

Лекции №12 - 15

ТЕМА: ВЫТЯЖКА

План лекции: 1 Способы вытяжки,
2. Анализ вытяжки без прижима,

Введение вытяжки

Вытяжкой осуществляется получение полых пространственных деталей из плоской листовой заготовки.

При вытяжке пуансон оказывает давление на среднюю часть заготовки и втягивает ее в матрицу; при этом периметр заготовки уменьшается. В заготовке под действием пуансона возникают меридиональные растягивающие напряжения, обеспечивающие втягивание периферийной части заготовки в матрицу. Вытяжкой получают детали различных конфигураций в плане и профилей в осевом сечении. Различают первый переход вытяжки, превращающий плоскую заготовку в пространственную деталь или полуфабрикат, и последующие переходы, в которых происходит дальнейшее формоизменение полого полуфабриката, т. е. увеличение его высоты при одновременном уменьшении поперечного сечения. Обычно вытяжка осуществляется с помощью матрицы и пуансона; рабочие кромки их скруглены дугами окружностей, радиусы которых в несколько раз больше толщины заготовки.

Процесс вытяжки достаточно сложен. Проектирование и отладка технологических процессов с операциями вытяжки часто связаны с большими трудностями. При вытяжке возможное формоизменение заготовки, как правило, ограничивается ее разрушением в том месте, где действуют наибольшие по величине растягивающие напряжения $\sigma_{p \max}$, поэтому при изучении операции вытяжки особое внимание будет уделено выяснению факторов, влияющих на величину $\sigma_{p \max}$, и оценке степени этого влияния.

Анализ процессов вытяжки начнем с наиболее простого случая вытяжки цилиндрического стакана из плоской круглой заготовки.

Вытяжкой получают полые детали разнообразной формы из плоских листовых или полых тонкостенных заготовок, не требующие, как правило, дальнейшей обработки, кроме обрезки неровного края. К ним относятся:

детали, имеющие форму тел вращения (осесимметричные): днища котлов и различных цилиндрических резервуаров, металлическая посуда, детали осветительной аппаратуры (например, детали автомобильных фар) и многие др.;

детали коробчатой формы: топливные баки двигателей внутреннего сгорания, бидоны для горюче-смазочных материалов, тара для продуктов консервного производства и пр.;

детали, имеющие одну ось симметрии или асимметричные: автокузовные детали — крыша автомобиля, его двери, капот и пр.;

цилиндрические детали, у которых толщина дна больше толщины стенок: артиллерийские гильзы, гильзы стрелкового оружия, металлическая посуда с толстым дном и пр.

Перечисленные детали могут иметь диаметр (или длину) — от нескольких миллиметров до нескольких метров и толщину стенки — от десятых долей до десятков миллиметров.

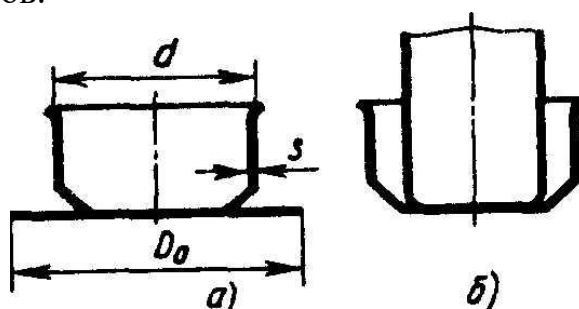


Рис. 8.1. Переходы вытяжки:
a — первый; *б* — последующий

Детали, получаемые вытяжкой, в зависимости от относительной высоты штампуют в одну или несколько операций или переходов. На первом переходе плоскую заготовку вытягивают в полу, открытую с одного конца деталь или полуфабрикат (рис. 8.1, *a*).

На последующих переходах происходит увеличение высоты при одновременном уменьшении поперечных размеров полуфабрикатов, полученных на предыдущих переходах вытяжки (рис. 8.1, *б*).

Изготовление деталей вытяжкой осуществляется без нагрева заготовки, в холодном состоянии. Исключение — вытяжка толстолистого металла (толщиной свыше 20 мм), когда заготовку нагревают для того чтобы снизить деформирующее усилие. При вытяжке заготовок из алюминиевых сплавов для повышения степени деформации за одну операцию применяют местный (локальный) электронагрев зоны пластической деформации.

Для изготовления деталей вытяжкой применяют листовой металл, обладающий высокими пластическими свойствами: низкоуглеродистую качественную и конструкционную низколегированную сталь, алюминий и различные его сплавы, медь, латунь и другие металлы.

Вытяжку осуществляют в специальных штампах, рабочие органы которых: матрица, 1 со скругленной рабочей кромкой, пуансон 2 и, если это необходимо, прижимное кольцо 3 (рис. 8.2). Между пуансоном и матрицей имеется зазор z , в который пуансон втягивает заготовку. При вытяжке внешняя сила, передаваемая пуансоном, приложена к донной части вытягиваемой детали, краевая же ее часть остается свободной, не нагруженной внешними силами. Применяют два основных способа вытяжки:

- 1) без искусственного уменьшения толщины стенки (вытяжка);
- 2) с искусственным, преднамеренным уменьшением толщины стенки (вытяжка с утонением), в том числе комбинированная вытяжка.

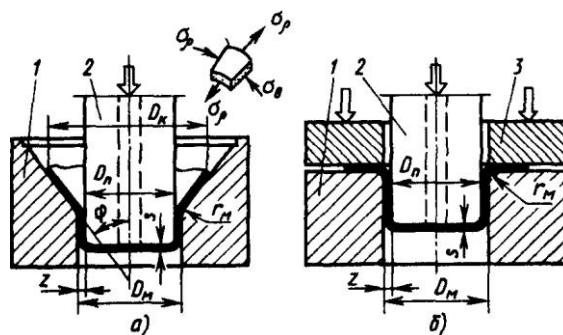


Рис. 8.2, Схемы штампов для первого перехода вытяжки:
 а — без прижимного кольца; б — с прижимным кольцом

Вытяжка без утонения стенки характеризуется существенным уменьшением диаметра заготовки при приблизительно неизменной толщине стенки вытягиваемой детали. Вытяжку осуществляют в штампе, у которого зазор между пуансоном и матрицей равен или больше толщины заготовки ($z \geq s$).

Вытяжка с утонением характеризуется существенным уменьшением толщины стенки при относительно малом уменьшении диаметра заготовки. При вытяжке с утонением зазор $r < s$.

В процессе вытяжки без утонения в краевой части заготовки, еще не втянутой в матрицу (во фланце, см. рис. 8.2, а), одновременно возникают растягивающие σ_r и сжимающие σ_θ напряжения. Сжимающие напряжения σ_θ , действующие в окружном направлении, при определенном соотношении диаметров заготовки и вытягиваемой детали могут вызвать появление складок во фланце (явление потери устойчивости), приводящих при втягивании складок в зазор между пуансоном и матрицей к массовому браку вследствие отрыва дна.

Для устранения складкообразования в штампах для вытяжки предусматривают прижимное кольцо (складкодержатель), которое прижимает фланец к матрице и этим препятствует складкообразованию (см. рис. 8.2, б). В связи с этим различают два способа вытяжки: без утонения с прижимом и без прижима заготовки.

Вытяжкой за одну операцию можно получить относительно неглубокие детали, высота которых не превышает 0,7—0,8 диаметра. При вытяжке более высоких деталей растягивающие напряжения, возникающие в стенке, возрастают настолько, что может наступить, отрыв дна. В связи с этим процесс вытяжки необходимо разделять на несколько переходов, что позволяет уменьшить радиальные растягивающие напряжения в стенках вытягиваемой детали. В процессе вытяжки материал заготовки упрочняется, его пластические свойства ухудшаются. Чрезмерное упрочнение металла приводит к потере пластичности и, в конечном итоге, к разрушению. Поэтому процесс изготовления высоких деталей (высотой более диаметра вытягиваемой детали) заключается в чередовании следующих друг за другие операции вытяжки, в промежутке между которыми, по мере необходимости, проводится рекристаллизационный отжиг полуфабрикатов для снятия упрочнения (рис. 8.3).

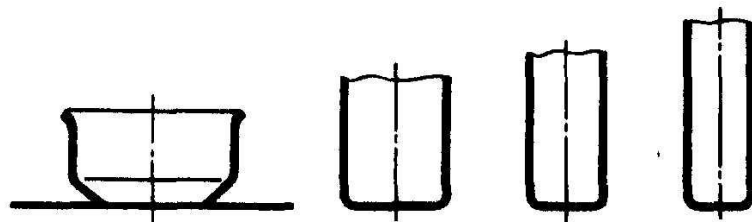


Рис. 8.3. Схема технологического процесса вытяжки высоких деталей

Последующие операции вытяжки осуществляются в штампах с прижимом (рис. 8.4, *а*) или без него (рис. 8.4, *б*) в зависимости от относительной толщины заготовки и степени деформации. Последующие операции вытяжки могут быть выполнены прямым или реверсивным способом. В том случае, когда пуансон передает давление на полу заготовку с внутренней стороны дна (рис. 8.4), способ вытяжки называют прямым. Если пуансон передает давление на полу заготовку с внешней стороны дна (рис. 8.5, *а*), способ вытяжки называют реверсивным (обратным), поскольку при этом заготовка втягивается в матрицу в обратном направлении по сравнению с направлением вытяжки на первой операции.

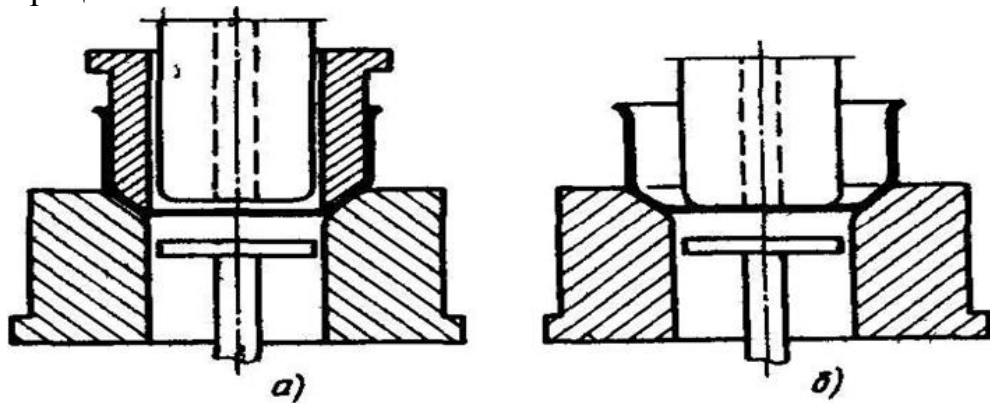


Рис. 8.4. Схемы штампов для последующих переходов вытяжки:

а — с прижимным кольцом; *б* — без прижимного кольца

Реверсивную вытяжку применяют для получения деталей или полуфабрикатов сложной формы, например, с двойным дном или двойными стенками (рис. 8.5, *б*). Кроме того, реверсивную вытяжку применяют, когда требуется совместить первый и последующий переход вытяжки в одном штампе, а также при вытяжке деталей сферической формы.

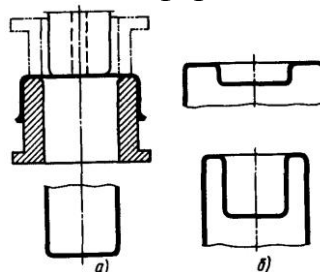


Рис. 8.5. Реверсивная вытяжка: *а* — схема штампа; *б* — детали

В массовом и крупносерийном производстве вытяжку осуществляют на кривошипных прессах простого и двойного действия. Как правило, детали крупных и средних размеров (автокузовные детали, металлическая посуда и др.) вытягивают на прессах двойного действия, мелкие детали — на кривошипных прессах простого действия.

Исследованию процесса вытяжки посвящено большое число работ отечественных и зарубежных ученых. Однако исследование вытяжки продолжается, поскольку некоторые задачи решены приближенно и поэтому требуют уточнения, а также возникают новые задачи в связи с появлением новых способов вытяжки, совмещением вытяжки с другими операциями листовой штамповки и пр. Схема, обобщающая различные способы вытяжки, приведена на рис. 8.6.

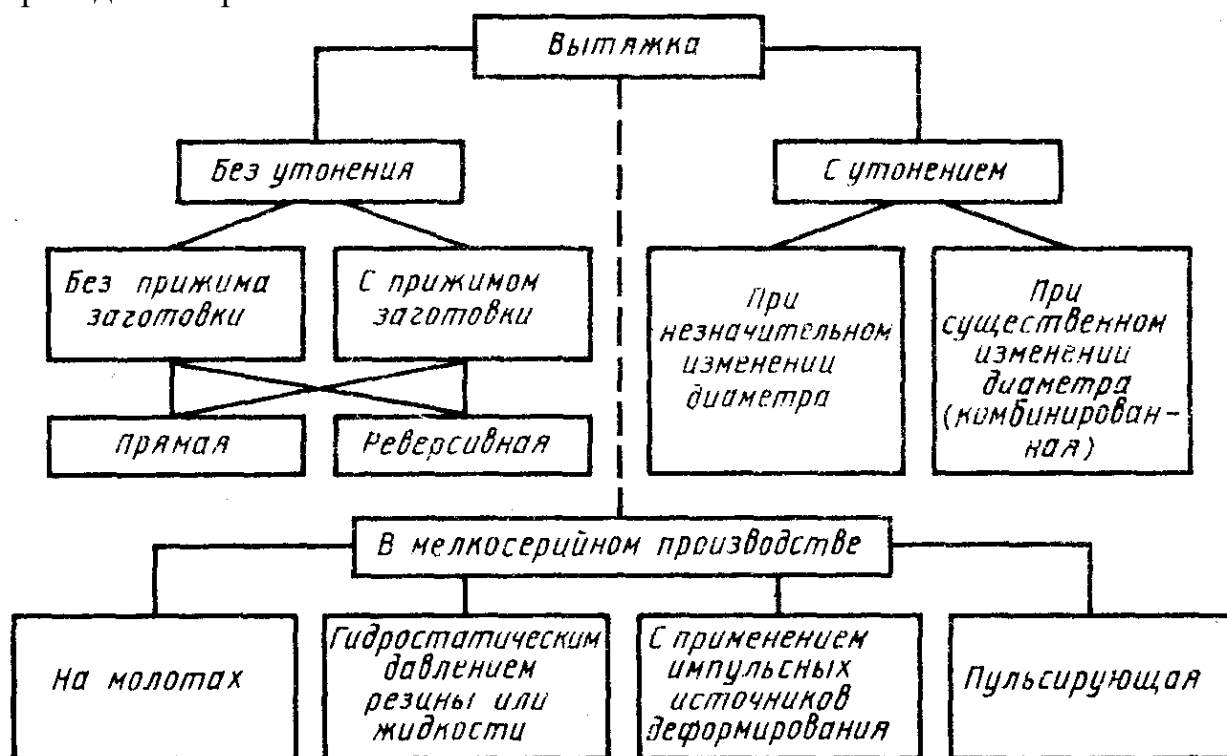


Рис. 8.6. Схема, обобщающая различные способы вытяжки

2. ВЫТЯЖКА БЕЗ ПРИЖИМА ЗАГОТОВКИ

Вытяжку без прижима заготовки осуществляют в штампе без складкодержателя на прессе простого действия. Очаг пластической деформации находится во фланце конической формы, в котором возникают радиальные растягивающие и окружные сжимающие напряжения σ_r и σ_θ (см. рис. 8.2).

Возможность вытяжки без прижима регламентируется двумя факторами: при относительно малой толщине заготовки — складкообразованием конического фланца от воздействия окружающих сжимающих напряжений σ_θ или при относительно большой толщине локальной деформацией по толщине стенки, завершающейся разрывом в зоне сопряжения дна и стенки вытягиваемой детали. По данным Е. Н. Мошнина возможность складкообразования при вытяжке в матрице со скругленной рабочей кромкой может быть установлена с помощью граничных кривых, построенных по результатам использования уравнений теории устойчивости и теории пластического течения при различных радиусах скругления матрицы r_m (кривые 1 и 2 на рис. 8.7), с увеличением которых предельная степень

деформации, характеризуемая коэффициентом K_B , увеличивается. Теоретические данные проверялись экспериментально применительно к штамповке днищ различного рода из стали 20, 12X18H9T и алюминиевого сплава Д16АМ [15]. Ключ к использованию граничных кривых показан на рис. 8.7 стрелками на пунктирных линиях.

