

Интенсификация операций листовой штамповки

План лекции

1. Совмещение нескольких операций в одном штампе
2. Дополнительное силовое воздействие на заготовку
3. Создание неоднородного температурного поля в очаге деформации в зоне передачи усилий
4. Снижение реактивных и повышение разгружающих сил трения при вытяжке
5. Пульсирующая вытяжка
6. Локализация очага деформации

Основная цель интенсификации формоизменения заготовок заключается в сокращении длительности технологического цикла и, следовательно, повышении производительности труда, сокращении числа занятого прессового оборудования и, соответственно, операторов.

В настоящее время число способов интенсификации формоизменения возросло настолько, что появилась необходимость в объединении их в отдельные группы.

1. Совмещение нескольких операций в одном штампе с использованием дополнительного силового воздействия

- Совмещение нескольких формоизменяющих операций в одном штампе с использованием доп. силового воздействия позволяет уменьшить напряжения в опасном сечении заготовки, повысить критическую степень деформации и сократить число переходов, необходимых для получения детали.

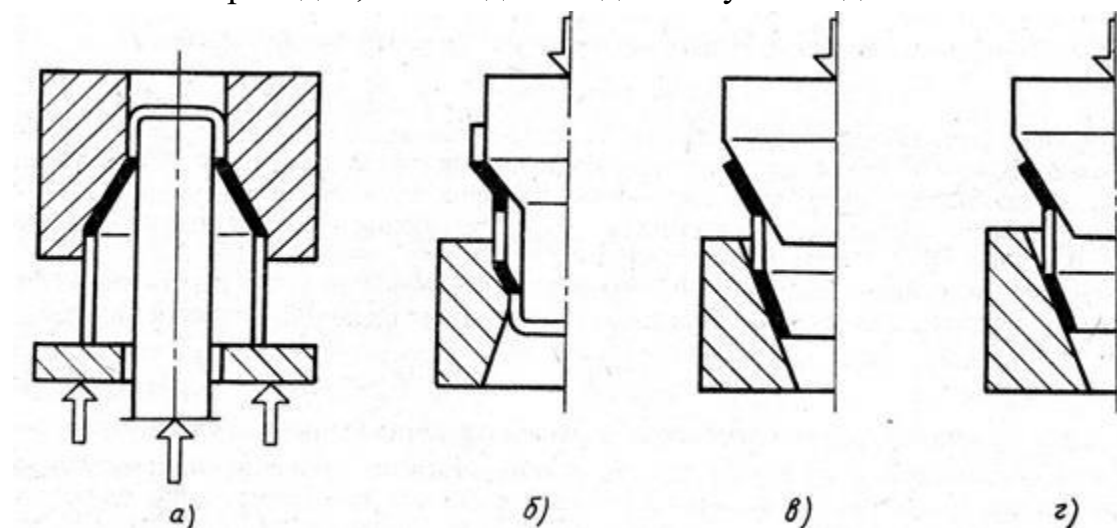


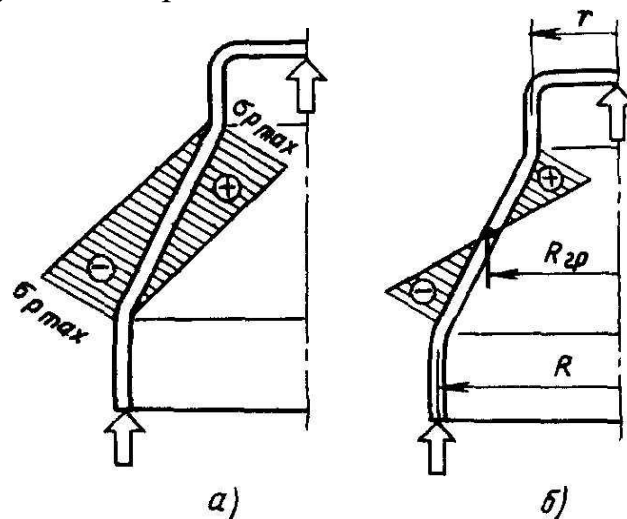
Рис. 1 - Совмещение операций в одном штампе

а – вытяжка с обжимом; б – вытяжка, обжим и раздача; в, г – раздача и обжим

- Анализ этих схем показывает, что при совмещении вытяжки и обжима (рис. 1 а), а также при совмещении вытяжки, обжима и раздачи (рис.1 б) из-за дополнительного усилия, заталкивающего заготовку в матрицу, возникают сжимающие напряжения, разгружающие опасное сечение заготовки и

уравновешивающие в этом сечении напряжения растяжения, возникающие при втягивании заготовки в матрицу пуансоном.

