

Лекция №19

Тема Обжим пустотелых цилиндрических заготовок.

План лекции: 1. Суть обжима, схема процесса, очаг деформации, 2. НДС, степень деформации, 3. устойчивость заготовки при обжиге, технологические расчеты, штампы для обжима.

Обжимом обрабатывают заготовки в виде отрезков труб, сварных кольцевых обечаек и цилиндрических полуфабрикатов, полученных вытяжкой. Заготовки с дном могут быть обжаты как со стороны открытого конца (торца), так и со стороны дна.

В массовом и крупносерийном производстве обжим осуществляют в специальных штампах, рабочий орган которых — кольцевая матрица. В зависимости от требуемой формы детали (конусной или куполообразной) используют матрицы с рабочей полостью, имеющей прямолинейную, наклонную к оси симметрии, или криволинейную образующую.

Если обжим ведут в свободном состоянии — без противодействия (подпора) заготовки снаружи и изнутри (или только снаружи), пластически деформируется лишь ее участок, находящийся в полости матрицы, остальная часть деформируется упруго.

Обжимом получают горловины цилиндрических бидонов (в том числе баллонов аэрозольной упаковки), различные переходники трубопроводов, горловины гильз и пр. (рис. 9.12). Кроме того, обжимом в сочетании с другими операциями листовой штамповки (например, раздачей) получают различные детали из сварных кольцевых заготовок (сепараторы подшипников качения, детали колес сельскохозяйственных машин и др.).

Деформация при обжиге оценивается коэффициентом обжима, который представляет собой отношение диаметра заготовки к срединному диаметру деформированной ее части $K_{об} = D/d$.

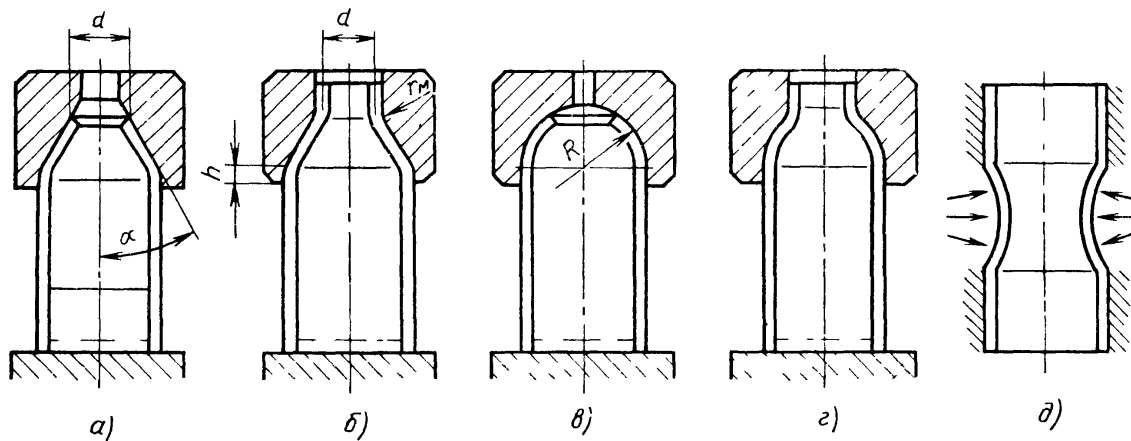


Рис. 9.12 Детали, получаемые обжимом

При обжиге внутренняя поверхность очага деформации не нагружена (рис. 9.13, а), а напряжение σ_n , передаваемое матрицей, при относительно тонкостенной заготовке мало по сравнению с напряжением текучести. В связи с этим можно считать, что напряженное состояние при обжиге плоское, характеризуемое двухосным неравномерным сжатием нормальными напряжениями σ_r и σ_θ (рис. 9.13, а).

При обжиге деформированное состояние по очагу деформации неоднородно, оно изменяется в зависимости от соотношения главных нормальных напряжений σ_r и σ_θ . **Схема деформированного** состояния при обжиге на различных участках образующей заготовки показана на рис. 9.13, а. Между нормальными напряжениями и деформациями при обжиге существует связь, установленная формулой:

$$\varepsilon_n = (\sigma_r + \sigma_\theta) \cdot \varepsilon_\theta / (\sigma_r + 2 \cdot \sigma_\theta), \quad (9.13)$$

которая применима для технологических расчетов.

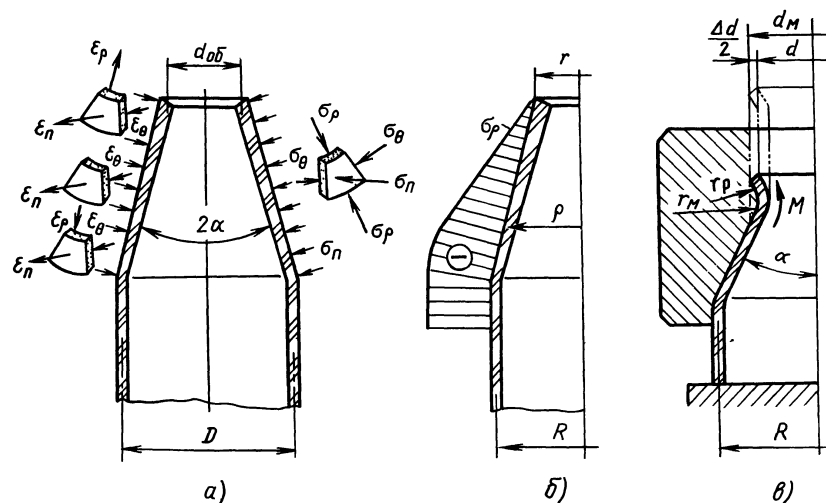


Рис. 9.13 Схемы деформированного напряженного состояния при обжиге (а), Эпюра напряжений по очагу деформаций (б), схема обжига при малом радиусе закругления рабочей кромки матрицы (в).