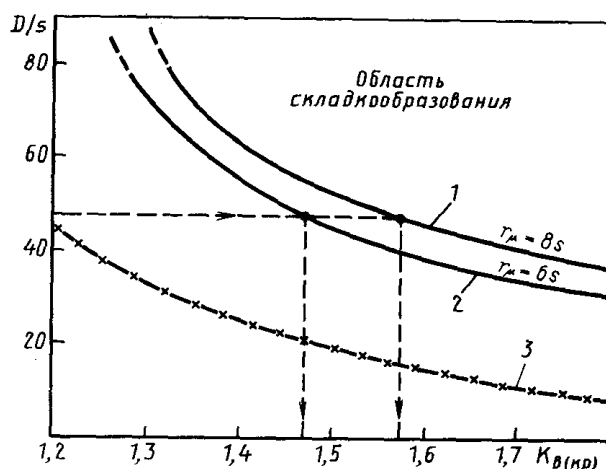


Рис. 8.7. Граничные кривые, устанавливающие области штамповки и складкообразования при вытяжке без прижима заготовки: 1 и 2 — по данным Е. Н. Мошникова для матриц с $r_m=6 \cdot s$ и $r_m=8 \cdot s$ (соответственно); 3 — по данным Л. А. Шофмана

Возможность вытяжки без прижима заготовки приближенно можно установить, используя условие, предложенное Л. А. Шофманом:

$$D_0 - d \leq (18 \div 22) \cdot s.$$

В начальный момент вытяжки без прижима заготовки в радиальной матрице наблюдается изгиб фланца относительно рабочей кромки на некоторый угол γ (рис. 8.8). Поворот фланца происходит под действием изгибающего момента, который возникает вследствие смещения сил, приложенных к заготовке со стороны пуансона и матрицы. В связи с подъемом фланца над плоскостью матрицы он принимает коническую форму (см. рис. 8.8).

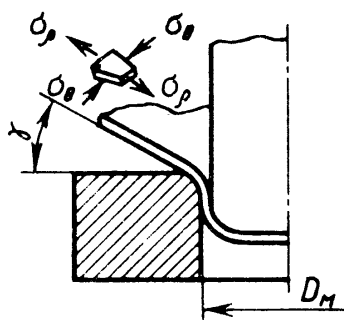


Рис. 8.8. Начальный момент вытяжки без прижима заготовки

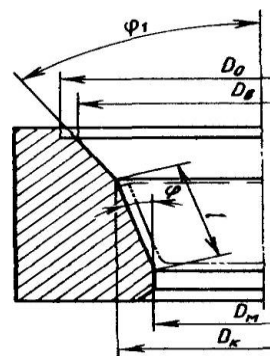


Рис. 8.9. Двухконусная матрица для вытяжки

Как правило, вытяжку без прижима заготовки ведут в матрице с конической заходной частью, так как вероятность складкообразования в таких матрицах меньше, чем в цилиндрических с радиальной заходной частью. Складкообразование при вытяжке в конической матрице зависит не только от

относительной ширины фланца и радиуса скругления матрицы, но и от угла наклона ее образующей φ , который принимают равным $30\text{—}45^\circ$ при вытяжке относительно тонкостенных стаканов ($d/s > 30$) и $15\text{—}20^\circ$ при вытяжке относительно толстостенных стаканов ($d/s < 30$).

Диаметр заходной части конической матрицы D_B должен быть немногим менее диаметра заготовки (рис. 8.9) [5]:

$$D_B \approx 0,9D_0. \quad (8.1)$$

При угле наклона образующей $\varphi = 15^\circ$ и соблюдении условия (8.1) матрица получается относительно высокой. Например, при соотношении $R_0/r = 2$ ее высота равна почти двум диаметрам вытягиваемого стакана. Высоту матрицы можно уменьшить, если использовать двухконусную матрицу, состоящую из двух полостей: верхней (заходной), имеющей угол наклона образующей $\varphi_1 = 30\div 45^\circ$, и нижней, имеющей угол наклона образующей $\varphi = 12\div 15^\circ$ (рис. 8.9).

В начальной стадии деформирования пуансон, оказывая давление на центральную часть заготовки, вызывает ее прогиб, так как усилия, действующие со стороны пуансона и матрицы, смещены в радиальном направлении и образуют изгибающий момент.

Дальнейшее опускание пуансона приводит к возникновению меридиональных_растягивающих напряжений, достаточных для перевода фланца заготовки (части, противостоящей плоскости матрицы) в пластическое состояние.

С этого момента начинается втягивание заготовки в матрицу с образованием боковых поверхностей вытягиваемого стакана при одновременном уменьшении диаметра заготовки. Однако изгибающий момент в части заготовки, прилегающей к скругленной кромке матрицы, продолжает действовать, так как переход элементов фланца на скругленную кромку матрицы должен сопровождаться значительным изменением радиуса кривизны срединной поверхности этих элементов. В промежуточной стадии деформирования заготовка принимает форму, показанную на рис. 8.8.

Действие меридиональных растягивающих напряжений σ_r приводит к тому, что во фланце в тангенциальном (широтном) направлении возникают сжимающие напряжения σ_θ . Совместное действие этих напряжений обеспечивает втягивание фланца в отверстие матрицы. Так как поверхности заготовки во фланце свободны от внешних напряжений, а толщина заготовки мала по сравнению с ее диаметром, то напряженное состояние во фланце может быть с достаточной степенью точности принято плоским равноименным. Для отыскания поля напряжений во фланце необходимо решить совместно уравнение равновесия и уравнение пластичности. Учитывая наличие осевой симметрии деформирования, уравнение равновесия для заготовки постоянной толщины может быть записано в виде

$$\rho \frac{d\sigma_r}{d\rho} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0. \quad (150)$$

Уравнение пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений без учета влияния упрочнения для рассматриваемого случая имеет вид

$$\sigma_p - \sigma_\theta = \beta \sigma_s ; \quad (151)$$

здесь растягивающее напряжение σ_p является максимальным, а сжимающее σ_θ — минимальным главным нормальным напряжением.

Совместное решение уравнений (150) и (151) дает дифференциальное уравнение

$$d\sigma_p = -\sigma_s \frac{dr}{r} \quad (152)$$

Интегрирование уравнения (152) с использованием граничного условия, по которому при $r = R$ (по контуру заготовки) $\sigma_p = 0$, позволяет получить формулу для определения величины σ_p в функции радиуса

$$\sigma_p = \sigma_s \ln(R/r) \quad (153)$$

Из уравнения пластичности находим формулу для определения величины σ_θ в функции радиуса

$$\sigma_\theta = -\sigma_s [1 - \ln(R/r)] \quad (154)$$

Как видно из формулы (153), во фланце при $\sigma_p < \sigma_s$ может происходить пластическая деформация, в то время как для начала пластического деформирования донной части (плоское растяжение) или образующейся стенки (линейное растяжение) необходимо, чтобы $\sigma_p = \sigma_s$. Из этой же формулы видно, что напряжение σ_p увеличивается с уменьшением текущего радиуса r .

Формулы (153) и (154) могут быть использованы для оценки величины изгибающего момента, действующего на переходе от фланца, к торообразной части заготовки, контактирующей со скругленной кромкой матрицы.

Так как напряжения σ_θ действуют в широтных направлениях по конической поверхности, то они образуют относительно кромки матрицы момент, уравновешивающий изгибающий момент, изменяющий кривизну срединной поверхности элементов при их переходе на скругленную кромку матрицы.

Момент, отнесенный к единице длины в широтном направлении по кромке матрицы, определяется по формуле

$$M_1 = \frac{M_\theta}{rdy} = \frac{\sigma_s s}{2rtg\alpha} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 - 2\ln \frac{R}{r} \right) \quad (157)$$

Зная R , g , a , s и σ_s (из опытов), по формуле (157) можно определить величину момента, действующего у кромки матрицы и вызывающего подъем фланца до угла конусности α .

В проведенных опытах по определению величины изгибающего момента [41] использовались низкоуглеродистая сталь, медь, свинец и такие размерные характеристики заготовок, при которых фланец не терял устойчивости. При этом установили, что величина момента, определенная по формуле (157) с точностью до 20%, равна моменту $M = \frac{1}{4} \sigma_s s^2$, т. е. моменту изгиба полосы единичной ширины без учета упрочнения, утонения заготовки, и влияния упругодеформированного слоя. Этот вывод несколько парадоксален, так как в сечении, прилегающем к кромке матрицы, действуют растягивающие напряжения σ_p , приводящие к появлению продольной силы, а последняя, как было показано ранее, уменьшает величину изгибающего

момента. Объяснить это противоречие в какой-то степени можно тем, что уменьшение момента от действия продольной силы компенсируется упрочнением, дающим увеличение σ_s , а также не учтенным в анализе действием моментов в широтном направлении.

Опытами было также установлено, что, хотя в действительности кривизна срединной поверхности заготовки в меридиональном сечении непостоянна (немного увеличивается по мере приближения к кромке матрицы), образующая фланца незначительно отличается от прямой.

Если принять, что $M = \frac{1}{4} \sigma_s s^2$ и $M = M_1$, то после несложных преобразований из этого равенства можно вывести формулу, позволяющую приближенно определить угол конусности, получаемый фланцем заготовки при вытяжке:

$$\operatorname{tg} \alpha \times \sin \alpha = \frac{r}{s} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 - 2 \ln \frac{R}{r} \right) \quad (158)$$

Зная поле напряжений во фланце, можно найти поле деформаций.

Уравнение связи напряжений и деформаций применительно к деформированию фланца при $\sigma_z = 0$ (считая, что в процессе деформирования $\sigma_r / \sigma_\theta = \text{const}$ для каждого элемента) имеет вид

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = \frac{\varepsilon_r + 2\varepsilon_z}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_z} \quad (159)$$

Из условия постоянства объема имеем $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta - \varepsilon_z$. Подставляя найденное выражение ε_r в уравнение (159), получаем

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = \frac{\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_z}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_z} \quad (159')$$

Обозначив отношение $\sigma_r / \sigma_\theta = \alpha$, после некоторых преобразований формулы (159') получим

$$\varepsilon_z = -\frac{1+\alpha}{2-\alpha} \varepsilon_\theta \quad (160)$$

Отсюда следует, что при $\alpha = 0$ (у края заготовки) $\varepsilon_z = -1/2 \varepsilon_\theta$, т. е. имеет место линейная схема сжатия в тангенциальном направлении, дающая утолщение заготовки.

Так как линейная схема напряженного состояния у края заготовки имеет место на протяжении всего процесса вытяжки, то, заменив относительные деформации через логарифмические, можно получить формулу, определяющую конечную толщину края вытянутого стакана (при изменении радиуса заготовки от R до r):

$$s_k = s_0 \sqrt{\frac{R}{r}} = s_0 \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (161)$$

Утолщение заготовки при вытяжке возникает в той части, у которой деформации ε_z и ε_θ обратны по знаку. Выражение

$$\alpha = \frac{\sigma_r}{\sigma_\theta}$$

после подстановки в него значений σ_r и σ_θ из формул (153) и (154) может быть представлено в виде

$$\alpha = - \frac{\ln \frac{R}{\rho}}{1 - \ln \frac{R}{\rho}}. \quad (162)$$

Величина α является отрицательной. Поэтому для изменения знака деформации ν , необходимо, чтобы $\alpha < -1$. Радиус, разграничивающий зону утолщения от зоны утонения заготовки при вытяжке, может быть найден из условия, при котором $\alpha = -1$.

Тогда из формулы (162) найдем, что радиус, разграничивающий области утонения и утолщения, равен

$$\rho = \frac{R}{\sqrt{e}} = \frac{R}{1,65} = 0,607R. \quad (163)$$

В процессе вытяжки при $\rho > 0,607R$ заготовка утолщается, а при $\rho < 0,607R$ утоняется.

Вытяжка заготовки по приведенной схеме без дополнительной опоры фланца может осуществляться лишь при определенных размерных характеристиках фланца, обеспечивающих отсутствие складкообразования. Сжимающие напряжения σ_θ , действующие во фланце при определенных условиях, могут привести к потере его устойчивости с образованием в радиальных направлениях волн или складок.

В литературе имеются достаточно точные, но вместе с тем и довольно сложные решения [56], с помощью которых можно найти условия потери устойчивости фланца. Кроме того, имеются упрощенные, приближенные зависимости, позволяющие определить возможность складкообразования. Естественно, что устойчивость фланца будет тем больше, чем больше толщина заготовки при данном диаметре или ширине фланца. Для первого перехода вытяжки в матрице с плоским рабочим торцом условие вытяжки без складок можно записать в виде [56]

$$D - d \leq (18 \dots 22)s \quad (164)$$

где D — диаметр заготовки; d — диаметр вытягиваемого стакана.

Если неравенство (164) не удовлетворяется, т.е. $D - d > 18 \dots 22s$, то возможно, образование складок и вытяжку целесообразно вести с прижимом. На рис. 50 представлена схема вытяжки с прижимом (заметим, что в зависимости от условий вытяжки в промежутке от $D - d = 18s$ до $D - d = 22s$ может быть, а может и не быть складкообразования).

Более точный анализ потери устойчивости фланца заготовки при вытяжке, проведенный Л. А. Шофманом [56], показал, что интенсивность упрочнения металла в процессе деформирования оказывает влияние на склонность к складкообразованию. Было установлено, что более интенсивно упрочняющиеся металлы, менее склонны к складкообразованию и предельное отношение s/D для них меньше, чем для менее интенсивно упрочняющихся металлов. Заметим, что по мере деформирования интенсивность упрочнения уменьшается, поэтому можно считать, что заготовки из наклепанного (упрочненного) металла более склонны к складкообразованию, чем заготовки

из отожденного металла.

Диаметр входного отверстия нижней конической полости матрицы D_k (рис. 8.9) можно определить, используя предложенное С. А. Валиевым условие, согласно которому вытяжка в цилиндрической полости матрицы должна начаться после того, как произойдет уменьшение (спад) деформирующего усилия в находящейся над ней конической полости матрицы. В этот момент внешний диаметр меньшего основания полуфабриката становится равным диаметру цилиндрической полости матрицы D_m , а диаметр большего основания — равным D_k . Расчленение процесса вытяжки на отдельные стадии позволяет получить высокую суммарную степень деформации при умеренных степенях деформации на каждой стадии процесса [5].

Используя условие равенства площади поверхности заготовки и полуфабриката в рассматриваемый момент вытяжки (см. рис. 8.2)

$$\pi \cdot D_0^2 / 4 = \pi(D_k + D_m) \cdot l / 2 + \pi \cdot D_m^2 / 4,$$

где $l = (D_k - D_m) / 2 \cdot \sin \varphi$ — длина образующей (см. рис. 8.9), можно определить диаметр входного отверстия нижней конической полости матрицы D_k в функции коэффициента $K_b = D_0 / D_k$ и угла φ :

$$D_k = D_m \cdot \sqrt{(K_b^2 - 1) \cdot \sin \varphi + 1} \quad (8.2)$$

Расчеты по формуле (8.2) показывают, что при $K_b = 2$ и $\varphi = 15^\circ$ диаметр входного отверстия матрицы $D_k = 1,34 \cdot D_m$.

При вытяжке без прижима заготовки в матрице с конической заходной частью коэффициент вытяжки равен отношению диаметра заготовки к диаметру вытянутой детали (полуфабриката) $K_b = D_0 / d$. Наибольшее по очагу деформации радиальное растягивающее напряжение в «пиковый» момент вытяжки (когда усилие вытяжки достигает наибольшего значения) с учетом контактных сил трения и дополнительных напряжений, возникающих при изгибе и спрямлении заготовки при втягивании ее пуансоном в цилиндрическую полость матрицы, определяется следующим образом (обозначение см. на рис. 8.2, а):

$$\sigma_{\rho \max} = \beta \cdot \sigma_{s \text{ ср}} [(D_k / D_m - 1) \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \varphi) + s / (2 \cdot r_m + s)] \cdot (1 + \mu \cdot \varphi), \quad (8.3)$$

где $\sigma_{s \text{ ср}}$ — среднее значение напряжения текучести; D_k — диаметр краевой части полуфабриката, приближенно определяемый по формуле (8.2).

Формула (8.3) получена методом совместного решения уравнений, определяющих равновесие и пластичность заготовки, при известном граничном условии, согласно которому при $\rho = R \cdot \sigma_\rho = 0$. Происходящее в процессе вытяжки упрочнение металла учтено в формуле (8.3) с помощью среднего значения напряжения текучести $\sigma_{s \text{ ср}}$, которое определяется в результате использования кривых упрочнения. Анализ формулы (8.3) показывает, что с возрастанием степени деформации, сил трения, напряжения текучести и толщины заготовки радиальное растягивающее напряжение $\sigma_{\rho \max}$ увеличивается, увеличение же радиуса скругления рабочей кромки матрицы приводит к его уменьшению.

Вытяжку без прижима заготовки можно проводить в матрице, у которой образующая рабочей полости имеет форму *трактрисы*. Деформируясь в такой

матрице, фланец заготовки приобретает двоякую кривизну, что, вероятно, способствует повышению его несущей способности. При этом повышается критическая степень деформации при одновременном увеличении износостойкости матрицы.

Экспериментально установлено, что предельно допустимая степень деформации при вытяжке в конической матрице ($\varphi=30^\circ$) выше, чем в радиальной, а при вытяжке в трактрисной матрице — выше, чем в конической.