- При этом образуются один общий или два самостоятельных очага деформации (на рис. 1 очаги деформации зачернены). Если обе совмещенные операции приводят к уменьшению поперечных размеров деформируемой заготовки, например вытяжка и обжим (см. рис. 1 *а*), то очаг деформации один, он охватывает участок заготовки, имеющий переменную площадь поперечного сечения.
- Если одна из совмещаемых операций приводит к увеличению, а другая к уменьшению поперечных размеров заготовки, например раздача, обжим, вытяжка (см. рис. 1, *б*), раздача и обжим (см. рис. 1, *в*, *г*), то образуются два отдельных очага деформации, разделенные между собой упругодеформированной зоной.
- В этом случае общая степень деформации заготовки равна сумме степеней деформаций, получаемых при выполнении совмещенных операций



Эпюры распределения напряжений при: *а* — вытяжке и обжиге выполняемых раздельно, *б* — при совмещении вытяжки и обжима

- Преимущества данного способа штамповки рассмотрим на примере совмещения вытяжки (последующего перехода) с обжимом в конической матрице (см. рис. 1, *а*).
- Заготовка в виде цилиндрического стакана втягивается в матрицу давлением пуансона в дно, как при вытяжке, и одновременно заталкивается в матрицу давлением толкателя в краевую часть заготовки, как при обжиге (см. рис. 1, *а*).
- При этом образуется общий очаг пластической деформации, в пределах которого поперечные размеры заготовки только уменьшаются.
- Как и при раздельной штамповке, в очаге деформации возникают напряжения, направленные вдоль образующей заготовки:
 - растягивающие от вытяжки и
 - сжимающие от обжима.
- Предельно возможное формоизменение заготовки при вытяжке и обжиге зависит :
 - от значения максимального растягивающего и
 - максимального сжимающего напряжений в очаге деформации.

- Если эти напряжения достигнут критического значения, произойдет обрыв дна заготовки или складкообразование в зоне передачи усилия под действием сжимающих напряжений.
- при совмещении вытяжки и обжима предельно возможное формоизменение выше, чем при раздельной штамповке. Коэффициент формоизменения $K_{в об}$ принимают равным произведению допустимых коэффициентов вытяжки и обжима:

$$K_{в об} = K_{в} \times K_{об}$$

- Как и при обжиге, на силовые условия совмещенного процесса вытяжки с обжимом влияет угол наклона образующей конической матрицы.
- Существует зона оптимальных углов, при которых технологическое усилие наименьшее.
- При использовании смазочного материала, обеспечивающего коэффициент трения $\mu \leq 0,1$, эта зона оптимальных углов находится в пределах 20—25°.
- Деформирующее усилие, необходимое для одновременной вытяжки и обжима заготовки, определяют, как сумму усилий раздельной штамповки:

$$P = P_{в} + P_{об} = \pi \cdot s \cdot (\sigma_{\rho \max}^в \cdot d + \sigma_{\rho \max}^{об} \cdot D)$$

- Совмещение вытяжки и обжима особенно эффективно при изготовлении конических деталей с малым углом при вершине (10—20°) или деталей с криволинейной образующей большого радиуса кривизны, имеющих скругленную или плоскую вершину.

2. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЗАГОТОВКУ

- Наибольшего эффекта от дополнительного силового воздействия на заготовку достигают при выполнении формоизменяющих операций холодной штамповки, когда в очаге пластической деформации (особенно в краевых его участках), возникают растягивающие напряжения.
- Указанное наблюдается при отбортовке, раздаче и изгибе на ребро полосы в зоне растяжения.
- Создание дополнительных сжимающих напряжений в этих участках заготовки повышает ее пластичность и, следовательно, критическую степень деформации.
- Дополнительное силовое воздействие на заготовку может осуществляться различными способами.
- Например, при отбортовке и раздаче зажимают краевую часть деформируемой заготовки между коническими поверхностями пуансона и выталкивателя (рис. 11.3, а) или пуансона и матрицы (рис. 11.3, б), имеющие разные углы конусности (разность углов составляет 2—3°).
- Защемление краевого участка заготовки при отбортовке и раздаче приводит к возникновению контактных касательных напряжений, сдерживающих развитие локальных деформаций, что повышает критическую степень деформации.

- При вытяжке с утонением дополнительное силовое воздействие осуществляют, проталкивая заготовку в матрицу (рис. 11.3, в)
- а при отбортовке с утонением — противодавлением, приложенным к кромке борта (рис. 11.3, г).

