Глава 21. Листовая штамповка (ЛШ)

К листовой штамповке относятся методы получения деталей и изделий, для которых в качестве исходной заготовки используют листовой материал, трубные заготовки, катаные и гнутые профили.

штамповку осуществляют как в холодном, так и подогретом состоянии. Горячей листовой штамповкой (ГЛШ) получают крупногабаритные детали паровых и гидравлических турбин большой мощности, детали прессов, прокатных станов, элементы космических аппаратов, подводных лодок, судов и др.

Широкое применение листовой штамповки обусловлено рядом достоинств, которыми обладает данный способ. К их числу можно отнести:

1) малую металлоемкость изделий;

2) высокую точность штампуемых изделий;

3) хорошее качество поверхности, что позволяет полностью исключить или совсем свести к минимуму обработку поверхности;

4) высокую производительность;

5) простоту механизации и автоматизации процессов листовой штамповки;

6) приспособляемость к условиям производства (рентабельность в условиях как мелкосерийного, так и массового производства);

7) малоотходность;

8) возможность получения различных и оптимальных механических свойств в различных участках деталей, получаемых штамповкой.

Все операции листовой штамповки можно объединить в две группы: разделительные и формоизменяющие.

21.1. Разделительные операции листовой штамповки

При выполнении разделительных операций деформирование заготовки происходит вплоть до разрушения. В начальной стадии процесса разделения заготовки пластическая деформация сосредоточивается у кромок инструмента (рис. 21.1), который внедряется на некоторую глубину в металл. При этом возникают очаги деформации, которые в ходе процесса, продвигаясь в толщину заготовки, смыкаются. В результате пластическая деформация охватывает всю толщину заготовки в месте реза.

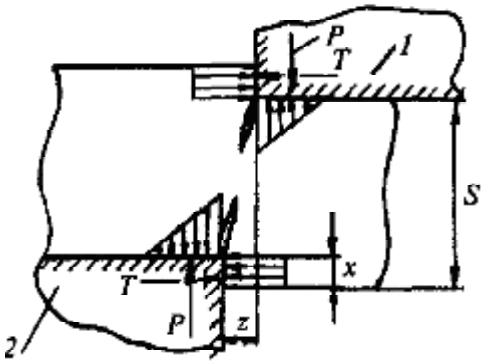

Рис. 21.1. Схема разрушения металла при разделительной резке

Дальнейшее внедрение режущих кромок вызывает смещение одной части заготовки относительно другой. При этом в результате действия момента, образованного силами *P*, заготовка стремится повернуться, а на ее боковых гранях возникают горизонтальные силы *T*, прижимающие заготовку к боковым граням режущего инструмента. Эти силы при смещении режущего инструмента относительно заготовки сглаживают поверхность, образуя блестящий поясок *x* по поверхности среза. При достижении предельной величины деформации в слоях заготовки, расположенных вблизи от режущих кромок, возникают трещины, которые из-за расклинивающего действия сил *P* и *T* несколько разворачиваются и сливаются (встречаются) в теле заготовки.

Условием встречи трещин в теле заготовки является выбор величины зазора *Z* между пуансоном *1* и матрицей *2*. Для конструкционных сталей зазор обычно составляет 10% от толщины разрезаемого металла (S).

Разделительной резкой получают детали, к которым не предъявляются высокие требования качества поверхности разделения (например, заготовки под последующую обработку).

В плоских деталях, полученных из листа, часто требуются хорошая чистота поверхности разделения и повышенная точность поперечных размеров, которые достигаются увеличением высоты блестящего пояска. Это возможно за счет уменьшения концентрации напряжений, например при затуплении режущих кромок, или за счет ликвидации растягивающих напряжений в очаге деформирования.

В результате чистовой вырубки получают высокоточные детали, не требующие дальнейшей обработки, например шестерни часов, рычаги фотоаппаратов и т. д. Использование чистовой вырубки увеличивает энергозатраты процесса в 2—2,5 раза.

Основные виды разделительных операций: **отрезка** — разделение заготовки по незамкнутому контуру; **вырубка** — разделение заготовки по замкнутому контуру, при котором отделяемая часть является деталью; **пробивка** — разделение заготовки по замкнутому контуру, при котором отделяемая часть является отходом.

При проектировании деталей, получаемых вырубкой или пробивкой, следует придерживаться следующих правил.

