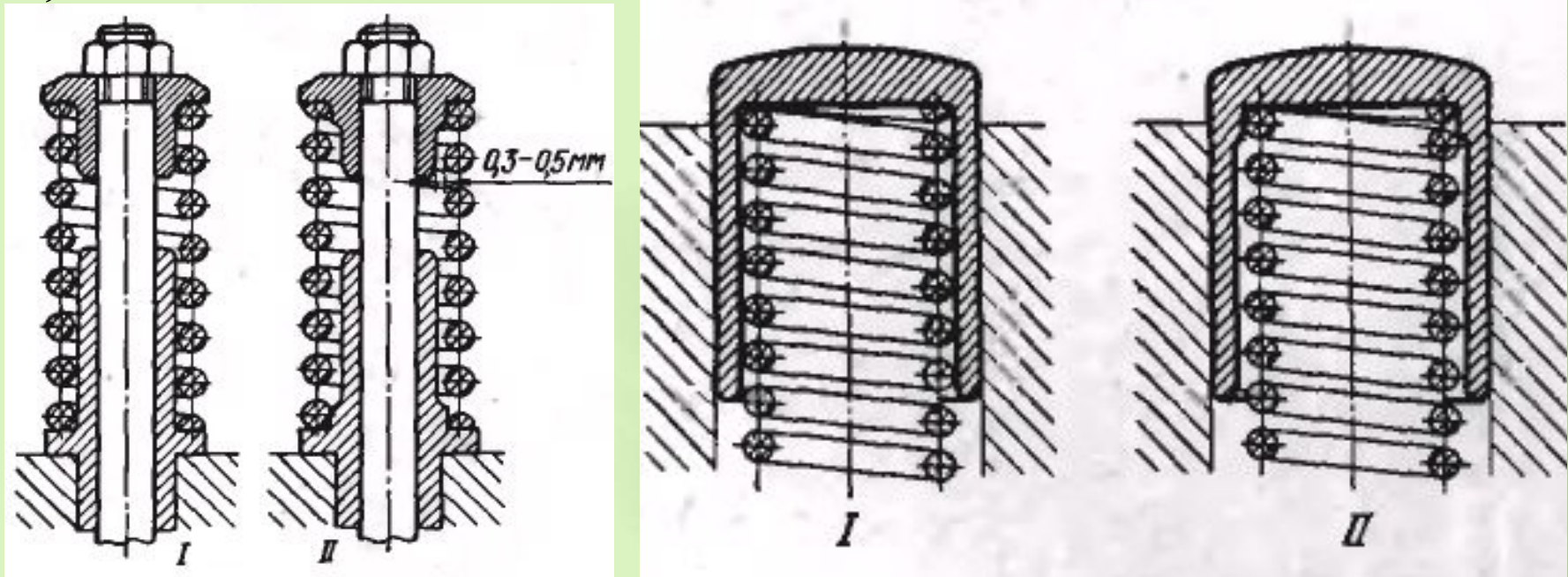


# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

Делать центрирующие пояски высотой более  $h = 1,5d$  не рекомендуется во избежание излишнего трения между витками и центрирующими поверхностями. Зазор между поверхностями деталей, смежными с центрирующими поясками и витками пружины должен быть не менее 0,3...0,5 мм. Особенно это важно при расположении пружины в охватывающих деталях, т.к.  $D$  увеличивается:

$D, D'$  - диаметры пружины до и после осадки, мм  
 $\alpha, \alpha'$  - углы наклона витков до и после осадки.

