

## ТЕМА: ГИБКА (1 часть-2 часа)

### План лекции

1. Введение
2. Стадии гибки
3. Напряжения и деформации при гибке
4. Расчет размеров заготовки, учет упругих деформаций при гибке

**Гибка выполняется** на кривошипных и гидравлических прессах, валковых листогибочных машинах, специальных профилегибочных машинах для гибки с растяжением, а также на универсально-гибочных автоматах.

*В машиностроении наиболее широко выполняют гибку в штампах, установленных на кривошипных прессах.*

*Гибку в штампах осуществляют одновременным действием на заготовку пуансона и матрицы, причем точки приложения сил  $P$  и  $Q$  находятся на определенном расстоянии друг от друга (рис. 7.1). Силы  $P$  и  $Q$  образуют изгибающий момент, достаточный для выполнения формоизменения.*

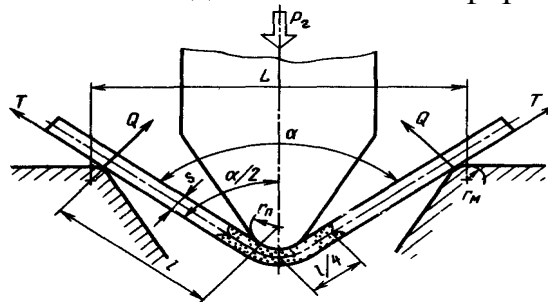


Рис. 7.1. Схема действия сил при гибке в штампе

В процессе гибки кривизна деформируемого участка заготовки увеличивается, при этом одновременно происходит **растяжение внешних** и **сжатие внутренних слоев**. По мере уменьшения радиуса изгиба пластической деформацией охватывается **вся толщина заготовки**. Форма зоны пластической деформации и ее протяженность при  $\alpha = 90^\circ$  составляют около одной четверти плеча гибки  $l$  (см. рис. 7.1).

После гибки *форма и размеры поперечного сечения* заготовки в зоне пластической деформации изменяются. Изменения поперечного сечения заготовки тем больше, чем меньше радиус изгиба.

Это происходит вследствие того, что пластическая деформация в окружном направлении в соответствии с условием неизменности объема сопровождается пластическими деформациями обратного знака в одном или двух взаимно перпендикулярных направлениях: радиальном и аксиальном.

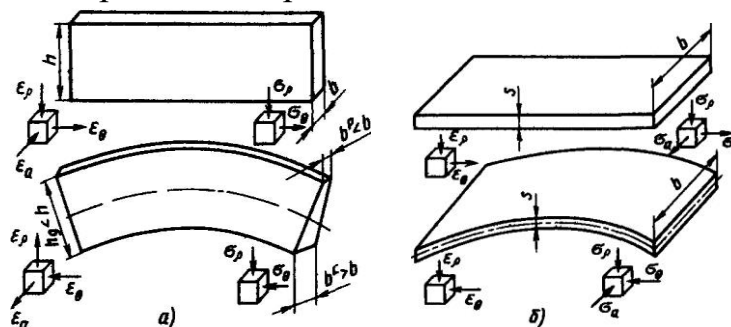


Рис. 7.2. Схема гибки узкой (а) и широкой (б) полос

**При гибке узкой полосы** на ребро первоначально прямоугольная форма поперечного сечения превращается в трапециевидальную (рис. 7.2, а), высота сечения в зоне пластической деформации уменьшается ( $s_d < s$ ). **При гибке широкой полосы или листа** форма поперечного сечения в зоне пластической деформации изменяется несущественно, уменьшается лишь ее толщина  $s$  (рис. 7.2, б).

*Напряженное состояние* зоны пластической деформации при гибке характеризуется нормальными напряжениями  $\sigma_\theta$  в окружном направлении и нормальными напряжениями  $\sigma_r$  в радиальном направлении, последние возникают вследствие нажатия продольных слоев заготовки друг на друга (см. рис. 7.2, а, б).

Кроме того, при гибке широкой заготовки возникают еще нормальные напряжения  $\sigma_a$  в аксиальном (осевом) направлении. Их возникновение объясняется упругим изменением формы и размеров элементарного (по ширине) участка заготовки, находящегося на некотором расстоянии от ее краев (см. рис. 7.2, б).

При гибке широкой заготовки (в отличие от гибки на ребро полосы) аксиальные деформации встречают сопротивление соседних, непосредственно примыкающих к элементарному участку слоев металла, вызывая этим возникновение аксиальных напряжений  $\sigma_a$ .

В зоне растяжения аксиальные напряжения растягивающие, в зоне сжатия — сжимающие (см. рис. 7.2, б). Таким образом, при гибке широкой полосы напряженное состояние — объемное.

При гибке узкой полосы аксиальные напряжения малы по сравнению с напряжением текучести, поэтому ими можно пренебречь ( $\sigma_a \approx 0$ ). Это допущение позволяет считать, что при гибке на ребро узкой полосы напряженное состояние плоское.

## 2. Стадии гибки

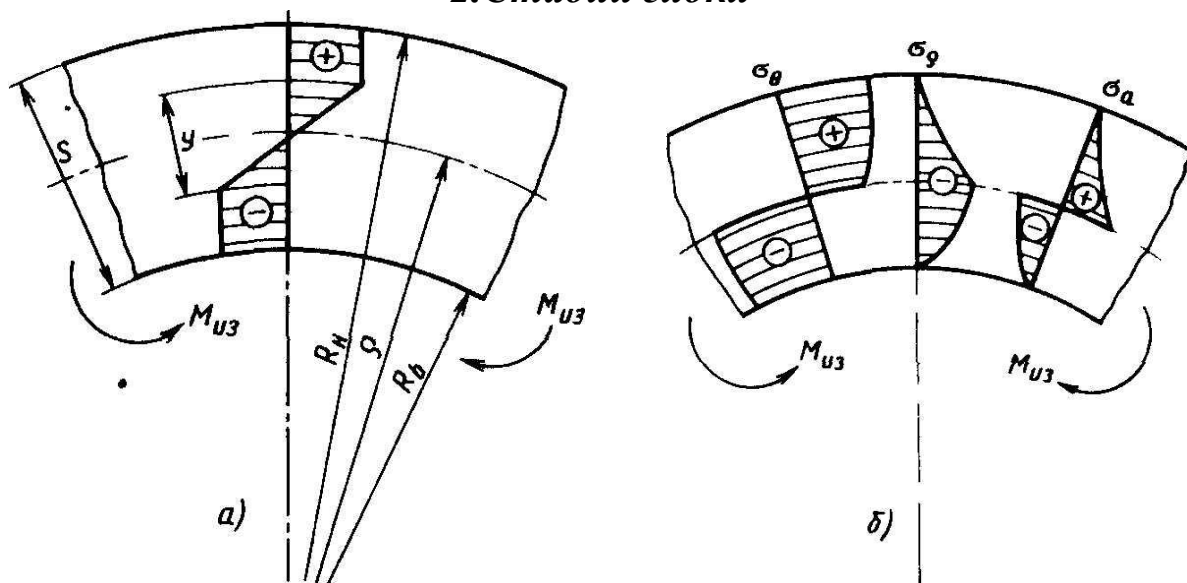


Рис. 7.3. Эпюры напряжений по толщине заготовки на стадиях:  
а — упругопластической; б — чисто пластической

*Значение и характер распределения напряжений, возникающих в зоне пластической деформации, зависят от радиуса кривизны изгибаемой заготовки.*

**В начальной стадии** ее радиус кривизны велик, заготовка деформируется только упруго, данная стадия гибки называется *упругой*. Она хорошо известна из курса «Сопротивление материалов».

