

М. Н. ГОРБУНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНО- ШТАМПОВОЧНЫХ РАБОТ В ПРОИЗВОДСТВЕ САМОЛЕТОВ

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

*Допущено
Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебника для студентов
высших технических учебных заведений,
обучающихся по специальности «Самолетостроение»*



Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1981

ББК 39.53

Г67

УДК 629.7 : 621.73.01/07.002 (07)

Рецензент: кафедра технологии производства летательных аппаратов
Московского авиационного института им. Серго Орджоникидзе

Горбунов М. Н.

Г67 Технология заготовительно-штамповочных работ
в производстве самолетов. Учебник для вузов. —
2-е изд. перераб. и доп. — М.: Машиностроение,
1981. — 224 с., ил.

В пер.: 80 к.

Г 31808-188 — 188-81. 3606030000
038(01)-81

ББК 39.53

ГТ5.1

ИБ № 2411

Михаил Николаевич Горбунов

**ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНО-ШТАМПОВОЧНЫХ РАБОТ
В ПРОИЗВОДСТВЕ САМОЛЕТОВ**

Редактор *Д. Я. Чернис*

Технический редактор *В. И. Орешкина*
Художественный редактор *В. В. Лебедев*

Переплет художника *В. В. Воронина*
Корректор *В. Е. Блохина*

Сдано в набор 29.10.80.

Формат 60×90^{1/16}

Печать высокая.

Тираж 4500 экз.

Подписано в печать 13.01.81.

Бумага типографская № 2.

Усл. печ. л. 14,0.

Заказ 1129.

Т-01312.

Гарнитура литературная.

Уч.-изд. л. 15,75.

Цена 80 к.

Издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Б-76, Стромынский пер., д. 4.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7.

© Издательство «Машиностроение», 1970 г.
© Издательство «Машиностроение», 1981 г., с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник написан в соответствии с программой курса «Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов», который изучается студентами авиационных вузов, обучающимися по специальности «Самолетостроение». Основой для его создания явилось учебное пособие «Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов», изданное в 1970 г. и нашедшее широкое применение в учебном процессе.

Необходимость второго издания книги вызвана не только научно-техническим прогрессом, внесшим в последнее десятилетие существенные изменения в технологию заготовительно-штамповочных работ, но и коррективами методического характера. При подготовке второго издания из книги исключены материалы, касающиеся технологического оборудования, оснастки, средств механизации штамповки, а также технологической подготовки производства, так как изложение их предусмотрено в других курсах.

Заготовительно-штамповочные работы (листовая штамповка) — один из основных процессов изготовления деталей самолетов. Листовая штамповка во многих случаях успешно заменяет менее производительные способы обработки металлов: механическую обработку, литье, объемную штамповку; возрастающие ее возможности обеспечивают замену сварных или клепаных узлов цельноштампованными изделиями.

В книге дана общая характеристика заготовительно-штамповочных работ в самолетостроении, классификация элементарных операций и совмещенных процессов. Описаны технологические схемы выполнения операций, их назначение, возможности и области применения, напряженно-деформированное состояние в очаге деформаций. Приведена методика расчетов силовых и технологических параметров и определения рациональных режимов штамповки.

Автор стремился представить подробные сведения об элементарных операциях (гибка, вытяжка, раздача, обжим, отбортовка, формовка и др.), так как на основе этих данных могут быть легче усвоены сущность совмещенных процессов, метод анализа штамповки сложных деталей, особенности выполнения операций различными методами.

Аналитические зависимости, характеризующие распределение напряжений и деформаций в заготовке при выполнении различных операций, устанавливаются наиболее распространенным методом — совместным решением уравнений равновесия и пластичности с использованием присущих каждой операции граничных условий. Сами решения являются приближенными и упрощенными, однако при из-

ложении материала выявляются возможности получения более точных решений.

Наряду с выяснением физической сущности операций указаны направления их совершенствования, обеспечивающие большее формоизменение заготовки, повышение точности обработки, предотвращение разрывов и потери устойчивости заготовки, расширение области применения штамповки. Такой подход к изучению технологического курса способствует, на наш взгляд, лучшему усвоению его содержания.

Анализ операций сделан применительно к инструментальному методу штамповки, однако в книге показана также специфика выполнения операций другими методами, широко применяющимися в самолетостроении. Среди них штамповка эластичными средами и жидкостью, на листоштамповочных молотах, высокоскоростная и ротационная.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГОТОВИТЕЛЬНО-ШТАМПОВОЧНЫХ РАБОТ

1.1. СУЩНОСТЬ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Заготовительно-штамповочные работы — разновидность штамповки, одного из способов обработки металла давлением. В научно-технической и учебной литературе эта разновидность штамповки часто называется листовой штамповкой, и мы для краткости также будем употреблять этот термин.

Все виды штамповки можно, независимо от вида заготовок и температурно-скоростных условий деформирования, разделить на объемную и листовую штамповку. При выполнении операций объемной штамповки заготовка подвергается существенным изменениям формы и размеров сечений при больших смещениях объемов. При выполнении операций листовой штамповки не предусматривается принудительное смещение объемов заготовки и изменение ее толщин; заданные формы и размеры деталей обеспечиваются формоизменением плоской или прямолинейной заготовки путем ее пластического деформирования. Наиболее употребительными полуфабрикатами для изготовления деталей являются листы, прессованные профили и трубы.

Заготовительно-штамповочные работы включают в себя комплекс различных технологических операций, выполняемых на механических и гидравлических прессах, валковых и роликовых машинах, на специализированных станках. Инструментом являются штампы различного назначения. Физическая и механическая сущность явлений, имеющих место при выполнении операций штамповки, а также методика расчета силовых и технологических параметров изучаются в теории обработки металлов давлением.

Листовая штамповка — распространенный метод изготовления деталей как в общем, так и в специальном машиностроении. Отличительной чертой ее является высокая производительность труда, рациональное использование исходного материала, широкие возможности механизации и автоматизации технологических процессов, достаточно хорошая точность воспроизведения размеров деталей, возможность изготовления жестких деталей при небольшой их массе. Эти достоинства обеспечивают листовой штамповке постоянное расширение ее применения в разных отраслях машиностроения.

В производстве самолетов заготовительно-штамповочные работы занимают одно из ведущих мест. Из всех деталей самолета

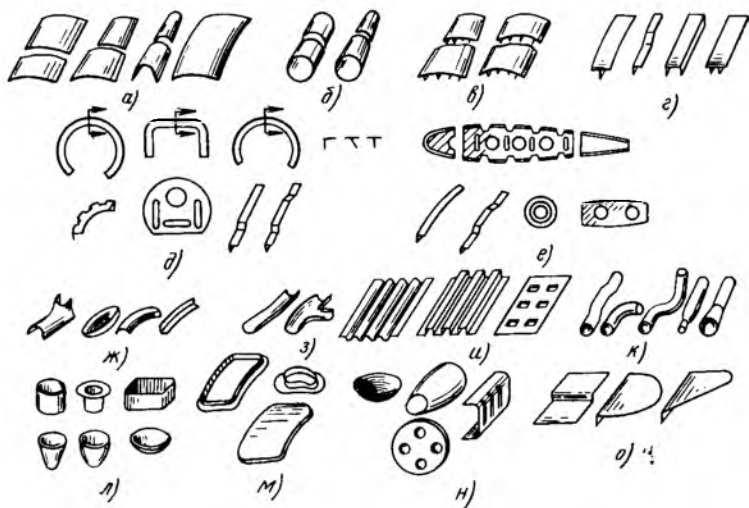


Рис. 1.1. Типовые самолетные детали из листовых, профилированных и трубчатых полуфабрикатов:

а—обшивки; б—обечайки корпусов; в—монолитные панели; г—стрингеры; д—детали шпангоутов; е—детали нервюр; ж—зализы, законцовки; з—полупатрубки; и—гофры, панели; к—детали из труб; л—детали баллонов, кожухов; м—двери, люки, окантовки; н—детали баков; о—соединительные детали

60...70% изготавливаются в заготовительно-штамповочных цехах; трудоемкость этих работ составляет 10...12% от общей трудоемкости изготовления самолета. В связи с применением труднодеформируемых материалов (высокопрочных сталей, титановых сплавов, композиционных материалов), имеется тенденция к некоторому возрастанию удельного веса заготовительно-штамповочных работ.

На рис. 1.1 показаны типовые детали из листовых, профилированных и трубчатых полуфабрикатов; число таких деталей для легкого самолета клепаной конструкции исчисляется тысячами, а для тяжелого — десятками тысяч. Основные группы деталей планера самолета изготавливаются из листовых материалов, из пресованных профилей и панелей при помощи штамповки. К ним относятся: внешние обшивки и панели, элементы шпангоутов, стрингеров, нервюр, лонжеронов, дверей, люков. Из трубчатых полуфабрикатов изготавливаются детали тяг управления и трубопроводы гидро- и газовых систем различного назначения.

Наиболее крупногабаритными и сложными по форме деталями являются внешние обшивки самолета, которые образуют теоретические обводы планера. Трудоемкость изготовления обшивок составляет около 15% от всей трудоемкости заготовительно-штамповочных работ, 25...27% падает на долю деталей из пресованных профилей: стрингеров, шпангоутов, поясов нервюр и лонжеронов, профилей стенок нервюр и шпангоутов и др. Около 10% приходится на изготовление деталей трубопроводов, 15% на штамповку с помощью эластичных сред деталей нервюр, шпангоутов, диафрагм:

12...14% составляет трудоемкость штамповки сложных деталей (дверей, люков, окантовок, законцовок, обтекателей и др.) на листоштамповочных молотах. Раскройные работы составляют в среднем около 12% от общей трудоемкости.

Удельный вес отдельных видов работ может изменяться в ту или иную сторону в зависимости от сложности и габаритных размеров деталей самолета, требований к точности их изготовления, от технологических свойств материалов.

Масштабы заготовительно-штамповочных работ характеризуются объемом технологической подготовки производства. Так, для серийного производства самолета средней категории необходимо изготовить: инструментальных штампов 2,5...3,0 тысячи, свинцово-цинковых штампов 2,0...2,5 тысячи, оправок и формблоков 3,5...4,0 тысячи, несколько сот обтяжных пуансонов, десятки тысяч шаблонов и др.

Листовая штамповка как метод изготовления деталей из листовых и профилированных полуфабрикатов широко распространена не только в самолетостроении, но и в других отраслях машиностроения (производство автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин и др.), а также в судостроении, приборостроении, в производстве бытовых приборов и машин и др.

Однако листовая штамповка в самолетостроении имеет существенные отличительные черты, обусловленные спецификой объекта производства.

На выбор методов и средств штамповки деталей большое влияние оказывают свойства материалов, применяемых в самолетостроении; здесь широко применяются особые приемы штамповки для высокопрочных алюминиевых, титановых, магниевых сплавов, жаропрочных сталей, композиционных материалов.

Отличительную особенность накладывает на изготовление большинства листовых деталей плазово-шаблонный метод производства, при котором форма и размеры деталей определяются эталоном в виде плоских сечений агрегатов, изображенных на плазах, и шаблонами как жесткими носителями размеров; эталоном в виде пространственного макета поверхности и слепками как жесткими носителями размеров.

Мелкосерийный тип производства большинства самолетов обуславливает применение типовых процессов, упрощенных методов, универсальных и специализированных средств производства (штамповка эластичными средами и жидкостью, штамповка на листоштамповочных молотах и др.).

С учетом перспективных конструкций самолетов в области заготовительно-штамповочных работ намечаются следующие направления развития:

- создание оборудования и освоение формообразования обшивок и панелей длиной до 20 м и более при ширине до 2 м;
- создание технологического оборудования и оснастки с встроенными средствами нагрева заготовок;

— дальнейшее освоение штамповки деталей из сложных в технологическом отношении титановых сплавов, жаропрочных сталей и композиционных материалов;

— изыскание новых методов и средств, дающих возможность повысить коэффициент использования материала, изготовить детали с меньшим числом операций, штамповать тонкостенные детали с переменной толщиной стенки и др.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПЕРАЦИИ

Операции листовой штамповки разделяются на две основные группы: разделительные и формоизменяющие. В дополнение к ним в качестве самостоятельных или сопутствующих операций применяются операции механической обработки — фрезерование и сверление.

Назначение **разделительных операций** — раскрой листовых материалов и профилированных полуфабрикатов. С их помощью изготавливают плоские детали и заготовки из листов и прямолинейные — из пресованных профилей и труб. К этим операциям относятся: вырубка (образование внешних контуров), пробивка отверстий, отрезка, обрезка и надрезка (рис. 1.2). Выполнение их производится на гильотинных или роликовых ножницах и на штампах. Кроме того, в самолетостроении применяется раскрой на фрезерных станках и лучом горячей плазмы или электронным лучом (для сталей и сплавов титана).

Действующие на заготовку внешние нагрузки вызывают в очаге деформаций при выполнении разделительных операций напряжения, достигающие в конечный момент разрушающих.

Изготовление всех деталей из листов, профилей и труб в начальной стадии начинается с разделительных операций.

Назначение **формоизменяющих операций** — превращение плоских или прямолинейных заготовок в детали пространственных форм. Напряжения в очаге деформаций, вызываемые внешними нагрузками, превосходят предел текучести, но не достигают разрушающих. Форма детали сохраняется и после снятия внешних нагрузок вследствие возникновения в заготовке остаточных (пластических) деформаций.

К формоизменяющим операциям относятся: гибка, вытяжка, раздача, обжим, отбортовка, формовка, обтяжка и несколько операций объемной штамповки — ротационное выдавливание, набор материала на кромках заготовок, холодное выдавливание и др. Гибкой изготавливают профили шпангоутов, трубопроводы, цилиндрические и конические обшивки; вытяжкой — шаровые баллоны, двери, люки, законцовки (крыльев, киля, стабилизатора), зализы; формовкой — элементы жесткости на стенках шпангоутов, нервюры; обтяжкой — обшивки двойной кривизны и др.

При помощи разделительных и формообразующих операций, применяемых последовательно или поочередно, можно изготавливать детали самых разнообразных форм и размеров (см. рис. 1.1).

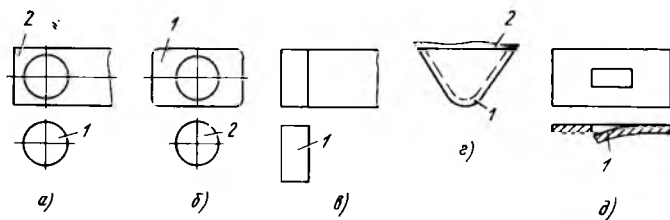


Рис. 1.2. Разделительные операции:

а—вырубка; *б*—пробивка; *в*—отрезка; *г*—обрезка; *д*—надрезка; *1*—деталь; *2*—отходы

Перечисленные операции следует рассматривать как элементарные. Во многих случаях для убыстрения изготовления деталей применяют совмещенные процессы, в которых одновременно реализуются две и более элементарные операции: вырубка и пробивка, вытяжка и обжим, раздача и обжим и др. Часто при выполнении элементарных операций к заготовке прикладывается усилие, вызывающее растяжение или сжатие, которые можно также отнести к элементарным операциям. Тогда возникают ряд таких совмещенных процессов как гибка с тангенциальным растяжением или сжатием, гибка с радиальным сжатием, раздача или обжим со сжатием и др.

В основу сделанной классификации формоизменяющих операций положены напряженно-деформированное состояние заготовки в основном очаге ее деформаций и условия на его границах.

На рис. 1.3 представлена классификация гибочных операций. Первая из них (см. рис. 1.3, *а*) — элементарная операция гибки, остальные — совмещенные, где используют две (рис. 3, *б*) и три (рис. 3, *в*) элементарные операции. Возможны и другие сочетания элементарных операций в одном процессе. Каждая совмещенная операция имеет свое назначение и способствует решению определенных сложных задач по деформированию гибкой разнообразных заготовок.

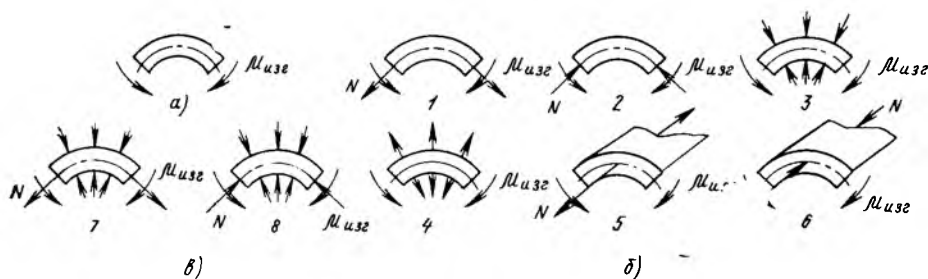


Рис. 1.3. Классификация гибочных операций:

а—гибка (элементарная операция); *б*—совмещение двух операций; *в*—совмещение трех операций; *1*—гибка с тангенциальным растяжением; *2*—гибка с тангенциальным сжатием; *3*—гибка с радиальным сжатием; *4*—гибка с радиальным растяжением; *5*—гибка с осевым растяжением; *6*—гибка с осевым сжатием; *7*—гибка с тангенциальным растяжением и радиальным сжатием; *8*—гибка с тангенциальным и радиальным сжатием

Другие формоизменяющие операции выявляются из рассмотрения очага деформаций, имеющего плоскую кольцевую форму (табл. 1.1) и последовательно нагружаемого на границах внешними силами растяжения или сжатия. Классификация сделана применительно к осесимметричному деформированию при плоском напряженном состоянии в очаге деформаций, характерном для рассматриваемых операций. Здесь и в дальнейшем σ_θ — окружное (тангенциальное), а σ_r — радиальное (меридиональное) напряжения, возникающие в очаге деформаций под действием внешней силы P , приложенной по внутренней (r) или внешней (R) границе очага деформаций.

Механизм деформирования заготовки проследим на примере операции вытяжки (см. табл. 1.1, п. 1). Как видно из схемы, сущность операции *a* заключается в формоизменении плоской заготовки *1* в цилиндрическую полую деталь. Заготовка *1*, сокращаясь по внешнему диаметру $2R$, втягивается в зазор между пуансоном *2* и матрицей *3* силой P , приложенной к пуансону. Пуансон, надавливая на донную часть заготовки, через вертикальную стенку передает по внутреннему контуру r внешнее усилие в очаг деформаций, занимающий кольцевую площадь от r до R ; напряжения в очаге деформаций имеют разные знаки. В операции вытяжки вертикальная стенка образующейся детали является зоной передачи внешнего усилия в очаг деформаций, а фланец — самим очагом деформаций; такое разделение площади заготовки намечается и в других операциях.

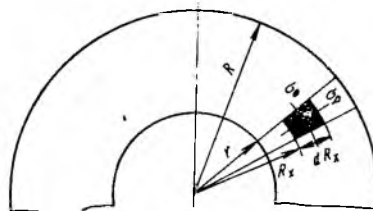
В конечной стадии вся плоская заготовка может перейти в вертикальную стенку; тогда получится цилиндрический стакан без фланца.

На схеме *б* показана вытяжка второго перехода, где стакан большего диаметра формоизменяется в стакан меньшего диаметра; здесь очаг деформаций, находящийся в пределах радиусов от r до R , имеет коническую форму.

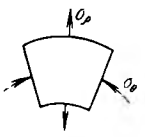
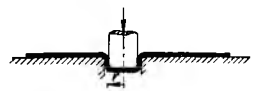
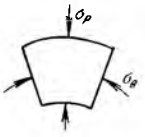
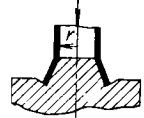
Аналогичным образом устанавливается механизм деформирования заготовки и при выполнении других операций, указанных в табл. 1.1. При выявлении перечня указанных операций путем перебора возможных нагружений по границам очага деформаций можно наметить несколько общих положений:

а) при выполнении операций 1, 2, 5, 6 (вытяжки, раздачи, отбортовки, обжима) на заготовке четко очерчиваются границы очага деформаций ($r \neq 0$ и $R \neq \infty$). Здесь при нагружении очага деформаций по внутреннему контуру в нем возникает плоское разноименное поле напряжений ($+\sigma_r$ и $-\sigma_\theta$ при вытяжке и $-\sigma_r$ и $+\sigma_\theta$ — при раздаче); при нагружении по внешнему контуру очага деформаций возникает плоское одноименное напряженное состояние ($+\sigma_r$ и $+\sigma_\theta$ при отбортовке и $-\sigma_r$ и $-\sigma_\theta$ при обжиме). Изготовление детали происходит формоизменением заготовки то ли за счет уменьшения размера заготовки (радиуса R при вытяжке и обжиме), то ли за счет увеличения размера заготовки (радиуса r при раздаче и отбортовке). Деформации по толщине заго-

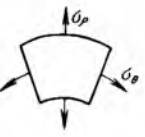
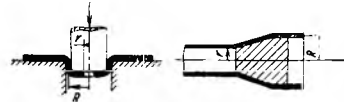
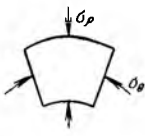
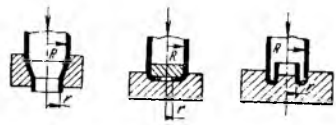
Таблица 1.1

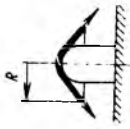
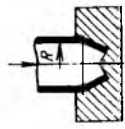
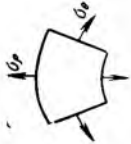
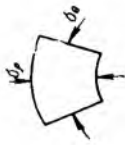
Классификация элементарных
формоизменяющих операций

№ п/п	Наличие контуров	Характер усилия	Схема напряженного состояния	Название процесса	Схема осуществления процесса
<i>Усилие приложено по внутреннему контуру r</i>					
1	$\frac{r}{R}$	Растяжение		Вытяжка (а и б) и волочение (в)	
2	$\frac{r}{R}$	Сжатие		Раздача, выворот труб	

№ п/п	Наличие контуров	Характер усилия	Схема напряженного состояния	Название процесса	Схема осуществления процесса
3	r $R = \infty$	Растяжение		Формовка	
4	r $R = \infty$	Сжатие		Подсадка после раздачи	

Усилие приложено по наружному контуру R

5	R r	Растяжение		Отбортовка, раздача с растяжением	
6	R r	Сжатие		Обжим, образование дна на трубе, выворот труб вовнутрь	

		
	Обтяжка	Подсадка после обжима
		
	Растяжение	Сжатие
	R $r=0$	R $r=0$
7		8

товки являются сопутствующими, площадь ее изменяется незначительно. Степень формоизменения заготовки может быть охарактеризована отношением радиусов r и R в начальный момент деформирования;

б) при выполнении операций 3, 4, 7, 8 (см. табл. 1.1) очаг деформаций на заготовке четко очерчивается только с одной стороны (с внешней или с внутренней); второй, неявной границей является граница между зонами пластической и упругой деформаций, которую устанавливают расчетным или опытным путем. Деформация по толщине заготовки является не сопутствующей, а основной; в данном случае формоизменение заготовки происходит в большей степени за счет изменения ее площади, т. е. за счет уменьшения или увеличения толщины, а не путем изменения ее размеров, как в предыдущих операциях. Степень формоизменения заготовки может быть охарактеризована отношением конечной и начальной площадей заготовки, отношением соответствующих толщин, отношением периметров и др.;

в) во всех операциях знак радиального (меридионального) напряжения σ_r в очаге деформаций совпадает со знаком удельных сил, приложенных к той или другой границе очага деформаций.

Рассмотренные операции (см. табл. 1.1) относятся к элементарным. В целях совершенствования производства деталей и расширения технологических возможностей листовой штамповки в последние годы более широко стали применять совмещенные операции, соединяющие две и бо-

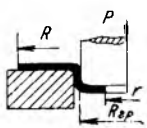
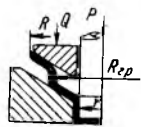
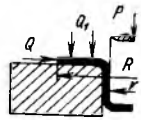
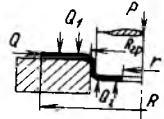
те элементарные операции в одном процессе. Эти совмещенные операции выявляются перебором возможных нагружений одновременно обеих границ очага деформаций и нагружений в направлении, нормальном его поверхности. Вариантов совмещенных операций может быть большое число; из них отбираются технологически осуществимые операции, которые способствуют расширению технологических возможностей штамповки, интенсификации производства. В табл. 1.2 показаны некоторые рациональные дважды и трижды совмещенные операции, дающие возможность увеличить степень формоизменения заготовки за один штамповочный переход. Радиусами r и R очерчены границы общего очага деформаций, а радиусом $R_{гр}$ — граница между отдельными операциями.

Таблица 1.2

Некоторые совмещенные формоизменяющие операции



№ п/п	Внешние усилия	Совмещенные операции	Схема операций
1	Растяжение по r , сжатие по R	Вытяжка с обжимом	
2	Сжатие по r , сжатие по R	Раздача с подпором кромки	
3	Сжатие по r , растяжение по R	Отбортовка с подпором кромки	
4	Сжатие по $R_{гр}$	Раздача с обжимом	

№ п/п	Внешние усилия	Совмещенные операции	Схема операций
5	Растяжение по $R_{гр}$	Вытяжка с отбортовкой	
6	Растяжение по r , сжатие по $R_{гр}$	Вытяжка с обжимом и раздачей	
7	Растяжение по r , сжатие по R и плоскости	Вытяжка с обжимом и сжатием по плоскости	
8	Растяжение по $R_{гр}$ сжатием по R и плоскости	Вытяжка с обжимом, отбортовкой и сжатием по плоскости	

В настоящее время развиваются и другие направления совмещений, в которых сочетаются различные виды нагружения заготовки сосредоточенными по границам и распределенными по всей поверхности очага деформаций силами. Однако если распределенное нагружение производится давлением жидкости, то подобные виды совмещений объединяются общим названием — *гидромеханические методы штамповки*. Определенные преимущества и перспективы имеют совмещения в различных вариантах статического и высокоскоростного нагружения заготовки.

К заготовительно-штамповочным работам в самолетостроении относится также ряд операций объемной штамповки: вытяжка с утонением, ротационное и ударное выдавливания, операции по набору материала (усиления) на тонкостенных листовых и трубчатых заготовках. Специфичные операции и примеры применяются при изготовлении деталей из композиционных материалов и др.

Комплекс перечисленных основных операций заготовительно-штамповочных работ, являющихся предметом дальнейшего изучения, наглядно очерчивает содержание данного раздела технологии самолетостроения, место и содержание настоящего курса. Здесь

упомянуты лишь основные операции. На практике осуществляется много других технологических операций со специфическими схемами деформирования. Это разнообразие обусловливается методами осуществления операций: штамповка в жестких штампах или эластичными средами, при малых скоростях или при импульсном нагружении, в холодном состоянии или с нагревом заготовки, поэлементно или одновременно.

На механизм деформирования определяющее влияние оказывает форма заготовок и штампуемых деталей. Простейший случай — осесимметричное деформирование; с усложнением формы возникают большие сложности в расчетах необходимых параметров. Во многих случаях при штамповке деталей сложных форм в разных зонах заготовки возникает напряженно-деформированное состояние, вызванное выполнением в этих зонах тех или иных элементарных операций. Штампы, на которых выполняются различные операции, как правило, повторяют их название: гибочные штампы, вытяжные, обтяжные и т. д.

1.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ

При выборе конструкционных материалов для самолетов и других летательных аппаратов в первую очередь удовлетворяется главное требование — высокая весовая эффективность конструкции, т. е. максимальное отношение полезной нагрузки к общей взлетной массе при сохранении уровня других качественных показателей. Можно сказать, что проблемы дальности, скорости, высотности самолетов — это прежде всего проблемы создания конструкционных материалов с высокими механическими и другими специальными характеристиками. Подбор материала для элементов самолета с учетом сложных условий их работы — это творческий процесс; оптимальное решение здесь должно удовлетворять требованиям разного, часто противоположного характера. Критерии оптимальности материала различны для каждой группы деталей в зависимости от типа основных нагрузок: растяжение, срез, смятие, устойчивость, жесткость, изгиб. При этом обязательно учитываются технологические характеристики — свариваемость, штампуемость, обрабатываемость резанием и др. Большую роль при подборе материалов играют статистические данные о поведении существующих материалов разных видов в конструкциях конкретного назначения, статистические данные по дефектам, выявленным при эксплуатации, по установлению причин отказов, по выносливости и надежности материала.

В качестве основных конструкционных материалов в самолетостроении применяются алюминиевые и титановые сплавы, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали и сплавы и все шире начинают внедряться композиционные материалы на неметаллической и металлической основе. В последние десятилетия по этим группам материалов достигнуто существенное улучшение их свойств. Предел прочности σ_b алюминиевых сплавов в настоящее время дости-

гает 600 МПа (плотность $\rho=2,8$ г/см³), титановых сплавов — 1300 МПа ($\rho=4,5$ г/см³), сталей — 2000 МПа, ($\rho=7,8$ г/см³), композиционных материалов в направлении армирования — 1000 МПа и более ($\rho=2,0 \dots 2,5$ г/см³). В самолетах ближайшего будущего, как и в современных самолетах, преимущественное применение будут находить алюминиевые сплавы. Тенденции развития самолетостроения дают основания предположить, что 85...90% общей массы конструкций всех видов самолетов и вертолетов будут изготавливаться из алюминиевых сплавов с частичным включением титановых сплавов, сталей и жаропрочных сплавов, а производство цельнотитановых и цельносталевых самолетов будет носить мелкосерийный характер [8]. Высокая удельная прочность композиционных материалов, например, боралюминия, обеспечит им также широкое применение в будущем.

Алюминиевые сплавы употребляются для изготовления элементов планера самолетов, испытывающих при полете нагрев не выше 180...200° С (скорость равна примерно двум скоростям звука). Наиболее употребительными марками являются Д16, АМг6, В95, АК4. В зависимости от легирующих элементов алюминиевые сплавы обладают достаточно высокой удельной прочностью (σ_b/ρ), хорошей коррозионной стойкостью, устойчивостью к действию топлив и масел.

Сплав Д16 относится к наиболее отработанным конструкционным материалам и уже около 40 лет применяется для обшивок и деталей каркаса самолетов клепаной конструкции. Он легирован медью (4%) и магнием (1,5%) и относится к группе дуралюминов; упрочняется термической обработкой ($t=500^\circ\text{C}$), иногда дополнительно — нагартовкой. После закалки и старения имеет предел прочности $\sigma_b=420 \dots 430$ МПа, предел текучести $\sigma_s=280 \dots 290$ МПа, относительное удлинение $\delta=11\%$. Поставляется в виде листов, прессованных профилей и труб. При штамповке подвергается значительным деформациям в отожженном и свежезакаленном состоянии, а в состаренном — незначительным деформациям. Сплав находится в свежезакаленном состоянии в течение двух часов с момента закалки; в этот, так называемый инкубационный период, сплав сохраняет хорошие пластические свойства, которые затем утрачивает вследствие упрочнения при старении в естественных условиях. При многооперационной штамповке нагартовка снимается или повторной закалкой или отжигом при $t=360^\circ\text{C}$.

Сплав В95 — более прочен, он упрочняется термической обработкой ($t=470^\circ\text{C}$) с последующим старением при $t=140^\circ\text{C}$; $\sigma_b=500 \dots 530$ МПа, $\sigma_s=410 \dots 420$ МПа, δ — не менее 10%. Легирован медью (1,7%), магнием (2,3%) и цинком (6%). После закалки и старения имеет неудовлетворительную пластичность; в отожженном и свежезакаленном состоянии (в течение 6 ч после закалки) имеет удовлетворительную штампуемость. Применяется для обшивок, монолитных панелей, стыковочных узлов, поясов лонжеронов, шпангоутов, нервюр и стрингеров самолетов клепаной конструкции.

Сплав АМг6 термически не упрочняется, имеет $\sigma_{\text{в}}=320$ МПа, $\sigma_{\text{s}}=160$ МПа, δ — не менее 15%, легирован магнием (6%). Достоинством сплава является высокая коррозионная стойкость и хорошая свариваемость. Применяется для сварных конструкций: обечайки и днища баков под разные виды горючего и окислителя, обшивки и детали каркаса сварных отсеков, трубопроводов. В отожженном состоянии хорошо штампуется при больших деформациях гибкой, вытяжкой, отбортовкой и др. Для снятия упрочнения при многооперационной штамповке применяется отжиг при $t=310 \dots 335^\circ \text{C}$. При необходимости — упрочняется холодной деформацией.

Сплав АК4-1 относится к теплостойким сплавам, сохраняющим удовлетворительные механические свойства при повышенных температурах. Легирован медью, магнием, никелем, железом и титаном; после закалки и старения этот сплав имеет $\sigma_{\text{в}}=400$ МПа, $\delta=11 \dots 12\%$. Деформируется удовлетворительно; применяется для обшивок и монолитных панелей фюзеляжей и крыльев дозвуковых и сверхзвуковых самолетов.

Менее широко применяются другие материалы на основе алюминия: САП — теплостойкий материал, спекаемый при больших давлениях из алюминиевых порошков и применяющийся для конструкций, работающих длительное время при повышенных температурах; АМп — сплав с невысокими данными по прочности, но обладающий высокими пластическими свойствами и используемый для деталей, при изготовлении которых требуются большие пластические деформации.

Алюминий является не только основой высокопрочных сплавов, но также основой для ряда композиционных материалов.

Титановые сплавы употребляются для конструкций горячих зон самолетов, строящихся в основном из алюминиевых сплавов, или для основных элементов планера самолетов (обшивок и деталей каркаса), летающих при скоростях выше двух скоростей звука ($M=2,35 \dots 3,2$) [8]. Эти сплавы — перспективные авиационные материалы, они обладают высокой удельной прочностью (по сравнению с алюминиевыми сплавами и сталями), а также способностью длительное время сохранять достаточную прочность при повышенных температурах, при которых применение алюминиевых сплавов невозможно. Обычно они применяются в отожженном состоянии при максимальной прочности 1100 МПа.

По особенностям строения кристаллической решетки титановые сплавы разделяются на три группы: α — модификация с гексагональной кристаллической решеткой (марки ОТ4, ВТ5, ВТ20); β — модификация с объемно-центрированной решеткой (ВТ15) и группа сплавов $\alpha + \beta$ (ВТ6, ВТ16, ВТ22).

Титановые сплавы трудно обрабатывать и при большой номенклатуре деталей из этих материалов требуется существенная перестройка производства. В холодном состоянии они малопластичны и штампуются только с нагревом заготовки до $550 \dots 800^\circ \text{C}$ (в зависимости от марки сплава); при нагреве заготовок в обыч-

ных условиях происходит газонасыщение поверхностных слоев и охрупчивание металла, поэтому нагрев в воздушной среде строго регламентируется (или рекомендуется производить его в среде нейтральных газов). Такие специфические свойства обуславливают применение нового технологического оснащения в виде оборудования или оснастки с встроенными нагревательными устройствами; вызывают трудности доводочные работы, подгонка деталей при сборке. Вследствие этого производство деталей из титановых сплавов обходится в несколько раз дороже, чем из традиционных марок алюминиевых сплавов.

Преимущественный вид соединения деталей из титана — электроконтактная и аргонодуговая сварка.

Жаропрочные и коррозионно-стойкие стали и сплавы применяются в конструкциях, работающих при температурах выше 500°C , при которых применение титановых сплавов нерационально. В практике самолетостроения применяют три типа сталей: термически неупрочняемые (12X18H9T, 12X18H10T, 15X18H12C4TЮ и др.), переходного аустенитно-мартенситного класса (CH-2, CH-3, CH-4 и др.), мартенситного класса, упрочняемые закалкой и старением (ВНС-2, ВНС-5 и др.). Все эти материалы, легированные в основном хромом и никелем, интенсивно упрочняются при выполнении в холодном виде штамповочных операций, склонны к налипанию штампуемого материала на рабочие поверхности штампов, обладают высоким сопротивлением деформированию, что обуславливает применение инструментальных штампов. Стали первой группы имеют наилучшие показатели пластичности, особенно в закаленном состоянии, что дает возможность штамповать из них сложные детали. В ненагретом состоянии сталь 12X18H9T имеет $\sigma_{\text{в}} = 550 \text{ МПа}$, $\delta = 40\%$. Штамповка деталей из термически упрочняемых сталей производится в разупрочненном состоянии. Стали мартенситного класса рекомендуется штамповать в нагретом состоянии в интервале температур устойчивого аустенита ($950 \dots 1000^{\circ}\text{C}$), совмещая при этом формообразование заготовки с ее термической обработкой.

В целом жаропрочные стали удовлетворительно штамуются и хорошо свариваются всеми видами сварки, что совместно с высокой прочностью ($\sigma_{\text{в}} = \text{до } 1400 \text{ МПа}$) обеспечивает им широкое применение. Эти материалы употребляют для наружных обшивок, деталей каркаса, баков высокоскоростных машин, для горячих зон самолетов клепаной конструкции из алюминиевых сплавов.

Жаропрочные стали, как и титановые, неудовлетворительно обрабатываются резанием. Поэтому для раскройных работ применяют анодно-механический способ резки, резку струей высокотемпературной плазмы и другими электрофизическими способами.

Композиционные материалы отличаются большим разнообразием. Наибольшее распространение получили волокнистые композиционные материалы, включающие в себя разнородные по форме, свойствам и назначению материалы: тонкие волокна, распределенные должным образом в связующем, объединяющем их в монолит.

Волокна воспринимают основные эксплуатационные нагрузки и должны обладать высокой прочностью, высоким модулем упругости, химической пассивностью в отношении связующего и при необходимости — теплостойкостью; связующее, часто называемое матрицей, должно обеспечивать определенную прочность связей с волокнами (наполнителями), иметь высокие пластические свойства, быть коррозионно-стойким и легким.

В авиационной промышленности широкое внедрение этих материалов обещает существенное снижение массы конструкции (на 20...25%) и повышение ее весовой отдачи. Поэтому в настоящее время широко проводятся работы по изысканию методов и средств экономичного изготовления конструкций из композиционных материалов. Основным преимуществом их является всесторонняя равнопрочность и жесткость, обеспечиваемая соответствующим направлением волокон в связующем.

По природе составляющих композиционные материалы разделяются на три основные группы: связующее и волокна — металлы; связующее — металл, волокна — неметалл; связующее и волокна — неметаллы. Металлической матрицей является чаще всего алюминий или его сплавы, а неметаллической — эпоксидные, фенольно-альдегидные и другие смолы. В металлическую матрицу заделываются волокна из хромоникелевых сталей, бериллия, бора, тугоплавких соединений и др. Из композиционных материалов на неметаллической матрице наибольшее распространение получают стеклопластики, где в смолу заделываются или стекловолокно или стеклополотно.

Проведение разделительных и формоизменяющих операций заготовок из композиционных материалов, особенно если волокна хрупкие, вызывает определенные трудности и требует специальных методов и технологических средств.

Штампуемость или способность металлов и других материалов пластически деформироваться оценивается как показателями стандартных механических испытаний на растяжение, так и по результатам специальных технологических испытаний. Показатели механических испытаний характеризуют пластические свойства материала в самом общем, больше качественном, чем количественном, виде. Относительное удлинение δ характеризует пластические свойства металла лишь с качественной стороны; чем больше δ , тем лучше эти свойства. Ни в одной операции предельная деформация не может быть равна относительному удлинению, так как удлинение является сложной характеристикой, включающей величину равномерной и сосредоточенной стадий растяжения. Поэтому δ зависит от размеров испытываемых образцов. Относительное сужение ψ в лучшей степени характеризует пластические свойства металлов. По величине ψ металлы разделяются на группы по пластическим свойствам и по интенсивности упрочнения: малопластичные металлы — $\psi \leq 0,1$; среднепластичные, среднеупрочняющиеся — $\psi = 0,1 \dots 0,2$; пластичные, сильноупрочняющиеся — $\psi = 0,2 \dots 0,3$; высокопластичные, сильноупрочняющиеся — $\psi > 0,3$.

В качестве технологических испытаний применяют испытание на изгиб и вытяжку. Критерием штампуемости при испытании на изгиб является число перегибов по определенному радиусу до появления трещины; на вытяжку — предельная глубина сферической лунки, соответствующая моменту образования на образце трещины.

Более полные сведения о материалах, применяемых для листовых и профильных деталей самолетов, приведены в справочной литературе [34]. Основные принципы выбора материала для авиационных конструкций, а также данные о свойствах наиболее распространенных материалов приведены в специальной литературе [8].

1.4. МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОПЕРАЦИЙ

Под *теоретическим анализом операций* будем понимать исследование напряженного и деформированного состояний заготовки в процессе ее формоизменения, а также решение на этой основе задач по расчету силовых и технологических параметров, по определению рациональных режимов, дающих наибольшую эффективность. Решение основной задачи, как известно из теории обработки давлением, можно осуществить различными методами: решением уравнений равновесия совместно с условием пластичности (инженерный метод), методом линий скольжений, методом сопротивления материалов пластическим деформациям, методом баланса работ и др. [38]. Мы при анализе операций будем использовать только инженерный метод.

Учитывая достаточную обеспеченность учебной литературой курса по теории обработки металлов давлением [31, 38], мы не будем излагать общих основ теории, а часть необходимых сведений дадим при рассмотрении конкретных операций.

ГЛАВА 2

РАСКРОЙНЫЕ РАБОТЫ (РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ)

2.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

К раскройным относятся все виды работ, связанные с выполнением разделительных операций, т. е. с изготовлением плоских деталей и заготовок для деталей пространственных форм. Большое значение раскройных работ заключается не столько в значительном объеме трудовых затрат, сколько в том, что от рациональности их осуществления существенно зависит та составляющая себестоимости детали, которая определяется затратами на материал [39]:

$$C_m = m_{\text{дет}} c_m + m_{\text{отх}} (c_m - c_{\text{отх}}).$$

Здесь $m_{\text{дет}}$ — масса детали; c_m — стоимость единицы массы материала; $m_{\text{отх}}$ — масса отходов; $c_{\text{отх}}$ — стоимость единицы массы отходов.

При заданных массе детали и стоимости материала, из которого она сделана, затраты на материал в значительной степени зависят от массы и стоимости отходов, т. е. от того, как построен процесс раскроя материала. Если потребительская стоимость отходов равна нулю (отходы не используются), то стоимость материала, переходящая в стоимость детали, равна

$$C_m = (m_{\text{дет}} + m_{\text{отх}}) c_m.$$

Стоимость авиационных материалов велика, поэтому большое количество отходов при раскрое значительно повышает себестоимость всего самолета. Отходы из тех же материалов стоят в 10...15 раз дешевле исходных материалов.

Второе слагаемое в приведенных уравнениях представляет дополнительные затраты на материал в виде отходов; это то слагаемое, которое при разработке технологического процесса необходимо приводить к минимальному значению.

Основным критерием отработанности технологического процесса раскроя является коэффициент использования материала $k_{\text{и.м.}}$, определяемый отношением массы $m_{\text{дет}}$ детали к массе m_3 заготовки:

$$k_{\text{и.м.}} = \sum m_{\text{дет}} / \sum m_3.$$

Коэффициент $k_{\text{и.м.}}$ можно определить для всего самолета, для отдельного агрегата или узла, а также для отдельных деталей при раскрое их из листа или полосы. При раскрое листовых материалов массу деталей и заготовок можно в расчетах заменять соответствующими площадями.

Итак, основными требованиями к раскройным работам являются наиболее полное использование материала, уменьшение отходов.

На основе многолетнего производственного опыта определены главные организационно-технологические принципы обеспечения рационального раскроя:

— сосредоточение всех раскройных работ на заводе в одном раскройном цехе. Это дает возможность более полно использовать металл, так как, во-первых, отходы от раскроя крупных деталей можно использовать для изготовления мелких деталей, а, во-вторых, сосредоточение всей номенклатуры деталей самых разнообразных форм и размеров в одном месте увеличивает вероятность наиболее плотного, с минимальными перемычками размещения шаблонов деталей на листовых полуфабрикатах;

— внедрение группового раскроя, сущность которого заключается в том, что из листа заданного размера раскраиваются детали не одного наименования, а нескольких, причем подобранных таким образом, чтобы форма всех деталей позволяла наилучшим образом использовать материал;

— получение с металлургических заводов листовых полуфабрикатов специальных размеров для крупных деталей, например наружных обшивок планера;

— наилучшее использование отходов.

Показатели использования материала зависят от вида полуфабриката; наиболее эффективно используется материал, поступающий на самолетостроительные заводы в виде труб и прессованных профилей ($k_{и.м}=0,8 \dots 0,9$); для листовых материалов $k_{и.м} \approx 0,6$.

Одно из основных требований к раскройным работам — обеспечить точность размеров и формы изделий и надлежащее качество кромки среза — ее чистоту, перпендикулярность основной плоскости деталей и отсутствие заусенцев.

2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАСКРОЯ

Применение той или другой разделительной операции при изготовлении конкретных деталей зависит от их формы, размеров, от толщины и свойств материала, а также от вида полуфабриката. На рис. 2.1 дана классификация процессов раскроя листовых материалов с указанием технологического оборудования и оснастки. Раскрой может быть групповым или индивидуальным.

Детали больших и средних размеров (длиной от 500 до 3000 мм и более) из алюминиевых сплавов с прямолинейными очертаниями контуров раскраиваются на гильотинных ножницах. Детали этой группы, имеющие криволинейные или смешанные очертания контуров, раскраиваются путем фрезерования на специальных радиальных станках, на станках со следящим приводом или с числовым программным управлением. Реже применяется раскрой на роликовых или вибрационных ножницах; этот способ менее производительен и употребляется для обрезки припуска на крупногабаритных пространственных деталях, для раскроя стальных листов и в тех случаях, когда раскрой носит единичный характер.

Для небольших плоских заготовок и деталей применяется раскрой в штампах. В зависимости от объема производства данных деталей применяются инструментальные или упрощенные штампы. Как видно из рис. 2.1, расположение деталей на полосе (заготовке) может быть различным и определяется их конструкцией и требованиями эффективного использования материала. Раскрой на полосе может быть с перемычками, без перемычек, расположение деталей — однорядное или многорядное, встречное и пр. Для раскроя с отходами характерно наличие внутренних и внешних перемычек, для малоотходного раскроя — только внутренних перемычек, а для безотходного — отсутствие перемычек, что дает возможность полностью использовать материал полосы.