1. Необходимо избегать сложных конфигураций с узкими и длинными вырезами контура или очень узкими прорезями.

2. Малые и средние заготовки (до 300 мм) необходимо проектировать с радиусами скругления углов (г $\geq 0{,}5S$), поскольку для их изготовления применяют цельные матрицы. Крупногабаритные заготовки (более 300 мм) можно проектировать без закруглении углов, так как они изготовляются в составных матрицах.

Сопряжения сторон наружного контура следует выполнять с закруглениями лишь в случае необходимости вырубки детали по всему контуру.

Для безотходного раскроя допускают сопряжения под прямым углом.

4. Наименьшие размеры пробиваемых отверстий не должны быть менее (1,3-1,5)S.

5. Наименьшее расстояние от края отверстия до прямолинейного наружного контура должно быть не менее S для фигурных круглых отверстий и не менее 2,5S, если края отверстий параллельны контуру детали.

6. Не следует располагать отверстия в заготовке, подлежащей гибке, близко к радиусу закругления детали. Наименьшее расстояние от края отверстия до загнутой полки должно составлять $a \geq r + 2S$, где г — радиус изгиба.

В большинстве случаев конфигурация холодноштампованной детали или ее заготовки может быть изменена без какого-либо ущерба для конструктивного или эксплуатационного назначения таким образом, что измененная форма детали позволит значительно снизить расход материала (рис. 21.2).

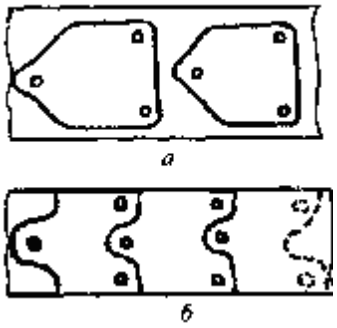

Рис. 21.2. Примеры раскроя: *а* — нерационального; *б* — рационального

21.2. Формообразующие операции листовой штамповки

В отличие от разделительных, при формоизменяющих операциях во избежание разрушения заготовки избегают максимальной локализации пластической деформации. Наиболее широко применяющиеся формообразующие операции листовой штамповки—гибка и вытяжка.

Гибка — изменение направления оси заготовки. В процессе гибки слои металла, прилегающие к пуансону, сжимаются, а противоположные — растягиваются (рис. 21.3, *а*).

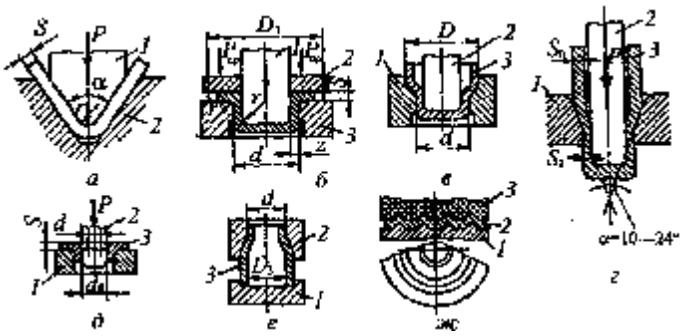

Рис. 21.3. Формообразующие операции:
а — гибка; *б* — вытяжка; *в* — многопереходная вытяжка; *г* — вытяжка с утонением стенки; *д* — отбортовка; *е* — обжим; *ж* — формовка; *1* — матрица; *2* — пуансон; *3* — заготовка

Серединные слои заготовки напряжений при этом не испытывают, их называют нейтральными.

При гибке следует учитывать направление прокатки; в общем случае желательно, чтобы сжатие и растяжение были направлены вдоль волокон.

Определяя необходимый угол изгиба, следует учитывать так называемый угол пружинения — уменьшение угла изгиба после снятия деформирующей нагрузки вследствие упругой деформации. Угол пружинения увеличивается с увеличением радиуса изгиба, прочностных характеристик металла, с уменьшением толщины заготовки.

Гибкой получают изделия типа скоб, кронштейнов, заготовок для шовных труб и др.

Основные технологические требования к конструкции изогнутой детали.

1. Минимально допустимые радиусы гибки следует применять лишь в случае конструктивной необходимости, в большинстве случаев возможно применить увеличенные радиусы гибки r = S, а для толстых заготовок r > 2S.