По мере уменьшения радиуса изгиба периферийные слои заготовки начинают деформироваться пластически, поскольку значение возникающих в этих слоях окружных напряжений  $\sigma_a$  достигает напряжения текучести. Эту стадию называют *упруго-пластической*. Эпюра распределения напряжений  $\sigma_\theta$  показана на рис. 7.3, а.

При дальнейшем уменьшении радиуса изгиба пластическая зона растет, а упругая, соответственно, уменьшается и при относительном внутреннем радиусе изгиба  $R_s \leq 5$  почти все поперечное сечение заготовки находится в пластическом состоянии, начинается *чисто пластическая* стадия изгиба.

*На этой стадии происходит* заметное смещение нейтральной поверхности в сторону сжатых волокон заготовки, которое увеличивается с уменьшением радиуса изгиба. Эпюры распределения напряжений  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_p$ , и  $\sigma_a$  по толщине заготовки на стадии чисто пластического изгиба показаны на рис. 7.3, б.

**Энергосиловые характеристики гибки** (изгибающий момент, деформирующее усилие), равно как и упругие деформации заготовки, возникающие после снятия нагрузки, определяют применительно к определенной стадии процесса гибки в связи с тем, что по мере уменьшения радиуса изгиба изменяются:

- напряженно-деформированное состояние очага деформации,
- значения возникающих напряжений?
- радиус кривизны нейтральной поверхности.

*С учетом сделанных предпосылок перейдем к определению поля напряжений и деформаций при изгибе моментом.*

### ***3. Поле напряжений и деформации при изгибе моментом***

Вначале рассмотрим изгиб моментом широкой полосы, у которой деформации в направлениях, перпендикулярных к плоскости, в которой происходит изменение кривизны срединной поверхности, могут быть приняты равными нулю.

Далее будет показано, что это допущение справедливо для средней части изгибаемой полосы, а краевые ее участки испытывают более сложное деформирование.

Изменение кривизны заготовки может происходить тогда, когда одна часть заготовки по толщине испытывает удлинение в тангенциальном направлении, а другая – сжатие.

Примем, что в какой-то момент деформирования, когда наружная и внутренняя поверхности имели радиусы кривизны соответственно  $R$  и  $r$ , слой, который в данный момент не испытывает ни удлинения, ни укорочения (нейтральный слой), имеет радиус кривизны  $r_n$ . Тогда слои, для которых  $R > r > r_n$ , будут испытывать удлинение в тангенциальном направлении ( $\epsilon_\theta > 0$ ), а слои для которых  $r_n > r > r$ , испытывают сжатие ( $\epsilon_\theta < 0$ ).

Деформации  $\varepsilon_\theta$  могут быть вызваны действием напряжений  $\sigma_\theta$ , которые будут положительными (растягивающими) для  $R > r > r_n$  и отрицательными (сжимающими) для  $r_n > r > r$ . При наличии кривизны, отличной от нуля, за счет надавливания слоев друг на друга появятся радиальные напряжения  $\sigma_r$ , которые будут сжимающими для зоны тангенциального растяжения и для зоны тангенциального сжатия.

Распределение напряжений по толщине может быть найдено из совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и уравнения пластичности.

В рассматриваемом случае, учитывая постоянство кривизны заготовки по углу, для анализа поля напряжений целесообразно принять полярную систему координат. При этом следует учесть, что при изгибе моментом, ввиду отсутствия перерезывающих сил, напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  являются главными нормальными напряжениями. Для этого случая уравнение равновесия имеет вид:

$$\frac{\rho d\sigma_r}{d\rho} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \quad (7.2)$$

Для упрощения написания полученных формул и учитывая, что среднее главное нормальное напряжение оказывает сравнительно малое влияние на условие перехода в пластическое состояние, решение найдем с использованием гипотезы максимальных касательных напряжений.

Для рассматриваемого случая изгиба уравнение пластичности по этой гипотезе может быть представлено в виде

$$+\sigma_r - \sigma_\theta = \sigma_s \quad (7.3)$$

где знак минус относится к зоне растяжения в тангенциальном направлении, а знак плюс к зоне сжатия в тангенциальном направлении.

При совместном решении уравнений (7.2) и (7.3) и использовании граничных условий, по которым при  $r = R$  и  $r = r$  напряжения  $\sigma_r = 0$ , получаем формулы, показывающие распределение напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  по толщине заготовки:

Зона растяжения

$$\sigma_r \approx -\sigma_s \ln \frac{R}{\rho}$$

$$\sigma_\theta \approx \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho}\right)$$

Зона сжатия

$$\sigma_r \approx -\sigma_s \ln \frac{\rho}{r}$$

$$\sigma_\theta \approx -\sigma_s \left(1 + \ln \frac{\rho}{r}\right)$$

(7.4)

Из формул (7.4) видно, что напряжения  $\sigma_p$  возрастают по абсолютной величине по мере удаления от поверхностей заготовки в ее толщину.

На нейтральной поверхности при  $p = p_n$  напряжения  $\sigma_p$ , определяемые из формул (7.4) для зон растяжения и сжатия, равны между собой. Если приравнять эти напряжения, получим:

$$\sigma_s \ln \frac{R}{\rho_n} = \sigma_s \ln \frac{\rho_n}{r}$$

Из этого выражения легко получить формулу для определения радиуса нейтральной поверхности, найденную И. П. Ренне [48] [Р. Хиллом [571]:

$$\rho_n = \sqrt{Rr} \quad (7.5)$$

В тех случаях, когда отношение радиусов, находящееся под  $\ln$  знаком логарифма, незначительно отличается от единицы, можно заменить логарифм первым членом разложения логарифма в ряд 'по соотношению типа;  $\ln x = \ln[1 + (x - 1)] \approx x - 1$

С учетом указанного разложения формулы (7.4) могут быть записаны в несколько ином виде:

Зона растяжения

$$\sigma_\rho \approx -\sigma_s \left( \frac{R}{\rho} - 1 \right) \quad \sigma_\theta \approx \sigma_s \left( 2 - \frac{R}{\rho} \right)$$

Зона сжатия

$$\sigma_\rho \approx -\sigma_s \left( \frac{\rho}{r} - 1 \right) \quad \sigma_\theta \approx -\sigma_s \frac{R}{\rho}$$

(7.4')

Используя приближенные формулы (7.4') и приравнявая значения напряжений  $a_0$  для зон растяжения и сжатия при  $p = p_n$ , получаем ту же формулу (7.5) для определения радиуса нейтральной поверхности.

Из формул (7.4) и (7.5) можно найти наибольшую по абсолютному значению величину  $\sigma_p$ , действующую на нейтральной поверхности:

$$\sigma_{\rho \max} \approx -\frac{1}{2} \sigma_s \ln \frac{R}{r} \quad (7.6) \text{ или } \sigma_{\rho \max} \approx -\sigma_s \left( \sqrt{\frac{R}{r}} - 1 \right) \quad 7.6')$$

• Для того чтобы легче было оценить величину  $\sigma_{\max}$ , примем  $R = r + s$  ( $s$  - толщина заготовки) и используем линейное разложение квадратного корня в ряд, тогда формула (7.6') может быть преобразована к виду:

$$\sigma_{\rho \max} \approx -\sigma_s \frac{s}{2r} \quad 7.7.$$

- Из формулы (7.7) видно, что при  $rls > 5$  максимальная (по абсолютному значению) величина  $\sigma_{рх}$  не превышает  $1/10$  напряжения текучести;

В этом случае с достаточной степенью точности влиянием напряжений  $\sigma_r$  на величину тангенциальных напряжений можно пренебречь, а напряжение  $\sigma_r$  принять постоянным, равным по абсолютному значению напряжению текучести.

Из формулы (7.5) можно установить, что нейтральная поверхность смещена относительно срединной к внутренней поверхности заготовки.