Используя формулу (9.13), можно определить толщину стенки у кромки отверстия. Так как на кромке $\sigma_r=0$, формула (9.13) примет вид

$$\epsilon_n = -\epsilon_\theta/2. \quad (9.13a)$$

Поскольку ϵ_n и ϵ_θ имеют разные знаки и ϵ_θ характеризует деформацию сжатия, очевидно, что ϵ_n определяет деформацию растяжения. Выразив ϵ_θ и ϵ_n в функции соответствующих размеров обжатой заготовки

$$\epsilon_\theta = \ln(d/D); \quad \epsilon_n = \ln(s_k/s)$$

и подставив значения ϵ_θ и ϵ_n в уравнение (9.13a), получим

$$\ln(s_k/s) = 1/2 \ln(D/d),$$

откуда толщина стенки у кромки отверстия

$$s_k = s \cdot \sqrt{D/d} = s \cdot \sqrt{K_{об}}. \quad (9.14)$$

Из полученной формулы следует, что толщина стенки у края деформированной части заготовки больше толщины стенки исходной заготовки, и она тем больше, чем больше коэффициент обжима $K_{об}$. Если принять допущение о том, что толщина стенки изменяется в очаге деформации по линейному закону, то средняя ее толщина будет равна

$$s_{cp} = (s + s_k)/2 = (s + s \cdot \sqrt{K_{об}})/2 = 0,5 \cdot s \cdot (1 + \sqrt{K_{об}}). \quad (9.15)$$

Область применения формулы (9.14) ограничена в связи с тем, что при высокой степени деформации ($K_{об} > 2,0$) расчеты по этой формуле дают завышенные значения s_k а при диаметре отверстия d , близком к нулю, s_k увеличивается до бесконечности. Это объясняется тем, что при выводе формулы (9.14) было сделано допущение о существовании линейной схемы напряженного состояния у кромки заготовки ($\sigma_r = \sigma_n = 0$).

При большой степени деформации и относительно толстостенной заготовке ($s/D > 0,1$) главное напряжение σ_n , действующее в направлении нормали к ее образующей, становится соизмеримым с напряжением σ_θ вблизи края заготовки и это влияет на характер изменения толщины стенки в очаге деформации — максимальная толщина стенки образуется не у края заготовки, а на некотором удалении от него. При $d/2 = s \cdot \cos \alpha$, когда краевые участки обжатой заготовки соприкасаются друг с другом и отверстие в ней практически отсутствует, толщину стенки у кромки приближенно можно определить

$$s_k = s \cdot \sqrt{\frac{D}{2 \cdot e \cdot s \cdot \cos \alpha}}, \quad (9.16)$$

где e — основание натурального логарифма.

Расчеты по формуле (9.16) дают результат существенно меньший, чем по формуле (9.14), полученной для линейной схемы напряженного состояния.

Наибольшее по очагу пластической деформации **меридиональное напряжение** $\sigma_r \max$

определяют методом совместного решения уравнений, определяющих равновесие и пластичность заготовки при известном граничном условии, согласно которому на кромке заготовки $\sigma_{\rho \max}=0$. Применительно к обжиму в конической матрице такое решение с учетом упрочнения (при использовании степенной аппроксимации диаграммы упрочнения), сил трения, утолщения краевой части заготовки, изгиба и спрямления ее при входе в матрицу имеет вид:

$$\sigma_{\rho \max} = 1,1 \cdot \sigma_B / 2 \cdot \psi_p^{\psi_p / (1-\psi_p)} \cdot (1-d/D)^{1/(1-\psi_p)} \cdot (1+\mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (1+\sqrt{D/d}) \cdot (3-2 \cdot \cos \alpha). \quad (9.17)$$

Установлено, что после обжима без противодействия заготовки из большинства применяемых в машиностроении материалов уменьшаются в диаметре на 20—50 %, при этом отношение $D/d=1,25 \div 2,0$. Если принять среднее значение $D/d=1,54$, то множитель, учитывающий среднее утолщение стенки, согласно формуле (9.15) будет равен $0,5 \cdot (1+s \cdot \sqrt{K_{об}}) = 0,5 \cdot (1+1 \cdot \sqrt{1,54}) = 1,12$. Учитывая это, а также введя в формулу (9.17) обозначение $K_{об} = D/d$, получим

$$\sigma_{\rho \max} = \frac{1,23 \cdot \sigma_B}{\psi_p^{\psi_p / (1-\psi_p)}} \cdot (1-1/K_{об})^{1/(1-\psi_p)} \cdot (1+\mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (3-2 \cdot \cos \alpha). \quad (9.17a)$$

Анализ формулы (9.17a) показывает, что наибольшее по очагу пластической деформации меридиональное сжимающее напряжение увеличивается с увеличением **степени деформации** ($\psi=1-1/K_{об}$) коэффициента трения μ , и интенсивности упрочнения материала заготовки, характеризуемой величиной ψ_p . Эпюра распределения напряжений σ_{ρ} показана на рис. 9.13, б. Исследование формулы (9.17a) на экстремум после ряда упрощающих допущений позволяет установить, что угол наклона образующей матрицы для обжима имеет оптимальное значение, при котором меридиональное напряжение минимально. Этот угол определяют по формуле

$$\sin \alpha_{opt} \approx \sqrt[3]{\mu/2}. \quad (9.18)$$

Расчеты по формуле (9.18) показывают, что при $\mu=0,1$ $\alpha_{opt}=21^\circ 36'$, а при $\mu=0,05$ $\alpha_{opt}=17^\circ$.

При обжиме в конической матрице с центральным отверстием краевая часть заготовки при переходе из конической в цилиндрическую полость изгибается (поворачивается) и затем по мере прохождения через нее снова приобретает цилиндрическую форму, т. е. поочередно происходит изгиб и спрямление краевой части заготовки под воздействием изгибающих моментов.

Существенное влияние на точность диаметра обжатой части заготовки оказывает радиус закругления рабочей кромки матрицы r_m (рис. 9.13, б). Это объясняется тем, что естественный радиус изгиба (краевой части) заготовки r_p имеет вполне определенное значение, зависящее от толщины и диаметра заготовки, а также от угла наклона образующей матрицы, который приближенно может быть определен по формуле

$$r_p = \sqrt{D \cdot s_k} / (2 \cdot \sin \alpha).$$

Если радиус скругления матрицы $r_m < r_p$, элемент заготовки, перемещающийся из конической части очага деформации в образующийся цилиндр, теряет контакт с матрицей и диаметр цилиндрической части обжатой детали или полуфабриката уменьшается по сравнению с диаметром матрицы ($d = d_m - \Delta d$) (рис. 9.13, в). Если же $r_m \geq r_p$, указанное явление не происходит, и диаметр обжатой части соответствует диаметру рабочего отверстия матрицы. В связи с этим радиус скругления рабочей кромки матрицы для обжима r_m должен быть не менее r_p :

$$r_m \geq \sqrt{D \cdot s} / (2 \cdot \sin \alpha). \quad (9.19)$$

Если же условие (9.19) по каким-либо причинам (например, по конструктивным соображениям) не выполняется, то диаметр центрального отверстия матрицы увеличивают, при этом Δd определяют по формуле

$$\Delta d = \left[\left(\sqrt{D \cdot s} / \sin \alpha \right) - 2 \cdot r_m - s \right] \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (9.20)$$

Деформирующее усилие обжима может быть определено приближенно как произведение площади поперечного сечения заготовки на временное сопротивление ее материала:

$$P_{об} \approx \pi \cdot D \cdot s \cdot \sigma_B \quad (9.21)$$

Формула (9.21) применяется для ориентировочных, укрупненных расчетов, например, при подборе прессы по усилию.

