

Лекция №16

Тема **ВЫТЯЖКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ**

План лекции: Область применения, механизм деформирования, напряженно-деформированное состояние, размеры заготовки, усилие, степень деформации, предельное состояние

Вытяжка с утонением стенки применяется для получения высоких пустотелых деталей или полуфабрикатов, у которых толщина дна больше толщины стенки. Вытяжка с утонением осуществляется протягиванием заготовки в виде колпачка (полученного вытяжкой или каким-либо другим способом) через матрицу, при этом зазор z между пуансоном и матрицей должен быть меньше толщины стенки заготовки $z = (D_m - D_a)/2 < s$. Данным способом вытяжки получают детали с полем допуска $h9—h12$. Допуск на толщину стенки составляет 15—25 % номинальной толщины стенки, допуск на высоту полуфабриката — до 15 % его высоты.

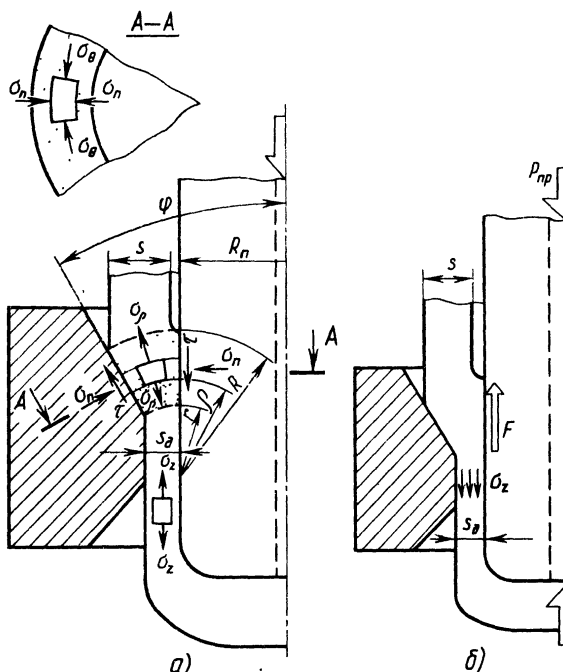


Рис. 8.46. Очаг пластической деформации, его напряженное состояние (а) и схема действия внешних сил (б) при вытяжке с утонением стенки

В процессе вытяжки с утонением происходит уменьшение первоначальной толщины стенки заготовки при относительно небольшом уменьшении ее диаметра. За одну операцию можно получить полуфабрикат значительно большей высоты, чем при вытяжке без утонения.

При вытяжке с утонением очаг пластической деформации находится в зоне уменьшения толщины заготовки. Он мал по сравнению с другими размерами полуфабриката и ограничен с обеих сторон упругодеформированными участками (рис. 8.46, а).

Вытяжка с утонением происходит в условиях объемного деформированного состояния. Однако, если учесть, что относительное уменьшение диаметра мало по сравнению с деформациями в осевом

(увеличение длины) и радиальном (уменьшение толщины стенки) направлениях, то без большой погрешности можно считать, что вытяжка с утонением происходит в условиях плоского осесимметричного деформированного состояния.

При деформировании элементарного объема, выделенного в очаге деформации, возникают нормальные растягивающие σ_r , нормальные сжимающие σ_θ , окружные сжимающие σ_v и касательные τ напряжения (см. рис. 8.46, а). Таким образом, при вытяжке с утонением напряженное состояние — объемное.

При вытяжке заготовка скользит относительно пуансона (вверх), в результате чего возникают контактные силы трения, действующие в направлении движения пуансона. Одновременно заготовка скользит относительно матрицы в направлении движения пуансона, при этом возникают контактные силы трения, направленные в сторону, противоположную направлению движения пуансона.

Силы трения на поверхности контакта заготовки и пуансона разгружают опасное сечение, уменьшая растягивающие напряжения σ_r . Силы трения на поверхности контакта заготовки и матрицы способствуют увеличению растягивающих напряжений σ_r .