Найдем отношение разницы радиусов срединной и нейтральной поверхностей «с» к толщине заготовки  $s$ , приняв во внимание:

$$r_{cp} = \frac{R+r}{2} \quad \text{и} \quad R=r+s$$

$$c = \frac{r_{cp} - \rho_H}{s} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{r}{s}} - \sqrt{\frac{r}{s}} \right)^2 \quad (7.8)$$

- При расчете по формуле (7.8) видно, что при  $r/s > 5$  смещение нейтральной поверхности от срединной составляет меньше  $1/100$  толщины заготовки. Следовательно, в этом случае с достаточной степенью точности можно считать, что **нейтральная поверхность заготовки совпадает с срединной**.
- Из формулы (7.8) видно, что чем меньше отношение  $rls$ , тем больше смещение нейтральной поверхности заготовки относительно срединной.
- При  $rls \rightarrow 0$  это смещение стремится к  $s/2$ .
- Полученные формулы позволяют установить распределение напряжений по толщине заготовки.

## ГИБКА (2 часть-2 часа)

### 4. РАЗМЕРЫ ЗАГОТОВКИ, учет пружинения

Длину заготовки, необходимую для получения изогнутой детали с требуемыми размерами, определяют из условия равенства ее длины длине нейтральной поверхности деформаций  $L_{\text{нпд}}$  (поверхности, на которой отсутствуют деформации).

Для определения длины заготовки контур детали разбивают на прямолинейные и криволинейные участки с постоянными радиусами кривизны. Длину заготовки определяют, как сумму длин прямолинейных и криволинейных участков, причем длину криволинейных участков подсчитывают по нейтральной поверхности деформаций:

$$L_{\text{заг}} = L_{\text{нпд}} = \sum l_i + \sum \frac{\pi \cdot \alpha_i}{180} \cdot \rho_{\text{д}i} \quad (7.9)$$

где  $l_i$  — длина прямолинейных участков;  $\rho_{\text{д}i}$  — радиус нейтральной поверхности деформаций криволинейных участков.

Определение длины заготовки, по существу, сводится к отысканию радиуса нейтральной поверхности, а затем к определению ее длины.

На стадиях упругопластического и плоского чисто пластического изгиба, когда радиус изгиба относительно велик, нейтральная поверхность деформаций проходит через центр тяжести поперечного сечения заготовки.

Если поперечное сечение толщиной  $s$  прямоугольное, то  $\rho_{\text{д}} = R_{\text{в}} + s/2$ .

В рассмотренном случае длину заготовки определяют путем развертки криволинейных участков детали по поверхности, проходящей через центр тяжести ее поперечного сечения.

На стадии объемного чисто пластического изгиба, как это установлено в теории обработки металлов давлением, нейтральная поверхность деформаций смещается относительно срединной в сторону сжатых волокон заготовки, причем это смещение тем больше, чем меньше радиус изгиба. Это явление необходимо учитывать при расчете длины заготовки.

Радиус кривизны нейтральной поверхности напряжений при гибке можно определить из условия равенства наибольших радиальных сжимающих напряжений на этой поверхности:  $\rho_0 = \sqrt{R_{\text{н}} \cdot R_{\text{в}}} = \sqrt{(R_{\text{в}} + s) \cdot R_{\text{в}}} \quad (7.10)$

где  $\rho_0$  — радиус нейтральной поверхности напряжений;  $R_{\text{н}}$  и  $R_{\text{в}}$  — наружный и внутренний радиусы изгибаемой заготовки, соответственно. Упрочнение, возникающее при изгибе заготовки в холодную, по данным Е. Н. Мошнина на величину  $\rho_0$  влияет несущественно.

Формула (7.10) впервые была получена И. П. Ренне и Р. Хиллом независимо друг от друга. Ее можно использовать для определения радиуса нейтральной поверхности деформаций. Расчеты по формуле (7.10) показывают, что при  $R_{\text{в}} = s \cdot \rho_0 = 1,4 \cdot s$ , а при  $R_{\text{в}} = 5 \cdot s$ ,  $\rho_0 = 5,5 \cdot s$ . В первом случае нейтральная поверхность смещена относительно срединной на расстояние  $0,1 \cdot s$  в сторону сжатых волокон, во втором случае она совпадает со срединной поверхностью.

Радиусы кривизны нейтральной поверхности деформаций можно определить, используя коэффициенты смещения нейтральной поверхности  $\chi$ ,

значение которых зависит от относительного радиуса изгиба  $\bar{r} = R_b / s$  [18]. Коэффициент смещения нейтральной поверхности тем больше, чем больше относительный радиус гибки. При  $r_b=0,1 \cdot x=0,3$ , а при  $r_b=5,0 \cdot x=0,5$ . Зная  $x$ , можно определить радиус кривизны нейтральной поверхности деформаций:

$$\rho_d = R_b + x \cdot s. \quad (7.11)$$

Из приведенных данных следует, что с уменьшением радиуса заготовки  $R_b$  положение нейтральной поверхности деформаций смещается в сторону сжатых волокон, она совпадает со срединной поверхностью при  $R_b \geq 5 \cdot s$ , так как при этом  $x=0,5$ .

Зная положение нейтральной поверхности деформаций, можно определить длину этой поверхности, а, следовательно, и длину заготовки, необходимую для получения изогнутой детали с требуемыми размерами.

### **Изменение размеров и формы поперечного сечения заготовки в зоне изгиба.**

Особенно существенное изменение формы и размеров претерпевает поперечное сечение узкой полосы, изгибаемой на ребро; первоначально прямоугольное поперечное ее сечение превращается после гибки в трапецеидальное. При гибке широкой полосы заметно изменяется лишь ее толщина. Формулы для определения ширины поперечного сечения узкой полосы после гибки в любом ее сечении на расстоянии  $\rho$  от центра кривизны имеют вид:

в зоне растяжения

$$b_\rho^p = b \cdot (\rho_0 / \rho)^{\frac{1}{2 \cdot (2 - \rho / R_n)}} \quad (7.12)$$

в зоне сжатия

$$b_\rho^p = b \cdot (\rho_0 / \rho)^{\frac{3}{2 \cdot \sqrt{\rho / R_n}} - 1} \quad (7.13)$$

при  $\rho = R_n$  ширина полосы станет наименьшей и будет равна:  $b_{\min} = b \cdot \sqrt{\rho / R_n}$  (7.12а)

При  $\rho_0 = \rho$ , как и следовало ожидать,  $b_\rho = b$ . Приведенные формулы (7.12) и (7.13) получены в результате совместного решения уравнений связи между напряжениями и деформациями, уравнений равновесия, пластичности и неизменности объема [2].

Утонение листовой заготовки в зоне пластической деформации при гибке приближенно можно определить так [16]:

$$s - s_\delta = \Delta s = \frac{s^3}{4 \cdot (2 \cdot R_g + s)^2}. \quad (7.14)$$

Расчеты по этой формуле показывают, что утонение становится заметным при малых радиусах изгиба, например, при  $R_b=2 \cdot s$  значение  $\Delta s$  составляет около 1 % толщины заготовки.

Толщина листовой заготовки в зоне пластической деформации после гибки может быть определена и на основании экспериментальных данных как произведение коэффициента уменьшения толщины  $\eta$  на первоначальную (до гибки) толщину заготовки  $s$ :  $s_d = \eta \cdot s$ . (7.15)



В зависимости от значения относительного радиуса изгиба коэффициент  $\tau$  изменяется при гибке полос на угол  $90^\circ$  из сталей 10 и 20 от 0,82 при  $r_b = 0,1$  до 0,99 при  $r_b = 4,0$  [18].

Из приведенных данных следует, что при относительном радиусе  $r_b > 4,0$  уменьшение толщины заготовки практически отсутствует, что хорошо согласуется с теоретическими данными.