Однако, несмотря на преимущества, трактрисные матрицы широкого практического применения не получили в связи с более высокой стоимостью их изготовления по сравнению со стоимостью изготовления конических матриц.

3. Тема ВЫТЯЖКА С ПРИЖИМОМ ЗАГОТОВКИ

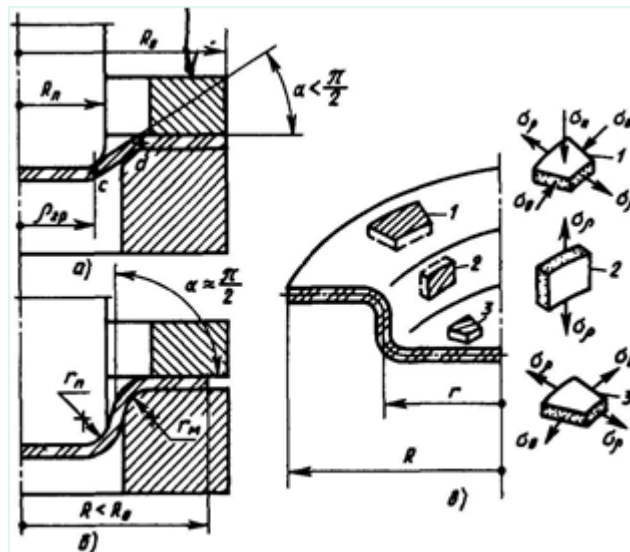


Рис. 8.10. Схема вытяжки с прижимом

При вытяжке с прижимом заготовки различают две стадии: начальную, когда только начинается втягивание заготовки в матрицу и угол охвата заготовкой скругленных рабочих участков пуансона и матрицы мал $\alpha < \pi/2$ (рис. 8.10, а), и последующую, когда $\alpha \approx \pi/2$ (рис. 8.10, б).

На начальной стадии вытяжки происходит уменьшение толщины заготовки в очаге деформации, представляющем собой кольцевой участок шириной $c — d$ (см. рис. 8.10, а), при этом радиус заготовки R_0 не уменьшается. При достаточно высоком деформирующем усилии и усилии прижима разрушение заготовки наступает на участке $c — d$, поэтому на данной стадии вытяжки участок $c — d$ является опасным (наименее прочным).

По мере увеличения усилия вытяжки очаг пластической деформации растет, постепенно распространяясь на фланец и, частично, на донную часть заготовки. После того как весь фланец будет охвачен пластической деформацией, начинается вторая стадия вытяжки, характеризующаяся увеличением угла охвата α и уменьшением радиуса фланца ($R_\phi < R_0$).

Когда угол охвата α приближается к $\pi/2$ (полный охват), центры радиусов r_n и r_m скругления рабочих кромок пуансона и матрицы находятся

приблизительно на одном уровне (см. рис. 8.10, б).

В произвольно фиксированный момент второй стадии вытяжки, после того как пуансон уже втянул заготовку в матрицу на определенную глубину, по крайней мере, три участка этой заготовки находятся в различных условиях напряженного состояния (кольцевой фланец 1, цилиндрический 2 и донный 5) (рис. 8.10, в).

Кольцевой фланец 1, ограниченный двумя окружностями, радиусы которых R и r , испытывает плоское напряженное состояние, так как напряжение сжатия σ_n , вызванное давлением прижимного кольца штампа, мало по сравнению с напряжением текучести σ_s , а при вытяжке без прижима — совсем отсутствует. На элементарный объем, выделенный во фланце дугами двух концентрично расположенных окружностей и радиально направленными линиями, в радиальном направлении действуют растягивающие напряжения σ_r и в окружном (тангенциальном) направлении — сжимающие напряжения σ_θ (см. рис. 8.10, в).

При вытяжке диаметр фланца уменьшается, именно в нем сосредоточен очаг пластической деформации. Однако для начала и дальнейшего протекания пластического формоизменения фланца необходимо, чтобы соотношение между напряжениями σ_r и σ_θ было вполне определенным. Согласно условию пластичности Губера—Мизеса:

$$|\sigma_r| + |\sigma_\theta| = \beta \cdot \sigma_s. \quad (8.4)$$

Цилиндрический участок 2 в результате давления пуансона, передаваемого на донную часть заготовки, находится в условиях, близких к линейному растяжению. В этом случае возникают растягивающие напряжения σ_r , которые должны быть меньше напряжения текучести ($\sigma_r < \sigma_s$). Если это условие не будет выполнено, произойдет локальное утонение стенки, завершающееся отрывом дна. Рассматриваемый участок деформируется упруго в отличие от фланца, который деформируется пластически, несмотря на то, что в нем $\sigma_r < \sigma_s$ [см. уравнение (8.4)].

Донный участок 3 испытывает двухосное растяжение. Так же, как и цилиндрический участок, дно стакана деформируется упруго, при этом нормальные растягивающие напряжения, действующие в радиальном и окружном направлениях, всегда меньше напряжения текучести материала заготовки: $\sigma_r < \sigma_s$ и $\sigma_\theta < \sigma_s$.

Кольцевой фланец вытягиваемой детали называют зоной пластической деформации, а цилиндрический и донный — зонами передачи усилий.

Распределение напряжений по очагу деформации установлено в результате совместного решения уравнений статики и пластичности при известных граничных условиях. Для идеальных условий деформирования были получены следующие уравнения [22]: Каждую составляющую напряжения $\sigma_{вт}$ (σ_r) можно определить аналитическим путем при определенных упрощающих допущениях. Напряженное состояние в основном очаге деформации — во фланце ввиду того, что напряжение сжатия σ_n , возникающее от силы прижима заготовки, весьма мало по сравнению с σ_s .

(меньше 4,5 МПа), его можно принять равным нулю и считать, что здесь имеет место плоская равноименная схема напряженного состояния. Толщина заготовки считается неизменной и равной исходной толщине s .

Распределение напряжений в очаге деформации при этих условиях определяется путем совместного решения уравнения равновесия малого участка — элемента, выделенного в очаге деформаций, совместно с уравнением пластичности.

Так как при вытяжке полого цилиндра из плоской круглой заготовки имеет место осе симметричная деформация, это позволяет для определения напряженного состояния в очаге деформации ограничиться рассмотрением напряженного состояния элементарного сектора

(в плоскости заготовки) $ABCD$ с углом в плане $d\gamma$ (рис. 75). Касательные напряжения тогда $\tau_{r\theta} = 0$, а напряжения σ_r и σ_θ являются главными.

Рассмотрим условие равновесия кольцевой полоски шириной dR_x , находящейся на расстоянии R_x от центра O при малом перемещении заготовки в системе полярных координат. Введем обозначения: $R_{вн}$ — внутренний радиус изделия ($r_1 = d/2$); R (R_3) — радиус заготовки ($D/2$); R_n — наружный радиус перемещенного фланца; $R_x(p)$ — текущий радиус кольцевой полоски.

Спроектируем силы на радиус, проходящий через центр участка, и приравняем эту сумму нулю. Силы, действующие на участок, равны напряжениям, умноженным на соответствующие площади. Напряжение σ_r действует на площадь $f_1 = R_x d\gamma s$, $\sigma_r + d\sigma_r$ — на площадь $f_2 = (R + dR_x) d\gamma s$, а σ_θ — на площади с двух сторон перпендикулярно грани кольцевой полости $f_3 = 2 dR_x s$. Составим дифференциальное уравнение равновесия действующих на элемент сил, пренебрегая для упрощения членами второго порядка $d\sigma_r dR_x$ (рис. 75),

$$\sigma_r R_x d\gamma s + \sigma_r dR_x d\gamma s + d\sigma_r R_x d\gamma s - \sigma_r R_x d\gamma s - 2\sigma_\theta dR_x \sin(d\gamma/2) s = 0$$

или, после сокращения и дифференцирования, имея в виду, что для малых углов $\sin d\gamma/2 = d\gamma/2$, получим

$$R_x d\sigma_r + (\sigma_r - \sigma_\theta) dR_x = 0 \quad (214)$$

Уравнение (214) можно написать (при $dR_x = dp$ и $R_x = p$) и в таком виде

$$p \frac{d\sigma_r}{dp} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d\sigma_r}{dp} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{p} = 0 \quad (215)$$

Для решения дифференциального уравнения используем уравнение пластичности без учета упрочнения при плоском напряженном состоянии, когда напряжения имеют разные знаки

($\sigma_r \sigma_\theta < 0$), тогда

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \sigma_s \quad (216)$$

где σ_r и σ_θ — главные нормальные напряжения (растяжения и сжатия); σ_s — напряжение текучести.

В случае сильного давления прижима, когда имеет место объемное напряженное состояние, следует пользоваться уравнением пластичности

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \beta \sigma_s \quad (217)$$

где β — коэффициент, учитывающий влияние σ_n и равный 1,00...1,15.

Решая уравнение (215) совместно с уравнением пластичности (216),

получим

$$d\sigma_p = -\sigma_s \frac{dR_x}{R_x} = -\sigma_s \frac{d\rho}{\rho} \quad (218)$$

$$\sigma_p = -\sigma_s \int \frac{dR_x}{R_x} = -\sigma_s \int \frac{d\rho}{\rho} \quad (219)$$

Произведя интегрирование уравнения (219) и используя для отыскания произвольной постоянной интегрирования граничное условие, что на свободной кромке заготовки при $R_x = R_H$ напряжение $\sigma_p = 0$, получим

$$\sigma_p = \sigma_s \ln(R_H/R_x), \text{ или } \sigma_p = \sigma_s \ln(R_H/\rho), \quad (220)$$

Тангенциальное сжимающее напряжение σ_θ определяется из уравнения пластичности (216), если в него подставить значение σ_s . Тогда

$$\sigma_\theta = -\sigma_s [1 - \ln(R_H/R_x)] \text{ или } \sigma_\theta = -\sigma_s [1 - \ln(R_H/\rho)] \quad (221)$$

Задаваясь разными значениями R_x или ρ в пределах от r_{lcp} ($r_1 + s/2$) до R_H ($R = D/2$), можно определить характер распределения напряжений σ_p и σ_θ по фланцу вытягиваемой детали.

Рассмотрим подробнее влияние основных факторов на поле напряжений для наиболее общего случая — первого перехода вытяжки с прижимом.

Как видно из схемы (рис. 50), на заготовку в процессе деформирования воздействуют со стороны пуансона: 1)тянущая сила, создающая меридиональные растягивающие напряжения, 2) усилие прижима Q , прижимающее фланец к плоскости матрицы, 3)силы трения, приложенные к нижней и верхней плоскостям фланца, и 4)силы трения, действующие на внутренней поверхности при ее скольжении по кромке матрицы. 5)Кроме того, в местах резкого изменения кривизны срединной поверхности (изгиб при входе элементов на скругленную кромку матрицы и спрямление при сходе элементов со скругленной кромки матрицы) на процесс деформирования значительное влияние оказывают изгибающие моменты.

Попытаемся учесть влияние отмеченных факторов на поле напряжений в очаге деформации.

В том случае, когда плоскости прижима и матрицы, по которым скользит заготовка, параллельны, можно считать, что вследствие более интенсивного утолщения краевой части заготовки усилие прижима не будет равномерно распределяться по всей плоскости фланца, а его действие будет сосредоточено по некоторому кольцевому участку, граничащему с краем заготовки. Отсюда следует, что при вытяжке с прижимом на основную часть фланца не действуют нормальные напряжения, вызываемые усилием прижима. В то же время, как будет показано далее, усилие "прижима" сравнительно невелико и даже на части фланца не может создать нормальных напряжений, соизмеримых с пределом текучести.

Следовательно, и при вытяжке с прижимом допускается, что схема напряженного состояния плоская.

Вследствие более интенсивного утолщения краевой части заготовки силы трения, вызванные действием прижима, будут сосредоточены у краевой части фланца. Это обстоятельство позволяет приближенно учесть влияние сил трения во фланце в граничных условиях.

Действительно, силы трения, приложенные к верхней и нижней плоскостям фланца вблизи его края, вызовут появление растягивающих напряжений в радиальном направлении у края заготовки.

Величину этих усредненных по толщине растягивающих напряжений можно определить из выражения

$$\sigma_{\text{тр}} = \frac{2\mu Q}{2\pi R s} = \frac{\mu Q}{\pi R s} \quad (165)$$

В этом случае можно принять (рис. 50), что при отыскании произвольной постоянной интегрирования уравнения (152) граничное условие при $\rho = R$ имеет вид

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\text{тр}}$$

После интегрирования получаем

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s \ln \frac{R}{\rho} + \frac{\mu Q}{\pi R s} \quad (166)$$

Формула (166) позволяет установить распределение напряжений в плоской части заготовки.

Как было показано в гл. I, влияние изгиба на величину меридиональных напряжений может быть оценено поправкой на изгиб $\Delta\sigma_{\rho}$, на которую ступенчато увеличивается меридиональное напряжение в зоне изгиба и спрямления. Применительно к рассматриваемому процессу вытяжки, при радиусе скругления кромки матрицы r_m значение $\Delta\sigma_{\rho}$ может быть определено по формуле

$$\Delta\sigma_{\rho} = \frac{1}{4} \sigma_s \frac{s}{r_m + \frac{s}{2}} \quad (167)$$

Влияние трения на кромке можно приближенно учесть множителем $e^{\mu\alpha}$ (по аналогии с множителем, учитывающим влияние трения при скольжении ремня по шкиву). В этом случае величина напряжения σ_{ρ} , действующего на границе участка, контактирующего со скругленной кромкой матрицы и центральной частью заготовки, будет определяться выражением

$$\sigma_{\rho} = \left(\sigma_s \ln \frac{R}{\rho_1} + \frac{\mu Q}{\pi R s} + \frac{\sigma_s}{4} \frac{s}{r_m + \frac{s}{2}} \right) e^{\mu\alpha} \quad (168)$$

В том случае, когда угол охвата заготовкой скругленной кромки матрицы достигает значения $\alpha = \pi/2$, а $\rho = r$, возникает участок спрямления элементов при переходе их в стенки образующегося стакана. В этом случае к членам, находящимся в скобках формулы (168), следует прибавить $\Delta\sigma_{\rho}$ для учета влияния спрямления, а в показатель степени подставить $\alpha = \pi/2$. Тогда максимальную величину растягивающего напряжения, действующего на границе пластически деформируемой части заготовки, можно определить по формуле

$$\sigma_{\rho \text{ max}} = \sigma_s \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R s \sigma_s} + \frac{s}{2r_m + s} \right) e^{\mu \frac{\pi}{2}} \quad (169)$$

Формулу (169) можно упростить, если, учитывая малые значения коэффициента трения μ , при вытяжке, заменить экспоненциальную функцию

первыми двумя членами разложения ее в ряд по соотношению

$$e^{\frac{\mu\pi}{2}} \approx 1 + \mu \frac{\pi}{2} \approx 1 + 1,6\mu$$

в этом случае формула (169) имеет вид

$$\sigma_{p \max} = \sigma_s \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R s \sigma_s} + \frac{s}{2r_m + s} \right) (1 + 1,6\mu) \quad (169')$$

При вытяжке особо тонкого материала ($s < 0,2$ мм) характер складкообразования изменяется (складка образуется в виде черточек, вытянутых в радиальном направлении), и для этого случая более правильно принимать силы трения, равномерно распределенные по плоскости фланца. В этом случае решение может быть получено с использованием уравнения равновесия (7), в котором следует принять $R_p = R_\theta = \infty$ и $\alpha = \pi/2$. Решая это уравнение равновесия совместно с уравнением пластичности (151) и принимая

$$q = -\frac{Q}{\pi(R^2 - r^2)} = \text{const}, \text{ получим}$$

$$\sigma_p = \sigma_s \ln \frac{R}{\rho} + \frac{2\mu\mu}{\pi s(R^2 - r^2)} (R - \rho)$$

при $\rho = r$ и, учитывая изгиб и трение на кромке матрицы аналогично предыдущему, получаем

$$\sigma_{p \max} = \sigma_s \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi(R+r)s\sigma_s} + \frac{s}{2r_m + s} \right) (1 + 1,6\mu) \quad (169'')$$

Из сопоставления формул (169'') и (169') видно, что при распределенных силах трения влияние трения под прижимом больше, чем при силах, сосредоточенных по краю заготовки ($\frac{R+r}{2} < R$) в случае, если усилие прижима Q одинаково, что в принципе не должно иметь место, так как оно зависит от относительной толщины.

В формулу (169') входит усилие прижима Q , величину которого находим по данным, приведенным в справочной литературе. Минимальную величину усилия прижима, необходимую для предотвращения складкообразования при вытяжке цилиндрических стаканов, можно также найти по приближенной эмпирической формуле, полученной на основании обработки опытных данных:

$$Q = 0,1 \left(1 - \frac{18k}{k-1} \frac{s}{D} \right) k^2 P_{\max} \quad (170)$$

Если для приближенных расчетов принять, что $P_{\max} = \pi ds (k - 1) \sigma_v$, а для более точных $P_{\max} = \pi ds \sigma_{p \max}$ и использовать формулы (169) и (170), можно решить получающееся при этом уравнение относительно $\sigma_{p \max}$.