Особенность напряженного состояния при вытяжке с утонением заключается в том, что касательные напряжения τ на поверхности контакта заготовки матрицы и пуансона направлены в разные стороны и сжимающие напряжения σ_n по абсолютному значению велики по сравнению с напряжениями τ , σ_r и σ_v . Рассмотренная особенность напряженного состояния очага пластической деформации — основная причина того, что допускаемая степень деформации при вытяжке с утонением выше, чем при вытяжке без утонения стенки.

Выясним механизм деформирования при вытяжке с утонением с учетом влияния основных факторов и стремления получить максимально простые зависимости с помощью приближенного метода работ. Рассмотрим процесс на этапе установившегося деформирования, а составляющие работы деформирования найдем как средние для всего деформируемого объема. Основные составляющие работ при вытяжке с утонением внутренних сил, создаваемых напряжениями σ_r и σ_θ , а так же касательными напряжениями, действующими в очаге деформации в радиальном и тангенциальном напряжении.

1) Внешние силы — это пуансон давит на доньшко, создает в стенках протянутой части заготовки растягивающее напряжение σ_z .

Т.к. $dA_{\sigma_z} = \sigma_z \cdot F \cdot dh$ — дает элементарную работу тянущей силы.

2) работа сил трения из наружной поверхности.

3) работа сил трения на внутренней поверхности заготовки.

С учетом сказанного условия равенства работ внешних и внутренних сил для рассматриваемого процесса

$$dA_{\sigma_z} - dA_{mp.m.} - dA_{mp.n.} = dA_{\sigma_r} + dA_{\sigma_\theta} + dA_\tau + dA_{c\partial\theta.R} + dA_{c\partial\theta.r} \quad (1)$$

Найдем величины отдельных составляющих, входящих в равенство (1).

Следует отметить, что значения $\mu < 0,1$, т.к. хорошая смазка. Поэтому напряжение τ в рад. и танген. направлениях сравнительно малы.

Нетрудно заметить, что

$dA_{\sigma_\rho} + dA_{\sigma_\varphi} + dA_\tau = dA_D$ – представляет собой работу формоизменения, которая определяется

$$A_D = \iiint_V (\sigma_i \varepsilon_i dV) \quad (2)$$

где V – объем очага деформации.

Если принять, что упрочнение отсутствует, то интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \sigma_s = \text{const.}$$

Учитывая, что сдвиговые деформации малы, можно принять из схемы плоской деформации $\rightarrow \varepsilon_\rho = -\varepsilon_\varphi$ – является главными линейными деформациями

$$\text{то } \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_\varphi = 1,15 \varepsilon_\varphi$$

Определяем ε_φ и dV .

Если смещение точек в радиальном направлении при $\rho = r$ обозначить через dh_r , то радиальное смещение точек лежащих на произвольном радиусе ρ будет равно

$$dh_\rho = \frac{r}{\rho} dh_r.$$

Тогда деформация ε_φ может быть найдена по величине смещения dh_ρ

$$\varepsilon_\varphi = \frac{dh_\rho}{\rho} = \frac{r}{\rho} = dhr$$

Очевидно, что элементарный объем любого элемента равен

$$dV = \rho \alpha \cdot d\rho.$$

После подстановки найденных величин в (2) и вынесения постоянных величин r, dh, α, σ за знак интеграла

$$dA_D = 1,15 \sigma_s \alpha \cdot r dhr \int_r^R \frac{d\rho}{\rho} = 1,15 \sigma_s \alpha \cdot r dhr \ln \frac{R}{r}.$$

Для упрощения примем, что решение идет по гипотезе max касат. напряжения. Тогда 1,15 не нужен

$$dA_D = \sigma_s \alpha \cdot r dhr \ln \frac{R}{r}.$$

Для отыскания работ сил трения необходимо оценить величины смещений в рад-ом направлении. На контактных поверхностях матрицы и пуансона смещение dh_ρ точек заготовки относительно матрицы уменьшается от

$$dh_r (npu. \rho = r) \text{ до } dh_R (npu. \rho = R).$$

Смещение точек заготовки относительно пуансона определяется

$$dh_{\rho n} = dh_\rho - dh_r = -\left(1 - \frac{r}{\rho}\right) dh_r$$

разностью смещений точек заготовки и точек пуансона, знак (-) указывает, что напр. смещений точек заготовки относительно пуансона обратно направлению смещения точек заготовки относительно пов-ти матрицы.