### Учет упругих деформаций при гибке, способы их уменьшения

#### Упругие деформации при гибке одноугловых деталей.

Пластический изгиб, как и другие виды пластической деформации, сопровождается упругими деформациями, которые вызывают изменение формы и размеров заготовки: радиуса кривизны и угла между прямолинейными участками заготовки (рис. 7.8). Это объясняется тем, что при разгрузке слои заготовки, находящиеся в зоне растяжения, вследствие упругой деформации укорачиваются, а слои, находящиеся в зоне сжатия, удлиняются. Разноименные упругие деформации в зонах растяжения и сжатия вызывают поворот поперечных сечений заготовки на так называемый *угол пружинения*  $\Delta\alpha$ , в результате чего происходит изменение радиуса ее кривизны и, следовательно, угла изгиба. Упругие деформации (пружинение) следует учитывать при расчете размеров инструмента для гибки. Это позволяет устранить трудоемкие операции ручной правки после штамповки. Если известно значение пружинения, характеризуемое изменением радиуса гибки  $\Delta r$  и изменением угла гибки  $\Delta\alpha$ , то размеры инструмента (пуансона и матрицы) определяют по следующим зависимостям:

$$r_{\Pi} = r_d - \Delta r; \quad (7.16)$$

$$\alpha_{\Pi} = \alpha_d \pm \Delta\alpha. \quad (7.17)$$

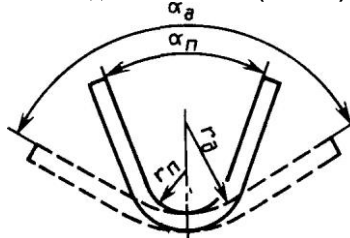


Рис. 7.8. Схема упругой деформации при гибке

Наиболее простое решение задачи определения упругих деформаций при чисто пластическом изгибе широкой полосы из не-упрочняющегося изотропного материала, при достаточно большом радиусе изгиба (когда влиянием радиальных сжимающих напряжений  $\sigma_r$  можно пренебречь ввиду относительно малой их величины) было получено Е. А. Поповым [16]:

$$\Delta\alpha = 3 \frac{\sigma_s}{E} \cdot \left( \frac{r_{\Pi}}{s} + 1 \right) \cdot \alpha_u^\circ, \quad (7.18)$$

где  $\alpha_u$  — угол изгиба, равный  $180^\circ - \alpha$ .

При решении задачи использована гипотеза плоских сечений, «теорема о разгрузке», предложенная А. А. Ильюшиным, и закон Гука. Упругие

деформации внеконтактных участков заготовки при правке (разгибании) не учитывались.

Принятые в анализе допущения снижают точность расчетов по формуле (7.18), поэтому она пригодна лишь для качественной оценки влияния учтенных в анализе факторов на упругие деформации при гибке. Например, цветные металлы (алюминиевые сплавы), имеющие предел текучести, близкий к пределу текучести стали, но существенно меньший (в 2—3 раза) модуль упругости, пружинят больше, чем сталь, причем упругие деформации увеличиваются с увеличением относительного радиуса изгиба  $\bar{r}_n = r_n / s$ , угла изгиба  $\alpha_n = 180^\circ - \alpha$  и  $\sigma_s$  (при  $E = \text{const}$ ).

Решение задачи по определению упругих деформаций при гибке моментом на стадии плоского чисто пластического изгиба с учетом деформационного упрочнения металла было получено Е. Н. Мошным. Предложенные им расчетные формулы имеют вид

$$\bar{r}_n = r_n / s = \frac{\bar{r}_d}{1 + 2 \cdot m \cdot (\sigma_T / E) \cdot \bar{r}_d}; \quad (7.19) \quad \alpha_n = \alpha_d - \Delta\alpha = \frac{\alpha_d}{1 + 2 \cdot m \cdot (\sigma_T / E) \cdot \bar{r}_n}, \quad (7.20)$$

где  $\bar{r}_d = r_d / s$  — относительный радиус изгиба детали;  $m = K_1 + K_0 / (2 \cdot r_d)$  — относительный изгибающий момент;  $K_1 = s / W$  — коэффициент профиля поперечного сечения заготовки;  $K_0 = \Pi / \sigma_T$  — коэффициент упрочнения металла. Коэффициент профиля поперечного сечения равен: прямоугольного и квадратного (а также уголка) — 1,5; круглого — 1,7; швеллера и двутавра — 1,8.

Формулу (7.19) можно преобразовать для гибки заготовок из неупрочняющихся металлов ( $\Pi = 0$ ,  $K_0 = 0$ ), имеющих прямоугольное поперечное сечение ( $K_1 = 1,5$ ):  $\bar{r}_n = \frac{\bar{r}_d}{1 + 3 \cdot (\sigma_T / E) \cdot \bar{r}_d}$  (7.21)

В таком виде формула (7.21) была получена С. К. Абрамовым.

Формулами (7.19)—(7.20) можно пользоваться при гибке моментом на относительно большие радиусы (больше 5—10 толщин заготовки), т. е. когда в конечной ее стадии происходит правка (см. рис. 7.5, з).

Гибка в штампах происходит под действием поперечной силы, приложенной к заготовке между опорами. Однако закономерности, полученные для изгиба моментом, с известным приближением, могут быть использованы при изгибе поперечной силой (что подтверждено проведенными экспериментами), за исключением изгиба на малые радиусы, значение которых соответствует стадии объемного чисто пластического изгиба.

При относительно малых радиусах изгиба после соприкосновения заготовки с боковыми гранями пуансона (см. рис. 7.5, в), по мере опускания пуансона, как уже указывалось, происходит одновременное уменьшение радиуса изгиба центрального участка заготовки и разгибание (правка) ее полков. После снятия нагрузки в результате упругих деформаций центрального участка, соприкасающегося со скругленной кромкой пуансона, угол между полками увеличивается, а в результате спрямления полков — уменьшается. Уменьшение угла между полками объясняется тем, что при разгрузке

растянутые слои полок сокращаются по длине, а сжатые — удлиняются, в результате чего первоначальный угол изгиба уменьшается. Такой вид пружинения получил название «отрицательного».

Теоретическое исследование гибки при относительно малых радиусах скругления рабочей кромки пуансона, когда в конце процесса происходит разгибание полок заготовки, было выполнено И. А. Норицыным и Ю. Г. Калпиным. Они показали, что при гибке угол пружинения определяется разностью углов пружинения центрального участка заготовки ( $\Delta\alpha_y$ ) и ее полок ( $\Delta\alpha_n$ ):

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_y - \Delta\alpha_n.$$

Установлено, что «отрицательное» пружинение возрастает с уменьшением радиуса гибки и увеличением расстояния между опорами заготовки. В результате теоретического анализа была получена формула (7.31) для определения радиуса скругления пуансона, при котором  $\Delta\alpha_n = \Delta\alpha_y$ , и, следовательно  $\Delta\alpha = 0$ :

$$r_n = \frac{L \cdot \sigma_m + \Pi \cdot s \cdot (\pi - \alpha) \cdot \sin \alpha / 2}{3 \cdot \sigma_r \cdot (\pi - \alpha) \cdot \sin \alpha / 2 + 6 \cdot \sigma_r \cdot \cos \alpha / 2} - \frac{s}{2}. \quad (7.22)$$

Экспериментальные исследования определения углов пружинения при одноугловой гибке черных металлов на малые радиусы, выполненные Б. В. Рябининым, показали, что усилие гибки влияет на угол пружинения  $\Delta\alpha$  только до вполне определенного момента, после чего рост усилия на угол пружинения не влияет. Проведенные эксперименты подтвердили также, что в зависимости от относительного радиуса изгиба  $r_d$  пружинение может быть: положительным, когда происходит увеличение угла изогнутой детали после снятия нагрузки, в этом случае  $\alpha_n = \alpha_d - \Delta\alpha$ , и «отрицательным», когда происходит уменьшение угла изогнутой детали после снятия нагрузки, в этом случае,  $\alpha_n = \alpha_d + \Delta\alpha$ . Кроме того, установлено, что пружинение может отсутствовать, когда  $\Delta\alpha = 0$  и, следовательно,  $\alpha_n = \alpha_d$ .