В формуле (170) принято $k = D/d = R/r$ (D — исходный диаметр заготовки; P_{\max} — максимальное усилие вытяжки).

Приведенный анализ был выполнен без учета упрочнения, но он позволяет оценить влияние некоторых факторов на величину растягивающего напряжения, действующего в опасном сечении заготовки.

Из формулы (169') видно, что величина коэффициента трения μ

оказывает влияние на $\sigma_{r\max}$, причем с увеличением μ напряжение в опасном сечении возрастает.

$$\sigma_r = \beta \cdot \sigma_s \cdot \ln(R/\rho); \quad (8.5)$$

$$\sigma_\rho = -\beta \cdot \sigma_s \cdot [1 - \ln(R/\rho)]. \quad (8.6)$$

Приведенные данные позволяют проследить характер изменения напряжений по очагу деформации: радиальное напряжение σ_r изменяется от нулевого значения на кромке фланца ($\rho=R$) до наибольшего значения в месте сопряжения фланца с цилиндрическим участком детали ($\rho=r$), а окружное напряжение σ_θ — от максимального значения на кромке фланца при $\rho=R$ до минимального в месте сопряжения фланца с цилиндрическим участком при $\rho=r$. Эпюра распределения напряжений σ_r и σ_θ по ширине фланца показана на рис. 8.11, а. Анализируя эпюру, можно сделать вывод о том, что на участке фланца с преобладающими (по абсолютному значению), сжимающими напряжениями $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$ произойдет утолщение, а на участке фланца с преобладающими радиальными растягивающими напряжениями $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$ — утонение. При $|\sigma_r| = |\sigma_\theta|$ толщина фланца остается неизменной, равной толщине исходной заготовки. В этом случае *деформированное состояние* при этом условии — *плоское*. Схемы деформированного состояния различных участков фланца показаны на рис. 8.11, б.

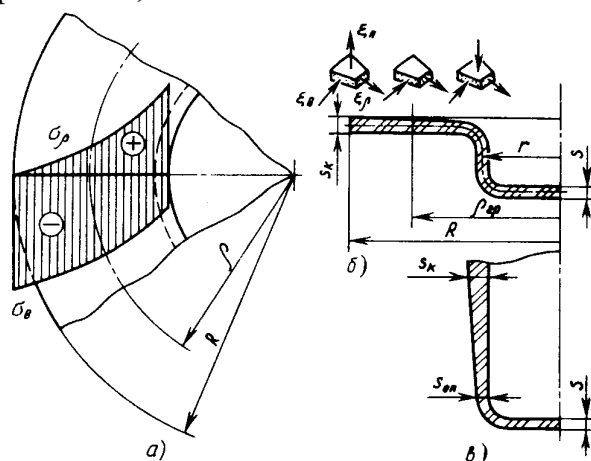


Рис. 8.11. Распределение напряжений и деформаций по фланцу детали при вытяжке. Границу между участками утолщения и утонения фланца можно установить, используя условие плоского деформированного состояния, которое в принятых обозначениях имеет вид $(\sigma_r + \sigma_\theta)/2 = \sigma_n$. Учитывая, что при вытяжке $\sigma_n \approx 0$, условие плоского деформированного состояния принимает вид

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 0. \quad (8.7)$$

Подставив в условие (8.7) значения σ_r и σ_θ согласно (8.5) и (8.6) с учетом знаков, получаем

$$\beta \cdot \sigma_s \cdot \ln(R/\rho) - \beta \cdot \sigma_s \cdot [1 - \ln(R/\rho)] = 0, \quad (8.8)$$

откуда при $\rho = \rho_{\text{гр}}$ радиус окружности, разграничивающий участки утолщения и утонения фланца, $\rho_{\text{гр}} = 0,606 \cdot R$ (рис. 8.11, б).

Наибольшая толщина фланца по очагу деформации s_k находится на его кромке, где напряженное состояние близко к линейному ($\sigma_r \approx 0$, $\sigma_n \approx 0$). При линейном сжатии в радиальном и аксиальном направлениях степени деформации равны друг другу $|\varepsilon_r| = |\varepsilon_\theta|$, при этом условие неизменности объема

принимает вид $\varepsilon_\theta + 2 \cdot \varepsilon_\rho = 0$, откуда $\varepsilon_n = (1/2) \cdot \varepsilon_\theta$.

Учитывая, что $\varepsilon_n = \ln(s_k/s)$ и $\varepsilon_\theta = \ln(R/R_0)$, получаем $\ln(s_k/s) = -1/2 \cdot \ln(R/R_0)$, откуда $s_k = s \cdot \sqrt{R_0/R}$. При полном перетягивании заготовки в матрицу фланец отсутствует, соответственно $R=r$, следовательно,

$$s_k = s \cdot \sqrt{R_0/r}, \quad (8.9)$$

или с учетом нормальной анизотропии металла [25]

$$s_k = s \cdot (R_0/r)^{1/(1+R^*)}. \quad (8.9a)$$

Для изотропного металла коэффициент анизотропии $R^* = 1$, при этом его значении формула (8.9a) переходит в формулу (8.9). Формула (8.9) может быть использована для приближенного расчета зазора z между пуансоном и матрицей штампа для вытяжки, приняв $z = s_k$; более точно значение z определяют по таблицам, приведенным в работе [18]. Таким образом, деформированное состояние по очагу деформации при вытяжке неоднородно, оно зависит от соотношения главных нормальных напряжений (см. рис. 8.11, б). В связи с этим толщина стенки детали, полученной вытяжкой, неравномерна по высоте: у кромки она больше, а на участке сопряжения с дном — меньше толщины исходной заготовки; толщина дна остается приблизительно равной толщине исходной заготовки (рис. 8.11, в).

Поперечное сечение детали с наименьшей толщиной стенки называют опасным, именно в нем деталь разрушается, происходит отрыв дна (рис. 8.12). Рассмотренное сечение опасно еще и по той причине, что кольцевой слой металла, находящийся в этом сечении, менее упрочнен, чем слои металла, находящиеся в вышерасположенных поперечных сечениях.

Если степень деформации не превышает допустимую, толщину стенки в опасном сечении приближенно можно определить так [16]:

$$s_{\min} = \frac{s}{(R_0/r)^{s/2 \cdot r_m}}. \quad (8.10)$$

Недостаток формулы (8.10) заключается в том, что в ней не учтено влияния характеристик механических свойств материала заготовки на s_{\min} .

В реальных условиях деформирования на характер распределения напряжений, возникающих при вытяжке, существенно влияет ряд факторов: упрочнение металла, силы контактного трения, изгиб и спрямление элементов заготовки при втягивании ее в матрицу, анизотропия механических свойств металла и пр.

Методика учета влияния перечисленных факторов подробно изложена в научно-технической литературе и учебниках [16, 22]. Следуя этой методике и используя степенную аппроксимацию кривой упрочнения, получена формула для определения наибольшего, по очагу пластической деформации, радиального растягивающего напряжения в произвольно фиксированный момент вытяжки для изотропного металла [16]:

$$\sigma_{\rho \max} = \sigma_B \cdot \left[\frac{1}{1 - \psi_p} \cdot \left(\frac{x}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}} \cdot \left(\ln \frac{R_0}{x} - x \right) + \frac{\mu \cdot Q}{\pi \cdot R_0 \cdot s \cdot \sigma_B} + \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \right] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu), \quad (8.11)$$

где $x = (R_0 - R)/R_0$ — относительное смещение края фланца в процессе вытяжки.

Первое слагаемое в приведенной формуле — напряжение, вызванное сопротивлением деформированию фланца заготовки с учетом упрочнения металла; второе — напряжение, возникающее при преодолении контактных сил трения, приложенных к плоской части (зеркалу) матрицы и прижимного кольца; третье — напряжение, возникающее от изгиба и спрямления заготовки при втягивании ее в матрицу. Множителем $(1 + 1,6 \cdot \mu)$ учитывают влияние дополнительных растягивающих напряжений, возникающих при преодолении контактных сил трения на рабочей кромке матрицы.

С увеличением x первый множитель второго слагаемого формулы (8.11) увеличивается, а второй — уменьшается. Следовательно, рассматриваемая функция должна иметь экстремальное значение. Это объясняется тем, что по мере втягивания заготовки в матрицу наружный радиус ее фланца R уменьшается, при этом значение $\sigma_{\rho \max}$ уменьшается. В то же время с уменьшением R степень деформации увеличивается и это приводит к увеличению напряжения текучести вследствие упрочнения металла и, следовательно, к увеличению $\sigma_{\rho \max}$.

В связи с этим в процессе вытяжки $\sigma_{\rho \max}$ изменяется немонотонно, и максимум этого напряжения возникает в некоторый промежуточный момент деформирования, когда $R_0 > R > r$. Исследование формулы (8.11) на максимум и минимум позволяет определить экстремальное значение относительного смещения фланца:

$$x^3 = (R_0 - R^3)/R_0 = \psi_p \cdot \ln(R_0/r); \quad (8.12)$$

здесь R^3 — экстремальный радиус фланца. Преобразуя (8.12), можно получить

$$R^3 = R_0 [1 - \psi_p \cdot \ln(R_0/r)]. \quad (8,12a)$$

Экстремальный радиус фланца R^3 тем меньше, чем выше интенсивность упрочнения материала заготовки, характеризуемая величиной ψ_p , и выше степень деформации, характеризуемая логарифмом отношения R_0/r . При $\psi_p = 0,2$ и $R_0/r = 2$ экстремальный радиус фланца $R^3 = 0,86 \cdot R_0 = 1,72 \cdot r$, что согласуется с экспериментальными данными. Подставив в формулу (8.11) вместо x величину x^3 согласно (8.12), получим экстремальное значение $\sigma_{\rho \max}^3$:

$$\sigma_{\rho \max}^3 = \sigma_B \cdot \left[\ln \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{1}{1 - \psi_p}} + \frac{\mu \cdot Q}{\pi \cdot R \cdot s \cdot \sigma_B} + \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \right] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu). \quad (8.13)$$

При допустимом соотношении радиусов заготовки и вытягиваемого стакана (для пластических материалов $R/r < 2$) вся заготовка перетягивается в матрицу без разрушения, в этом случае $\sigma_{\rho}^3 < \sigma_s$. При вытяжке с более высокой

степенью деформации ($R_0/r > 2$) экстремальное напряжение σ_ρ^3 может достигнуть напряжения текучести σ_s , которое, как это установлено экспериментально, в момент обрыва дна детали равно $(1,1 \div 1,2) \cdot \sigma_b$; приближенно принимают $\sigma_{\rho \max}^3 \cong \sigma_s$ [16]. В этом случае без разрушения возможна лишь незавершенная вытяжка с так называемым широким фланцем.

В момент обрыва дна детали фланец имеет определенный радиус, который называют критическим $R_{кр}$. Критический радиус фланца приближенно определяют из условия $\sigma_{\rho \max}^3 = \sigma_s$. Используя формулу (8.11) и приняв допущение о том, что $\ln(R_0/r) + x \cong \ln(R_0/x)$, можно определить критическое относительное смещение фланца $x_{кр}$ [16]:

$$x_{кр} = \psi_p \cdot \left[\frac{1 - \psi_p}{\ln(R_0/r)} \cdot \frac{1}{1 + 1,6 \cdot \mu} - \frac{\mu \cdot Q}{\pi \cdot R_0 \cdot s \cdot \sigma_b} - \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \right]^{\frac{1 - \psi_p}{\psi_p}}. \quad (8.14)$$

С учетом (8.14) критический радиус фланца

$$R_{кр} = R_0 \cdot (1 - x_{кр}).$$

Если радиус фланца вытягиваемой детали больше критического ($R > R_{кр}$), он считается широким. Вытяжка деталей с широким фланцем возможна с более высокой степенью деформации, чем вытяжка детали без фланца (с полным перетягиванием заготовки в матрицу), или деталей с фланцем, радиус которого меньше критического. Особенность технологии вытяжки деталей с широким фланцем рассмотрена в п. 8.5.

Последующие переходы вытяжки

Последующие переходы вытяжки. выполняются в матрицах с конической заходной частью. В качестве заготовки служит стакан, полученный на первом переходе. Процесс ведется без прижима заготовки, если относительная толщина $(s/D_3) \cdot 100 \geq (5 \div 7) (1 - m)$, и с прижимом заготовки, если $(s/D_3) \cdot 100 < (5 \div 7) (1 - m)$; здесь $m = r/R_3$.

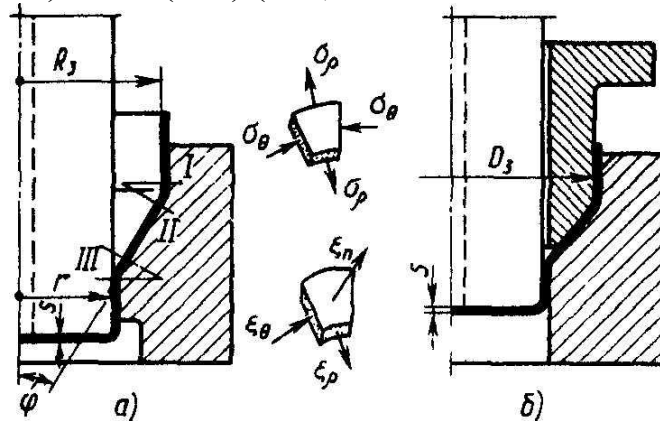


Рис. 8.13. Установившаяся стадия вытяжки последующих переходов:

а — без прижима заготовки; *б* — с прижимом заготовки

При выполнении последующих переходов вытяжки очаг деформации охватывает три кольцевых участка — два тороидных и один конический, ограниченный радиусами R_3 и r (рис. 8.13). В период установившегося

процесса вытяжки протяженность очага деформации остается неизменной, в то время как на первом переходе, по мере втягивания заготовки в матрицу, очаг пластической деформации сокращается.

Условия деформирования на последующих переходах вытяжки менее благоприятны, чем на первом переходе, в связи с тем, что заготовка (стакан), получившая упрочнение, имеет переменное, возрастающее по мере удаления от донного участка, напряжение текучести и переменную толщину стенки по высоте.

Один из вариантов решения задачи о распределении напряжений на установившейся стадии вытяжки выполнен на базе безмоментной теории оболочек после установления распределения напряжений по трем геометрическим простым участкам очага деформации: *I* и *III* и *II* (см. рис. 8.13). В результате совместного решения уравнений, определяющих равновесие и пластичность каждого участка очага деформации в отдельности, и использования краевых условий на границах этих участков получена формула для определения наибольшего радиального растягивающего напряжения $\sigma_{\rho \max}$, возникающего при вытяжке отоженной заготовки в штампе без прижимного устройства [16]:

$$\sigma_{\rho \max} = \sigma_{s \text{ ср}} \cdot \left[(1 - r/R_3) \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \varphi) + \sqrt{\frac{s}{2 \cdot R_3}} \cdot \sin \varphi + \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \right] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu). \quad (8.15)$$

Среднее, по очагу деформации, напряжение текучести $\sigma_{s \text{ ср}}$ можно определить в результате использования линейной аппроксимации кривой упрочнения первого вида:

$$\sigma_{s \text{ ср}} = \sigma_{\text{т0}} + 0,5 \cdot \Pi \cdot (1 - r/R_3).$$

Из анализа формулы (8.15) следует, что существует оптимальный угол наклона образующей конической матрицы для вытяжки, при котором значение $\sigma_{\rho \max}$ наименьшее. Приблизительно, значение оптимального угла определяется так:

$$\sin \varphi_{\text{опт}} = \sqrt{\mu(1 - r/R_3)} \cdot \sqrt{2 \cdot R_3 / s}. \quad (8.16)$$

В зависимости от условий деформирования оптимальные углы матрицы изменяются от 10 до 35°.

Последующие переходы вытяжки могут выполняться как в конических, так и в радиальных (цилиндрических) матрицах со скругленной (торообразной) заходной частью, например, при вытяжке деталей с широким фланцем или при вытяжке в ленте (см. § 8.6).

На установившейся стадии последующего (второго) перехода вытяжки в конической матрице происходит существенное изменение кривизны срединной поверхности образующей заготовки, вызывающее возникновение изгибающих моментов у границы упругой и пластической зон деформации. При этом в цилиндрическом участке заготовки, еще не втянутом в матрицу, возникают окружные растягивающие напряжения σ_{θ} , способные, в определенных условиях, вызвать появление продольных трещин. Этому способствует еще и деформационное упрочнение заготовки после первого

перехода вытяжки, в связи с чем ее пластические свойства ухудшились.