Если детали имеют элементарную форму (круг, квадрат, прямоугольник и др.), то коэффициент $k_{и.м}$ использования материала можно определить аналитическим способом. Так, для круглой детали при однорядном раскрое легко получить формулу, исходя из геометрических соотношений (см. рис. 2.1):

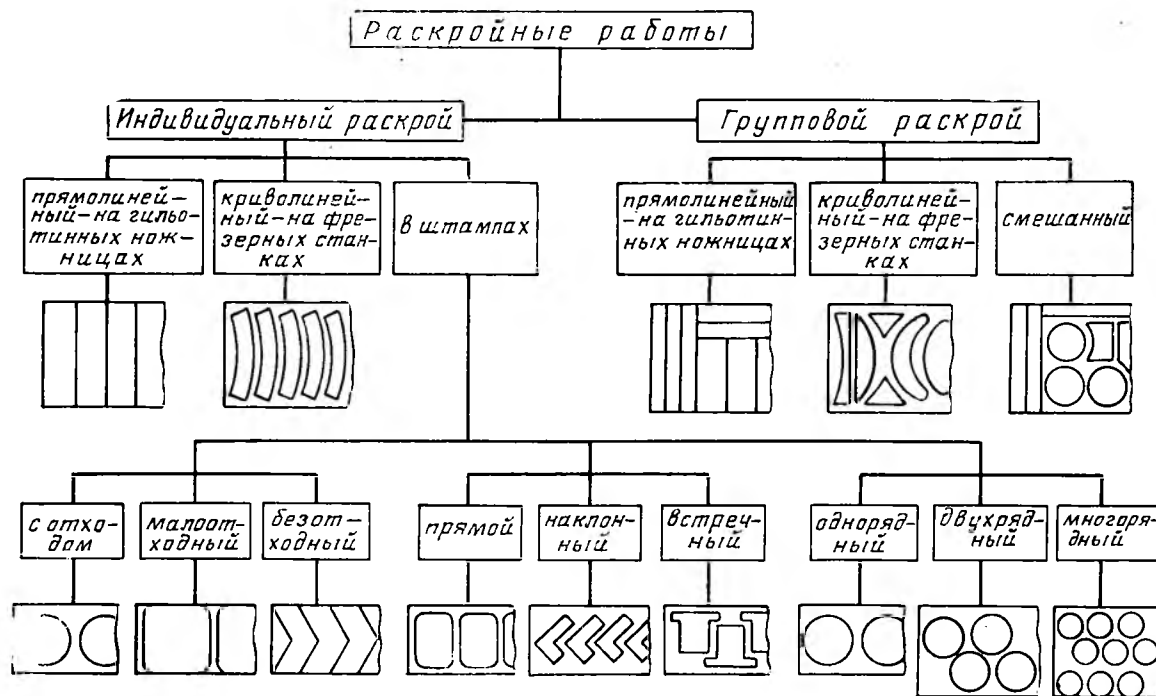


Рис. 2.1. Классификация процессов раскроя листовых полуфабрикатов

$$k_{н.м} = \frac{\pi D^2}{4(D + 2a)(D + b)},$$

а для двухрядного раскроя

$$k_{н.м} = \frac{\pi D^2}{2\left(D + 2a + \frac{D + b}{2} \sqrt{3}\right)(D + b)},$$

где D — диаметр детали, a и b — размеры внешней и внутренней перемычек.

Из этих формул следует, что при раскрое круглых деталей коэффициент использования металла полосы составляет лишь около 0,7, т. е. 30% металла идет в отход. Проведение двухрядного раскроя повышает $k_{н.м}$ примерно на 8% (в расчетах можно принять $a = b = s$, где s — толщина материала). Если полоса отрезается от листа, то при раскрое листа на полосы может быть также отход, поэтому итоговый $k_{н.м.Σ}$ будет еще меньше:

$$k_{н.м.Σ} = k_{н.м.1} k_{н.м.2},$$

где $k_{н.м.1} k_{н.м.2}$ — соответственно коэффициенты использования металла полосы и листа.

Аналогичным путем можно определить $k_{н.м}$ и в других случаях раскроя деталей простых форм. Для деталей со сложными очертаниями контура площади их определяются планиметрированием.

2.3. РАСКРОЙНЫЕ КАРТЫ

Раскройные карты являются основными технологическими документами, на основании которых планируется и осуществляется раскрой деталей, определяются нормы расхода материала на каждую деталь, размеры и количество отходов. Карты раскроя ориентируются на определенные листовые полуфабрикаты (марка и состояние материала, габаритные размеры, толщина).

Раскройная карта представляет собой чертеж, выполненный в определенном масштабе, на котором показывают расположение раскраиваемых деталей на листе заданных размеров и их количество; гарантированные размеры перемычек определяются методом раскроя. Представление о раскройных картах могут дать эскизы, приведенные на рис. 2.1 для индивидуального и группового раскроя листов и полос.

Разработку раскройных карт предшествует трудоемкая работа по распределению всей номенклатуры деталей по маркам материалов и их термообработке, по толщине и размерам. Только после такой классификации можно заказать подетальные комплекты шаблонов, пользуясь которыми — комплектовать карты раскроя.

Наряду с наиболее полным использованием материала к раскройным картам предъявляются следующие требования:

— карты следует составлять под определенное оборудование (гиловинные ножницы, фрезерные станки и др.);

- каждая карта должна включать количество разных деталей комплектно, т. е. на один, два или более самолетов;
- на карте должны быть указаны количество и размеры отходов.

На основании раскройных карт изготавливаются шаблоны группового раскроя (ШГР), которые повторяют в натуральную величину чертежи раскройных карт; определяется коэффициент использования материала

$$k_{и.м} = \frac{\sum F_{дет}}{F_{л}}, \quad (2.1)$$

здесь $F_{дет}$ — площадь деталей; $F_{л}$ — площадь раскраиваемого листа.

Определив значение $k_{и.м}$, можно затем определить норму расхода материала на каждую деталь, раскраиваемую по данной карте:

$$m_{и.р} = \frac{m_{дет}}{k_{и.м}},$$

а также массу материала m_k , расходуемого на комплект деталей,

$$m_k = m_{и.р} n = \left(\frac{m_{дет}}{k_{и.м}} \right) n,$$

где $m_{дет}$ — масса готовой детали; n — количество деталей данного наименования на самолет.

2.4. МЕХАНИЗМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

На рис. 2.2 показаны технологические схемы процессов резания на ножницах (отрезка) и на штампах (вырубка-пробивка). Раскрой на ножницах, в частности на гильотинных, разделение заготовки происходит по незамкнутому контуру, вырубка и пробивка в большинстве случаев — по замкнутому. На рис. 2.2, а иллюстрируется раскрой листа на полосы. Верхний нож 2 и нижний нож 6 отрезают полосу от листа, продвинутого за линию нижнего ножа до упора 1 на расстояние l , равное ширине отрезаемых полос. Для предотвращения опрокидывания листа на столе 5 ножниц предусмотрен прижим 4. Верхний нож закреплен на ползуне ножниц и совершает возвратно-поступательное движение; вниз — рабочий ход, вверх — холостой ход; нижний нож, закрепленный на столе ножниц, неподвижен. Ножи имеют острые режущие кромки и установлены с небольшим зазором z между ними. Для раскроя плоских деталей с прямолинейными очертаниями контура могут применяться штамп-ножницы, установленные на прессах.

При раскрое в штампах (рис. 2.2, б) разделение заготовки (полосы) 7 производится режущими кромками 12 пуансона 8 и матрицы 10; матрица — рабочая часть штампа, охватывает деталь; пуансон — ответная рабочая часть, которую охватывает деталь. Отделяемая от полосы деталь или пробиваемое в детали отверстие определяется размерами и формой в плане пуансона и матрицы.

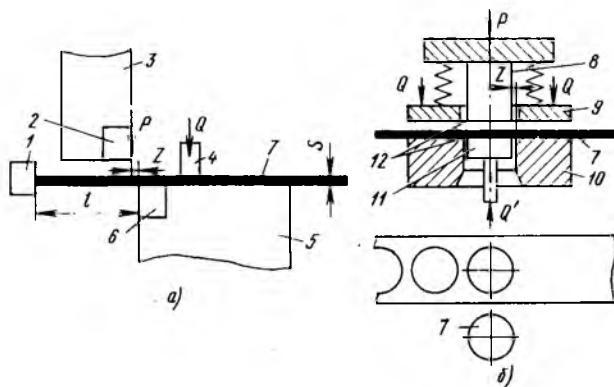


Рис. 2.2. Технологические схемы раскроя:

а—на ножницах; *б*—на штампах; 1—упор; 2—верхний нож; 3—ползун гильотинных ножниц; 4—прижим; 5—стол; 6—нижний нож; 7—заготовка; 8—пуансон; 9—съемник; 10—матрица; 11—выталкиватель; 12—режущие кромки пуансона и матрицы

Пуансон вместе с верхней частью штампа закрепляется на ползуне прессы и перемещается вверх — вниз, матрица закрепляется на нижней неподвижной части штампа, устанавливаемой на столе прессы. При рабочем ходе вниз пуансон надавливает на заготовку, отделяет от нее деталь и проталкивает ее в отверстие матрицы, преодолевая сопротивление Q' выталкивателя 11. При обратном ходе ползуна отходы полосы снимаются с пуансона съемником 9, а деталь выталкивается обратно на зеркало штампа выталкивателем 11; при изготовлении небольших деталей выталкиватель отсутствует и детали проталкиваются вниз в приемник под столом прессы. Во время нахождения пуансона в крайнем верхнем положении производится продвижение полосы на шаг штамповки, и цикл повторяется.

Механизм пластического деформирования и разрушения заготовки в указанных случаях имеет некоторые различия, однако основные положения являются общими. Верхний нож, опускаясь вниз, надавливает на заготовку, вызывая последовательно: упругое сжатие, пластическое смятие, сдвиг и разрушение. Все стадии деформирования, возникающие в заготовке около режущей кромки верхнего ножа (пуансона), возникают также и около режущей кромки нижнего ножа (матрицы). На рис. 2.3 показана последовательность стадий деформаций и разрушения заготовки; в сочетании с диаграммой $P=f(h)$ они наглядно представляют качественную сторону механизма деформирования.

На первой стадии (рис. 2.3, *а*) при внедрении ножа в толщу металла от 0 до h_1 происходит упругое сжатие и затем пластическая деформация в зоне режущих кромок; усилие P на этой стадии резко возрастает (рис. 2.3, *б*), затем интенсивность возрастания его по ходу ножа снижается как вследствие перехода упругих деформаций в пластические, так и вследствие уменьшения площа-

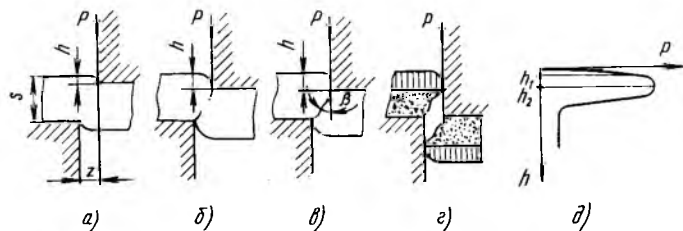


Рис. 2.3. Последовательность стадий деформирования и разрушения при резке на ножницах

ди среза. Очаги деформаций, в начальный момент отдельно возникающие в металле около режущих кромок, по ходу ножа развиваются в глубь металла, сливаются и образуют единый очаг деформаций [35]. При ходе ножа, равном h_2 , накопленная пластическая деформация около режущих кромок становится предельной, приводящей к начальной стадии разрушения; вблизи режущих кромок возникают трещины, которые, распространяясь, соединяются при дальнейшем ходе ножа (рис. 2.3, б и в). Возникновение трещин может совпадать с моментом действия максимального усилия P ; с дальнейшим их развитием усилие снижается.

Соединением трещин в срединных слоях заготовки заканчивается процесс отделения детали от заготовки (рис. 2.3, в, г). Усилие P на этой стадии преодолевает сопротивление проталкивания детали в полость матрицы, трение на контактной поверхности отходов и пуансона, а также сопротивление Q' выталкивателя.

Величина внедрения ножей до образования трещин (h_2) различна и зависит от свойств металла. Для малопластичных металлов эта величина может быть совершенно незначительной, а для пластичных может достигать до $0,5s$ (s — толщина заготовки).

На рис. 2.3, г показан профиль среза заготовки; явно выделяются две зоны. Блестящий пояс (заштрихован вертикальными линиями), образованный при непосредственном контакте с боковой поверхностью инструмента и равный по высоте внедрению ножа до образования трещин (h_2); шероховатая часть (помечена точками), большая по высоте, образованная вне контакта с инструментом и являющаяся одной из границ соединившихся в срединных слоях заготовки трещин. Кромка среза перпендикулярна к основной поверхности детали и отходов, на стороне блестящего пояса притуплена кромка, а на шероховатой части появляется заусенец, угол наклона кромки равен углу β (см. рис. 2.3, в), определяющему наклон поверхности раздела после соединения трещин. Наклон кромки среза характеризует также величина зазора z .

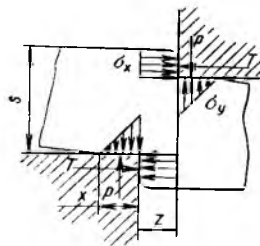


Рис. 2.4. Эпюры напряжений, действующих в заготовке при резке

На рис. 2.4 показаны эпюры напряжений, действующих в заготовке в направлении действия силы $P(\sigma_y)$ и в плоскости заготовки (σ_x) [35]. Внешняя сила P уравнивается внутренними силами, образованными напряжениями σ_y , а изгибающий момент, образованный силой P , уравнивается внутренними силами и моментом реактивной силы T .

2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Деформирующее усилие необходимо знать при проектировании технологических процессов для подбора оборудования и проектировании оснастки. Определение усилия P из условия равенства внутренних и внешних сил представляет определенные трудности. С момента соприкосновения и надавливания торца ножа (пуансона) на заготовку в очаге деформаций близ режущих кромок возникают напряжения, которые на протяжении всего процесса изменяются как по величине, так и по направлению. Определить деформирующее усилие P — значит уловить момент, когда внутренние напряжения по величине и направлению обусловят наибольшее на протяжении всего процесса сопротивление деформированию, т. е. когда P будет равно $P_{\max}$ (см. рис. 2.3, д). Подбор технологического оборудования производится именно по максимальному деформирующему усилию.

В научной литературе имеются решения этой задачи, однако в силу того, что при анализе невозможно учесть все, даже основные, факторы, влияющие на силовой режим процесса, полученные зависимости лишь приблизительно определяют $P_{\max}$. В производственных условиях используется зависимость, установленная на основе экспериментальных данных и широкого практического опыта:

$$P_{\max} = kLs\sigma_{\text{ср}} = k\sigma_{\text{ср}}F_{\text{ср}}, \quad (2.2)$$

где L — длина линии среза или периметр контура детали (при раскрое в штампах); s — толщина заготовки; произведение этих двух величин дает начальную площадь $F_{\text{ср}}$ среза; $\sigma_{\text{ср}}$ — сопротивление срезу, определяемое из опыта как отношение $P_{\max}/F_{\text{ср}}$. Практикой показано, что при сохранении постоянными условий резания (зазор z , состояние режущих кромок, скорость деформирования) сопротивление срезу для данного металла не зависит от площади среза.

Сопротивление срезу $\sigma_{\text{ср}}$ как характеристика металла приводится в справочной литературе [34]. Примерное значение $\sigma_{\text{ср}}$ можно определить по пределу прочности σ_b ; у пластичных металлов $\sigma_{\text{ср}} = (0,6 \dots 0,7)\sigma_b$, а у малопластичных $\sigma_{\text{ср}} = (0,75 \dots 0,85)\sigma_b$.

Коэффициент $k = 1,1 \dots 1,3$ учитывает отклонения реальных условий от рациональных условий резания (притупление кромок, изменение зазора), а также возможные колебания толщины и свойств листовых полуфабрикатов.

По усилию, подсчитанному по уравнению (2.2), подбирают необходимое оборудование. В случае отсутствия оборудования тре-

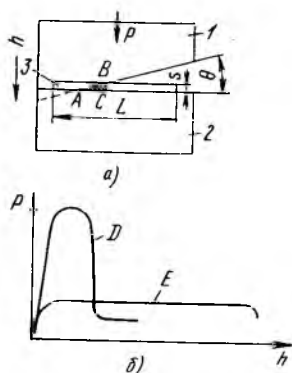


Рис. 2.5. Раскрой на ножницах:

а—раскрой с наклонным верхним ножом; б—графики усилий при резке: на ножницах с параллельными (кривая D) и наклонными (кривая E) ножами; 1—верхний нож; 2—нижний нож; 3—заготовка

буемого усилия, а часто с целью уменьшения больших по значению деформирующих усилий намечаются меры по снижению $P_{\max}$.

Из уравнения (2.2) видно, что единственным направлением уменьшения $P_{\max}$ является снижение площади резания $F_{\text{ср}}$, так как $\sigma_{\text{ср}}$ является характеристикой металла, которая может быть изменена только изменением температурно-скоростных условий деформирования. При раскрое на гильотинных ножницах уменьшение площади среза производится наклоном верхнего ножа по отношению к нижнему (рис. 2.5). Из рисунка видно, что в каждый момент под ножами находится не вся, а лишь часть площади среза, равная площади заштрихованного треугольника ABC; эта мгновенная площадь среза $F_{\text{ср}}$ определяется из формулы

$$F_{\text{ср}} = \frac{s^2}{2 \operatorname{tg} \theta}.$$

II тогда усилие резания определяется так:

$$P_{\max} = k \frac{\sigma_{\text{ср}} s^2}{2 \operatorname{tg} \theta}. \quad (2.3)$$

Угол θ наклона верхнего ножа принимается не более $3 \dots 4^\circ$. Однако и при этом наклоне усилие резания на таких ножницах уменьшается в десятки раз, особенно при раскрое длинных листов; из уравнения (2.3) видно, что $P_{\max}$ не зависит от длины L раскраиваемого листа.

Площадь под графиком $P=f(h)$ (см. рис. 2.5, б) характеризует работу, затрачиваемую на пластическое деформирование и разрушение при резании. Работа при резании одних и тех же листов на ножницах с параллельными и наклонными ножами должна быть одинакова, поэтому одна и та же работа производится в первом случае — большим усилием на коротком пути, во втором — меньшим усилием на длинном пути. В последнем случае требуется большой ход ползуна ножниц, однако мощность привода здесь может быть значительно меньше.

При раскрое в штампах для уменьшения усилия резания производится скашивание режущих кромок пуансонов или матриц, а если в штампе имеется несколько пуансонов, то их режущие кромки располагают на разных уровнях, чтобы вырубка или пробивка происходила не одновременно по всей площади среза. На рис. 2.6 показаны пуансоны и матрицы таких штампов.

Наличие скосов на ножницах и штампах приводит к возникновению изгибающего момента и к искривлению части заготовки, ко-

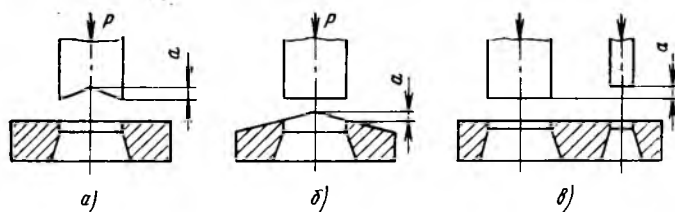


Рис. 2.6. Схемы штампов со скошенными режущими кромками:

а—для пробивки; *б*—для вырубки; *в*—для последовательного выполнения пробивки и вырубки

торая расположена над или под инструментом, имеющим скосы, поэтому скос выполняется на пуансоне, если отделяемая часть идет в отходы (пробивка), и на матрице, если отделяемая часть является деталью (вырубка). Высота скоса принимается не менее высоты блестящего пояса, чтобы обеспечить снижение усилия в момент достижения им максимального значения. На практике высоту a скоса принимают равной $(0,5 \dots 1,0)s$.

Для подсчета усилия резания при скошенных или ступенчатых режущих кромках необходимо проследить изменение по ходу процесса площади среза $F_{ср}$ и принять для расчета по уравнению (2.1) наибольшее ее значение. То же относится и к расчету усилия при раскрое на роликовых или вибрационных ножницах.

Расчеты показывают, что при вырубке прямоугольных деталей на штампах, имеющих скос режущих кромок 2° , усилие вырубки снижается на $17 \dots 25\%$, а скос кромок 4° — на $45 \dots 55\%$ [34].

Усилие съема полосы (отхода) с пуансона после вырубки детали (см. рис. 2.2, б) определяется расчетным или опытным путем и выражается в долях максимального усилия резания. Значение усилия съема необходимо для расчета привода съемника, а иногда Q учитывается при расчете полного усилия вырубки-пробивки.

После полного отделения детали пуансон оказывается охваченной полосой, из которой произведена вырубка детали; эта полоса как бы напрессована на пуансон, и чтобы ее снять, необходимо затратить некоторую энергию. Необходимая для этого энергия аккумулируется пружинами съемника (см. рис. 2.2, б) или другим устройством. Сжимаясь при рабочем ходе, эти пружины разжимаются при холостом ходе ползуна прессы и оказывают давление на кольцо съемника, который и удаляет полосу с пуансона.

Усилие Q съемника в общем виде можно выразить уравнением

$$Q = \mu \sigma_k F_k. \quad (2.4)$$

Здесь F_k — площадь контакта боковой поверхности пуансона с заготовкой; σ_k — контактные напряжения; μ — коэффициент трения.

Если принять, что площадь контакта полосы с пуансоном ограничивается блестящим пояском [31], высота которого равна h_2 (см. рис. 2.3, в), а $\sigma_k \approx \sigma_s$, то получим

$$Q = L h_2 \mu \sigma_s. \quad (2.5)$$

Полученная формула — приближенная, так как при ее выводе не учтены все факторы, влияющие на величину силы Q . На усилие Q , в частности на σ_k , влияют: толщина материала, величины пере-мычек и зазора, конфигурация деталей и др. Однако усилие съемника пропорционально усилию резания $P_{\max}$ и расчеты Q часто производят в упрощенном виде на основе установленных соотношений. Практически установлено и рекомендуется для расчетов [13, 34]:

$$Q = (0,03 \dots 0,05) P_{\max}. \quad (2.6)$$

Усилие выталкивания Q' (см. рис. 2.2, б) или проталкивания (при штамповке на провал) приближенно определяется также из соотношений (2.5) или (2.6), хотя сопротивление выталкиванию и носит несколько иной характер, чем при съеме. Определение Q' необходимо для расчета привода выталкивателя и для учета его при расчете полного усилия штамповки; при рабочем ходе вниз усилие Q' преодолевается движением пуансона (см. рис. 2.2, б).

Полное усилие штамповки с учетом сопротивления приводов съемника и выталкивателя

$$P = 1,3Ls_{\text{ср}} + Q + Q'. \quad (2.7)$$

В зависимости от конструкции штампа и пресса последние два слагаемых или одно из них могут отсутствовать. При отрезке и при раскрое на гильотинных ножницах Q и Q' равны нулю.

Для уменьшения сил трения при вырубке и пробивке, при съеме и выталкивании штампы и заготовки перед штамповкой смазывают обычным машинным маслом. Опытю установлено, что при отсутствии смазки усилие вырубки повышается на 3...6%, а усилие проталкивания на 30...40%; кроме того, отсутствие смазки снижает стойкость штампов и ускоряет затупление режущих кромок.

Зазор между ножами (пуансоном и матрицей) должен подбираться так, чтобы трещины, образовавшиеся в зоне верхних и нижних режущих кромок, при своем развитии встретились в срединных слоях заготовки. Начальный или минимальный зазор, при котором происходит совпадение трещин, считается оптимальным. Если принять, что образующая поверхности разделения имеет прямолинейную образующую и известен угол β ее наклона к оси пуансона или ножа (см. рис. 2.3, в), то оптимальный зазор может быть определен из геометрических соотношений [31, 34]:

$$z = (s - h_1) \operatorname{tg} \beta. \quad (2.8)$$

По результатам опытных данных угол β для малопластичных металлов равен 4° и увеличивается до 6° для пластичных металлов.

При зазоре меньше оптимального скалывающие трещины не совпадают, между ними образуется перемычка, которая, разрываясь, ухудшает качество кромки; кроме того, при этом повышается усилие резания (до 15%), увеличивается высота заусенцев. При увеличении зазора сверх оптимального расширяется зона дефор-

маций около кромки из-за большего изгибающего момента, увеличивается усилие деформирования и высота торцевого заусенца.

Для большинства деформируемых сталей и цветных сплавов рекомендуются следующие зазоры: при толщине s до 1 мм зазор 4...6% от толщины листа, при $s=1 \dots 2$ мм зазор 6...10%. Более подробные рекомендации по выбору зазоров даны в справочнике по листовой штамповке [34]. Так как при износе рабочих частей штампов зазор увеличивается, то в новом штампе обычно выдерживается нижнее значение диапазона зазоров.

2.6. РАСКРОЙ НА НОЖНИЦАХ

Раскрой на ножницах — основной вид раскроя для деталей, имеющих прямолинейные очертания контуров. Наиболее употребителен и производителен раскрой на гильотинных ножницах, являющихся специальным видом прессового оборудования; они имеют удлиненную станину и ползун, что дает возможность закрепить на них длинные ножи: верхний — на ползуне, нижний — на столе. На современных гильотинных ножницах можно раскраивать листы длиной до 8 м, толщиной 4 мм.

На гильотинных ножницах раскрой листов производится по упору — заднему или переднему. В сочетании с различного рода направляющими резание по упорам дает возможность раскраивать детали не только прямоугольных, но и разнообразных других форм (рис. 2.7). На столе ножиц для установки и закрепления упоров и направляющих имеются соответствующие пазы. Резание по упорам дает возможность обеспечивать точность 0,2...0,5 мм. Стрелками на рис. 2.7 показано направление перемещения заготовки в процессе раскроя.

Резка на ножницах с наклонным верхним ножом сопровождается изгибом и закручиванием отрезаемой полосы; чем больше угол наклона, длина реза и меньше ширина полосы, тем в большей степени сказываются эти недостатки.

Наряду с гильотинными ножницами в авиационной промышленности применяются роликовые и вибрационные ножницы, в кото-

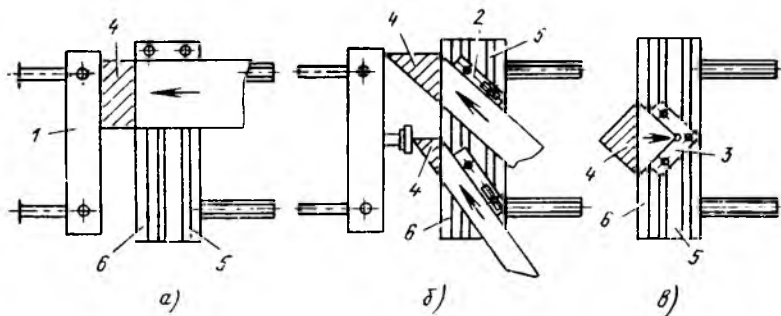


Рис. 2.7. Применение упоров при резке:

а—заднего; б—бокового; в—переднего; 1—задний упор; 2—боковой упор; 3—передний упор; 4—отрезаемая часть заготовки; 5—стол; 6—линия среза

7460056

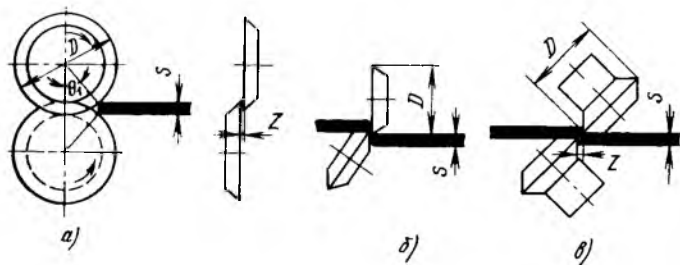


Рис. 2.8. Схемы работы роликовых ножниц:

а—с параллельными осями; *б*—с наклонной осью нижнего ролика; *в*—с наклонными осями обоих роликов

рых разделение заготовки происходит не одновременно по всей линии среза, а постепенно; в каждый данный момент под вращающимися режущими кромками роликов находится лишь часть площади, определяемая диаметром роликов и толщиной листа. Из рис. 2.8 приведены схемы резки на роликовых ножницах разной конструкции. Верхние и нижние ролики вращаются в разные стороны, увлекая лист в зону резания силами трения. Захват и перемещение листа происходят в том случае, если угол захвата $\theta_1 \leq 12^\circ$; качественно резание без проскальзывания листа обеспечивается роликами, диаметр D которых составляет не менее 30 толщин разрезаемого листа. Для облегчения разделения листа при раскросе один ролик должен заходить за другой (перекрывание) на величину $b = (0,2 \dots 0,4)s$ (см. рис. 2.8). Как и на гильотинных ножницах с наклонным верхним ножом, на роликовых ножницах резание вдоль намеченной линии происходит при сравнительно небольшом усилии; производительность ножниц зависит от диаметров и скорости вращения роликов.

На роликовых ножницах производится обрезка припуска на деталях после штамповки, криволинейный раскрой листов из сталей и титановых сплавов, а в опытном и единичном производствах — криволинейный раскрой алюминиевых сплавов. В случае наклонно-

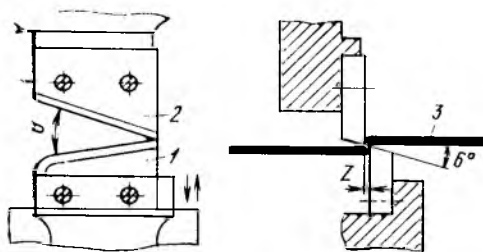


Рис. 2.9. Схема работы вибрационных ножниц:

1—нижний нож; *2*—верхний нож; *3*—заготовка

го расположения осей роликов поворот листа при криволинейном раскросе облегчается по сравнению с ножницами с горизонтальным расположением осей вследствие уменьшения площади контакта роликов с кромкой среза. На ножницах с наклонными ножами можно вырезать заготовки с контурами, имеющими достаточно большую кривизну.

Ножи-ролики устанавливаются на скобообразной стани-

не с разной величиной вылета. Роликовые ножницы применяются для резки листов толщиной до 2 ... 3 мм; точность раскроя соответствует 7 ... 9 классам.

Кроме роликовых ножниц, для раскроя и обрезки деталей применяются вибрационные ножницы, схема работы которых приведена на рис. 2.9. Нижний нож ножниц соединен с ползуном кривошипно-шатунного механизма и совершает до 2000 двойных ходов в минуту. Длина ножей 35 ... 40 мм, угол створа — до 25°. Принудительная подача производится со скоростью 3 ... 4 м/мин при толщине разрезаемой заготовки 2—3 мм. Прерывистый процесс резания и небольшой заход режущих кромок облегчает поворот листа при криволинейном раскрое.

2.7. РАСКРОЙ НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ

Проведение криволинейного раскроя крупногабаритных деталей на роликовых и вибрационных ножницах сопряжено с большими трудовыми затратами. Поэтому для криволинейного раскроя листов из алюминиевых сплавов применяется преимущественно фрезерование на специализированных фрезерных и сверлильных станках, а для раскроя стальных листов и листов из титановых сплавов — станки, на которых разделение раскраиваемых листов производится не фрезерованием, а прожиганием струей высокотемпературной плазмы. Длительное время широкое применение находили радиальные сверлильно-фрезерные станки, на которых отделение заготовок от пакета листов производится путем фрезерования канавок при ручном обводе фрезерной головкой контура шаблонов. Однако в последние годы были спроектированы и изготовлены раскройные станки со следящим приводом и с числовым программным управлением.

Радиальный сверлильно-фрезерный станок (РСФ или ОС) имеет два хобота; на одном установлена сверлильная, на другом — фрезерная головки. Возможность вращения хоботов вокруг колонны станка и радиального перемещения головок за счет складывания звеньев хоботов обеспечивает сверление и фрезерование на большой площади. На этих станках можно производить раскрой листов длиной до 6 м при толщине пакета до 12 мм. Наибольший вылет хоботов составляет 2,5—2,9 м, частота вращения шпинделя фрезерной головки до 16000 об/мин, диаметр применяемых фрез 8 мм.

Пакет листов укладывают на стол станка, а поверх него — шаблон группового раскроя (ШГР); по отверстиям в этом шаблоне сверлятся все необходимые в деталях отверстия. Затем ШГР снимают и на пакет листов устанавливают и закрепляют шаблоны фрезерования (ШФ), по контуру которых проводится фрезерование. На станках имеется два стола: на одном в пакете листов сверлятся отверстия (ШО, ИО, СО и др.), на другом производится фрезерование. Номенклатура и расположение раскраиваемых деталей на пакете листов определяется по раскройной карте.

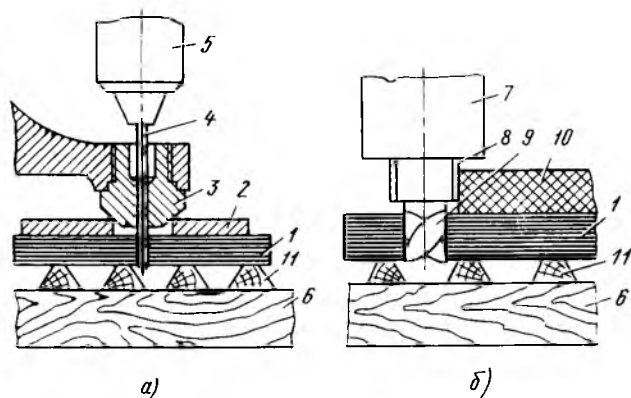


Рис. 2.10. Схемы раскроя на радиальном сверлильно-фрезерном станке:

а—сверление отверстий; *б*—фрезерование; 1—пакет листов; 2—шаблон группового раскроя; 3—кондукторная втулка; 4—сверло; 5—шпиндель сверлильной головки; 6—стол станка; 7—шпиндель фрезерной головки; 8—втулка; 9—фреза; 10—шаблон фрезерования; 11—рейки

Из схемы сверления на рис. 2.10, *а* видно, что размеры отверстий в ШГР 2 больше размеров отверстий, которые нужно сверлить в пакете листов 1. В отверстие шаблона западает конический поясок кондукторной втулки 3, расположенной в ее нижней части. Западание конуса втулки в отверстие шаблона служит сигналом для опускания шпинделя 5 сверлильной головки и сверления отверстия в нужном месте. Перемещая хобот со сверлильной головкой по всей площади пакета, оператор последовательно производит сверление в нем всех отверстий по сетке отверстий в шаблоне.

Фрезерование канавки вокруг шаблонов фрезерования (рис. 2.10, *б*) производится фрезой диаметром 8 мм, сделанной из быстрорежущей стали Р18 или Р9. Фрезерование идет в два прохода, черновой — с втулкой 8 и чистовой — после снятия втулки 8; при этом снимается слой 0,8 мм, равный толщине стенки втулки.

Копировальные сверлильно-фрезерные станки типа КСФ-1М обеспечивают более производительный раскрой листов. Они оснащены двухкоординатной электрической следящей системой, имеют по два стола: на одном в соответствии с раскройной картой укладывают и закрепляют шаблоны, на другом — пакет листов, подлежащих раскрою. Над столами перемещаются два сверлильных агрегата и один фрезерный; каждый агрегат имеет копировальную и рабочую головки. Автоматическое перемещение шупа копировальной головки вдоль кромки шаблона автоматически повторяется фрезерной головкой, при помощи которой фрезеруется канавка в пакете листов. На таких станках можно раскраивать листы размером 7×1,2 м при высоте пакета 10 мм; скорость подачи фрезерной головки — до 2 м/мин, точность фрезерования $\pm 0,25$ мм.

Обрезка обшивок одинарной кривизны после формообразования путем обтяжки производится фрезерованием на станках типа ФОЛ

(фрезерный обрезной листовой); длина деталей, подлежащих об резке — до 6 м. Для раскроя листов применяются также станки с числовым программным управлением, в том числе и станки для раскроя стальных и титановых листов, на которых вместо фрезерных головок встроены плазменные головки; эти станки обслуживают раскрой листов длиной до 10 м.

Для раскроя труб и прессованных профилей применяются маятниковые пилы, на которых отрезка заготовок производится дисковыми фрезами.

2.8. РАСКРОЙ В ШТАМПАХ

Детали и заготовки малых и средних размеров из всех материалов раскраивают из полос в штампах на механических кривошипных прессах.

На рис. 2.11 показаны компоновки рабочих элементов штампов для выполнения основных разделительных операций, а на рис. 2.12 более подробно дана схема вырубного штампа, на которой представлены не только его рабочие, но и вспомогательные элементы. Кроме пуансона, матрицы и съемника здесь показаны плиты — верхняя 5 и нижняя 8 и соединяющие их направляющие колонки 1, при помощи которых обеспечивается равномерное по контуру распределение зазора α между пуансоном и матрицей, закрепленными на верхней и нижней плитах. Хвостовик, установленный на верхней плите, служит для закрепления верхней части штампа на ползуне пресса. Колонки запрессованы в нижней плите, а с верхней плитой соединены подвижной посадкой, чем обеспечивается движение и направление верхней части штампа при ее рабочем ходе вниз относительно нижней. Когда ползун находится в крайнем верхнем поло-

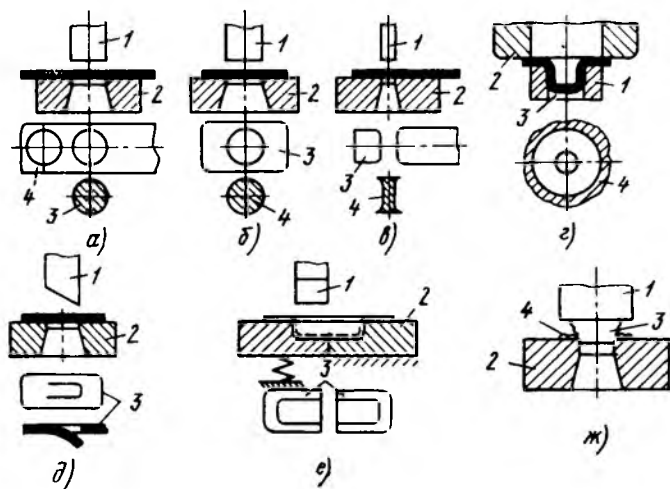


Рис. 2.11. Классификация штампов по характеру выполняемой работы:

а—вырубной; б—пробивной; в—отрезной; г—обрезной; д—надрезной; е—разрезной; ж—зачистной; 1—пуансон; 2—матрица; 3—деталь; 4—отходы

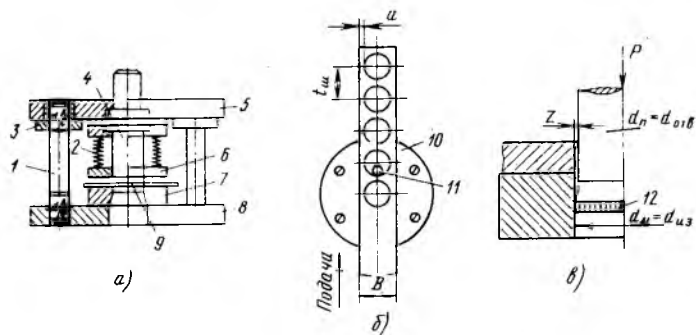


Рис. 2.12. Вырубной штамп с направляющими колонками:

a—общий вид; *б*—направляющие для полосы; *в*—перенос размеров штампа на деталь; 1—направляющие колонки; 2—пружины съемника; 3—направляющие втулки; 4—пуансон; 5—верхняя плита; 6—съемник; 7—матрица; 8—нижняя плита; 9—полоса; 10—направляющая; 11—упор; 12—деталь

жении, полоса перемещается на шаг штамповки. Продвижение полосы происходит по направляющим 10 (рис. 2.12, б), а фиксация в нужном положении обеспечивается упором 11, задерживающим полосу за перемычку.

Из рис. 2.12, в видно, что отделившаяся деталь 12 имеет диаметр матрицы, а отверстие — диаметр пуансона. Следовательно, если размер изделия по наружному контуру обозначить $d_{из}$, а по внутреннему — $d_{отв}$, то при определении размеров пуансона $d_{п}$ и матрицы $d_{м}$ необходимо принять:

— при вырубке, т. е. при образовании наружного контура $d_{м} = d_{из}$ или $d_{м} = d_{п} + 2z$;

— при пробивке, т. е. при образовании внутреннего контура $d_{п} = d_{отв}$ или $d_{п} = d_{м} - 2z$.

Подача полосы в рабочую зону производится по направляющим 10, а ограничение продвижения, т. е. соблюдение шага подачи $t_{ш}$ осуществляется при помощи упора 11, который, западая в пробитое в полосе отверстие, задерживает ее. Ширина B полосы, как видно из рис. 2.1, зависит от типа раскроя. При безотходном и малоотходном раскрое боковые перемычки отсутствуют и ширина полосы равна соответствующему размеру изделия $d_{из}$. При раскрое с отходом

$$B = d_{из} + 2a, \quad (2.9)$$

где $d_{из}$ — размер детали в направлении ширины полосы; a — ширина перемычки.

При многорядном, наклонном или встречном раскрое ширина полосы определяется обычно графическим построением действительного расположения деталей.

Величина перемычек зависит от свойств материала, формы и размеров деталей, толщины полосы, способа и точности направления полосы в штампе. Слишком узкие перемычки могут вытягиваться в зазор между пуансоном и матрицей, разрываться; при боль-

ших погрешностях фиксации полосы детали могут получаться без полного контура. Минимальные перемычки должны быть больше зоны распространения пластической деформации около линии разделения. Для тонкой полосы ($s < 0,5$ мм) перемычки могут быть равны нескольким ее толщинам, для средней — около одной толщины, для толстой ($s > 2$ мм) ширина перемычек может быть меньше толщины материала. Внутренние перемычки принимаются несколько меньшими, чем внешние.

При разработке технологических процессов приходится решать вопрос о выборе размеров листа в зависимости от размеров полос. Зная ширину полосы, длину ее следует выбирать такой, чтобы концевые отходы были минимальными, а раскрой листа на полосы обеспечивал наиболее рациональное его использование. Коэффициент использования материала при раскросе в штампах определяется двумя коэффициентами: коэффициентом использования полосы при раскросе из нее деталей и коэффициентом использования листа при раскросе из него полос.

Общий коэффициент использования металла равен произведению этих двух коэффициентов или определяется отношением (2.1).

При разработке технологических процессов приходится сравнивать способы раскроя, изменять площади полос и листов и производить расчет, прежде чем остановиться на определенном варианте, обеспечивающем наибольшее значение $k_{и.м.}$

Отдельные разделительные операции могут совмещаться в одном процессе. Наиболее распространено совмещение вырубki и пробивки, т. е. одновременное образование как наружного контура детали, так и внутреннего. Элементарным примером может служить изготовление шайбы.

На рис. 2.13 показаны два варианта штамповки детали с отверстием. При подаче справа налево в штампе последовательного действия (см. рис. 2.13, а) пуансоном 1 вначале пробивается отверстие с отделением отхода 6, а затем на базе этого отверстия после подачи полосы на шаг t пуансоном 2 образуется наружный контур детали 5; матрица 3 является общей для пуансонов 1 и 2. На торцевой части пуансона 2 имеется выступающая часть — ловитель, при помощи которого полоса более точно ориентируется относительно матрицы; при неточной фиксации полосы внутреннее отверстие детали будет расположено эксцентрично относительно внешнего контура. При работе на таком штампе детали и внутренние

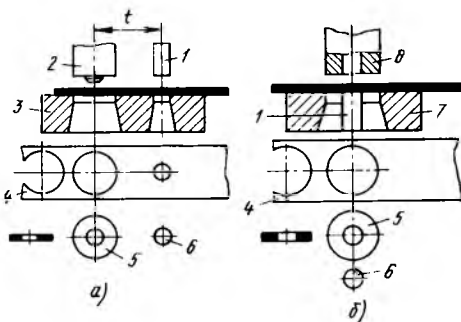


Рис. 2.13. Рабочие детали штампа:

а—последовательного действия; б—совмещенного действия; 1—пуансон для пробивки; 2—пуансон для вырубки; 3—матрица для пробивки и вырубки; 4—отходы полосы; 5—деталь; 6—внутренние отходы; 7—матрица для вырубки; 8—пуансон для вырубки и матрица для пробивки

отходы можно удалять под стол пресса, т. е. производить штамповку «на провал».

В штампе совмещенного действия (см. рис. 2.13, б) так же, как и в штампе последовательного действия, объединяются пробивной и вырубной штампы, но образование контуров производится в нем одновременно, пробивной штамп находится внутри вырубного. Опусканием пуансона-матрицы 8 деталь 5 отделяется и проталкивается вниз, а внутренний отход 6 отделяется и проталкивается вверх. Из схемы легко видеть, что и деталь и внутренние отходы нужно вытолкнуть на поверхность штампа, т. е. штамповка «на провал» в данном случае невозможна.

Оба способа обеспечивают одинаковую производительность: при каждом ходе ползуна пресса снимается готовая деталь. Но так как в штампе последовательного действия возможна штамповка «на провал», то, в особенности при автоматической подаче, предпочтение следует отдать именно этому способу. Выталкивание деталей и отходов на поверхность штампа совмещенного действия создает дополнительные трудности, так как их нужно или сдвигать сжатым воздухом или запрессовывать в полосу отходов и удалять вместе с ней, или, снимать вручную. Однако одностороннее расположение пуансонов при последовательном способе обуславливает некоторое искривление деталей и для придания им плоской формы производится дополнительная операция — правка.

Точность деталей при совмещенном способе выше, чем при последовательном, так как здесь точность размеров зависит только от точности изготовления штампа и не зависит от точности фиксации полосы.