$$D' = D \frac{\cos \alpha'}{\cos \alpha}$$

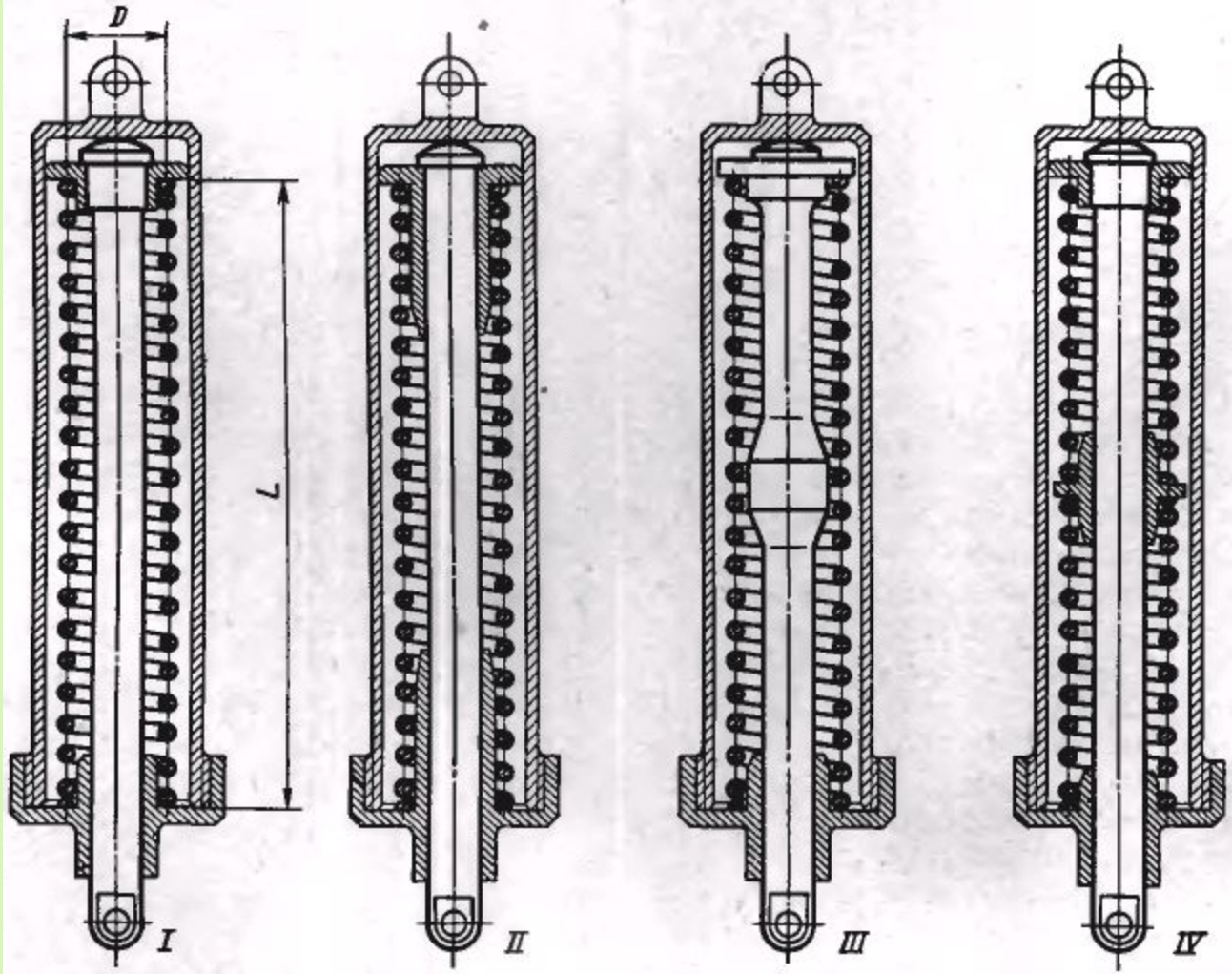


**Рисунок 10** – Способы центрирования пружин: I – неправильно; II – правильно

# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

## 3 Устойчивость

При большой длине пружины возникает опасность потери продольной устойчивости (выпучивание).



Рекомендуемые соотношения (рисунок 11):

$L/D \approx 5$  – хорошая центровка с направляющими

$L/D \approx 2,5$  – шарнирная центровка

**Рисунок 11** – Способы предупреждения потери продольной устойчивости пружин

# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

Причиной разрушения спиральных пружин при статическом осевом нагружении являются касательные напряжения. Внешняя осевая сила  $F$  (сила растяжения-сжатия, приложенная к оси пружины) на плече, равном радиусу пружины, создает момент  $T$ , скручивающий виток.

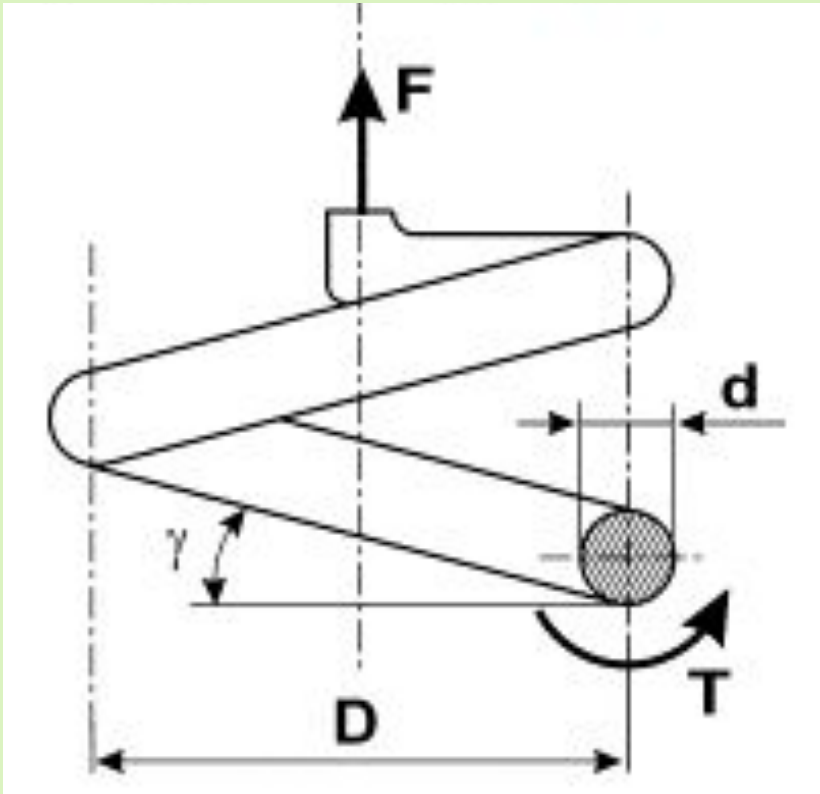
Основной расчет проводится по крутящему моменту:

$$\tau = k \frac{T}{W_{кр.}} \leq [\tau]$$

$$W_{кр.} = \frac{\pi d^3}{16} \quad \text{— полярный момент сопротивления сечения}$$

$k$  — коэффициент формы, зависящий от соотношения  $D/d$ .

Отношение  $D/d$  называется индексом пружины.