Более точно **усилие обжима** можно определить как произведение наибольшего, по очагу пластической деформации, напряжения $\sigma_{\rho \max}$, действующего в осевом направлении, на площадь поперечного сечения заготовки и на коэффициент ω :

$$P_{об} \approx \pi \cdot \omega \cdot D \cdot s \cdot \sigma_{\rho \max} \quad (9.22)$$

При обжиме в конической матрице по схеме, показанной на рис. 9.12, а, для определения усилия обжима используют формулу (9.22). При обжиме по схеме, приведенной на рис. 9.12, б, когда краевая часть обжатой детали входит в центральное отверстие матрицы, для определения усилия обжима используют ту же зависимость с той лишь разницей, что к напряжению $\sigma_{\rho \max}$, определяемому по формуле (9.22), добавляют слагаемое $\sqrt{s/d} \cdot \sin \alpha$, учитывающее влияние дополнительных напряжений, вызванных изгибом и спрямлением краевого участка заготовки при выходе его из очага деформации. В данном случае формула для определения усилия обжима принимает вид

$$\sigma_{об} \approx \left(3,7 \cdot D \cdot s \cdot \sigma_B / \psi_p^{1/(1-\psi_p)} \right) \cdot \left[(1 - 1/K_{об})^{1/(1-\psi_p)} \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) + \sqrt{s/d} \cdot \sin \alpha \right] \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha) \quad (9.23)$$

Преимущество формул (9.22) и (9.23) по сравнению с формулой (9.21) заключается в том, что они позволяют установить характер и степень влияния учтенных в анализе факторов на усилие обжима.

Работа деформирования. В процессе обжима усилие деформирования изменяется. В начальный период формоизменения усилие интенсивно возрастает до момента входа краевого участка заготовки в цилиндрический пояс матрицы диаметром d , после чего на установившейся стадии остается приблизительно неизменным до окончания процесса. В связи с этим работу деформирования можно рассматривать как сумму двух слагаемых: работы A_1 , затрачиваемой на деформирование конического участка детали, и работы A_2 , затрачиваемой в период установившейся стадии процесса: $A = A_1 + A_2$.

Работа деформирования в общем виде определяется по формуле

$$A_1 = \int_0^H P_x dh = \omega \cdot \pi \cdot D \cdot s \int_0^H \sigma_{\rho \max} dh, \quad (9.24)$$

где P_x — «текущее» усилие деформирования; dh — элементарный путь матрицы при обжиме; H — путь матрицы, необходимый для получения конусного участка детали.

Если считать, что при обжиме утолщение стенки (при $K_{об} = 2,0 \div 1,54$) увеличивает радиальное сжимающее напряжение в среднем на 15 %, то формула для определения $\sigma_{\rho \max}$ без учета упрочнения может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma_{\rho \max} = 1,15 \cdot \omega \cdot \sigma_s \cdot (1 - d_x / D) \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha) \quad (9.25)$$

Из условия равенства площади поверхности заготовки и детали можно получить

$$d_x = \sqrt{D / (D - 4 \cdot H \cdot \sin \alpha)} \quad (9.26)$$

Объединив выражения (9.24), (9.25) и (9.26), после интегрирования получим формулу для определения работы деформирования:

$$A_1 = \omega \cdot \pi \cdot D \cdot s \cdot \sigma_s \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha) \cdot H \cdot \left(1 - \frac{D \cdot \sqrt{D} - \sqrt{(D - 4 \cdot H \cdot \sin \alpha)^3}}{6 \sqrt{D} \cdot \sin \alpha} \right) \quad (9.27)$$

Формула (9.27) позволяет определить работу деформирования по ходу матрицы и построить зависимость $P = fP(H)$.

Если принять допущение о том, что усилие обжима на первой стадии процесса изменяется по линейному закону, а на установившейся стадии остается неизменным, то суммарная работа деформирования будет равна

$$A = A_1 + A_2 = 0,5 \cdot P \cdot H_k + P \cdot h = P \cdot (0,5 \cdot H_k + h), \quad (9.28)$$

где H_k — высота конического участка детали; h — высота цилиндрического обжатого участка детали диаметром d . Расчеты по формулам (9.27) и (9.28) при определении A_1 дают расхождения до 10—15 %.

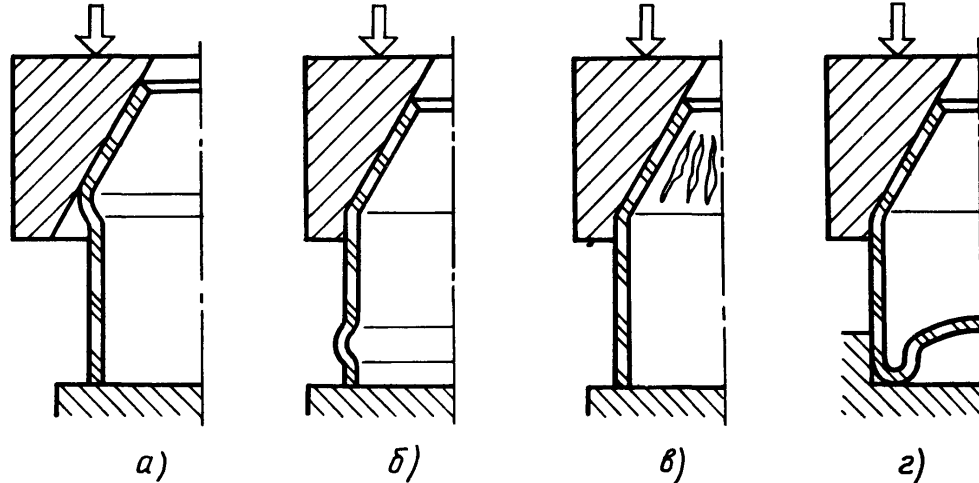


Рис. 9.14. Виды локальной потери устойчивости при обжиге

Допустимый коэффициент обжима. Обжим осуществляется в условиях неравномерного сжатия в осевом и окружном направлениях. При определенном критическом значении сжимающих напряжений σ_r и σ_θ происходит локальная потеря устойчивости заготовки (выпучивание), завершающаяся, в большинстве случаев, складкообразованием. Экспериментально установлено, что при относительной толщине стенки $(s/D) \cdot 100$ свыше 2—3 образуются поперечные (кольцевые) складки на участке сопряжения конической и цилиндрической части заготовки (рис. 9.14, а) или у опорной ее поверхности (рис. 9.14, б). При относительной толщине заготовки менее 2—3 возникают продольные складки в зоне пластической деформации, направленные вдоль образующей (рис. 9.14, в). При обжиге заготовки в виде стакана с внешним противодействием на цилиндрическую часть донный ее участок пластически деформируется и течет навстречу матрице (рис. 9.14, з). Таким образом, критическая степень деформации при обжиге, а, следовательно, и значение критического коэффициента обжима регламентируются локальной потерей устойчивости.