Выбор того или другого способа совмещения (вырубки и пробивки, отрезки и пробивки, обрезки и пробивки и др.) сопровождается анализом всех преимуществ и недостатков и сравнением экономических затрат.

Кроме совмещенных разделительных операций производится совмещение разделительных и формоизменяющих операций: вырубка заготовки и ее вытяжка, вырубка или отрезка заготовки и гибка, вытяжка и пробивка, пробивка и отбортовка и др. Эти совмещенные процессы уменьшают количество необходимой оснастки, повышают производительность; непосредственно из полосы получается за один ход пресса готовая пространственная деталь. На рис. 2.14 показаны схемы двух совмещенных процессов: вырубки и вытяжки (а), пробивки и отбортовки (б). В левой части каждой из схем детали штампа и заготовка показаны в исходном положении, а в правой — в ходе процесса вытяжки после вырубки заготовки (а) и отбортовки после пробивки отверстия (б). Совмещенный процесс вырубки и вытяжки, как видно из схемы, должен осуществляться на прессе двойного действия, имеющего два ползуна; на внутреннем ползуне закрепляется пуансон 4 для вытяжки, на внешнем — пуансон 3 для вырубки и прижим, предотвращающий образование складок при вытяжке. Вырубка производится усилием P , вытяжка — усилием Q .

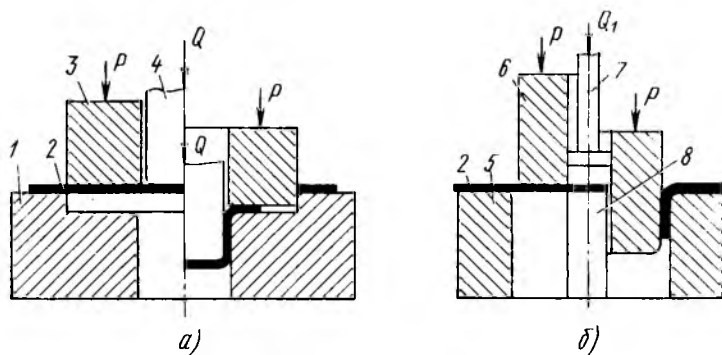


Рис. 2.14. Схемы работы комбинированных штампов:

а—для вырубки заготовки и ее вытяжки; *б*—для пробивки отверстия и его отбортовки; 1—матрица для вытяжки; 2—полоса; 3—пуансон для вырубки и прижим для вытяжки; 4—пуансон для вытяжки; 5—матрица для отбортовки; 6—пуансон для отбортовки и матрица для пробивки; 7—выталкиватель; 8—пуансон для пробивки

Совмещенный процесс пробивки и отбортовки может производиться на прессе с одним ползуном (пресс одинарного действия). Опускающийся пуансон-матрица 6 усилием P производит пробивку отверстия совместно с расположенным внизу пуансоном 8, а затем при дальнейшем опускании происходит отбортовка этого отверстия по матрице 5.

Для осуществления раскроя в штампах на универсальных прессах технологическое оснащение включает в себя: штампы различного назначения, подающие устройства для перемещения полос, лент или штучных заготовок в рабочую зону, а также удаляющие устройства для удаления из рабочей зоны и укладывания изготовленных деталей. В зависимости от требуемой точности и размеров деталей, от масштаба производства, от сложности контуров уровень технологического оснащения может быть различным; для деталей, изготавливаемых в массовом порядке, может быть применен штамп-автомат, а при опытном или единичном производстве применяются упрощенные штампы: без механической подачи полос и удаления деталей. Рациональность уровня сложности технологического оснащения определяется эффективностью капитальных вложений.

С конструкцией разделительных штампов и с методикой расчета их элементов можно ознакомиться в специальной литературе [13, 23, 34, 36].

2.9. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА КРОМКИ СРЕЗА

Выше было дано описание механизма деформирования и разрушения при разделительных операциях без снятия стружки. Выявлено, что поверхность среза неперпендикулярна плоскости детали, имеет большую шероховатость, заусенец. В связи с этим кромка дорабатывается зачисткой, а мелкие детали — галтовкой.

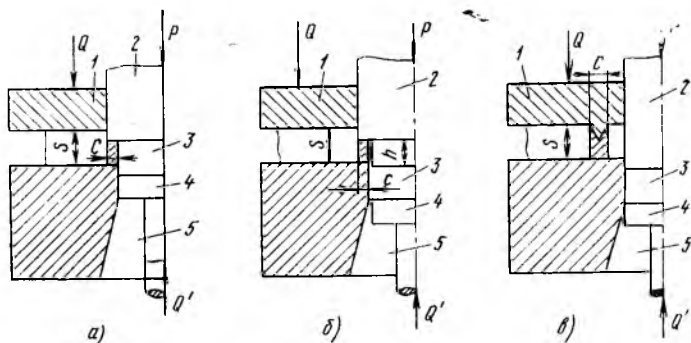


Рис. 2.15. Схемы вырубных штампов с приложением к очагу деформаций дополнительного сжатия:

1—съемник; 2—пуансон; 3—отделяемая часть заготовки; 4—выталкиватель; 5—матрица

Однако имеются способы повышения качества кромки среза путем усовершенствования разделительных операций.

Как видно из схем разделения заготовки, для обеспечения перпендикулярности кромки необходимо, чтобы зазор z (см. рис. 2.3, а) был равен нулю, а блестящий пояс был распространен на всю толщину заготовки, т. е. должны быть приняты меры для предотвращения возникновения скалывающих трещин около режущих кромок и распространения их в глубину. Последнее может быть осуществлено изменением в очаге деформаций напряженного состояния в направлении схем, обеспечивающих повышение пластичности металла и увеличение предельных значений пластических деформаций, при которых начинается разрушение. Известно, что наиболее благоприятной для пластической деформации схемой напряженного состояния является трехстороннее неравномерное сжатие. Следовательно, для того, чтобы предотвратить или задержать образование трещин при разделительных операциях, необходимо приложить к очагу деформаций дополнительное сжатие со стороны рабочих элементов штампов. На рис. 2.15 показаны три схемы осуществления вырубки или пробивки с приложением к очагу деформаций дополнительного сжатия. Общим во всех схемах является то, что давление на заготовку оказывается не только в зоне среза, но и за ее пределами; на рис. 2.15 зоны дополнительного давления показаны в виде заштрихованных прямоугольников. Сжатие в направлении, перпендикулярном плоскости заготовки, обусловит появление сжимающих напряжений и деформаций в плоскости заготовки, которые, надавливая на поверхность раздела, уменьшают влияние растягивающих напряжений и задерживают или вообще предотвращают образование трещин около режущих кромок. Подсчитано [31], что для получения в очаге деформаций (рис. 2.15, а, б) схемы всестороннего неравномерного сжатия величина перекрытия должна быть равна $c \approx 0,12s$, высота ступеньки h на пуансоне (см. рис. 2.15, б) — меньше высоты блестящего пояска при обычных условиях вырубки, пуансон должен не доходить

до поверхности матрицы на размер 0,1s. Выступ на съемнике показан на рис. 2.15, в.

Последняя схема вырубки со сжатием со стороны выступа на съемнике находит в настоящее время широкое практическое применение. Этот способ имеет преимущества по сравнению с двумя предыдущими; здесь происходит полное отделение детали от отхода в то время как при вырубке пуансоном полнее матрицы (при отрицательном зазоре) в конце хода остается небольшая перемычка, которая, разрываясь при обратном ходе ползуна, оставляет на изделии неровности и заусенцы.

Мы рассмотрели разделительные операции, выполняемые в инструментальных штампах на механических прессах. В практике заводов встречаются разнообразные способы реализации этих операций. Это обуславливается разными видами заготовок (лист, профиль, труба, детали пространственных форм), программой выпуска, особыми требованиями к качеству кромки среза и др.

Осуществление разделительных операций при повышенных скоростях деформирования сужает очаг деформации, что способствует уменьшению шероховатости и конусности поверхности среза.

Качество среза при отрезке заготовок из профилей, труб и прутков повышается, если вдоль оси приложить сжимающее усилие, увеличивающее гидростатическое давление в очаге деформации и способствующее увеличению по высоте заготовки блестящего пояска.

Разнообразны также конструкции разделительных штампов. Применение инструментальных штампов экономически целесообразно в крупносерийном и массовом типах производства. В опытном и мелкосерийном производстве часто применяют упрощенные, более дешевые штампы (пластинчатые, с универсальными эластичными пуансонами или матрицами, пинцетные и др.); при изготовлении небольшого количества деталей применяют для штампов легкообрабатываемые неинструментальные материалы. Определенное распространение имеют универсальные штампы, оформляющие контуры детали не сразу, а постепенно, поэлементно. На рис. 2.16 показана последовательность образования окончательных форм трех деталей при помощи набора универсальных отрезных, вырубных и пробивных штампов. Внешние контуры деталей образуются за несколько ходов пресса на универсальном отрезном штампе (на штамп-ножницах), отверстия — на универсальных пробивных, закругления на угловых участках — на универсальных штампах для обрезки углов по радиусу и др. Следовательно имея комплект универсальных штампов различного назначения, можно поэлементно изготавливать детали самых разнообразных форм и размеров. Ком-

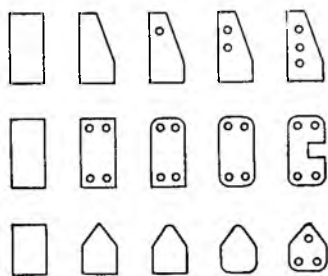


Рис. 2.16. Последовательное образование контуров плоских деталей путем поэлементной штамповки на универсальных штампах

плект штампов проектируется и изготавливается на основе анализа геометрических форм и размеров деталей.

Разнообразные способы и технические средства для разделительных операций указаны в справочной и специальной литературе [23, 34].

ГЛАВА 3

ГИБКА

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В соответствии с классификацией (рис. 1.3) мы рассмотрим здесь собственно гибку как элементарную операцию и некоторые совмещенные процессы гибки.

Сущность операции заключается в превращении плоской или прямолинейной заготовки в пространственную деталь одинарной кривизны, в создании или изменении кривизны срединной поверхности заготовки в одной плоскости — в плоскости изгиба.

Типовыми деталями (см. рис. 1.1), изготавливаемыми гибкой, являются: обшивки цилиндрической и конической частей фюзеляжа, конические обшивки крыльев и оперения, цилиндрические и конические обечайки, профили шпангоутов, стрингеры, детали трубопроводных систем и др.

На рис. 3.1 показаны технологические схемы гибки. Гибку можно производить в гибочных штампах (рис. 3.1, а, б), на специализированных гибочных машинах (рис. 3.1, в), на роликовых или валковых станках. Основным оборудованием для гибки в штампах являются универсальные механические и гидравлические прессы, специализированные гибочные прессы с удлиненной станиной и ползуном (как у гильотинных ножниц). Выбор прессы производится в каждом отдельном случае по величине необходимого усилия, размеру стола, величине хода ползуна, размеру открытой и закрытой высот прессы. Все эти размеры определяют, исходя из размеров и свойств материала деталей. Для гибки крупногабаритных листовых деталей, прессованных профилей и труб применяется разнообраз-

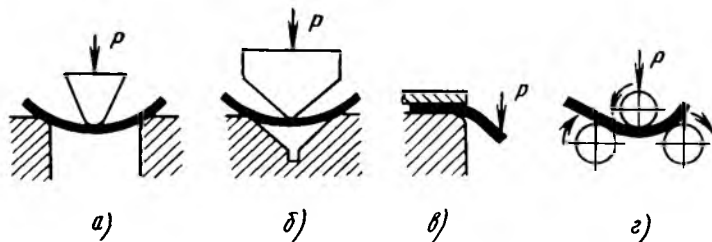


Рис. 3.1. Технологические схемы гибки:

а—свободной; б—с чеканкой; в—консольной; г—на роликовом или валковом станке

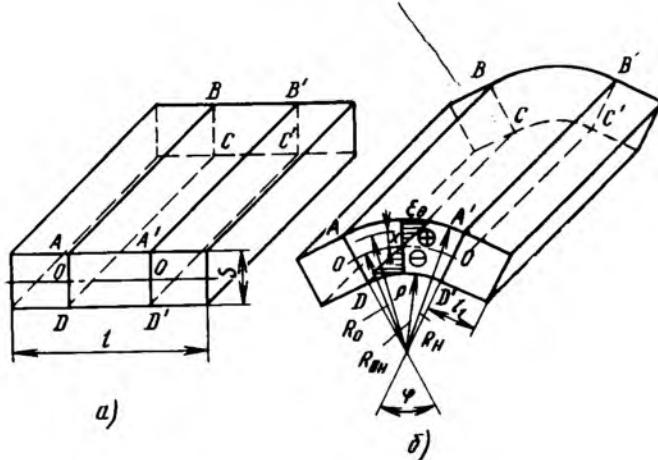


Рис. 3.2. Распределение тангенциальных деформаций заготовки при гибке:
а—исходная заготовка; б—изогнутая деталь

разное оборудование: трехвалковые машины, трех- и четырехроликовые станки, обтяжные прессы, трубогибочные станки и др.

На рис. 3.2 показаны исходная заготовка и полученная изогнутая деталь. Деталь характеризуется радиусом и углом изгиба. Различают внутренний $R_{вн}$ и наружный $R_{н}$ радиусы, характеризующие соответственно кривизну вогнутой и выпуклой поверхностей заготовки в зоне изгиба, а также радиус R_0 нейтрального слоя, характеризующий кривизну поверхности внутри заготовки, которая разграничивает растянутую и сжатую зоны по высоте сечения. Под углом гибки будем понимать центральный угол φ (см. рис. 3.2).

3.2. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Здесь мы рассмотрим элементарную операцию гибки, где деформирование производится или только моментом или только усилием.

В основу анализа процесса гибки положена гипотеза плоских сечений, согласно которой исходные плоские сечения заготовки остаются плоскими и после ее гибки. На рис. 3.2 видно, что сечения $ABCD$ и $A'B'C'D'$ в изогнутой заготовке остаются плоскими; эти сечения лишь развернулись относительно друг друга, перестали быть параллельными, но остались плоскими. При этом внешние волокна AA' на выпуклой стороне заготовки растянуты, а на вогнутой стороне DD' — сжаты; растянутая и сжатая в тангенциальном направлении зоны разделяются нейтральным слоем, где тангенциальные напряжения равны нулю.

Гипотеза плоских сечений соблюдается на практике при упругих и малых упруго-пластических деформациях; при больших пластических деформациях плоские сечения несколько искажаются, однако для технических расчетов этим можно пренебречь, и с некоторой погрешностью гипотеза плоских сечений может быть принята и для этого случая.

Гипотеза плоских сечений позволяет легко установить распределение тангенциальных деформаций по высоте сечения. Для любого волокна, характеризуемого радиусом ρ (см. рис. 3.2), относительная тангенциальная деформация ε_θ растяжения определяется по формуле

$$\varepsilon_\theta = \frac{\rho - R_0}{R_0} = \frac{x}{R_0}. \quad (3.1)$$

Это означает, что деформация волокон пропорциональна их расстоянию от нейтрального слоя и обратно пропорциональна радиусу его кривизны. Максимальные деформации будут на внешних волокнах, как наиболее удаленных от нейтрального слоя, и если нейтральный слой совпадает со срединной поверхностью, то

$$\varepsilon_{\theta \max} = \frac{s}{2R_0} = \frac{1}{2\bar{R}_0}, \quad (3.2)$$

где $\bar{R}_0 = \frac{R_0}{s}$; R_0 — обычно называют относительным радиусом изгиба.

В теории пластического изгиба различают гибку моментом и гибку усилием. Гибка моментом является несколько идеализированной схемой, однако на примере этой упрощенной схемы нагляднее усваивается сущность и закономерности операции. При гибке моментом предполагается, что вдоль всего очага деформаций действует изгибающий момент M одного значения, определяющий везде постоянную кривизну. При гибке усилием такое условие не соблюдается; во всех схемах гибки, показанных на рис. 3.1, вдоль заготовки действует неодинаковый изгибающий момент, что обуславливает также неравномерную кривизну. Различают также: гибку широкой и гибку узкой полос, различают их схемы напряженного состояния. При гибке широкой полосы вдоль линии изгиба отсутствуют деформации и имеют место напряжения, в то время как при гибке узкой полосы вдоль линии изгиба, наоборот, отсутствуют напряжения и имеют место деформации.

На рис. 3.3 показаны схемы напряженного и деформированного состояний заготовки в очаге деформации при гибке по малому радиусу. При значительной кривизне очага деформаций наряду с тангенциальными напряжениями σ_θ и деформациями ε_θ возникают радиальные напряжения σ_r и деформации ε_r вследствие надавливания изогнутых волокон друг на друга, а также аксиальные напряжения σ_z , обуславливаемые стесненностью деформаций вдоль линии гибки широкой заготовки.

Как видно из схемы, при указанных условиях в очаге деформаций возникает объемное напряженное и плоское деформированное состояние. При изгибе моментом указанные напряжения принимаются главными, так как в данном случае отсутствуют перерезывающие силы.

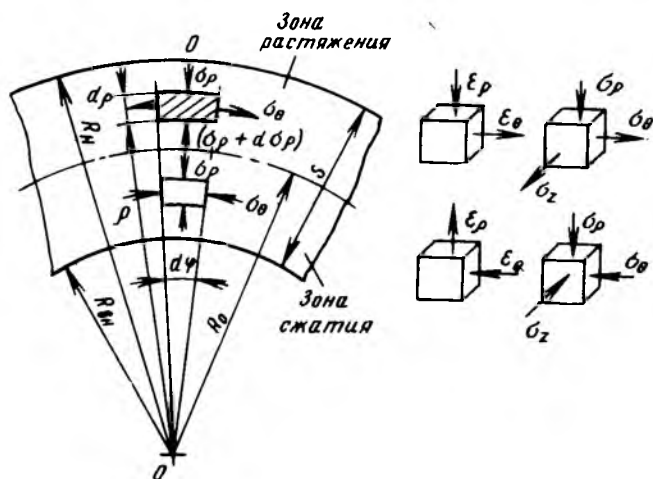


Рис. 3.3. Схема напряженного и деформированного состояния заготовки при гибке моментом

Распределение напряжений по очагу деформаций может быть приближенно установлено путем совместного решения уравнений равновесия и уравнений пластичности.

Уравнение равновесия для заштрихованного элемента в растянутой зоне (см. рис. 3.3) получим, проецируя действующие на него силы на радиус OO и приравнявая их сумму нулю. Уравнение имеет вид

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0. \quad (3.3)$$

Уравнение пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений с учетом того, что напряжения σ_ρ и σ_θ являются крайними главными напряжениями, имеет вид

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s. \quad (3.4)$$

Подстановка значения σ_θ из уравнения (3.4) в уравнение (3.3) с учетом знаков напряжений дает:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \frac{\sigma_s}{\rho} &= 0 \\ \text{откуда } d\sigma_\rho &= \sigma_s \frac{d\rho}{\rho}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

После интегрирования получим:

$$\sigma_\rho = \sigma_s \ln \rho + C. \quad (3.6)$$

Постоянная C интегрирования определяется из условия: если $\rho = R_n$, то $\sigma_\rho = 0$, т. е.

$$C = -\sigma_s \ln R_n.$$

Тогда радиальные напряжения определяются уравнением

$$\sigma_r = -\sigma_s \ln \frac{R_n}{\rho}. \quad (3.7)$$

Подставляя значение σ_θ в уравнение пластичности, получим выражение для определения σ_θ :

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_n}{\rho} \right). \quad (3.8)$$

Среднее главное напряжение σ_z для плоскодеформированного состояния будет определяться выражением

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2}.$$

Аналогичным образом определяются уравнения для σ_ρ и σ_θ в сжатой зоне:

$$\sigma_r = -\sigma_s \ln \frac{\rho}{R_{вн}}; \quad (3.9)$$

$$\sigma_\theta = -\sigma_s \left(1 + \ln \frac{\rho}{R_{вн}} \right). \quad (3.10)$$

Мы исходим из предпосылки, что по всей высоте сечения заготовки выполняется условие пластичности (3.4), т. е. по всему сечению металл деформируется пластически или по крайней мере упругодеформированные волокна в зоне, близко прилегающей к нейтральному слою, занимают небольшой объем, и это не может внести большой ошибки в расчеты. Не учитывалось также изменение положения нейтрального слоя и переход волокон близ нейтрального слоя из зоны сжатия в зону растяжения. Выведенные уравнения не учитывают упрочнения, с ростом деформаций напряжения не возрастают и везде остаются равными пределу текучести. Чтобы учесть упрочнение металла, нужно принять уравнение пластичности (3.4) в иной форме, с учетом упрочнения, и снова решать его совместно с уравнением равновесия при тех же граничных условиях.

Уравнение пластичности с учетом упрочнения (Π — модуль упрочнения) можно записать так:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \sigma_s' + \Pi \epsilon_\theta. \quad (3.11)$$

При гибке деформация в любом волокне определяется уравнением (3.1), и тогда уравнение пластичности переписется в следующем виде:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \sigma_s' + \Pi \frac{\rho - R_0}{R_0}. \quad (3.12)$$

Чтобы определить σ_r и σ_θ следует решить уравнение (3.12) совместно с уравнением (3.3).

Из анализа уравнений (3.7) ... (3.10) следует, что радиальные напряжения σ_ρ на внешних растянутых ($\rho = R_n$) и на внешних сжа-

тых ($q=R_{вн}$) слоях равны нулю. Максимальное значение они принимают на нейтральном слое, когда $q=R_0$.

Характер распределения тангенциальных напряжений σ_θ в растянутой и сжатой зонах различен. По высоте растянутой зоны σ_θ изменяются от минимального значения на нейтральном слое, когда $q=R_0$ [см. уравнение (3.8)] до σ_s на внешнем слое, когда $q=R_{вн}$. В сжатой зоне — наоборот: на нейтральном слое, когда $q=R_0$ σ_θ имеет максимальное значение, а на внешнем слое — минимальное и равное σ_s .

Характер распределения напряжений будет несколько отличен, если учесть упрочнение.

Если отношения радиусов $R_{вн}/q$ и $q/R_{вн}$ приближаются к единице, то напряжения σ_q в растянутой и сжатой зонах приближаются к нулю, и тогда в сечении заготовки остаются только тангенциальные напряжения σ_θ . Это может быть в том случае, когда радиус изгиба велик в сравнении с толщиной заготовки. Расчеты показывают, что $\sigma_q = 0,13\sigma_s$ при $R_{вн}=3s$, поэтому с незначительной ошибкой для $R_{вн}/s > 3$ можно принять схему напряженного состояния линейной и определять силовые и другие параметры процесса из этого условия. Тогда на основании уравнений (3.8) и (3.10) напряжения по сечению заготовки соответственно в растянутой и сжатой зонах будут равны:

$$\sigma_\theta = \sigma_s'; \quad -\sigma_\theta = \sigma_s \quad (3.13)$$

или, принимая во внимание (3.12), с учетом упрочнения

$$\sigma_\theta = \sigma_s' + \Pi \frac{\rho - R_0}{R_0}; \quad \sigma_\theta = -\left(\sigma_s' + \Pi \frac{R_0 - \rho}{R_0}\right). \quad (3.14)$$

На рис. 3.4 показано распределение напряжений по высоте изогнутой заготовки в соответствии с установленными уравнениями. Легко видеть, что при объемной схеме напряженного состояния (рис. 3.4, а) в растянутой зоне по всей высоте сечения напряжения σ_θ — меньше предела текучести, а в сжатой зоне, наоборот, больше предела текучести. Такое соотношение напряжений обуславливает смещение нейтрального слоя от срединной поверхности в сторону сжатой зоны (к центру кривизны), в результате чего растяжение будет действовать на большей части сечения, чем сжатие, так как только в этом случае будет выполняться условие равновесия и сумма сил выше нейтрального слоя будет равна сумме сил — ниже него. Смещение нейтрального слоя от срединной поверхности подтверждается опытами по гибке при малых радиусах из-

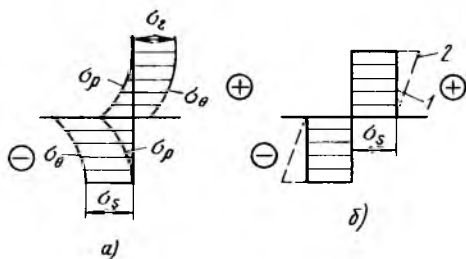


Рис. 3.4. Распределение напряжений при гибке:

а—при объемном напряженном состоянии без упрочнения; б—при линейном напряженном состоянии без упрочнения (1) и с упрочнением (2)

гиба и положение его можно определить аналитическим путем.

Уравнения (3.7) и (3.9) устанавливают распределение радиальных напряжений по высоте сечения в растянутой и сжатой зонах. На границах этих зон, то есть на нейтральном слое, напряжения σ_0 , определенные как по уравнению (3.7), так и по уравнению (3.9), должны быть одинаковыми. Из этого и можно определить положение нейтрального слоя (R_0).

Подставим в указанные уравнения R_0 вместо q , приравняем их и, решив относительно R_0 , получим:

$$R_0 = \sqrt{R_{\text{вн}} R_{\text{н}}} \quad (3.15)$$

Если учесть, что радиус $R_{\text{ср}}$ срединного слоя определяется выражением $R_{\text{ср}} = \frac{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}}{2}$, а $R_{\text{н}} = R_{\text{вн}} + s$, то при помощи уравнения (3.15) можно дать оценку относительного смещения нейтрального слоя от срединной поверхности в зависимости от относительного радиуса $R_{\text{вн}}$ изгиба.

С учетом приведенных значений $R_{\text{ср}}$ и $R_{\text{н}}$ из выражения (3.15) можно получить выражение для расчета относительного смещения нейтрального слоя от срединного:

$$c = \frac{R_{\text{ср}} - R_0}{s} = 0,5 + \frac{R_{\text{вн}}}{s} - \sqrt{\frac{R_{\text{вн}}^2}{s^2} + \frac{R_{\text{вн}}}{s}}. \quad (3.16)$$

При гибке по малым радиусам растяжению подвергается большая часть сечения заготовки, а меньшая — сжатию. Это обуславливает некоторое уменьшение конечной толщины заготовки.

Кривизна очага деформаций заготовки в процессе гибки изменяется от нуля в начальный момент до конечной — в конце процесса. Следовательно, в соответствии с уравнением (3.16) положение нейтрального слоя с изменением кривизны будет также изменяться: в начальный момент, при малой кривизне, $R_0 = R_{\text{ср}}$, а в конце процесса $R_0 = R_{\text{ср}} - cs$. Это означает, что волокна вблизи срединного слоя меняют знак деформаций: вначале они находились в зоне сжатия, а затем переходят в зону растяжения. Поэтому участок в средней по толщине части заготовки от $R_{\text{ср}}$ до $R_{\text{ср}} - cs$ находится в условиях немонотонной деформации, и для него проведенный анализ напряженного и деформированного состояния (без учета эффекта Баушингера) является лишь приближенным. Однако в технических расчетах это допустимо, так как толщина слоя немонотонной деформации незначительна.

Отметим особенности гибки поперечным усилием (рис. 3.5). В данном случае кроме изгибающего момента в очаге деформаций действуют перерезывающие силы, которые обуславливают появление касательных напряжений в радиальном направлении. Изгибающий момент $M_{\text{в}}$, а следовательно и кривизна $1/R_0$ в очаге деформаций (участок заготовки между опорами) распределены неравномерно: вблизи опор значение их минимально, а в центральной

части, где действует сосредоточенная сила P , — максимально. Вблизи опор момент мало-го значения изгибает заготовку лишь упруго, кривизна здесь тоже мала; в зоне приложения силы P кривизна имеет большее значение, и здесь возникают пластические деформации и остаточная кривизна. Процесс деформирования — нестационарный, в каждый данный момент эпюры сил, моментов и кривизны изменяются, по ходу процесса увеличивается сила P , увеличиваются моменты и кривизна, увеличивается участок пластического изгиба и сокращается участок упругого изгиба. В конечной стадии процесса, при достижении заготовкой требуемой кривизны и угла изгиба параметры процесса достигают экстремального значения; они и подлежат определению.

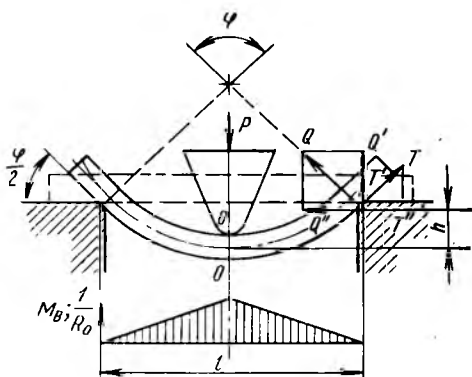


Рис. 3.5. Распределение сил, моментов и кривизны по очагу деформаций при гибке поперечной силой

Далее на основе общих положений о пластическом изгибе решаются задачи по расчету параметров процесса, знание которых необходимо при проектировании технологических процессов: сил, моментов, пружинения, минимального радиуса, длины заготовки. Ввиду того, что большинство авиационных материалов подвергаются гибке по радиусам, равным трем толщинам заготовки, произведем расчеты указанных параметров исходя из схемы линейного напряженного состояния металла в очаге деформаций и совпадения нейтрального слоя со срединным слоем. Это, естественно, будут приближенные решения, однако для технических расчетов они могут быть приемлемы. Кроме того, как следует из уравнений (3.9) и (3.16), при радиусе изгиба $R_0 > 5s$ радиальное напряжение σ не превышает 10% от σ_s , а смещение радиуса нейтрального слоя от срединного составляет меньше одного процента от толщины заготовки. Поэтому принятые допущения для случаев гибки по большому радиусу являются более обоснованными.

3.3. РАСЧЕТ УСИЛИЙ ПРИ ГИБКЕ

В технологических схемах гибки, представленных на рис. 3.1, кривизна заготовки образуется вследствие действия силы P , создающей внешний изгибающий момент M_B . Значение момента внешней силы P в разных сечениях зависит от их расстояния от опор; по длине очага деформаций M_B является переменным (см. рис. 3.5).

Внешняя сила P , по значению которой подбирается технологическое оборудование, определяется из равенства момента M_B внешней силы P для сечения с наибольшей кривизной моменту $M_{вн}$ внут-

ренных сил, действующих в том же сечении. В качестве расчетной примем схему свободной гибки заготовки, лежащей на матрице, выполненной в виде двух опор (см. рис. 3.5). Сила P , подлежащая определению, вызывает силы реакции на опорах штампа, а перемещение заготовки на опоре обуславливает появление силы трения T :

$$T = \mu Q, \quad (3.17)$$

где μ — коэффициент трения.

Система внешних сил создает внешний изгибающий момент M_b , распределение которого вдоль оси заготовки показано на рис. 3.5; пропорционально моменту будет и распределение значений кривизны заготовки в промежутке между опорами.

Определим максимальное значение изгибающего момента внешних сил, соответствующее сечению, расположенному в плоскости симметрии штампа.

В каждой промежуточной стадии гибки, характеризуемой углом φ , для сечения OO изгибающий момент сложится из моментов вертикальных и горизонтальных составляющих сил Q и T :

$$M_b = (Q' + T') \frac{l}{2} + (Q'' - T'') h. \quad (3.18)$$

Величина прогиба h может быть определена для каждого момента гибки исходя из геометрических соображений, если известен угол φ изгиба.

Также из геометрических соображений и с учетом выражения (3.17) определяются следующие соотношения:

$$Q' = Q \cos(\varphi/2); \quad Q'' = Q \sin(\varphi/2); \quad (3.19)$$

$$T' = \mu Q \sin(\varphi/2); \quad T'' = \mu Q \cos(\varphi/2).$$

Из условий равновесия можно записать:

$$P = 2(Q' + T') = 2Q [\cos(\varphi/2) + \mu \sin(\varphi/2)],$$

$$\text{откуда } Q = \frac{P}{2(\cos \varphi/2 + \mu \sin \varphi/2)}. \quad (3.20)$$

Подставляя значение Q в уравнения (3.19), а затем уравнения (3.19) — в (3.18), получаем значение момента:

$$M_b = P \left[\frac{l}{4} + \frac{h}{2} \frac{\sin(\varphi/2) - \mu \cos(\varphi/2)}{\cos(\varphi/2) + \mu \sin(\varphi/2)} \right]. \quad (3.21)$$

Значение внешнего момента может быть определено, в зависимости от необходимости, с различной степенью точности. Например, если не учитывать трение ($\mu = 0$), то уравнение (3.21) примет более простой вид:

$$M_b = \frac{P}{2} \left[\frac{l}{2} + h \operatorname{tg}(\varphi/2) \right]. \quad (3.22)$$

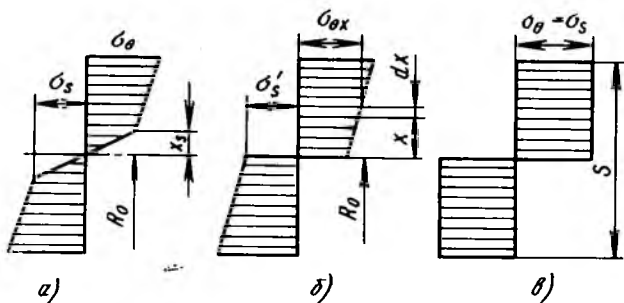


Рис. 3.6. Распределение тангенциальных напряжений σ_θ по высоте сечения изгибаемой заготовки:

а—при упруго-пластическом изгибе с упрочнением; б—то же без упругой зоны; в—при пластическом изгибе без упрочнения

Приближенно значение M_B может быть определено для начальной стадии гибки ($\varphi=0$); тогда из уравнения (3.22) получаем формулу, известную из курса сопротивления материалов:

$$M_B = Pl/4. \quad (3.23)$$

Далее определим момент внутренних сил в рассматриваемом сечении. Для этого необходимо задаться законом распределения нормальных напряжений σ_θ по высоте сечения. На рис. 3.6 показаны упрощенные эпюры распределения по высоте сечения напряжений σ_θ для различных случаев гибки.

Упруго-пластическое деформирование возникает при гибке по большому радиусу в холодном состоянии, когда деформации, определяемые уравнением (3.1), невелики и упруго-деформированные волокна около нейтрального слоя занимают определенную высоту. При малых радиусах изгиба ($R_0 \leq 3s$) высота упруго-деформированного слоя $|x_s|$ мала, можно ею пренебречь и считать, что по всей высоте заготовки металл деформируется пластически, т. е. реализуется распределение напряжений σ_θ , соответствующее эпюре рис. 3.6, б.

Распределение напряжений, показанное на рис. 3.6, в, может иметь место при горячем деформировании, когда с ростом деформации напряжения σ_θ остаются постоянными и равными пределу текучести σ_s .

Каждому из приведенных случаев деформирования соответствует определенная диаграмма связи напряжений с деформациями, показанная на рис. 3.6.

Определим момент $M_{вн}$ внутренних сил для чисто пластического изгиба с упрочнением (см. рис. 3.6, б).

В общем случае значение элементарного момента сил в обозначениях рис. 3.6, б выражается уравнением

$$dM_{вн} = \sigma_{\theta x} B x dx, \quad (3.24)$$

где B — ширина изгибаемой заготовки. Произведение $B dx$ — пред-

ставляет элементарную площадь, на которой действуют напряжения $\sigma_{\theta x}$.

Напряжение $\sigma_{\theta x}$ для любого значения x при линейном законе упрочнения может быть определено так:

$$\sigma_x = \sigma_s' + \Pi \frac{x}{R_0}. \quad (3.25)$$

Значение напряжения на нейтральном слое равно экстраполированному пределу текучести σ_s' , а приращение напряжения выражается произведением модуля упрочнения Π и деформации в рассматриваемом волокне, значение которой определяется уравнением (3.1). С учетом этого, уравнение (3.24) примет вид:

$$dM_{\text{вн}} = \left(\sigma_s' + \Pi \frac{x}{R_0} \right) Bx dx. \quad (3.26)$$

Силы, расположенные выше и ниже нейтрального слоя, создают моменты одного направления, поэтому

$$M_{\text{вн}} = 2\sigma_s' \int_0^{s/2} Bx dx + \frac{2\Pi}{R_0} \int_0^{s/2} Bx^2 dx. \quad (3.27)$$

Первый удвоенный интеграл представляет собой статический момент инерции, а удвоенный второй интеграл — момент инерции прямоугольного сечения. После интегрирования получим:

$$M_{\text{вн}} = \sigma_s' \frac{Bs^2}{4} + \frac{\Pi}{R_0} \frac{Bs^3}{12} \quad (3.28)$$

$$\text{или } M_{\text{вн}} = \sigma_s' S + \frac{\Pi}{R_0} J, \quad (3.29)$$

где S и J — соответственно, статический момент и момент инерции сечения.

Для деформирования при отсутствии упрочнения ($\Pi=0$) уравнение (3.28) упрощается:

$$M_{\text{вн}} = \sigma_s' \frac{Bs^2}{4}. \quad (3.30)$$

Для определения усилия необходимо приравнять моменты внешних и внутренних сил. Для общего случая справедливо принять уравнения (3.21) и (3.28). Получим

$$P = \frac{\sigma_s' \frac{Bs^2}{4} + \frac{\Pi}{R_0} \frac{Bs^3}{12}}{\frac{l}{4} + \frac{h}{2} \frac{\operatorname{tg}(\varphi/2) - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg}(\varphi/2)}}. \quad (3.31)$$

Как показывают опыты, максимальное значение усилия при величине расстояния между опорами $l = (6 \dots 12)$ наблюдается в диапазоне углов изгиба $\varphi = 30 \dots 60^\circ$.

Для ориентировочных расчетов можно определить усилие для начального момента гибки ($\varphi=0$) без учета сил трения ($\mu=0$) и упрочнения ($P=0$). Тогда

$$P = \sigma_s' \frac{Bs^2}{l}. \quad (3.32)$$

Во всех других случаях гибки сосредоточенной силой (рис. 3.1) сохраняется основное условие равенства внешнего и внутреннего моментов и разница будет заключаться лишь в определении плеча внешнего усилия. Если производится гибка П-образных по сечению деталей, имеющих две линии перегиба, усилие гибки соответственно удваивается. В том случае, когда наряду с гибкой производится правка детали (см. рис. 3.1, б) и по времени эта правка не совпадает с гибкой, то усилие определяется произведением площади заготовки, подвергаемой правке, и необходимого давления, которое для пластичных легких сплавов может быть равным 30...50 МПа, а для высокопрочных сталей 350 МПа и более.

3.4. ПРУЖИНЕНИЕ ПРИ ГИБКЕ

Как известно пластическая деформация сопровождается упругой. Значение упругой деформации, в сравнении с пластической, в большинстве случаев невелико, однако она существенно искажает форму деталей после снятия внешних сил.

В отличие от пластической (остаточной) деформации, упругая деформация исчезает. Она связана с изменением объема металла при действии внешних нагрузок. Если после деформации в изделии не сохраняются остаточные деформации, то после разгрузки объем восстанавливается, а упругая деформация полностью снимается. Явление упругого восстановления сопровождается любой случай пластического деформирования с отличием лишь в количественных отношениях; при гибке проявление его наиболее наглядно. Физическую сторону пружинения можно пояснить рассмотрением деформирования растяжением.

На рис. 3.7, а представлена диаграмма растяжения, на которой показана связь между напряжениями и деформациями не только во время нагрузки, но и при разгрузке. Ломаная линия 1 соответствует стадии нагружения, активной стадии, здесь участок ОА отражает закономерность упругой деформации, а участок АВ — пластической деформации. Прямая 2 соответствует стадии разгрузки, пассивной стадии деформирования; она параллельна прямой ОА упругой части диаграммы нагружения и если производится полная разгрузка, то пересечение ее с осью деформаций разделяет общую истинную деформацию ϵ_n на остаточную $\epsilon_{ост}$ и упругую ϵ_y , которая исчезает при разгрузке. Как видно из диаграммы, на стадии разгрузки не происходит пластической деформации и упругая деформация ϵ_y может быть рассчитана по закону Гука. Тогда:

$$\epsilon_n = \epsilon_{ост} + \epsilon_y = \epsilon_{ост} + \sigma_1/E. \quad (3.33)$$

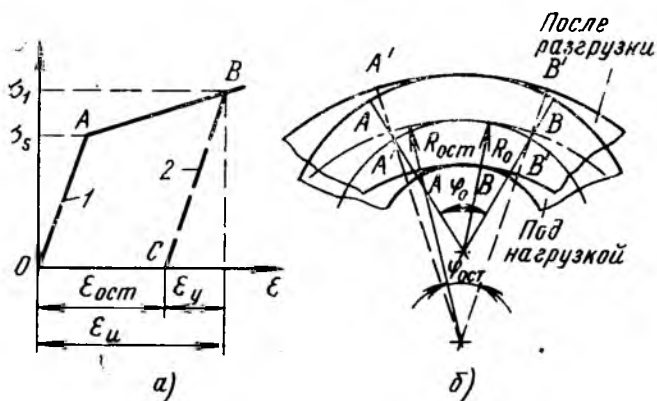


Рис. 3.7. Пружинение после снятия внешних нагрузок:
а—при растяжении; б—при изгибе

Следовательно, остаточную деформацию можно рассчитать, если известна общая деформация $\epsilon_{\text{и}}$ (она может быть замерена в конце стадии нагружения) и известно напряжение σ_1 , создаваемое внешней нагрузкой в конце нагружения. Упругие деформации при разгрузке всегда имеют знак, обратный деформациям стадии нагружения, длина образца $l_{\text{ост}}$ после пружинения становится меньше длины $l_{\text{и}}$ в конце действия нагрузки и равна $l_{\text{ост}} = l_{\text{и}}(1 - \epsilon_{\text{у}})$.

Теперь покажем, как влияет пружинение на форму изогнутых деталей. Обозначим радиус нейтрального слоя детали под нагрузкой через R_0 , остаточный радиус через $R_{\text{ост}}$; те же индексы примем и для углов φ изгиба.

На рис. 3.7, б иллюстрируется действие упругих деформаций на изогнутую деталь. Сечения AA и BB разворачиваются под их действием в положение $A'A'$ и $B'B'$ вследствие того, что в растянутой зоне упругие деформации уменьшают длину волокон, а в сжатой — увеличивают. Изменение длины волокон выше и ниже нейтрального слоя приводит к изменению радиуса R_0 и угла изгиба φ_0 , достигнутых под действием внешнего момента. Остаточный радиус $R_{\text{ост}} > R_0$, а остаточный угол $\varphi_{\text{ост}} < \varphi_0$.

При гибке деформированное состояние характеризуется кривизной нейтрального слоя, которая определяется величиной момента. Тогда по аналогии с (3.33) и в соответствии с теоремой о разгрузке [14] можно записать

$$\frac{1}{R_{\text{ост}}} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{\text{у}}}. \quad (3.34)$$

Здесь, как и при растяжении, остаточная кривизна детали определяется разностью кривизны $1/R_0$ под нагрузкой, вызванной внешним изгибающим моментом, и кривизны $1/R_{\text{у}}$ (упругой), вызванной моментом того же значения, но в предположении, что деформирование происходит в упругой зоне. Судя по диаграмме

рис. 3.7, а, напряжение σ_1 вызывает пластическую деформацию, однако для определения упругой деформации ε_y мы приняли закон Гука, предположив, что напряжение σ_1 вызывает лишь упругие деформации.

Остаточная кривизна $1/R_{\text{ост}}$ нейтрального слоя может быть легко определена, если мы знаем связь между кривизной и изгибающим моментом в стадии упругого деформирования. Приближенно эту связь можно представить так [24]:

$$\frac{1}{R_y} = \frac{M}{EJ}, \quad (3.35)$$

где $J = \frac{Bs^3}{12}$ — момент инерции сечения заготовки; B и s — ширина и толщина заготовки.

С учетом уравнения (3.35) уравнение (3.34) примет вид:

$$\frac{1}{R_{\text{ост}}} = \frac{1}{R_0} - \frac{M_n}{EJ} \quad (3.36)$$

или, если решать его относительно остаточного радиуса кривизны

$$R_{\text{ост}} = \frac{R_0}{1 - M_n R_0 / (EJ)}. \quad (3.37)$$

Зная остаточный радиус, можно определить остаточный угол $\varphi_{\text{ост}}$ изгиба приближенно, исходя из условия, что длина нейтрального волокна при разгрузке остается постоянной:

$$R_0 \varphi_0 = R_{\text{ост}} \varphi_{\text{ост}}. \quad (3.38)$$

Разница между остаточным углом изгиба и начальным углом называется углом пружинения,

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_{\text{ост}}. \quad (3.39)$$

Из (3.38) определяется угол $\varphi_{\text{ост}}$, а из (3.37) — $R_{\text{ост}}$; с учетом этого

$$\Delta\varphi = \varphi_0 \left(1 - \frac{R_0}{R_{\text{ост}}} \right) = \varphi_0 \frac{M_n R_0}{EJ}. \quad (3.40)$$

Момент может быть принят для пластического изгиба в соответствии с уравнением (3.28), имея в виду, что $M_n = M_{\text{вн}}$.

Из уравнений (3.37) и (3.40) видно, что для данных конкретных условий гибки (известны R_0 , φ_0 , E , J) значения остаточного радиуса и угла пружинения, определяются значением момента: чем меньше момент, тем меньше изменяются геометрические размеры деталей после разгрузки. Это и определяет пути повышения точности процесса гибки, предусматривающие приближение $R_{\text{ост}}$ к R_0 , а $\Delta\varphi$ — к нулю.

Идеальная точность характеризуется соотношениями: $R_{\text{ост}} = R_0$ и $\Delta\varphi = 0$. Наоборот, абсолютно неточный процесс гибки характеризуется соотношениями $R_{\text{ост}} = \infty$ и $\Delta\varphi = \varphi_0$, когда гибка происходит в упругой зоне и остаточные деформации вообще отсутствуют; гра-

ницу упругого изгиба, как следует из уравнений (3.37) и (3.40), определяет соотношение $M_B R_0 / EJ = 1$.