Если считать, что напряжение σ_θ постоянно по высоте упругой зоны заготовки высотой h , то его значение можно определить из условия равенства изгибающих моментов, действующих на границе упругой и пластической зон заготовки:

$$0,25 \cdot \sigma_s \cdot s^2 \cdot R_3 d\gamma = \sigma_\theta \cdot s \cdot l^2 \sin \frac{d\gamma}{2},$$

где $d\gamma$ — центральный элементарный угол (рис. 8.14, а). Принимая $\sin \frac{d\gamma}{2} \approx \frac{d\gamma}{2}$ и сделав необходимые преобразования, получим

$$\sigma_\theta = \sigma_s \cdot R_3 \cdot s / (2 \cdot l^2). \quad (8.17)$$

По мере втягивания заготовки в матрицу высота l уменьшается, в связи с чем согласно формуле (8.17) окружное напряжение, σ_θ возрастает. Когда напряжение σ_θ достигает напряжения текучести σ_θ , высота не втянутого в матрицу участка заготовки [16]

$$l = \sqrt{s \cdot R_3 / 2}. \quad (8.18)$$

Таким образом, краевая часть заготовки начинает пластически деформироваться раньше, чем войдет в коническую полость матрицы (так как $l > 0$), при этом диаметр заготовки несколько увеличится.

Исследования, выполненные И. А. Норицыным, показали, что окружные растягивающие напряжения σ_θ , возникающие в еще не втянутой в матрицу части заготовки, в определенных условиях могут вызвать появление продольных трещин вдоль образующей заготовки (рис. 8.14, б). Для устранения возможности появления указанного дефекта И. А. Норицыным были предложены матрицы для вытяжки с реактивной полостью в виде кольца высотой $H = 0,4 \cdot D$ (рис. 8.14, в), препятствующей появлению и развитию окружных деформаций. Использование матриц с реактивной полостью позволяет вести многопереходную вытяжку без межоперационных отжигов.

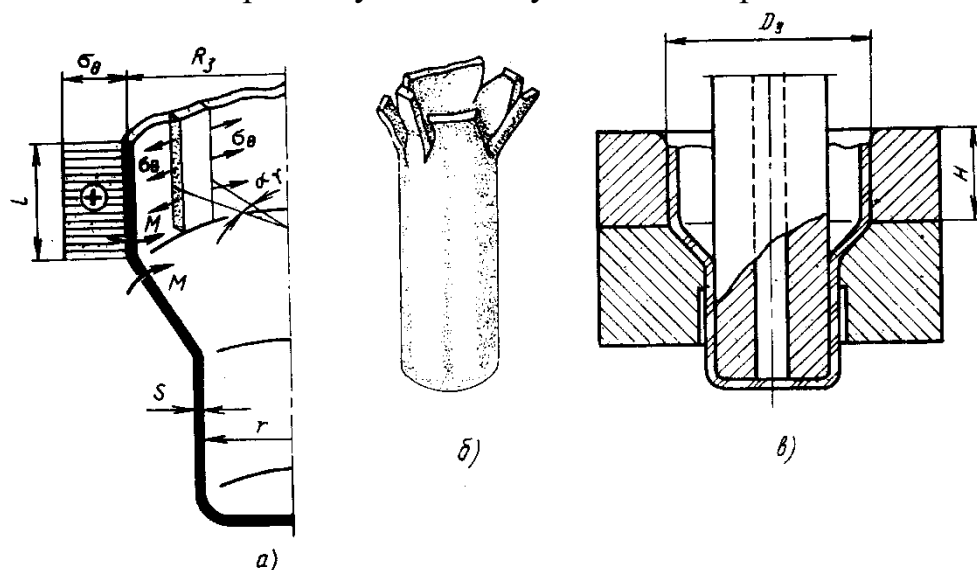


Рис. 8.14. Особенности вытяжки последующих переходов:
а - эпюра распределения растягивающих напряжений; б - трещины возможные продольные; в - матрица с реактивной полостью

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Размеры и форма заготовки. Исходя из предположения о том, что приращение площади поверхности вытягиваемой детали из-за утонения стенки равно уменьшению площади ее поверхности вследствие утолщения стенки, диаметр заготовки можно определить из условия $F_{\text{дет}} = F_{\text{заг}}$.

Если это условие не выполняется, то вводится поправочный коэффициент $f_{\text{ср}}$, учитывающий среднее изменение площади поверхности заготовки в процессе вытяжки. Коэффициент $f_{\text{ср}}$ можно определить, используя приближенную эмпирическую формулу Л.А. Шофмана:

$$f_{\text{ср}} = F_{\text{заг}} / F_{\text{дет}} = 1/[0,95 + 0,8 \cdot \mu \cdot (s/r_m) \cdot K_b^2]. \quad (8.19)$$

Наибольшее влияние на изменение $f_{\text{ср}}$ оказывает коэффициент вытяжки $K_b = D_0/d$. Чем он больше, тем меньше $f_{\text{ср}}$.

В зависимости от соотношения параметров, входящих в формулу (8.19), $f_{\text{ср}}$ может быть больше или меньше единицы, в связи с чем площадь поверхности детали после вытяжки может увеличиваться ($f_{\text{ср}} < 1$) и уменьшаться ($f_{\text{ср}} > 1$) или оставаться неизменной ($f_{\text{ср}} = 1$).

Это объясняется тем, что с изменением K_b , μ и r_m изменяются и радиальные растягивающие и тангенциальные сжимающие напряжения σ_r и σ_θ , следовательно, изменяется протяженность участков фланца вытягиваемой детали с преобладающими растягивающими или преобладающими сжимающими напряжениями. Последнее связано с утонением или утолщением фланца и, следовательно, с увеличением или уменьшением площади поверхности детали после вытяжки.

Для деталей, имеющих форму тел вращения, заготовка, как правило, имеет форму круга, поэтому условие равенства площади поверхности заготовки и детали при постоянной толщине заготовки может быть представлено в виде

$$F_{\text{дет}} = 0,785 \cdot D_0^2,$$

откуда диаметр заготовки

$$D_0 = 1,13 \cdot \sqrt{F_{\text{дет}}}. \quad (8.20)$$

Площадь поверхности детали $F_{\text{дет}}$ вычисляется путем суммирования площадей поверхностей геометрически простых элементов, из которых состоит деталь (рис. 8.16), диаметр заготовки можно определить, применяя следующую зависимость:

$$D_0 = 1,13 \cdot \sqrt{f_1 + f_2 + \dots + f_n} = 1,13 \cdot \sqrt{\sum f_i} \quad (8.21)$$

где f_n — поверхность геометрически простого элемента детали. При расчете диаметра заготовки для вытяжки осесимметричной детали необходимо учитывать припуск на обрезку волнистой кромки полуфабриката, которая образуется вследствие плоскостной анизотропии механических свойств материала заготовки. Выпуклые участки кромки называют *фестонами*, их высота достигает 20 % высоты детали. Фестоны располагаются на участках кромки детали симметрично относительно направления прокатки (рис. 8.17,а).

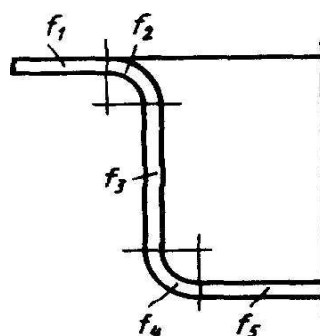


Рис. 8.16. Схема разделения поверхности детали на геометрически простые элементы

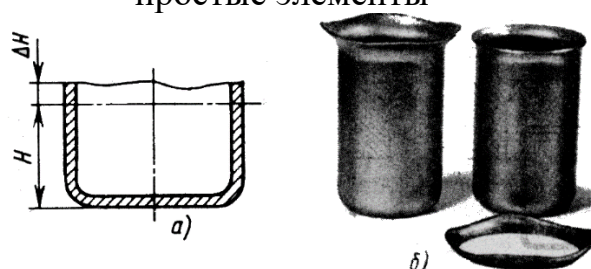


Рис. 8.17. Деталь с фесто́нами

Расположение фесто́нов зависит от свойств материала, заготовки, режимов прокатки и термической обработки листа. При вытяжке деталей из холоднокатаных листов со степенью обжатия менее 30 % после рекристаллизационного отжига фесто́ны образуются под углом 45° , а при более высоком, обжатии — под углами 0 и 90° относительно направления прокатки листа. При вытяжке стальных деталей фесто́ны располагаются под углами 0 и 90° , а при вытяжке деталей из алюминиевых сплавов и латуни под углом 45° относительно направления прокатки листа. Исходная анизотропия холоднокатаного листа, из которого получают заготовки, — следствие образования текстуры — предпочтительной ориентировки кристаллографических осей зерен металла. В процессе деформации зерна металла и неметаллические включения приобретают вытянутую форму, в связи с чем образуется строчечная структура, предопределяющая анизотропию металла.

После вытяжки фесто́ны удаляются обрезкой, значение припуска на обрезку ΔH зависит от соотношения диаметра и высоты вытягиваемой детали и толщины заготовки. Экспериментально установлено, что ΔH составляет от 5 до 20 % высоты детали, чем больше относительная высота и толще металл, тем больше припуск на обрезку. Обрезку фесто́нов проводят ступенчатым пуансоном, состоящим из рабочего участка и ловителя, диаметр которого на 0,2—0,3 мм меньше внутреннего диаметра детали (рис. 8.18, а).

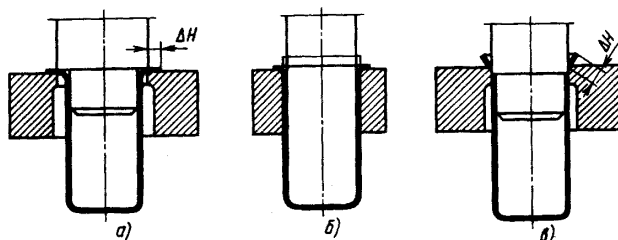


Рис. 8.18. Способы удаления фесто́нов: а, б — обрезка фланца с

последующей вытяжкой; δ — «откус» неровного края в штампе

При обрезке диаметр матрицы равен разности наружного диаметра фланца детали и удвоенного припуска на обрезку $2 \cdot \Delta H$. При этом после обрезки требуется дополнительная операция — вытяжка краевого участка детали (рис. 8.18, б). При обрезке по схеме, показанной на рис. 8.18, в, диаметр матрицы равен наружному диаметру детали. При опускании пуансона происходит отделение неровного края детали (откус), после чего пуансон проталкивает деталь сквозь матрицу. Деталь, полученная после удалений неровного края в штампе, показана на рис. 8.17, б. Если деталь вытягивается за одну операцию, обрезку фестонов можно совместить с вытяжкой в одном штампе, в этом случае рабочая кромка матрицы должна быть округлена радиусом, равным не менее 6—8 толщин заготовки. Один из способов уменьшения неравномерности высоты вытянутой детали — использование фигурных (профильных) заготовок, форма и размеры которых определяются с учетом анизотропии металла. Размеры фигурной заготовки для вытяжки определяются из условия равенства времени перемещения материальных точек K и M , лежащих на ее контуре вдоль оси симметрии фестонов и впадин, до контура отверстия (проема) матрицы (рис. 8.19, а). В результате использования этого условия получена формула для определения радиуса дуги, касательной к впадине [25]:

$$R_x / R_m = \left[1 + (2 + f_{cp}) \cdot (K^{2+f_{\phi}} - 1) / (2 + f_{cp}) \right]^{1/(2+f_{\phi})},$$

где R_m — радиус проема матрицы. Значения f_{ϕ} и f_b зависят от расположения фестонов и впадин относительно направления прокатки листа, они определяются по формулам $f_0 = -1 \cdot (1 + R_{90}^*)$; $f_{90} = -1 \cdot (1 + R_0^*)$; $f_{45} = -1 \cdot (1 + R_{45}^*)$. При вытяжке цилиндрических деталей из стали 08кп фестоны расположены вдоль и поперек направления прокатки, а впадины под углом 45° к ней, следовательно, $f_b = f_0$ и $f_{\phi} = f_{45}$. Радиус R_0 определяется из условия неизменности поверхности. Радиусы R_o и R_x определяют максимальный и минимальный размеры фигурной заготовки, при вытяжке которой фестоны практически отсутствуют. Контур заготовки строится с использованием уравнения косинусоиды, с амплитудой, равной $(1/2)(R_0 - R_x)$, и периодом $\pi/2$ (см. рис. 8.19, а). При вырубке фигурных заготовок впадина располагается вдоль или поперек направления прокатки. Применение фигурных заготовок для вытяжки цилиндрических деталей снижает расход металла на 15—20 %, однако стоимость штампа для вырубки при этом увеличивается.

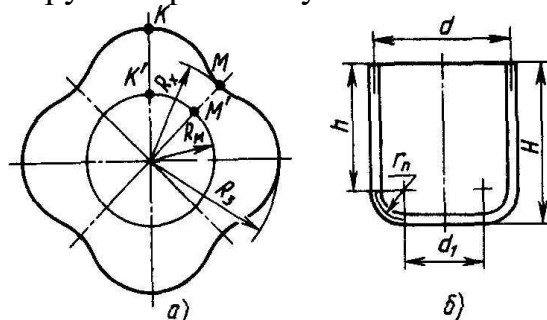


Рис. 8.19. Фигурная (профильная) заготовка (а) для получения деталей без

фестонов (б)

Кроме использования фигурных заготовок для уменьшения влияния анизотропии металла на неравномерность высоты деталей, получаемых вытяжкой, применяют матрицы с переменной (по контуру проема) кривизной рабочей кромки, неодинаковый нагрев фланца, дифференцированный по контуру матрицы прижим фланца и пр.

При определении диаметра заготовок для деталей, получаемых вытяжкой и имеющих стенку толщиной менее 2 мм, расчет ведется по наружным (внешним) размерам детали, а для деталей со стенкой толщиной свыше 2 мм — по срединным ее размерам.

В качестве примера определим диаметр заготовки для осесимметричной детали с учетом припуска на обрезку неровного края ΔH . Для цилиндрического стакана без фланца (см. рис. 8.19, б) условие равенства площади поверхности заготовки и детали определяется уравнением

$$\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} + \pi \cdot d \cdot (h + \Delta H) + \frac{\pi}{4} \cdot (2 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot r_{\Pi} + 8 \cdot r_{\Pi}^2), \quad (8.22)$$

откуда

$$D_0 = \sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d \cdot (h + \Delta H) + 2 \cdot r_{\Pi} \cdot (\pi \cdot d_1 + 4 \cdot r_{\Pi})}. \quad (8.22a)$$

Диаметр заготовки можно определить по более простой формуле, приняв $r_{\Pi}=0$, $h=H$ и $d_1=d$, тогда

$$D_0 \approx \sqrt{d \cdot (d + 4 \cdot H)} \quad (8.22б)$$

В данном случае припуск на обрезку неровного края ΔH можно не назначать, так как при неизменных d и H и при $r_{\Pi}=0$ площадь поверхности детали больше, чем при $r_{\Pi} \neq 0$.

Диаметр заготовки для осесимметричных деталей со сложной криволинейной образующей определяется двумя методами: графоаналитическим с использованием теоремы Гульдена-Паппа и чисто графическим с использованием правила веревочного многоугольника.

Силовые условия

Силовые условия; деформирующие усилие, усилие прижима, работа деформирования.

В начальной стадии формоизменения *деформирующее усилие* — функция угла охвата α (рис. 8.20):

$$P_{\alpha} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot s \cdot \sigma_{\rho \max} \cdot \sin \alpha,$$

где $\rho = r - r_{\Pi} \cdot (1 - \sin \alpha)$.

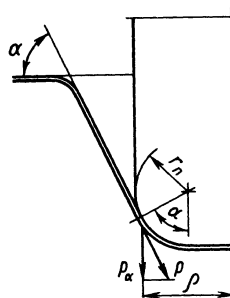


Рис. 8.20. Схема действия сил на начальной стадии вытяжки

Из приведенной формулы следует, что при угле α , близком к нулю, деформирующее усилие близко к нулю даже при большом значении $\sigma_{\rho \max}$. Это объясняется тем, что проекции элементарных сил, вызванных напряжениями $\sigma_{\rho \max}$ на ось Пуансона малы.

По мере вытягивания заготовки в матрицу угол α стремится к $\pi/2$, после достижения этого значения он остается практически неизменным и на усилие не влияет.

При увеличении угла α увеличивается и проекция вектора $\sigma_{\rho \max}$ на ось Пуансона, достигая наибольшего значения при $\alpha = \pi/2$

$$P_{\max} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot s \cdot \sigma_{\rho \max} \cdot \quad (8.23)$$

Подставляя значение $\sigma_{\rho \max}$ согласно (8.3), (8.13) и (8.15) в (8.23), можно получить формулы для определения деформирующего усилия с прижимом и без прижима заготовки на первом и последующих переходах вытяжки.