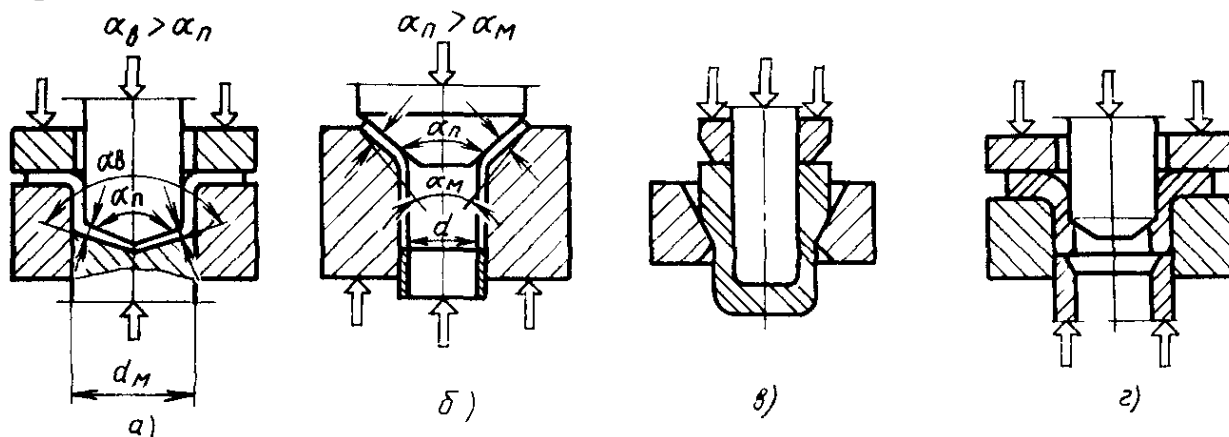


Рис. 11.3. Схема дополнительного силового воздействия на заготовку при: а — отбортовке; б — раздache; в — вытяжке с утонением; г — отбортовке с утонением

Типовые детали, получаемые гидростатическим давлением с наложением продольного сжатия

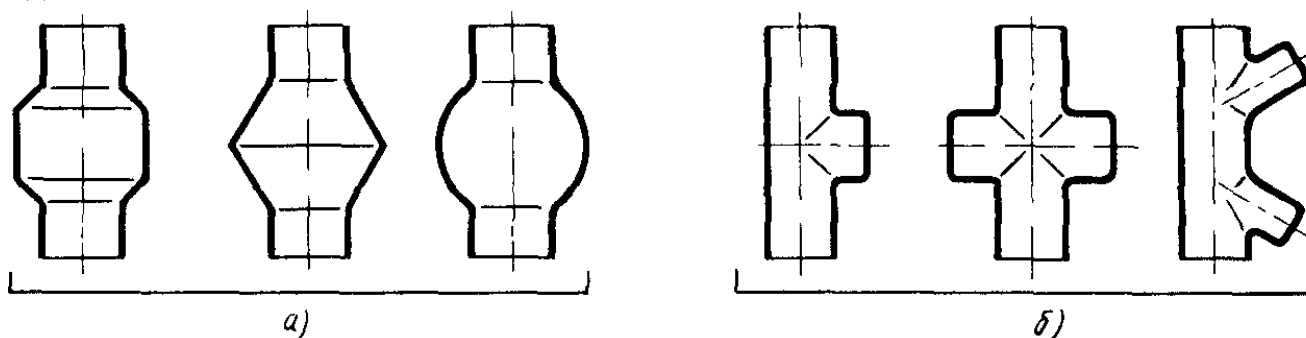


Рис. 11.4 - Детали, получаемые гидростатическим давлением с наложением продольного сжатия

- К способам дополнительного силового воздействия на заготовку можно отнести и способ продольного сжатия отрезка трубы, находящегося под действием внутреннего гидростатического давления, который применяют для получения полых осесимметричных деталей с кольцевым выступом (рис. 11.4, а) и полых деталей с одним или несколькими отводами (рис. 11.4, б).
- Сущность процесса заключается в том, что цилиндрическую заготовку в виде отрезка трубы со стенкой толщиной до 6—8 мм помещают в штамп с разъемной матрицей, где ее одновременно подвергают внутреннему гидростатическому давлению и осевому (продольному) сжатию, создающему в зоне пластической деформации сжимающие напряжения.
- При этом, по условию пластичности, окружные растягивающие напряжения уменьшаются, а предельная степень деформации увеличивается.
- Штамп, для изготовления тройника из трубчатой заготовки, показан на рис. 11.5, а.

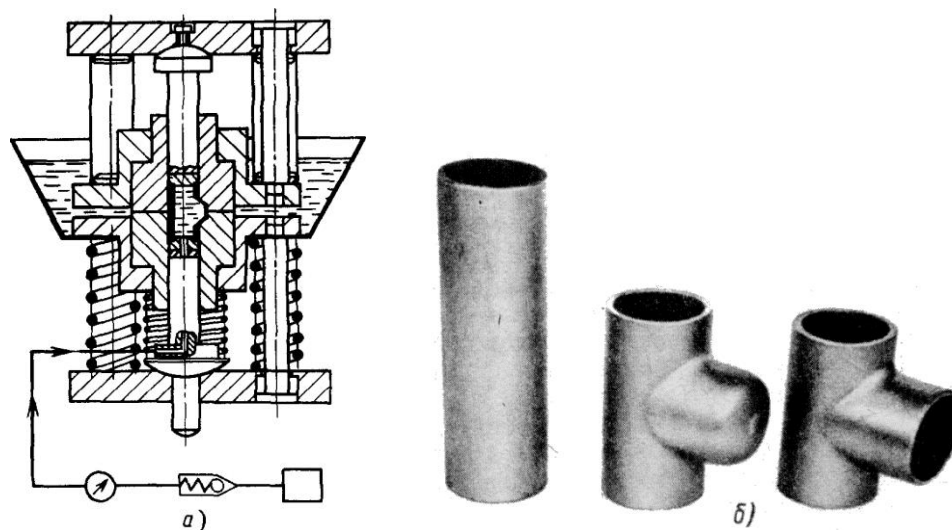


Рис. 11.5. Штамп для изготовления тройника из трубчатой заготовки (а) и технологические переходы изготовления тройника (б)