Эффективным средством повышения точности гибки является уменьшение значения изгибающего момента за счет уменьшения σ_s и Π . Так, гибка заготовок не в закаленном, а в отожженном или свежезакаленном состоянии может существенно уменьшить пружинение. Еще более точной будет гибка при деформировании заготовки в нагретом состоянии, когда резко уменьшается σ_s , а $\Pi = 0$; тогда момент определяется уравнением (3.30), а подстановка его в уравнения (3.37) и (3.40) дает:

$$R_{\text{ост}} = \frac{R_0}{1 - 3 \frac{\sigma_s}{E} \frac{R_0}{s}}; \quad (3.41)$$

$$\Delta\varphi = 3\varphi_0 \frac{\sigma_s}{E} \frac{R_0}{s}. \quad (3.42)$$

Расчеты и эксперименты показывают, что угол пружинения может колебаться, в зависимости от конкретного случая, от нескольких до десяти и более градусов. Пружинение увеличивается с увеличением относительного радиуса изгиба. Для деформирования без упрочнения полностью упругий изгиб наступает, как следует из уравнения (3.41) и (3.42), при условии, когда $3 \frac{\sigma_s}{E} \frac{R_0}{s} = 1$.

Знание величины пружинения дает возможность проектировать оснастку с учетом упругой деформации. Так, угол на штампе должен быть равен $\varphi_{\text{дет}} + \Delta\varphi$ ($\varphi_{\text{дет}}$ — угол изгиба детали), а радиус изгиба (R_0) при заданном радиусе детали $R_{\text{дет}}$ определяется как

$$R_0 = \frac{R_{\text{дет}}}{1 + R_{\text{дет}} M_B / (EJ)}. \quad (3.43)$$

Значение радиусов везде дано по срединной поверхности; внутренний радиус $R_{\text{вн}}$ изгиба, по которому делается пуансон, равен $R_{\text{вн}} = R_0 - s/2$.

Сделанный анализ справедлив для свободного изгиба (см. 3.1, а, в, г). Для изгиба с чеканкой (см. рис. 3.1, б) механизм деформирования значительно сложнее. Пружинение в очаге деформаций в данном случае алгебраически складывается с пружинением концевых участков заготовки, поэтому итоговый эффект пружинения зависит от глубины матрицы, от давления чеканки. Как правило угол пружинения при гибке с чеканкой меньше, чем при свободной гибке, а в некоторых случаях может быть равным нулю или иметь отрицательный знак, т. е. после разгрузки угол изгиба может не уменьшаться, а, наоборот, увеличиваться.

Приведенные выше уравнения не всегда обеспечивают точное совпадение расчетных и опытных данных. Это объясняется тем, что действительная схема деформирования сложнее, чем принятая нами; на результаты расчетов влияют также несовпадение нейтрального слоя деформаций и напряжений, неполная разгрузка в

центральных слоях заготовки, колебания механических характеристик заготовок (σ_s , Π), отклонения толщины от номинального размера, изменение условий трения, размеры концевых участков и другие несоответствия принятой схемы действительным условиям протекания операции. Более точные решения даны в работах [34, 21].

3.5. МИНИМАЛЬНЫЙ РАДИУС ГИБКИ

Опыт показывает, что для листовых заготовок степень деформаций при гибке ограничивается предельными степенями деформаций растяжения. При чрезмерно больших деформациях на выпуклой стороне детали образуется трещина. Здесь имеет место максимальное растягивающее растяжение, а радиальное сжатие равно нулю (см. рис. 3.4, а), т. е. наименее благоприятная схема для пластического деформирования. Следовательно, если в уравнении (3.2) положить $\epsilon_{\theta \max} = \epsilon_{\text{доп}}$ ($\epsilon_{\text{доп}}$ — предельно допустимая деформация), то относительный радиус будет иметь минимально допустимое значение, т. е. $R_0 = R_{0 \min}$. Из того же уравнения получаем:

$$\bar{R}_{0 \min} = \frac{R_{0 \min}}{s} = 1/(2\epsilon_{\text{доп}}). \quad (3.44)$$

При конструировании листовых деталей конструктору всегда выгодно иметь радиус изгиба как можно меньшего значения, так как при этом деталь будет иметь больший момент инерции и, следовательно, большую жесткость. Поэтому определение минимально возможного радиуса изгиба, гарантирующего доброкачественность деталей и отсутствие в них трещин, является весьма важным и нужным для производства моментом расчета технологических параметров, особенно при внедрении новых материалов.

Сложность определения $R_{0 \min}$ вызывается неясностью в определении допустимой деформации $\epsilon_{\text{доп}}$ растяжения. При малых радиусах изгиба деформация на выпуклой стороне превосходит равномерную деформацию δ_r , выявляемую при испытаниях на растяжение: к δ_r присоединяется сосредоточенная деформация, т. е. в этой опасной зоне возникает некоторое подобие шейки. При таких условиях деформирования вполне обоснованно можно принять за допустимую деформацию растяжения деформацию, соответствующую максимальному сужению ψ в шейке в момент разрыва образца при испытании на растяжение [31]. Тогда, учитывая известную связь между деформацией растяжения в направлении действия силы и сужением ψ образца, можно записать:

$$\epsilon_{\text{доп}} = \psi / (1 - \psi). \quad (3.45)$$

Подставляя значение $\epsilon_{\text{доп}}$ в (3.44), получим:

$$\left(\frac{R_0}{s} \right)_{\min} = \frac{1 - \psi}{2\psi} \quad \text{или} \quad \left(\frac{R_{\text{нн}}}{s} \right)_{\min} = \frac{1 - 2\psi}{2\psi}. \quad (3.46)$$

Из уравнения (3.46) можно определить минимальные значения внутреннего радиуса. Для малопластичных металлов ($\psi = 0,1$)

$R_{\text{вн min}}=4s$; для среднепластичных ($\psi=0,2$) $R_{\text{вн min}}=1,5s$; для высокопластичных металлов ($\psi=0,3$) $R_{\text{вн min}}=0,66s$.

Приведенный метод определения $R_{0 \text{ min}}$ носит приближенный характер, в нем не учитываются многие факторы, влияющие на процесс гибки. Например, на $R_{0 \text{ min}}$ оказывает влияние ориентация направления прокатки листа по отношению линии изгиба. Наименьший радиус гибки достигается при таком раскрое заготовок, когда линия изгиба перпендикулярна направлению проката. Наличие неровностей и заусенцев в зоне растяжения обуславливает преждевременную концентрацию деформаций и уменьшает технологические возможности гибки, поэтому зачистка кромок может существенно увеличить допускаемые деформации при гибке. С увеличением угла изгиба $R_{0 \text{ min}}$ увеличивается.

Расчет минимального радиуса изгиба относится к сложным задачам по определению штампуемости металла или предельного состояния в момент перехода пластического деформирования к разрушению. Критерии штампуемости основываются на предположении, что деформирование происходит без разрушения, если накопленная в ходе процесса деформирования интенсивность деформаций не достигает некоторой предельной деформации, зависящей от вида материала, от вида напряженного состояния (жесткости схемы), от температурно-скоростных условий.

Значения минимальных радиусов изгиба для наиболее распространенных конструкционных материалов приведены в справочниках, а также ведомственных нормалях и руководящих технических материалах. Так для отожженного алюминиевого сплава Д16АМ $R_{\text{вн}}=(1,5 \dots 2,0)s$, для закаленного $R_{\text{вн}}=(3 \dots 4)s$; для стали 1Х18Н9Т $R_{\text{вн}}=s$; для титанового сплава ВТ1 при температуре нагрева $300 \dots 400^\circ \text{C}$ $R_{\text{вн}}=(1,5 \dots 2,0)s$, для титанового сплава ВТ5 при той же температуре $R_{\text{вн}}=(3 \dots 4)s$.

3.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ РАЗВЕРТКИ

Длина заготовки для изогнутых деталей определяется как развертка по нейтральному слою, радиус изгиба которого R_0 . Пользуясь обозначениями рис. 3.2, длину l развертки детали можно приближенно выразить так:

$$l=2l_1+\varphi R_0. \quad (3.47)$$

Радиус нейтрального слоя можно принять $R_0=\sqrt{R_{\text{вн}}R_{\text{н}}}$, однако для практических расчетов приемлемой является формула

$$l=2l_1+\varphi(R_{\text{вн}}+ks), \quad (3.47a)$$

где k — коэффициент, характеризующий положение нейтрального слоя; φ — угол изгиба в радианах.

При изгибе сосредоточенной силой значение радиуса нейтрального слоя является осредненным, так как вдоль очага деформаций он имеет переменное значение. Поэтому коэффициент k принимает по опытным данным независимо от свойств материала.

Для различных $R_{\text{вн}}$ он имеет следующие приближенные значения:

$R_{\text{вн}}$	0,5s	s	2s	3s	>3s
k	0,38	0,42	0,46	0,47	≈0,5

3.7. СПОСОБЫ ГИБКИ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Выбор способа гибки определяется размерами заготовки, конструкцией и точностью размеров деталей, экономическими соображениями. При разработке технологических процессов необходимо определить: размеры заготовки, усилие гибки (для подбора оборудования), перечень технологической оснастки.

Гибка в штампах — наиболее производительный способ изготовления деталей. Высокой точности деталей можно достигать путем корректировки размеров пуансонов и матриц на величину упругой деформации. Для большого числа деталей изготавливаются специальные штампы, для небольших партий употребляют универсальные штампы.

На рис. 3.8 показан чертеж специального штампа для гибки детали П-образного сечения. Заготовка на штампе фиксируется штифтами 8, а отштампованная деталь выталкивается из матрицы выталкивателем 11, действующим от нижнего буфера (резинового, пружинного или пневматического). Мелкие детали можно штамповать «на провал». Пуансон 7 и матрица 2 устанавливаются на верхней и нижней плитах универсального блока (плиты 1, 5 с направляющими колонками 3) в нужном положении при помощи фиксирующих штифтов и закрепляются болтами.

На рис. 3.9 показана схема комбинированного штампа для совмещенного процесса отрезки или вырубki заготовки и гибки детали также П-образного сечения. При рабочем ходе ползуна вниз заготовка сначала вырубается пуансоном 5 и матрицей 2, после чего ее изгибает уже гибочный пуансон 1 по матрице, находящейся в центральной части вырубного пуансона. Во время гибки вы-

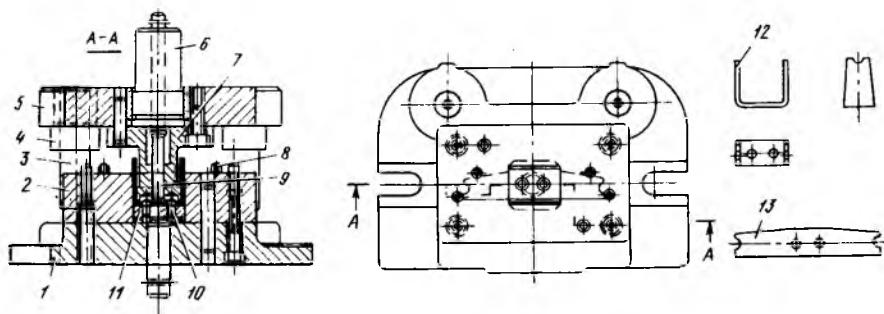


Рис. 3.8. Специальный гибочный штамп:

1—нижняя плита; 2—матрица; 3—направляющие колонки; 4—направляющие втулки; 5—верхняя плита; 6—хвостовик; 7—пуансон; 8, 10—штифты для фиксации заготовки; 9—съемник; 11—выталкиватель; 12—деталь; 13—заготовка

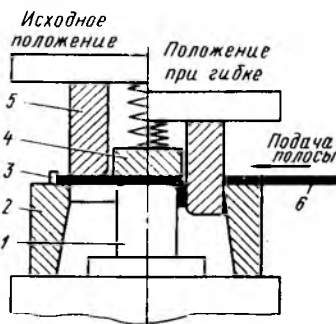


Рис. 3.9. Штамп для совместного процесса вырубki и гибки:

1—пуансон для гибки; 2—матрица для вырубki; 3—упор для полосы; 4—выталкиватель; 5—пуансон для вырубki и матрица для гибки; 6—заготовка (полоса)

талкиватель 4 выполняет роль прижима, предотвращающего прогиб заготовки на торце пуансона 1; при обратном ходе ползуна выталкиватель удаляет изогнутую деталь из матрицы. Фиксация заготовки в нужном положении относительно матрицы производится по упорам 3.

На рис. 3.10, а, б даны универсальные гибочные штампы и показаны этапы изготовления детали с четырьмя перегибами. Для гибки мелких деталей штампы монтируются на плитах универсальных блоков, которые устанавливаются на универсальных прессах. Для изготовления длинных профилей пуансоны и матрицы могут быть длиной в несколько метров, их устанавливают на специализированных гибочных прессах.

Универсальная матрица выполняется в виде призмы, по граням которой расположены пазы разной формы, которые представляют собой отдельные матрицы, отличающиеся друг от друга размерами (b , a и др.). В комплект пуансонов входят пуансоны с разными радиусами r и углами β ; в комплект может входить несколько изогнутых пуансонов. Кроме пуансонов и матриц на универсальном штампе имеется регулируемый упор, при помощи которого заготовка фиксируется в нужном положении.

На рис. 3.10, б показана универсальная гибочная матрица, где роль собственно матрицы выполняет пластмасса (полиуретан), находящаяся в металлическом контейнере 5. В исходном положении плоскую заготовку укладывают на полиуретановую подушку 4. При ходе гибочного пуансона вниз заготовка 7 внедряется в полиуретановую подушку, встречая с ее стороны определенное сопротивление, которое и обеспечивает деформирование листовых заготовки по форме пуансона. Шириной ограничительных пластин 6 можно регулировать давление на заготовку.

В последние годы полиуретан находит все большее применение в штамповочной оснастке [41].

Гибка на валковых станках применяется в самолетостроении для изготовления цилиндрических и конических обшивок и обечаек. Цилиндрические обшивки могут быть на средней части фюзеляжа, в баковых отсеках, конические — в хвостовой части фюзеляжа, на крыльях, на оперении, на баках. Размеры обшивок увеличиваются, в настоящее время доходят до 10 м и более длиной; широкое применение получили монолитные панели, т. е. обшивки с продольными ребрами (стрингерами). Для изготовления обшивок и монолитных панелей спроектировано и изготовлено большое число валковых

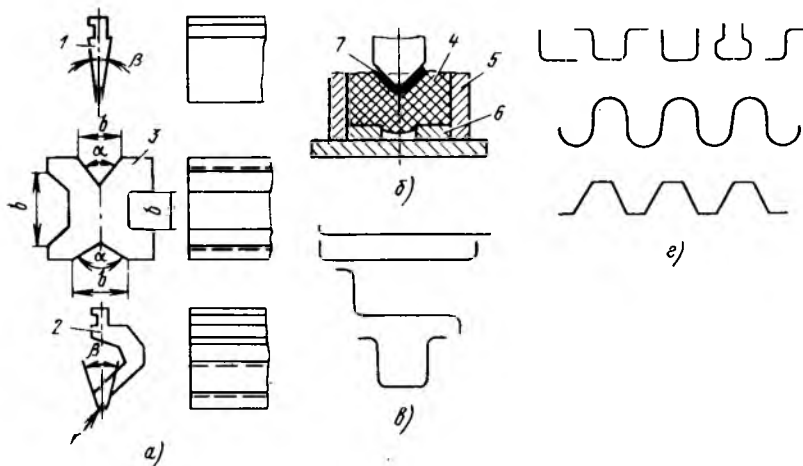


Рис. 3.10. Универсальные гибочные штампы:

а—конструкция пуансонов и матрицы; **б**—конструкция матрицы с полиуретановой подушкой; **в**—последовательность гибки профиля; **г**—профили и гофры, изготавливаемые в универсальных штампах; **1**, **2**—пуансон; **3**—матрица; **4**—полиуретановая подушка; **5**—контейнер; **6**—ограничительные пластины; **7**—заготовка

станков, на которых можно производить прокатку обшивок и монолитных панелей длиной до 12 м.

Валковые машины имеют три рабочих вала, изменение взаимного расположения которых обеспечивает регулирование кривизны изгибаемых заготовок. На рис. 3.11 показаны схемы работы валковых машин, возможные способы регулирования положения валов, а также типы обшивок и обечаек, которые можно изготавливать таким способом. По схеме, показанной на рис. 3.11, *а*, работают станки, у которых верхний вал закреплен на подвижной верхней траверсе (показана пунктиром), перемещающейся от гидравлического привода. На таких станках могут прокатываться обшивки с небольшим углом изгиба (фюзеляжные, крыльевые); кривизна регулируется опусканием или подъемом верхнего вала, а конусность (изменение кривизны по длине) создается установкой верхнего вала под некоторым углом к нижним валам или установкой под некоторым углом друг к другу нижних валов. Заготовка укладывается на нижние валы в то время, когда верхняя траверса поднята; затем траверса опускается, между валами устанавливается нужный размер l_1 , соответствующий заданной кривизне обшивки, после чего валам сообщается вращение и начинается процесс прокатки. Заготовка перемещается силами трения, возникающими на ее поверхности при вращении валов. Если траверса через верхний вал сообщает заготовке давления P , а на опорах возникают реакции Q и Q' , то сила трения, втягивающая заготовку в зону деформаций, будет равна $\mu(P + Q + Q')$, где μ — коэффициент трения.

У станков, взаимное расположение валов которых изменяется опусканием нижних валов под некоторым углом вниз (рис.

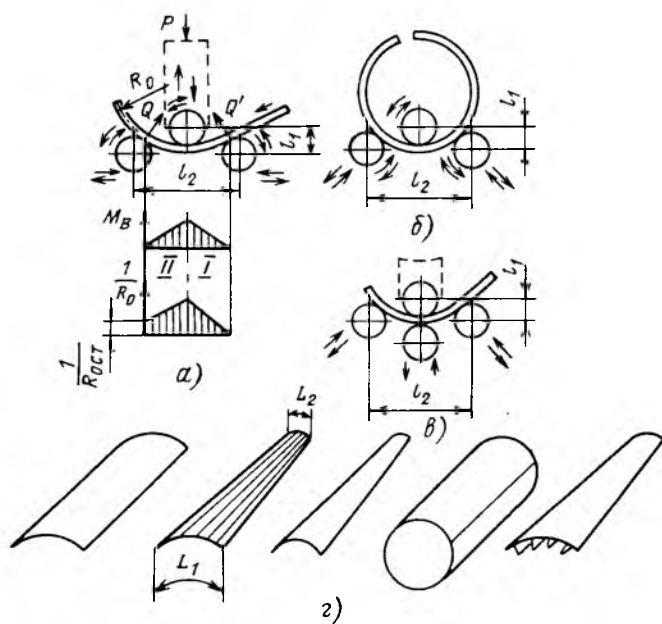


Рис. 3.11. Схемы валковых станков:

а—трехвалковый станок с регулируемым положением верхнего и нижнего валов; б, в—трех- и четырехвалковые станки с регулируемым положением нижних валов; г—обшивки, обечайки и монолитные панели, изготавливаемые на валковых станках

3.11, б), верхняя траверса отсутствует, и на таких станках можно изгибать обечайки с большими углами изгиба, вплоть до 360° . Заготовка укладывается на нижние валы, находящиеся в нижнем положении, затем они поднимаются, между валами устанавливается нужное расстояние l_1 , после чего начинается прокатка. Все три вала также являются приводными.

По схеме а работают станки модели КГЛ (копировально-гибочные листовые), по схеме б — станки моделей ГЛС (гибочные листовые станки). Станок этого типа ГЛС-12 имеет четыре вала (рис. 3.11, в), из которых два центральных (тянущие) — приводные, а боковые (гибочные) — не приводные. Станок комбинированный и может работать как гибочный пресс (верхняя траверса выполняет роль плунжера) и как прокатный валковый станок.

Станки КГЛ имеют следующие технологические характеристики: КГЛ-1 — наибольшая длина изгибаемых листов 3,5 м при $s=2,5$ мм; КГЛ-2—5,0 м при $s=6$ мм; КГЛ-3 — 7,0 м при $s=12$ мм; минимальные радиусы изгиба соответственно 20, 75 и 150 мм.

На станке ГЛС-12 можно прокатывать обшивки или прессованные панели длиной до 12 м, а максимальное усилие, развиваемое верхней траверсой этого станка, составляет $2 \cdot 10^7$ Н.

Гибка прокаткой отличается от поперечного изгиба тем, что при симметричном положении валов напряженно-деформированное состояние заготовки слева и справа от центрального вала не одинаково; сечения заготовки на одном и том же расстоянии от плоскости симметрии имеют различную кривизну и напряжения.

На рис. 3.11, а показаны эпюры моментов, действующих в разных сечениях, заготовки и распределение кривизны по длине заготовки в промежутке между нижними опорами (валами). Весь этот промежуток можно разделить на две зоны: область *I* можно называть зоной нагрузки, а область *II* — зоной разгрузки. В зоне *I* каждое сечение проходит последовательно стадии с изменением кривизны от нуля на правом валу до максимального значения в срединной области. После прохождения данным сечением зоны контакта с верхним валом оно попадает в зону разгрузки, где кривизна начинает уменьшаться из-за упругих деформаций. Кривая, характеризующая положение оси заготовки в промежутке между валами, несимметрична.

Прокатка цилиндрических обшивок с постоянной кривизной есть простейший случай прокатки. Такие детали прокатываются при одном положении валов, которое устанавливается и уточняется в соответствии с фактически получающимся радиусом кривизны, который можно измерить шаблоном после выхода обшивки из рабочей зоны. Получающаяся кривизна постепенно доводится до требуемой опусканием верхнего вала, т. е. уменьшением размера l_1 , а прокатка повторяется при прямом или обратном вращении валов. Расстояние l_2 между нижними валами всегда предпочтительно выдерживать минимальным, так как это, хотя и требует повышенного усилия деформирования (за счет меньшего плеча), уменьшает длину прямолинейных участков по краям заготовки.

Несколько сложнее проводится прокатка обшивок переменной кривизны. Гибка таких деталей требует регулирования по ходу прокатки положения верхнего вала; необходимо поднимать траверсу при уменьшении и опускать ее при увеличении кривизны. На станках КГЛ-1 и КГЛ-2 имеются копировальные системы, и регулирование кривизны при прокатке может происходить автоматически. Копиры, служащие датчиками в системах слежения, отрабатываются обычно с учетом упругой деформации.

Наиболее сложным процесс прокатки становится при изготовлении конических обшивок и обечаек. Трудность заключается в том, что по длине таких обшивок кривизна переменна, а прямолинейные образующие идут по процентным линиям, то есть по линиям, которые проходят через точки, отделяющие относительно равные хорды по различным сечениям. Заготовка в этом случае имеет клиновидную форму, причем она должна быть заправлена под валы по процентной линии и выйти из-под валов с другой стороны тоже по процентной линии. Это обусловливает необходимость иметь различную скорость перемещения заготовки под валами. Большая скорость должна быть вдоль широкого конца заготовки (вдоль размера L_1 , показанного на рис. 3.11, з) и меньшая — вдоль узкого

конца (вдоль размера L_2). Если предположить, что процентные линии совпадают с кромками обшивки, то соотношение скоростей при прокатке с разных ее концов может быть определено из следующих выражений:

$$L_1 = V_1 t_1 \quad \text{и} \quad L_2 = V_2 t_2.$$

При совпадении процентных линий с кромками начало и конец прокатки с разных сторон обшивки должны совершаться одновременно, и тогда $t_1 = t_2$. Поэтому

$$\frac{L_1}{V_1} = \frac{L_2}{V_2} \quad \text{или} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{L_1}{L_2}, \quad (3.48)$$

т. е. соотношение скоростей зависит от клиновидности заготовки.

На станках КГЛ с валами постоянного диаметра невозможно обеспечить различную окружную скорость, поэтому при прокате на них конических обшивок требуются специальные приемы. Перед началом прокатки на конической заготовке размечают процентные линии, а прокатка производится поэтапно с несколькими перестановками заготовки, при которых широкий конец (L_1) вручную перемещают в направлении прокатки на большее расстояние, чем узкий конец (L_2); при этом ось верхнего вала совмещается с положением процентных линий. Каждый этап прокатки охватывает лишь небольшой участок, равный 5...10% общей ширины заготовки.

Для создания переменной кривизны вдоль обшивки верхний вал устанавливают под углом к осям нижних валов; в этом случае размер l_1 (см. рис. 3.11, а) становится переменным и на выходе из-под валов обшивка имеет различную по длине кривизну. Обычно для каждого станка опытным путем отрабатывают зависимости остаточного радиуса от взаимного расположения валов (от размеров l_1 , l_2) для наиболее употребительных материалов и толщин заготовок, строят соответствующие графики, которые используются оператором.

Конечно, такая технология прокатки конических обшивок далека от совершенства, поэтому в тех случаях, когда число конических обечаек велико, строят станки с комплектом конических валов, создающих переменную окружную скорость при постоянной угловой скорости за счет изменяющегося диаметра. Зная зависимость (3.48), можно определить необходимый перепад диаметров вала в зависимости от клиновидности обшивки. Связь окружной скорости с угловой определяется уравнением $V = \omega R$, а $\omega = \frac{\pi n}{30}$; вместо V_1 и V_2 в уравнение (3.48) можно подставить их значения и выразить отношение диаметров d_1 и d_2 в зависимости от отношения L_1 и L_2 . Недостатком станков с коническими валами является их малая универсальность; строго говоря, каждая обечайка с данной конусностью требует специального комплекта валов с соответствующей конусностью.

3.8. ОСОБЕННОСТИ ГИБКИ ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ

Гибка профилей и труб имеет свои специфические особенности, обусловливаемые формой их сечений.

В производстве самолетов применяется большое число деталей и прессованных профилей и труб. Стрингеры, профили шпангоутов, нервюры, окантовки изготавливаются гибкой из профилей различных сечений. Детали трубопроводов различных систем также изготавливаются гибкой. Детали из профилей и труб ответственны по своему назначению, поэтому к точности их размеров и сохранению формы сечения предъявляются высокие требования.

При гибке прессованных профилей следует иметь в виду, что нейтральный слой заготовки совпадает с линией центров масс сечения, поэтому при соблюдении гипотезы плоских сечений эпюры деформаций и напряжений в растянутой и сжатой зонах не имеют взаимно отраженного вида, как показано на рис. 3.2 и 3.6 для листовых заготовок. Поэтому очень важно, как ориентирован профиль в плоскости изгиба; разная ориентация профиля, даже простейшего сечения (например, уголкового), дает качественно разную картину деформированного состояния.

На рис. 3.12, *а* показан уголкового профиля, который изогнут так, что его вертикальная стенка больше подвергается сжатию; на рис. 3.12, *б* тот же профиль изогнут по-другому. Этот профиль перед гибкой был как бы повернут на 180° , и его вертикальная стенка больше подвергается растяжению. В случае *а* максимальная деформация, равная h_2/R_0 , является сжатием, и при достаточно большой кривизне и тонкой стенке профиля здесь возможна потеря устойчивости, могут появиться гофры; этот дефект и будет ограничивать технологические возможности операции. В случае *б* та же максимальная деформация h_2/R_0 является растяжением и техноло-

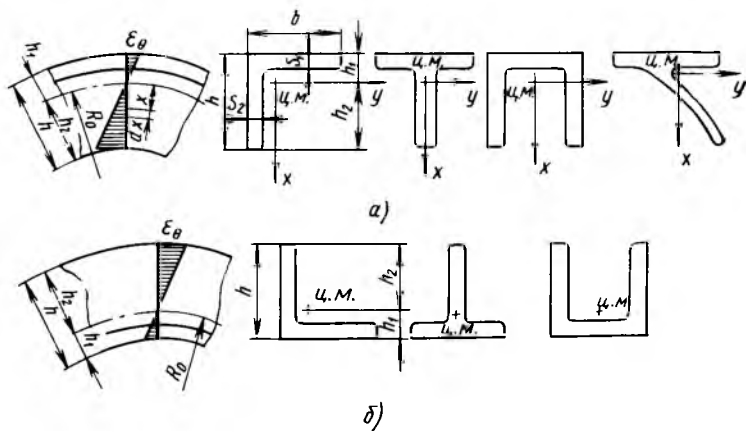


Рис. 3.12. Гибка профилей разных сечений:

а—вертикальная стенка подвергается сжатию; *б*—вертикальная стенка подвергается растяжению; ц. м. — центр масс сечения

логические возможности операции ограничиваются уже не потерей устойчивости, так как максимальная деформация сжатия $h_1/R_0 < h_2/R_0$, а предельно допустимой деформацией растяжения (прочностью на разрыв). Следовательно, в зависимости от ориентации профиля в плоскости изгиба изменяются предпосылки для определения минимального радиуса изгиба.

Уравнение (3.44) для минимального радиуса изгиба применительно к рассматриваемому случаю можно переписать в виде

$$R_{0 \min} = h_2/\varepsilon_{\text{доп}} \quad (3.49)$$

Если технологические операции ограничиваются прочностью на разрыв, то предельно допустимую деформацию $\varepsilon_{\text{доп}}$ можно определять по изложенной выше методике для гибки листового материала. Гораздо сложнее определить $\varepsilon_{\text{доп}}$, когда ограничивающим фактором является потеря заготовкой устойчивости — образование складок. Теоретическое определение предельных деформаций сжатия вызывает большие затруднения, и в практических условиях обычно пользуются результатами опытных данных. Для предотвращения потери устойчивости стенку профиля помещают в узкий зазор в штампе, применяют прижимы (складкодержатели), в некоторых случаях допускается наличие гофров небольшой высоты, которые впоследствии устраняются («посаживаются») вручную или механически.

При гибке профилей из алюминиевых сплавов Д16 и В95 редко допускают изгиб по радиусу меньше четырех высот стенки профиля во избежание появления трещин или потери устойчивости.

Определение усилия гибки профилей отличается также некоторыми особенностями при расчете изгибающего момента $M_{\text{вн}}$. Значение внешнего изгибающего момента $M_{\text{вн}}$ определяется так же, как и для гибки листового металла. Однако ввиду сложности сечения профилей определение момента $M_{\text{вн}}$ соответственно общему уравнению (3.26) связано с некоторыми дополнительными трудностями. Для наиболее широко применяемых сечений профилей можно использовать уравнение (3.29), которое является общим для любой формы заготовки. Если для заданных профилей известен статический момент инерции сечения относительно главной оси, перпендикулярной плоскости изгиба, то вычисление момента $M_{\text{вн}}$ значительно упрощается. Исходя из общей методики, $M_{\text{вн}}$ для гибки профиля уголкового сечения (см. рис. 3.12, а) можно определить следующим выражением, записанным на основании уравнения (3.28):

$$M_{\text{вн}} = \int_0^{h_1-s_1} \left(\sigma_s + \Pi \frac{x}{R_0} \right) s_2 x dx + \int_{h_1-s_1}^{h_1} \left(\sigma'_s + \Pi \frac{x}{R_0} \right) b x dx + \int_0^{h_2} \left(\sigma'_s + \Pi \frac{x}{R_0} \right) s_2 x dx. \quad (3.50)$$

Это выражение справедливо и для случая, когда вертикальная стенка подвергается растяжению (см. рис. 3.12, б). Аналогичный подход следует применять и при рассмотрении других сечений профилей.

Если сечение профиля несимметрично относительно главной плоскости, совпадающей с плоскостью изгиба, то при гибке такого профиля принципы плоского изгиба не соблюдаются, т. е. ось изогнутой детали уходит из плоскости приложения внешних сил. К несимметричным профилям можно отнести профили уголкового, Z-образного и других форм, у которых сечения несимметричны относительно плоского изгиба. При пластическом изгибе в сечениях таких профилей наряду с нормальными напряжениями растяжения и сжатия возникают еще и касательные напряжения, вызывающие закручивание заготовки, в результате чего деталь получается не плоской, а сложной пространственной формы. Закручивание тем интенсивнее, чем меньше относительный радиус. Явление закручивания весьма отрицательно сказывается на точности размеров деталей, и для его устранения в технологический процесс включаются доводочные операции, часто выполняемые вручную. Например, стенка профиля шпангоута, изготовленного гибкой, должна точно прилегать к плоскости контрольной плиты (допускается зазор до 0,2 мм); такой точности можно достигнуть лишь сложной и кропотливой доводкой. Закручивание профиля в процессе самой гибки можно полностью или частично устранить, помещая стенку профиля в специальный узкий зазор в штампе, или, если гибка производится на роликовых прокатных станках, то установкой на выходе из рабочей зоны специального бокового ролика, который отгибает профиль в направлении, противоположном направлению закручивания. В некоторых случаях можно соединять прокатку с небольшим обжатием кромки горизонтальной полки профиля, что гасит действие касательных напряжений, и профиль остается изогнутым в одной плоскости.

Кроме указанных особенностей гибка прессованных профилей вызывает искажение угловых размеров. Этот дефект также отрицательно сказывается на точности размеров деталей. Устранить его механическим путем очень трудно, допуски же на угловые размеры авиационных профилей довольно жесткие ($\pm 30'$).

Самый распространенный способ гибки профилей — прокатка на трех- или четырехроликовых станках. Схемы работы этих станков аналогичны схемам работы трех- и четырехвалковых станков (см. рис. 3.11), но вместо валов здесь применяются ролики, сечение которых соответствует сечению изгибаемых профилей. На рис. 3.13 приведены принципиальные схемы наиболее широко применяемых профилегибочных станков. На станке И-620 (схема а) профиль зажимается между двумя средними приводными роликами, при вращении которых он силами трения перемещается в рабочую зону, подвергаясь изгибу боковыми (неприводными) роликами. Кривизна детали зависит от расстояний l_1 и l_2 , которые регулируются опусканием или подъемом боковых роликов под некоторым

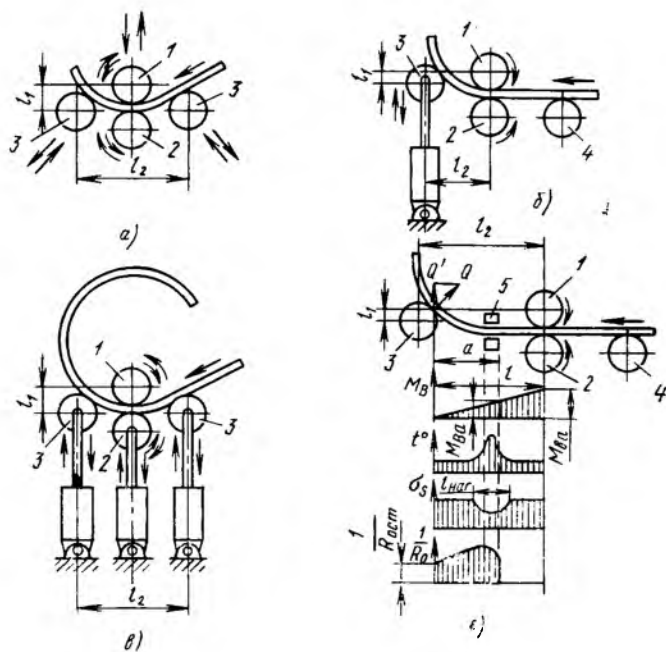


Рис. 3.13. Схема гибки на профилегибочных роликовых станках:

а—станок И-620; *б*—ПГ-3; *в*—ПГ-4; *г*—станок с устройствами для нагрева заготовки током высокой частоты (ТВЧ); *1*—верхний приводной ролик; *2*—нижний приводной ролик; *3*—гибочные ролики; *4*—направляющий ролик; *5*—индуктор

углом по отношению к оси станка. На этом станке можно изгибать профили сечением до 400 мм² при наименьшем радиусе 100...150 мм. Станок не оборудован устройствами для автоматического регулирования расстояния между осями роликов по ходу прокатки, поэтому гибка на нем изделий с переменной кривизной затруднительна.

Станок ПГ-2М (схема *б*) оборудован следящей гидравлической системой, при помощи которой гибочный ролик *3* поднимается или опускается по ходу прокатки в соответствии с профилем копира, чем и регулируется кривизна детали на выходе из рабочей зоны. Профиль копира обрабатывается с учетом упругих деформаций, что позволяет если не сразу получить точную кривизну, то по крайней мере, приблизить ее к необходимой и тем самым значительно уменьшает доводочные работы. Станок ПГ-2М более мощный, чем станок И-620, и на нем можно изгибать профили из алюминиевых сплавов с площадью сечения до 600...650 мм².

Станок ПГ-4 и аналогичный ему станок ПГ-3 (схема *в*) предназначены для гибки прокаткой профилей шпангоутов с постоянной кривизной (круглых) с углом изгиба до 360°. Станки не оборудованы копировальной системой, все три нижних ролика станков имеют гидравлический привод, что облегчает регулирование относи-

тельного положения роликов и позволяет расположить гибочные ролики 3 асимметрично по отношению к приводным роликам 1 и 2. Все это упрощает подгибку концевых участков заготовки. Гибочные ролики станка ПГ-4 имеют самостоятельный привод, вследствие чего можно легче осуществлять все варианты их взаимного расположения при подгибке концевых участков. Усилие нижнего (приводного) ролика 2 равно $2 \cdot 10^5$ Н, а гибочных роликов — $1,2 \cdot 10^5$ Н каждого, что позволяет изгибать не только профили из алюминиевых сплавов, но также и стальные шпангоуты.

Особый интерес представляет станок, подобный по схеме станку ПГ-2, но оснащенный устройствами для нагрева заготовки токами высокой частоты (ТВЧ) (см. рис. 3.13, з). Как видно из нижней части рисунка, эпюра внешних изгибающих моментов $M_{\text{в}}$ в рабочей зоне такова, что при обычных условиях гибки, когда механические свойства по длине заготовки не изменяются, максимальная кривизна должна достигаться заготовкой в зоне контакта с ведущими роликами 1 и 2, т. е. там, где сила Q' имеет наибольшее плечо l . Однако вследствие местного резкого снижения напряжения текучести σ_s от нагрева в зоне расположения индуктора 5 изгиб начинается именно там, где σ_s имеет наименьшее значение. Моменты внешних сил в сечениях на расстояниях l и a от силы Q' обозначим $M_{\text{вл}}$ и $M_{\text{ва}}$ соответственно. Очевидно, что

$$M_{\text{вл}} = Q'l > M_{\text{ва}} = Q'a,$$

но в силу местного разупрочнения сопротивление металла деформированию в сечении a будет значительно меньше, чем в сечении l , поэтому эпюра кривизны $1/R_0$ имеет такой своеобразный вид по сравнению с обычным случаем гибки прокаткой.

Гибка с нагревом ТВЧ применяется для изготовления деталей из труб, но перспективна и для изготовления деталей из профилей, особенно в тех случаях, когда имеется опасность потери стенкой профиля устойчивости в сжатой зоне.

Чтобы предотвратить потерю устойчивости заготовкой, нужно сосредоточить деформацию при гибке в узкой зоне по длине заготовки; это делается местным разупрочнением металла путем нагрева токами высокой частоты (см. распределение t и σ_s по длине заготовки). Если длина зоны нагрева $l_{\text{наг}} \leq 2s$ (здесь s — толщина стенки заготовки), то складки не образуются. Для ограничения зоны нагрева смежные с индуктором участки заготовки искусственно охлаждаются водой.

Как уже было указано, конструкция роликов должна соответствовать сечению профиля. На рис. 3.14, а показано сечение роликов для гибки профилей таврового и уголкового сечений. Ролики собраны из отдельных элементов и в некотором диапазоне размеров являются универсальными. Комплект роликов рассчитан на гибку профилей с посадкой или растяжением стенки (нижний и верхний ролики можно менять местами). Заготовки профилей уголкового сечения можно изгибать одновременно по две, складывая их стенкой к стенке; в результате получается как бы профиль

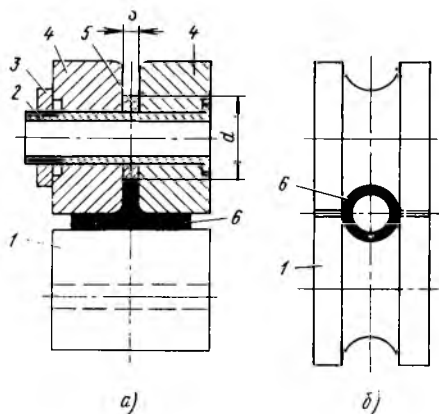


Рис. 3.14. Ролики для гибки профилей:

a—таврового и уголкового сечения; *б*—труб; *1*—нижний ролик; *2*—штулка; *3*—гайка; *4*—боковые кольца верхнего ролика; *5*—прокладка; *6*—заготовка

таврового сечения. Нижний ролик монолитный, а верхний собирается на втулке 2. Сменными элементами являются боковые кольца 4, у которых изменяется размер R , и прокладка 5, которая подбирается по размерам s и d в соответствии с размерами сечения профиля.

В настоящее время в связи с наблюдаемой тенденцией увеличения диаметров фюзеляжей и корпусов летательных аппаратов более удобными для гибки шпангоутов диаметром 6 ... 10 м являются роликовые станки с горизонтальным расположением роликов.

Описанными способами не исчерпываются все варианты гибки профилей. Небольшие

по длине профили изгибают в штампах; иногда гибка производится на станках с вращающимся столом (профиль как бы навивается на оправку), и др.

Особым случаем, технически сложным и теоретически мало освещенным, является гибка панелей, имеющих в сечении сложный профиль. Обычно монолитные панели применяются на крыльях, на оперении, на цилиндрических и конических частях фюзеляжей, корпусов и отсеков топливных баков; в готовом виде панели имеют поверхность одинарной кривизны с линейными образующими вдоль процентных линий. Панели могут иметь только продольное оребрение — стрингеры, а также одновременно продольное и поперечное оребрение (вафельная конструкция) с разным взаимным расположением (рис. 3.15, *в*). Гибка панелей производится или на валковых станках (см. рис. 3.15, *а*), причем перед гибкой пространство между ребрами (стрингерами) заполняется пластическими массами, а поверх ребер накладывается лист дуралюмина, или на универсальных штампах за несколько ходов прессы с перемещением заготовки после каждого хода (см. рис. 3.15, *б*). Вследствие резких перепадов толщин панелей радиусы их кривизны R_0 также переменны по сечению (см. рис. 3.15, *г*).

В последние годы в отечественной и зарубежной промышленности для изготовления монолитных панелей применяется также гибка обдувом дробью внешней поверхности панели (см. рис. 3.15, *д*). Дробеструйная головка установки перемещается вдоль панели, последовательно обрабатывая за несколько проходов всю ее поверхность (стрелками на рис. 3.15, *д* показаны направления перемещения дробеструйной головки и панели). Под воздействием сжатого воздуха, подаваемого к головке, дробь выбрасывается с большой

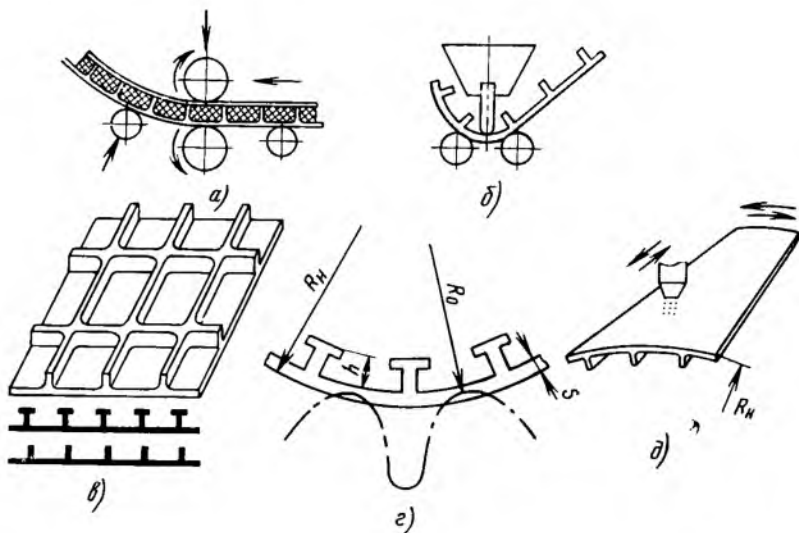


Рис. 3.15. Способы гибки монолитных панелей:

а—гибка прокаткой; *б*—свободная гибка; *в*—сечения монолитных панелей; *г*—положение нейтрального слоя; *д*—гибка обдувом дробью

скоростью через сопло на поверхность панели. Обладающие кинетической энергией дробинки, соударяясь с поверхностью панели, вызывают в ней пластическую деформацию; в поверхностном слое панели возникают напряжения сжатия, под действием которых плоская панель изменяет форму и приобретает необходимую кривизну. Участки, на которых нужна большая кривизна, обрабатываются более длительное время.

При гибке труб возникают два основных дефекта — потеря устойчивости, т. е. образование гофров в сжатой зоне трубы, и превращение круглого сечения в овал. Появление овальности приводит к тому, что при каждом изменении давления стенка трубопровода подвергается дополнительной деформации, а гофры на поверхности трубопроводов, в особенности трубопроводов высокого давления (более $2 \cdot 10^5$ ГПа), в условиях вибрационных нагрузок становятся концентраторами напряжений. Это вызывает преждевременное образование трещин и выводит из строя всю систему.

Для изготовления трубопроводов наиболее широко применяются алюминиевые сплавы АМг, Д16, сталь 1Х18Н9Т и титановые сплавы. Основной технологической операцией для всех трубопроводов является гибка, часто не в одной плоскости, а сложная пространственная.