Работу сил трения определим, как произведение величины средней для контактной поверхности сил трения на величину среднего перемещения. После совм. решения уравнения равны и пластичности

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s \ln \frac{R}{\rho} ; \sigma_{\varrho} = -\sigma_s (1 - L \frac{R}{\rho})$$

среднее напряжение

$$\sigma_{\theta_{cp}} = -\sigma_s (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r})$$

среднее смещение на наружной поверхности

$$dh_{cp.m} = \frac{dh_r + dh_R}{2} = (1 + \frac{r}{R}) \frac{dh_r}{2}$$

Используя указанные соотношения и принимая во внимание, что длина конкретного участка = $R-r$ и учитывая, что сила трения равна произведению нормальной силы на коэффициент трения имеем:

$$dAmA_m = \mu \frac{\sigma_s}{2} (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}) (R-r) (1 + \frac{r}{R}) dh_r$$

Аналогично найдем работу по пуансону, учитывая, что среднее перемещение точек заготовки по пуансону равно среднему арифметическому

$$dhch_n = \frac{dh_m + dh_{Rn}}{2} = \frac{0 - (1 - \frac{r}{R}) dh_r}{2} = -(1 - \frac{r}{R}) \frac{dh_r}{2}.$$

С учетом сказанного, получаем:

$$dAm.n = -\mu \frac{\sigma_s}{2} (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}) (R-r) (1 - \frac{r}{R}) dh_r$$

Теперь определяем величину работы сдвига на границах очага деформации

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}.$$

Если считать, что смещение точек в очаге деформации происходит в радиальных напряжениях то изменение их на угол Q при переходе из упругой области в пластическую, а наоборот, то смещение определяется из геометрических соображений

$$dh_{\tau_R} = dh_R \operatorname{tg} \theta \quad \text{и} \quad dh_{\tau_r} = dh_r \operatorname{tg} \theta$$

$$\theta_{cp} = \frac{\alpha}{2}.$$

В этих условиях работа сдвига по границам очага деф-ции: произведения суммарного усилия сдвига на среднюю величину тангенц. смещения

$$dA_{сдв.R} = \frac{\sigma_s}{2} R \alpha . dh_R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\sigma_s}{2} R \alpha \frac{r}{R} dh_r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\sigma_s}{2} r \alpha . dh_r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

$$dA_{сдв.r} = \frac{\sigma_s}{2} r \alpha . dh_r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

После подстановки в (1)

$$dA_{\sigma_z} = \sigma_s \alpha \cdot r dh_r \ln \frac{R}{r} + \frac{\mu \sigma_s}{2} (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}) (R - r) (1 + \frac{r}{R}) dh_r - \frac{\mu \sigma_s}{2} (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}) (R - r) (1 - \frac{r}{R}) dh_r + \\ + \sigma_s r \alpha \cdot dh_r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sigma_s r \alpha \cdot dh_r [\ln \frac{R}{r} + \frac{\mu}{R \alpha} (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}) (R - r) + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}]$$

Если принять, что $dA_{\sigma_z} = \sigma_z S_1 dh$ и установить связь между dh и dh_r из условия постоянного объема $S_1 dh = r \alpha \cdot dh_r$; $dA_{\sigma_z} = \sigma_z r \alpha \cdot dh_r$.