Изменение углов пружинения  $\Delta\alpha$  в зависимости от относительного радиуса изгиба  $\bar{r}_n$  показано на рис. 7.9. Анализ показывает, что с увеличением относительного радиуса  $\bar{r}_n$  и уменьшением угла детали  $\alpha_d$  угол пружинения  $\Delta\alpha$  увеличивается и что для каждого угла детали существует относительный радиус, при котором  $\Delta\alpha = 0$ . Этот относительный радиус является оптимальным, поскольку упругие деформации отсутствуют. Из рисунка видно, что теоретические и экспериментальные данные совпадают удовлетворительно.

Теоретическое и экспериментальное исследование упругих деформаций при одноугловой гибке черных и цветных металлов и их сплавов было выполнено А. Д. Комаровым, результаты этих исследований в виде графика приведены в работе [18].

#### **Упругие деформации при гибке двухугловых деталей.**

При свободной гибке, т. е. когда матрица имеет сквозное провальное отверстие и отсутствует прижимная планка-выталкиватель, заготовка изгибается до тех пор, пока ее концы не упрутся в боковые грани пуансона.

При этом угол изгиба меньше  $\pi/2$  на. Да, а радиус изгиба  $r_d$  может быть больше радиуса скругления рабочей части пуансона  $r_n$  (рис. 7.10, а).

Одновременно происходит изгиб (выпучивание) среднего участка заготовки, находящегося под торцом пуансона. Чем больше зазор между пуансоном и матрицей, тем больше угол пружинения и выпучивание среднего участка заготовки. При разгрузке упруго деформируются все элементы детали: средний ее участок, полки и угловые участки.

При двухугловой гибке с прижимом заготовки к торцу пуансона (рис. 7.10, б) средний ее участок не деформируется, при этом угол пружинения можно рассматривать как сумму углов пружинения участка *I*, прилегающего к скругленной части пуансона, и участка *II*, расположенного в зазоре между пуансоном и матрицей.

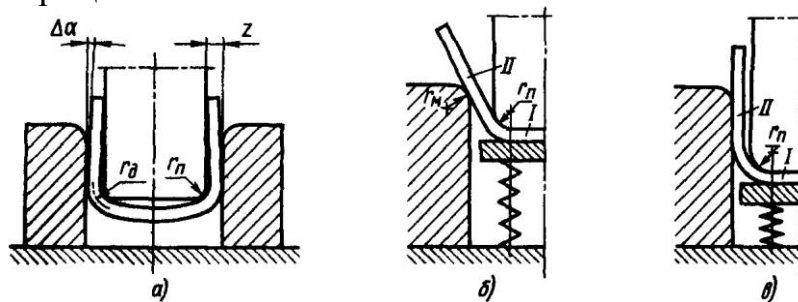


Рис. 7.10. Схема двухугловой гибки:

*а* - без прижима заготовки; *б* — с прижимом заготовки; *в* — с прижимом (конечная стадия)

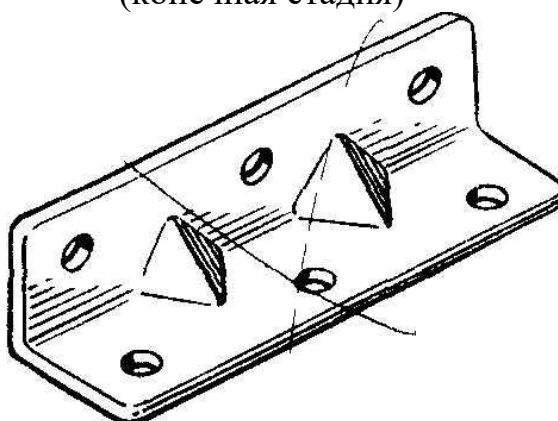


Рис. 7.12. Изогнутая деталь с ребрами жесткости

Деформация участка *I* заканчивается в тот момент, когда центры радиусов скругления пуансона и матрицы  $r_n$  и  $r_m$  находятся на одном уровне, как показано на рис. 7.10, б. При дальнейшем опускании пуансона изгиб происходит только в результате деформации участка *II* при неподвижном участке *I* (рис 7.10, в).

Исходя из этих предпосылок, В. Т. Мещерин и А. Н. Ильин предложили номограмму для определения суммарного угла пружинения П-образных деталей. Порядок использования номограммы показан стрелками на пунктирных линиях.

Анализ номограммы позволяет установить, что угол пружинения уменьшается с уменьшением относительного радиуса изгиба  $r_n$  и уменьшением зазора  $z$ .

Если известно значение угла пружинения  $\Delta\alpha$ , то, как и при одноугловой гибке, необходимо корректировать угловые размеры инструмента. Для этого

при гибке П-образных деталей на торцевой части пуансона делают пологую впадину, угол наклона  $\alpha^*$  сателльной к которой в точке сопряжения со скругленной частью пуансона равен  $\Delta\alpha$ , а на прижимной планке делают выступ, сопряженный с впадиной на пуансоне (см. рис. 7.11).

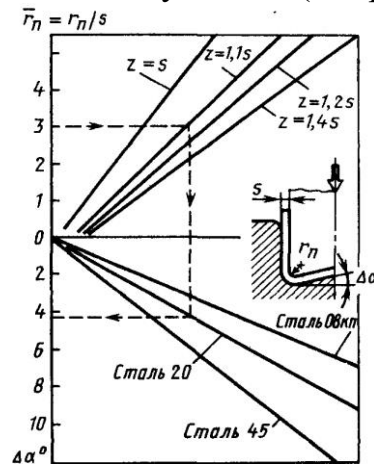


Рис. 7.11. Номограмма для определения суммарного угла пружинения П-образных деталей

Двухугловую гибку рекомендуется выполнять в том случае, когда расстояние между отогнутыми полками меньше суммы их длин:  $l < l_1 + l_2$ , если это условие не соблюдается, применяют последовательно гибку двух углов.

#### Способы уменьшения упругих деформаций при гибке.

Один из способов уменьшения упругих деформаций при гибке одноугловых деталей заключается в конструктивных изменениях гнутых деталей, а именно, в проектировании ребер жесткости, пересекающих линию изгиба (рис. 7.12). Ребра жесткости сдерживают упругие деформации детали при разгрузке, чем способствуют уменьшению угла пружинения.

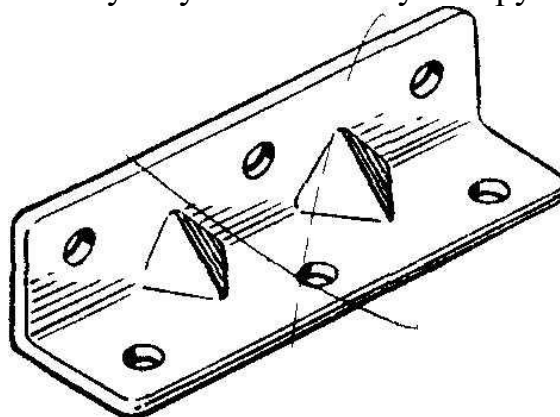


Рис. 7.12. Изогнутая деталь с ребрами жесткости

Другой способ уменьшения упругих деформаций при гибке заключается в применении специальных машин и штампов, при помощи которых заготовка не только изгибается, но и растягивается (или сжимается) продольными силами.