При соблюдении гипотезы плоских сечений основные положения теории пластического изгиба сохраняются и для гибки труб. Несколько сложнее в данном случае определяется момент внутренних сил. На рис. 3.16 показана изогнутая труба и ее поперечное сечение. Предположим, что материал при деформации упрочняется в со-

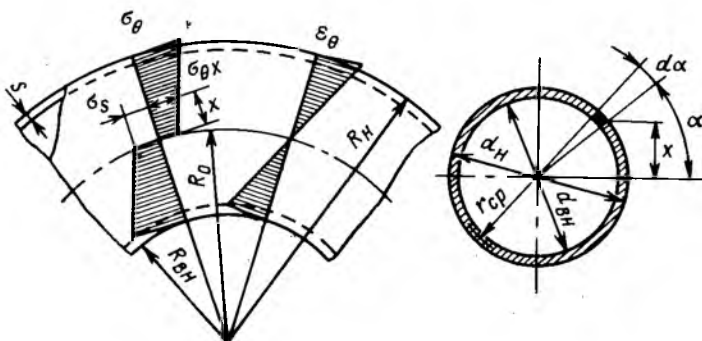


Рис. 3.16. Распределение напряжений и деформаций по сечению трубы при гибке

ответствии с линейным законом, как это выражено уравнением (3.25). Определение момента внутренних сил сводится к решению интеграла

$$M_{\text{вн}} = 2 \int_0^{\pi} \sigma_{\theta x} x dF. \quad (3.51)$$

Для трубы x и dF можно выразить как (см. рис. 3.16)

$$x = r_{\text{cp}} \sin \alpha; \quad dF = r_{\text{cp}} s d\alpha. \quad (3.52)$$

Подставляя уравнения (3.52) и (3.25) в (3.51), получим

$$M_{\text{вн}} = 2 \int_0^{\pi} \left(\sigma'_s + \Pi \frac{r_{\text{cp}} \sin \alpha}{R_0} \right) r_{\text{cp}}^2 s \sin \alpha d\alpha \quad (3.53)$$

или

$$M_{\text{вн}} = 2 \sigma'_s r_{\text{cp}}^2 s \int_0^{\pi} \sin \alpha d\alpha + 2 \Pi \frac{r_{\text{cp}}^3 s}{R_0} \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha d\alpha. \quad (3.54)$$

Решения интегралов, входящих в последнее уравнение, имеют вид

$$\int_0^{\pi} \sin \alpha d\alpha = 2; \quad \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \frac{\pi}{2}.$$

Следовательно, с учетом того, что $r_{\text{cp}} = d_{\text{cp}}/2$ (d_{cp} — средний диаметр трубы), можно записать:

$$M_{\text{вн}} = \sigma'_s d_{\text{cp}}^2 s + \frac{\Pi d_{\text{cp}}^3 s \pi}{8 R_0}. \quad (3.55)$$

Если упрочнение не учитывать или оно отсутствует ($\Pi = 0$), то

$$M_{\text{вн}} = \sigma_s d_{\text{cp}}^2 s. \quad (3.56)$$

На основе приведенных уравнений для $M_{\text{вн}}$ можно определить усилие P деформирования и остаточный радиус $R_{\text{ост}}$ кривизны.

Развитию овальности и гофров в сжатой зоне стенки трубы препятствует применение наполнителя. Оказывая противодействие с внутренней стороны, наполнитель, если не полностью, то в максимальной степени предотвращает появление этих дефектов.

Аналитическое определение критического радиуса, при котором в процессе свободной гибки возникает потеря устойчивости стенкой трубы и образуются гофры, очень затруднительно. Поэтому диапазон гибки труб с разной относительной толщиной стенки ($s = s/d_{\text{ср}}$), в котором можно производить гибку без наполнителя или с наполнителем, находят по результатам экспериментов. Определяющее значение при гибке имеет относительная толщина стенки трубы. При одном и том же диаметре трубу с относительной толщиной стенки $s = 5 \dots 6\%$ и более можно изгибать без наполнителя по радиусу $R_0 = 5d_{\text{н}}$ (здесь $d_{\text{н}}$ — наружный диаметр трубы), а при $s = 1,5 \dots 2,0\%$ — только с наполнителем. Наряду с потерей устойчивости при минимальном радиусе изгиба труб происходит также утонение стенки в растянутой зоне, где максимальная тангенциальная деформация по срединной поверхности $\epsilon_{\theta \text{ max}} = d_{\text{ср}}/2R_0$. Если деформация по окружности отсутствует (диаметр $d_{\text{н}}$ не изменяется), то деформация по толщине — $\epsilon_n = \epsilon_{\theta \text{ max}}$. Тогда

$$\epsilon_n \approx \frac{s - s_{\text{min}}}{s} \approx \frac{d_{\text{ср}}}{2R_0} \approx \frac{d_{\text{н}} - s}{2R_0}, \quad (3.57)$$

а минимальная толщина стенки

$$s_{\text{min}} \approx s \left(1 - \frac{d_{\text{н}} - s}{2R_0} \right). \quad (3.58)$$

Таким образом, с уменьшением относительного радиуса R_0 гибки утонение увеличивается; например, при $\bar{s} = s/d_{\text{н}} = 5\%$ и $R_0 = 2d_{\text{н}}$ толщина $s_{\text{min}} \approx 0,75s$ (утонение составляет 25%). Исходя из этого условия гибки по радиусу меньше $2,5d_{\text{н}}$, применяется с использованием специальных приемов гибки.

В настоящее время в качестве наполнителя чаще всего применяется жидкость. Трубу с обоих концов закрывают пробками; затем через одну из пробок, в которой имеется односторонний клапан, во внутреннюю полость трубы нагнетается жидкость, подаваемая от специальной зарядной станции под давлением $10^5 \dots 15^3$ ГПа. Давление зависит от относительной толщины трубы и радиуса изгиба. Иногда применяют твердые наполнители: расплавленную канифоль, селитру и легкоплавкие металлы.

Наиболее распространены следующие способы гибки труб: гибка на роликовых станках, гибка в штампах, гибка на специализированных станках.

Гибка труб на роликовых станках подобна гибке профилей (см. рис. 3.13); ролики в данном случае имеют ручки, диаметром равные диаметру изгибаемой трубы. При опасности потери устойчивости труба предварительно заполняется наполнителем. Гибка на

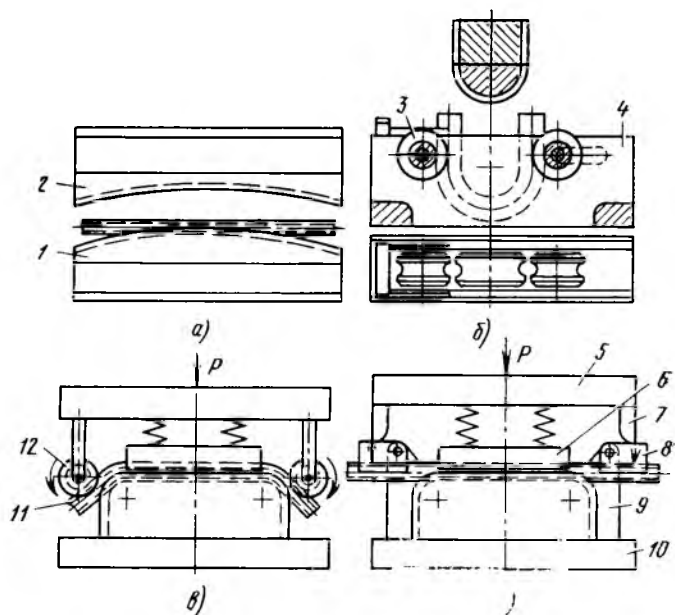


Рис. 3.17. Штампы для гибки труб:

а—обычной конструкции; *б*—с роликовыми опорами; *в*—с обкаткой роликами; *г*—с поворотными колодками; 1—пуансон; 2—матрица; 3—опорный ролик; 4—корпус; 5—верхняя плита; 6—прижим; 7—толкатель поворотной колодки; 8—поворотная колодка; 9—кронштейн поворотной колодки; 10—нижняя плита; 11—заготовка; 12—ролики

станках с местным нагревом токами высокой частоты может производиться без наполнителя, так как потеря устойчивости в данном случае не наступает вследствие деформации лишь небольшого участка заготовки.

Гибкой в штампах изготавливаются детали из труб со сравнительно небольшой длиной (до 500 мм). Кривизна деталей может быть сложной: знакопеременной или расположенной не в одной плоскости. В зависимости от относительного радиуса изгиба и толщины стенки заготовки гибку можно производить с наполнителем и без него, в одну или несколько операций. Местный изгиб на концах труб также можно выполнять в штампах. На рис. 3.17 показаны типовые гибочные штампы. Пуансоны, прижимы, ролики и поворотные колодки имеют ручки, соответствующие диаметру заготовки. Роль матриц в схемах *б* и *в* выполняют ролики 3 и 12, а в схеме *г* — колодки 8, поворачивающиеся под действием толкателя 7 при опускании ползуна.

На рис. 3.18 показана схема гибки труб на специализированном станке с поворотным столом; оправка (пуансон), по которой производится гибка, устанавливается на столе станка.

Гибка производится без наполнителя, но с внутренней оправкой, которую помещают в месте изгиба трубы и оставляют там на все время операции гибки. Конец заготовки 5 зажимают прижи-

мом 2 на гибочной оправке 1, в трубу вставляют внутреннюю оправку 3, закрепленную на штанге с регулируемой длиной; затем стол станка приводят во вращение. При повороте оправки труба изгибается роликом 4 и последовательно заполняет ручей оправки. В современных трубогибочных станках ролик 4 закреплен на штоке гидравлического цилиндра и может вместе с ним перемещаться вдоль оси цилиндра, что обеспечивает гибку труб на оправках с переменной кривизной. Внешний изгибающий момент определяется произведением Pl ; плечо l при гибке труб на оправке с переменной кривизной непостоянно, и усилие P определяется исходя из минимального значения l .

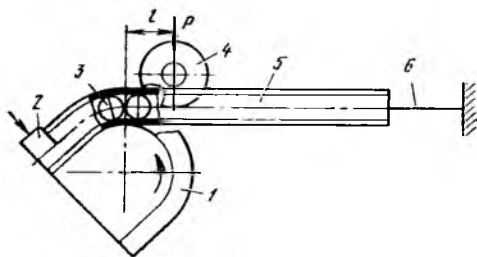


Рис. 3.18. Схема работы станка с поворотным столом:

1—гибочная оправка; 2—прижим; 3—внутренняя оправка; 4—ролик; 5—заготовка; 6—штанга

Внутренние оправки (дорны) имеют разную конструкцию. Это может быть или несколько шариков, подобранных по внутреннему диаметру трубы и соединенных тросом, или гибкая оправка, собранная из фасонных шайб, или просто сплошной небольшой по длине дорн с закруглением на стороне, обращенной к выпуклой стороне изогнутой трубы. Внутренняя оправка в зоне гибки заготовки предотвращает потерю устойчивости, а в зоне уже изогнутого участка трубы калибрует сечение трубы.

В практике трубогибочного производства в последние годы нашли применение станки, на которых можно изготавливать гибкой трубчатые детали не только с кривизной в одной плоскости, но и сложной пространственной формой. Ввиду того, что изменение взаимного расположения рабочих элементов на станке при гибке заготовки не в одной плоскости и не по постоянному радиусу затруднительно, такие станки оборудованы или копировальным устройством, получающим сигналы от шаблонов, или программным управлением.

На рис. 3.19 показана схема работы станка такого типа, на котором заготовка получает изгиб, проходя от тянущих роликов 2 к гибочному ролику 1. Кривизна заготовки зависит от расстояний l_1 и l_2 между роликами 1 и 2. Программный носитель управляет перемещением гибочного ролика вверх (увеличение кривизны) и вниз (уменьшение кривизны), а также вращением зажима 4 и заготовки 3, что дает возмож-

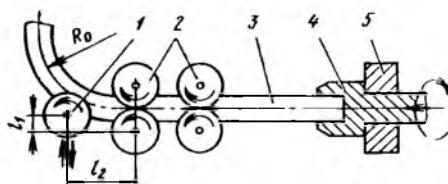


Рис. 3.19. Схема работы трубогибочного станка с автоматическим управлением:

1—гибочный ролик; 2—подающие ролики; 3—заготовка; 4—зажим; 5—каретка

ность изгибать трубу не в одной плоскости. Заготовка 3 подается в зону деформаций роликами 2; с целью предотвращения проскальзывания заготовки в роликах, что приводит к нарушению формы деталей, синхронность перемещений гибочного ролика и заготовки обеспечивается принудительной подачей заготовки специальной кареткой 5.

3.9. ГИБКА С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ РАСТЯЖЕНИЕМ

Гибка с тангенциальным растяжением совмещает две элементарные операции; гибку и растяжение. Две нагрузки (изгибающий момент и сила), действующие на заготовку одновременно или в определенной последовательности, не зависят друг от друга, и различные количественные их соотношения позволяют управлять процессом гибки.

Гибку с тангенциальным растяжением применяют в самолетостроении с сороковых годов, с момента внедрения в серийное производство высокоскоростных реактивных самолетов, для которых были предъявлены повышенные требования к точности наружных обводов. Приложение к заготовке тангенциальной силы при выполнении гибки повышает точность изготавливаемых деталей. Спроектировано и изготовлено специализированное оборудование — станки типа ПГР (профилегибочные растяжные), и гибка с тангенциальным растяжением широко применяется на заводах для изготовления деталей из прессованных профилей (стрингеры, полки нервюры, профили шпангоутов и др.) с малой кривизной, а также обшивок одинарной кривизны. Гибка деталей с малой кривизной связана со значительным искажением их формы после пружинения, и внедрение нового варианта гибки сыграло весьма положительную роль, главным образом, из-за снижения трудоемкости доводочных работ.

Покажем, что дополнительно приложенная к заготовке тангенциальная сила уменьшает вредное действие пружинения, т. е. приближает $R_{ост}$ к R_0 и $\varphi_{ост}$ к φ_0 (см. рис. 3.7). В качестве исходных примем уравнения (3.37) и (3.40), устанавливающие зависимость остаточного радиуса и угла пружинения от параметров процесса.

На рис. 3.20 показана схема нагружения заготовки моментом M_b и силой N , а также распределение напряжений и деформаций по высоте сечения. Так как разность внутренних тангенциальных сил по сечению должна уравновешиваться внешней силой N , нейтральный слой должен быть смещен от срединного слоя в сторону сжатых волокон на некоторую величину $c = R_{ср} - R_0$.

Уравнения равновесия для данного случая:

$$N = \sigma_s(s/2 + c)B - \sigma_s(s/2 - c)B = 2\sigma_s cB; \quad M_b + M_N = M_{ин}. \quad (3.59)$$

Первое уравнение выражает равенство внутренних и внешних сил, второе — равенство моментов внутренних и внешних сил (здесь M_N — момент силы N ; B — ширина заготовки). Из первого уравнения видно, что площадь зоны растяжения больше зоны сжатия и что

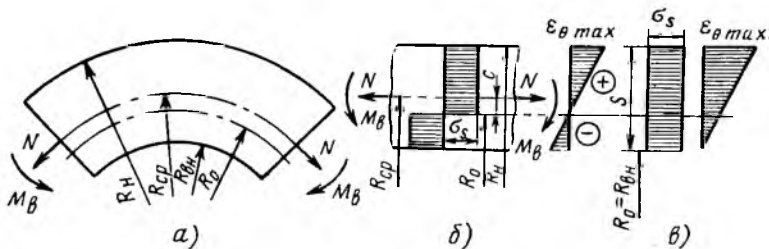


Рис. 3.20. Напряженно-деформированное состояние заготовки при гибке с тангенциальным растяжением (без упрочнения металла):

а—схема приложения внешних нагрузок; б—распределение σ_θ и ϵ_θ ; в—распределение σ_θ и ϵ_θ при $c=s/2$

смещение нейтрального слоя относительно среднего слоя пропорционально величине силы N . Из уравнений (3.59) имеем

$$M_B = M_{ин} - M_N. \quad (3.60)$$

Момент внутренних сил

$$\begin{aligned} M_{ин} &= \sigma_s B \left(\frac{s}{2} + c \right) \left(\frac{s/2 + c}{2} \right) + \sigma_s B \left(\frac{s}{2} - c \right) \left(\frac{s/2 - c}{2} \right) = \\ &= \sigma_s B \left(\frac{s^2}{4} + c^2 \right). \end{aligned} \quad (3.61)$$

Момент силы N

$$M_N = Nc = 2\sigma_s c^2 B. \quad (3.62)$$

Подставив значения M_B и M_N в уравнение (3.60), получим

$$M_{ин} = \sigma_s B (s^2/4 + c^2) - 2\sigma_s B c^2 = \sigma_s B (s^2/4 - c^2). \quad (3.63)$$

Сравнивая выражение (3.30) для M_B при чистом изгибе (без учета упрочнения) с выражением этого момента при изгибе с растяжением (3.63), можно видеть, что M_B действительно уменьшается с приложением осевой силы N растяжения. Уменьшение M_B тем больше, чем больше смещение нейтрального слоя. Из уравнения (3.63) следует, что если $c=s/2$ (см. рис. 3.20, б), то $M_B=0$ и процесс гибки становится идеально точным, так как согласно уравнениям (3.37) и (3.40) остаточный радиус кривизны $R_{ост}=R_0$, а угол пружинения $\Delta\varphi=0$. При этом по уравнению (3.59) осевая сила $N=\sigma_s Bs$.

Такой идеально точный процесс возможен при горячем деформировании ($P=0$), когда диаграмма растяжения имеет вид, показанный на рис. 3.6, в.

Однако гибка с растяжением выполняется обычно в холодном состоянии, когда металлы упрочняются и по высоте сечения заготовки вместе с изменением деформаций изменяются и напряжения. При $c=s/2$; $R_0=R_{вн}$ эпюра напряжений будет иметь вид, приве-

денный на рис. 3.21; напряжения изменяются от σ_s' на нейтральном слое до $\sigma = \sigma_s' + \Pi s/R_0$ на внешней выпуклой стороне заготовки. Условия равновесия (3.59) для этого случая запишутся так:

$$N = \frac{\sigma_s' + (\sigma_s' + \Pi s/R_0)}{2} Bs = (\sigma_s' + \Pi s/2R_0) Bs; \quad (3.64)$$

$$M_n + M_N = M_{nn} = \int_0^s (\sigma_s' + \Pi x/R_0) Bx dx. \quad (3.65)$$

Момент силы N относительно нейтрального слоя:

$$M_N = N \frac{s}{2} = \left(\sigma_s' + \Pi \frac{s}{2R_0} \right) \frac{Bs^2}{2}; \quad (3.66)$$

момент внутренних сил:

$$M_{nn} = \int_0^s \sigma_s' Bx dx + \int_0^s \frac{\Pi B}{R_0} x^2 dx = \sigma_s' B \frac{s^2}{2} + \frac{\Pi B}{R_0} \frac{s^3}{3}. \quad (3.67)$$

Тогда необходимое значение момента M_b можно выразить уравнением

$$M_b = M_{nn} - M_N = \sigma_s' B \frac{s^2}{2} + \frac{\Pi B}{R_0} \frac{s^3}{3} - \left(\sigma_s' + \Pi \frac{s}{2R_0} \right) \frac{Bs^2}{2} \quad (3.68)$$

$$\text{или } M_b = \frac{\Pi}{R_0} \frac{Bs^3}{12} = \frac{\Pi'}{R_0}.$$

Определим остаточный радиус для этого реального случая. Подставим значение момента M_b из уравнения (3.68) в уравнение (3.37):

$$R_{\text{ост}} = \frac{R_0}{1 - \frac{R_0}{EJ} \frac{\Pi I}{R_0}} = \frac{R_0}{1 - \Pi/E}. \quad (3.69)$$

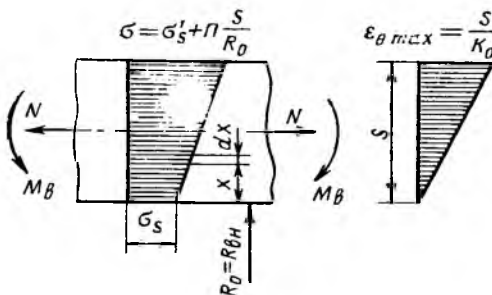


Рис. 3.21. Напряженное и деформированное состояние при вытяжке с тангенциальным растяжением с упрочнением металла

Уравнение (3.40) для угла сужения примет вид

$$\Delta\varphi = \varphi_0 \Pi/E. \quad (3.70)$$

Из последних выражений видно, что точность деталей при гибке с растяжением значительно выше точности деталей при обычной гибке. Так, для отожженного алюминиевого сплава можно принять $E = 72000$ МПа, $\Pi = 400$ МПа. Тогда $R_{\text{ост}} = 1,01 R_0$, т. е. остаточный радиус кривизны после пружины

жинения увеличивается лишь на 1%, в то время как при чистом изгибе остаточный радиус для того же материала согласно уравнению (3.37) и уравнению (3.38), из которого берется значение $M_{вн}$, при $R_0 = 10s$ увеличивается на 10%.

Гибку с растяжением нельзя применять для изготовления деталей с малыми радиусами, когда волокна наружного слоя подвергаются большой деформации, близкой к предельно допустимой. Следует иметь в виду также, что наибольшая точность деталей получается при гибке с растяжением, когда

$R_0 = R_{вн}$; при этом максимальная деформация растяжения внешних волокон удваивается по сравнению с чистым изгибом.

Минимальный радиус гибки с растяжением можно определить по изложенной выше методике в зависимости от допустимой деформации.

Гибку с растяжением можно производить по двум принципиально разным схемам: 1) сначала заготовка растягивается под воздействием силы N , а затем происходит гибка (обтягивание) по оправке; 2) сначала заготовку изгибают на роликовых станках или другим способом, а потом калибруют растяжением по оправке.

Гибка с растяжением производится на профилегибочных растяжных станках ПГР (рис. 3.22). На этих станках гибку с растяжением можно производить по обеим схемам. По первой схеме концы прямой заготовки 10 заправляют в зажимы 8, когда поворотные кронштейны 2 находятся в исходном положении на одной оси, соединяющей центры их вращения. Затем включают гидропривод растяжных гидроцилиндров 3, заготовка растягивается (зажимы 8 закреплены на штоках 7 этих цилиндров) и огибается (обтягивается) по оправке 11 при повороте кронштейнов; поворот кронштейнов осуществляется тягами 6 при ходе штока 5 гибочного гидроцилиндра 4. Преимущество первой схемы в том, что гибка растянутой заготовки происходит при смещении нейтрального слоя от центра масс сечения профиля, и деформация сжатия или уменьшена (см. рис. 3.20, б) или совершенно отсутствует (при $c = 0,5s$, см. рис. 3.20, в), что очень важно для предотвращения потери устойчивости стенкой профиля.

При работе по второй схеме гибка осуществляется так: при отсутствии натяжения или незначительном натяжении шток гидроцилиндра 4 делает ход, тяги 6 поворачивают кронштейны 2, и происходит обычная гибка профиля по оправке со всеми недостатками, присущими этому процессу (потеря устойчивости, значительное

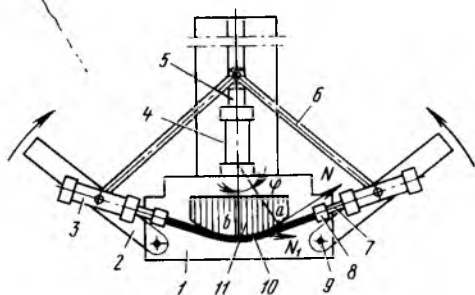


Рис. 3.22. Схема гибки с тангенциальным растяжением на станке ПГР:

1—стол станка; 2—поворотный кронштейн; 3—гидроцилиндр для растяжения; 4—гидроцилиндр для гибки; 5—шток гибочного цилиндра; 6—тяга; 7—шток растяжного цилиндра; 8—зажим; 9—ось вращения кронштейна; 10—заготовка (профиль); 11—оправка

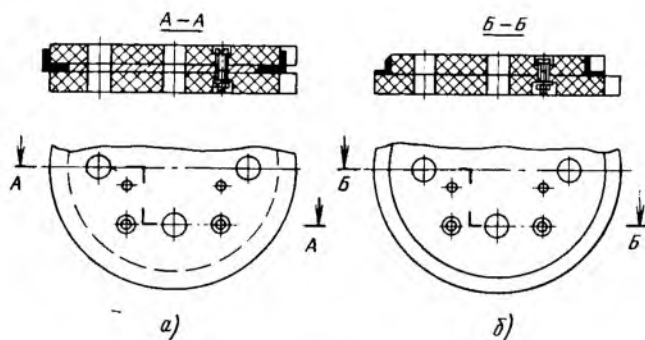


Рис. 3.23. Пуансоны для обтяжки профилей уголкового сечения

пружинение). Но после гибки на определенный угол φ можно растянуть профиль силой N при ходе штока растяжного гидроцилиндра 3, выправляя таким образом складки, образовавшиеся в результате потери устойчивости, и уменьшая пружинение. Недостаток проведения операций по этой схеме в том, что вследствие действия сил трения осевое растяжение распределяется неравномерно по длине профиля, находящегося в контакте с оправкой. Если на границе контакта профиля с оправкой осевая сила имеет значение N , то в центральной зоне изогнутого профиля значение этой силы $N_1 = N/e^{\mu\varphi}$, т. е. уменьшено силами контактного трения, препятствующими перемещениям заготовки по оправке. Здесь e — основание натуральных логарифмов. Если растяжение применяется после гибки на угол $\varphi = \pi/2$ и $\mu = 0,2$, то сила $N_1 = 0,7N$.

Станки ПГР располагают широкими технологическими возможностями. Модели станков ПГР-6, ПГР-7 и ПГР-8 имеют следующие характеристики: усиление растяжения $6 \cdot 10^4$, $25 \cdot 10^4$ и $6 \cdot 10^5$ Н соответственно, наибольшая длина заготовки — 5,5; 6,0 и 9,9 м, наибольший угол изгиба — 180, 220, 280°. На наиболее мощном станке ПГР-8 можно производить гибку профилей с растяжением из сплава Д16 с сечением до 1500 мм^2 , а из сплава В95 — до 1200 мм^2 . Для гибки с растяжением применяются также станки с вращающимся столом, на которых профиль как бы навивается, растягиваясь, на оправку, закрепленную на столе и имеющую контур будущей детали. Такие станки аналогичны по схеме станку, показанному на рис. 3.18, с той лишь разницей, что к заготовке дополнительно прикладывается осевая сила.

В качестве оснастки при гибке с растяжением применяются обтяжные пуансоны, изготавливаемые по шаблону контура (ШК) из дельта-древесины. На рис. 3.23 показаны пуансоны для двух вариантов обтяжки профилей уголкового сечения. Если гибка выполняется за одну операцию, то кривизна пуансонов корректируется на величину упругой деформации в соответствии с установленными для остаточного радиуса кривизны уравнениями. Такая корректировка хотя и не обеспечивает полного соответствия формы деталей

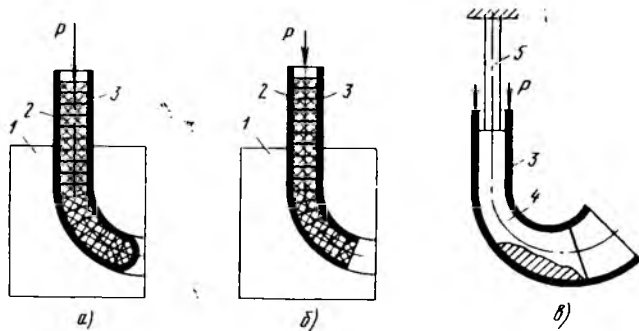


Рис. 3.24. Варианты совмещенных процессов гибки:

а—протягиванием через ручей; *б*—проталкиванием через ручей; *в*—на роговой оправке с раздачей

заданным размерам из-за нестабильности свойств материала и размеров заготовок, но значительно снижает доводочные работы. Корректировка пуансонов с постоянной кривизной несложна, значительно труднее корректировать форму пуансонов с переменной кривизной, когда нужно разбивать контур на участки с примерно одинаковым радиусом и производить корректировку отдельно каждого участка с последующим их плавным соединением. Если усилие растяжения обеспечивает смещение нейтрального слоя на край сечения ($c=0,5s$), то радиус пуансона R_n можно определить по радиусу детали R_d из уравнения, следующего из выражения (3.69):

$$R_n = R_d (1 - \Pi/E). \quad (3.71)$$

Опыт показывает, что гибка с растяжением за две операции с промежуточной термической обработкой (разупрочняющей) обеспечивает высокую точность деталей, и в этом случае пуансоны можно изготавливать по теоретическому контуру, т. е. непосредственно по ШК, снятым с плаза.

Корректировка кривизны пуансона упрощается, если это контур образуется из отдельных узких секторов, устанавливаемых по шаблону в пазах специальной плиты — основания. Такие универсальные наборные пуансоны изготавливаются из стали, расстояние между отдельными секторами принимается минимальным во избежание заметной огранки.

Более подробно о гибке профилей с тангенциальным растяжением можно узнать из книг [11, 22, 24].

На рис. 3.24, *а* показана схема варианта гибки трубы с тангенциальным растяжением путем протягивания через ручей разъемной матрицы 1. На исходной заготовке 3 образуется дно; внутрь трубы в качестве заполнителя вставляются резиновые шайбы 2. Труба втягивается в ручей матрицы, изгибаясь при этом силой P , действующей через внутренний наполнитель на дно заготовки. Давление, создающееся внутри трубы, предотвращает потерю устойчивости стенки на вогнутой части при гибке заготовки. Гибка по данной

схеме обеспечивает изготовление деталей с внутренним радиусом изгиба, равным диаметру заготовки и даже несколько меньшим.

На рис. 3.24, в приведен вариант гибки трубы с ее раздачей (увеличением диаметра) на оправке-пуансоне рогообразной формы. Деформирующее усилие действует на торец заготовки 3. Под действием этого усилия заготовка перемещается по оправке переменного диаметра 4, подвешенной на штанге 5, которая закреплена на верхней плите пресса. Сочетающееся с изгибом окружное растяжение (раздача) ослабляет опасность потери устойчивости стенки на вогнутой стороне за счет увеличения диаметра заготовки; вместо утолщения или образования складок происходит увеличение площади заготовки. Этот вариант процесса реализуется с нагревом трубы токами высокой частоты. Нагрев сплава Д16Т производится до 450°C , стали 1Х18Н10Т до 950°C . Процесс обеспечивает гибку труб по радиусу до 0,5 диаметра заготовки при небольшом перепаде толщин стенки и увеличение диаметра до 30% [9].

3.10. ГИБКА С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ СЖАТИЕМ

Совмещенный процесс гибки с тангенциальным сжатием (см. рис. 1.3) применяют, чтобы уменьшить деформации растяжения на выпуклой стороне заготовки и тем самым обеспечить гибку по малому радиусу. Одновременно, как и при гибке с растяжением, гибка со сжатием дает лучшие показатели по точности деталей за счет уменьшения пружинения. Усилие P (рис. 3.25), воздействующее на торцы профиля, осуществляет его сжатие и «догибание», в результате чего внутренний радиус гибки уменьшается.

Целый ряд теоретических положений по гибке с растяжением (определение сил и моментов, остаточных радиусов и углов пружинения) справедлив и для гибки со сжатием. Если сила тангенциального сжатия (равна $\sigma_s F$) такова, что нейтральный слой смещается от среднего слоя на расстояние $c = 0,5s$, то деформация сжатия распространяется по всему сечению, опасность разрушения устраняется совершенно и радиус изгиба при применении листовых материалов можно довести до значений, меньших толщины заготовки.

Гибку со сжатием можно применять также и для труб и прессо-

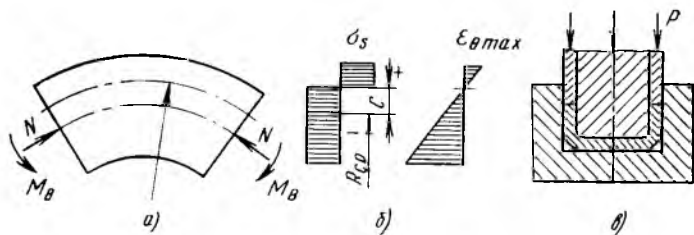


Рис. 3.25. Гибка с тангенциальным сжатием:

а—схема приложения внешних нагрузок; б—эпюры напряжений и деформаций; в—схема калибровки сжатием

ванных профилей. Профили со сложным сечением подвергают гибке путем проталкивания через криволинейный ручей, при этом в очаге деформаций возникают напряжения, характерные для гибки со сжатием (см. рис. 3.24, б). Однако дополнительное сжатие полков, обращенных к центру кривизны, может вызвать потерю устойчивости (образование складок); для предотвращения складок необходимо установить прижимы или вводить полки профиля в калиброванный зазор штампа.

3.11. ГИБКА С РАДИАЛЬНЫМ СЖАТИЕМ

Гибка с радиальным сжатием (см. рис. 1.3) как технологический процесс стал распространяться сравнительно недавно в связи с необходимостью изготовления листовых деталей повышенной жесткости с малым радиусом изгиба. Вспомним, что деформации при гибке листовых заготовок ограничиваются разрывом наружных волокон на выпуклой стороне, где действуют тангенциальные деформации и напряжения максимального значения; напряжения растяжения здесь равны пределу текучести σ_s , что следует из уравнения пластичности (3.4) при $\sigma_\theta = 0$. Схема напряженного состояния материала на выпуклой стороне — двухстороннее растяжение — неблагоприятная для пластического деформирования. Поэтому дополнительное сжатие свободной поверхности заготовки в радиальном направлении обеспечивает повышение предельных степеней деформаций и уменьшение минимального радиуса изгиба [12].

Для расчета параметров процесса может быть использовано решение задачи по определению напряжения σ_θ и σ_θ для элементарной операции гибки. Разница будет лишь в граничных условиях, из которых определяется постоянная интегрирования C в уравнении (3.6). Раньше мы принимали, что $\sigma_\theta = 0$ при $\varrho = R_H$ (для растянутой стороны), а теперь при $\varrho = R_H$ надо принять $\sigma_\theta = -q$ (рис. 3.26). Принимаем, что третье напряжение σ_z , действующее вдоль линии изгиба, является средним главным напряжением. На основе изложенного радиальное напряжение σ_ϱ , определяемое для элементарной операции гибки уравнением (3.7), для совмещенного процесса гибки с радиальным сжатием будет определяться уравнением

$$\sigma_\varrho = -\left(\sigma_s \ln \frac{R_H}{\varrho} + q\right). \quad (3.72)$$

Тангенциальное напряжение

$$\sigma_\theta = \sigma_s - \left(\sigma_s \ln \frac{R_H}{\varrho} + q\right). \quad (3.73)$$

Из последнего уравнения видно, что тангенциальное напряжение растяжения σ_θ в данном случае меньше, чем при обычной гибке [см. уравнение (3.8)]. На внешнем растянутом волокне опасность образования трещины при гибке по малому радиусу умень-

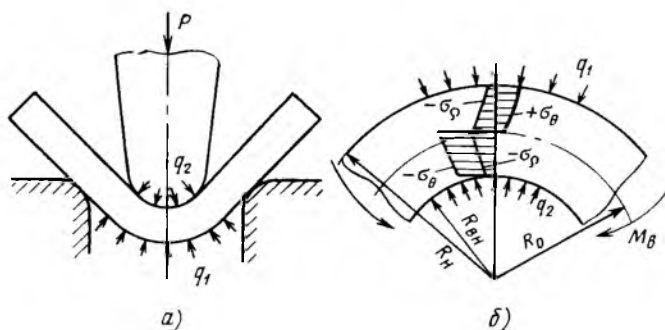


Рис. 3.26. Схема гибки с радиальным сжатием (а) и эпюра напряжений (б)

шается; при гибке с радиальным сжатием на основе уравнения (3.73) при $q=R_H$

$$\sigma_\theta = \sigma_s - q. \quad (3.74)$$

При данном совмещенном процессе не только уменьшается напряжение растяжения в опасной зоне, но и улучшается также схема напряженного состояния, увеличивается гидростатическое давление, повышающее пластичность металла. Нейтральный слой смещается в сторону сжатых волокон.

Следуя изложенной методике, можно далее рассчитать все параметры процесса: силовые, технологические, точностные. Технические средства гибки со сжатием могут быть различными: противодействие со стороны нижнего привода, чеканка углового участка в глухой матрице и др.

3.12. ДРУГИЕ СОВМЕЩЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ГИБКИ

Другие совмещенные процессы гибки, показанные на рис. 1.3, также способствуют расширению технологических возможностей операции в различных направлениях, таких как уменьшение радиуса изгиба, предотвращение потери устойчивости, повышение стабильности приданной внешними нагрузками формы деталей, сохранение формы и размеров сечений и др.

Гибка с радиальным растяжением трудноосуществима технически; некоторую аналогию можно провести с гибкой трубных заготовок, находящихся под высоким внутренним давлением. Этот совмещенный процесс не имеет производственного распространения и не подвергался подробному исследованию. Радиальные растяжения здесь будут уменьшать на участках, наиболее удаленных от нейтрального слоя, радиальное сжатие, напряжения σ_r по высоте сечения могут изменять знак: растяжение на внешних волокнах выпуклой и вогнутой сторон и сжатие в зоне нейтрального слоя. На выпуклой стороне (растянутой) предельно допустимая деформация

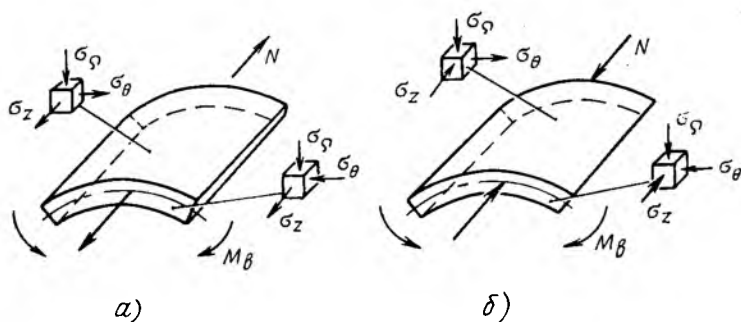


Рис. 3.27. Схемы гибки:

а—с осевым растяжением; б—с осевым сжатием

уменьшается, а на вогнутой — увеличивается. Нейтральный слой смещается в сторону растянутых волокон.

Практический интерес представляют совмещенные процессы гибки с осевым растяжением и сжатием (вдоль линии изгиба), особенно последний вариант, где дополнительное сжатие по ширине заготовки обеспечивает повышение гидростатического давления в очаге деформаций. На рис. 3.27 показаны схемы напряженного состояния в различных зонах заготовки. При гибке с осевым сжатием в опасной зоне на выпуклой стороне схема напряженного состояния улучшается и возможна гибка по меньшему радиусу.

Еще большими возможностями могут располагать тройные совмещения элементарных операций, показанные на рис. 1.3, в.

Совмещенные процессы гибки изучены еще недостаточно; наиболее полно это направление листовой штамповки освещено в работах [31, 12].

3.13. ГИБКА РАСКАТКОЙ

Гибка раскаткой — это неравномерное утонение заготовки, вследствие чего создается неравномерное удлинение волокон в тангенциальном направлении и возникает изгиб заготовки. На основе уравнения (3.2) можно заключить, что если каким-либо способом удастся увеличить длину волокон заготовки с одной стороны и укоротить с другой на относительную величину ϵ_0 , то заготовка примет кривизну $1/R_0 = 2\epsilon_0/s$. На практике это достигается путем разводки и посадки материала на специализированном доводочном оборудовании; в качестве заготовок могут быть профили, например, уголкового сечения, полосы, изгибаемые на ребро, и трубы.

На рис. 3.28 показаны некоторые схемы гибки раскаткой полос. Кривизна деталей, показанных в нижней части схем, определяется деформацией ϵ_n по толщине, ее величиной и распределением по ширине полосы.

Наряду с перечисленными методами гибки в последнее время получают распространение: гибка профилей и труб с неравномерным нагревом по высоте сечения, гибка труб с калибровкой внут-

(3.2) $\epsilon_{\max} = \frac{1}{2R_0} = \frac{1}{2R_0}$

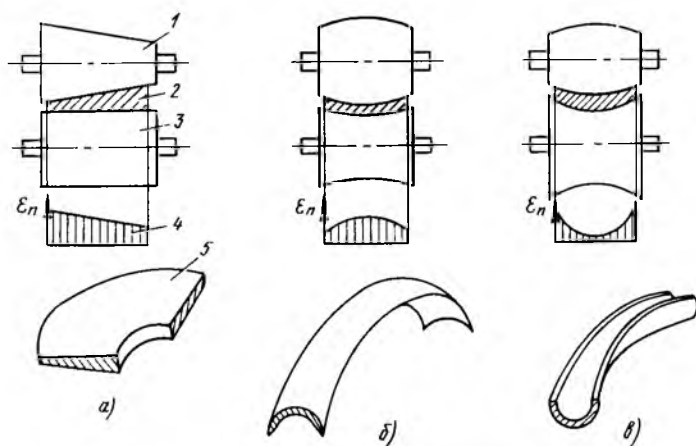


Рис. 3.28. Схемы гибки раскаткой

ренным давлением, более сложные совмещенные процессы. Распространенными операциями в производстве самолетов являются подсечка и малковка прессованных профилей, которые можно также отнести к гибочным операциям.

ГЛАВА 4 ВЫТЯЖКА

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Операция вытяжки является первой формоизменяющей операцией по классификации, показанной в табл. 1.1. Очаг деформаций кольцевой формы нагружен внешним усилием — растяжением по внутренней его границе. Формоизменение плоской или пространственной заготовки в полую деталь происходит за счет уменьшения диаметра заготовки путем приложения в меридиональном направлении растягивающих напряжений от воздействия внешней силы P .

Для достижения необходимых диаметра и высоты детали вытяжку можно производить за одну, две или несколько операций. На рис. 4.1 приведены схемы операций вытяжки.

Как следует из схемы рис. 4.1, *а*, при первой операции плоская круглая заготовка 4, лежащая на матрице 1, проталкивается опускающимся пуансоном 3 в полость матрицы и принимает в конце операции форму круглого цилиндрического стакана. Для предотвращения потери устойчивости заготовки при уменьшении ее диаметра на нее через прижим 2 воздействует сила Q . Выходя из-под прижима, заготовка изгибается по ребру матрицы и, переходя в полость матрицы, образует стенку детали.

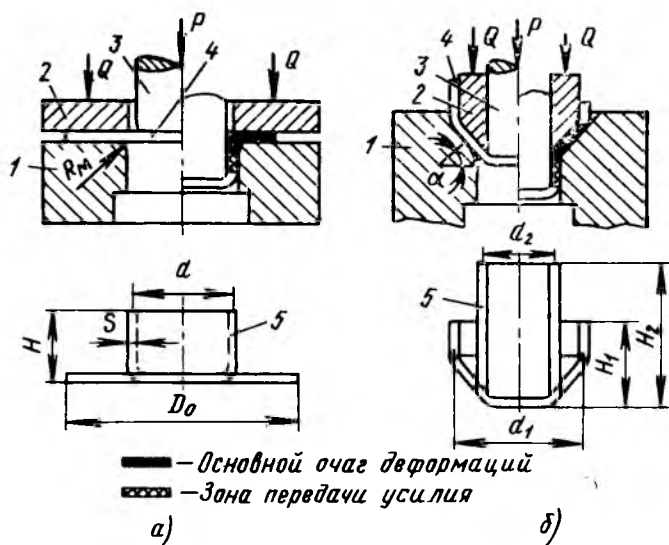


Рис. 4.1. Технологические схемы вытяжки:

а—первая операция; б—вторая и последующие операции; 1—матрица; 2—прижим; 3—пуансон; 4—заготовка; 5—деталь

При второй и последующих операциях вытяжки (см. рис. 4.1, б) заготовкой 4 является цилиндрический стакан, который в результате операции формообразования превращается в деталь 5 меньшего диаметра, но большей высоты. При этих операциях рабочие элементы штампа отличны от рабочих элементов штампа первой операции, что обуславливается формой заготовки.

Вытяжкой изготавливаются разнообразные детали (рис. 4.2). Они разделяются на детали, имеющие форму тел вращения и детали коробчатой и более сложной форм. В производстве летательных аппаратов вытяжка применяется для изготовления днищ баков, полусфер шаровых баллонов, обтекателей воздушных винтов, передних отсеков подвесных баков, законцовок крыльев, киля и

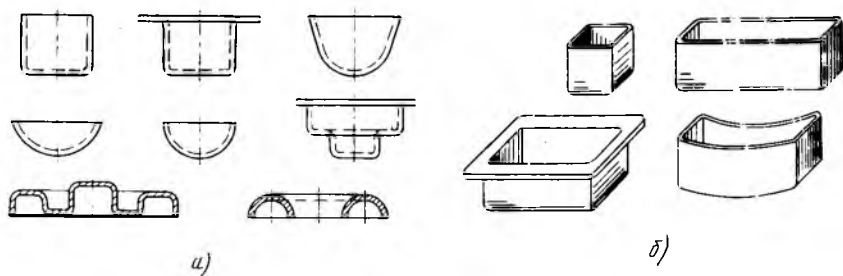


Рис. 4.2. Детали, изготавливаемые вытяжкой:

а—осесимметричные; б—коробчатые

стабилизатора, деталей капота и гондол двигателей, различного вида кожухов и колпачков, корпусов приборов и др. Вытяжка сопровождается большой деформацией и поэтому применяется только для металлов, обладающих хорошими пластическими свойствами.

4.2. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВКИ

Как следует из схем вытяжки (см. рис. 4.1), усилие P ползуна пресса действует через пуансон на донную часть вытягиваемой детали, а затем через ее вертикальную стенку передается на фланец заготовки. Фланец, перемещаясь в полость матрицы, оказывает сопротивление, обусловливаемое сопротивлением металла деформированию и силами трения, возникающими на контактных поверхностях штампа и движущейся заготовки. Поэтому вертикальную стенку вытягиваемой детали принято называть *зоной передачи усилия*, а фланец — *основным очагом деформаций*; в последующих операциях основным очагом деформаций будет уже участок заготовки, лежащий на конической поверхности матрицы (см. рис. 4.1, б). Усилие вытяжки, передаваемое через вертикальную стенку, в общем виде можно выразить как

$$P = P_d + P_{тр} + P'_{тр} + P_{изг}, \quad (4.1)$$

где P_d — усилие, затрачиваемое на преодоление сопротивления металла деформированию; $P_{тр}$ и $P'_{тр}$ — усилие, затрачиваемое на преодоление сил трения соответственно на плоской части матрицы (под прижимом) и на ребре матрицы (в зоне радиуса R_m , см. рис. 4.1, а); $P_{изг}$ — усилие, затрачиваемое на изгиб и спрямление заготовки на ребре матрицы.