После подстановки dA_{σ_z} в уравнение () и сокращая на $r \alpha \cdot dh_r$, получаем

$$\sigma_z = \sigma_s [\ln \frac{R}{r} + \mu (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}) \frac{R - r}{R \alpha} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}]$$

Для упрощения ф-лы () заменим R и r на S_0 и S_1 .

$$\text{Т.к. } R - r = \frac{S_0 - S_1}{\sin \alpha}; R \alpha = \frac{S_0}{\cos \frac{\alpha}{2}}; r \alpha \approx \frac{S_1}{\cos \frac{\alpha}{2}}.$$

$$\sigma_z = \sigma_s [\ln \frac{S_0}{S_1} + \frac{\mu}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{S_0}{S_1}) (1 - \frac{S_1}{S_0}) + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}]$$

Оптимальное значение α_{opt} найдем, если $\frac{d\sigma_z}{d\alpha} = 0$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_{opt}}{2} = \sqrt{\frac{\mu}{2} (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{S_0}{S_1}) (1 - \frac{S_1}{S_0})}$$

Усилие деформации

$$P = \pi \cdot d_n S_1 \sigma_z + \mu_2 \pi \cdot d_n \sigma_{\theta cp} \frac{S_0 - S_1}{\sin \alpha}$$

После подстановки в ф-лу значений σ_z и $\sigma_{\theta cp}$

$$\sigma_{\theta cp} = \sigma_s (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{S_0}{S_1})$$

и проведения преобразования при $\mu_1 = \mu_2$

$$\sin \alpha = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \approx 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

$$P = \pi \cdot d_n S_1 \sigma_s [\ln \frac{S_0}{S_1} + \frac{\mu}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} (1 - \frac{1}{2} \ln \frac{S_0}{S_1}) (\frac{S_0^2 - S_1^2}{S_1 S_0}) + \operatorname{tg} \eta_2]$$

Напряжения, возникающие в стенках протянутой части заготовки в период установившегося деформирования, определяют, используя один из методов решения задачи о пластическом формоизменении, а именно — метод работ, метод линий скольжения, метод верхней оценки, метод конечных элементов (МКЭ) и др.

Приведем формулу для определения наибольшего растягивающего напряжения в осевом направлении при вытяжке с утонением стенки, полученную методом работ [23]:

$$\sigma_z = \sigma_s' \cdot \left\{ \left[1 + [\mu_1 + (\mu_1 + \mu_2) \cdot \ln(R/\sqrt{R \cdot r})] / \varphi \right] \cdot \ln(R/r) + \varphi / 2 \right\}, \quad (8.44)$$

где φ - угол наклона образующей матрицы (угол ската матрицы); μ_1 -

коэффициент контактного трения по матрице; μ_2 - коэффициент контактного трения по пуансону; R и r - радиусы дуг, ограничивающих очаг пластической деформации (рис. 8.47).

Анализ формулы (8.44) показывает, что увеличение коэффициента трения μ_2 по пуансону приводит к уменьшению σ_z . Однако это еще не значит, что коэффициент трения можно увеличивать беспредельно, так как с его увеличением увеличивается выделение теплоты на контактной поверхности, что может привести к налипанию (схватыванию) металла и, следовательно, появлению задиров.

Расчеты по формуле (8.44) дают наименьшую погрешность по сравнению с экспериментальными данными при степени деформации $\psi \geq 0,4$ при всех углах ската матрицы φ . При малых степенях деформации ($\psi < 0,3$) и больших углах наклона матрицы ($\varphi \geq 18 \div 20^\circ$) расхождения значительно больше [6].

Если условия трения по пуансону и матрице одинаковы, то $\mu_1 = \mu_2 = \mu$. Для данного случая вытяжки при замене отношения радиусов отношением толщин ($R/r = s/s_d$) формула (8.44) примет вид

$$\sigma_z = \sigma'_s \cdot [1 + (\mu/\varphi) \cdot \ln(s/s_d) + \varphi/2] \quad (8.44a)$$