2. В случае гибки пластичных металлов (сталь 10,20) с малым радиусом закругления (0,5S) линию изгиба желательно располагать поперек волокон проката. В случае гибки тех же металлов с радиусом r ≥ S расположение линии изгиба безразлично.

3. При гибке твердых и малопластичных металлов (бронза, сильноупрочненная латунь, лента пружинной стали и др.) линию изгиба следует располагать поперек волокон проката. Наименьший радиус изгиба берется в пределах (2—4) S.

4. При изгибе заготовки в разных направлениях, а также при изготовлении правых и левых деталей из одной заготовки радиус закругления одного из перегибов должен быть увеличен. Гибка должна быть произведена таким образом, чтобы сторона с заусенцами пришлась на наружную сторону перегиба с увеличенным радиусом.

5. Для увеличения жесткости гнутых деталей и устранения упругого пружине-ния рекомендуется штамповка ребер жесткости поперек угла изгиба.

6. Наименьшая высота отгибаемой полки должна быть h ≥ 3S.

Вытяжка без утонения стенок — превращение плоской заготовки в полое изделие или увеличение высоты полого полуфабриката путем протягивания через матрицу с уменьшением поперечных размеров заготовки, но без предварительного ее утонения (рис. 21.3, б).

Особенностью вытяжки является то, что фланец и вертикальные стенки вытягиваемой заготовки находятся в различных условиях напряженного и деформированного состояний. Сжимающие напряжения σ_0 во фланце могут привести к потере устойчивости (образованию складок), а растягивающие напряжения σ_p в стенке могут привести к отрыву донной части, что накладывает определенные ограничения на технологический процесс вытяжки. Мерой деформации при вытяжке является коэффициент, равный

$$K_B = D_{заг} / d_{изд}$$

где $D_{заг}$ — диаметр заготовки; $d_{изд}$ — диаметр изделия.

Обычно K_B = 1,6—2,2. Предельный (теоретический) коэффициент вытяжки для деталей типа кругового цилиндра с дном равен 2,7.

Если требуется получать детали с большими значениями коэффициента вытяжки, применяют многопроходную вытяжку (рис. 21.3, в) с межоперационным отжигом.

Размеры заготовок под вытяжку определяют из условия равенства поверхностей

заготовки и отштампованного изделия.

Вытяжка с утонением **стенки** отличается тем, что зазор между матрицей и пуансоном выбирается меньшим, чем толщина материала заготовки (рис. 21.3, г). Заготовкой в этом случае является стакан, полученный обычной вытяжкой. Матрица имеет форму деформирующего конуса с углом 10—20°.

Обычно при вытяжке с утонением стенки не стремятся уменьшить диаметр изделия; утонение стенки приводит к большому увеличению высоты изделия. Степень деформации стенки при этом может составлять 40—60%.

Вытяжкой получают как осесимметричные детали, так и детали коробчатой и более сложных форм, например кузовные детали автомобилей.

Основные технологические требования к конструкции полых деталей, изготовленных вытяжкой:

1) необходимо по возможности избегать сложных и несимметричных форм вытягиваемых деталей, прибегая к ним лишь в случае явной конструктивной необходимости;

2) радиусы закруглений у фланца должны быть по возможности больше, а радиусы закруглений у дна могут быть взяты меньшими. Сопряжение стенок с дном без радиуса закругления может быть выполнено путем дополнительной калибровки или при штамповке толстых заготовок ($D/S \leq 20$);

3) необходимо избегать глубоких вытяжек с широким фланцем ($D > 3d$ при $h > 2d$, где h — высота цилиндрической части), требующих большого количества операций;

4) в прямоугольных коробках следует избегать острых углов в плане и у дна детали.

Отбортовка (рис.21.3, *д)* — процесс получения горловины или просто бортов вокруг предварительно пробитых отверстий. Формоизменение определяют коэффициентом отбортовки $K_0 = d/d_0$, который зависит от механических характеристик металла заготовки и ее относительной толщины S/d_0 и не должен превышать 1,8.

Отверстие для отбортовки предпочтительно просверлить, так как при пробивке появляющиеся наклеп и заусенцы существенно снижают допустимый K_0. В этой связи часто комбинируют пробивку отверстий с последующим рассверливанием. Отбортовку применяют для изготовления кольцевых деталей с фланцами, для образования выступов под резьбу, для сварки с трубами и т. п.