Так как зазор между пуансоном и матрицей больше толщины заготовки, трение в зазоре не учитывается.

Если каждое из усилий в уравнении (4.1) разделить на площадь сечения стенки, равную πds , то получим действующее в стенке напряжение $\sigma_{ст}$ и напряжения, из которых оно складывается:

$$\sigma_{ст} = \sigma_d + \sigma_{тр} + \sigma'_{тр} + \sigma_{изг}. \quad (4.2)$$

Здесь σ_d — напряжение, обусловленное сопротивлением металла деформированию; $\sigma_{тр}$ и $\sigma'_{тр}$ — напряжения, обусловленные трением на плоской части и на ребре матрицы соответственно; $\sigma_{изг}$ — напряжение, обусловленное изгибом заготовки по ребру матрицы. На рис. 4.3 показаны направления действия этих напряжений; если трение на ребре матрицы учесть коэффициентом Эйлера, то уравнение (4.2) примет вид

$$\sigma_{ст} = (\sigma_d + \sigma_{тр} + \sigma_{изг}) e^{\mu \alpha}. \quad (4.3)$$

Каждую составляющую напряжения $\sigma_{ст}$ можно определить аналитическим путем при определенных упрощающих допущениях. Напряженное состояние в основном очаге деформаций обычно по-

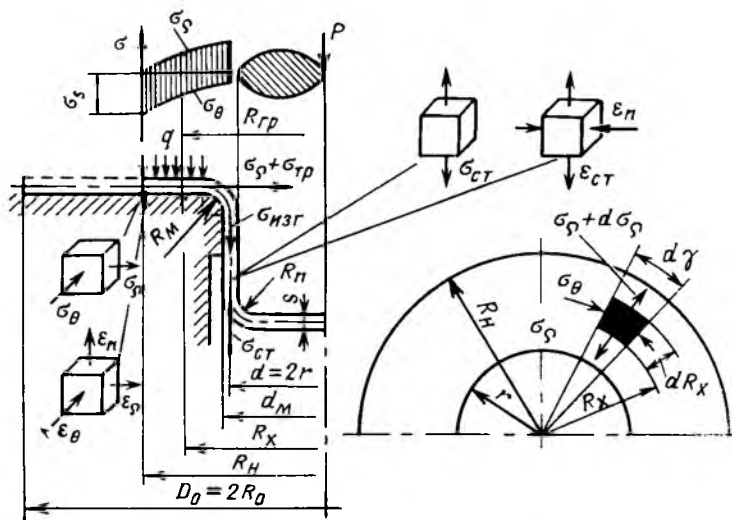


Рис. 4.3. Напряженно-деформированное состояние плоской заготовки при вытяжке

лагают плоским; учитывают тангенциальные (окружные) σ_θ и радиальные (меридиональные) σ_r напряжения, а напряжения по толщине заготовки от воздействия прижима ввиду их малости приравнивают нулю. Толщину заготовки считают неизменной и равной исходной толщине s . При этих условиях распределение напряжений по очагу деформаций определяется путем совместного решения уравнения равновесия малого участка, выделенного в очаге деформаций, и уравнения пластичности. На рис. 4.3 справа показан малый участок заготовки, ограниченный двумя радиальными сечениями, отстоящими друг от друга на угол $d\gamma$ и двумя окружными сечениями, разделенными малым приращением радиуса dR_x .

Запишем условие равновесия выделенного участка в системе полярных координат, спроецировав силы на радиус, проходящий через центр участка, и приравняв сумму сил нулю. Силы, действующие на участок, равны напряжениям, умноженным на соответствующие площади. Напряжение σ_θ действует на площади $dR_x s$, напряжение σ_r — на площади $R_x d\gamma s$, а $\sigma_r + d\sigma_r$ — на площади $(R_x + dR_x) d\gamma s$ [см. рис. 4.3]. С учетом этого уравнения равновесия можно записать в виде

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(R_x + dR_x)d\gamma s - \sigma_r R_x d\gamma s + 2\sigma_\theta dR_x s \sin \frac{d\gamma}{2} = 0. \quad (4.4)$$

Раскрыв скобки и учитывая, что для малых углов $\sin \frac{d\gamma}{2} \approx \frac{d\gamma}{2}$, получим уравнение

$$\frac{d\sigma_r}{dR_x} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{R_x} = 0. \quad (4.5)$$

Уравнение пластичности без учета упрочнения при плоском напряженном состоянии заготовки, когда напряжения имеют разные знаки ($\tau_Q \tau_\theta < 0$), запишем в следующем виде:

$$\sigma_Q - \sigma_\theta = \sigma_s. \quad (4.6)$$

Совместное решение уравнений (4.5) и (4.6) дает соотношения

$$d\tau_Q = -\sigma_s \frac{dR_x}{R_x}; \quad \sigma_Q = -\sigma_s \int \frac{dR_x}{R_x}, \quad (4.7)$$

Произведя интегрирование и определив постоянную интегрирования из условия, что на свободной кромке заготовки при $R_x = R_n$ (см. рис. 4.3) напряжение $\sigma_Q = 0$, получим:

$$\tau_Q = \sigma_s \ln \frac{R_n}{R_x}. \quad (4.8)$$

Тангенциальное напряжение σ_θ определяется из уравнения пластичности (4.6), если в него подставить значение σ_Q :

$$\sigma_\theta = -\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_n}{R_x} \right). \quad (4.9)$$

Задаваясь разными значениями R_x в пределах от r до R_n , можно определить характер распределения напряжений τ_Q и σ_θ по фланцу вытягиваемой детали. На рис. 4.3 над фланцем показано изменение напряжений с изменением R_x . Напряжение изменяется от нуля до максимального в зоне перехода в вертикальную стенку ($R_x = r$), равного

$$\sigma_{Q \max} = \sigma_s \ln (R_n/r). \quad (4.10)$$

Значение $\sigma_{Q \max}$ неодинаково на разных стадиях процесса вытяжки, которые можно характеризовать отношением радиуса R_n свободной кромки заготовки к радиусу R_0 заготовки. Из уравнения (4.10) видно, что чем более поздняя стадия процесса рассматривается, т. е. чем меньше R_n , тем ниже значение $\sigma_{Q \max}$. Поэтому запишем уравнение (4.10) при начальном моменте операции, когда R_n имеет наибольшее значение и равно R_0 . Тогда

$$\sigma_{Q \max} = \sigma_s \ln (R_0/r) = \sigma_s \ln (1/m), \quad (4.10a)$$

где $m = r/R_0 = d/D_0$ — коэффициент вытяжки, который характеризует степень формоизменения заготовки.

Именно это значение $\tau_{Q \max}$ следует подставлять в уравнение (4.3), определяющее напряжение $\sigma_{\text{ст}}$ в стенке вытягиваемой детали.

Для определения $\sigma_{\text{тр}}$ необходимо определить силу трения на поверхности контакта фланца со штампом и разделить ее на площадь сечения вертикальной стенки. Сила трения возникает при контакте заготовки с матрицей и с прижимом, поэтому примем ее удвоенное значение $2\mu Q$ (см. рис. 4.1 и 4.3). Тогда

$$\sigma_{\text{тр}} = \frac{2\mu Q}{\pi d s}. \quad (4.11)$$

Общее усилие Q прижима можно выразить через давление q . Площадь F заготовки, на которую прижим оказывает давление, условно принимается равной начальной площади заготовки, находящейся на плоской части матрицы (см. рис. 4.3):

$$F = \frac{\pi [D_0^2 - (d_m + 2R_m)^2]}{4},$$

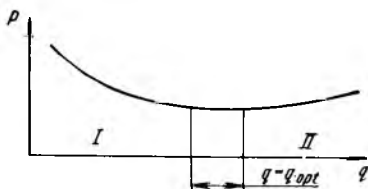


Рис. 4.4. Зависимость усилия P вытяжки от давления q прижима

Здесь R_m — радиус закругления ребра матрицы.

Тогда уравнение (4.11) можно окончательно переписать как

$$\sigma_{тр} = \frac{\mu q [D_0^2 - (d_m + 2R_m)^2]}{2ds}. \quad (4.12)$$

Гораздо труднее определить давление q . Значение q должно быть минимальным, чтобы не перегружать вертикальную стенку и не повышать усилие P вытяжки, но и достаточным, чтобы предотвратить образование складок (потерю устойчивости) на фланце. В такой постановке эта задача весьма сложна и не рассматривается в настоящей книге. В условиях производства минимально необходимое давление определяется путем проведения пробных вытяжек при разном давлении q с регистрацией максимальных значений усилия P ; при этом выявляется зависимость P от q , характер которой показан на рис. 4.4. При значении $q = q_{opt}$, как показано, усилие P имеет наименьшее значение; q_{opt} разделяет график на зоны I и II, в которых усилие P повышается. В зоне I при недостаточном давлении q фланец теряет устойчивость, образуются складки, при устранении которых в зазоре между пуансоном и матрицей усилие P повышается; в зоне II усилие P возрастает пропорционально увеличению q , так как с увеличением давления q сила трения увеличивается. Следовательно, q_{opt} является оптимальным или минимально необходимым давлением, при котором складки не образуются и трение мало сказывается на силовом режиме операции; именно это значение q и принимается при определении $\sigma_{тр}$ по уравнению (4.11). Для алюминиевых сплавов АМ, АМц, Д16-М, В95А-М значение q лежит в пределах 0,8...1,6 МПа, для малоуглеродистых сталей — в пределах 2,0—2,5 МПа, а для коррозионно-стойких сталей — до 4 МПа. Небольшие значения q_{opt} по сравнению с σ_s для тех же материалов подтверждают справедливость того, что напряженное состояние в очаге деформаций при вытяжке принимается плоским.

Однако воздействие прижима не всегда необходимо. Толстостенные заготовки вытягиваются совершенно без образования складок на фланце или с образованием лишь небольшой волнистости, которая уничтожается при изгибе заготовки по ребру матрицы и при калибровке детали в зазоре между пуансоном и матрицей. На прак-

тике вытяжку производят без прижима, если относительная толщина заготовки $s/D_0 > 0,02$ (более 2%); при меньшей относительной толщине вытяжка производится с прижимом.

Последнее слагаемое $\sigma_{изг}$ в уравнении (4.3), учитывающее изгиб заготовки на входе на перетяжное ребро с радиусом R_m (см. рис. 4.3) и спрямление при сходе с него, зависит от относительного радиуса изгиба R_m/s и свойств материала (σ_s). В соответствии с исследованиями Е. А. Попова [31] это слагаемое выражается уравнением (4.13), которое мы даем без вывода:

$$\sigma_{изг} = \frac{\sigma_s s}{2R_{cp}} = \frac{\sigma_s s}{2R_m + s}, \quad (4.13)$$

где R_{cp} — средний радиус изгиба.

Данное решение задачи о распределении напряжений по очагу деформаций носит приближенный характер; в решении не учтено изменение толщины заготовки, упрочнение металла, а трение учтено лишь при подсчете напряжений на внутренней границе очага деформации.

С учетом всех слагаемых напряжение $\sigma_{ст}$, равное $\sigma_{d \max}$, будет определяться уравнением

$$\sigma_{ст} = \sigma_{d \max} = \left\{ \sigma_s \ln \frac{1}{m} + \frac{\mu q [D_0^2 - (d_m + 2R_m)^2]}{2ds} + \frac{\sigma_s s}{2R_m + s} \right\} e^{\mu \alpha}. \quad (4.14)$$

Знание напряженного состояния дает возможность установить примерную картину деформированного состояния в очаге деформаций. Уравнение, связывающее напряжение с деформациями, для плоского напряженного состояния имеет вид [38]:

$$\frac{\sigma_Q}{\sigma_\theta} = \frac{\epsilon_Q - \epsilon_n}{\epsilon_\theta - \epsilon_n}. \quad (4.15)$$

Радиальная деформация ϵ_Q определяется из условия постоянства объема:

$$\epsilon_\theta + \epsilon_Q + \epsilon_n = 0. \quad (4.16)$$

Тогда

$$\frac{\sigma_Q}{\sigma_\theta} = - \frac{\epsilon_\theta + 2\epsilon_n}{\epsilon_\theta - \epsilon_n} \quad (4.17)$$

или

$$\epsilon_n = - \frac{1 - \sigma_Q/\sigma_\theta}{2 - \sigma_Q/\sigma_\theta} \epsilon_\theta. \quad (4.18)$$

Если на протяжении всего процесса для отдельных элементов очага деформаций сохраняется постоянным отношение σ_Q/σ_θ , то на основе уравнений связи можно для них определить соответствующие деформации.

В случае, когда отношение σ_Q/σ_θ по ходу процесса не остается постоянным, деформация ϵ_n может быть определена, если принять σ_Q/σ_θ равным среднему значению этого отношения в заданном промежутке изменения R_x [т. е. $\sigma_Q/\sigma_\theta = (\sigma_Q/\sigma_\theta)_{cp}$].

Практическое значение имеет знание изменения толщины заготовки в процессе вытяжки; уравнение (4.18) дает такую возможность, так как оно связывает деформацию ϵ_n (по толщине) с окружной деформацией ϵ_θ , которая может быть задана отношением радиусов для определенной стадии процесса или для конечной стадии. Окружная деформация сжатия при вытяжке является максимальной; при переходе любого волокна фланца, фиксируемого радиусом R_x , в стенку изделия волокно укорачивается до радиуса r , подвергаясь относительной деформации

$$\epsilon_{\theta x} = (r - R_x)/R_x = -(1 - r/R_x).$$

Максимальной деформации ϵ_θ подвергается кромка заготовки, переходя с радиуса R_0 на радиус r :

$$\epsilon_{\theta \text{кр}} = -(1 - r/R_0) = -(1 - m).$$

С уменьшением коэффициента вытяжки m степень формоизменения и степень тангенциальной деформации увеличиваются.

Зная окружную деформацию, можно определить толщину детали в конечной стадии деформирования. Для свободной кромки $\sigma_\theta = 0$ на протяжении всего процесса $\sigma_\theta/\sigma_\theta = 0$, поэтому из (4.18) следует

$$\epsilon_n = -\frac{1}{2} \epsilon_\theta.$$

Деформации ϵ_n и ϵ_θ более точно можно выразить логарифмическими деформациями: $\epsilon_n = \ln \frac{s_{\text{кр}}}{s}$; $\epsilon_\theta = \ln \frac{r}{R_0}$. Подставляя эти выражения в последнюю формулу, получим:

$$\ln \frac{s_{\text{кр}}}{s} = -\frac{1}{2} \ln \frac{r}{R_0} = \frac{1}{2} \ln \frac{R_0}{r}; \quad s_{\text{кр}} = \frac{s}{\sqrt{m}}. \quad (4.19)$$

Анализируя напряженное состояние фланца, можно заметить, что в определенной зоне соблюдается равенство $\sigma_\theta = -\sigma_\theta$. Обозначим радиус, на котором соблюдается это условие, $R_{\text{гр}}$ (см. рис. 4.3). Тогда при $R_x > R_{\text{гр}}$ соблюдается $|\sigma_\theta| > |\sigma_\theta|$ и ϵ_n — положительна, т. е. здесь имеет место утолщение; при $R_x < R_{\text{гр}}$, напротив, $|\sigma_\theta| > |\sigma_\theta|$ и ϵ_n — отрицательна, т. е. здесь происходит утонение заготовки; при $R_x = R_{\text{гр}}$ $\epsilon_n = 0$ и $s_{\text{гр}} = s$ — толщине исходной заготовки.

Приравняв уравнения (4.8) и (4.9), получим $R_{\text{гр}} = 0,61 R_n$; умножив и разделив правую часть на r , получим $R_{\text{гр}} = 0,61 (mr)$. Следовательно, при $m < 0,61$ фланец разделяется на две упомянутые зоны.

Итак, стенка вытянутого стакана будет иметь переменную толщину; вблизи донной части $s_{\text{ст}} < s$, вблизи кромки $s_{\text{ст}} > s$, и эти две зоны разделяет сечение, где $s_{\text{ст}} = s$. Стенка как зона передачи усилия в очаг деформаций испытывает меридианальное растяжение; пластические деформации здесь вредны, они утоняют стенку и могут привести к отрыву дна.

В донной части заготовки возникает двустороннее растяжение, однако большое трение на ребре пуансона блокирует эту зону и толщина здесь остается примерно равной исходной.

При выполнении второй и последующих операций вытяжки (см. рис. 4.1, б) напряженно-деформированное состояние заготовки имеет отличительные особенности, которые обусловлены формой очага деформаций заготовки, неравномерной ее толщиной и неравномерностью свойств деформированного металла. Здесь возрастает влияние изгиба, на входе и при выходе из очага деформации заготовка должна изогнуться и спрямиться; возрастает также влияние изгиба заготовки в тангенциальном направлении. При небольших размерах деталей решение задачи по определению поля напряжений по безмоментной теории оболочек является приближенным. Однако в очаге деформаций (см. конический кольцевой участок с границами d_1 и d_2 на рис. 4.1, б) изгиб и спрямление заготовки качественно не изменяют распределение напряжений, которые приближенно можно определить по уравнениям (4.8) и (4.9). Максимальное меридиональное напряжение на внутренней границе очага деформаций будет равно:

$$\sigma_{Q \max} = \sigma_s \ln(d_1/d_2) = \sigma_s \ln(1/m'), \quad (4.20)$$

где $m' = d_2/d_1$ — коэффициент второй и последующих операций вытяжки.

При расчете $\sigma_{Q \max}$, которое определяет технологические возможности операции, можно, как и в предыдущем случае, учесть другие сопротивления: трение на конической поверхности очага деформаций (от d_2 до d_1) слагаемым $\sigma_r = \frac{2\mu Q}{\pi d_2 s}$, на сходе с ребра матрицы путем множителя $e^{\mu\alpha}$ (α — угол охвата заготовкой кромки матрицы) и сопротивление изгиба слагаемым, взятым по уравнению (4.13).

4.3. УСИЛИЕ ВЫТЯЖКИ И ПРИЖИМА

Усилие вытяжки определяется произведением напряжения $\sigma_{ст}$, отыскиваемого по уравнению (4.14), и площади сечения стенки вытягиваемой детали, т. е.

$$P = \left[\sigma_s \ln \frac{1}{m} + \frac{\mu q [D_0^2 - (d_m + 2R_m)^2]}{2ds} + \frac{\sigma_s s}{2(R_m + 0,5s)} \right] e^{\mu\alpha} \pi ds. \quad (4.21)$$

При первой операции — вытяжке плоской заготовки — стационарной стадии нет, очаг деформаций здесь непрерывно сокращается, а вместе с тем по ходу операции изменяется и усилие P . В начале операции усилие возрастает от нуля до максимума, который имеет место после того, как пуансон пройдет примерно 15...20% своего рабочего хода. Усилие P начинает уменьшаться не сразу, так как упрочнение металла некоторое время удерживает его на высоком уровне. Но после значительного уменьшения диа-

метра фланца заготовки усилие уменьшается и в конце хода пуансона равно усилию проталкивания детали через отверстие матрицы.

Уравнение (4.21) не учитывает упрочнения металла и справедливо лишь для идеально пластичного металла, например при деформировании нагретой заготовки. Упрочнение можно учесть, если σ_s в уравнении (4.21) заменить истинным сопротивлением металла деформированию, соответствующим средней тангенциальной деформации $\varepsilon_{\theta \text{ ср}}$ фланца, которую можно определить [42] как

$$\varepsilon_{\theta \text{ ср}} = 1 - 0,5 \left(\frac{R_H}{R_0} + \frac{m}{\sqrt{1 + m^2 - (R_H/R_0)^2}} \right), \quad (4.22)$$

Тогда среднее сопротивление деформированию при упрочнении по линейному закону определится по формуле

$$\sigma_{s \text{ ср}} = \sigma'_s + \Pi \varepsilon_{\theta \text{ ср}} = \sigma'_s + \Pi \left[1 - 0,5 \left(\frac{R_H}{R_0} + \frac{m}{\sqrt{1 + m^2 - (R_H/R_0)^2}} \right) \right]. \quad (4.23)$$

Для расчета $\sigma_{s \text{ ср}}$ нужно знать коэффициент вытяжки, а относительное уменьшение фланца R_H/R_0 можно принять равным 0,8, что примерно соответствует максимальному значению усилия вытяжки.

Если вытяжка производится без прижима, то $\sigma_{тп} = 0$ и уравнение (4.21) примет вид

$$P = \left[\sigma_s \ln \frac{1}{m} + \frac{\sigma_s s}{2(R_M + 0,5s)} \right] e^{\mu \pi ds}. \quad (4.24)$$

В условиях производства усилие определяют при помощи более простых зависимостей. Можно, например, определить необходимое усилие исходя из несущей способности вертикальной стенки:

$$P = \sigma_s \pi ds \quad \text{или} \quad P = \sigma_{нп} \pi dsc. \quad (4.25)$$

Если на заготовку будет действовать усилие, достаточное, чтобы ее разрушить, то оно будет тем более достаточно, чтобы вытянуть заготовку без разрушения.

Принимаются следующие значения коэффициента: $c = 1$ при $m = 0,5 \dots 0,55$; $c = 0,5$ при $m = 0,75 \dots 0,80$. Можно положить, что между этими крайними значениями m коэффициент c изменяется по линейному закону.

Уравнение (4.24) справедливо не только для первой операции вытяжки, но и для последующих, однако с учетом соответствующего изменения свойств металла в результате предыдущей деформации.

Давление Q прижима определяется произведением $q_{\text{opt}} F$, где F — площадь заготовки, находящаяся под прижимом в начальный момент вытяжки:

$$Q = q_{\text{opt}} F = q_{\text{opt}} \frac{\pi [D_0^2 - (d_M + 2R_M)^2]}{4}. \quad (4.26)$$

По ходу вытяжки фланец уменьшается, вследствие чего толщина заготовки, в особенности на кромке, увеличивается и плоский прижим с некоторого момента начинает передавать давление только на сравнительно узкий периферийный участок фланца; поэтому подсчет давления Q по уравнению (4.26) дает условную расчетную величину.

При последующих операциях вытяжки давление Q прижима также определяется произведением $q_{\text{опт}}F$, однако площадью здесь будет горизонтальная проекция действительной площади контакта прижима с поверхностью матрицы.

Как следует из уравнения (4.21), в силовом режиме большую роль играют силы трения; они перегружают стенку детали, и технологические возможности операции снижаются. Доля сил трения в общем усилии вытяжки, регистрируемом на пуансоне, изменяется с изменением коэффициента трения: при $\mu=0,05$ силы трения составляют около 20%; а при $\mu=0,2$ — около 50% от общего усилия.

Уменьшение сил трения достигается повышением чистоты поверхности рабочих элементов штампа и применением эффективной смазки. Поверхности рабочих элементов шлифуют, а часто и полируют. В качестве смазки для алюминиевых заготовок применяются разные минеральные масла, технический вазелин, жидкое мыло; для стальных заготовок — минеральные масла, но с твердыми наполнителями — графитом и тальком. При вытяжке с нагретом заготовке применяются графитовые смазки.

Особо трудно подобрать смазку при вытяжке хромоникелевых жаропрочных сталей вследствие больших давлений, возникающих на контактных поверхностях. В этом случае применяют густую смазку с наполнителями, иногда заготовки предварительно подвергают покрытию хлорвиниловым лаком.

Чтобы уменьшить сопротивление движению заготовки в зазоре между матрицей и пуансоном, зазор принимают несколько большим толщины заготовки. При изготовлении деталей из алюминиевых сплавов односторонний зазор на всех переходах равен $(1,1 \dots 1,2)s$, а из сталей — $(1,15 \dots 1,3)s$, так как стальные листы имеют больший допуск на толщину. При значительной степени деформации кромка заготовки, утолщаясь существенно при уменьшении диаметра от D_0 до d , в конце хода пуансона несколько уточняется, проходя через зазор между пуансоном и матрицей.

4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА ЗАГОТОВОК

Вдоль радиуса фланца происходит деформация ϵ_0 положительного знака (соответствующая знаку напряжения σ_0), и поэтому диаметр заготовки не равен развертке детали, а имеет меньшее значение. Диаметр заготовки при вытяжке определяется из условия постоянства объема металла, участвующего в пластическом деформировании:

$$V_1 = V_0 \quad \text{или} \quad F_1 s_1 = F_0 s_0,$$

где V_0 , F_0 и s_0 — объем, площадь поверхности и толщина заготовки, а V_1 , F_1 и s_1 — объем, площадь поверхности и толщина детали.

Так как для круглых деталей площадь поверхности заготовки можно выразить через ее диаметр, получим:

$$F_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} \quad \text{и} \quad F_1 = \frac{\pi D_0^2}{4} \frac{s_0}{s_1} \quad (4.27)$$

Как показывает опыт, средняя толщина детали примерно равна исходной, а площадь поверхности сохраняется неизменной. Следовательно, если положить $s_1 \approx s_0$, то $F_1 \approx F_0$ и

$$D_0 = \sqrt{4F_1/\pi} = 1,12 \sqrt{F_1}. \quad (4.28)$$

Зная размеры детали, можно всегда определить площадь ее срединной поверхности F_1 по известным из геометрии формулам. На рис. 4.5, а показана деталь с фланцем; для подсчета площади поверхности образующая детали разделена на отдельные участки, площадь которых отыскивается по известным формулам, а полная поверхность детали определяется суммой площадей участков:

$$F_1 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5. \quad (4.29)$$

Детали могут иметь самую различную геометрическую форму, и здесь нет необходимости приводить формулы для определения площади их поверхности. Остановимся лишь на общем подходе к определению площади поверхности деталей, имеющих форму тел вращения. Прежде всего, из общего контура детали нужно выделить участки, для определения площади которых формулы известны. Сложные криволинейные контуры образующей детали нужно разбивать на такие по величине участки, чтобы в каждом из них криволинейный отрезок можно было заменить отрезком прямой, тогда задача сводится к определению поверхности цилиндра или усеченного конуса. В тех случаях, когда упростить задачу не удастся, можно пользоваться общим правилом определения площади поверхности тел вращения, которое заключается в том, что деталь вычерчивают в определенном масштабе и разделяют на отдельные участки; затем измеряют длину l отрезков образующей и определяют их центры масс (ц. м.); площадь F поверхности, образующаяся при вращении этих отрезков вокруг оси OO симметрии, определяется произведением (см. рис. 4.5, б)

$$F = 2\pi R_{ц.м.} l.$$

Здесь l — длина образующей; $R_{ц.м.}$ — расстояние центра масс образующей от оси вращения. Поверхность тела вращения равна

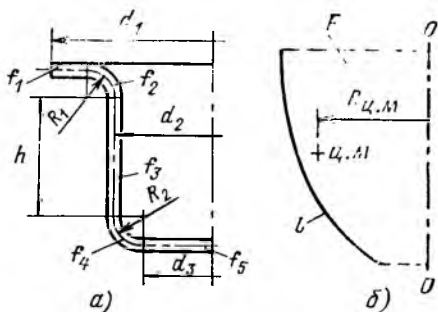


Рис. 4.5. Разделение детали на отдельные участки при определении площади ее поверхности:

а—деталь с фланцем; б—деталь с криволинейной образующей

длине его образующей, умноженной на длину окружности, которую описывает при вращении центр масс этой образующей. Если образующая является отрезком прямой, то ее центр масс находится в середине отрезка; положение центра масс дуги, стягиваемой заданным центральным углом, можно определить по геометрическим формулам или по таблицам, приведенным в справочной литературе [34].

Припуски на размеры заготовки, предусматриваемые для чистовой обрезки деталей по высоте или по диаметру фланца, принимаются также по данным справочников.

4.5. МИНИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЫТЯЖКИ И РАСЧЕТ ЧИСЛА ОПЕРАЦИЙ

Минимальные значения коэффициентов вытяжки характеризуют технологические возможности операции — относительную высоту вытягиваемой за одну операцию детали (под относительной высотой понимается отношение высоты H детали к диаметру d). Из схем операций вытяжки (см. рис. 4.1) видно, что в полость матрицы не может войти заготовка неограниченно большого диаметра, так как зона передачи усилия имеет определенную несущую способность. Если диаметр заготовки намного больше диаметра детали, то фланец окажет большее сопротивление, чем может выдержать вертикальная стенка, и она разрушится по опасному сечению.

Следовательно, операция вытяжки реализуется успешно лишь при определенных соотношениях диаметров заготовки и детали.

Вертикальная стенка вытягиваемой детали неодинакова по толщине и поэтому обладает переменной несущей способностью. Сечение с наименьшей толщиной стенки называется опасным сечением. Это сечение расположено в нижней части стакана — в зоне сопряжения дна с вертикальной стенкой, где $s_1 < s_0$ и металл мало упрочнен деформацией (ε_0 мала при R_x , близком к r), чем и определяется характер разрушения — отрыв дна стакана.

Минимальное значение коэффициентов вытяжки можно определить аналитическим путем. Обозначим эти коэффициенты через m_1 и m_2 соответственно для первой и последующих операций вытяжки. Если пренебречь утонением стенки и считать $s_1 \approx s_0 \approx s$, а допустимое значение усилия принять $P = \sigma_s \pi ds$, то из уравнения (4.21) можно определить минимальное значение коэффициента вытяжки m_1 . Можно упростить задачу и определить значение m_1 для идеальных условий, когда вредные сопротивления приняты равными нулю ($\mu = 0$; $\sigma_{изг} = 0$), а σ_s всюду одинаков ($P = 0$). В этих условиях уравнение (4.21) примет вид

$$P = \sigma_s \ln(1/m_1) \pi ds. \quad (4.30)$$

Если допустимое значение $P = \sigma_s \pi ds$, то коэффициент вытяжки m_1 будет иметь минимальное значение. Тогда уравнение (4.30) можно записать в виде

$$\sigma_s \pi ds = \sigma_s \ln(1/m_1) \pi ds. \quad (4.31)$$

$$\text{Отсюда} \quad \ln(1/m_1) = 1; \quad m_1 = (1/e) \approx 0,37. \quad (4.32)$$

Следовательно, при первой операции вытяжки в идеальных условиях можно сократить диаметр заготовки более чем в 2,5 раза. В реальных условиях это, конечно, недостижимо, так как трение, изгиб и упрочнение дополнительно нагружают опасное сечение заготовки, поэтому при $m_1=0,37$ может произойти разрушение. Практически реализуемый коэффициент m_1 первой операции вытяжки имеет несколько большее значение. Для наиболее пластичных металлов (АМ, АМц, сталь 20) минимальное значение коэффициента m_1 вытяжки лежит в пределах 0,5 ... 0,55; для материалов средней пластичности (АМг, Д16А-М, 1Х18Н9Т) в пределах 0,55 ... 0,60; для титановых сплавов, вытягиваемых с нагревом заготовки до температуры 400 ... 600° С, коэффициент $m_1=0,50 \dots 0,60$.

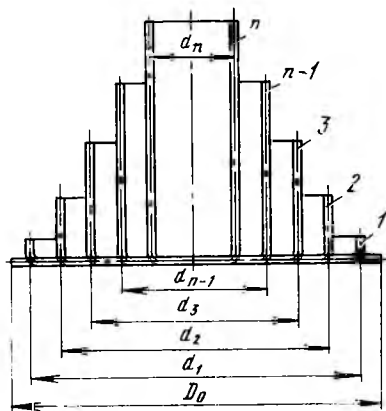


Рис. 4.6. Последовательность вытяжки цилиндрических деталей:

1, 2, 3, ..., $n-1$, n —формы детали после соответствующих операций

Если первая операция вытяжки не обеспечивает требуемого соотношения диаметра и высоты детали ($d/D_0 < m_1$), то для придания детали окончательных размеров производится несколько операций вытяжки. В каждой последующей операции диаметр детали сокращается пропорционально коэффициенту вытяжки m_2 ($d_n = m_2 d_{n-1}$), значение которого выше значения m_1 в первой операции. Снижение технологических возможностей вытяжки в последующих операциях объясняется упрочнением металла и утолщением стенки заготовки в результате предыдущих операций, а также увеличением продолжительности максимального усилия вытяжки на стадии стационарного протекания процесса, когда размер очага деформаций остается неизменным. Для тех же групп материалов коэффициент вытяжки m_2 последующих операций равен соответственно 0,75 ... 0,80; 0,80 ... 0,85 и 0,70 ... 0,80.

Зная минимальные значения m_1 и m_2 для первой и последующих операций, можно в каждом отдельном случае определить количество необходимых операций вытяжки для изготовления детали определенных размеров. Для этого необходимо по заданным размерам детали (d_n и h_n) определить диаметр D_0 заготовки и суммарный коэффициент вытяжки $m_* = d_n/D_0$. Примем, что суммарный коэффициент $m_* < m_1$ и что деталь требуемых размеров можно получить только за несколько операций вытяжки. Промежуточные размеры диаметров детали определяются выражениями (рис. 4.6):

$$d_1 = m_1 D_0; \quad d_2 = m_2 d_1 = m_2 m_1 D_0;$$

$$d_3 = m_2 d_2 = m_2^2 m_1 D_0; \quad d_4 = m_2 d_3 = m_2^3 m_1 D_0; \quad d_n = m_2^{n-1} m_1 D_0.$$

Количество операций n можно определить из последнего выражения:

$$\lg d_n = (n-1) \lg m_2 + \lg (m_1 D_0); \quad (4.33)$$

$$n = \frac{\lg d_n - \lg (m_1 D_0)}{\lg m_2} + 1.$$

Здесь диаметр детали d_n , минимальные значения коэффициентов m_1 и m_2 первой и последующих операций вытяжки для данного материала и диаметр заготовки D_0 известны.

Можно поступить проще: взять произведение $(m_1 m_2 m_2 \dots)$ из столькоких сомножителей, чтобы получить равенство

$$m_1 m_2 m_2 m_2 \dots = m_s = d_n / D_0. \quad (4.34)$$

Количество сомножителей должно соответствовать количеству n необходимых операций вытяжки.

Технологические возможности операций вытяжки деталей из одного и того же материала зависят от толщины заготовки: чем тоньше заготовка, тем меньшие деформации происходят за одну операцию, а значение коэффициента вытяжки m возрастает.

Коэффициент вытяжки m связан с высотой детали. Так, для детали без фланца (см. рис. 4.1, а) площадь F ее поверхности можно приближенно выразить суммой площадей дна диаметром d и боковой поверхности диаметром d при высоте H . Равенство площадей заготовки и поверхности детали дает

$$\frac{\pi D_0^2}{4} = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d H; \quad \frac{H}{d} = \frac{1 - m^2}{4m^2}.$$

Если $m=0,5$, то $H=0,75d$, а при $m=0,6$ высота $H=0,44d$, т. е. при увеличении m на 0,1 глубина вытяжки уменьшается в 1,7 раза.

В справочной литературе [34] коэффициенты вытяжки и предельная высота деталей, получаемых за одну операцию, дифференцированы по материалам, толщине заготовок, форме и конструкции деталей, что дает возможность более точно определить технологические и силовые параметры операции.

4.6. ОСОБЕННОСТИ ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ КОРОБЧАТОЙ ФОРМЫ

Вытяжка круглых деталей относится к случаю осесимметричного деформирования, когда напряжения и деформации зависят только от одного параметра — радиуса R_x (см. рис. 4.3); на заданном радиусе R_x напряжения постоянны по всей окружности, поэтому напряжение σ_θ , действующее в выделенном участке по двум граням, разделенным углом $d\gamma$, одинаково. Если деталь не осесимметрична, например имеет форму прямоугольной коробки, то во фланце происходит более сложное распределение напряжений, зависящее уже от двух координат (R_x и γ_x в полярных координатах

или x и y в прямоугольных); на гранях выделенного элемента будут возникать напряжения σ_0 , $\sigma_0 + d\sigma_0$, σ_y и $\sigma_y + d\sigma_y$ (рис. 4.7), и уравнение равновесия необходимо записывать уже в частных производных, что очень осложняет решение задачи по определению σ_0 и σ_y для любого сечения. При необходимости с методикой определения σ_0 и σ_y можно познакомиться в специальной литературе [17, 31]. Здесь мы рассмотрим лишь упрощенное представление о процессе вытяжки деталей коробчатой формы и приведем сведения, необходимые для расчетов технологических и силовых параметров.

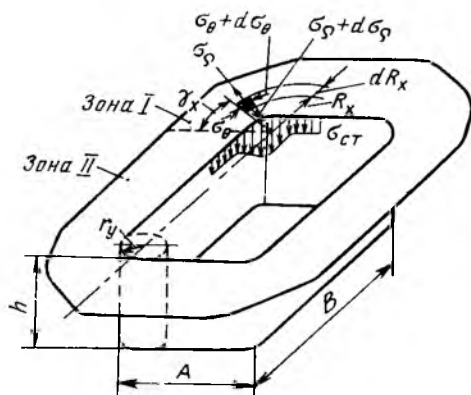


Рис. 4.7. Вытяжка детали коробчатой формы

На рис. 4.7 показана деталь коробчатой формы, условно находящаяся в процессе вытяжки. Плоская фланцевая часть детали, как и при вытяжке круглых деталей, является основным очагом деформаций, а вертикальная стенка — зоной передачи усилия. Напряжение в стенке $\sigma_{ст}$ также обуславливается сопротивлением деформированию $\sigma_{0 \max}$ и сопротивлениями трения $\sigma_{тр}$ и изгиба $\sigma_{изг}$. Однако при отсутствии осевой симметрии напряжение σ_0 при заданном R_x переменено и зависит от угла γ_x ; оно больше в зоне фланца, находящейся против радиуса углового закругления r_y и может быть равно нулю в зонах фланца, находящихся далеко от закруглений, против прямолинейных участков контура детали. Поэтому и напряжение $\sigma_{ст}$ по периметру стенки неодинаково (эпюра напряжений $\sigma_{ст}$ также показана на рис. 4.7).

При упрощенном рассмотрении процесса полагают, что при штамповке невысоких ($h \leq 0,3A$) прямоугольных и квадратных коробок вытяжка происходит лишь в угловых участках фланца (зона I), а в остальных участках (зона II) тангенциальные напряжения σ_0 и деформации ϵ_0 отсутствуют и напряжения в стенке, расположенной против этих зон, обуславливаются лишь трением и изгибом. В соответствии с этим можно определить напряжение $\sigma_{ст}$ по отдельным зонам, затем умножить его на соответствующие площади сечения и таким образом получить необходимое для вытяжки усилие.

При подборе пресса для вытяжки прямоугольных деталей можно определить усилие по формуле (4.25), которую в данном случае можно записать в следующем виде:

$$P = (2A + 2B - 1,72r_y) \sigma_{вс} s. \quad (4.35)$$

Для квадратных коробок $A=B$ коэффициент s имеет разные значения в зависимости от относительной высоты коробок (h/A) и

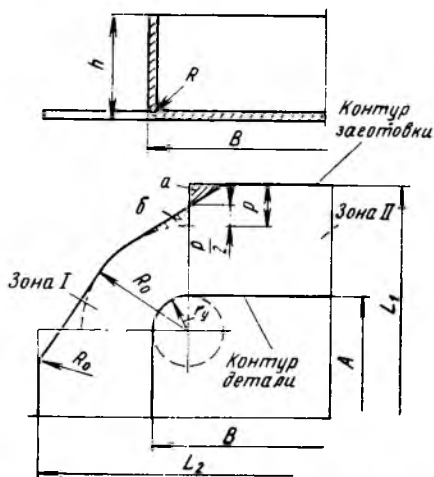


Рис. 4.8. Построение контура заготовки прямоугольной коробки

относительного радиуса сопряжения стенок (r_γ/h) в пределах от 0,4 при $h/A=0,4$ до 0,8 при $h/A=1,0 \dots 1,2$ [17]. Для высоких квадратных коробок усилие вытяжки определяется также, как для цилиндрического стакана, но диаметр стакана следует принимать таким, чтобы длина его окружности была равна периметру коробки. Диаметр такого эквивалентного стакана (A — сторона квадрата) равен: $d_{\text{экв}}=1,27 (A - 0,43 r_\gamma)$.

Напряженно-деформированное состояние заготовки при вытяжке коробчатых деталей определяется формой заготовки; оптимальной по форме заготовкой считается такая, при

вытяжке которой высота стенки получается одинаковой по всему периметру детали. Окончательные контуры заготовки обычно устанавливают только на основе нескольких пробных вытяжек.

Для сравнительно невысоких коробок ($h/A \leq 0,3$) удовлетворительные результаты получаются при следующем способе построения контура заготовки. На рис. 4.8 показана деталь с размерами сторон A , B и высотой h . Исходя из упрежденного предствления о процессе вытяжки в зоне I размер заготовки определяют как при вытяжке, а в зоне II — как при гибке. Следовательно, размеры L_1 и L_2 заготовки определяются по правилу развертки (по средней линии):

$$L_1 = (A - 2R) + 2(h - R) + \pi R; \quad L_2 = (B - 2R) + 2(h - R) + \pi R.$$

В угловых участках радиус R_0 определяется из предположения вытяжки условного круглого стакана, как бы составленного из четырех таких участков; диаметр стакана $d=2r_\gamma$, а высота h . Диаметр D_0 заготовки определяется из условия $F_{\text{дет}}=F_{\text{заг}}$ по формулам, применяемым для круглых деталей, а $R_0=D_0/2$. Размеры заготовки, определенные в разных зонах из различных предпосылок, на стыках зон I и II не одинаковы, здесь появляется ступенька, высота которой p . Но так как контур заготовки не может быть ступенчатым, его плавно сопрягают построением касательных к окружности R_0 из точек, разделяющих высоту ступеньки p пополам. При этом заштрихованные участки a удаляются, участки b присоединяются и общий контур заготовки (показанный жирной линией) становится плавным.

Для высоких коробок этот способ не дает приемлемых результатов, и в этом случае применяются другие приемы, также экспериментально проверенные [17].

Точность построенных разными способами контуров заготовок для квадратных, прямоугольных и более сложных деталей невысока, поэтому в большинстве случаев производят обрезку деталей по высоте; получение заданной высоты деталей гарантируется припуском, предусматриваемым в размерах заготовки, определенных расчетным путем.

Степень деформации при вытяжке коробок характеризуется или коэффициентом $m_{\text{кор}}$ вытяжки угловых участков, равным r_y/R_0 , или относительной высотой h/A , достигаемой за одну операцию. При вытяжке коробок значения коэффициента $m_{\text{кор}}$ меньше, чем при вытяжке круглых стаканов (степень деформации больше). Это объясняется тем, что напряжения стенки в угловых участках несколько уменьшаются вследствие разгрузки ее соседними малонагруженными участками.

Поэтому при одинаковых условиях вытяжки коэффициент $m_{\text{кор}} = r_y/R_0$ по сравнению с коэффициентом m_1 для круглых стаканов находится примерно в следующем соотношении: $m_{\text{кор}} = (0,5 \dots 0,7)m_1$. Относительная высота коробок при вытяжке за одну операцию применительно к материалам с высокой пластичностью не выше $0,5 \dots 0,6$.

4.7. РАЦИОНАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Здесь мы рассмотрим некоторые усовершенствования технологических процессов вытяжки, направленные на обеспечение устойчивого протекания процесса и на увеличение степеней деформаций, достигаемых за одну операцию.

Установлено, что технологические возможности операции ограничиваются прочностью опасного сечения, находящегося в зоне сопряжения стенки с дном детали, и что процесс формоизменения совершается без дефектов только при определенных соотношениях диаметров заготовки и изделия. Однако возможности операции можно расширить, если суметь разгрузить опасное сечение. При проектировании машин равнопрочность конструкции обеспечивается изменением сечений; при проектировании технологических процессов такой возможности нет, однако некоторого подобия равнопрочности заготовки в процессе ее формоизменения можно достичь изменением по ее диаметру сопротивления деформированию, которое обеспечивается дифференцированным нагревом заготовки.

Вытяжка с нагревом. Минимальное значение коэффициента вытяжки m_1 было определено из уравнения (4.31). При этом было принято, что сопротивление деформированию σ_s в очаге деформаций (фланце) и в опасном сечении (стенке) одинаково; в уравнении (4.31) σ_s исключалось и потому не оказывало влияния на коэффициент m_1 . Картина изменится, если σ_s будет неодинаково. Обозначим σ_{s1} — предел текучести материала в опасном сечении; σ_{s2} — то же во фланце. Тогда на основании уравнения (4.31) можно записать

$$\sigma_{s1} \pi ds = \sigma_{s2} \ln(1/m_1) \pi ds; \quad \sigma_{s1}/\sigma_{s2} = 1/m_1,$$

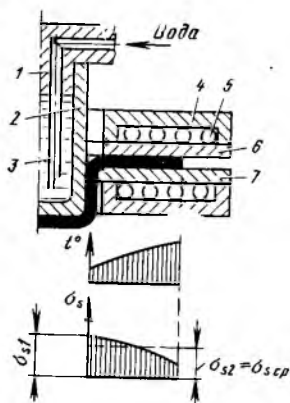


Рис. 4.9. Схема операции вытяжки с дифференцированным нагревом:

1—пуансонодержатель; 2—пуансон; 3—трубка для ввода воды; 4—нагревательная коробка; 5—электронагреватель; 6—прижим; 7—матрица

откуда коэффициент

$$m_1 = 1/e^{k_{s1}/\sigma_{s2}}. \quad (4.36)$$

Следовательно, технологические возможности операции вытяжки зависят от соотношения механических свойств в отдельных зонах заготовки. В частном случае, если $\sigma_{s1} = \sigma_{s2}$, то $m_1 = 0,37$, если $\sigma_{s1} < \sigma_{s2}$, то $m_1 > 0,37$, а если $\sigma_{s1} > \sigma_{s2}$, то $m_1 < 0,37$.