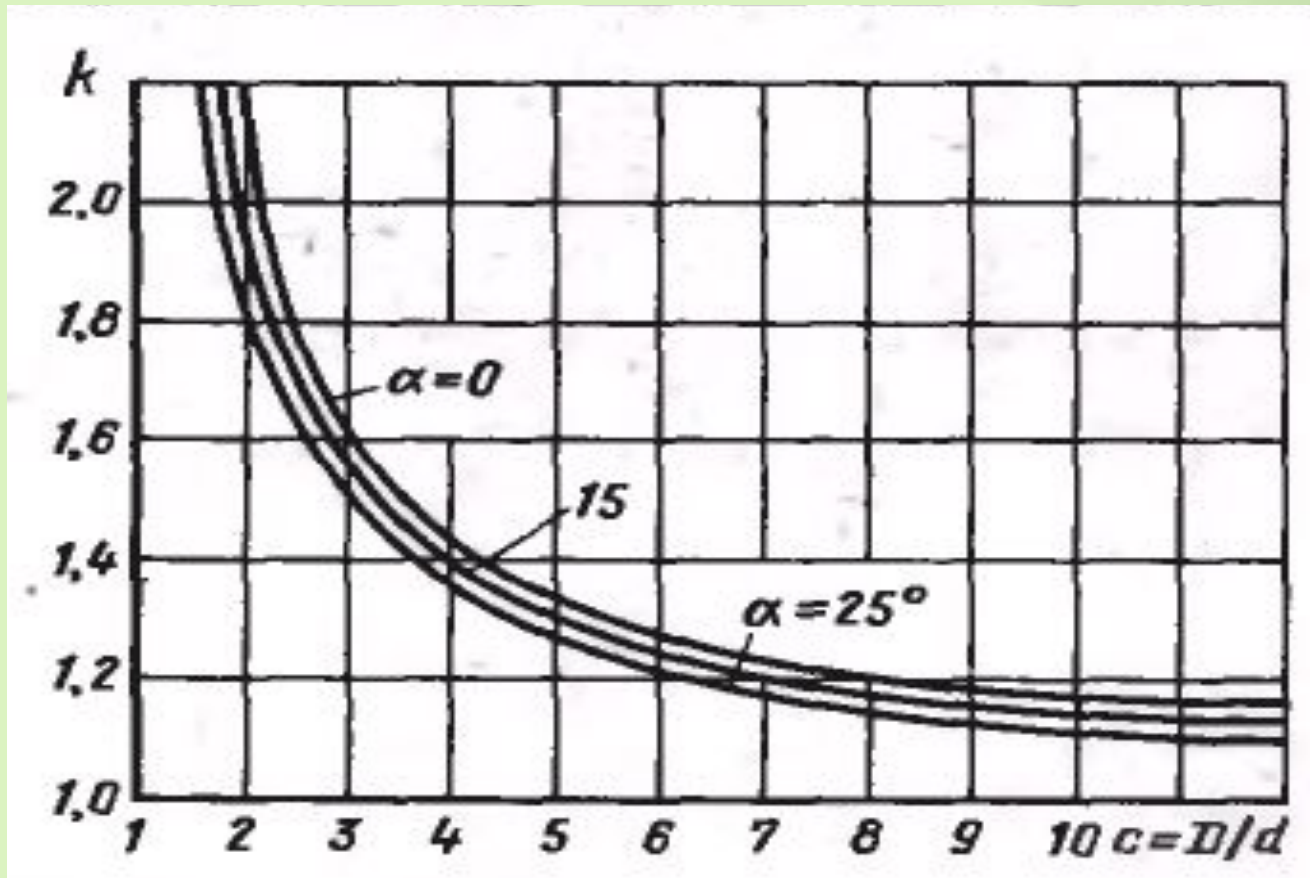


**Рисунок 12** – Схема действия сил при осевой нагрузке пружины сжатия



# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

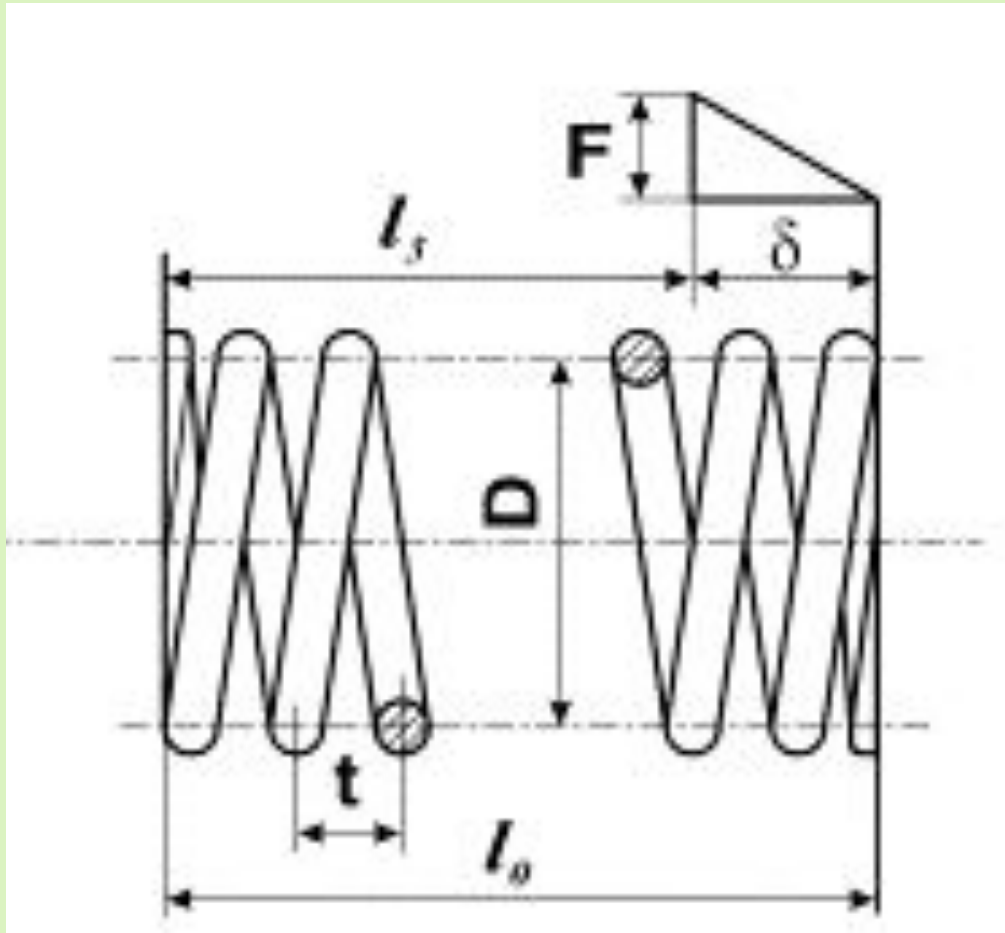
При больших диаметрах следует несколько снижать верхнюю границу индекса пружины. При  $C \leq 4$  в наружных волокнах витков пружины могут появиться разрывы и участки пластичности из-за большой кривизны, поэтому пружины с такими значениями индекса использовать нецелесообразно.



**Рисунок 13** – Зависимость коэффициента формы от индекса пружины

# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Особенности конструкции. Расчет

В случае, если при проектировочном расчете требуется определить число витков  $n$ , обеспечивающих заданное значение осадки пружины  $\delta$ :



$$n = \frac{Gd^4 \delta}{8FD^3}$$

$G$  - модуль упругости при сдвиге;  
 $F$  - внешняя осевая сила.