Обжим — уменьшение периметра поперечного сечения концевой части полой заготовки — производится сужающей полостью матрицы (рис. 21.3, *е)* насаживанием ее на гильзу. За один переход можно получить d = (0,7—0,8)D. Для получения горловины еще меньшего диаметра делают несколько последовательных операций, иногда с промежуточным отжигом.

Раздача — увеличение периметра поперечного сечения концевой части полой заготовки путем заталкивания в нее расширяющегося пуансона. Раздача — это операция, противоположная обжиму.

При необходимости местного изменения формы листовой заготовки, сохраняя при этом размеры ее наружного контура, производят локальную вытяжку, называемую формовкой.

Формовку часто используют для увеличения жесткости листов конструкции путем создания конструкционных выступов или впадин, ребер жесткости и т. п. — капот и крышка багажника автомобиля, двери, боковины канистр (рис. 21.3, *ж).*

Формовка производится в штампах, аналогичных вытяжным штампам, с увеличенной силой прижима до такой степени, что зажатая часть листа не подвергается деформации. Изменение формы внутренней части изделия происходит за счет ее утонения.

21.3. Оборудование и инструмент для листовой штамповки

Разделительные операции осуществляют, как правило, на механических ножницах гильотинного, алигаторного и дискового типов или на штампах, установленных на различные виды прессов.

Ножницы — специализированная машина, позволяющая отрезать заготовки различных конфигураций и видов как по замкнутому, так и по незамкнутому контуру.

У *гильотинных* ножниц инструмент (режущие ножи) имеет наклонные режущие кромки и перемещается параллельно-поступательно.

У *апигаторных* ножниц режущая верхняя кромка совершает угловые качателъные движения относительно оси, закрепленной на нижней кромке.

У *дисковых* ножниц инструмент (режущие ножи) изготовлен в виде двух (или более) металлических дисков с параллельными осями вращения, которые вращаются в разные стороны.

Формообразующие операции листовой штамповки осуществляют на механических прессах с увеличенным ходом, а также гидравлических прессах в штампах различных типов (рис. 21.4).

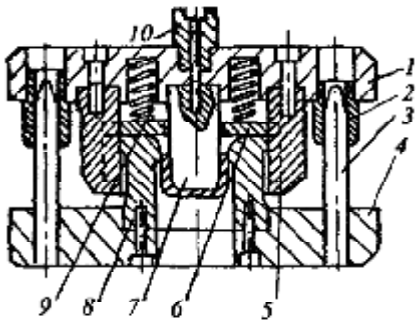

Рис. 21.4. Штамп для вытяжки

Штамп состоит из верхней*1* и нижней *4* плит, на которых крепится инструмент — матрица *8,* вытяжной пуансон 7, вырубная матрица 5, направляющие колонки *3* и втулки *2,* пружины прижима *9* и прижим *б,* нажимный хвостовик *10.*

Штампы устанавливаются на пресс, верхняя плита штампа посредством хвостовика *10* крепится к ползуну, а нижняя — к подштамповой плите пресса. Оператор пресса укладывает заготовку на позицию обработки (на деталь *8)* и кнопкой или педалью включает пресс. Ползун опускается, инструмент пресса воздействует на заготовку, осуществляя определенные операции листовой штамповки (в нашем случае вырубает из полосы круглую заготовку), а затем вытягивает цилиндрический стаканчик.

В современном массовом производстве применяют сложные многопозиционные штампы или группы штампов, установленные на нескольких прессах. Укладка заготовки в штамп, съем ее с позиции обработки и передача заготовки с позиции на позицию, как правило, механизированы или автоматизированы.

21.4. Другие способы листовой штамповки

В единичном и мелкосерийном производстве применять жесткие штампы экономически невыгодно. В этих случаях широко применяются штамповка в универсальных штампах эластичной средой, штамповка взрывом, электрогидравлическая (ЭГШ) и магнитно-импульсная, давильные работы и др.

Штамповка эластичной средой. Существует две разновидности способа: вытяжка резиновым пуансоном (рис. 21.5, *а)* и вытяжка резиновой матрицей (рис. 21.5, б).