Предельный (критический) коэффициент обжима приближенно может быть определен теоретически из условия сохранения устойчивости заготовки, т. е. когда

$$\sigma_{r \max} \leq \sigma_{кр}, \quad (9.29)$$

где $\sigma_{кр}$ — критическое напряжение, при котором происходит потеря устойчивости. Это условие с учетом уравнения (9.17а) принимает вид

$$1,23 \cdot \sigma_{\theta} / \psi_p^{\psi_p / (1 - \psi_p)} \cdot (1 - 1/K_{об})^{1/(1 - \psi_p)} \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha) \leq \sigma_{кр}. \quad (9.30)$$

Решив полученное уравнение относительно $K_{об}$ который при выполнении условия (9.29) будет предельным, получим

$$K_{обп} = 1 : \left\{ 1 - \left[\frac{0,8 \cdot \sigma_{кр} \cdot \psi_p^{\psi_p / (1 - \psi_p)}}{\sigma_{\theta} \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha)} \right]^{1 - \psi_p} \right\}. \quad (9.31)$$

Более точно, учитывая влияния относительной толщины стенки заготовки, критическое напряжение $\sigma_{кр}$ можно определить по формуле, полученной на базе теории устойчивости, применительно к сжатию относительно коротких тонкостенных цилиндрических оболочек за пределами упругой деформации по формуле А. С. Вольмира:

$$\sigma_{кр} = \frac{4}{3} \cdot E_c \cdot \frac{s}{D}, \quad (9.32)$$

где E_c — секущий модуль, численно равный тангенсу угла наклона прямой, соединяющей начало координат с точкой, лежащей на диаграмме растяжения в осях «а — б». Зная E_c , можно определить соответствующее критическое значение s/D для ряда произвольно взятых точек на диаграмме «а — б», используя для этого формулу (9.32), после чего построить кривую в осях « $\sigma_{кр}$ - s/D ».

Исследование формулы (9.31) позволяет установить характер влияния основных факторов на значение предельного коэффициента обжима $K_{обп}$. С возрастанием относительной толщины заготовки значение $K_{обп}$ увеличивается. С увеличением равномерного сужения при растяжении ψ_p , характеризующего интенсивность упрочнения, временного сопротивления σ_b и коэффициента контактного трения μ значение $K_{обп}$ уменьшается.

На допустимую степень обжатия существенно влияет неравномерность механических свойств заготовки в продольном направлении вследствие неравномерного упрочнения, что наблюдается, например, у заготовок-полуфабрикатов, полученных вытяжкой в холодном состоянии. Чем меньше сопротивление деформированию в зоне обжатия и чем больше критическое напряжение в зоне выпучивания, тем предельно допустимая деформация больше. Поэтому при изготовлении латунных и стальных гильз предусмотрена операция «отжиг дульца», в результате которой краевая часть детали разупрочняется, а предельно допустимая деформация увеличивается.

Критическое напряжение $\sigma_{кр}$ может быть определено экспериментально как произведение коэффициента запаса устойчивости φ_y на предел текучести материала заготовки:

$$\sigma_{кр} = \varphi_y \cdot \sigma_T. \quad (9.33)$$

Для определения коэффициента устойчивости используют данные, полученные при обжиме конической матрицей относительно коротких заготовок (высотой 1,5—2,0 диаметра) до момента выпучивания. Установлено, что коэффициент устойчивости φ_y уменьшается с увеличением относительного диаметра заготовки D/s и увеличением угла наклона образующей матрицы α (рис. 9.15). При $D/s=20$ и $2\alpha=30^\circ$ коэффициент устойчивости стальных заготовок близок к единице, при этом $\sigma_{кр} \approx \sigma_T$.

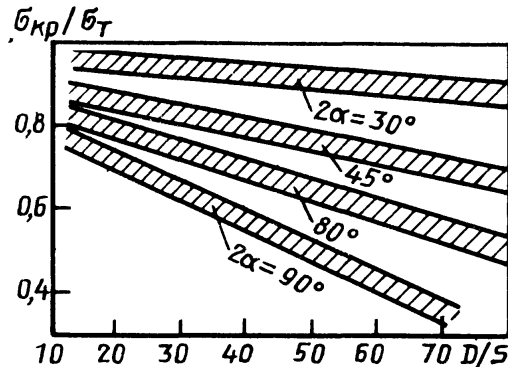


Рис 9.15. Зависимость коэффициента устойчивости φ_y от относительного диаметра заготовки

С учетом (9.33) и того, что $\psi_p = \delta_p / (1 + \delta_p) = 1 - e^{-n}$, формула для определения предельного коэффициента обжима:

$$K_{обп} = 1 : \left\{ 1 - \left[\frac{0,81 \cdot \varphi_y \cdot \sigma_T \cdot (1 - e^{-n})^{e^n - 1}}{\sigma_b \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha)} \right]^{e^{-n}} \right\}. \quad (9.34)$$

Расчеты по формуле (9.34) показывают, что при $\sigma_T=300$ МПа, $\sigma_b=400$ МПа, $\alpha=15^\circ$, $\delta_p=0,25$, $n=\ln(1+0,25)=0,223$, $\mu=0,1$ и $\varphi_y=0,9$ критический коэффициент обжима $K_{кр}=1,49$, что примерно на 10—15 % меньше по сравнению с экспериментальными данными.

Недостаток формулы (9.34) заключается в том, что в ней не учтено влияние относительного диаметра заготовки D/s на значение $K_{обр}$. Косвенно это влияние учтено коэффициентом устойчивости φ_y , который зависит от D/s , однако связь между φ_y и D/s в виде аналитической функции не установлена.

Расчетные коэффициенты обжима — предельные, т. е. такие, при которых заготовка, не имеющая никаких локальных дефектов и отклонений от номинальных размеров, находится на грани выпучивания. Для создания некоторого запаса устойчивости с учетом дефектов реальной заготовки (возможные вмятины, разностенность, овальность поперечного сечения и пр.) расчетные значения $K_{обр}$ уменьшают на 10—15 %:

$$K_{об} = K_{обп} / (1,1 \div 1,15). \quad (9.35)$$

Допустимые коэффициенты обжима могут быть определены не только расчетным путем, но и на основании экспериментальных данных. В технической литературе имеются специальные таблицы и графические зависимости для определения допустимых коэффициентов обжима в функции основных факторов, влияющих на их значение [11, 18, 24].