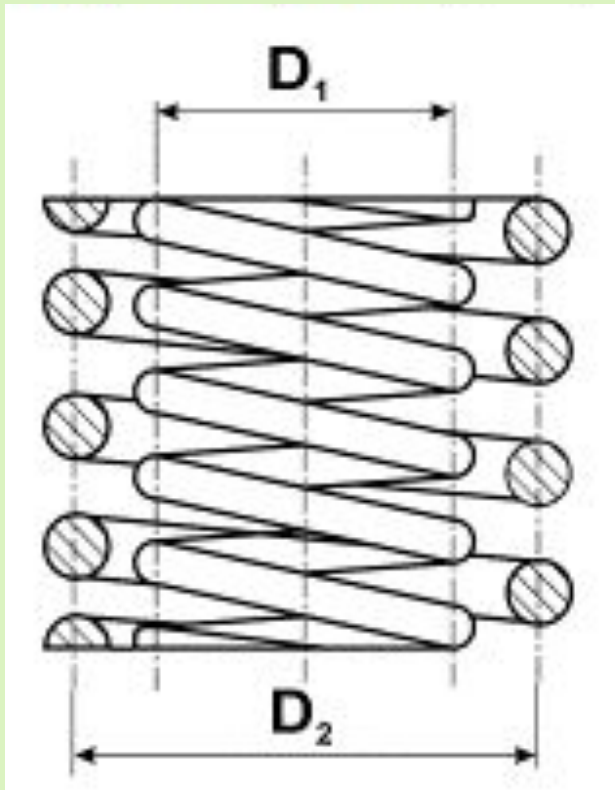
Таким образом, диаметр проволоки  $d$  определяется из условия статической прочности, а количество витков  $n$  рассчитывается из условия обеспечения требуемой осадки  $\delta$ .

Рисунок 14 – Расчетная схема пружины сжатия



# Спиральные пружины растяжения, сжатия. Расчет составных пружин

В ряде случаев используют пружинный узел, когда меньшая по диаметру пружина (первая) диаметром  $D_1$  устанавливается внутри наружной (второй) с диаметром  $D_2$ . При этом внешняя осевая сила  $F$ , приложенная к узлу, складывается из нагрузок, действующих на каждую из пружин:

$$F = F' + F''$$


Расчет составных пружин выполняется в форме проверочного. Для обеспечения **равнопрочности** следует соблюдать условие:

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \dots = n_i d_i$$

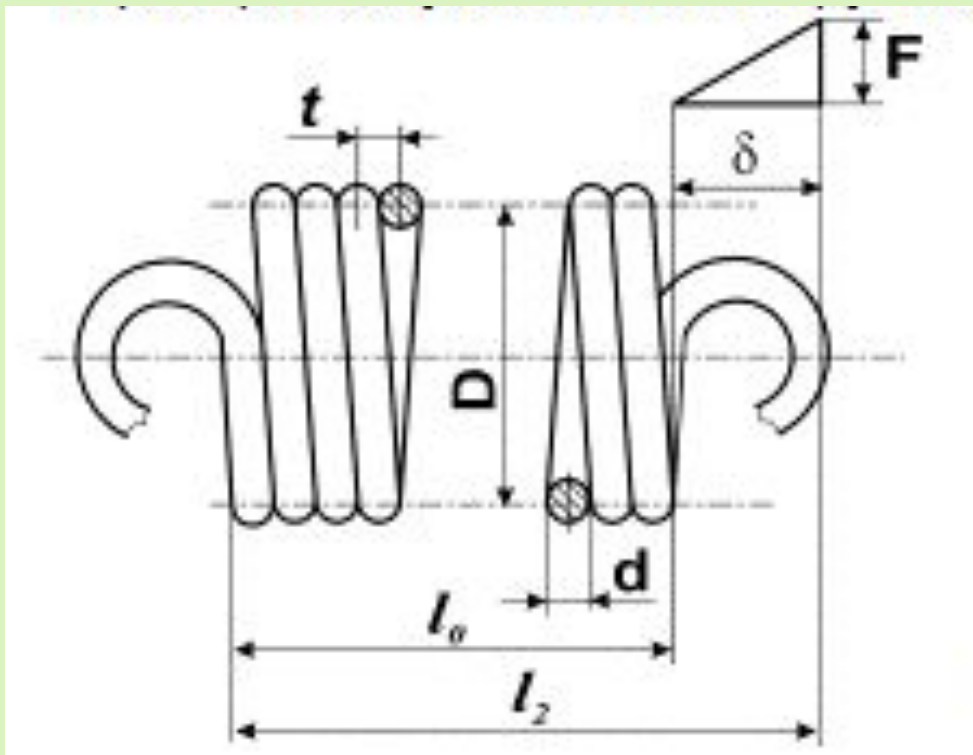
где  $i$  – количество пружин в узле.

Под **равнопрочностью** понимается условие, при котором каждая из пружин имеет одинаковый уровень максимальных напряжений.

Рисунок 15 – Составная пружина сжатия

# Особенности расчета пружин растяжения, кручения

**Пружины растяжения** навиваются таким образом, что в исходном состоянии зазор между витками отсутствует. Кроме того, для пружин такого типа не характерна потеря устойчивости. В отличие от пружин сжатия пружины растяжения имеют **места крепления (зацепы)**. Наличие зацепов приводит к тому, что помимо основных напряжений возникают дополнительные напряжения изгиба. Статический и геометрический расчеты пружин растяжения выполняются по тем же зависимостям, что и расчеты пружин сжатия.



## **Недостатки:**

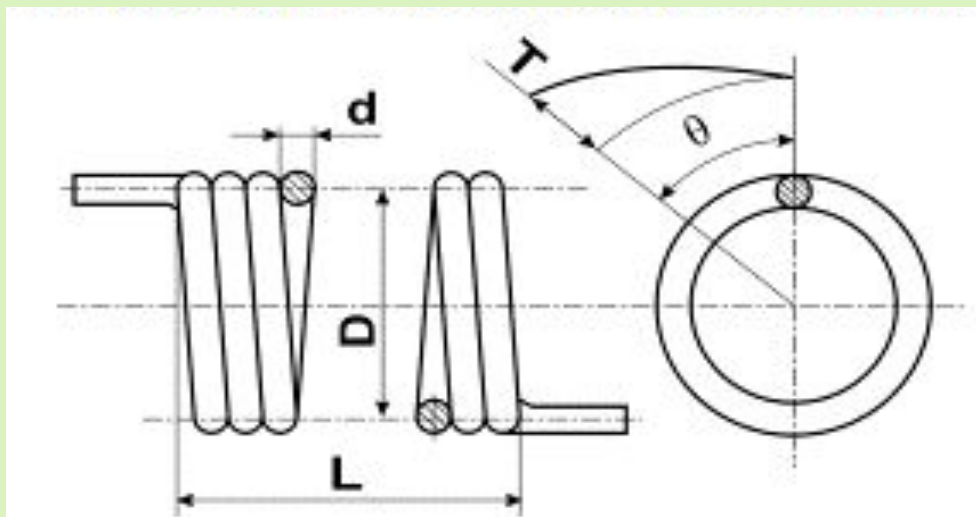
- габариты (из-за зацепов) всегда больше;
- подвергаются изгибу;
- плохо центрируются (из-за зацепов);
- участки перехода в зацепы и сами зацепы вытягиваются.