В тех случаях, когда требуется подобрать оборудование по силовому параметру, деформирующее усилие определяют приближенно по упрощенным формулам. Например, усилие вытяжки можно определить, как произведение наибольшего, по очагу пластической деформации, радиального растягивающего напряжения, возникающего в идеальных условиях вытяжки (8.5), на площадь поперечного сечения детали диаметром d . После замены в формуле (8.5) σ_s на σ_b и разложения в ряд имеющегося в этой формуле логарифма отношения D_0/d (приняв во внимание только первый член ряда) формула для определения деформирующего усилия примет вид

$$P_b \approx \pi \cdot d \cdot s \cdot (K_b - 1) \cdot \sigma_b, \quad (8.24)$$

где $K_b = D_0/d$.

Влияние упрочнения и сил трения в этой формуле в известной степени компенсируется тем, что $(D_0/d - 1) > \ln(D_0/d)$ и $\sigma_b > \sigma_s$.

Согласно рекомендациям Романовского В. П. [18] деформирующее усилие определяется как произведение временного сопротивления разрыву σ_b на площадь поперечного сечения вытягиваемой детали и на поправочный коэффициент ξ , значение которого зависит от степени деформации, относительной толщины заготовки и порядкового номера перехода вытяжки:

$$P_e \approx \xi \cdot \sigma_e \cdot \pi d s.$$

Коэффициент ξ определяют по таблицам, составленным на основании обобщения экспериментальных данных. Для первого перехода вытяжки $\xi_1 = 0,28 \div 1,1$, для второго — $\xi_2 = 0,15 \div 1,1$ и т. д. значение ξ увеличивается с увеличением степени деформации и относительной толщины заготовки.

Усилие прижима заготовки должно удовлетворять двум условиям, а именно: оно должно быть не настолько велико, чтобы вызвать отрыв дна при вытяжке, и не настолько мало, чтобы образовались складки в зоне пластической деформации.

Приближенно усилие прижима Q можно представить, как произведение среднего удельного усилия μ , удовлетворяющего поставленным условиям, на площадь фланца детали F , находящуюся под прижимным кольцом в

начальный момент вытяжки:

$$Q = q \cdot F_{\text{пл.}}$$

При вытяжке цилиндрических деталей из плоской заготовки усилие прижима будет равно

$$Q = 0,785 \cdot [D_0^2 - (d + 2 \cdot r)^2] \cdot q. \quad (8.25)$$

На последующих переходах вытяжки усилие прижима определяется по сходной формуле

$$Q = 0,785 \cdot [d_{n-1}^2 - (d_n + 2 \cdot r_m)^2] \cdot q, \quad (8.26)$$

где n — порядковый номер перехода вытяжки; d_{n-1} и d_n — диаметры полуфабрикатов на предыдущем и последующем переходах вытяжки.

Удельное (среднее) усилие прижима q зависит, в основном, от характеристик механических свойств материала, толщины заготовки, а также от степени деформации. В зависимости от перечисленных факторов согласно данным, приведенным в справочной литературе [18], $q = 4,5 \div 8$ МПа, чем тоньше заготовка и больше $K_B = D_0/d$, тем удельное усилие прижима больше (рис. 8.21).

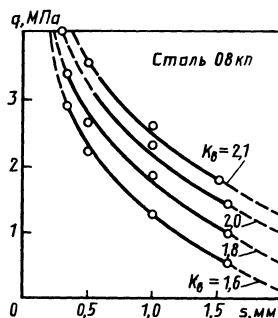


Рис. 8.21. Зависимость удельного усилия прижима от относительной толщины заготовки

Для определения усилия прижима при втягивании плоской заготовки в матрицу можно использовать приближенную формулу, полученную в результате обработки экспериментальных данных [16]:

$$Q = 0,1 \cdot \left[1 - \frac{18 \cdot K_B \cdot s}{(K_B - 1) \cdot D_0} \right] \cdot K_B^2 \cdot P_B, \quad (8.27)$$

где P_B — деформирующее усилие, определяемое по формуле (8.24).

Из формулы (8.27) следует, что усилие прижима Q возрастает с увеличением $K_B = D_0/d$, усилия P_B и с уменьшением относительной толщины заготовки s/D_0 . При $D \rightarrow d \ll 18 \cdot s$ $Q=0$, т. е. необходимость в применении прижима отпадает.

А. А. Бебрисом было установлено, что при вытяжке усилие прижима может изменяться в определенных пределах от Q_{max} до Q_{min} . Интервал $Q_{\text{max}} \rightarrow Q_{\text{min}}$ зависит от степени деформации заготовки: чем она больше, тем интервал изменения Q меньше (рис. 8.22).

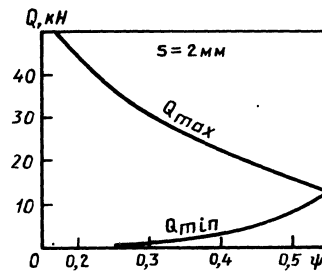


Рис. 8.22. Зависимость интервала $Q_{\max} - Q_{\min}$ от степени деформации

Только при вытяжке с предельно допускаемой (критической) степенью деформации усилие прижима должно быть вполне определенным, единственным. Отсюда следует, что чем выше степень деформации при вытяжке, тем тщательнее должна быть настройка процесса по зазору между зеркалом матрицы и зеркалом прижимного кольца штампа.

Исследования показали, что в процессе вытяжки усилие прижима, обеспечивающее отсутствие складок, изменяется вместе с уменьшением ширины фланца вытягиваемой детали и зависит от итоговой степени деформации толщины и характеристик механических свойств ее материала.

Работу деформирования A можно определить интегрированием уравнения, функционально связывающего деформирующее усилие P_B и путь пуансона:

$$A = \int_0^H P_B dh = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot s \cdot \int_0^H \sigma_{\rho_{\max}} dh \quad (8.28)$$

При отсутствии упрочнения $\psi_p = 0$ и $\sigma_B = \sigma_s$; для данных условий деформирования формула (8.13) для определения $\sigma_{\rho_{\max}}$ может быть представлена в виде

$$\sigma_{\rho_{\max}} = \beta \cdot \sigma_s \cdot [\ln(R/r) + \mu \cdot Q / (\pi \cdot R \cdot s \cdot \sigma_s) + s / (2 \cdot r_m + s)] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu). \quad (8.13a)$$

В этой формуле радиус фланца R , изменяющийся в процессе вытяжки, определяется из условия равенства площади поверхности заготовки и детали. При малых r_m и r_n по сравнению с диаметром заготовки

$$R = \sqrt{R_0^2 - 2 \cdot r \cdot H}. \quad (8.29)$$

Совместное решение формул (8.28), (8.29) и (8.13a) с учетом преобразования логарифмической функции, входящей в формулу (8.13a), позволяет определить работу деформирования при вытяжке неупрочняющегося металла [22]:

$$A = \pi \cdot r^2 \cdot (K_B - 1) \cdot s \cdot \sigma_s \cdot \left[\ln K_B - \frac{K_B^2 - 1}{4 \cdot K_B^2} + \frac{2 \cdot \mu \cdot Q}{\pi \cdot r \cdot s \cdot (K_B + 1) \cdot \sigma_s} + \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \right] \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu), \quad (8.30)$$

где $K_B = D/d$.

Анализ формулы (8.30) показывает, что работа деформирования увеличивается с увеличением K_B , коэффициента трения μ , усилия прижима Q , относительной толщины заготовки s/D и радиуса вытягиваемой детали r . При $K_B = 1$ $A = 0$.

Предельная (критическая) степень деформации. Степень деформации при вытяжке характеризуется относительным сокращением площади поперечного

сечения вытягиваемой детали при приблизительно неизменной толщине стенки. Учитывая это, степень деформации

Степень деформации и коэффициент вытяжки связаны зависимостью

$$\psi = (K_B - 1) / K_B, \quad (8.31)$$

из которой следует, что чем больше степень деформации (и, следовательно, относительное сокращение диаметра вытягиваемого полуфабриката), тем значение K_B больше.

Существует предельная (критическая) степень деформации ψ_k и, следовательно, предельный (критический) коэффициент вытяжки $K_{вп}$, при котором напряжения в опасном сечении вытягиваемого полуфабриката близки к разрушающим.

Определение предельного (критического) коэффициента вытяжки теоретическим путем довольно сложно. Сложность решения этой задачи заключается в том, что растягивающие напряжения, необходимые для пластического формоизменения фланца, зависят от большого числа факторов, степень влияния которых установлена лишь приближенно вследствие ряда допущений, принимаемых в анализе напряженно-деформированного состояния, а условия разрушения полуфабриката основываются на экспериментальных данных. Поэтому задача по определению предельного коэффициента вытяжки теоретически может быть решена только приближенно, основная цель такого рода решения — установление функциональной связи между определяемым параметром и факторами, влияющими на его значение.

Одно из решений по определению предельного коэффициента вытяжки из первой операции при штамповке с прижимом заготовки в цилиндрической матрице с радиальной заходной частью было получено с учетом упрочнения металла, контактных сил трения и изгибных напряжений в результате использования уравнения (8.13) и принятого условия равенства $\sigma_{\rho \max}$ напряжению текучести σ_s , которое приближенно может быть принято равным временному сопротивлению материала заготовки σ_B [23]:

$$K_{вп} = \exp \left[0,9 \cdot \left(\frac{1}{1 + 1,6 \cdot \mu} - \frac{s}{2 \cdot r_m + s} - \frac{\mu \cdot Q}{\pi \cdot R \cdot s \cdot \sigma_B} \right)^{1 - \psi_p} \right] \quad (8.32)$$

Расчеты по формуле (8.32) дают приближенный результат, однако она отражает физическую сущность процесса вытяжки, так как ее анализ позволяет установить характер и степень влияния учтенных факторов на значение $K_{вп}$.

Следует отметить, что условие $\sigma_{\rho \max} = \sigma_B$ — приближенное, поскольку значение $\sigma_{\rho \max}$ действительное, а значение σ_B — условное. Кроме того, установленное экспериментально условие отрыва дна при вытяжке имеет вид $\sigma_{\rho \max} = (1,1 \div 1,2) \cdot \sigma_B$. Поправочный коэффициент (1,1—1,2) в какой-то мере компенсирует указанное допущение, не нарушая функциональной зависимости между $K_{вп}$ и факторами, влияющими на его значение.

При вытяжке деталей с малой относительной толщиной стенки ($100 \cdot s/D < 0,1$) складкообразование имеет своеобразный характер: вместо волн, пересекающих весь фланец, образуется большое число мелких складок малой длины в радиальном направлении. При этом создаются условия, при которых удельное усилие прижимного кольца распределяется по всей поверхности фланца равномерно, следовательно

С учетом этого получена формула для определения радиального растягивающего напряжения [23]:

$$\sigma_{\rho \max} = \beta \cdot \sigma_s \cdot \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{\mu \cdot Q}{\pi \cdot (R+r) \cdot s \cdot \sigma_s} + \frac{s}{2 \cdot r_M + s} \right) \quad (8.33)$$

Сравнивая результаты расчетов по формулам (8.33) и (8.13а), можно установить, что при равномерно распределенном по поверхности фланца удельном усилии прижима (следовательно, и сил трения) напряжения в опасном сечении больше, чем, когда удельное усилие (и силы трения) приложено только к краевому участку фланца.

Если при решении той же задачи использовать степенную аппроксимацию кривой упрочнения вида $\sigma_s = C \cdot \varepsilon^n$ (где $\varepsilon = \ln R/r$ — логарифмическая степень деформации), то получить результат в виде аналитической функции не удастся. Поэтому численное решение задачи выполнено с помощью ЭВМ. Результат такого решения приведен в виде кривых в осях K_B — W при $\mu = \text{const}$ и переменном n (рис. 8.23, а) и $n = \text{const}$ и переменном μ (рис. 8.23, б), в которых параметр $W = 2 \cdot q \cdot r / \sigma_B \cdot e^n \cdot s$. Анализ рисунков показывает, что предельный (критический) коэффициент вытяжки K_B увеличивается с уменьшением q и r и увеличением σ_B , n и s .

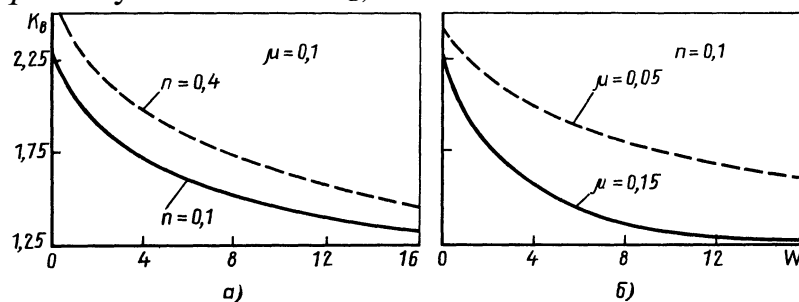


Рис. 8.23, Зависимость предельного коэффициента вытяжки K_B от параметра W :

а — при $\mu = \text{const}$; б — при $n = \text{const}$

На предельное формоизменение при вытяжке положительно сказывается анизотропия механических свойств холоднокатаного листа. При коэффициенте нормальной анизотропии $R^* > 1$ металл хорошо сопротивляется утонению, предельное формоизменение за одну операцию увеличивается. В данном случае принимают во внимание минимальный коэффициент анизотропии R^*_{\min} (а не максимальный или средний), так как предельное состояние (появление шейки) возникает между фестонами, во впадине, т. е. в направлении R^*_{\min} . Предельный коэффициент вытяжки с учетом анизотропии металла можно определять, если использовать условие текучести Мизиса—Хилла. Для трансверсально-изотропного металла при плоском

деформированном состоянии условие текучести в сокращенной записи имеет вид

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \cdot \sigma_s,$$

Где

$$\beta = \frac{1 + R^*}{\sqrt{1 + 2 \cdot R^*}}. \quad (8.34)$$

Из формулы (8.34) следует, что изменение R^* от 1 до 2 вызывает увеличение β примерно в 1,2 раза и оказывает влияние на расчетную величину $/C_{кр}$. Зависимость предельного коэффициента вытяжки ($K_b = D_0/d$) от значения R^*_{min} , построенная с учетом анизотропии по данным Ю. М. Арышенского, показана на рис. 8.24. Из рисунка видно, что с увеличением R^* коэффициент вытяжки увеличивается; при $R^* > 1$ он больше и при $R^* < 1$ — меньше коэффициента вытяжки изотропного металла, у которого $R^* = 1$.

Коэффициенты вытяжки, полученные расчетным путем, являются предельными (критическими). Для создания некоторого запаса устойчивости расчетные значения коэффициента вытяжки необходимо уменьшить на 10—15%. Учитывая это, допустимый коэффициент вытяжки K'_b будет равен

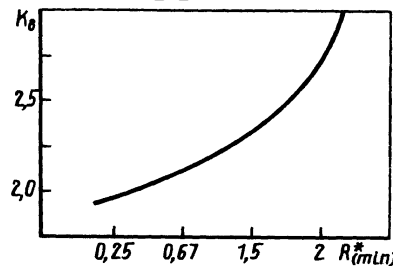


Рис. 8 24. Зависимость предельного коэффициента вытяжки K_b от коэффициента нормальной анизотропии R^*_{min}

Допустимые коэффициенты вытяжки могут быть определены на основании экспериментов и производственных данных. В справочной литературе имеются специальные таблицы для определения допустимых коэффициентов вытяжки, широко применяемые в инженерной практике при проектировании технологических процессов производства штампованных деталей. В работе [18] и др. коэффициенты вытяжки (m_b) приведены в виде отношений d/D_0 или d_N/d_{N-1} , поэтому их значения меньше единицы. Связь между K_b и m_b следующая: $m_b = 1/K_b$.

Если многопереходная вытяжка ведется без межоперационных отжигов, то при увеличении порядкового номера перехода N значение K_b уменьшается вследствие возрастания упрочнения материала заготовки. Разница в значении K_b существенна лишь на первом и втором переходах вытяжки ($K_1 > K_2$). При выполнении последующих переходов значение K_b изменяется незначительно. С известным приближением можно считать, что $K_2 \approx K_3 \approx \dots \approx K_N = const$. Указанное явление объясняется тем, что с увеличением степени деформации интенсивность упрочнения металла постепенно затухает.

Если многопереходная вытяжка ведется без межоперационных отжигов, то при увеличении порядкового номера перехода N значение K_b уменьшается вследствие возрастания упрочнения материала заготовки. Разница в значении K_b существенна лишь на первом и втором переходах вытяжки ($K_1 > K_2$). При

выполнении последующих переходов значение K_b изменяется незначительно. С известным приближением можно считать, что $K_2 \approx K_3 \approx \dots \approx K_N = \text{const}$. Указанное явление объясняется тем, что с увеличением степени деформации интенсивность упрочнения металла постепенно затухает.