Критический коэффициент обжима, а также точность размеров деталей, полученных обжимом, существенно зависят от анизотропии механических свойств материала заготовки. С увеличением коэффициента нормальной анизотропии R предельный коэффициент обжима $K_{обп}$ увеличивается, так как при этом увеличивается сопротивление стенок заготовки утолщению и выпучиванию. Следствие плоскостной анизотропии при обжиге, как и при вытяжке, — образование фестонов на краевом участке обжатой заготовки, что вызывает необходимость обрезки неровного края детали и, следовательно, приводит к повышению расхода металла. Анизотропия вызывает разнотолщинность вершины фестона и впадины, овальность горловины, а также влечет за собой неравномерное сопротивление материала заготовки воздействию внешней среды (например, окислению). Для получения высокой степени деформации при обжиге и устранения указанных дефектов необходимо, чтобы коэффициент нормальной анизотропии R^* в продольном направлении заготовки был больше коэффициента анизотропии в окружном ее направлении, а их значение — больше единицы.

Размеры заготовки. Продольная длина заготовки, из которой можно получить детали требуемых размеров после обжима, определяется из условия неизменности объема, а диаметр и толщина стенки заготовки принимаются равными диаметру и толщине стенки необжатого участка D и s соответственно (рис. 9.16).

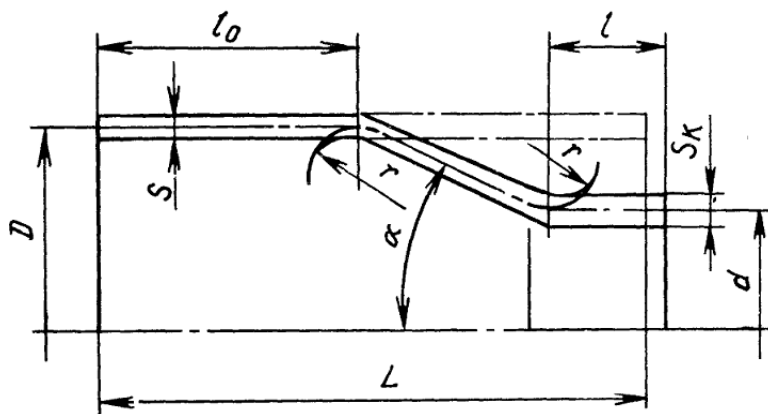


Рис. 9.16. Схема к определению размеров заготовки при обжиге (б)

Конический и цилиндрический (диаметром d) участки детали после обжима имеют утолщенную стенку. Приняв, что толщина стенки конического участка изменяется от s до s_k по линейному закону и толщина s_k соответствует расчетной по формуле (9.14), формула для определения продольной длины заготовки L может быть представлена в следующем виде:

при обжиге по схеме рис. 9.12, а, когда краевая часть заготовки не выходит за пределы конической части матрицы:

$$L = l_0 + \frac{d + D - 2 \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha)}{4 \cdot D} \cdot \left(\frac{D - d}{2 \cdot \sin \alpha} - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right) + \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180}. \quad (9.36)$$

при обжиге по схеме рис. 9.12, б, когда краевая часть заготовки выходит за пределы конической части матрицы и образуется цилиндрический участок диаметром d :

$$L = l_0 + l \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} + \left(1 + \frac{D}{d} \right) \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right) \cdot \left(\frac{D - d}{2 \cdot \sin \alpha} - 2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right] + \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180}. \quad (9.37)$$

При выводе формул (9.36) и (9.37) принято, что радиусы изгиба r заготовки при входе и выходе из конической части матрицы равны друг другу и их значение соответствует расчетной [по формуле (9.19)].

Конструктивные особенности штампов. Конструкция штампа для обжима изменяется в зависимости от требуемой степени деформации. Если степень деформации близка к критической, возможна местная потеря устойчивости в виде складки у опорной поверхности заготовки. В этом случае применяют полузакрытые штампы с частичным противодавлением (подпором), передаваемым цилиндрическому участку заготовки неподвижной втулкой, закрепленной на нижней плите штампа.

При высокой степени обжатия, когда коэффициент обжима больше допустимого, применяют закрытые штампы со скользящей втулкой, создающей противодавление по всей высоте заготовки. Использование такого штампа исключает появления кольцевой складки у опорной поверхности, конструктивная схема такого штампа показана на рис. 9.17. При обжиге заготовок с относительной толщиной стенки $s/D > 0,3$ в закрытых штампах можно получить степень деформации до 70—80 %. Полуфабрикат, изготовленный обжимом из стальной трубчатой заготовки с относительной толщиной стенки $s/D = 0,12$ за один переход в закрытом штампе, ранее был показан на рис. 9.16, а.

Мы рассмотрели обжим в конической матрице. Если требуется получать детали куполообразной формы (см. рис. 9.12, в, г), обжим проводят в матрицах с криволинейной образующей, постоянной кривизны. Этот вид обжима достаточно хорошо изучен, расчетные формулы для определения, его технологических параметров в полном объеме имеются в научно-технической литературе [11, 16, 22].

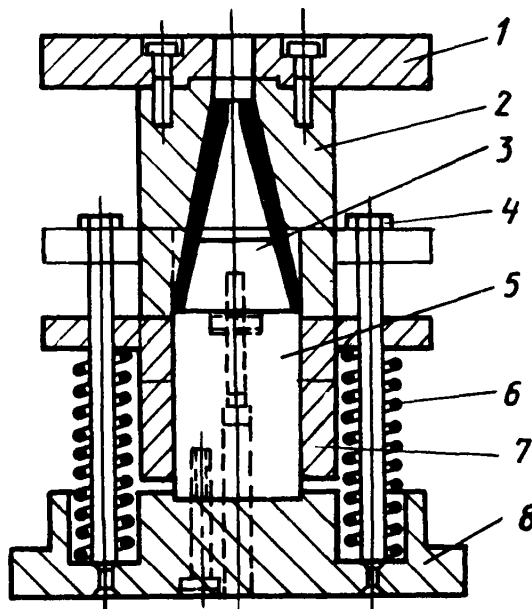


Рис. 9.17. Закрытый штамп для обжима:

1 — верхняя плита; 2 — матрица; 3 — ловитель; 4 — болт упорный, 5 — оправка опорная; 6 — пружина; 7 — втулка скользящая; 8 — плита нижняя

Кроме обжима в продольном направлении заготовки (продольный обжим) применяют поперечный обжим в кольцевую щель (см. рис. 9.12, д), который осуществляется с

помощью магнитно-импульсной штамповки (см. п. 12.3).

Лекция №21

Тема РАЗДАЧА ПУСТОТЕЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

План лекции: 1. Суть способа, схема процесса, 2. Очаг деформации, НДС заготовки, 3. работа, усилие раздачи, 4. устойчивость процесса раздачи, размеры заготовки, 5. штампы для раздачи.