По этим причинам **не применяются** в ответственных силовых механизмах.

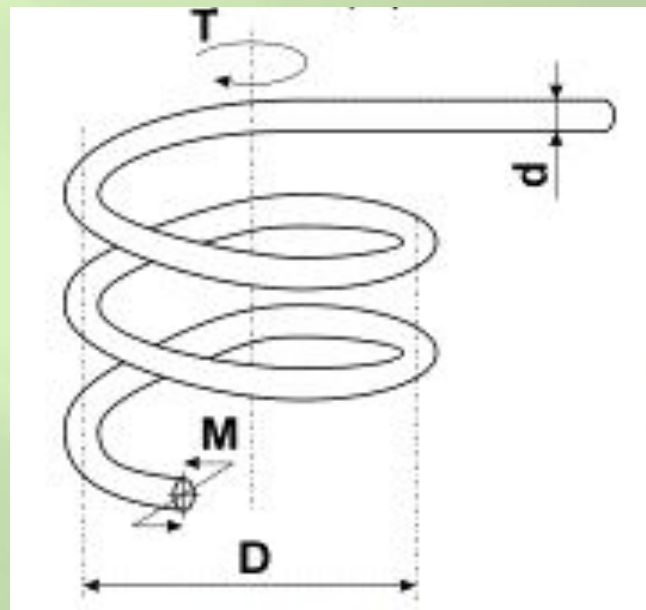
**Рисунок 16 – Цилиндрическая пружина растяжения**

# Особенности расчета пружин растяжения, кручения

**Пружины кручения** совершают работу за счет энергии, полученной от предварительного закручивания. Сила  $F$ , приложенная к пружине и вызывающая внешний момент вращения  $T$ , приводит к появлению в поперечном сечении проволоки изгибающего момента  $M$  (рисунок 18), максимальное значение которого равно:  $T = 0,5FD$ . Для пружины кручения характерно то, что при закручивании ее длина увеличивается, а диаметр уменьшается.



**Рисунок 17 – Цилиндрическая пружина кручения**



**Рисунок 18 – Деформация пружины кручения**

**Пружины кручения** работают устойчивее, если рабочий момент от силы  $F$  скручивает, а не раскручивает пружину.

# Кольцевые, тарельчатые и пластинчатые пружины

**Кольцевые пружины** (рисунок 19) состоят из набора чередующихся колец с наружными и внутренними коническими поверхностями.

Применяются при периодических ударных нагрузках, когда наряду с упругой амортизацией, необходимо обеспечить поглощение энергии удара и предупредить колебания системы. Обладают незначительной осевой деформацией. Используются как **пружины сжатия**.