Одним из способов уменьшения упругих деформаций при гибке двухугловых деталей является уменьшение зазора между пуансоном и матрицей. Угол пружинения существенно уменьшается при гибке в штампах с зазором меньше толщины заготовки ( $r = 0,9 \cdot s$ ). Однако при этом возникают

высокие нормальные давления на инструмент, приводящие к налипанию (схватыванию) металла и, следовательно, появлению задиров. Для устранения этого явления следует применять эффективные смазочные материалы с наполнителем и хромировать инструмент.

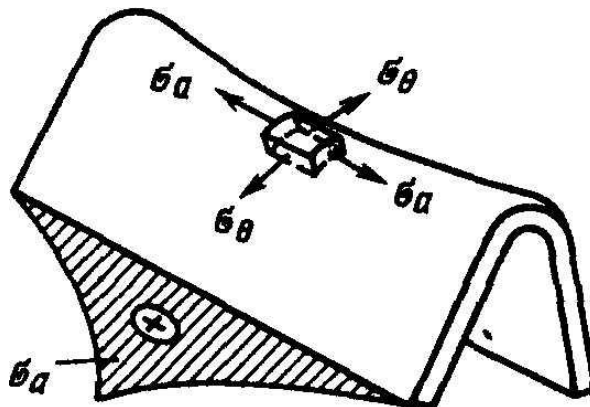
- Двухугловую гибку рекомендуется выполнять в том случае, когда расстояние между отогнутыми полками меньше суммы их длин:  $l < l_1 + l_2$ , если это условие не соблюдается, применяют последовательно гибку двух углов.

### МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЙ РАДИУС ИЗГИБА, ГИБКА ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ

- **Минимально допустимый радиус изгиба** определяют из условия сохранения устойчивости периферийных слоев изгибаемой заготовки. При гибке широкой заготовки потеря устойчивости приводит, в конечном итоге, к появлению трещины в зоне растяжения, при гибке на ребро узкой полосы — к появлению трещины в зоне растяжения или складок в зоне сжатия.
- Минимально допустимый радиус изгиба зависит от характеристик пластичности и анизотропии материала заготовки, ее толщины, качества поверхности, состояния кромок. Кроме того, на значение минимально допустимого радиуса изгиба влияет способ гибки, угол изгиба и ширина заготовки.
- В отечественной и зарубежной научно-технической литературе опубликовано большое число формул для определения **минимально допустимого радиуса изгиба**. В их числе формула, полученная в предположении, что допустимая степень деформации периферийного слоя в зоне растяжения не превышает относительную равномерную деформацию при растяжении, имеющая вид:

$$r_{\min} = r_{\min} / s \geq (1 - 2 \cdot \psi_p) / 2 \cdot \psi_p$$

- На значение минимально допустимого радиуса изгиба оказывает влияние ширина заготовки, чем она больше, тем больше минимально допустимый радиус изгиба. Это объясняется тем, что с увеличением ширины заготовки в зоне растяжения увеличиваются осевые (аксиальные) растягивающие напряжения, в связи с чем снижается пластичность металла, характеризуемая значением деформации в момент разрушения. Аксиальные растягивающие напряжения распределяются по ширине заготовки неравномерно: у края они равны нулю, а в середине достигают максимума. **Этим можно объяснить появление трещин при гибке в середине детали, а не у ее края, а также появление седловины в зоне изгиба детали** (рис. 7.14).

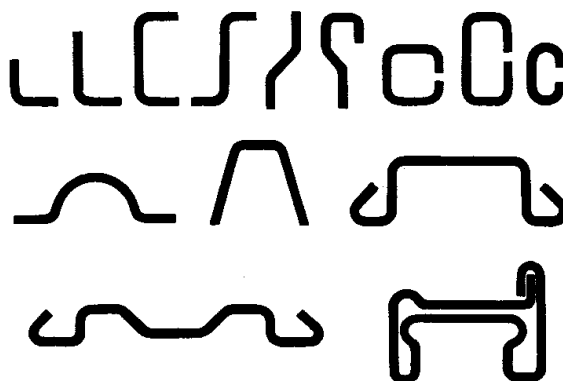


- На значение минимально допустимых радиусов гибки влияет способ установки заготовки в штамп. Если заготовку, полученную вырубкой, устанавливают в штамп заусенцами к пуансону, то при гибке они будут сжиматься и, даже при малых радиусах изгиба, трещины не появятся. При установке заготовки заусенцами к матрице заусенцы растягиваются (раскрываются), появляются трещины.
- Упрочнение металла, происходящее в процессе вырубки заготовки, также влияет на значение минимально допустимых радиусов гибки. В том случае, когда упрочнение является причиной появления трещин при гибке из-за исчерпания ресурса пластичности материала заготовки, ее нормализуют или отжигают, или удаляют упрочненный слой металла зачисткой в штампе.
- Экспериментально установлено, что для наиболее широко применяемых в машиностроении металлов минимально допустимые радиусы изгиба изменяются от 0 до 8 толщин заготовки.

Минимально допустимые радиусы изгиба назначают лишь при крайней конструктивной необходимости, во всех остальных случаях назначают увеличенные на 10—20 % радиусы изгиба по сравнению с минимально допустимым

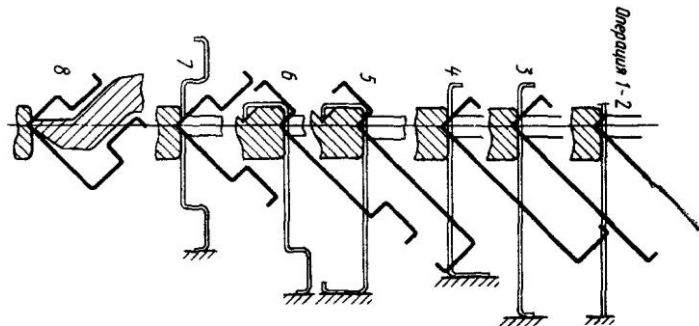
### ***Гибка профилей и труб***

- Применение гнутых профилей из листового и полосового проката взамен профилей, полученных непосредственно горячей прокаткой, позволяет существенно снизить массу изготавливаемых из них деталей и сборочных единиц машин.
- Гнутые профили, форма и размеры которых регламентированы государственными стандартами, могут быть изготовлены гибкой в универсальных штампах, устанавливаемых на листогибочные прессы, на листогибочных машинах с поворотной балкой и на профилегибочных станах. Поперечные сечения гнутых профилей показаны на рис. 7.15.



- Область применения того или иного способа изготовления гнутых профилей зависит от формы, размеров, толщины исходного материала и масштаба производства.

- В мелкосерийном производстве гнутые профили средних и крупных размеров изготавливают последовательной поэлементной гибкой на листогибочных прессах и листогибочных машинах специального назначения (рис. 7.16, операции 1÷8).



- В массовом и крупносерийном производстве (например, производство легковых автомобилей) тонкостенные гнутые профили небольших размеров изготавливают профилированием на профилегибочных станах.
- Сортамент гнутых профилей России состоит из сортовых, листовых гофрированных профилей и профилей специального назначения, изготовленных из рулонных заготовок толщиной 0,5...8 мм и шириной 30...1500 мм из углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением до 650 МПа.

Эффективность применения гнутых профилей взамен профилей, полученных горячей прокаткой, очевидна. Гибка профилированных заготовок и труб с относительно малой толщиной стенки осложняется возможностью потери устойчивости (складкообразования) в зоне сжатия, возможностью изменения угла между полками гнутых уголков и П-образных профилей, а также, при больших радиусах кривизны изгиба, — большой упругой деформацией (пружинением). Поэтому при гибке профилированных заготовок, сортового металлопроката гнутых профилей и труб применяют специальные приемы и оборудование.

### Гибка на машинах с поворотным столом.

Тонкостенные гнутые профили, полученные профилированием, изгибают при помощи специальных машин, работающих по принципу наматывания. Конструктивная схема профилегибочной машины для гибки окантовочных деталей дверей автомобиля показана на рис. 7.17.