Особенность его конструкции штампа — матрица с разъемом в горизонтальной плоскости. После того, как осевое сжатие и давление рабочей жидкости достигнет определенного значения, начинается затекание части заготовки в боковое отверстие матрицы, завершающееся формообразованием отвода, при этом первоначальная длина заготовки существенно уменьшается. Технологические переходы изготовления тройника показаны на рис. 11.5, б.

- Штамповку тройников ведут на специализированном гидравлическом прессе (мод. ПГШФ-40) или на универсальных гидравлических прессах усилием 1600—2500 кН в сочетании с автономной насосной станцией.
- Гидростатическое давление жидкости, необходимое для изготовления соединительных деталей велосипедных рам, в конечный момент деформирования достигает 220—280 МН/м².
- Изготовление полых велосипедных рам с одним и более отводами с помощью гидростатического давления с наложением продольного сжатия при любой программе выпуска наиболее эффективно по сравнению с использованием штамповочных заготовок вследствие уменьшения объема ручных операций (сварка и пр.).

3. СОЗДАНИЕ НЕОДНОРОДНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ И В ЗОНЕ ПЕРЕДАЧИ УСИЛИЯ

- Сущность способа интенсификации формоизменения заготовок, основанного на создании в них неоднородного температурного поля, можно установить, анализируя условие сохранения прочности (или устойчивости) при вытяжке.
- Это условие заключается в том, что наибольшее радиальное растягивающее напряжение не должно превышать критического напряжения текучести σ_s , при котором происходит локальная потеря устойчивости (появление шейки) в зоне передачи усилия, а именно — в опасном сечении вытягиваемого изделия.
- Используя экспериментально установленную зависимость $\sigma_s^* = (1,1 \div 1,2) \cdot \sigma_b$, указанное условие без учета сил трения может быть представлено в следующем виде:

$$\beta \cdot \sigma_s \cdot \ln(R/r) = 1,1 \cdot \sigma_B,$$

откуда при $\beta = 1,1$

$$R/r = K_B = \exp(\sigma_B/\sigma_s),$$

где σ_s — напряжение текучести в очаге деформации; σ_B — временное сопротивление разрыву в зоне передачи усилия.

- С учетом этого разработаны два способа вытяжки:
- с локальным нагревом зоны пластической деформации (с целью уменьшения σ_s в этой зоне)
- с локальным охлаждением зоны передачи усилия (с целью увеличения σ_B на этом участке).

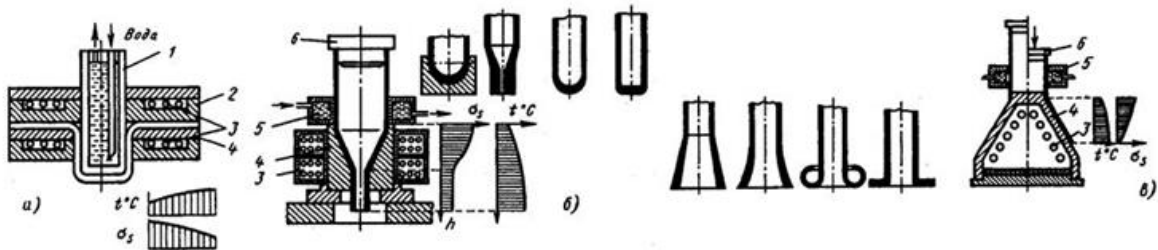
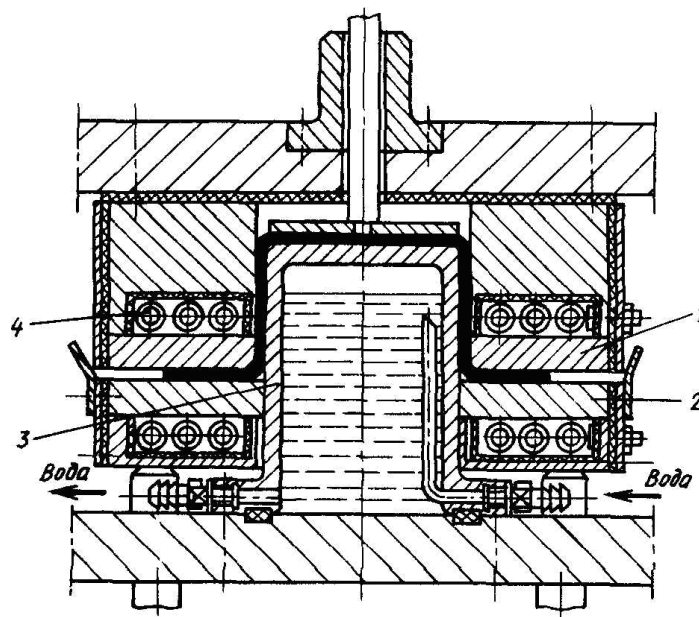