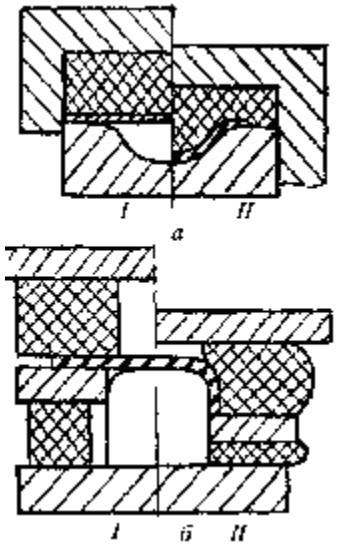

Рис. 21.5. Штамповка эластичной средой: *а* — вытяжка резиновым пуансоном; *б* — вытяжка резиновой матрицей; *I* — начальная стадия процесса; *II* — конечная стадия процесса

Заготовку укладывают на матрицу (рис. 21.5, *а)* или на пуансон и прижим (рис. 21.5, б). Резина, опускаясь, прижимает заготовку к матрице (*а*) или прижиму (б) и вдавливает ее в матрицу или обтягивает по пуансону, формуя деталь.

В последнее время резину заменяют полиуретаном, который обладает весьма высокой твердостью, эластичностью и износостойкостью (выдерживает до 50 000 штамповок), что позволяет существенно увеличивать срок службы таких штампов.

Штамповка взрывом применяется для изготовления крупногабаритных деталей при толщине более 2 мм. Преимуществом данного способа является высокая экономическая эффективность в результате резкого снижения капитальных затрат и сокращения сроков и стоимости подготовки производства. Другим достоинством является возможность штамповки деталей из высокопрочной стали.

Штамповка взрывом (рис. 21.6) основана на деформации листовой заготовки *2* давлением ударной среды, образующейся при взрыве бризантных взрывчатых веществ*1*.

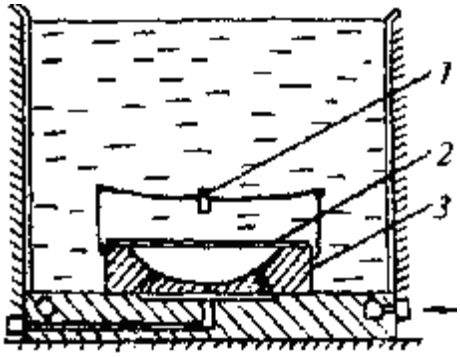

Рис 21.6. Схема штамповки взрывом:*1* — заряд; *2* — заготовка; *3* — матрица

В зависимости от размеров и формы штампуемых деталей штамповка взрывом осуществляется различными способами: при больших габаритах деталей — штамповкой в бассейнах с водой; при штамповке небольших деталей — штамповкой в наземных установках в бронекамерах.

Штампы для штамповки взрывом состоят из матрицы *3,* имеющей рабочую тяжка резиновой матрицей; *1* — начальная полость соответственной формы, с отверстием для удаления воздуха. Для небольших деталей применяют металлические литые или сварные матрицы. Для крупногабаритных деталей, в целях удешевления, матрицы выполняют из дерева или железобетона с поверхностной облицовкой рабочих поверхностей (металлом или стеклопластиком).

Известны случаи применения для штамповки взрывом матрицы, изготовленной из льда (обычно для крупногабаритных деталей). Вода замораживается жидкой углекислотой. После штамповки появившиеся в матрице трещины заливают водой и вновь замораживают. Штамповка производится при 10—15 °С.

Электрогидравлическая штамповка (ЭГШ). В основу ЭГШ положен электрогидравлический эффект образования ударных волн при мощных электрических разрядах в несжимаемых жидкостях (рис. 21.7).

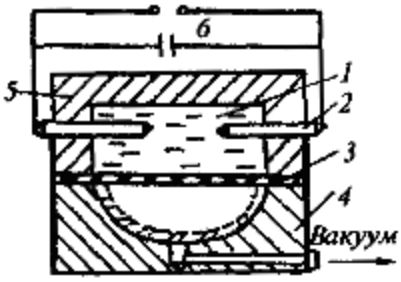

Рис. 21.7. Схема электрогидравлической штамповки: *1*— камера; *2* — электроды; *3* — заготовка; *4* — матрица; 5 — контейнер; *6*—источник тока

Заготовку *3* укладывают на матрицу *4,* имеющую полость, соответствующую конфигурации желаемой детали, и сверху закрывают контейнером 5. В контейнер введены электроизолированные электроды *2,* подсоединенные к сети высоковольтных конденсаторов большой

емкости. Полость матрицы вакуумируют, а в полость контейнера закачивают воду. При мгновенном разряде конденсаторной батареи (время разряда $4 \cdot 10^{-5}$ с) в жидкости возникает ударная волна, деформирующая заготовку, которая принимает форму матрицы.