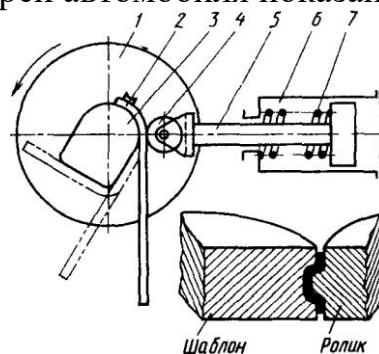


Рис. 7.17

Эта машина имеет поворотный стол 1 и пневматический или гидравлический цилиндр 6, на штоке поршня 5 закреплен нажимной ролик или



нажимная колодка 4. На столе машины установлен шаблон 3, форма и размеры которого соответствуют внутреннему контуру изгибаемой детали. Заготовка одним концом закрепляется на шаблоне зажимом 2, после чего стол машины начинает поворачиваться и наматывать заготовку на шаблон, которая в течение всего процесса гибки прижимается к шаблону роликом или колодкой. После выключения давления в цилиндре колодка (или ролик) отодвигается в исходное положение под действием пружины 7.

### Гибка с растяжением.

Сущность гибки с растяжением заключается в том, что кроме внешнего изгибающего момента к заготовке прикладывают продольные растягивающие силы, которые уменьшают изгибающий момент.

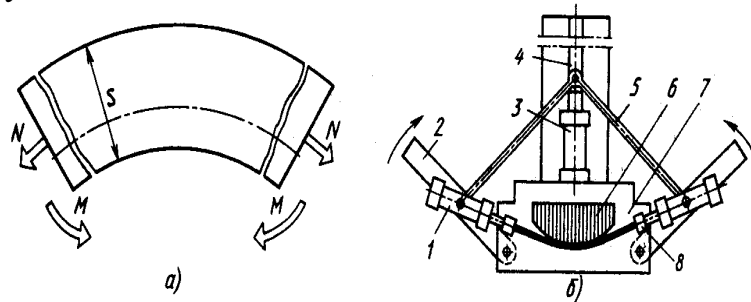


Рис. 7.18 - Машина модели «ПРГ» состоит из гидроцилиндра растяжения 1, поворотных кронштейнов 2, гидроцилиндра поворота кронштейнов 3, направляющей 4, тяг 5, шаблона 6, штока 7, цангового зажима 8.

При этом точность размеров изогнутой детали, зависящая от ее упругих деформаций, повышается пропорционально уменьшению изгибающего момента.

Указанную закономерность можно установить с помощью формулы, функционально связывающей изгибающий момент  $M$  и продольную растягивающую силу  $N$  на стадии линейного чисто пластического изгиба применительно к изгибу заготовки единичной ширины

$$M = \sigma_s \times \left( \frac{s^2}{4} - \frac{N^2}{4 \times \sigma_s^2} \right)$$

Анализ приведенной формулы показывает, что при увеличении продольной силы  $N$  внешний изгибающий момент  $M$  уменьшается

С уменьшением  $M$  уменьшаются и упругие деформации заготовки; при нулевом значении изгибающего момента ( $M = 0$ ) все слои заготовки будут только растянуты. При этом при разгрузке возникают только линейные деформации, угловые деформации практически отсутствуют, т. е. точность размеров изогнутой детали существенно возрастает.

В серийном и мелкосерийном производстве, например в авиационной промышленности, гибку с продольным растяжением применяют при изготовлении крупных и средних пологих, дугообразных деталей из тонкостенных алюминиевых и дюралюминиевых прессованных заготовок (шпангоуты, пояса нервюр, спрингеры и пр.).

Гибку с продольным растяжением (см. рис. 7.18, б) проводят на специализированных машинах модели «ПГР», на которых предварительно растянутую заготовку изгибают и обтягивают вокруг шаблона, имеющего форму и размеры детали.

Возможна и другая последовательность работы машины — вначале гибка, а затем растяжение. Весь цикл работы машины автоматизирован, машина, настроенная на гибку какой-либо детали, работает по заданной программе.

При гибке с продольным растяжением пружинение весьма незначительно, однако оно полностью не исключается, так как деформация наружных и внутренних слоев заготовки различна, поэтому различным будет и упрочнение этих слоев, оказывающее влияние на упругую деформацию.

- В **массовом и крупносерийном производстве** гибка с продольным растяжением относительно небольших деталей может осуществляться в штампах (рис. 7.19, а), особенность которых заключается в том, что они имеют

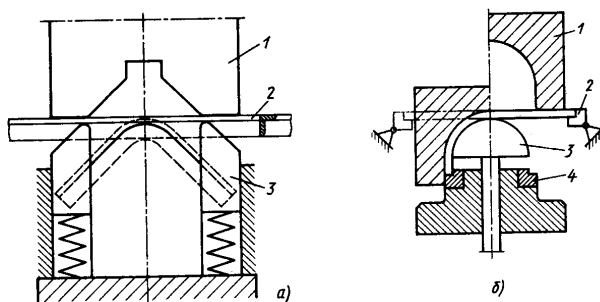


Рис. 7.19 – Схемы: а — для гибки с продольным растяжением; б — для гибки с продольным сжатием

- Кроме того, применяют гибку с *продольным сжатием* заготовки в штампе, схема которого показана на рис. 7.19, б.

Действие сжимающих продольных сил при гибке со сжатием аналогично действию продольных растягивающих сил при гибке с растяжением - они уменьшают момент, необходимый для пластического изгиба заготовки, в связи с чем повышается точность размеров изогнутой детали. При гибке с продольным сжатием нейтральная поверхность напряжений смещается в сторону выпуклой поверхности заготовки и при сжимающем напряжении, равном  $\sigma_s$ , совпадает с ней.

Кроме повышения точности размеров изгибаемых деталей гибка со сжатием позволяет получать двухугловые детали с малым радиусом изгиба. Если напряжения сжатия достигают значений  $\sigma_s$ , то можно получать радиусы изгиба меньше толщины заготовки.

### Гибка труб.

Гибка труб на относительно малые радиусы имеет свои особенности, связанные с потерей устойчивости, приводящей к складкообразованию в зоне сжатия. Критический радиус изгиба, при котором заготовка находится на грани потери устойчивости, зависит от относительной толщины стенки трубы, механических свойств ее материала, радиуса изгиба, допустимого утонения

стенки, допустимой овализации поперечного сечения трубы в зоне изгиба и пр. Приблизительно относительный критический радиус изгиба трубы, при котором отсутствуют складки, можно определить по эмпирической формуле:

$$\bar{r}_{\min} = r_{\min} / D_{\text{н}} \approx 9,25 \cdot \sqrt{0,2 - s / D_{\text{н}}}$$

где  $D_{\text{н}}$  — наружный радиус трубы;  $s$  — толщина стенки трубы.

- Расчет по этой формуле показывает, что при изменении относительной толщины стенки  $s/D_{\text{н}}$  от 0,01 до 0,1 относительный критический радиус изгиба трубы изменяется от 4,1 до 3,0.
- Кроме складкообразования при гибке труб происходит изменение формы ее поперечного сечения, которое можно рассматривать как один из видов потери устойчивости; первоначально круглое поперечное сечение становится овальным.
- Овальность поперечного сечения трубы регламентируется отраслевым стандартом, в соответствии с которым при радиусе изгиба трубы больше двух ее диаметров, отклонения диаметра в зоне изгиба допускаются не более 8—10 %, а при радиусе изгиба менее двух диаметров — не более 20 %.
- При необходимости гибки труб на радиусы меньше критических применяют различные способы гибки, к числу которых относится *гибка наматыванием* с оправкой-дорном, находящейся внутри трубы.
- Гибку наматыванием широко применяют при изготовлении элементов трубопроводов и различных деталей из тонкостенных труб диаметром 10—300 мм. Гибку наматыванием осуществляют при помощи комплекта сменного инструмента, схема установки которого показана на рис. 7.20.