В результате раздачи происходит уменьшение толщины стенки и длины образующей заготовки в зоне пластической деформации, которая охватывает участок с увеличенными поперечными размерами. В процессе раздачи в очаге деформации возникают окружные растягивающие и радиальные сжимающие напряжения.

В массовом и крупносерийном производстве раздачу выполняют в специальных штампах, рабочий орган которых — жесткий цельный пуансон с постепенно увеличивающимися размерами поперечного сечения. Внедряясь в пустотелую заготовку в виде отрезка трубы или стакана, полученного вытяжкой, или сваркой кольцевой обечайки, пуансон пластически деформирует ее. Детали, полученные раздачей, показаны на рис. 9.18.

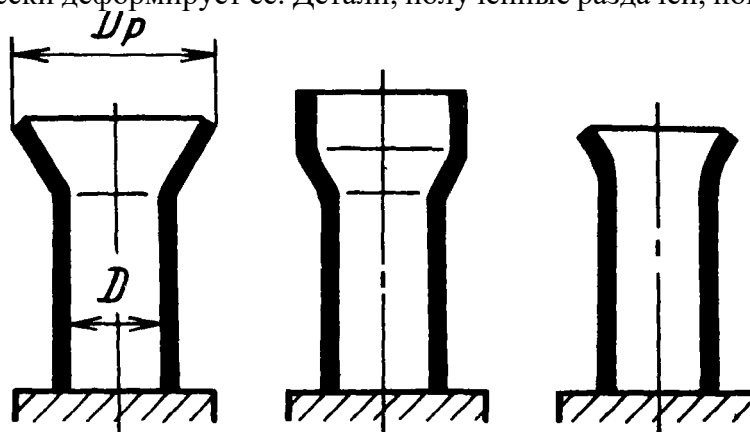


Рис. 9.18. Детали, получаемые раздачей

Формоизменение заготовок оценивается коэффициентом раздачи, представляющим собой отношение наибольшего диаметра деформированной ее части D_p к диаметру заготовки D :

$$K_p = D_p / D.$$

Раздачу применяют для получения различных деталей и полуфабрикатов, имеющих переменное поперечное сечение. Применяя раздачу и обжим, можно получить из кольцевых сварных цилиндрических обечаек-заготовок полуфабрикаты сепараторов конических подшипников, колес сельскохозяйственных машин, различного рода корпусные заготовки и пр.

В качестве примера можно привести два варианта технологического процесса штамповки колес сельскохозяйственных машин: вытяжкой из плоской круглой заготовки и раздачей, и обжимом из сварной кольцевой заготовки. Применение второго варианта технологического процесса позволяет получить существенную экономию металла.

При раздаче зона пластической деформации охватывает участок заготовки с переменным поперечным сечением, цилиндрическая ее часть деформируется упруго.

Наружная часть заготовки не нагружена внешними силами, а удельное усилие, передаваемое пуансоном, при малой относительной толщине стенки мало по сравнению с напряжением текучести. Поэтому можно считать, что напряженное состояние при раздаче, как и при обжиге, плоское, характеризуемое сжатием в осевом и окружном направлениях нормальными напряжениями σ_ρ и σ_θ (рис. 9.20, а). Деформированное состояние при раздаче неоднородно по очагу деформации. Так же, как и при обжиге, деформированное состояние изменяется в зависимости от соотношения нормальных напряжений σ_ρ и σ_θ . В точках, где напряжения σ_ρ и σ_θ равны между собой по абсолютному значению, толщина заготовки в процессе деформирования не изменяется, деформированное состояние плоское. В остальных участках заготовки деформированное состояние объемное, причем там, где $|\sigma_\rho| > |\sigma_\theta|$ — происходит, утолщение стенки, а на участке, где $|\sigma_\rho| < |\sigma_\theta|$ — утонение. Зона утолщения стенки мала по сравнению с зоной утонения. Поэтому с некоторым приближением можно считать, что в очаге деформации при раздаче стенка заготовки только утоняется [16]. Наименьшая толщина заготовки находится у ее кромки и определяется по формуле, сходной по своей структуре с формулой (9.14):

$$s_k = s \cdot \sqrt{\frac{D}{D_p}} = \frac{s}{\sqrt{K_p}}. \quad (9.38)$$

Из формулы (9.38) следует, что утонение стенки на кромке будет тем больше, чем больше коэффициент раздачи K_p .

Рис. 9.20

Распределение напряжений σ_ρ и σ_θ по очагу пластической деформации может быть установлено методом совместного решения уравнений, определяющих равновесие и пластичность заготовки, используя при этом ряд допущений. Формула для определения радиального сжимающего напряжения имеет вид

$$\sigma_\rho = -\beta \cdot \sigma_s \cdot [1 + (tg \alpha / \mu)] \cdot [1 - (2 \cdot \rho / D_p)^{\mu / tg \alpha}], \quad (9.39)$$

где ρ — текущий радиус поперечного сечения заготовки в очаге пластической деформации. При $\rho = D_p/2$ радиальное сжимающее напряжение достигает наибольшего значения:

$$\sigma_{\rho \max} = -\beta \cdot \sigma_s \cdot [1 + (tg \alpha / \mu)] \cdot [1 - (D / D_p)^{\mu / tg \alpha}]. \quad (9.40)$$

Если двучлен $1 - (D / D_p)^{\mu / tg \alpha}$ дважды разложить в ряд (вначале степенную функцию, а затем, получившуюся после разложения степенной функции, логарифмическую) и учесть приращение радиального напряжения в связи с изгибом при входе ее на конусную часть пуансона множителем $(3 - 2 \cdot \cos \alpha)$, то после преобразований получим

$$\sigma_{\rho \max} = -\beta \cdot \sigma_s \cdot (\mu / tg \alpha + 1) \cdot (D / D_p - 1) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha). \quad (9.40a)$$

Если учесть среднее по очагу деформации утонение стенки введением в формулу (9.40a) множителя $0,5 \cdot \left(1 + \sqrt{D / D_p}\right)$ и принять среднее напряжение текучести равным $\sigma_{s(ср)} = 0,5 \cdot \sigma_b \cdot (D_p / D + 1)$, что соответствует средней степени деформации при использовании линейной аппроксимации диаграммы упрочнения 1-го вида, что формула (9.40a) примет вид

$$\sigma_{\rho \max} = -0,25 \cdot \beta \cdot \sigma_b \cdot (D_p^2 / D^2 - 1) \cdot (\mu / tg \alpha + 1) \cdot \left(1 + \sqrt{D / D_p}\right) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha). \quad (9.41)$$

Формула (9.41) применима в том случае, когда наибольший диаметр деформированной

части заготовки не превышает диаметра цилиндрической части пуансона ($D_p < D$) (см. рис. 9.20, а).