Определение числа операций (или переходов) и размеров полуфабрикатов при вытяжке цилиндрических деталей. Если известны допустимые коэффициенты вытяжки для первой и последующих операций (определенные расчетом или принятые согласно экспериментальным данным), диаметры полуфабрикатов, по переходам вытяжки, легко определяются согласно следующим зависимостям (рис. 8.25):

$$\begin{aligned} d_1 &= D_0 / K_1; \\ d_2 &= d_1 / K_2; \\ d_3 &= d_2 / K_3 = D_0 / K_1 \cdot K_2 \cdot K_3. \end{aligned} \quad (8.35)$$

Учитывая, что при вытяжке без межоперационных отжигов $K_2 \approx K_3 \approx \dots \approx K'$,

$$d_2 = \frac{D_0}{K_1 \cdot K'}; \quad d_3 = \frac{D_0}{K_1 \cdot (K')^2}; \quad d_N = \frac{D_0}{K_1 \cdot (K')^{N-1}}, \quad (8.35a)$$

где N — число операций (переходов) вытяжки. Более точно K' определяют как среднеарифметическое значение коэффициентов вытяжки на последующих переходах: $K' = (K_2 + K_3 + \dots + K_N) / (N - 1)$. Для определения N можно использовать уравнение (8.35a), прологарифмировав его:

$$N = 1 + \frac{\lg d_N - \lg(D_0 / K_1)}{\lg(1 / K')}. \quad (8.36)$$

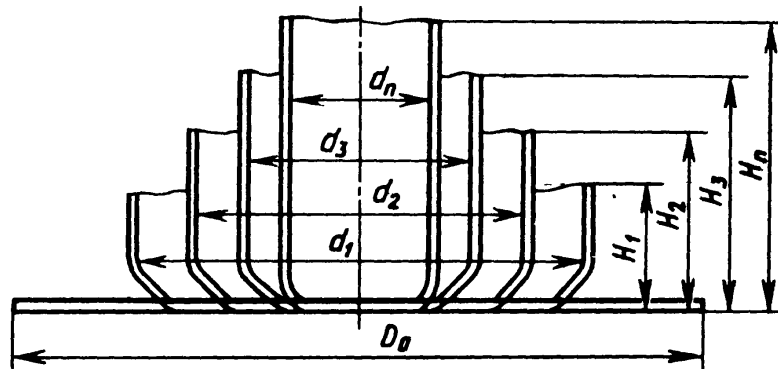


Рис 8.25. Схема к определению числа переходов (операций) вытяжки

Определив диаметры полуфабрикатов после каждой операции вытяжки и задавшись радиусом скругления r_n (см. рис. 8.19, б), определяют высоты полуфабрикатов (H_1, H_2, \dots, H_N) из условия равенства площади поверхности заготовки и детали:

$$0,785 \cdot D_0^2 = F_1 = F_2 = \dots = F_N,$$

где F_1, F_2, \dots, F_N — площади поверхности полуфабрикатов после каждой операции вытяжки. Используя уравнение (8.22), можно получить формулу для определения высоты цилиндрического полуфабриката без фланца:

$$H = \frac{D_0^2 - d_1^2 - 2 \cdot r_n \cdot (\pi \cdot d_1 + 4 \cdot r_n)}{4 \cdot d} + r_n - \Delta H, \quad (8.37)$$

где ΔH — припуск на обрезку неровного края, остальные обозначения

показаны на рис. 8.19, б.

Высоты полуфабрикатов по переходам вытяжки приближенно определяются по формуле (8.37), в которой приняты $r_{\text{п}}=0$ и $\Delta H=0$, после чего она принимает вид

$$H_N = (D_0^2 - d_N^2) / (4 \cdot d_N), \quad (8.37a)$$

где d_N — диаметр полуфабриката после Δf переходов. Формулу (8.37a) используют при определении высоты рабочей части пуансона для вытяжки, высоты прижимных колец и при выборе пресса по ходу ползуна.

Радиус скругления рабочей кромки матрицы r_m , как это следует из формулы 8.32, влияет на значение предельного коэффициента вытяжки K_b . С увеличением r_m коэффициент вытяжки K_b увеличивается. Однако чрезмерное увеличение радиуса скругления матрицы приводит к уменьшению площади заготовки, находящейся под прижимным кольцом штампа, что может привести к складкообразованию. Кроме того, исследование формулы 8.32 показывает, что увеличение радиуса скругления матрицы свыше 6...10 толщин заготовки не дает существенного увеличения K_b , поэтому значение радиусов скругления рабочей кромки матрицы принимают равным 6—10 толщинам заготовки, меньшие значения для металла толщиной свыше 4 мм, а большие — для более тонкого металла.

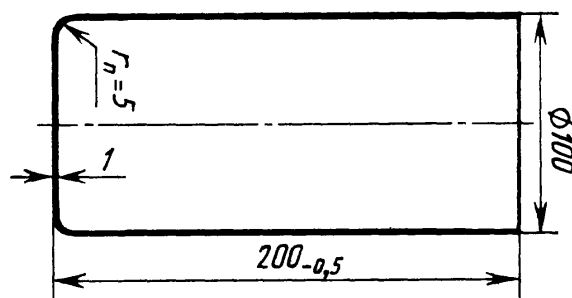


Рис. 8.26. Чертеж детали, получаемой вытяжкой

Рабочие (исполнительные) размеры инструмента для вытяжки зависят, в основном, от значения одностороннего зазора между пуансоном и матрицей z , который, в свою очередь, связан со степенью деформации вытягиваемой детали. При вытяжке деталей с фиксированными наружными (внешними) размерами зазор назначают при уменьшении размеров пуансона, при вытяжке деталей с фиксированными внутренними размерами — при увеличении размеров матрицы. С учетом того, что в результате изнашивания рабочий диаметр матрицы D_m увеличивается, а диаметр пуансона $D_{\text{п}}$ уменьшается, формулы для определения исполнительных размеров инструмента могут быть представлены в следующем виде [8]:

при фиксированном наружном диаметре детали

$$D_m = (d_n - 0,8\Delta)^{+\delta_m}; \quad D_{\text{п}} = (d_n - 0,8\Delta - 2 \cdot z)^{+\delta_m},$$

при фиксированном внутреннем диаметре детали

$$D_{\text{п}} = (d_n + 0,2\Delta)^{-\delta_{\text{п}}}; \quad D_m = (d_n + 0,2\Delta + 2 \cdot z)^{+\delta_m},$$

где d_s — номинальный диаметр детали; Δ — допуск на изготовление детали; δ_m и $\delta_{\text{п}}$ — допуски на изготовление матрицы и пуансона, соответственно;

ТЕМА: ВЫТЯЖКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ ОТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ

План лекции: 1. Вытяжка с широким фланцем, 2. вытяжка ступенчатых деталей, 3. вытяжка конических деталей, 4. вытяжка полусферических деталей, вытяжка в ленте.

А) с широким фланцем

Вытяжкой можно получать осесимметричные детали, отличающиеся по своей форме от цилиндрических деталей, а именно — с широким фланцем, ступенчатые, конические, с криволинейной образующей (в частности сферические) и др.

Изготовление перечисленных деталей представляет определенные трудности в связи с тем, что условия формоизменения менее благоприятны, чем условия вытяжки цилиндрических деталей без фланца или с малым фланцем. Поэтому при штамповке осесимметричных деталей, отличающихся по форме от цилиндрических, применяют определенные приемы, позволяющие получать их без разрушения. Многопереходную вытяжку деталей с широким фланцем можно осуществлять без прижима заготовки двумя способами: втягиванием заготовки в матрицу пуансоном; передающим давление донному ее участку с последующей правкой фланца в отдельном штампе или вытяжкой с одновременным проталкиванием заготовки в матрицу силой, приложенной к торцовому участку заготовки, и правкой фланца в конечный момент вытяжки (рис, 8 27). Второй способ вытяжки более предпочтителен, так как при проталкивании создаются осевые сжимающие напряжения, которые разгружают опасное сечение детали и это позволяет вести многопереходный процесс без межоперационных отжигов с высокой степенью итоговой деформации на многопозиционных листоштамповочных автоматах.

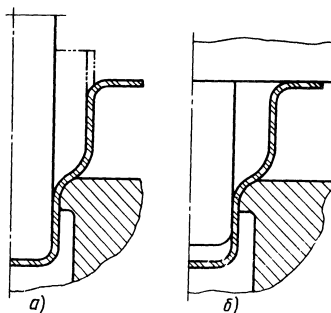


Рис. 8.27. Схема вытяжки: а — без проталкивания; б — с проталкиванием полуфабриката

Особенность технологии вытяжки деталей с широким фланцем заключается в том, что после первой операции получают диаметр фланца, предусмотренный чертежом детали (с припуском на обрезку). На всех последующих операциях этот диаметр остается неизменным, формоизменение происходит вследствие уменьшения диаметра цилиндрической части полуфабриката, увеличения ширины фланца и высоты детали (рис. 8.28).

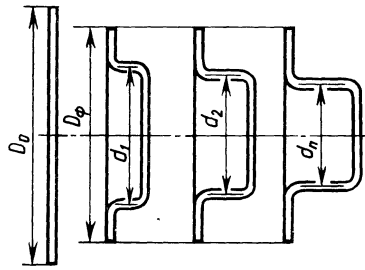


Рис. 8.28. Переходы вытяжки деталей с широким фланцем

Высота полуфабриката после первой операции вытяжки h_1 определяемой из условия равенства площадей поверхности заготовки и детали:

$$h_1 = \frac{D_0^2 + d_\phi^2}{4 \cdot d_1} + 0,86 \cdot r_n,$$

где d_1 — диаметр полуфабриката после первой операции вытяжки; d_ϕ — диаметр фланца.

Высоту полуфабрикатов на последующих операциях вытяжки определяют по формуле [18]

$$h_N = (h_{N-1} - 0,86 \cdot r_{N-1}) \cdot K_b + 0,86 \cdot r_N,$$

где r_{N-1} и r_N — радиусы полуфабрикатов по переходам вытяжки; $K_b = d_{N-1}/d_N$ — коэффициент вытяжки.

Существенное влияние на суммарную степень деформации при вытяжке с проталкиванием оказывает распределение объема, металла по операциям. Под действием проталкивающей силы стенка полуфабриката утолщается и ее утолщенный участок частично вытесняется во фланец, в связи с чем объем полуфабриката, претерпевающего формоизменение, уменьшается. В результате этого при вытяжке у детали может быть оторвано дно. Для того чтобы процесс вытяжки протекал устойчиво, необходимо при расчете высот полуфабрикатов предусмотреть некоторый избыток металла на предыдущей операции по сравнению с последующей. На первой операции рекомендуется набрать на 20—25 % металла больше по сравнению с последней операцией и равномерно распределить его по остальным операциям.

При вытяжке деталей с широким фланцем проталкивание заготовки осуществляется специально предусмотренным в штампе толкателем, опирающимся на буферное устройство, или пуансоном с заплечиком (буртом). Пуансон с заплечиком не только проталкивает заготовку в матрицу, но и на заключительной стадии процесса разгибает и правит фланец. Этапы формоизменения детали при вытяжке с широким фланцем показаны на рис. 8.29.

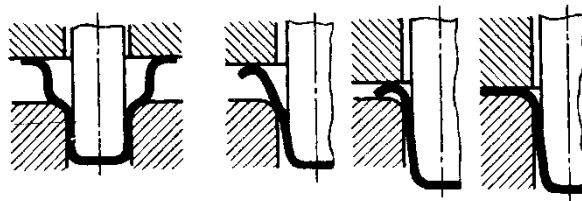


Рис. 8.29. Стадии формоизменения при вытяжке и проталкивании детали с широким фланцем

Излишне большое усилие проталкивания приводит к потере устойчивости полуфабриката, в результате чего появляются кольцевые выпуклости в месте сопряжения участка свободного изгиба и недеформируемой цилиндрической части полуфабриката. Потеря устойчивости наступает периодически, что приводит к изменению усилия проталкивания и образованию кольцевых полос на цилиндрической поверхности полуфабриката. Для устранения этого явления необходимо уменьшить усилие проталкивания за счет уменьшений контактных сил трения или увеличения радиуса скругления рабочей кромки матрицы.

Большой вклад в исследование вытяжки деталей с широким фланцем сделал И. А. Норицын, дальнейшее развитие его исследований получило в работах А. А. Бебриса, П. Г. Орлова и др.

Б) Ступенчатые осесимметричные

Такие детали получают, как правило, многооперационной вытяжкой (рис. 8.30). Первую ступень диаметром d_1 вытягивают из плоской заготовки за одну или несколько операций, после чего диаметр d_1 равно как и диаметр фланца D_1 (если чертежом детали предусмотрен фланец), остаются неизменными, а последующие ступени диаметром d_2 , d_3 и т. д. получают в результате перераспределения металла по аналогии с технологией штамповки деталей с широким фланцем. Высоты полуфабрикатов по операциям вытяжки определяют по условию равенства площадей поверхностей и подсчитывают с высокой точностью. Отсутствие избытка высоты полуфабриката, полученного на предыдущей операции, приводит к отрыву дна на последующей операции вытяжки. Избыток (3-5 %) поверхности полуфабриката, втягиваемого в матрицу, исключает возможность отрывов, он должен учитываться при расчете высот полуфабрикатов.

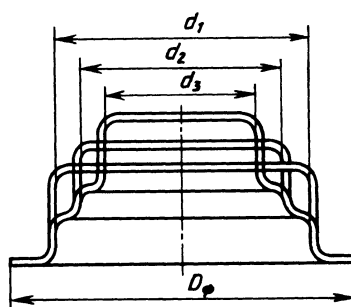


Рис. 8.30. Переходы вытяжки ступенчатых деталей

В том случае, когда итоговый коэффициент вытяжки K_v больше допустимого, вытяжка ступенчатой детали возможна за одну операцию. В данном случае оформление ступеней в конечный момент штамповки сопровождается уменьшением толщины стенки в угловых участках детали. Существует эмпирическая формула, предложенная З. М. Кальмановичем для определения итогового коэффициента вытяжки ступенчатой детали:

$$K_{\text{вп}} = \frac{\frac{h_1}{h_2} + \frac{h_2}{h_3} + \dots + \frac{h_{N-1}}{h_N} + 1}{\frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{d_1}{D_0} + \frac{h_2}{h_3} \cdot \frac{d_2}{D_0} + \dots + \frac{h_{N-1}}{h_N} \cdot \frac{d_{N-1}}{D_0} + \frac{d_N}{D_0}}, \quad (8.38)$$

где h_N и d_N — высоты и диаметры ступеней, соответственно, начиная от ступени наибольшего диаметра. Если $K_B < K_{\text{вп}}$ штамповка ступенчатой детали возможна за одну операцию.

В) Конические детали

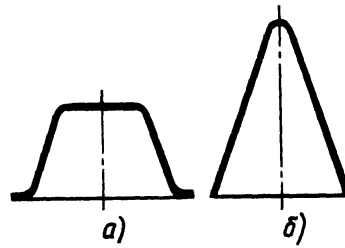


Рис. 8.31. Конические детали

Вытяжкой можно получать детали конической формы: низкие — в виде усеченного конуса (рис. 8.31, а) и высокие, остроконечные — с малым и большим углом конусности (рис. 8.31, б). Особенность условий деформирования конических деталей при вытяжке их из плоской заготовки заключается в том, что пуансон штампа для вытяжки контактирует только с небольшим центральным участком заготовки, а остальная ее кольцевая часть не контактирует с пуансоном и прижимным кольцом и остается свободной, не нагруженной внешними силами (рис. 8.32, а). По мере опускания пуансона на этом участке вытягиваемой детали возникают радиальные σ_r и окружные σ_θ напряжения. Условие равновесия элемента, находящегося в рассматриваемой зоне, выводится с помощью проецирования сил на нормаль к срединной поверхности элемента (уравнение Лапласа). При $\sigma_n = 0$ оно имеет вид

$$\sigma_r/R_r + \sigma_\theta/R_\theta = 0, \text{ откуда } R_r = -R_\theta \cdot \sigma_r/\sigma_\theta,$$

где R_r и R_θ — радиусы кривизны срединной поверхности элемента заготовки в меридиональном и окружном сечениях.

При $\sigma_\theta = 0$ $R_\theta = \infty$, т. е. только при отсутствии окружных напряжений образующая детали может быть прямолинейной, при всех других значениях σ_θ — криволинейной. Например, при разных знаках напряжений R_r и σ_θ образующая детали выпуклая и имеет тот же знак кривизны, что и кривизна окружного сечения (рис. 8.32, б). Однако при $\sigma_\theta = 0$ согласно условию пластичности $\sigma_r = \beta \cdot \sigma_s$, что при вытяжке недопустимо, так как может произойти, обрыв дна детали. Поэтому, если необходимо получить коническую низкую деталь с прямолинейной образующей, в технологическом процессе необходимо предусматривать операцию правки конического участка детали.