Рис. - Схемы термической интенсификации при вытяжке (а), обжиге (б), раздаче (в): 1 — пуансон; 2 — прижим; 3 — электронагреватели; 4 — матрица; 5 — охладитель; 6 — толкатель

Штамп для вытяжки с нагревом



- Рис. 11.6. Схема штампа для вытяжки с нагревом зоны пластической деформации: 1 — матрица; 2 — прижимное кольцо; 3 — пуансон; 4 — электронагреватель

- Штамповку с нагревом зоны пластической деформации применяют, в основном, в производстве деталей летательных аппаратов, изготовляемых из магниевых и алюминиевых сплавов.
- С локальным нагревом проводят вытяжку высоких цилиндрических и коробчатых деталей из плоских заготовок, а также обжим и раздачу трубчатых заготовок.
- Температура нагрева зоны деформации зависит от материала заготовки.
- Для алюминия и его сплавов она составляет 400—450 °С,

- Для магниевых сплавов — 360—380 °С.
- Время выдержки для нагрева заготовки зависит, в основном, от ее толщины. Для заготовок из алюминиевых сплавов время выдержки определяют из расчета 6—8 сек на 1 мм толщины.
- Для создания возможно большей разности температур в опасном сечении и фланце заготовки пуансон штампа для вытяжки охлаждают проточной водой.
- В связи со сравнительно большой продолжительностью нагрева заготовки штамповку осуществляют на гидравлических прессах или на прессах для штамповки пластмасс.
- Особенно эффективна вытяжка с локальным нагревом при изготовлении некруглых в поперечном сечении деталей: квадратных, прямоугольных, овальных, типа «восьмерки» и др., с малым радиусом скругления угловых участков.
- При вытяжке с нагревом за одну операцию можно получить некруглые детали более высокие, чем при вытяжке при комнатной температуре.
- Установлено, что при вытяжке магниевых сплавов МА1 и МА8 с нагревом фланца до температуры 350 °С критическая степень деформации увеличивается в 3—3,5 раза по сравнению с вытяжкой без локального нагрева.
- При вытяжке температура нагрева очага деформации должна повышаться от внутреннего к внешнему контуру фланца, при этом сопротивление деформированию материала фланца будет увеличиваться в обратном направлении.
- Неравномерное температурное поле по очагу деформации может быть получено в результате изменения числа и места расположения нагревательных элементов, а также охлаждения отдельных участков штампа.
- Кроме того, неравномерное температурное поле может быть получено электроконтактным нагревом, особенность которого заключается в том, что электрический ток подводится к заготовке через контакты, расположенные только у внешнего контура.
- При этом в зависимости от времени нагрева перепад температуры в очаге деформации (фланца) составляет 200—650 °С.
- Недостатки штамповки с локальным нагревом заключаются в конструктивной сложности штампа и низкой производительности труда,
- Достоинства — в возможности существенного сокращения числа операций при вытяжке высоких деталей с поперечным сечением сложной формы.

Вытяжка с применением глубокого холода

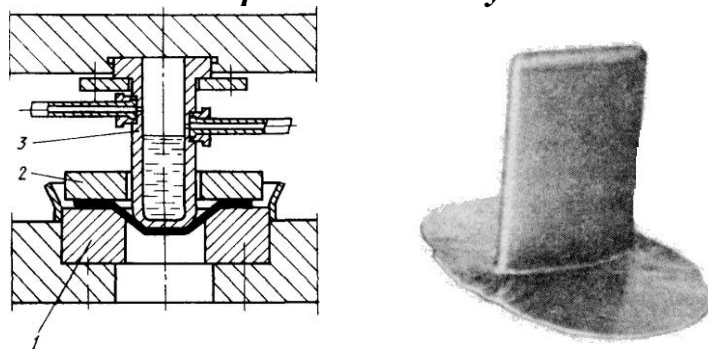


Рис.11.8 - Схема штампа для вытяжки с глубоким охлаждением опасного сечения детали и Типовая деталь, полученная с использованием местного нагрева или холода: 1 — матрица, 2 — прижимное кольцо, 3 — пуансон