Если же заготовка при раздаче перемещается вдоль цилиндрической части пуансона, то при определении $\sigma_{\rho \max}$ дополнительно необходимо учитывать приращение радиального напряжения в связи с еще одним изгибом и спрямлением краевого участка заготовки.

С учетом этих факторов и после ряда упрощений формула (9.41) принимает вид

$$\sigma_{\rho \max} = -0,25 \cdot \sigma_{\text{в}} \cdot (D_p / D + 1) \cdot [(D_p / D - 1) \cdot (\mu / \operatorname{tg} \alpha + 1) + 2 \cdot \sqrt{s / D} \cdot \sin \alpha] \cdot (1 + \sqrt{D / D_p}) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha) \quad (9.42)$$

В формуле (9.42) приращение радиального напряжения от изгиба и спрямления краевого участка заготовки при выходе из очага деформации учтено слагаемым $2 \cdot \sqrt{s / D} \cdot \sin \alpha$. Формулы (9.41) и (9.42) позволяют установить влияние учтенных в анализе факторов на σ_{ρ} и σ_{θ} , а также построить эпюры распределения этих напряжений по очагу пластической деформации (рис. 9.20, б).

Рис. 9.21. Схема раздачи при малом радиусе скругления рабочей кромки пуансона

При перемещении заготовки вдоль цилиндрической части пуансона с малым радиусом скругления рабочей кромки ее образующая может потерять контакт с ним, изогнуться и принять бочкообразную форму (рис. 9.21). Это происходит в связи с тем, что при определенной ширине краевого участка заготовки, сошедшего с конической части пуансона, изгибающий момент, образованный окружными силами, увеличивается настолько, что краевая часть заготовки изгибается в меридиональной плоскости. При дальнейшем скольжении заготовки относительно пуансона диаметр ее краевой части уменьшается, так как на элементы заготовки начинают действовать окружные напряжения σ_{θ} , изменившие знак на обратный (они становятся сжимающими); окружные напряжения увеличиваются до тех пор, пока возникшие силы не создадут изгибающий момент, необходимый для спрямления изогнутого края заготовки. После изгиба и спрямления заготовки деформирующее усилие стабилизируется. Приращение диаметра заготовки при раздаче ΔD_p вследствие изгиба краевой части заготовки может быть определено по формуле

$$\Delta D_p = (\sqrt{D \cdot s / \sin \alpha} - 2 \cdot r_{\text{п}} - s) \cdot (1 - \cos \alpha), \quad (9.43)$$

где $r_{\text{п}}$ — радиус сопряжения цилиндрического и конусного участков пуансона. Зная ΔD_p , можно определить диаметр пуансона, при котором после раздачи получается требуемый внутренний диаметр детали:

$$D_{\text{п}} = D_{\text{рв}} - \Delta D_p.$$

Обозначения в формуле (9.43) соответствуют показанным на рис. 9.21.

Анализ приведенных формул и экспериментальные данные показывают, что ΔD_p тем больше, чем больше угол наклона образующей пуансона, толщина стенки заготовки s и диаметр деформированного участка заготовки D_p .

Деформирующее усилие раздачи определяют как произведение наибольшего по очагу пластической деформации напряжения $\sigma_{\rho \max}$, действующего в осевом направлении, на площадь поперечного сечения и коэффициент $\omega = 1,1 \div 1,2$. С учетом формулы (9.42) деформирующее усилие раздачи:

$$P_p = 0,25 \cdot \omega \cdot \pi \cdot D \cdot s \cdot \sigma_{\text{в}} \cdot (D_p / D + 1) \cdot [(D_p / D - 1) \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) + 2 \cdot \sqrt{s / D} \cdot \sin \alpha] \cdot (1 + \sqrt{D / D_p}) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha) \quad (9.44)$$

Из формулы (9.44) следует, что для раздачи заготовок одних и тех же размеров

деформирующее усилие тем больше, чем выше характеристики прочности материала заготовки, степень деформации и силы контактного трения. Угол наклона образующей пуансона α также влияет на деформирующее усилие раздачи. Исследование формулы (9.44) показывает, что существуют оптимальные углы, при которых усилие раздачи наименьшее. При малых коэффициентах трения μ оптимальные углы конусности равны $15 \div 20^\circ$.

Работа деформирования. В процессе раздачи, как и в процессе обжима, усилие деформирования изменяется. Используя методику определения работы деформирования при обжиме, можно получить формулу для определения работы деформирования при раздаче, которая по своей структуре сходна с формулой (9.27):

$$A = \omega \cdot \pi \cdot D \cdot s \cdot \sigma_b \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha) \cdot H \cdot \left(\frac{\sqrt{(D + 4 \cdot H \cdot \sin \alpha)^3} - D \cdot \sqrt{D}}{6 \cdot H \cdot \sqrt{D} \cdot \sin \alpha} - 1 \right) \quad (9.45)$$

Эта формула позволяет определить работу деформирования по ходу пуансона и построить зависимость $P = P(H)$.

Предельный коэффициент раздачи. Критическая степень деформации при раздаче регламентируется одним из двух видов потери устойчивости, а именно — складкообразованием у основания заготовки или появлением шейки в одном или одновременно нескольких участках кромки деформированной части заготовки, приводящей к разрушению — трещине (рис. 9.22). Появление того или иного вида дефектов зависит от характеристик механических свойств материала заготовки, ее относительной толщины s/D , угла наклона образующей пуансона α , условий контактного трения и условий закрепления заготовки в штампе.

Отношение наибольшего диаметра деформированной части заготовки D_p к диаметру исходной заготовки D , при котором может возникнуть местная потеря устойчивости, носит название предельного коэффициента раздачи K_{rp} .

Рис. 9.22. Виды локальной потери устойчивости при раздаче:

a — складкообразование, b — появление шейки, разрушение

Предельный коэффициент раздачи приближенно может быть определен из условий, при котором наибольшее по очагу деформации радиальное сжимающее напряжение $\sigma_{\rho \max}$ не превышает критическое напряжение $\sigma_{кр}$, вызывающее складкообразование:

$$\sigma_{\rho \max} \leq \sigma_{кр}.$$

Приравняв $\sigma_{\rho \max}$ согласно формуле (9.41) критическому напряжению $\sigma_{кр} = \varphi_y \cdot \sigma_T$ (здесь $\varphi_y = \sigma_{кр} / \sigma_T$ — коэффициент устойчивости) и решив полученное уравнение относительно предельного коэффициента раздачи $K_{rp} = D_p / D$, получим [11]:

$$K_{rp} \approx \sqrt{\frac{2,2 \cdot \varphi_y \cdot \sigma_T}{\sigma_b \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot (3 - 2 \cdot \cos \alpha)}} + 1. \quad (9.46)$$

Для получения замкнутого решения при выводе формулы (9.46) принято, что для среднего значения коэффициента раздачи $K_{rp} = 1,43$, сумма $1 + \sqrt{D / D_p} = 1 + 1 / \sqrt{1,43} = 1,83$.