Как было отмечено, с уменьшением m_1 степень деформации возрастает, глубина вытяжки увеличивается и высокую деталь можно вытянуть за меньшее количество операций. Поэтому очень интересен процесс вытяжки в условиях, когда металл в опасном сечении прочнее, чем во фланце, т. е. когда $\sigma_{s1} > \sigma_{s2}$, чего можно достигнуть соответствующим распределением температур нагрева заготовки. Если, например, отношение $\sigma_{s1}/\sigma_{s2} = 1,5$, то $m_1 = 0,224$, и в этих условиях одна операция вытяжки с нагревом может заменить несколько операций, осуществляемых в обычных условиях.

Перспективность такой интенсификации процесса вполне очевидна. На рис. 4.9 приведена схема вытяжки в штампе, в котором операция производится с нагревом фланца заготовки и охлаждением вертикальной стенки, где расположено опасное сечение. Плита прижима 6 и матрица 7 нагреваются электронагревателями 5 (нихромовые спирали или трубчатые электронагреватели); пуансон охлаждается проточной водой. Так как тонколистовая заготовка нагревается по фланцу от рабочих элементов штампа, а охлаждается по стенке, то создается перепад температур t и обусловленный этим перепад предела текучести σ_s по очагу деформаций (см. рис. 4.9, внизу). Предел текучести во фланце можно принять равным среднему значению ($\sigma_{s2} = \sigma_{scp}$), а в опасном сечении — равным σ_s в зоне сопряжения фланца с вертикальной стенкой.

Температура нагрева прижима и матрицы штампа зависит от материала вытягиваемой заготовки и равна для алюминиевых сплавов $400 \dots 450^\circ \text{C}$. В случае вытяжки титановых сплавов и сталей нагрев следует проводить до более высоких температур, однако при этом резко падает стойкость штампа.

Минимальные значения коэффициентов вытяжки с нагревом заготовки уменьшаются с $0,5 \dots 0,6$ до $0,33 \dots 0,37$, следовательно, вместо двух-трех операций можно обойтись только одной. При вытяжке коробчатых деталей достигается еще больший эффект: одна операция вытяжки с нагревом заготовки заменяет три-четыре операции холодной вытяжки.

В связи с изменением свойств металла заготовки изменяются

и силовые параметры процесса вытяжки; при вытяжке алюминиевых сплавов давление прижима $q=0,4 \dots 0,8$ МПа; усилие вытяжки можно определить по формулам (4.25), но значение σ_s или σ_b следует принимать с учетом действительных температур нагрева стенки детали.

При определении температурного режима очень полезно знать для данного материала зависимость σ_s или σ_b от температуры испытания. Наиболее рационально принимать на фланце тот перепад температур, которому будет соответствовать наибольший перепад прочностных свойств.

Уменьшение сил трения. Из уравнения (4.21) следует, что силы трения, учитываемые через коэффициент трения μ , перегружают опасное сечение и уменьшают технологические возможности операции. Оценку влияния сил трения можно дать, приняв в уравнении (4.21) крайние значения μ . При оптимальных смазках и небольшой шероховатости поверхности штампа можно принять $\mu=0,05$, а при наименее благоприятных условиях — $\mu=0,2$. Тогда отношение P/P_d (P_d — усилие, преодолевающее только сопротивление деформированию металла) изменяется с 1,2 до 1,7, а минимальное значение коэффициента вытяжки с 0,44 увеличивается до 0,55. Наибольшая доля сил трения (около 70%) возникает на перетяжном ребре матрицы.

Основными направлениями снижения сил трения, обсуждаемыми в научно-технической литературе, являются:

- уменьшение шероховатости контактных поверхностей шлифованием, а в отдельных случаях — полированием или хромированием;

- подбор эффективных смазок (масел, жиров, покрытий, масел с наполнителями). Рекомендации по подбору смазок даны в справочной и специальной литературе [16, 34]. Наиболее эффективными являются смазки, обеспечивающие гидродинамический режим трения;

- уменьшение давлений на контактных поверхностях подбором минимально необходимых давлений прижима и рациональных форм штампов;

- приложение к инструменту в процессе вытяжки вибрационной нагрузки различной частоты, в том числе и ультразвуковой. Совокупное положительное влияние вибрации (уменьшение сил трения, выравнивание деформаций и др.) обеспечивает снижение усилия вытяжки в два раза и более, вследствие чего достигается большая высота вытягиваемых деталей.

Силы трения снижаются существенно, если вытяжка производится без прижима и $\sigma_{тр}$ в уравнении (4.2) равно нулю. Такой вариант возможен и при вытяжке с прижимом, однако в этом случае прижим должен работать прерывисто в следующем порядке: сообщается небольшое перемещение пуансону при приподнятом прижиме; при этом во фланцевой части заготовки появляются гофры таких размеров, чтобы их можно было устранить; затем вытяжка приостанавливается и на заготовку, расправляя складки,

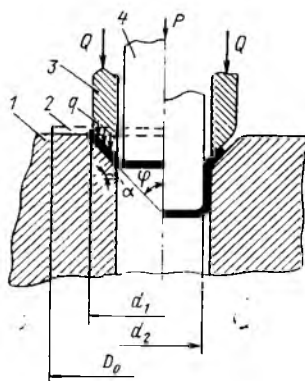


Рис. 4.10. Вытяжка первого перехода в конической матрице:

1—матрица; 2—заготовка; 3—прижим; 4—пуансон

опускается прижим. Повторение циклов дает возможность при вытяжке с нагревом фланца изготавливать высокие детали при $m_1 = 0,25$.

Форма и размеры рабочих частей штампов в значительной степени определяют протекание процесса вытяжки и предельные степени деформаций. Наибольшее влияние имеет форма заходной части матрицы. На рис. 4.1 показана матрица для первого перехода с входной кромкой, обработанной по радиусу R_m , и с конической — для последующих переходов. Практикой опробованы и другие варианты оформления входной части матриц: по эвольвенте, траектриссе, с двойным конусом и др. Эффективность изысканий в этой области может быть показана на примере замены радиусной матрицы для первого перехода конической

(рис. 4.10). Если вытяжка производится с прижимом, то прижим в этом случае выполняет две функции; прежде чем прижать заготовку к матрице, конусный прижим 3 работает как пуансон, свертывая плоскую заготовку 2 в конический полуфабрикат (см. левую часть рис. 4.10), который вытягивается далее пуансоном 4 в цилиндрическую деталь (см. правую часть рис. 4.10). Общее формоизменение заготовки как бы разделяется на два этапа; в первом — заготовка уменьшается по диаметру с D_0 до d_1 ($m_1 = d_1/D_0$), во втором — с d_1 до d_2 ($m_2 = d_2/d_1$). Тогда итоговый коэффициент $m_{\Sigma} = m_1 m_2$, что составляет меньшую величину, чем при вытяжке на радиусной матрице и с плоским прижимом. Кроме того, давление q прижима действует на заготовку под углом φ , поэтому нормальное к поверхности штампа и определяющее сопротивление трения $\sigma_{тр}$ давление уменьшено и равно $q' = q \sin \varphi$, а вторая составляющая $q'' = q \cos \varphi$ направлена в сторону движения заготовки. В дополнение к этому угол α охвата заготовкой ребра матрицы меньше $\pi/2$, что обеспечивает уменьшение также слагаемого $\varepsilon_{тр}$ в уравнении (4.2) или множителя $e^{\mu\alpha}$ в уравнении (4.14). Все эти преимущества обеспечивают более благоприятные условия вытяжки и увеличение высоты деталей. Рациональный диапазон углов φ конусности матрицы $20 \dots 40^\circ$; при этом коэффициент вытяжки может быть уменьшен с 0,55 до 0,45 [29]. В конусных матрицах заготовка приобретает дополнительную жесткость, что расширяет возможности вытяжки без прижима с существенным снижением усилия деформирования.

Радиус перетяжного ребра (R_m). Из уравнения (4.13) следует, что для снижения усилия деформирования необходимо увеличивать R_m ; однако при большом радиусе сопряжения кромки матрицы заготовка, перемещаясь в полость матрицы, слишком ра-

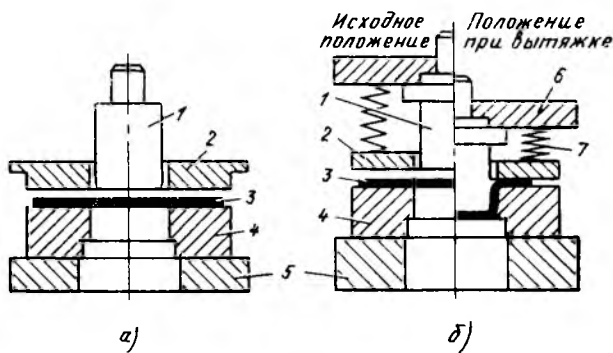


Рис. 4.11. Штампы для первого перехода вытяжки:

а—для прессы двойного действия; *б*—для прессы одинарного действия; 1—пуансон; 2—прижим; 3—заготовка; 4—матрица; 5—нижняя плита; 6—верхняя плита; 7—пружины привода прижима

но выходит из-под плоского прижима и в этой зоне появляются складки, которые при калибровке в зазоре между пуансоном и матрицей могут вызывать повышение усилия и даже отрыв дна детали. Рациональные значения R_m лежат в пределах $8 \dots 10$ толщины заготовки и не зависят от свойств материала.

Радиус сопряжения кромки пуансона (см. R_n на рис. 4.3) принимается равным примерно $1,5R_{0\min}$ ($R_{0\min}$ минимальный радиус изгиба заготовки). В этой зоне материал находится в сложном напряженном состоянии, здесь накопление пластических деформаций приводит к разрушению по опасному сечению, поэтому указанные рекомендации весьма приближены.

Зазор между матрицей и пуансоном принимается из расчета максимального утолщения заготовки, которое определяется уравнением (4.19). Если предусматривается калибровка кромки в зазоре, то односторонний зазор z может быть меньше значения $s/\sqrt{m}$.

Вытяжные штампы и оборудование. Вытяжка производится на механических и гидравлических прессах одинарного и двойного действия. Пресс одинарного действия имеет один ползун или плунжер, а двойного действия — два: внутренний и внешний; к внутреннему ползуну крепится вытяжной пуансон, а к наружному — прижим. Следовательно, на прессах двойного действия для прижима предусмотрен специальный привод, тогда как на прессе одинарного действия привод для прижима (пружины, резиновый буфер, пневмоцилиндр) должен быть встроен в штамп. Привод для прижима может быть расположен внизу, под столом прессы, и тогда пуансон с прижимом располагаются в нижней части штампа, а матрица — в верхней. На рис. 4.11, *а* показан штамп для первой операции вытяжки для прессы двойного действия, а на рис. 4.11, *б* — для прессы одинарного действия. Первый штамп значительно проще второго. Эта разница будет еще более очевидной, если сравнить между со-

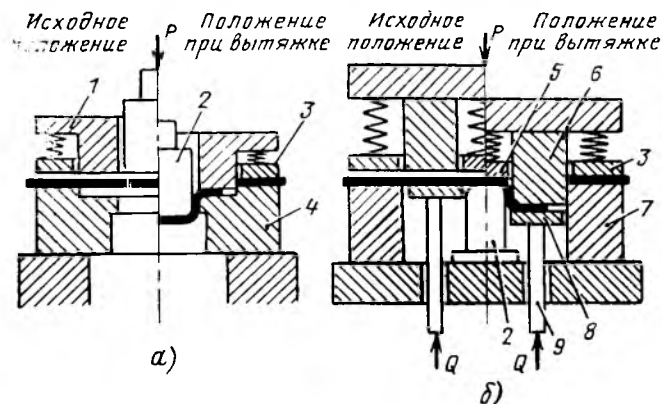


Рис. 4.12. Комбинированные вытяжные штампы (для вырубки заготовки и ее вытяжки):

а—для прессы двойного действия; *б*—для прессы одинарного действия; 1—прижим и пуансон для вырубки; 2—пуансон для вытяжки; 3—съемник; 4—матрица для вырубки и вытяжки; 5—выталкиватель; 6—матрица для вытяжки и пуансон для вырубки; 7—матрица для вырубки; 8—прижим; 9—штанги, соединяющие прижим с нижним приводом

бой комбинированные штампы — штампы для вырубки и вытяжки заготовки (рис. 4.12). На прессе двойного действия (рис. 4.12, *а*) вырубка и прижим заготовки осуществляются наружным ползуном, а вытяжка — внутренним; матрица 4 выполняет вырубку и вытяжку, а прижим 1 выполняет одновременно функцию вырубного пуансона; здесь можно изготовлять детали «на провал», в то время как в штампе для прессы одинарного действия должен быть обязательно предусмотрен выталкиватель.

Усилие прижима на прессе двойного действия определять не нужно, так как здесь прижим не оказывает давления на заготовку в начальный момент, но, находясь все время над заготовкой, не допускает появления складок. В отличие от прижимов с приводом от пружин и пневмо-гидравлических устройств (эластичных прижимов), на прессе двойного действия применяется жесткий прижим, создающий фиксированный зазор между плитой прижима и заготовкой. Эластичный прижим может отжиматься от матрицы заготовкой при ее утолщении, жесткий же прижим калибрует заготовку, не изменяя величины зазора, который принимается равным (1,20...1,25)*s*.

На прессе одинарного действия (см. рис. 4.12, *б*) давление *Q* прижима определяется по изложенной выше методике и принимается во внимание при расчете усилия *P* вытяжки.

В дополнение к изложенному следует заметить, что все вытяжные штампы оборудованы фиксаторами для установки заготовок; пуансоны и матрицы часто крепятся к плитам при помощи пуансоно- и матрицедержателей, направление движения пуансона определяется при помощи направляющих колонок; для неплоских заготовок применяются различного вида ловители и фиксаторы. Со все-

ми подробностями конструкции и расчета штампов можно ознакомиться в работах [13, 23, 34, 36].

Вытяжка с нагревом фланца и охлаждением стенки производится на гидравлических прессах при скоростях перемещения плунжера не выше 15 см/мин; такой режим необходим для обеспечения поля температур нагрева заготовки от штампа.

Мы не касались многих сторон процесса вытяжки. Значительные особенности имеет вытяжка конических и ступенчатых деталей, деталей с широким фланцем, сложных по форме деталей, существенное влияние на процесс оказывает изменение толщины заготовки, анизотропия материала, скорость деформирования и др. В книге с большим упрощением даны лишь основы теории и практики выполнения операции. Для более детального изучения вытяжки рекомендуется литература, на которую сделаны ссылки по ходу изложения материала этой главы. Дополнительно можно рекомендовать также [7, 17]. Об усовершенствовании вытяжки путем совмещения операций см. ниже в гл. 10.

ГЛАВА 5

РАЗДАЧА

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Раздача — это технологическая операция, применяемая для изготовления листовых и трубчатых деталей путем увеличения начального диаметра заготовки; внешнее усилие сжатия прикладывается по внутреннему контуру очага деформаций (см. табл. 1.1). На рис. 5.1 показаны технологические схемы операции. Из этого рисунка можно также составить представление о формах деталей, которые получают раздачей.

Эта операция широко применяется для изготовления трубчатых деталей с раструбом или с фланцем на концах, для ступенчатых деталей, для конических, бочкообразных или более сложных форм обечаек, в том числе из сварных заготовок (обечайки подвесных баков, корпусные детали двигателей, детали воздухозаборников и др.). Детали могут быть не только осесимметричных форм, но и более сложных.

Очаг деформаций, ограниченный внутренним по радиусу r и внешним по радиусу R_0 контурами, может иметь плоскую, коническую и более сложную формы (очаг деформаций I на рис. 5.1 зачернен); в проекции на плоскость во всех случаях очаг деформаций имеет кольцевую форму.

Принимается, что в очаге деформаций под действием силы P возникают плоское напряженное и объемное деформированное состояние; в меридиональном направлении напряжения σ_σ — сжимающие, в окружном σ_θ — растягивающие. Знаки радиальных и окружных деформаций ϵ_r и ϵ_θ совпадают со знаками напряжений,

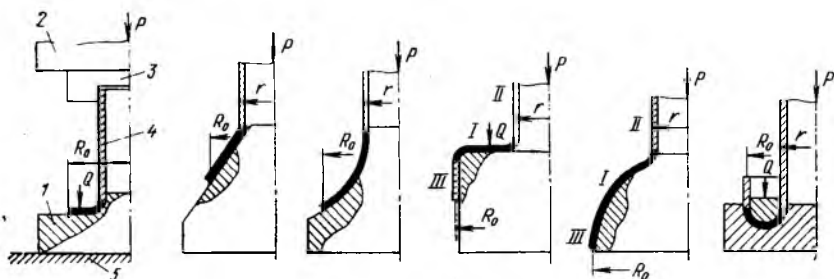


Рис. 5.1. Технологические схемы раздачи:

1—пуансон; 2—плунжер пресса; 3—фиксатор заготовки; 4—заготовка; 5—стол пресса

а деформации ε_n по толщине изменяют знак на радиусе $R_{гр}$, разделяющем зону утолщения и зону утонения.

Выше очага деформаций заготовка в радиальном направлении не деформируется, эта часть II является зоной передачи усилия в очаг деформаций. После выхода из очага деформаций (участок III) заготовка в радиальном направлении также не деформируется.

Технологические возможности операции ограничиваются разрывом кромки заготовки, подвергающейся максимальному растяжению в окружном направлении.

5.2. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВКИ

Распределение напряжений σ_θ и σ_ϕ вдоль радиуса R_x в пределах очага деформаций может быть определено, как и ранее, совместным решением приближенных уравнений равновесия и пластичности. Как и при вытяжке, примем форму очага деформаций плоской; этот случай раздачи иногда называется *фланцовой* (рис. 5.2). Примем несколько идеализированные условия деформирования — без учета трения, упрочнения и изгиба.

Уравнение равновесия на основе проецирования на радиус сил, действующих на выделенный элемент, будет иметь следующий вид:

$$\frac{d\sigma_\theta}{dR_x} + \frac{\sigma_\theta - \sigma_\phi}{R_x} = 0. \quad (5.1)$$

Уравнение пластичности по гипотезе постоянства максимальных касательных напряжений для данного напряженного состояния и без учета упрочнения металла:

$$\sigma_\theta - \sigma_\phi = \sigma_s. \quad (5.2)$$

Совместное решение этих уравнений при граничных условиях $\sigma_\phi = 0$ при $R_x = R_0$ (меридиональное напряжение на свободной кромке отсутствует) дает

$$\sigma_\theta = -\sigma_s \ln(R_0/R_x); \quad (5.3)$$

$$\sigma_\phi = \sigma_s [1 - \ln(R_0/R_x)]. \quad (5.4)$$

Распределение напряжений по очагу деформаций показано на рис. 5.2.

Максимальные значения напряжений σ_0 будут на внутренней границе очага деформаций, где приложено внешнее усилие:

$$\sigma_{0 \max} = -\sigma_s \ln(R_0/r) = -\sigma_s \ln(1/k_{\text{раз}}), \quad (5.5)$$

где $k_{\text{раз}} = r/R_0 = d_{\text{ср}}/D_0$ — коэффициент раздачи. Диаметр D_0 является наибольшим конечным диаметром изделия (диаметр фланца, диаметр большей цилиндрической части изделия, диаметр раструба). Коэффициент раздачи характеризует степень формоизменения заготовки, подобно коэффициенту вытяжки m ; чем меньше коэффициент раздачи, тем больше степень окружной деформации ε_θ , которая равна

$$\varepsilon_\theta = (R_0 - r)/r = (1 - k_{\text{раз}})/k_{\text{раз}}. \quad (5.6)$$

Уравнения (5.3), (5.4) для раздачи аналогичны соответствующим уравнениям (4.8) и (4.9) для вытяжки; распределение напряжений σ_0 и σ_θ по радиусу одинаково для этих двух операций и отличается только знаками, что соответствует противоположному назначению операций. При вытяжке плоская заготовка «свертывается» в цилиндр, при раздаче (фланцовке) — цилиндр «разворачивается» на плоскость.

Рассмотрим далее раздачу на коническом пуансоне (рис. 5.3). Учтем здесь силы трения на контактной конической поверхности, однако сохраним другие допущения.

Силы трения, действующие на элемент, примем равными $\mu \sigma_k$, где σ_k — напряжения на поверхности контакта. При проецировании сил на образующую конической поверхности, а также на нормаль к поверхности элемента, получим два уравнения равновесия [31]:

$$R_x \frac{d\sigma_0}{dR_x} + \sigma_r - \sigma_\theta - \mu \sigma_k R_x / \sin \alpha = 0; \quad (5.7)$$

$$\sigma_\theta / R_\theta - \sigma_k / s = 0, \quad (5.8)$$

где α — угол конусности пуансона; μ — коэффициент трения; R_θ — радиус кривизны элемента в широтном направлении, который из геометрических соотношений (см. рис. 5.3) равен $R_\theta = R_x \cos \alpha$. Принимая во внимание уравнение пластичности (5.2) и решая сов-

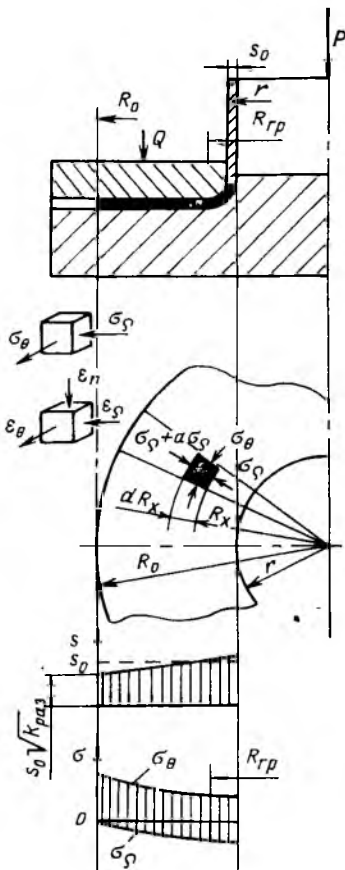


Рис. 5.2. Раздача (фланцовка) трубчатой заготовки

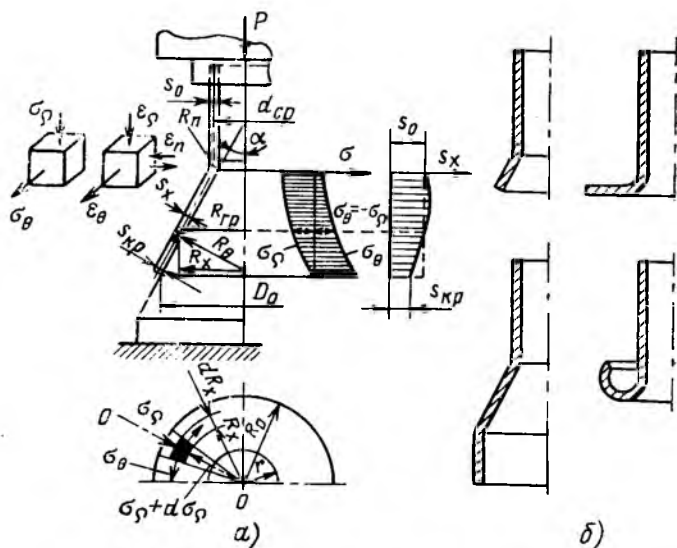


Рис. 5.3. Раздача на коническом пуансоне

местно с ним уравнения (5.7) и (5.8) при прежних граничных условиях, получим:

$$\sigma_Q = -\sigma_s \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{R_x}{R_0} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right]; \quad (5.9)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left\{ 1 - \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{R_x}{R_0} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right] \right\}. \quad (5.10)$$

При $R_x = r$

$$\sigma_{Q \max} = -\sigma_s \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) (1 - k_{\text{раз}}^{\mu \operatorname{ctg} \alpha}). \quad (5.11)$$

В значении $\sigma_{Q \max}$, по которому далее определяем силовые параметры процесса, влияние изгиба и спрямления в начале очага деформаций можно учесть отдельным членом, взятым в соответствии с уравнением

$$\sigma_{\text{изг}} = \sigma_s s / (2R_{\text{ср}}) = \sigma_s s / (2R_n - s). \quad (5.12)$$

Здесь сделано предположение, что заготовка изгибается (см. рис. 5.3) и разгибается, не отрываясь от поверхности инструмента. Значение $\sigma_{\text{изг}}$ в качестве дополнительного слагаемого при необходимости можно учесть как в уравнении (5.11), так и в уравнении (5.5).

Деформированное состояние определяется уравнением связи (4.18) для любого элемента очага деформаций, если принять, что для каждого из них отношение σ_Q / σ_θ сохраняется постоянным на всем протяжении процесса. Уравнение (4.18) можно выразить так:

$$\varepsilon_n = \ln s_x / s; \quad \varepsilon_\theta = \ln (R_x / r); \quad s_x = s (r / R_x)^{\frac{1 + \sigma_Q / \sigma_\theta}{2 - \sigma_Q / \sigma_\theta}}. \quad (5.13)$$

На кромке $R_x = R_0$, отношение $\sigma_0 / \sigma_0 = 0$; толщина кромки будет равна

$$s_{кр} = s \sqrt{r/R_0} = s \sqrt{k_{раз}}. \quad (5.14)$$

Вторым характерным сечением является сечение при $R_x = R_{гр}$, где $\tau_0 = \tau_\theta$ (см. рис. 5.2). Радиус $R_{гр}$, как и при вытяжке, может быть определен из равенства абсолютных значений τ_0 и τ_θ , взятых по уравнениям (5.3) и (5.4):

$$\left| \tau_s \ln \frac{R_0}{R_{гр}} \right| = \left| \tau_s \left(1 - \ln \frac{R_0}{R_{гр}} \right) \right|. \quad (5.15)$$

Окружность, описанная радиусом $R_{гр}$ ($R_{гр} > 0,61 R_0$), разделяет зону утонения от зоны утолщения стенки в очаге деформаций. Этот радиус можно выразить через коэффициент раздачи, если уравнение (5.15) умножить и разделить на r . Получим:

$$R_{гр} = 0,61 r / k_{раз}. \quad (5.16)$$

На граничном контуре на основе уравнений (4.18), (5.13) получаем:

$$\sigma_0 / \sigma_0 = -1; \quad s_{гр} = s; \quad \epsilon_n = 0; \quad -\epsilon_0 = s_0. \quad (5.17)$$

Из уравнения (5.16) видно, что $R_{гр}$ выходит на очаг деформаций только в том случае, если $k_{раз} < 0,61$; при холодном деформировании такой случай редок, он более реален при раздаче с нагревом. Поэтому можно считать, что в большинстве случаев при $k_{раз} > 0,61$ заготовка при раздаче во всем очаге деформаций утоняется, так как везде $|\sigma_\theta| > |\sigma_0|$. При $k_{раз} < 0,6$ часть очага деформаций вблизи внутреннего контура подвергается утолщению, так как здесь $|\sigma_\theta| > |\sigma_n|$, т. е. превалирует меридиональное сжатие. На рис. 5.2 показано примерное распределение толщин по очагу деформаций для этого случая раздачи.

Для определения толщины заготовки при переходе любого ее элемента из начального положения до некоторого промежуточного или конечного положения следует заменить σ_0 / σ_θ средним значением этого отношения на интересующем интервале изменения R_x .

5.3. УСИЛИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Полное усилие деформирования складывается из: усилия P_d , преодолевающего сопротивление металла деформированию, усилия $P_{тр}$, преодолевающего трение, и $P_{изг}$, преодолевающего сопротивление изгиба. Эти составляющие создают в стенке заготовки в зоне II (см. рис. 5.2) передачи усилия напряжения

$$\sigma_{ст} = \sigma_d + \sigma_{тр} + \sigma_{изг}.$$

При фланцовке сила Q на прижиме употребляется для предотвращения выворота; прижим здесь обеспечивает спрямление фланца. Роль трения на плоской части очага деформаций невелика, большее влияние трение оказывает при раздаче на конусных и более сложных форм пуансонах.

Уравнение (5.11) для определения $\sigma_{0 \max}$ учитывает сопротивление сил трения; сопротивление изгиба можно учесть дополнительным слагаемым, взятым по уравнению (5.12). Для того чтобы учесть упрочнение, можно в уравнении (5.11) вместо напряжения текучести σ_s принять среднее по очагу деформаций сопротивление деформированию $\sigma_{s \text{ ср}}$, ориентируясь не на интенсивность деформаций, а на максимальную деформацию — окружную деформацию ϵ_θ . Считаем, что упрочнение определяется законом $\sigma_s = \sigma'_s + \Pi \epsilon_\theta$ и примем $\sigma_{s \text{ ср}}$ из двух значений σ_s на границах очага деформаций. На внутреннем контуре ($R_x = r$) деформация $\epsilon_\theta = 0$, поэтому $\sigma_s = \sigma'_s$; на наружном контуре ($R_x = R_0$) деформация $\epsilon_\theta = (R_0 - r)/r$, а

$$\sigma_s = \sigma'_s + \Pi (R_0 - r)/r = \sigma'_s + \Pi (1 - k_{\text{раз}})/k_{\text{раз}}.$$

Тогда $\sigma_{s \text{ ср}}$ из двух крайних значений σ_s будет

$$\sigma_{s \text{ ср}} = \sigma'_s + \frac{\Pi}{2} \frac{1 - k_{\text{раз}}}{k_{\text{раз}}}. \quad (5.18)$$

С учетом сказанного усилие P деформирования для конечного момента деформирования будет равно:

$$P = \left[\left(\sigma'_s + \frac{\Pi}{2} \frac{1 - k_{\text{раз}}}{k_{\text{раз}}} \right) \left(1 + \frac{\text{tg } \alpha}{\mu} \right) (1 - k_{\text{раз}}^{\mu \text{ ctg } \alpha}) + \frac{\sigma_s s}{2R_n - s} \right] \pi d_{\text{ср}} s. \quad (5.19)$$

5.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Уже отмечалось, что течение процесса раздачи нарушается разрывом свободной кромки, находящейся в условиях линейного напряженного состояния (окружное растяжение). Разрушение кромки происходит при определенном значении накопленной пластической деформации, которую обозначим $\epsilon_{\text{доп}}$. Для выявления возможностей операции примем уравнение (5.6), связывающее окружную деформацию ϵ_θ кромки и коэффициент $k_{\text{раз}}$ формоизменения заготовки. Примем $\epsilon_\theta = \epsilon_{\text{доп}}$ и решим уравнение относительно $k_{\text{раз}}$:

$$k_{\text{раз}} = 1/(1 + \epsilon_{\text{доп}}). \quad (5.20)$$

Мы уже встречались с подобной задачей определения $\epsilon_{\text{доп}}$ при расчете минимального радиуса изгиба [см. уравнение (3.44)]. Тогда мы приняли $\epsilon_{\text{доп}}$ равной деформации растяжения, соответствующей сужению образца в шейке при испытании образца на разрыв. В данном случае можно поступить так же, приняв, однако, значение сужения ψ равным $\psi_{\text{ш}}$ в конце устойчивой стадии деформирования:

$$\epsilon_{\text{доп}} = \psi_{\text{ш}}/(1 - \psi_{\text{ш}}). \quad (5.21)$$

Тогда уравнение (5.20) будет выглядеть так:

$$k_{\text{раз}} = 1 - \psi_{\text{ш}}. \quad (5.22)$$

Это нижний предел деформирования; он ограничивает степень увеличения диаметра заготовки стадией равномерной деформации при растяжении (до образования шейки). В реальных условиях коэффициент раздачи может иметь меньшее значение: для сплава Д16АМ $k_{\text{раз}}=0,8$; для АМг — 0,75, для 1Х18Н10Т — 0,70. Колебание его значений зависит от толщины стенки заготовки, от состояния кромки (шероховатость, механические повреждения, наклеп).

Угол α конусности пуансона характеризует интенсивность изменения в меридиональном направлении напряжений и деформации и, следовательно, степень поддержания устойчивой деформации кромки менее деформированными соседними участками. Исходя из этого Е. А. Попов [31] предложил следующее выражение для расчета $k_{\text{раз}}$:

$$k_{\text{раз}} = \frac{1 - \psi_m}{\exp \sqrt{s/r} \sin \alpha}. \quad (5.23)$$

Как видно из уравнения (5.23) с увеличением угла α возможности деформирования увеличиваются, хотя это и приводит к увеличению усилия P .

В некоторых случаях $k_{\text{раз}}$ может ограничиваться утонением кромки; основываясь на уравнении (5.14), можно наложить такое условие:

$$k_{\text{раз}} = (s_{\text{кр}}/s)_{\text{min}}^2. \quad (5.24)$$

Исходя из условия устойчивости заготовки в зоне передачи усилия, можно записать:

$$\sigma_Q \max = \sigma_s \left(1 + \frac{\text{tg } \alpha}{\mu} \right) (1 - k_{\text{раз}}^{\mu \text{ ctg } \alpha}) \approx \sigma_s. \quad (5.25)$$

Здесь считается, что заготовка теряет устойчивость при напряжениях, примерно равных пределу текучести.

При необходимости раздачу можно производить за несколько операций с промежуточными отжигами для снятия упрочнения. В этом случае ограничением становится условие (5.24) — утонение стенки детали.

Увеличение степени деформации при раздаче достигается нагревом заготовки в очаге деформации. Заготовки из алюминиевых сплавов можно нагревать от горячего пуансона, который в свою очередь нагревается электронагревателями сопротивления,

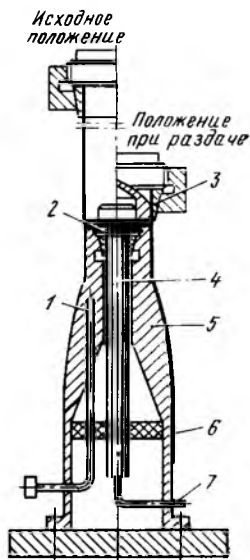


Рис. 5.4. Схема процесса раздачи с зональным нагревом:

1—термопара; 2—крепление электронагревателя; 3—зажим заготовки; 4—электрический нагреватель; 5—пуансон; 6—заготовка; 7—электропровод

вставленными во внутреннюю полость (рис. 5.4); температура нагрева $400 \dots 450^\circ \text{C}$. При нагреве заготовки от пуансона обеспечивается благоприятный перепад температур по заготовке. Нагревается только очаг деформаций, а зона передачи усилия, которая должна сохранять максимальную несущую способность, остается холодной. Нагрев увеличивает пластичность металла, и разрыв кромки наступает не при $k_{\text{раз}} = 0,7 \dots 0,8$, а при $k_{\text{раз}} = 0,5 \dots 0,6$; при этом возникает перегрузка зоны передачи усилия и опасность потери устойчивости, $k_{\text{раз}}$ ограничивается условием (5.25). Для предотвращения потери устойчивости и повышения несущей способности заготовки опасное сечение подвергают охлаждению.

Схема штампа для раздачи с зональным нагревом показана на рис. 5.4. В исходном положении верхней части штампа заготовку 6 фиксируют кулачковым зажимом 3 соосно относительно пуансона 5. При опускании плунжера заготовка скользит по нагретому пуансону вниз, одновременно нагреваясь от него и подвергаясь раздаче в заданном диапазоне температур. Эту операцию можно осуществлять только на гидравлических прессах при скорости хода плунжера до 15 см/мин.

5.5. РАЗМЕРЫ ЗАГОТОВКИ

Ввиду того, что в очаге деформаций преимущественной является тангенциальная деформация растяжения, то две другие главные деформации — отрицательны. Поэтому длина образующей конического очага деформации или ширина фланца (см. рис. 5.2) не равны, а несколько меньше исходной длины заготовки. Если принять, что заготовка после раздачи имеет толщину в очаге деформаций, изменяющуюся по линейному закону от s на внутреннем контуре до $s\sqrt{k_{\text{раз}}}$ на внешнем контуре очага деформаций, то из условия постоянства объема можно определить длину исходной заготовки. Формула для определения длины заготовки для раздачи на конусном пуансоне будет иметь следующий вид:

$$L = l_1 + 1,05 \left[\frac{l_2}{4 \cos \alpha} (1 + \sqrt{k_{\text{раз}}}) \left(\frac{1}{k_{\text{раз}}} + 1 \right) - \frac{l_3}{\sqrt{k_{\text{раз}}}} \right], \quad (5.26)$$

где l_1 — длина недеформированной части заготовки; l_2 — длина конической части; l_3 — длина цилиндрической деформированной части (большого диаметра); 1,05 — множитель, учитывающий неточности расчета, некоторое увеличение толщины в начале конической части.

5.6. РАЦИОНАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Рациональные режимы раздачи определяют исходя из условий получения наибольшей степени деформаций за одну операцию и минимального усилия деформирования. Полное использование возможностей операции раздачи расширяет возможности листо-

вой штамповки и обеспечивает изготовление деталей оригинальной конструкции.

Зональный нагрев, как указывалось выше, способствует существенной интенсификации процесса. Кроме уменьшения $k_{\text{раз}}$ рациональное распределение температур нагрева может обеспечить некоторое утолщение заготовки с тем, чтобы при последующей раздаче получить меньшее утонение стенки детали. При раздаче заготовок из алюминиевых сплавов с нагревом при $t=300^\circ\text{C}$ в начале очага деформаций и 450°C в конце получается $k_{\text{раз}}=0,48$ (увеличение диаметра более чем вдвое), утонение 20% (вместо 30% по расчету), а на участках около начального контура очага — утолщение 14% [9]; чем больше угол конусности пуансона, тем устойчивее может происходить утолщение. В этом случае подвергается раздаче заготовка, как бы предварительно утолщенная.

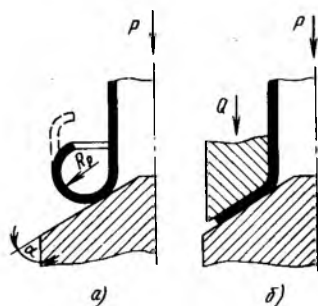


Рис. 5.5. Выворот трубы при раздаче на конусном пуансоне

Весьма положительную роль играет предварительный набор материала на концах труб, проведенный в отдельном штампе; если данную операцию проводить с нагревом очага деформаций, то удастся увеличить толщину в два и более раза на тонкостенных заготовках, имеющих $s/d=0,02$. Подвергая раздаче предварительно профилированную заготовку, можно получить раструб или ступенчатую деталь с толщиной стенки, равной исходной или распределенной по заданной зависимости [9].

Форма инструмента (штампа) влияет на силовой режим процесса и на распределение напряжений, на трение, на технологические возможности. С увеличением угла конусности пуансона несколько увеличивается усилие P , увеличивается утолщение в начале очага деформаций, при угле $\alpha > 55^\circ$ заготовка при своем движении отделяется от поверхности пуансона и начинает выворачиваться, поднимаясь вверх, навстречу движению плунжера; для предотвращения выворота необходимо делать штамп с прижимом (рис. 5.5, а, б). Выворот на коническом или плоском ($\alpha = \pi/2$) пуансоне происходит по схеме так называемого свободного изгиба, когда образующаяся кривизна заготовки не определяется штампом (рис. 5.5, а). Радиус R_0 свободного изгиба также зависит от угла α и определяется уравнением [31]

$$R_0 = \sqrt{rs/\sin \alpha}. \quad (5.27)$$

Влияние угла конусности α на усилие деформирования неоднозначно. Анализ уравнения [5.19] дает возможность установить оптимальные углы α , при которых P находится на нижнем пределе. Как показывают опыты и расчеты, оптимальные углы α располагаются в диапазоне $10 \dots 30^\circ$.

Условия трения влияют не только на усилие P деформирования

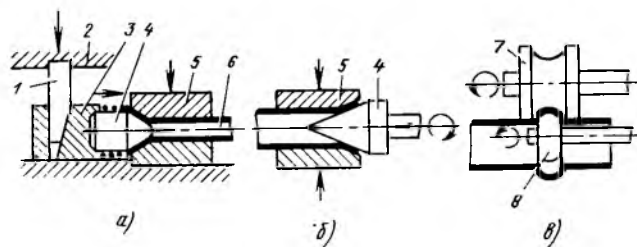


Рис. 5.6. Варианты раздачи:

а—в штампе; *б*—на станке с вращением пуансона (развальцовка); *в*—на роликовом станке (зиговка); 1—клин; 2—верхняя часть штампа; 3—пуансонодержатель; 4—пуансон; 5—разъемная матрица; 6—заготовка; 7—верхний ролик; 8—нижний ролик

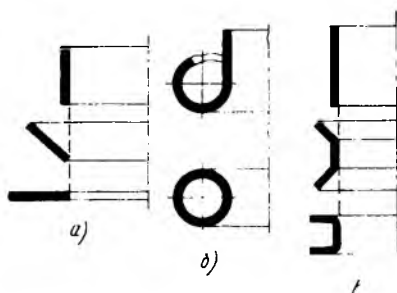


Рис. 5.7. Применение раздачи для изготовления деталей различных конфигураций:

а—плоских; *б*—горизонтальных; *в*—с двойными фланцами

(чем больше μ , тем больше P), но и регулируют свободное движение кромки заготовки. При неравномерных в широтном направлении условиях трения движение заготовки по пуансону может происходить неравномерно и кромка получается неровной. Шероховатая поверхность пуансона или неэффективная смазка портит внутреннюю поверхность детали, и этот дефект трудно устранить. Поэтому обращают особое внимание на обработку рабочих поверхностей штампов и подбор смазок.

Технологическим оборудованием для выполнения раздачи мо-

жет служить как прессовое оборудование, так и специализированные установки и станки, в том числе вращательного типа. На рис. 5.6 показаны различные схемы осуществления раздачи. На рис. 5.7 показаны технологические переходы при изготовлении некоторых деталей раздачи; эти схемы характеризуют возможности операции.

В данной главе рассмотрена раздача как элементарная операция в инструментальном исполнении. С более сложными и совмещенными процессами раздачи мы познакомимся после изучения других элементарных операций.

ГЛАВА 6

ОТБОРТОВКА

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вытяжка и раздача совершаются приложением внешней нагрузки по внутреннему контуру очага деформаций. Анализируя их, мы получили схожие зависимости для определения напряжений ε_0 и σ_0 . В операции отбортовки, как следует из нашей классификации (см. табл. 1.1), очаг деформаций нагружается по наружному контуру, он растягивается, все его элементы увеличиваются по диаметру. При этом в очаге деформаций возникает плоское одноименное напряженное состояние — растяжение в радиальном и тангенциальном направлении.

На рис. 6.1 показаны технологические схемы отбортовки и характерные детали, изготавливаемые с ее помощью. Как видно из рисунка, сущность операции заключается в образовании бортов по краям отверстий или по незамкнутым, но вогнутым контурам. Предварительно пробитое отверстие расширяется пуансоном и кромка его, имеющая радиус $r_{от}$, переходит в борт, имеющий радиус R_6 , в зазор между пуансоном и матрицей. Кольцевой очаг деформаций от $r_{от}$ до R_6 может иметь полскую (см. рис. 6.1, а), а также коническую (см. рис. 6.1, б) или более сложную форму; каждый случай деформирования имеет свои отличительные черты. Наиболее сложными случаями отбортовки являются отбортовки отверстий на пространственных заготовках (на обечайках, на днищах, на трубах), отбортовки некруглых отверстий (квадратных; прямоугольных и др.).

Когда очаг деформаций находится в условиях двухстороннего растяжения, то по всей его площади происходит утонение материала; в радиальном направлении также происходит сокра-

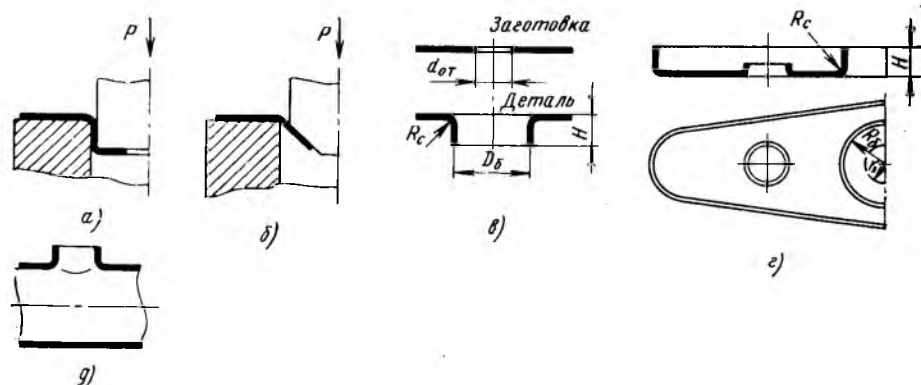


Рис 6.1. Отбортовка:

а, б—технологические схемы; в, г, д—детали, изготавливаемые отбортовкой

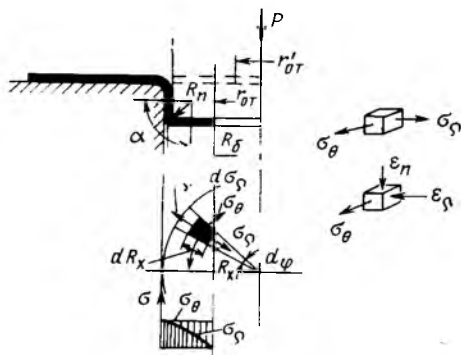


Рис. 6.2. Напряженно-деформированное состояние заготовки при отбортовке

и диафрагм) дополнительную жесткость, отбортовка возникает при штамповке полупатрубок, зализов, при отгибании бортов по вогнутым контурам.

6.2. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Как и в предыдущих случаях, примем очаг деформаций плоским (рис. 6.2) и для упрощения решим задачу для идеальных условий без учета трения, изгиба и упрочнения; толщину заготовки принимаем неизменной. Учтем дополнительные сопротивления в расчете $\sigma_{\rho \max}$ и усилия деформирования P .