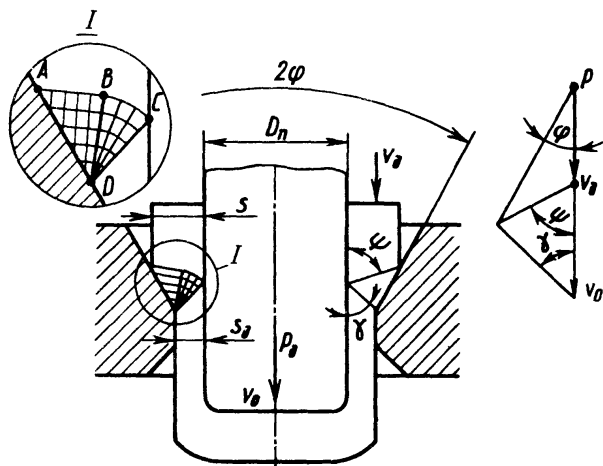


Рис. 8.47. Сетка линий скольжения при $\tau_k = 0$; разрывное кинематически допустимое поле и годограф скоростей при вытяжке с утонением

Исследование данной формулы позволяет найти оптимальное значение угла $\varphi_{\text{опт}}$ при котором значение σ_p наименьшее:

$$\varphi_{\text{опт}}^\circ = \sqrt{2 \cdot \mu \cdot \ln(s/s_d)} \cdot 180^\circ / \pi. \quad (8.44б)$$

При отношении $s/s_d = 2$ и $\mu = 0,05$ $\varphi_{\text{опт}} = 15^\circ$.

Оптимальный угол наклона матрицы $\varphi_{\text{опт}}$ увеличивается с увеличением коэффициента трения и степени деформации.

Размеры заготовки. При вытяжке с утонением толщину заготовки принимают равной толщине дна, вытягиваемого полуфабриката ($s = s_{\text{дн}}$). Диаметр заготовки D_0 определяют из условия равенства объема заготовки и детали с учетом объема металла на припуск под обрезку. Это условие может быть представлено в виде $0,785 \cdot s \cdot D_0^2 = \xi \cdot V_{\text{д}}$, откуда

$$D_0 = 1,13 \cdot \sqrt{\xi \cdot V_{\text{д}} / s}, \quad (8.45)$$

где ξ — коэффициент, учитывающий объем металла, идущего на обрезку

неровного края полуфабриката; V_d — объем детали.

Значение ξ зависит от относительной высоты вытягиваемого полуфабриката h/d_n и изменяется от 1,08 до 1,15, чем больше относительная высота, тем больше ξ . В том случае, когда неизвестен объем детали, диаметр заготовки может быть приближенно определен в функции ее размеров (высоты h , наружного диаметра d_n , толщины стенки s_d):

$$D_0 \approx \sqrt{d_n^2 + \frac{4 \cdot (d_n + s_d)}{s} \cdot (h + \Delta h - s) \cdot s_d}. \quad (8.46)$$

При выводе формулы (8.46) не учтено скругление угловых участков дна полуфабриката, поэтому припуск на обрезку неровного края Δh принимают минимальный.

Деформирующее усилие. При вытяжке с утонением стенки деформирующее усилие состоит из двух составляющих: усилия, вызывающего в деформированных стенках полуфабриката растягивающие напряжения σ_z (тянущего усилия), приложенного к донной его части, и равнодействующей сил контактного трения по пуансону, направленной в сторону, противоположную движению пуансона (рис. 8.46, б). Учитывая это, суммарное усилие вытяжки будет равно [23]

$$P_b = \pi \cdot d \cdot s_d \cdot \sigma_z + \pi \cdot d \cdot \mu \cdot \sigma_s \cdot \int_r^R [1 - \ln(R/\rho)] d\rho.$$

Принимая во внимание, что $r = s_d / \sin \varphi$, после интегрирования получаем

$$P_b = \pi \cdot d \cdot s_d \cdot \sigma_s' \cdot [1 + (\mu/\varphi) \cdot \ln(R/r) + \varphi/2 + (\mu \cdot \sin \varphi) \cdot \ln(R/r)].$$

Приняв $\mu/\sin \varphi \approx \mu/\varphi$ и заменив отношение радиусов R/r отношением толщин стенки s/s_d при условии, что коэффициенты трения на наружной и внутренней поверхности заготовки в очаге деформации одинаковы, с учетом (8.44а) получим

$$P_b = \pi \cdot d \cdot s_d \cdot \sigma_s' \cdot [(1 + 2 \cdot \mu/\varphi) \cdot \ln(s/s_d) + \varphi/2]. \quad (8.47)$$