- **Вытяжка с применением глубокого холода** основана на способности определенной группы металлов повышать свою прочность под воздействием весьма низких (криогенных) температур.
- При охлаждении сталей аустенитного класса до температур —180 °С существенно возрастает :
 - предел текучести,
 - временное сопротивление и другие характеристики прочности.
- При этом характеристики пластичности (например, относительное удлинение) снижаются незначительно или остаются без изменения.
- Например, при охлаждении сталей 10 и 20 до температур —180 °С временное сопротивление увеличивается в 1,9—2,1 раза, а стали 12Х13 в 2,3 раза.
- Особенность штампов заключается в том, что в пустотелый пуансон периодически, при каждом ходе прессы, подается определенная доза хладагента в виде жидкого азота или жидкого воздуха, имеющего температуру кипения порядка —180 °С.
- Относительное удлинение сталей 10 и 20 при этой температуре несколько снижается, а стали 12Х13 остается неизменным.
- Кратковременное глубокое охлаждение с последующим нагревом до комнатной температуры на структурное состояние указанных сталей не влияет.
- Рассмотренное явление используется при вытяжке для повышения прочности опасного сечения вытягиваемой детали путем локального охлаждения зоны передачи усилия. Это позволяет существенно повысить степень деформации за один переход и, следовательно, увеличить производительность труда. Преимущество заключается
 - в сокращении числа операций при вытяжке цилиндрических деталей по сравнению с вытяжкой при комнатной температуре и
 - возможность штамповки стальных тонколистовых деталей сложной формы за одну операцию.
- При подаче хладагента происходит интенсивное охлаждение пуансона, который, соприкасаясь с тонколистовой заготовкой, отбирает теплоту, охлаждает ее и повышает прочность металла в зоне контакта пуансона и заготовки.
- В результате этого опасное сечение детали способно выдерживать более высокую нагрузку, чем при вытяжке при комнатной температуре.
- Время охлаждения составляет 10—20 сек, поэтому вытяжку с применением глубокого холода ведут на гидравлических прессах.
- Предельные коэффициенты вытяжки для стали 10 и 20 при таком процессе достигают 0,38—0,33.
- Недостатки данного способа вытяжки — сложность конструкции штампа и необходимость применения установки для хранения и подачи хладагента в штамп

4. СНИЖЕНИЕ РЕАКТИВНЫХ И ПОВЫШЕНИЕ РАЗГРУЖАЮЩИХ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ

- При вытяжке на контактной поверхности заготовки и матрицы возникают силы трения F_1 , F_2 и F_3 превышающие при коэффициенте трения $\mu = 0,25 \div 0,30$ (без смазочного материала) усилие, затрачиваемое на пластическое формоизменение. Соотношение значений указанных сил трения следующее:

$$F_1 = 75, F_2 = 20 \text{ и } F_3 = 5 \%$$

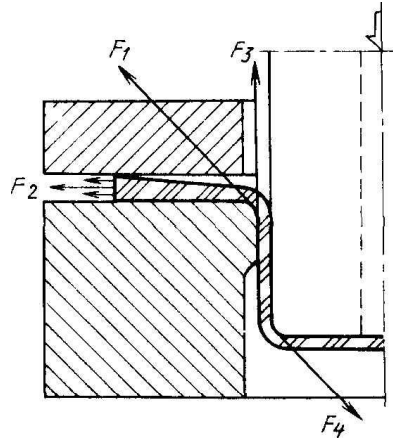


Рис. 11.9 – Схема действия сил при вытяжке

- В результате действия сил F_1 , F_2 и F_3 происходит увеличение растягивающих напряжений в опасном сечении вытягиваемой детали, что может привести к утонению стенки и даже обрыву дна.
- Поэтому всемерно стремятся снизить силы трения F_1 , F_2 и F_3 , применяя эффективные смазочные вещества и уменьшая шероховатость поверхности инструмента и заготовки.
- Именно поэтому рабочие поверхности матриц для вытяжки (плоскую и цилиндрическую) шлифуют, а поверхность криволинейную (заходную) — полируют.
- Сила трения F_4 приложена к контактной поверхности закругленной части пуансона и полуфабриката. Она действует в направлении движения пуансона
- Сила трения F_4 блокирует распространение растягивающих напряжений в опасном сечении, препятствует утонению стенки.

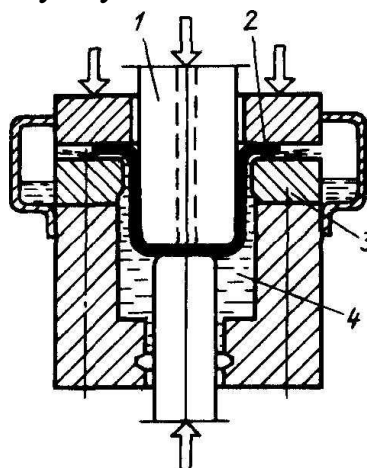


Рис. 11.10 - Штамп для гидромеханической вытяжки

- По мере опускания пуансона 1 давление жидкости в камере 4 возрастает настолько, что она начинает вытесняться в круговой зазор между фланцем

вытягиваемой заготовки 2 и матрицей штампа 3. При этом реактивные силы трения F_1 , F_2 и F_3 существенно уменьшаются, поскольку фланец заготовки перемещается между зеркалом прижимного кольца и тонким слоем жидкости.