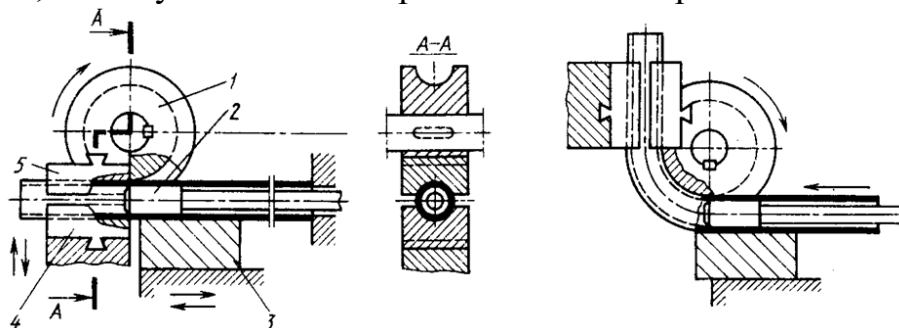


Рис.7.20 – Схема гибки наматыванием

- Заготовка в виде отрезка трубы надевается на оправку-дорн 2 до упора, установленного на требуемый размер, и закрепляется в канавке шаблона 1 при помощи зажимных колодок 4 и 5. После включения машины шаблон 1 поворачивается на требуемый угол гибки и останавливается, при этом заготовка наматывается на шаблон и одновременно снимается с дорно-оправки 2, жестко закрепленной на станине машины. Нажимная колодка 3, увлекаемая силой трения, перемещается вместе с прямолинейным участком трубы, поддерживая его и прижимая к шаблону 1. Профиль рабочей канавки ролика-шаблона 1 выполняется полукруглым с небольшими ребордами, выступающими за полуокружность. Канавка-ручей такой формы препятствует увеличению ширины поперечного сечения изгибаемой трубы

Для предупреждения искажения поперечного сечения трубы служат дорны-оправки: цельные (или жесткие) и составные (или гибкие),

изготавливаемые из износостойких сталей и термически обрабатываемых до твердости  $HRC=52\div 58$ . Для гибки труб из коррозионно-стойкой стали или цветных металлов и их сплавов, на внутренней поверхности которых не допускаются царапины и риски, применяют оправки-дорны из текстолита марки ПТ.

Рабочая часть оправки-дорна скруглена (рис. 7.21, а), она может иметь и ложкообразную форму (рис. 7.21, б), радиус кривизны рабочей части такой оправки равен  $(r_{из}+D/2)$ , где  $r_{из}$  — срединный радиус изгиба трубы). Ложкообразные оправки-дорны имеют большую площадь контакта с трубой и это улучшает условия, при которых

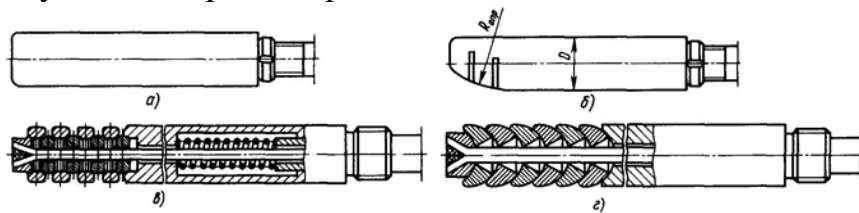


Рис. 7.21. Целые (а, б) и составные (в, г) оправки-дорны

#### *Гибка с локальным нагревом.*

Сущность данного способа гибки заключается в том, что заготовка-труба непрерывно перемещается через индуктор, который токами высокой частоты (ТВЧ) нагревает узкий кольцевой ее участок, являющийся при воздействии на трубу изгибающего момента очагом пластической деформации. Зона нагрева, а следовательно, и зона пластической деформации перемещаются вдоль оси заготовки.

При этом выходящие из зоны деформации уже изогнутые участки трубы образуют криволинейную часть изготавливаемой детали.

При гибке с локальным нагревом складкообразование в зоне сжатия не наступает, так как вследствие малой ширины зоны нагрева происходит осадка нагретого участка под действием сжимающих напряжений. Это позволяет изгибать трубу на малые радиусы.

Кроме того, в связи с тем, что **ненагретые**, холодные участки заготовки, примыкающие к зоне деформации, имеют существенно большую жесткость, они **сдерживают изменение формы поперечного сечения** нагретого участка заготовки.

Гибку с локальным нагревом применяют при изготовлении различных криволинейных элементов трубопроводов.

Для гибки труб с локальным нагревом применяются специальные трубогибочные машины, например, мод. ТГУ-300, схема которой приведена на рисунке 7.22.

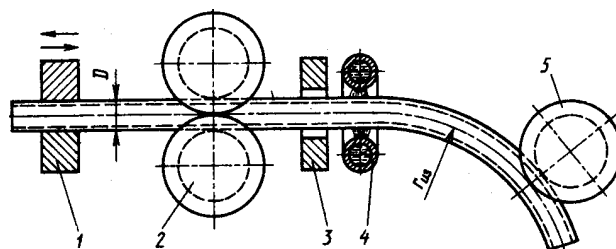


Рис., 7.22. Схема установки для гибки труб с локальным нагревом ТВЧ

Заготовка подается кареткой 1 через направляющие ролики 2 в индуктор 3, который нагревает ТВЧ узкий кольцевой участок трубы до температуры 800—900 °С. По выходе из индуктора заготовка охлаждается струей воды, подаваемой душирующей установкой (шпреером) 4. Гибка трубы осуществляется роликом 5.

- **Положение ролика** в зависимости от величины требуемого радиуса изгиба **устанавливается непосредственно оператором, специальной следящей системой или копирным устройством**, которые применяют для изгиба тонкостенных труб на малые радиусы.
- При ширине зоны нагрева  $h=3\div 4$  мм и относительной толщине стенки трубы  $s/D = 0,03\div 0,06$  изгиб без складок возможен на радиус  $r=1,5\cdot D$ .
- К числу преимуществ гибки с локальным нагревом можно отнести: возможность гибки труб на малые радиусы без применения поддерживающих оправок, отсутствие необходимости изготовления сменного инструмента (шаблонов, оправок и пр.), возможность автоматизации процесса гибки, малую овальность поперечного сечения трубы и др.
- **Недостаток** рассмотренного способа гибки — **низкая производительность** (скорость передвижения трубы относительно индуктора составляет 0,2—4,0 мм/с), сравнительно высокая стоимость и большие размеры электрогенераторной установки, для которой необходима большая производственная площадь.
  - Кроме рассмотренных способов гибки труб в массовом и крупносерийном производстве применяют гибку труб в штампах, установленных на кривошипные или гибочно-штамповочные горизонтальные прессы.
  - Область применения штампов — гибка труб с относительной толщиной стенки  $s/D > 0,06$  на радиус не менее 2—3 диаметров заготовки (при гибке без наполнителей).
  - Конструктивные особенности таких штампов в том, что матрица и пуансон имеют полукруглую канавку, соответствующую поперечному сечению трубы. Кроме того, для уменьшения сил трения на контактной поверхности матрицы и заготовки и устранения возможности появления задиров и рисок на поверхности заготовки штампы для гибки труб проектируют с поворотными колодками или с опорами для заготовки в виде роликов.
  - Мы рассмотрели лишь основные способы гибки, применяемые в машиностроении. Другие способы холодной гибки, а именно: гибка на универсальных автоматах с приводом от центральной шестерни, гибка с одновременным волочением, гибка с проталкиванием через фильеру с криволинейной осью, гибка на конической рогообразной оправке (гибка с раздачей) и др. изложены в специальной технической литературе .