Если использовать степенную аппроксимацию кривой упрочнения (по С. И. Губкину), то при средней, по очагу деформации, степени деформации $\psi_{cp} = 0,5 \cdot (s - s_d)/s$ напряжение текучести σ_s' в формуле (8.47) будет равно

$$\sigma_s = \sigma_b / (1 - \varphi_p) \cdot [(s - s_d) / 2 \cdot s \cdot \psi_p]^{\psi_p / (1 - \psi_p)}.$$

Р. Хиллом, а затем Л. А. Шофманом было показано, что, используя сетку линий скольжения ($ABCD$), построенную применительно к вытяжке с утонением стенки (см. рис. 8.47, а), можно определить деформирующее усилие как произведение удельного усилия на площадь поперечного сечения деформированного (протянутого) участка полуфабриката:

$$P_b = \frac{4 \cdot \sigma_s'}{\sqrt{3}} \cdot (1 + 2 \cdot \mu/\varphi) \cdot \frac{(1 + \varphi) \cdot \sin \varphi}{1 + 2 \cdot \sin \varphi} \cdot \pi \cdot [s_d \cdot (2 \cdot R_n + s_d)].$$

Оптимальный угол наклона матрицы φ_{opt} при котором усилие деформирования минимально, можно определить методом верхней оценки, используя для этого кинематически допустимое разрывное поле и годограф скоростей. В результате минимизации установлено, что $\varphi_{opt} = 15 \div 25^\circ$.

Экспериментальные исследования вытяжки с утонением стенки показали,

что наиболее существенное влияние на деформирующее усилие оказывает угол наклона матрицы только при малых степенях деформации (до 30 %). Например, при степени деформации 20 % увеличение угла наклона матрицы с 6 до 30° вызывает увеличение усилия вытяжки стальных полуфабрикатов в 2 раза, латунных в 2,4 раза. При более высоких степенях деформации усилие вытяжки от угла наклона матрицы практически не зависит. Также установлено, что с увеличением относительной толщины стенки полуфабриката усилие вытяжки уменьшается [6]. Степень деформации при вытяжке с утонением характеризуется относительным уменьшением площади поперечного сечения вытягиваемой детали (полуфабриката). Если обозначить F_{N-1} и F_N — соответственно площади поперечного сечения полуфабрикатов до и после вытяжки; d_{N-1} и d_N — номинальные наружные диаметры полуфабрикатов до и после вытяжки и d_b — номинальный внутренний диаметр вытягиваемой детали, то степень деформации будет равна

$$\psi = (F_{N-1} - F_N) / F_{N-1} = (d_{N-1}^2 - d_N^2) / (d_{N-1}^2 - d_b^2). \quad (8.48)$$

Зная ψ , d_{N-1} и d_b , из формулы (8.48) можно определить наружный диаметр полуфабриката, получаемого вытяжкой с утонением при принятой степени деформации:

$$d_N = \sqrt{d_{N-1}^2 + \psi \cdot (d_{N-1}^2 - d_b^2)}. \quad (8.48a)$$

Изменение диаметра полуфабриката при вытяжке с утонением мало по сравнению с изменением толщины стенки, поэтому принимают $d_{N-1} \approx d_N$. Учитывая это, степень деформации может быть принята равной $\psi = (s_{N-1} - s_N) / s_{N-1} = 1 - s_N / s_{N-1}$. Отношение s_{N-1} / s_N называют коэффициентом утонения и обозначают его K_y .

Существует критическая (предельная) степень деформации $\psi_{кр}$, а также критический коэффициент утонения $K_{ук}$ при котором напряжения в опасном сечении близки к разрушающим. Критическая степень деформации $\psi_{кр}$ теоретически определена И. П. Ренне из условия $\sigma_z \leq \sigma_b$. Предложенная им формула для определения $\psi_{кр}$ может быть представлена в следующем виде:

$$\psi_{кр} = 1 - 1 / \exp[\sqrt{3} \cdot (1 + n) / 2 \cdot C_a], \quad (8.49)$$

Где

$$C_a = 1 + (1 - \psi_{кр}) \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \varphi.$$

Формула (8.49) является трансцендентным уравнением с одним неизвестным $\psi_{кр}$, которое решается методом итерации.