- Одновременно высокое гидростатическое давление жидкости создает нормальное давление на внешнюю поверхность вытягиваемой детали, что приводит к увеличению силы трения F_4 , и опасное сечение разгружается.
- Уменьшение реактивных и увеличение активных (разгружающих) сил трения позволяет повысить предельно-допустимую степень деформации и с помощью ГМВ получать за одну операцию цилиндрические детали с относительной высотой $H/d \geq 1$ при малых радиусах скругления дна и высоком качестве поверхности детали.
- Недостаток ГМВ — большая энергоемкость процесса, так как необходимое деформирующее усилие в 2—3 раза больше, чем при обычной вытяжке.
- Это объясняется тем, что большие энергозатраты расходуются на преодоление противодействия жидкости (до 80 %).
- ГМВ за одну-две операции получают детали конической, параболической и сферической формы, в то время как при вытяжке в жестких штампах для изготовления такого рода деталей требуется три-четыре и более операций.

5. ПУЛЬСИРУЮЩАЯ ВЫТЯЖКА

- Пульсирующую вытяжку осуществляют в штампе с прижимным кольцом, совершающим колебательное (пульсирующее) движение вдоль оси штампуемой детали.
- В этих условиях вначале происходит вытяжка без прижима заготовки, сопровождаемая появлением складок (гофрированием) (рис. 11.11, а),
- а затем правка (разглаживание) фланца прижимным кольцом (рис. 11.11, б).
- В период вытяжки без прижима заготовки отсутствуют силы трения, возникающие при скольжении фланца относительно рабочей поверхности прижимного кольца штампа,
- в связи с чем радиальные растягивающие напряжения в опасном сечении меньше, чем при вытяжке с прижимом заготовки.

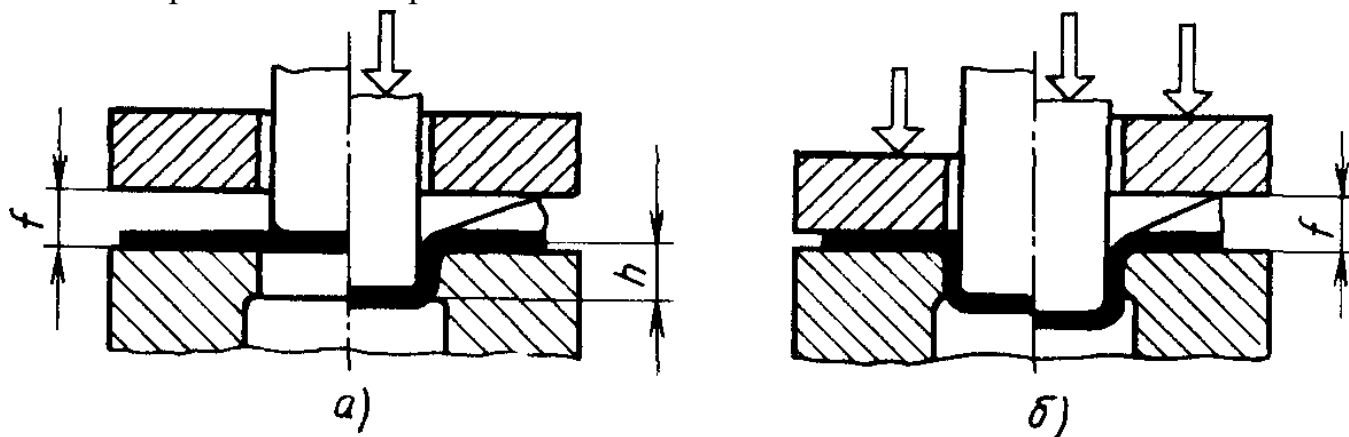


Рис. 11.11. Периоды процесса пульсирующей вытяжки: а — появление складок, б — правка складок прижимным кольцом штампа

- При пульсирующем режиме работы допустимый коэффициент вытяжки составляет 2,5—2,9, а высота деталей, получаемых за одну многопереходную операцию, в 2—2,5 раза больше, чем при обычной вытяжке.
- Наиболее эффективно пульсирующую вытяжку применять при штамповке деталей коробчатой формы, при изготовлении которых допустимый угловой коэффициент вытяжки достигает 10,0—12,5, в то время как при обычной вытяжке он составляет 2,9—3,3.
- Это позволяет существенно сократить число операций — вместо трех-четырех операций можно получать требуемую деталь за одну, осуществляемую в условиях пульсирующего режима.
- Применение пульсирующей вытяжки особенно целесообразно при штамповке цилиндрических деталей, имеющих относительную толщину стенки:

$$\bar{s}_0 = s / d_{\Pi} \leq 0,03$$

- При этом радиус скругления рабочей кромки матрицы должен быть в 2—3 раза меньше, чем при обычной вытяжке
- Значение этого радиуса определяют по эмпирической формуле:

$$r_{\text{м}} = s \cdot (0,25 + 0,5 / \sqrt{\bar{s}_0})$$

где s_0 — относительная толщина заготовки;

$r_{\text{м}}$ — радиус рабочей кромки матрицы

- Для полного разглаживания фланца и улучшения условий его скольжения относительно контактной поверхности инструмента рабочая часть (зеркало) прижимного кольца должна иметь плоский кольцевой участок шириной 3—5 мм, граничащий с его внутренним контуром, а остальная часть зеркала — быть слегка конусной (угол конусности $0^{\circ}30'—1^{\circ}$).
- Амплитуду пульсации f прижимного кольца и единичный ход пуансона h_{Π} за один цикл пульсации рассчитывают по формулам:

$$f = 0,05 \cdot (K_{\text{в}} - 1) \cdot d_{\Pi};$$

где d_{Π} — диаметр пуансона.