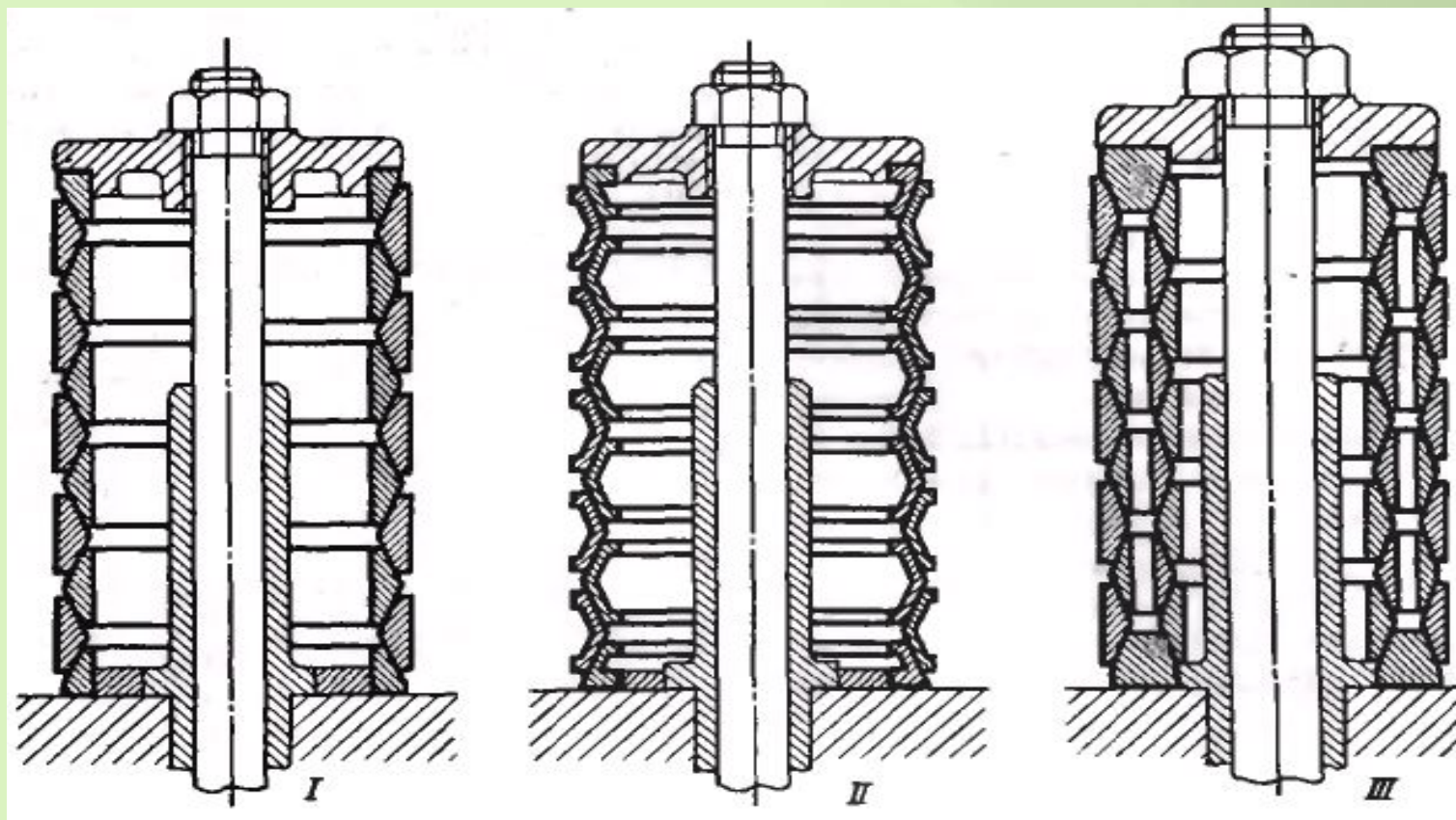


Рисунок 19 – Кольцевая пружина

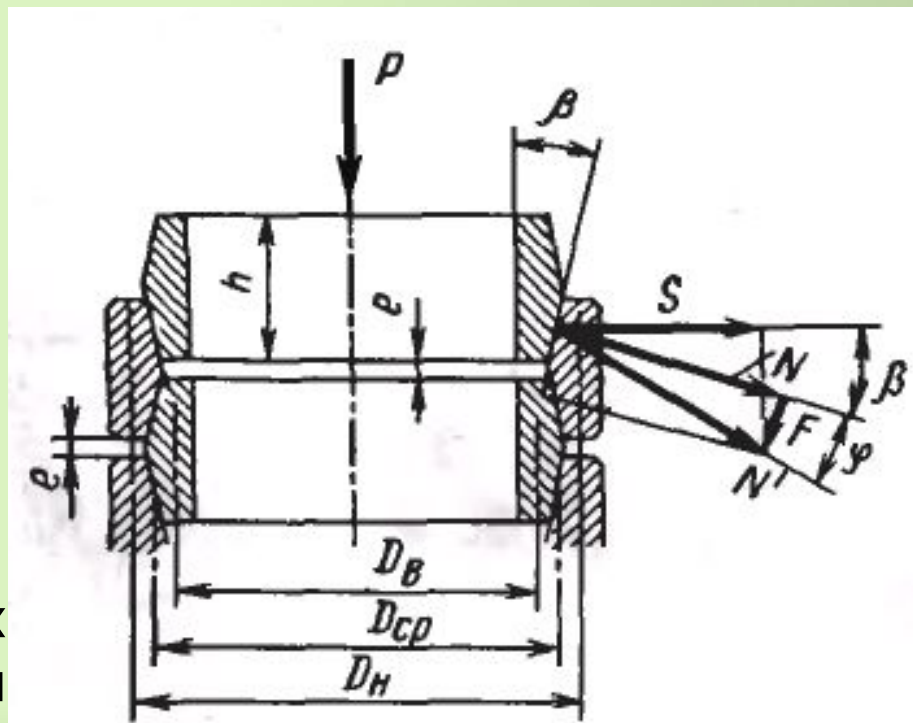
# Кольцевые, тарельчатые и пластинчатые пружины

**Расчет:** (рисунок 20)

- внутренние кольца – сжатие;
- наружные кольца – растяжение.

**Угол конусности**  $\beta$  должен быть больше угла трения (заклинивание).

**Рисунок 20** – К расчету кольцевых пружин



**Тарельчатые и пластинчатые пружины** (рисунок 21) применяют для восприятия значительных сил при небольших перемещениях.

Основной тип тарельчатых пружин – коническая шайба (получается штамповкой из листовой пружинной стали). Толщина шайбы от 1 до 20 мм, диаметр – от 30 до 300 мм. Угол конуса обычно лежит в пределах от 2 до 6 градусов.

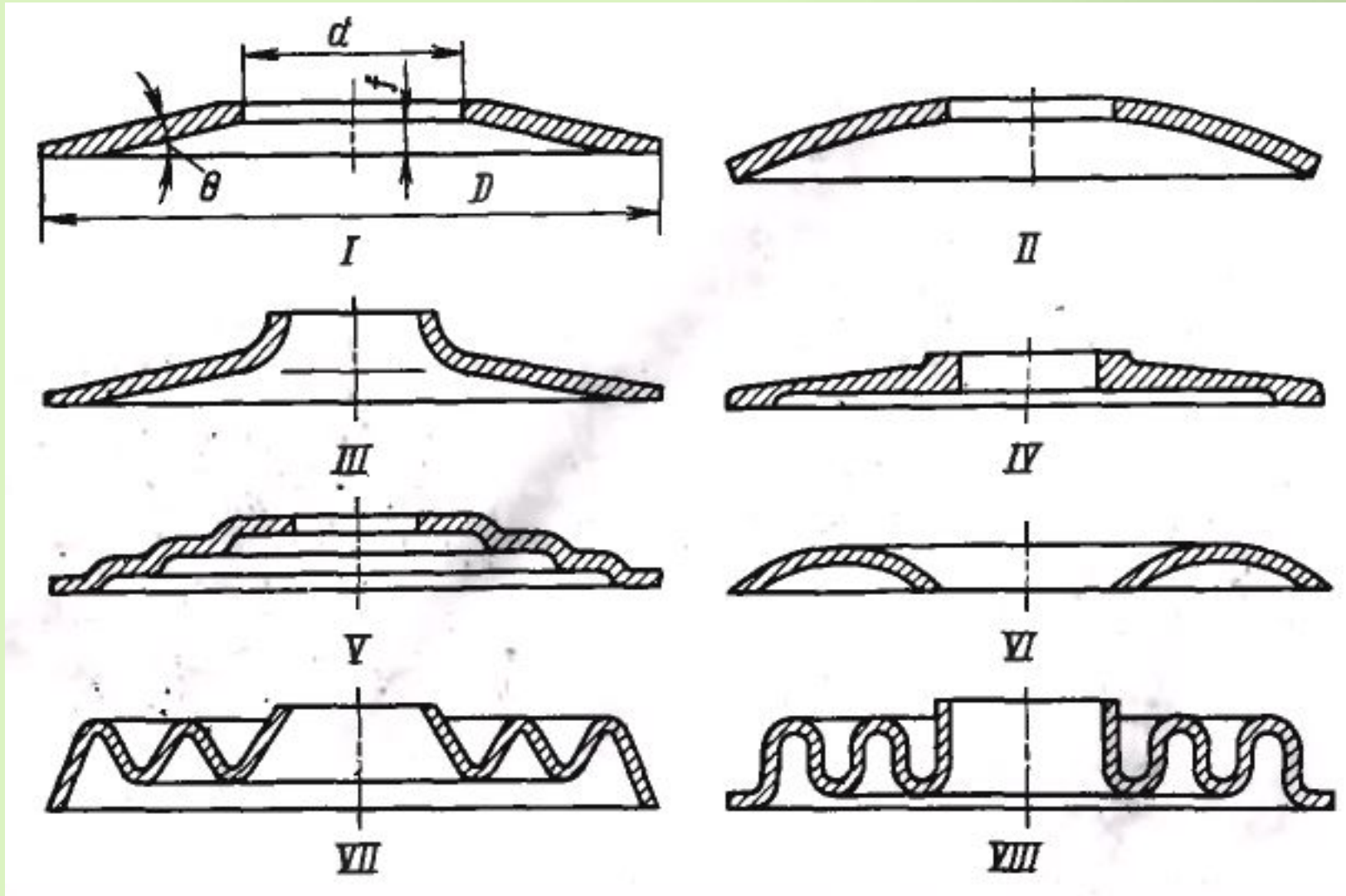
Для увеличения податливости тарельчатые пружины снабжают **гофрами** (рисунок 21, VII, VIII).