Сопоставление результатов расчета по формуле (8.49) с экспериментальными данными применительно к вытяжке латунных и стальных заготовок показало, что расчетные значения $\psi_{кр}$ на 10—15 % больше фактических. Это расхождение объясняется тем, что разрушение стенки происходит в результате образования трещин, которые совпадают с границами пластической области, являющимися линиями разрыва скоростей течения. Значительные локальные деформации сдвига, возрастающие с увеличением угла наклона матрицы при наличии растягивающих напряжений, делают металл весьма чувствительным к дефектам структуры, которые в данных условиях приводят к разрушению.

Для определения предельно допустимой степени деформации при вытяжке

с утонением можно использовать формулу (8.49), введя множитель, равный 0,85—0,9. Тогда, приближенно, предельно допустимая степень деформации будет равна [6]

$$\psi = (0,85 - 0,90) \cdot \psi_{кр}.$$

Допустимая степень деформации при вытяжке с утонением зависит от материала заготовки, числа последовательно установленных матриц и угла наклона матрицы ср. При $\psi \leq 18^\circ$ допустимая степень деформации равна: при вытяжке мягкой стали ($C \leq 0,12\%$) через одну матрицу 0,45—0,55; через две матрицы 0,60—0,70; через три матрицы 0,75—0,80; при вытяжке латуни ($Zn=25 \div 32\%$) соответственно: 0,55—0,60; 0,60—0,70 и 0,75—0,85 [11].

Первая операция вытяжки (свертка) в большинстве случаев выполняется без утонения. Срединный диаметр свертки $d_{ср}$ определяется как при вытяжке без утонения стенки: $d_{ср} = D_0 / K_{в1}$. Желательно, чтобы внутренний диаметр свертки был бы равен внутреннему диаметру детали, это обеспечивает минимальную разностенность, минимальную косину кромки и кривизну продольной оси полуфабриката. Зазор на вхождение пуансона в заготовку принимают равным 0,005 диаметра пуансона.

Последующие операции вытяжки ведутся с утонением при незначительном уменьшении наружного диаметра полуфабриката. В зависимости от материала заготовки и его состояния (наклепанный, отожженный) по нормативным данным выбирают допустимую степень деформации или коэффициенты утонения K_{y1}/K_{y2} , ..., после чего определяют диаметры и толщины стенок полуфабрикатов по операциям вытяжки. Общее число операций N , необходимое для получения детали с требуемыми размерами, можно определить, используя зависимость [11]:

$$N = (\ln F_N - \ln F_0) / \ln (1 - \psi_{ср}), \quad (8.50)$$

где F_0 и F_N - соответственно площади поперечного сечения заготовки (свертки) и детали; $\psi_{ср} = \psi_d$ - допустимая степень деформации. Среднюю высоту полуфабрикатов определяют из условия равенства объема плоской заготовки диаметром D_0 и соответствующего полуфабриката:

где d_n и s_N — соответственно наружный диаметр и толщина стенки полуфабриката. Формула получена для полуфабриката, не имеющего плавного сопряжения дна и стенок в угловых участках, поэтому расчетная высота полуфабриката незначительно превышает среднюю фактическую.