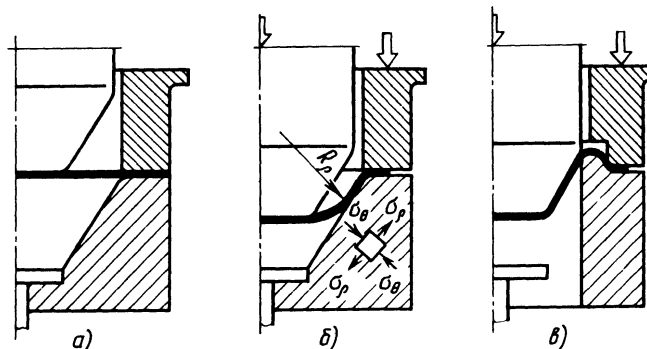


Рис. 8.32. Схема вытяжки низких конических деталей

Под действием окружных сжимающих напряжений σ_θ конический участок детали (находящаяся вне прижима) может потерять устойчивость, в результате чего появятся складки. Для того чтобы уменьшить сжимающие напряжения σ_θ , необходимо искусственно увеличить растягивающие напряжения σ_ρ , действующие в радиальном направлении, при этом по условию пластичности $\sigma_\rho + \sigma_\theta = \beta \cdot \sigma_s$ сжимающее напряжение σ_θ уменьшается.

Один из способов увеличения радиальных напряжений — вытяжка в матрице с перетяжным порогом (рис. 8.32, в), который создает дополнительное сопротивление на пути перемещения фланца заготовки относительно матрицы, увеличивая напряжение σ_ρ . Однако увеличение радиальных растягивающих напряжений вызывает утонение стенки, что может привести к разрушению деталей. Поэтому размеры перетяжных порогов должны быть подобраны так, чтобы увеличение радиальных напряжений не привело бы к отрыву дна детали [24]. Матрицы с перетяжными порогами применяют при вытяжке относительно низких деталей, имеющих форму усеченного конуса высотой $H \leq 0,3 \cdot d$, где d — диаметр большего основания конуса. Вытяжку деталей конической формы средней высоты ($0,7d > H > 0,3 \cdot d$) можно осуществлять без прижима или с прижимом заготовки в зависимости от относительной толщины заготовки $(s/D_0) \cdot 100$. При $(s/D_0) \cdot 100 > 2,5$ вытяжку ведут без прижима в закрытой матрице с плавной заходной частью в одну операцию с правкой в конце хода (рис. 8.33, а). При $(s/D_0) \cdot 100 < 2,5$ вытяжку осуществляют с прижимом фланца и, как правило, за две операции (рис. 8.33, б). При этом полуфабрикат, полученный после первой операции вытяжки, имеет плавные очертания контура, диаметр его равен диаметру большого основания конуса, а высоту определяют из условия равенства площади поверхности детали (или полуфабриката) и заготовки.

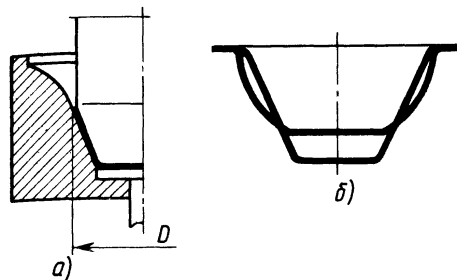


Рис. 8.33. Схема вытяжки конических деталей средней высоты:
а — в одну операцию; б — в две операции

Высокие конические детали с большим углом наклона образующей (30° — 60°), у которых $H > 0,7 \cdot d$, вытягивают за несколько операций одним из следующих способов.

Первый способ заключается в многооперационной вытяжке ступенчатого полуфабриката с последующим растяжением и правкой в специальном штампе (рис. 8.34, а). Данный способ не обеспечивает получение гладкой поверхности. Поэтому необходимо проводить обработку (выглаживание) детали на ротационном станке.

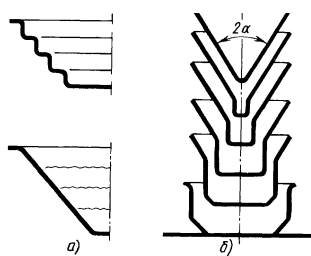


Рис. 8.34. Переходы вытяжки высоких конических деталей

По второму способу на первой операции вытягивается цилиндрический полуфабрикат, диаметр которого равен диаметру основания конуса, после чего за каждую последующую операцию вытяжки образуется все увеличивающаяся коническая поверхность (рис. 8.34, б). Качество поверхности готовой детали при вытяжке вторым способом выше.

При вытяжке высоких конических деталей вторым способом на всех переходах, кроме первого, для устранения возможности образования складок принимают более высокие значения допустимых коэффициентов вытяжки, например, для низкоуглеродистых сталей $K_b = 1,2 \div 1,35$. При вытяжке конических деталей диаметры полуфабрикатов по переходам определяются так же, как и при вытяжке цилиндрических деталей, т. е. диаметр цилиндрической части последующего перехода равен диаметру цилиндрической части предыдущего перехода, деленному на соответствующий коэффициент вытяжки $d_N = d_{N-1} / K_{b.N}$. Высокие конические детали могут быть изготовлены из полых цилиндрических полуфабрикатов — заготовок, полученных вытяжкой, продольным обжимом со стороны дна. При этом заготовка заталкивается в коническую матрицу силой, приложенной к ее торцу (рис. 8.35, а). В процессе обжима диаметр донной части заготовки постепенно уменьшается. Когда диаметр дна становится равным примерно половине диаметра исходной заготовки, плоская донная часть выпучивается и это способствует оформлению вершины конуса. Завершающая стадия штамповки конической детали продольным обжимом показана на рис. 8.35, б. При таком способе число переходов штамповки по сравнению с традиционными технологическими схемами последовательной вытяжки конических деталей сокращается [17].

Г) Условия деформирования полусферических деталей,

Для таких деталей, вытягиваемых из плоской заготовки за одну операцию, во многом сходны с условиями деформирования конических деталей. Отличие состоит в том, что при вытяжке низких конических деталей участок заготовки, контактирующий с пуансоном, деформируется упруго, а при вытяжке полусферических деталей — вся заготовка, в том числе и контактный ее участок, деформируется пластически. Кроме того, при вытяжке полусферических деталей протяженность ненагруженного, свободного участка заготовки в начальный период деформирования еще больше, чем при вытяжке конических деталей.

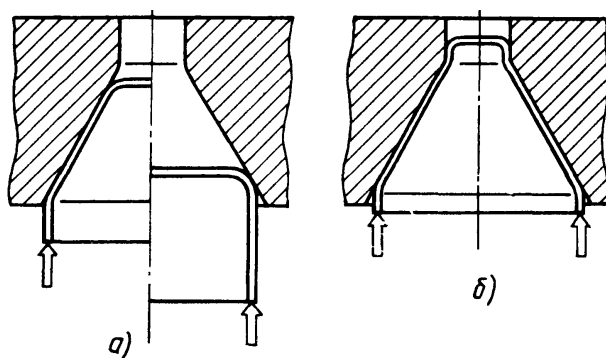


Рис. 8.35. Схема получения высокой конической детали продольным обжимом:

а - начальная стадия; *б* - завершающая стадия

Напряженное состояние различных участков заготовки при вытяжке неоднородно: в центральной части возникает двухосное растяжение, а вблизи рабочей кромки матрицы — сжатие с растяжением. Форма образующей ненагруженного участка криволинейная, выпуклая (рис. 8.36).

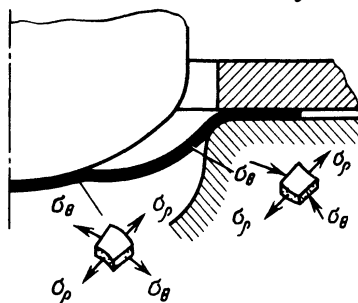


Рис. 8.36. Схемы напряженного состояния очага деформации в начальной стадии вытяжки полусферической детали

В связи с тем, что центральная часть полусферической детали деформируется в условиях двухосного растяжения, на этом участке происходит утонение стенки детали и, следовательно, незначительное увеличение ее поверхности. Если силы трения на контактной поверхности пуансона и заготовки малы или совсем отсутствуют (например, в условиях гидродеформирования), чрезмерное утонение центральной части детали может привести к появлению трещин в ее вершине или на некотором удалении от нее.

Для увеличения сил трения, блокирующих зону возможного разрушения (вершину детали), применяют штампы с противодавлением, прижимающим заготовку к пуансону и штампы с пуансонами повышенной шероховатости контактной поверхности.

При вытяжке полусферических деталей в свободном, ненагруженном участке заготовки возможно складкообразование, зависящее от относительной толщины заготовки s/D_0 . Поэтому способ вытяжки полусферических деталей выбирают при условии отсутствия складок. Если относительная толщина заготовки $(s/D_0) \cdot 100 > 3,0$, вытяжку ведут без прижима за одну операцию в глухой матрице с формовкой и правкой в конце хода (рис. 8.37, *а*). Если относительная толщина заготовки $(s/D_0) \cdot 100 < 3,0$, вытяжку полусферических деталей выполняют с прижимом заготовки в открытой матрице, в матрице с

перетяжным порогом (рис. 8.37, б) или реверсивным способом (рис. 8.37, в).

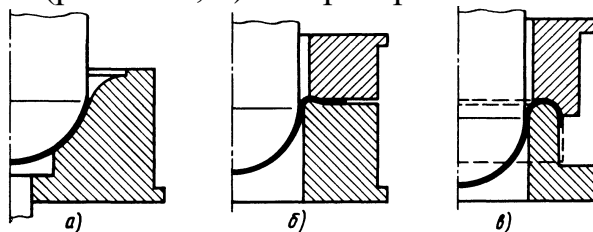


Рис. 8.37. Способы вытяжки полусферических деталей

Вытяжку тонкостенных высоких деталей с криволинейной образующей (типа отражателей осветительной аппаратуры) ведут в несколько операций. За первую операцию вытягивают полый цилиндр с плоским или выпуклым дном, диаметр которого больше диаметра основания детали на удвоенную толщину стенки кольцевой матрицы для реверсивной вытяжки (на 30—50 мм). На последующих операциях (или переходах) выполняют вытяжку реверсивным способом (рис. 8.37, в).

Рациональный способ получения днищ, основанный на совмещении прямого и реверсивного способов вытяжки, был разработан Л. А. Шофманом и П. И. Локотшем. Перетягивание заготовки через рабочую кромку кольцевого пуансона-матрицы (рис. 8.38) приводит к увеличению растягивающих напряжений в донной части детали, что уменьшает сжимающие напряжения и, следовательно, возможность появления складок. В то же время уменьшение диаметра краевой части детали, подвергающейся в начальный период деформирования прямой вытяжке, повышает ее устойчивость. Образующиеся при вытяжке небольшие складки разглаживаются при перемещении заготовки в зазоре между пуансоном и матрицей.

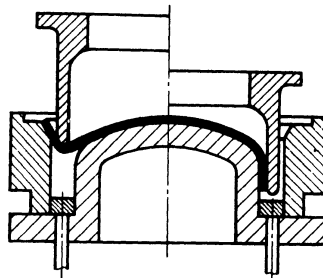


Рис. 8.38. Штамп для реверсивной вытяжки днища

МНОГОПЕРЕХОДНАЯ ВЫТЯЖКА ДЕТАЛЕЙ В ЛЕНТЕ

Сущность процесса заключается в многопереходной последовательной штамповке полуфабрикатов непосредственно в ленте. Полуфабрикаты удерживаются в ней специально предусмотренными перемычками — мостиками или запрессовкой отделенного полуфабриката в соответствующее гнездо. На последнем переходе происходит вырубка по контуру, в результате чего деталь отделяется от ленты (рис. 8.39). При перемещении ленты относительно инструмента (штампа) вместе с ней перемещаются и все полуфабрикаты. Таким образом, лента еще и средство межпереходного

транспортирования полуфабрикатов.

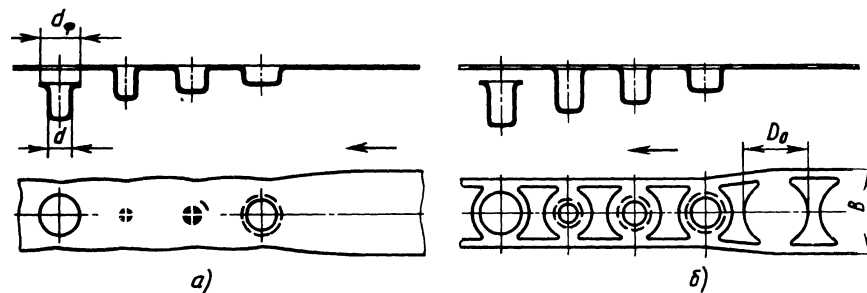


Рис. 8.39. Переходы штамповки деталей в ленте; а - без вырубки окон; б - с вырубкой окон

В ленте можно штамповать детали различной формы: плоские — вырубкой и пробивкой, изогнутые — гибкой в штампе и пустотелые — вытяжкой, отбортовкой и т. д. Размеры деталей, получаемых вытяжкой, обычно невелики, до 40—50 мм в диаметре, размеры деталей, получаемых вырубкой, достигают 200—250 мм при толщине листа 2—3 мм. В ленте шириной 330 мм штампуют корпуса автомобильных фар в девятипозиционном штампе последовательного действия длиной около 4000 мм.

Преимущества штамповки в ленте очевидны: высокая производительность процесса, безопасность в работе, возможность автоматизации процесса подачи ленты в штамп и объединения большого числа переходов в одном штампе последовательного действия (до десяти), в то время как в штампах совмещенного действия удастся объединить лишь два-три перехода.

Недостатки данного способа штамповки заключаются в некотором ограничении размеров штампуемых деталей, повышенном расходе металла вследствие увеличения перемычек, в сложности и высокой стоимости штамповой оснастки.

Вытяжку в ленте можно выполнять по схеме вытяжки деталей с широким фланцем (см. рис. 8.28). Для определения диаметров полуфабрикатов по переходам вытяжка необходимо знать допустимые коэффициенты вытяжки. Их значения приведены в справочной литературе и отраслевых руководящих технических материалах (например, РТМ-105-0-212—83).

Вытяжка в ленте осуществляется при условии :

$$\frac{h_v}{d_{вн}} < 1 \quad \frac{D_{\phi}}{d_{вн}} < 1,2$$

- Число переходов и их размеры определяют по предельным коэффициентам вытяжки. Условный диаметр заготовки D_z рассчитывают, как и для обычной вытяжки круглой цилиндрической детали, а вот ширину полосы по формуле
- $Bn=1,1Ds+2a$, (47)

- где a - боковая перемычка, зависящая от D_3 . Шаг штамповки в ленте без надрезов принимают $t=(0,8-1,0)D_3$.
- Общий коэффициент вытяжки определяют как произведение коэффициентов по переходам
- Когда $t_{общ} > t_{пред}$ в ленте предварительно выполняют надрезы. Форму технологических надрезов выбирают в зависимости от формы штампуемой детали [1,3,11]. Условный диаметр заготовки при вытяжке с надрезами увеличивают в 1,05 - 1,1 раза. Ширина винта при вытяжке с надрезом рассчитывается
- $V_n = b_n + k_l \cdot S$ (48)
- где k_l - коэффициент, зависящий от толщины ленты; при S от 0,2 до 1,5 k_l изменяется от 15 до 4.
- Шаг подачи при вытяжке с надрезом определяется как
- $t = D_3 + b$, (49)
- где b - ширина перемычки надреза равна 2-3 мм. Коэффициенты вытяжки с надрезами обычно берут на 5- 7% меньше, чем обычно без надрезов.
- При вытяжке в ленте деформирующее усилие, необходимое для выбора прессы по усилию, определяют приближенно с некоторым запасом как сумму деформирующих усилий по переходам штамповки (в том числе пробивки окон, обрубка фланца и пр.) и правки фланца.

Для низкоуглеродистой стали значение коэффициента вытяжки изменяется от 2,63 до 1,96 на первом переходе и от 1,37 до 1,19 — на последующих переходах [181. Приведенные коэффициенты вытяжки — предельные, при проектировании технологических процессов их необходимо уменьшить на 10—15%.

Если вытяжку в ленте ведут по схеме вытяжки деталей с широким фланцем с одновременным проталкиванием заготовки в матрицу, итоговая (суммарная) степень деформации без межоперационных отжигов может быть очень высокой, предельно допустимые итоговые коэффициенты вытяжки составляют: для низкоуглеродистой стали 7,14; для алюминия — 6,25; для латуни Л62 и Л63 — 5,0—3,7.

При вытяжке в ленте деформирующее усилие, необходимое для выбора прессы по усилию, определяют приближенно с некоторым запасом как сумму деформирующих усилий по переходам штамповки (в том числе пробивки окон, обрубка фланца и пр.) и правки фланца.

Область применения штамповки в ленте — изготовление небольших деталей в массовом и крупносерийном производстве.