Пластинчатые пружины (пример: листовые рессоры, рисунок 1, м)



# Кольцевые, тарельчатые и пластинчатые пружины

Расчет таких типов пружин производится на прочность и жесткость.



**Рисунок 21** – Типы тарельчатых пружин

# Торсионные пружины

**Торсионная пружина** – длинный закручивающийся стержень, который в основном используется как компенсатор угловых перемещений.

**Торсионные валы** предназначены для восприятия моментной нагрузки и поэтому устанавливаются так, чтобы исключить воздействие на них изгибающей нагрузки.

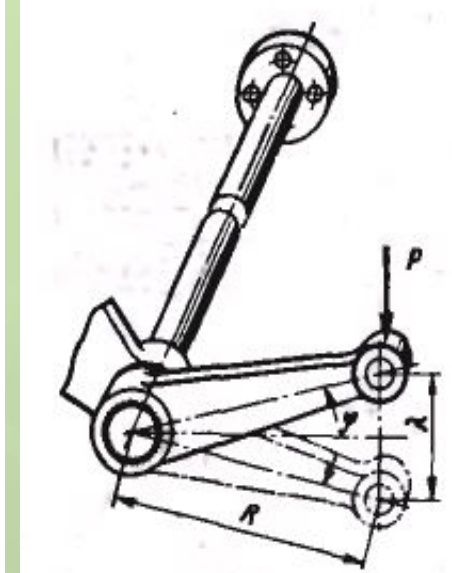
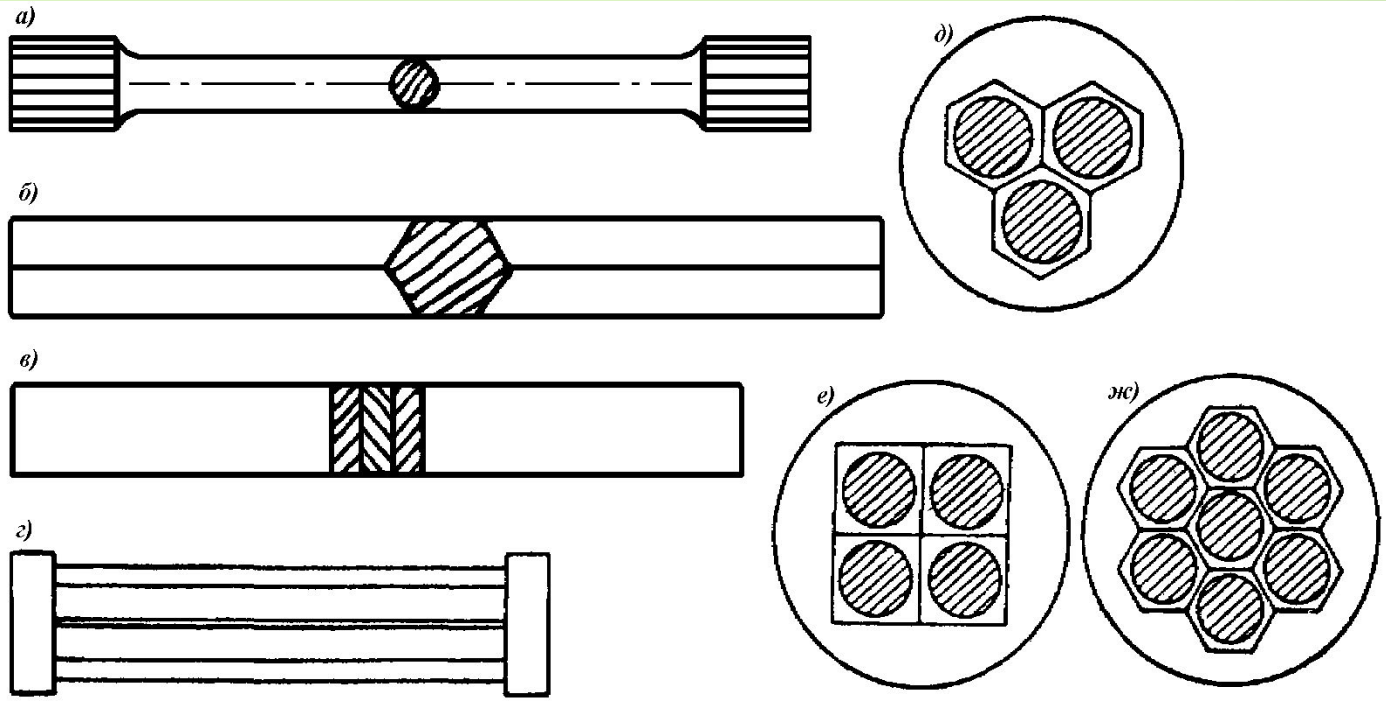
Конструкция торсионов может быть достаточно разнообразной (рисунок 22):

- **моноторсион** (рисунок 22, а, б), выполняемый в форме монолитного или пустотелого валика;
- **пучковый торсион** (рисунок 22, в-ж), включающий несколько валиков, концы которых заделаны в общие цапфы;
- **наборный пластинчатый торсион** (рисунок 22, в), в виде пакета листовых пластин, концевые части которых также заделываются в общую цапфу, и т.п.

Один конец торсиона закрепляется на неподвижной детали, например, на корпусе машины, другой – на поворотном элементе, например, на опорной части балансира (рисунок 23).

На концах торсионов нарезают треугольные или эвольвентные шлицы для соединения с сопряженными деталями.