Расчеты по формуле (9.46) показывают, что при $\alpha = 15^\circ$, $\sigma_T = 260$ МПа, $\sigma_b = 400$ МПа, $\varphi_y = 1$ и $\mu = 0,10$ $K_{rp} = 1,405$, а $K_{рд} = 1,405 / 1,1 = 1,277$.

Недостаток формулы (9.46) тот же, что и формулы для определения критического

коэффициента обжима (9.34), рассмотренной ранее.

Определение критической степени деформации в момент появления шейки на кромке заготовки осложняется тем, что окружная деформация при раздаче коническим пуансоном неравномерна вдоль образующей деформированного участка заготовки: периферийный слой, находящийся на кромке, деформируется больше, чем слои, удаленные от кромки, в результате чего последние сдерживают разрушение периферийного слоя, увеличивая его относительное удлинение. В связи с этим относительное удлинение краевого участка заготовки всегда больше относительного удлинения стандартного образца при растяжении.

Одно из решений задачи определения предельного коэффициента раздачи K_{rp} по условию появления шейки на краевом участке заготовки получено А. Ю. Аверкиевым и С. А. Шульгой. Предложенная ими формула для определения K_p имеет вид

$$K_{кр} = \exp(2 \cdot n/3) + \{\bar{s} \cdot \cos \alpha / [2 \cdot \exp(n/3)]\} \cdot (1 + 2 \cdot n/3), \quad (9.47)$$

где α — угол наклона образующей пуансона; $\bar{s} = 2 \cdot s/D$ — относительная толщина заготовки.

Анализ формулы (9.47) показывает, что K_{rp} увеличивается с увеличением показателя деформационного упрочнения n , относительной толщины заготовки s и угла α .

Для облегчения расчетов формула (9.47) представлена в виде графической зависимости $K_{rp} = K_{rp}'(s, n)$ при $\alpha=30^\circ$ (рис. 9.23). Аналогичные кривые можно получить для других углов α .

На предельный коэффициент формоизменения при раздаче влияет анизотропия механических свойств материала заготовки. С увеличением коэффициента нормальной анизотропии R^* предельный коэффициент раздачи увеличивается, так как при этом увеличивается сопротивление стенок заготовки утонению.

Для получения высокой степени деформации при раздаче необходимо, чтобы, как и при обжиге, коэффициент анизотропии в осевом направлении заготовки был бы больше коэффициента анизотропии в окружном ее направлении, а их значение — больше единицы.

Допустимые коэффициенты раздачи могут быть определены и на основании экспериментальных данных. В технической литературе [11, 24] имеются специальные таблицы для определения допустимых коэффициентов раздачи (которые, как и при обжиге, на 10—15 % больше предельных), применяемые в инженерной практике при проектировании технологических процессов изготовления штампованных деталей, включающих операцию раздачи.

Рис. 9.23. Зависимость предельного коэффициента раздачи (K_p) от относительной толщины стенки (s/D) и механических характеристик заготовки (n)

Рис. 9.24. Схема к определению размеров заготовки при раздаче

Размеры заготовки. Длина заготовки, из которой можно получить деталь требуемых размеров, определяется из условия равенства объема заготовки до и после раздачи, а диаметр и толщина стенки заготовки принимаются равными диаметру и толщине стенки цилиндрического участка детали D и s соответственно. После раздачи конический участок детали имеет неравномерную толщину стенки, изменяющуюся от s до s_k . Если принять допущение о том, что это изменение носит линейный характер и наименьшая толщина стенки деформированного участка соответствует расчетной по формуле (9.38), то формулы для определения продольной длины заготовки могут быть представлены в следующем виде:

при раздаче по схеме, приведенной на рис. 9.18:

$$L = l_0 + \frac{D_p + D + 2 \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha)}{4 \cdot D} \cdot \left(\frac{D_p - D}{2 \cdot \sin \alpha} - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \left(1 + \sqrt{D/D_p} \right) + \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180};$$

при раздаче по схеме, приведенной на рис. 9.18:

$$L = l_0 + l \cdot \sqrt{D_p/D} + (1 + D_p/D) \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot \left(1 + \sqrt{D/D_p} \right) \cdot \left(\frac{D_p - D}{2 \cdot \sin \alpha} - 2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right] + \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180}.$$

(9.48)

При выводе формулы (9.49) принято, что радиусы изгиба заготовки r при перемещении ее на коническую часть пуансона и сходе с нее равны друг другу и их значения соответствуют расчетным по формуле (9.19) (рис. 9.24).

Штампы для раздачи. Конструктивная схема штампа для раздачи, как и для обжима, зависит от требуемой степени деформации. Если степень деформации сравнительно невелика и коэффициент раздачи K_p меньше предельного, местная потеря устойчивости (в том числе появление шейки на кромке детали) исключена. В этом случае применяют открытые штампы без противодействия (подпора) на цилиндрический участок заготовки.

При высоких степенях деформации, когда коэффициент раздачи больше предельного, применяют штампы со скользящей втулкой-подпором, создающей противодействие на цилиндрический участок заготовки. Схема такого штампа показана на рис. 9.25. Его конструктивная особенность заключается в том, что скользящая втулка 4 опускается вниз регулируемо по длине толкателями 3, закрепленными на верхней плите штампа 1, что исключает возможность пережима заготовки на участке контакта пуансона, заготовки и скользящей втулки 4. Применение штампа со скользящей втулкой-подпором позволяет повысить степень деформации на 25—30 %.

Рис. 9.25. Штамп для раздачи со скользящей втулкой-подпором:

1 — верхняя плита; 2 — пуансон; 3 — толкатель; 4 — скользящая втулка; 5 — опорный стержень; 6 — пружина; 7 — нижняя плита

Рис. 9.26. Схема интенсификации раздачи

Предельную степень деформации при раздаче конусным пуансоном также можно повысить, если на кромке заготовки получить небольшой фланец шириной $5\text{--}6\cdot s$ при внутреннем радиусе изгиба $r \geq s$. При раздаче фланец воспринимает без разрушения более высокие окружные растягивающие напряжения, чем кромка заготовки без фланца. При этом предельная степень деформации увеличивается на 15—20 % (рис. 9.26).

Критерием выбора типа штампа для раздачи (со скользящей втулкой или без нее) служат расчеты по приведенным выше формулам для определения предельного коэффициента по условию отсутствия складок у основания заготовки (9.46) и условию отсутствия трещин на кромке детали (9.47).