Магнитно-импульсная штамповка (рис. 21.8) характеризуется тем, что давление на деформируемую металлическую заготовку создается непосредственным воздействием импульсного магнитного поля, без участия промежуточных твердых, жидких или газообразных сил. Это позволяет штамповать детали из полированных и лакированных заготовок без повреждения поверхности, а также деформировать заготовки, заключенные в герметическую пластмассовую оболочку.

Магнитно-импульсная обработка основана на мгновенном разряде электроэнергии, накопленной в мощной конденсаторной батарее *1*, через индуктор, являющийся рабочим органом. При этом в цепи индуктора *2* протекает импульс тока, а в прилегающем пространстве возникает импульсное магнитное поле, которое индуцирует в металлической заготовке *3* вихревые токи противоположного направления.

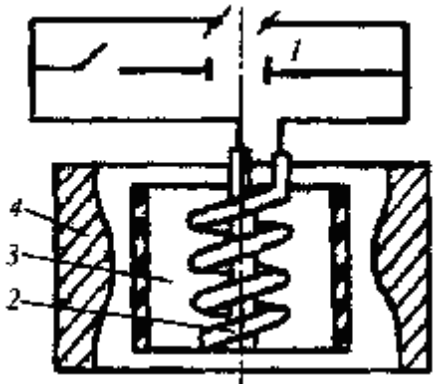

Рис. 21.8. Магнитно-импульсная штамповка: *1* — источник тока; *2* — индуктор; *3* — заготовка; *4* — матрица

При взаимодействии мощного магнитного поля индуктора с индуцированным в заготовке током и его магнитным полем возникают элекромеханические силы взаимодействия, стремящиеся оттолкнуть заготовку от индуктора и вызывающие ее деформацию. Магнитный импульс длится от 10 до 20 мкс, создавая давление от 3500 до 39 000 кг/см^2. Так же как и при штамповке взрывом, длительность магнитного импульса во много раз меньше времени деформации заготовки. Поэтому импульсное поле непосредственно действует на заготовку лишь в начальный момент (период разгона), после чего дальнейшая деформация заготовки происходит под действием полученного ею запаса кинетической энергии.

Движущаяся с высокой скоростью заготовка (300—400 м/с) ударяется о матрицу *4*, в результате чего возникают огромные силы соударения, деформирующие заготовку. Импульсная магнитная штамповка получила довольно большое применение в промышленности для вытяжки, пробивки отверстий, обжатия и раздачи труб, сборки трубчатых деталей с оправками и т. п.

Давильные в давильно-раскатные работы. В некоторых случаях холодноштамповочные операции сочетаются с давильными (рис. 21.9) или накатными операциями, выполняемыми на специальных станках при вращательном движении заготовки (детали) или деформирующего инструмента.

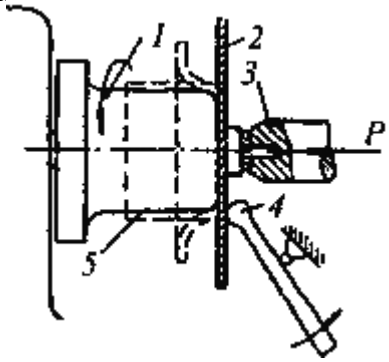

Рис. 21.9. Схема давильных работ:
1 — оправка; *2* — заготовка; *3* — упор; *4* — давильный ролик; *5* — форма изделия

Заготовку *2* устанавливают осесимметрично между оправкой *1* и упором *3* и зажимают силой *P*. Давильный ролик *4* воздействует на вращающуюся заготовку, последовательно меняя ее форму. По окончании процесса готовая деталь *5* имеет форму оправки.

Давильными процессами получают пустотелые детали выпуклой конфигурации весьма сложной формы. Иногда для этого требуется применение разборных оправок, позволяющих извлекать их по частям из полученной детали.

Контрольные вопросы

1. Назовите разделительные операции листовой штамповки.
2. Назовите формообразующие операции листовой штамповки.
3. Что такое «угол пружинения»?
4. Какое оборудование применяется для листовой штамповки?
5. Чем отличается штамповка взрывом от электроимпульсной?
6. Как определяется коэффициент вытяжки при листовой штамповке?