# Торсионные пружины



**Рисунок 22 – Некоторые виды торсионов:**

**а, б** □ моноторсионы □ **а)** цилиндрический;

**б)** призматический;

**в, г, д, е, ж** □ пучковые □ **в)** наборный пластинчатый;

**г)** многовальный, вид сбоку; **д)** трехвальный;

**е)** четырехвальный; **ж)** семивальный.

**Рисунок 23 –**

Торсионная рессора для восприятия поперечной силы

# Торсионные пружины

**Материалы:** высококачественные легированные стали, обладающие хорошими упругими и усталостными показателями (Сталь 45ХН2МФА).

Часть торсиона, работающая на закручивание, подвергается **улучшающей термической обработке**, а после обточки шлифуется и полируется. С целью повышения усталостной прочности и выносливости поверхность рабочей части торсиона подвергается **наклёпу** дробеструйной обработкой (глубина слоя деформирования до 0,8 мм) или накаткой роликами (глубина слоя деформирования до 2,0 мм).

Перед установкой в машину с целью повышения усталостной прочности и выносливости торсион подвергается **заневоливанию**. Торсионы, подвергнутые заневоливанию в обязательном порядке маркируют с указанием допустимого направления закручивания на месте установки.

**Таблица 2** – Рекомендации по выбору допускаемых напряжений при расчете пружин и торсионов

Характер нагрузки	Допускаемые напряжения кручения [τ]
Статическая	$0,6\tau_B$
Отнулевая	$(0,45...0,5)\tau_B$
Знакопеременная или ударная	$(0,25...0,3)\tau_B$

# Торсионные пружины

Расчет торсионов производят на жесткость (определяется  $\varphi$ ) и прочность (по допускаемым  $[\tau]$ ).

Материал торсионного вала работает в чистом виде на кручение, следовательно для него справедливо условие прочности:

$$\tau = \frac{T}{W_{\text{кр}}} \leq [\tau]$$

**Удельный угол закручивания** торсиона (угол поворота вокруг продольной оси одного конца вала относительно другого, отнесенный к длине рабочей части торсиона) определится равенством:

$$\frac{\varphi}{l} = \frac{32T}{\pi G d^4}$$

а предельно допустимый угол закручивания для торсиона:

$$\varphi_{\text{max}} = \frac{2 l [\tau]}{d G}$$

Таким образом, при проектном расчете (определении конструктивных размеров) торсиона его диаметр вычисляют исходя из предельного момента, а длину - из предельного угла закручивания.



# Резиновые амортизаторы

Резина имеет следующие амортизационные свойства:

- высокое удлинение;
- большое внутреннее трение.

Применяется для упругой подвески машин, восприятия толчков и ударов. Резина вулканизированная к наружной и внутренней металлическим обоймам называется **сайлент-блоком** («бесшумный блок»).

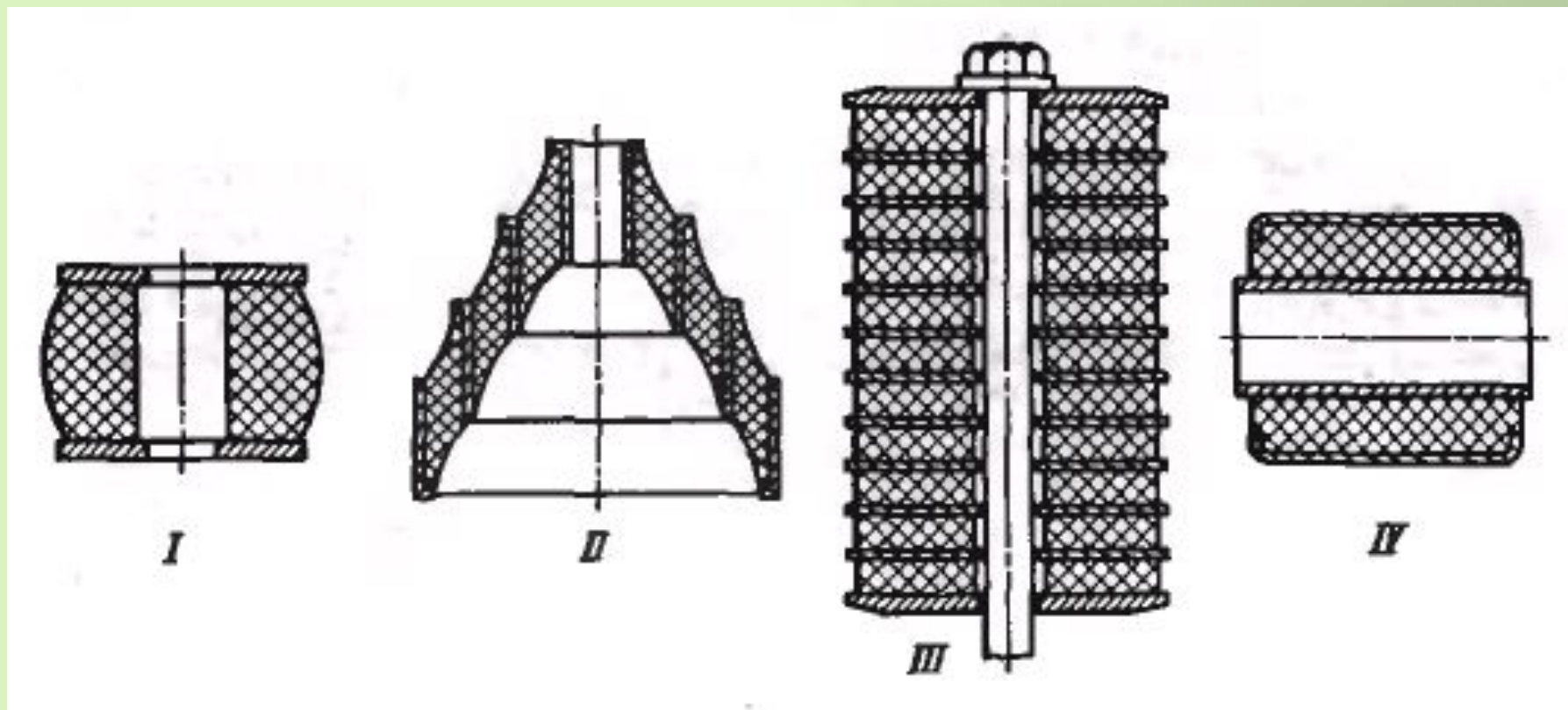


Рисунок 24 □ Резиновые амортизаторы

**Лекция закончена.  
Спасибо за внимание!**