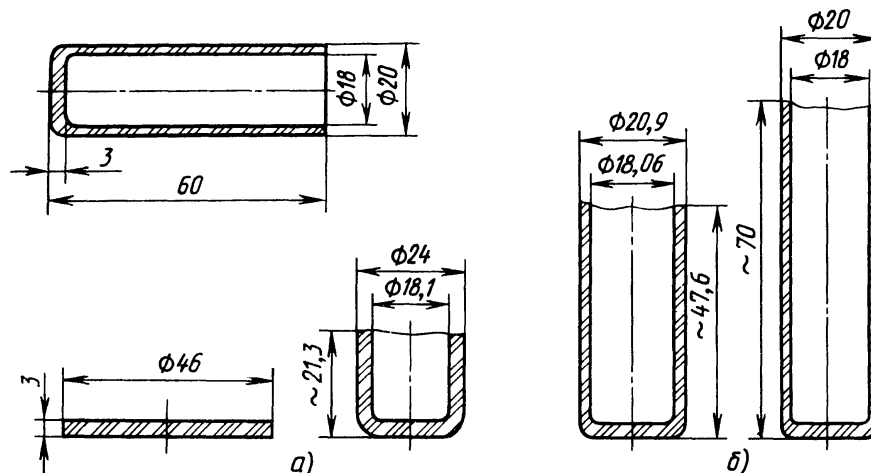


Рис. 8.48. Чертеж детали (а) и переходы ее штамповки (б)

В процессе вытяжки с утонением происходит интенсивное упрочнение материала заготовки (наклеп), при этом существенно повышается ее твердость. Для восстановления пластических свойств заготовки, по мере необходимости, после вытяжки проводят рекристаллизационный отжиг (желательно в нейтральной атмосфере) с последующим травлением, промывкой и сушкой.

Если вытяжка с утонением сопровождается существенным уменьшением диаметра полуфабриката, ее называют *комбинированной*. Исследование процесса комбинированной вытяжки показало, что одновременное уменьшение толщины стенки и диаметра полуфабриката (в определенных пределах) не только не снижает предельно допустимую степень деформации, но даже несколько увеличивает ее [5].

Применяя комбинированную вытяжку, за одну (первую) операцию получают деталь высотой до 1,5 ее диаметра, в то время как при вытяжке без утонения деталь такой высоты можно получить только за две, три операции (или перехода). Это объясняется тем, что при комбинированной вытяжке, как и при вытяжке с утонением, полезные (активные) силы трения существенно разгружают опасное сечение полуфабриката.

Комбинированная вытяжка позволяет не только сократить число операций, но и улучшить качество поверхности полуфабриката, повысить точность его диаметральных размеров. Она применяется для получения деталей, у которых толщина стенки меньше толщины дна.

Степень деформации при комбинированной вытяжке определяется соотношением

$$\psi = (F_{N-1} - F_N) / F_{N-1} = 1 - F_N / F_{N-1} = 1 - d_N \cdot s_N / (d_{N-1} \cdot s_{N-1}).$$

Имея в виду, что $K_B = d_{N-1} \cdot d_N$ и $K_{By} = s_{N-1} \cdot s_N$, получим

$$\psi = 1 - 1 / K_B \cdot K_{By} = 1 - 1 / K_{BK},$$

где $K_{BK} = K_B \cdot K_{By}$ — коэффициент формоизменения при комбинированной вытяжке, он равен произведению коэффициентов вытяжки K_B и вытяжки с утонением K_{By} . Зная значения K_B и K_{By} можно определить толщину стенки и диаметры полуфабрикатов по операциям комбинированной вытяжки:

$$d_{1(ср)} = D_0 / K_{B1}; \quad s_1 = s / K_{By1}; \quad d_{2(ср)} = d_{1(ср)} / K_{B2}; \quad s_2 = s_1 / K_{By2};$$

$$d_{N(ср)} = d_{(N-1)ср} / K_{BN}; \quad s_N = s_{N-1} / K_{ByN}.$$

В том случае, когда требуемый по чертежу детали диаметр $d_{ср}$ получен вытяжкой, а толщина стенки полуфабриката больше требуемой ($d_{ср} = d$ и $s_N > s$), вытяжка продолжается только с утонением стенки; при $s_N = s$, но при $d_{N(ср)} > d$ вытяжка продолжается без утонения стенки.

Высоту полуфабрикатов по операциям вытяжки определяют из условия равенства объемов заготовки и соответствующего полуфабриката и подсчитывают по формуле (8.49).

Основополагающие теоретические и экспериментальные исследования вытяжки с утонением и комбинированной вытяжки выполнены коллективами ученых МВТУ им. Баумана и Тульского политехнического института.