- При пульсирующей вытяжке усилие, создаваемое прижимным кольцом, должно быть в 3—4 раза больше усилия, создаваемого пуансоном, так как только при этом условии обеспечивается разглаживание складок, периодически появляющихся во фланце.
- Для пульсирующей вытяжки применяются специальные прессы двойного действия мод.: ПГ-13, ПМШ-500, ПГВ-1 с номинальным усилием 500/1000, 1000/4000 и 2000/3000 кН (в числителе указано усилие, развиваемое внутренним, а в знаменателе внешним ползунами прессы).

6. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

- Сущность локализации заключается в том, что деформирующий инструмент (пуансон, матрица, ролик, накатник) контактирует с заготовкой лишь на

небольшом (локальном) участке, создавая в нем очаг пластической деформации, который непрерывно перемещается по заданной траектории.

- При этом существенно уменьшается:
- сила деформирования,
- реактивные силы трения,
- повышается стойкость инструмента,
- упрощается его конструкция, что создает возможность производства большой номенклатуры деталей при малых затратах средств на изготовление оснастки.

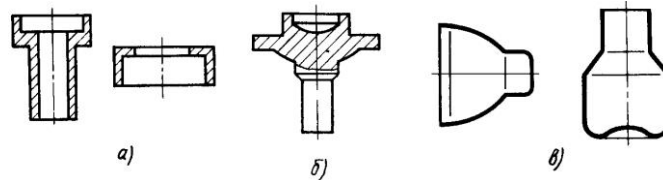


Рис. 11.12 - Детали, полученные локальным деформированием: *а* — торцевой раскаткой, *б* — сферодвижной штамповкой, *в* — ротационной вытяжкой

- К числу способов ротационной обработки металла относят: ротационную вытяжку, сферодвижную штамповку, торцевую и кольцевую раскатку полых заготовок, накатку зубьев шестерен, накатку резьбы и шлицев и пр.

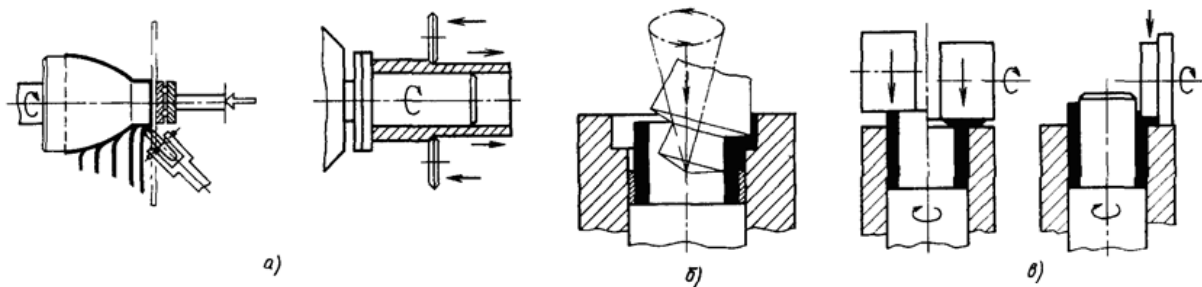


Рис. 11.13 - Схемы процессов с локальным деформированием: *а* — ротационная вытяжка; *б* — сферодвижная штамповка; *в* — торцевая раскатка (без утонения и с утонением)

- При *ротационной вытяжке* заготовка вращается вместе с шаблоном или оправкой, а давяльник в виде ролика перемещается в направлении касательной к шаблону (рис. 11.13, *а*).
- При *сферодвижной штамповке* заготовка не вращается, а инструмент (пуансон или матрица) совершает качательное и поступательное (вдоль оси детали) движение (рис. 11.13, *б*).
- При *торцевой раскатке* вращается заготовка, а ролик, ось которого расположена перпендикулярно оси заготовки, передает давление на ее торец (рис 11.13, *в*)
- Типовые детали, полученные ротационной обработкой, показаны на рис. 11.12.
- Точность размеров этих деталей соответствует 8—11-квалитету,
- Шероховатость поверхности $Ra=5\div0,63$ мкм.
- Производительность ротационной обработки ниже производительности штамповки на прессах (5—10 дет/мин), за исключением накатки резьбы и неглубоких шлицев на специализированных автоматах.