Пользуясь принятой методикой, проецируя силы на радиус и приравнивая их сумму нулю, получим уравнение равновесия в следующем виде:

$$\frac{d\sigma_{\rho}}{dR_x} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}}{R_x} = 0. \quad (6.1)$$

Уравнение пластичности по условию постоянства максимальных касательных напряжений при $\sigma_{\theta} > \sigma_{\rho}$:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s. \quad (6.2)$$

Совместное решение этих уравнений при граничных условиях $\sigma_{\rho} = 0$ при $R_x = r_{от}$ получаем уравнения для распределения вдоль R_x радиальных напряжений σ_{ρ} :

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s (1 - r_{от}/R_x). \quad (6.3)$$

Максимальное значение $\sigma_{\rho \max}$ возникает на вертикальной стенке образующегося борта ($R_x = R_{\delta}$), причем, чтобы получить $\sigma_{\rho \max}$, максимальное из всех возможных значений, надо взять радиус $r_{от}$ отверстия равным радиусу исходного отверстия. Получим

$$\sigma_{\rho \max} = \sigma_s (1 - r'_{от}/R_{\delta}) = \sigma_s (1 - k_{от\delta}), \quad (6.4)$$

щение длины волокон, а деформация растяжения в окружном направлении является максимальной главной деформацией.

Технологические возможности операции ограничиваются разрывом кромки отверстия, находящейся в условиях, близких к линейному растяжению.

Отбортовка применяется в производстве самолетов для широкого круга деталей. Создание бортов вокруг отверстий придает плоским крупногабаритным деталям (стенкам нервюр, шпангоутов, перегородок

где $k_{отб}$ — коэффициент отбортовки, характеризующий степень формоизменения заготовки. Коэффициент отбортовки связан с тангенциальной деформацией растяжения ε_θ :

$$\varepsilon_\theta = (R_6 - r'_{от})/r'_{от} = (1 - k_{отб})/k_{отб}. \quad (6.5)$$

Напряжение σ_θ в тангенциальном направлении равно σ_s по условию пластичности (6.2). На рис. 6.2 показано распределение напряжений по очагу деформаций. Значение $\sigma_Q \max$ можно уточнить, учтя трение и изгиб при переходе заготовки через ребро пуансона. Трение учтем множителем Эйлера, а изгиб и спрямление дополнительным слагаемым, аналогичным (5.12). Тогда:

$$\sigma_Q \max = \sigma_s \left[(1 - k_{отб}) + \frac{s}{2R_H + s} \right] e^{\mu \alpha}. \quad (6.6)$$

Деформированное состояние определяется уравнением (4.17) и (4.18). На свободной кромке (при $R_x = r_{от}$) $\sigma_Q/\sigma_\theta = 0$ и деформации равны $\varepsilon_n = 0,5\varepsilon_\theta$, а толщина кромки при переходе ее в стенку борта при замене деформации ε_n и ε_θ логарифмическими деформациями будет равна $s_{кр} = s \sqrt{k_{отб}}$; такое утонение кромки при отбортовке аналогично утонению при раздаче.

Если принять, что R_x характеризует начальное положение элемента на исходной заготовке, то после его перемещения в положение, определяемое радиусом R_6 (при $\sigma_Q/\sigma_\theta = \text{const}$), толщина этого элемента s_x будет равна:

$$s_x = s(R_x/R_6)^{\left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_Q}{2\sigma_\theta - \sigma_Q} \right)_{cp}}. \quad (6.7)$$

Напряжения σ_θ и σ_Q можно определить по уравнениям (6.2) и (6.3).

6.3. УСИЛИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Усилие деформирования должно преодолевать как сопротивление деформированию, так и другие сопутствующие сопротивления. Численно, как и в других операциях, усилие P равно произведению $\sigma_Q \max$ на площадь сечения стенки; используя уравнение (6.6), получим:

$$P = \sigma_s \left[(1 - k_{отб}) + \frac{s}{2R_H + s} \right] e^{\mu \alpha} \pi D_6 s. \quad (6.8)$$

Упрочнение металла можно учесть, используя линейный закон упрочнения и приняв окружающую деформацию ε_θ эквивалентной по упрочняющему эффекту деформации при испытании образцов на растяжение. Для упрощения примем деформацию ε_θ соответствующей моменту экстремального значения усилия, который имеет место в начале процесса при увеличении $r_{от}$ примерно до $1,1r_{от}$. Тогда $\varepsilon_{\theta \text{ ср}} = (1,1r_{от} - r_{от})/r_{от} = 0,1$, и эту деформацию ориентировочно примем средней для всего очага деформаций.

Уравнение (6.8) в этом случае примет такой вид:

$$P = (\sigma'_s + P\varepsilon_{\theta \text{ ср}}) \left[(1 - k_{\text{отб}}) + \frac{s}{2R_{\text{п}} + s} \right] e^{\mu \alpha} D_0 s. \quad (6.9)$$

Угол α при отбортовке плоским пуансоном равен $\pi/2$. Усилие отбортовки существенно снижается при замене пуансона с плоским торцом на конический или сферический пуансон. Усилие P здесь снижается за счет уменьшения угла α , за счет снижения влияния изгиба, так как при сферическом пуансоне $R_{\text{п}} = R_0$, а при конусной $R_{\text{п}}$ равен радиусу свободного изгиба, определяемому уравнением (5.27).

6.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Технологические возможности отбортовки определяются предельными степенями деформаций кромки отверстия. Как следует из схемы напряженного состояния, кромка деформируется в условиях, близких к линейному растяжению при $\sigma_0 = \sigma_s$. Если принять за характеристики технологических возможностей коэффициент отбортовки, то из уравнения (6.5) следует

$$k_{\text{отб}} = 1/(1 - \varepsilon_0), \quad (6.10)$$

Как и при раздаче, примем в качестве допустимой деформации деформацию устойчивой стадии растяжения, соответствующую моменту образования шейки, т. е.

$$\varepsilon_{\text{лон}} = \psi_{\text{ш}}/(1 - \psi_{\text{ш}}). \quad (6.11)$$

Тогда коэффициент отбортовки минимально предельного значения с учетом (6.11) будет равен

$$k_{\text{отб}} = 1 - \psi_{\text{ш}}. \quad (6.12)$$

Это значение $k_{\text{отб}}$ следует рассматривать как нижний предел деформирования; при отбортовке, как и при раздаче, устойчивое деформирование (без образования шейки) может совершаться и при больших деформациях из-за поддержания кромки соседними менее деформированными волокнами. Кроме того, в общем суммарном формоизменении заготовки участвует и некоторая доля сосредоточенной деформации, которая не учитывается уравнением (6.12). Как показывают опытные данные, допустимая деформация при отбортовке зависит также от толщины заготовки, от состояния поверхности кромки. Нагартованность поверхности, механические дефекты, дефекты структуры кромки резко снижают величину предельной тангенциальной деформации, способствует ее локализации и образованию трещины. Например, при отбортовке заготовок из стали с отверстиями, полученными сверлением с последующей зачисткой заусенцев, $k_{\text{отб}} = 0,36$, а в случае получения отверстий пробивкой $k_{\text{отб}} = 0,45$ ($s/d_{\text{от}} = 0,1$) [34]. При отбортовке отверстий небольших размеров проявляется большая степень деформации, чем при отбортовке крупных деталей. Так, для малоуглеродистой стали при $s/d_{\text{от}} = 0,01$ $k_{\text{отб}} = 0,70 \dots 0,75$, а при

$s/d_{от} = 0,2$ $k_{отб} = 0,30 \dots 0,40$ [34]. Поэтому в зависимости от перечисленных факторов предельные степени деформаций могут колебаться в довольно широком диапазоне. Для алюминиевых сплавов Д16АМ, АМг6М $k_{отб} = 0,9 \dots 0,7$; для стали 1Х18Н10Т $k_{отб} = 0,80 \dots 0,65$. При отбортовке прямоугольных отверстий собственно отбортовка происходит только в угловых участках, а в остальной части заготовки происходит гибка. Степень тангенциальной деформации в данном случае может быть больше, чем при отбортовке круглых отверстий, за счет разгружающего действия соседних малонагруженных участков.

Предельные степени деформаций могут ограничиваться также утонением стенки борта.

Положительно сказывается на возможности процесса отбортовки предварительное утолщение кромки отверстия в заготовке. Утолщенная кромка, подвергаясь утонению при увеличении диаметра, выдерживает большую деформацию до образования трещины.

Нагрев очага деформаций выше температур рекристаллизации металла может обеспечить увеличение в 1,5 и более раза допустимую тангенциальную деформацию.

6.5. РАЗМЕРЫ ЗАГОТОВКИ

В чертеже готовой детали конструктор дает высоту борта H , его диаметр D_6 и радиус R_c сопряжения борта со стенкой. Технологи необходимо определить диаметр отверстия в заготовке с таким расчетом, чтобы после его отбортовки получить заданные размеры борта. Учитывая сложное распределение напряжений в очаге деформаций, при строгих расчетах нельзя определять размеры отверстия из условия развертки при гибке. Здесь можно поступить так же, как при раздаче: определить размер отверстия из условия постоянства объема металла **очага деформаций в предположении, что толщина** стенки борта изменяется от $s \sqrt{R_{отб}}$ на кромке до исходной толщины s у сопряжения со стенкой по линейному закону. Однако в пределах допустимых коэффициентов отбортовки можно приближенно определить размеры отверстия без учета радиальной деформации по формуле (см. рис. 6.1, в):

$$d_{от} = D_6 + 0,86 R_c + 1,43 s - 2H. \quad (6.13)$$

При образовании борта по незамкнутому вогнутому контуру (см. рис. 6.1, г) свободные края борта оказывают некоторое влияние на распределение деформаций; около среза борта тангенциальная деформация растяжения ϵ_θ меньше, чем в средней части, и поэтому уменьшается длина борта. Радиус $r_{заг}$ заготовки для борта заданной высоты H и радиуса R_6 определяется формулой, аналогичной формуле (6.13):

$$r_{заг} = R_6 + 0,43 R_c + 0,72 s - H. \quad (6.14)$$

При отбортовке некруглых отверстий контур края заготовки не должен быть эквидистантен контуру борта в плане. Например, при

отбортовке прямоугольных отверстий ширина заготовки между контурами борта и отверстия должна быть больше в зоне закругленных углов, чем в зоне прямолинейных частей контуров.

6.6. РАЦИОНАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Приведем некоторые данные, направленные на совершенствование операции отбортовки, на снижение усилия деформирования и увеличение высоты бортов.

Размеры и форма рабочих частей штампов играют большую роль в протекании процесса отбортовки. Наибольшее влияние форма инструмента оказывает на усилие деформирования; варьирование формы пуансона при сохранении всех других условий деформирования дало возможность выявить оптимальные формы пуансонов для отбортовки круглых отверстий. Если принять усилие отбортовки пуансоном с криволинейной образующей за 100%, то усилие при отбортовке конусным пуансоном будет составлять 120%, а с плоским торцом — более 200% [34].

Зазор z между матрицей и пуансоном влияет на усилие и на технологические возможности; зазор рекомендуется принимать равным $(1,1 \dots 1,2)s$. Радиус сопряжения ребра матрицы влияет на напряжение в опасной зоне заготовки; при малом радиусе скругления ребра матрицы может возникнуть трещина на выпуклой стороне заготовки. Радиус R_c рекомендуется принимать несколько больше минимального радиуса изгиба данного материала. Радиус R_n сопряжения ребра пуансона оказывает существенное влияние на усилие деформирования, что видно из уравнения (6.9). Через ребро пуансона перегибается заготовка, переходя в цилиндрическую стенку борта; радиус его сопряжения должен быть $(6 \dots 8)s$.

Образование невысоких бортов на деталях небольших толщин производится остроконечным пуансоном, который вначале прокалывает отверстие, а затем его отбортовывает (рис. 6.3, а). В некоторых случаях для отбортовки отверстий применяются вращающиеся пуансоны, не сплошные, а состоящие из отдельных стержней,

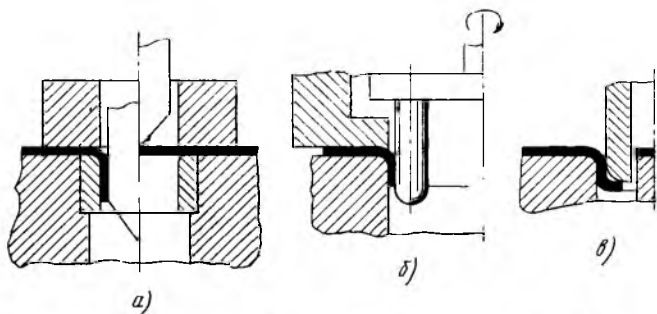


Рис. 6.3. Варианты отбортовки листовых деталей:

а—без предварительного образования отверстия; б—вращающимся инструментом; в—совмещение пробивки отверстия и отбортовки

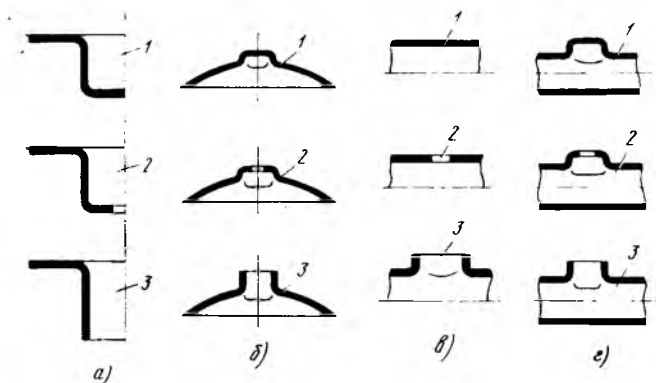


Рис. 6.4 Варианты отбортовки отверстий в пространственных заготовках:

а—в детали после вытяжки; *б*—в днище после формовки; *в*—в обечайках и трубах; *г*—в обечайках и трубах после формовки

расставленных по диаметру, равному D_6 (рис. 6.3, б). На рис. 6.3, в показан комбинированный штамп, в котором пробивается отверстие в заготовке, а затем оно отбортовывается.

Нагрев заготовки для увеличения степени деформации необходимо выполнять дифференцированно. Вблизи края заготовки нагрев должен быть выше, чем на участке сопряжения борта со стенкой, который является в данной операции зоной передачи усилия, в которой металл должен иметь большую несущую способность. Для алюминиевого сплава Д16 температура нагрева заготовки около кромки отверстия должна быть 450°C с плавным снижением до 300°C на стенке борта.

Снижение сил контактного трения достигается подбором эффективных смазок и тщательной обработкой контактных поверхностей, которыми в данном случае являются торец и боковая поверхность пуансона. Влияние сил трения на усилие деформирования выявляется из уравнения (6.9).

В качестве технологического оборудования применяются механические и гидравлические прессы, а также специализированные отбортовочные станки.

На рис. 6.4 показаны варианты отбортовки на заготовках различных форм. Отбортовка деталей после вытяжки (*а*) увеличивает высоту цилиндрической части детали; отбортовка отформованной полости в днищах, обечайках и трубах (*б*) увеличивает высоту борта, который используется для соединения с арматурой; отбортовка отверстий в обечайках и трубах (*в*) обеспечивает целесообразное присоединение отводов (1, 2, 3 — последовательность операций).

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При обжиме в очаге деформаций возникает плоское напряженное состояние, двустороннее сжатие. Как показано в табл. 1.1, внешние нагрузки здесь прикладываются по наружному контуру (по радиусу R) очага деформаций, под действием которых каждое окружное сечение по ходу процесса уменьшается, приближаясь к оси симметрии. Назначение операции — уменьшение диаметра заготовки, трубы или сварной обечайки; на рис. 7.1 показаны наиболее часто встречающиеся формы деталей, изготавливаемые обжимом. Среди них — цилиндрические детали с дном, ступенчатые (тяги управления), обечайки с оживальной образующей, цилиндрические и шаровые баллоны, детали с двойной стенкой. Как видно из рис. 7.1, внешнее усилие P сжатия приложено к торцу заготовки, заготовка как бы заталкивается в матрицу и оформляется по форме ее образующей. Наибольшему сокращению длины в окружном направлении подвергается кромка заготовки при перемещении кромки от радиуса R до r . Относительная окружная деформация ε_θ кромки выражается формулой:

$$\varepsilon_\theta = (r - R)/R = -(1 - k_{об}). \quad (7.1)$$

Как и в других операциях, коэффициент обжима $k_{об}$ характеризует степень формоизменения заготовки. Чем меньше его абсолютное значение, тем больше окружная деформация и больше отношение исходного диаметра заготовки к полученному после окончания операции. В частном случае, когда происходит смыкание кромки, т. е. $r=0$, то $k_{об}=0$. Для этого крайнего случая и стадий, близких к нему, некоторые положения из приведенного ниже анализа операции не являются справедливыми.

Кольцевой очаг деформаций (на рис. 7.1 — зачернен) от r до R может иметь плоскую, коническую или более сложную форму; форма очага деформаций обуславливает особенности напряженно-деформированного состояния и предельные возможности операции. Зона заготовки, через которую в очаг деформаций передается усилие, находится выше очага деформаций; если при обжиме материал заготовки переходит в меньший цилиндрический участок, то операция проходит стационарную стадию, когда очаг деформаций имеет постоянные размеры.

При двухосном сжатии в окружном и меридиональном направлениях заготовка в очаге деформаций утолщается. Наибольшее утолщение получает кромка изделия (по радиусу r). Технологические возможности операции ограничиваются осевой или радиальной потерей устойчивости заготовки. Осевая потеря устойчивости происходит в зоне передачи усилия по внешней границе очага деформаций, радиальная — по очагу деформации (от r до R). Конические складки вдоль радиуса имеют наибольшую высоту у сво-

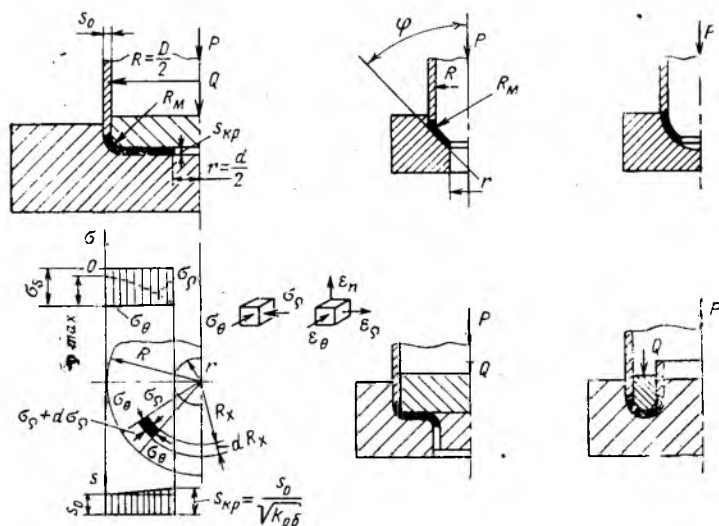


Рис. 7.1. Схема напряженно-деформированного состояния и технологические схемы операции обжима (очаг деформаций — зачернен)

бодной кромки и сходят на нет у наружного контура очага деформаций. Для предотвращения радиальной потери устойчивости применяется прижим, на который действует усилие Q (см. рис. 7.1); для предотвращения осевой потери устойчивости при необходимости заготовку в зоне передачи усилия помещают в зазор между внутренним вкладышем и наружной обоймой штампа.

Сосредоточенной осевой силой обжимают заготовки не только осесимметричные, но и более сложных форм.

7.2. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВКИ

Для выявления механизма деформирования прием быть может не самый употребительный случай обжима, однако наиболее наглядный — обжим с плоским очагом деформаций. Назначение такого процесса — образование дна на трубчатой заготовке (см. рис. 7.1).

Уравнение равновесия элемента, выделенного в очаге деформаций, при проецировании на радиус сил, действующих на него, остается прежним:

$$\frac{d\sigma_0}{dR_x} + \frac{\sigma_0 - \sigma_\theta}{R_x} = 0. \quad (7.2)$$

Уравнение пластичности

$$-\sigma_\theta = \sigma_s. \quad (7.3)$$

Совместное решение этих уравнений при граничных условиях $\sigma_Q = 0$ при $R_x = r$ дает:

$$\sigma_Q = -\sigma_s(1 - r/R_x); \quad (7.4)$$

$$\sigma_Q \max = -\sigma_s(1 - r/R_x) = -\sigma_s(1 - K_{об}). \quad (7.5)$$

На рис. 7.1 показано распределение напряжений σ_Q и σ_θ по очагу деформаций.

Для обжима в конической матрице с углом α конусности и с учетом сил трения на основе совместного решения уравнений (5.7), (5.8) и (7.3) при прежних граничных условиях напряжения определяются уравнениями:

$$\sigma_Q = -\sigma_s(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)(1 - r/R_x); \quad (7.6)$$

$$\sigma_Q \max = -\sigma_s(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)(1 - k_{об}). \quad (7.7)$$

Решение задачи применительно к обжиму в матрице с криволинейной образующей производится также на основе упомянутых уравнений; здесь задача усложняется тем, что $R_Q \neq \infty$ и уравнение (5.8) должно быть принято в таком виде:

$$\sigma_Q/R_Q + \sigma_\theta/R_\theta - \sigma_K/s_0 = 0. \quad (7.8)$$

Деформированное состояние отдельных зон очага деформаций примерно характеризует уравнение (5.13) при сохранении отношения σ_Q/σ_θ . Более точное уравнение:

$$s_x = s_0(R_x/R) - \left(\frac{1 - \sigma_Q/\sigma_\theta}{2 - \sigma_Q/\sigma_\theta} \right)_{ср}.$$

Наибольшая окружная деформация сжатия происходит на свободной кромке заготовки; толщина заготовки здесь при $\sigma_Q/\sigma_\theta = 0$, как следует из уравнения (5.13), равна:

$$s_{кр} = s_0/\sqrt{k_{об}}. \quad (7.9)$$

Окружная деформация ε_θ для любого волокна, находящегося в очаге деформаций на радиусе R_x , равна $\ln R_x/R$ или $(R_x - R)/R$. Радиальная деформация ε_Q — положительна и определяется из условия постоянства объема по формуле

$$\varepsilon_Q = \varepsilon_\theta - \varepsilon_n. \quad (7.10)$$

7.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ

Усилие P деформирования складывается из сопротивления металла деформированию, сопротивления сил трения и изгиба. Сопротивление деформированию количественно определяется $\sigma_Q \max$. Для уточнения значения $\sigma_Q \max$ учтем в уравнении (7.5) или (7.7) деформационное упрочнение металла путем замены σ_s на $\sigma_{ср}$, которое примем соответствующим средней по очагу деформации тангенциальной деформации $\varepsilon_\theta \text{ ср}$. В начале очага деформаций $\varepsilon_\theta = 0$, а на кромке $\varepsilon_\theta = 1 - k_{об}$; в этом случае примерное среднее значение

ние деформации можно принять равным $\varepsilon_{\text{ср}} = (1 - k_{\text{об}})/2$, а сопротивление деформированию

$$\sigma_{s \text{ ср}} = \sigma'_s + \Pi(1 - k_{\text{об}})/2. \quad (7.11)$$

Уравнения (7.5) и (7.7) с учетом этого примут вид:

$$\sigma_{Q \text{ max}} = - \left(\sigma'_s + \Pi \frac{1 - k_{\text{об}}}{2} \right) (1 - k_{\text{об}}); \quad (7.12)$$

$$\sigma_{Q \text{ max}} = - \left(\sigma'_s + \Pi \frac{1 - k_{\text{об}}}{2} \right) (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) (1 - k_{\text{об}}). \quad (7.13)$$

Влияние изгиба и спрямления заготовки на входе в очаг деформаций учтем уравнением (5.12). При этом радиус изгиба R_Q определяется радиусом матрицы и равен $R_Q = R_M - 0,5s$. Тогда усилие деформирования для обжима в конической матрице будет равно

$$P = \left[\left(\sigma'_s + \Pi \frac{1 - k_{\text{об}}}{2} \right) (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) (1 - k_{\text{об}}) + \frac{\sigma_s s_0}{2R_M - s_0} \right] \pi D s'_0 \quad (7.14)$$

и приближенное значение P для обжима в плоской матрице

$$P = \left[\left(\sigma'_s + \Pi \frac{1 - k_{\text{об}}}{2} \right) (1 - k_{\text{об}}) + \frac{\sigma_s s_0}{2R_M - s_0} \right] \pi D s_0. \quad (7.15)$$

Прижим заготовки в очаге деформаций применяется в тех случаях, когда имеется реальная опасность радиальной потери устойчивости, которая выявляется при большом формоизменении тонкостенных заготовок ($s_0/D < 0,02$). Обжим со складкодержателем расширяет технологические возможности операции, и в последние годы интерес к этому процессу увеличивается. Основные сведения о нем даны в работах [3, 33].

Усилие Q прижима определяется необходимым давлением q и величиной площади контакта заготовки с прижимом:

$$Q = (q\pi/4)(L^2 - d^2). \quad (7.16)$$

Примерное значение давления q должно соответствовать нижнему пределу q , принимаемому при вытяжке (см. гл. 4).

7.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Технологические возможности определяются коэффициентом обжима; при $k_{\text{об}} < k_{\text{об min}}$ усилие P превышает критическое значение и на заготовке в зоне передачи усилия образуется кольцевая складка. Следовательно, критерием нормального протекания процесса является $\sigma_{Q \text{ max}} < \sigma_{\text{кр}}$. Опыты показывают, что при относительной толщине заготовки $s_0/D > 0,02$ осевая потеря устойчивости наступит при $\sigma_{Q \text{ max}} = \sigma_s$.

Из уравнений (7.12) и (7.13) видно, что чем меньше $k_{\text{об}}$, чем больше Π и μ , тем быстрее $\sigma_{Q \text{ max}}$ достигает предела текучести σ_s и появляется опасность потери устойчивости.

На основе опытных данных можно привести следующие предельные значения коэффициентов отжима ($s_0/D > 0,02$): сплав

Д16 — 0,75, сплав АМг6 — 0,70...0,75; сталь малоуглеродистая 0,70...0,75. Для труб с меньшей относительной толщиной технологические возможности уменьшаются. Вместе с тем, если обжим проводить со складкодержателем, предотвращающим радиальную потерю устойчивости, то возможности операции расширяются.

Для примера покажем, как с введением складкодержателя изменяется значение $k_{об}$ для труб из АМг6 [33]:

	0,015	0,010	0,005
s_0/D Без складкодержателя	0,80	0,90	0,96
$k_{об}$ Со складкодержателем	0,70	0,73	0,83

Существенную роль в интенсификации обжима играет нагрев заготовки в очаге деформаций; при этом создается различное сопротивление деформированию в опасном сечении и в очаге деформаций, что положительно сказывается на протекании процесса. Для качественной иллюстрации этого заменим в уравнении (7.7) σ_s на $\sigma_{s\text{ ср}}$ — среднее сопротивление деформированию металла в очаге деформаций, $\sigma_{Q\text{ max}}$ на σ_s — предел текучести недеформированного металла в зоне передачи усилия ($R_x=R$), тогда $k_{об}$ должно иметь минимально допустимое значение. Дополним уравнение (7.7), кроме того, слагаемым, учитывающим $\sigma_{изг}$ по уравнению (5.12), и решим его относительно $k_{об}$:

$$k_{об} = 1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{s\text{ ср}}} \frac{1}{1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha} \left(1 - \frac{s_0}{2R_M - s} \right) = 1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{s\text{ ср}}} C. \quad (7.17)$$

Из этого уравнения видно, что $k_{об}$ зависит от соотношения пределов текучести в опасном сечении σ_s и в очаге деформаций $\sigma_{s\text{ ср}}$. Если процесс проходит без нагрева заготовки и металл в очаге деформаций упрочняется, то отношение $\sigma_s/\sigma_{s\text{ ср}}$ становится меньше единицы и в конечном итоге $k_{об}$ увеличивается, что снижает степень достигаемой деформации. И наоборот, если процесс происходит с нагревом очага деформаций и температура нагрева распределяется вдоль радиуса так, как показано на рис. 7.2, а, то $\sigma_{s\text{ ср}} < \sigma_s$; $\sigma_s/\sigma_{s\text{ ср}} > 1$, что обеспечивает в уравнении (7.17) уменьшение $k_{об}$. При определенных режимах произведение $(\sigma_s/\sigma_{s\text{ ср}})C$ может приближаться к единице ($C < 1$), и тогда $k_{об} \rightarrow 0$. Это означает, что обжим с дифференцированным нагревом может обеспечить предельно возможное редуцирование, т. е. до смыкания кромок. Опыты показывают справедливость такого заключения [9]. Так, в сферической матрице (рис. 7.2, б) обжим с нагревом очага деформаций от горячей матрицы (450°С) и с искусственным охлаждением опасной зоны заготовки (до 300°С) обеспечивает на трубах из сплава Д16 и АМг6 полное смыкание кромок с созданием требуемой герметичности. Такой технологический процесс принят для изготовления цилиндрических баллонов; этим способом возможно изготовление также небольших полых шаровых изделий ($s_0/D > 0,02$).

Зональный нагрев обеспечивает также существенную интенсификацию обжима тонкостенных труб и оболочек ($s_0/D < 0,02$) с при-

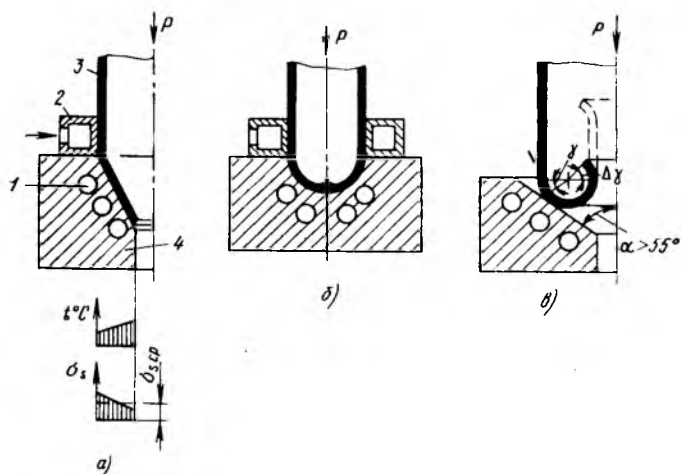


Рис. 7.2. Схемы обжима с нагревом очага деформаций и охлаждением передающей зоны:

а—в конической матрице; *б*—в сферической матрице; *в*—выворот в конической матрице ($\alpha > 55^\circ$); 1—нагревательное устройство; 2—охладитель; 3—заготовка; 4—матрица

менением прижима. Оболочки с относительной толщиной 1,5% также обжимаются до смыкания; в конических матрицах достигается $k_{об} = 0,4; 0,5; 0,8$ при s_0/D соответственно 1,5; 1,0 и 0,5%.

Увеличить степень деформации при обжиме тонкостенных заготовок позволяют: деформирование их с технологической оболочкой, увеличивающей s_0/D ; проведение операции с прижимом, для чего на заготовку надевают обойму, а внутрь вставляют вкладыш, соответствующий ее внутреннему диаметру; предварительное утолщение кромки заготовки, что также увеличивает s_0/D . Все эти варианты направлены на предотвращение потери устойчивости как в передающей зоне, так и в очаге деформаций.

7.5. РАЗМЕР ЗАГОТОВКИ

Как следует из схемы напряженно-деформированного состояния, наибольшая деформация сжатия в окружающем направлении компенсируется деформациями удлинения в радиальном и нормальном к поверхности очага направлениях. В силу этого следует ожидать, что заготовка в обжатой части по длине будет увеличиваться. Опыты показывают, что при небольших деформациях $k_{об} > 0,8$ и без выхода на меньший диаметр изменения по длине заготовки несущественны, однако при меньших коэффициентах обжима изменения длины заготовки следует учитывать. Если в основу

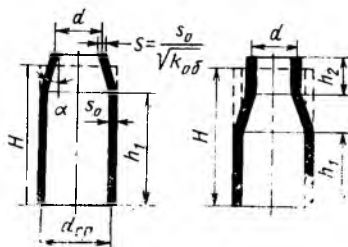


Рис. 7.3. Детали, обжатые в конических матрицах

расчета положить условие постоянства объема и предположение о линейном законе изменения толщины обжатой части в пределах от s_0 в начале очага деформаций до $s_0/\sqrt{k_{об}}$ на кромке, то для определения длин заготовок в обозначениях рис. 7.3 получаются такие формулы применительно к обжиму в конических матрицах без выхода и с выходом в малый цилиндр [2]:

$$H = 1,05 \left[h_1 + \frac{d_{cp}^2 - d^2}{4 \sqrt{d_{cp} d} \sin \alpha} \right]; \quad (7.18)$$

$$H = 1,05 \left[h_1 + \frac{h_2 d + (d_{cp}^2 - d^2)/(4 \sin \alpha)}{\sqrt{d_{cp} d}} \right].$$

Коэффициент 1,05 учитывает неровности кромки и дает некоторый припуск по длине детали для зачистки или приторцовки кромки.

7.6. РАЦИОНАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Установленные аналитические зависимости дают возможность наметить такие условия деформирования, которые обеспечат максимальное использование возможностей операций. Основные критерии рациональности режимов — сниженное значение усилия P и увеличенная степень деформации.

Форма инструмента (матрицы) существенно влияет на ход процесса. Наилучшие условия обеспечиваются при обжиме в сферической матрице. Здесь нет резкого перегиба на входе заготовки в очаг деформаций, нет спрямления, нет резкого возрастания давления и, следовательно, повышенного влияния сил трения; здесь меньшая склонность к появлению радиальных конических складок. В этом варианте легче достигается обжим до смыкания кромок.

Расчетами и опытами установлен диапазон оптимальных углов α конических матриц, обеспечивающих минимальное значение деформирующего усилия P . Это не следует из уравнения (7.14), где α влияет на усилие однозначно: с увеличением α увеличивается P . Однако если подсчитать усилие P с учетом влияния α на распределение напряжений σ_0 , то зависимость P_0 от α становится более сложной и выявляется оптимальное значение углов. Аналитически α_{opt} определяется формулой [31]:

$$\sin \alpha_{opt} = \sqrt[3]{\mu/2}. \quad (7.19)$$

Для реальных условий трения α_{opt} лежит в пределах $20 \dots 30^\circ$.

При углах $\alpha > 55^\circ$ заготовка отрывается от конической поверхности матрицы и начинает выворачиваться. Получив на входе изгиб по радиусу R_0 (см. рис. 7.2, в) на угол γ , заготовка может «избрать» два пути дальнейшего движения: 1) спрямиться и перемещаться к центру, обжимаясь на конической поверхности; 2) не спрямляться, а продолжать завиваться далее без изменения

R_0 , подвергаясь также обжиму вне контакта с матрицей с увеличением угла γ до 2π . Заготовка «избирает» направление с наименьшим сопротивлением и деформируется по второму варианту.

При достижении изгиба на угол $\gamma=2\pi$ (см. рис. 7.2, в) кромка заготовки не спрямляется, а продолжает завиваться далее, подвергаясь уже не обжиму, а раздаче (кромка увеличивается по диаметру. И только при достижении углом γ значения $\gamma=2\pi+\Delta\gamma$ (где $\Delta\gamma=30 \dots 40^\circ$) заготовка на участке $\gamma=2\pi$ начинает спрямляться, образуя цилиндрическую часть меньшего диаметра.

Для обеспечения требуемого α при $\Delta\gamma=0$ необходимы прижим и матрица специальной конструкции (см. рис. 7.1).

При $P>P_{кр}$ заготовка теряет устойчивость, на входе ($R_x=R$) в матрицу на ней образуется наружная кольцевая складка. Для предотвращения появления складки передающую зону полезно поместить в обойму, а внутрь вставить вкладыш. На рис. 7.4 показаны штампы с двусторонним подпором заготовки; установка их предусматривается на прессах двойного действия — с нижним (а) или верхним (б) дополнительным приводом.

Радиусы R_m сопряжения цилиндрических и конической поверхностей матрицы, как видно из уравнения (7.14), нельзя принимать слишком малыми, чтобы не увеличивать слагаемое $\sigma_{изг}$; значение R_m не должно быть меньше $3s$.

Трение на поверхностях контакта снижает возможности процесса, и требования по уменьшению его влияния являются такими же, как и для других операций.

В качестве **технологического оборудования** для обжима с нагревом применяются гидравлические прессы со скоростью перемещения плунжеров не выше 15 см/мин; деформирование в холодном состоянии производится как на гидравлических, так и на механических прессах.

Зональный нагрев заготовки из алюминиевых сплавов производится непосредственно от контакта с нагретой матрицей; как показано на рис. 7.2, матрица 4 помещена в нагревательное устройство 1, где нагревается равномерно. Однако действие охлаждающего устройства 2 обеспечивает требуемый перепад температур вдоль очага деформаций. В качестве нагревателей применяются спирали из нихромовой проволоки или ленты, а для охлаждения — проточная вода.

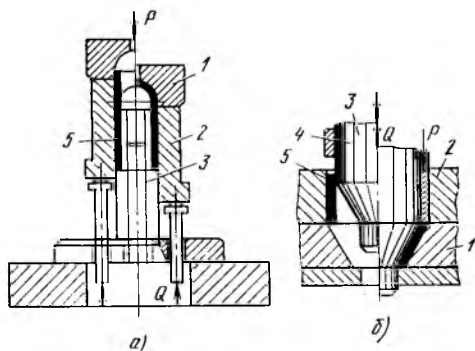


Рис. 7.4. Штампы для обжима с внутренним и внешним подпором:

1—матрица; 2—наружная обойма; 3—внутренний вкладыш (прижим); 4—пуансон; 5—заготовка

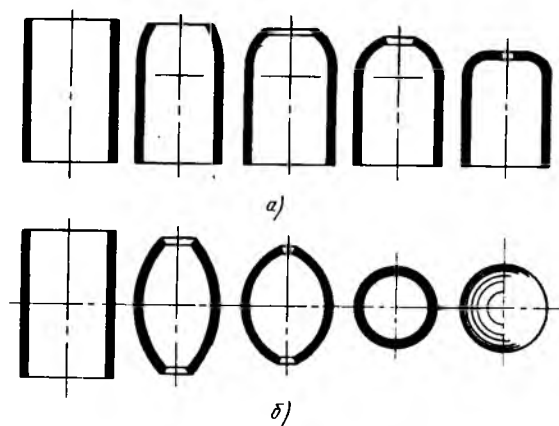


Рис. 7.5. Последовательность изготовления обжимом деталей:

а—с дном; б—шаровой

Число операций обжима при многооперационной штамповке определяется исходя из технологических возможностей каждой операции. Для восстановления пластических свойств металла в данном случае предусмотрена межоперационная разупрочняющая термическая операция. На рис. 7.5 даны два примера последовательности изготовления деталей методом обжима.

ГЛАВА 8 ФОРМОВКА

Как следует из принятой классификации (см. табл. 1.1), *формовкой* является формоизменяющая операция, при выполнении которой очаг деформации явно очерчен только с внутренней стороны (контур радиуса r), к которой приложено внешнее усилие растяжения. Внешний край заготовки находится на значительном расстоянии от внутреннего ($R > 10r$), поэтому его можно считать вообще отсутствующим. Внешнее силовое воздействие по контуру r не может обеспечить перемещения внешнего края заготовки. В этих условиях образование полости при движении пуансона может происходить только за счет увеличения площади заготовки и ее утонения.

На рис. 8.1 показаны технологические схемы формовки и детали, при формообразовании которых участвует операция формовки. Среди них детали нервюр и шпангоутов, днища и обечайки баков, детали трубопроводов, диафрагмы и перегородки. Формовкой полу-

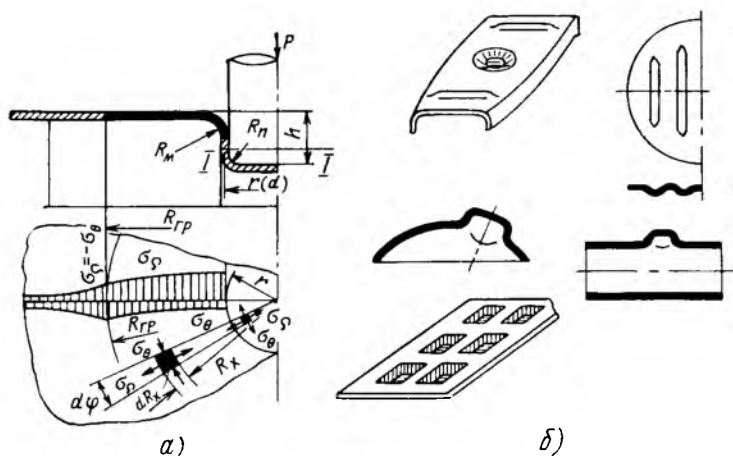


Рис. 8.1. Схема напряженного состояния, технологические схемы и детали, изготавливаемые формовкой:

$l-l$ —опасное сечение

чают также отводы на трубах, на днищах, на обечайках; здесь эта операция применяется как предварительная — перед отбортовкой. Наиболее широкое применение формовка получила при изготовлении крупногабаритных плоских деталей, стенок поперечного и продольного силового набора планера. Для придания таким деталям большей жесткости на них формуют элементы жесткости: круглые и прямоугольные глухие полости, рифты, крестовины, подсежки и др. Часто эта операция выполняется не в инструментальных штампах, а на формблоках давлением резины.

Отсутствие одной из границ очага деформаций накладывает определенную специфику на механизм деформирования. Как видно из схемы напряженного состояния (см. рис. 8.1), внешнее усилие P через пуансон и вертикальную стенку полости передается во фланцевую часть; здесь возникают в меридиональном направлении напряжения σ_r растяжения, которые обуславливают пластические деформации и втягивание близлежащих к контуру r частей заготовки в полость матрицы. Распространение пластических деформаций в неограниченной с внешней стороны заготовке сдерживается прочностью опасного сечения, которое расположено около сопряжения дна со стенкой полости, где металл не упрочнен деформацией и где действует $\sigma_{q\max}$. Следовательно, заготовка в зоне, удаленной от ребра матрицы, деформируется лишь упруго.

В качестве показателя формоизменения заготовки обычно принимается отношение высоты h формируемой полости к ее диаметру d . Формовка производится на универсальных прессах, а также на мощных гидравлических специализированных прессах для штамповки пластическими средами.

8.1. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ

Схема напряженного состояния элемента, выделенного в очаге деформаций на расстоянии R_x от оси симметрии, показана на рис. 8.1, а. Давление прижима, устраняющего возможность появления складок, мало по сравнению с σ_s , поэтому σ_n принимается равным нулю.

Из всех, как и ранее, принимаемых допущений наиболее нелогичным здесь является условие неизменности толщины, так как при формовке получение полости происходит только за счет утонения материала. Однако при небольших глубинах полостей, достигаемых при обычных условиях деформирования, такое допущение можно принять.

Уравнение равновесия и условие пластичности имеют тот же вид, что и для вытяжки. Совместное решение их во всех предыдущих случаях происходило при определении постоянной интегрирования из условия, что на свободной кромке $\sigma_\theta = 0$. При формовке свободного контура нет, поэтому данное граничное условие не подходит. Однако на фланце имеется граница $R_x = R_{rp}$ между пластической и упругой зонами, условия на которой могут быть определены. На этой границе должно выполняться условие пластичности и закономерности упругого деформирования при заданной схеме нагружения пластины по контуру отверстия с радиусом r . По условию пластичности на границе должно быть $|\sigma_r| + |\sigma_\theta| = \sigma_s$, а по условию упругого деформирования $|\sigma_r| = |\sigma_\theta|$ [40]. Тогда при $R_x = R_{rp}$ определяются значения $\sigma_\theta = \sigma_s/2$.

Решение уравнения равновесия совместно с уравнением пластичности при указанных граничных условиях дает:

$$\sigma_r = \sigma_s \ln \frac{R_{rp}}{R_x} + \frac{\sigma_s}{2}; \quad (8.1)$$

$$\sigma_\theta = - \left[\sigma_s - \left(\sigma_s \ln \frac{R_{rp}}{R_x} + \frac{\sigma_s}{2} \right) \right]. \quad (8.2)$$

На внутреннем контуре очага деформаций $R_x = r$ напряжение σ_θ имеет максимальное значение:

$$\sigma_{r \max} = \sigma_s \ln (R_{rp}/r) + (\sigma_s/2). \quad (8.3)$$

За границей пластической зоны ($R_x > R_{rp}$) происходит упругое деформирование, напряжения убывают в соответствии с уравнениями [40]

$$\sigma_r = (\sigma_s/2)(R_{rp}^2/R_x^2); \quad \sigma_\theta = -(\sigma_s/2)(R_{rp}^2/R_x^2).$$

На рис. 8.1 показана схема распределения напряжений вдоль радиуса R_x .

Значение радиуса R_{rp} можно определить из условия, что максимальное значение $\sigma_{r \max}$ при $R_x = r$ равно σ_s . Тогда из (8.3) находим $R_{rp} = 1,65r$.

Деформированное состояние определяется из условий связи главных напряжений и деформаций. Наибольшее утонение заготовки происходит в зоне сопряжения дна со стенкой полости.

Усилие P деформирования определяется сопротивлением деформированию металла ($\sigma_{p \max}$) сопротивлением изгиба ($\sigma_{изг}$) и трения ($\sigma_{тр}$). Сопротивление деформированию должно быть принято с учетом упрочнения, для чего вместо σ_s надо принять $\sigma_{s \text{ ср}}$, т. е. среднее сопротивление деформированию, определяемое средней по очагу интенсивностью деформаций $\varepsilon_{i \text{ ср}}$. Ввиду сложности расчета $\varepsilon_{i \text{ ср}}$, можно учесть эффект упрочнения через задаваемое допустимое утонение заготовки $\varepsilon_{n \max}$. Тогда приближенное уравнение для определения усилия деформирования будет таким:

$$P = \left[(\sigma_s + 0,5 \Pi \varepsilon_{n \max}) \left(0,5 + \ln \frac{R_{rp}}{r} \right) + \frac{\sigma_s s}{2(R_M + s/2)} \right] e^{\mu \alpha} \pi ds. \quad (8.4)$$

Усилие Q прижима может быть определено по формуле:

$$Q = qF,$$

где F — площадь контакта прижима с заготовкой в пределах очага деформаций (от r до R_{rp}); q — давление прижима, принимаемое по своему значению таким же, как при выполнении операции вытяжки.

Следует отметить, что формовка осуществляется иногда в другом варианте; свободная кромка заготовки не так далеко удалена от контура матрицы ($3-5r$) и для предотвращения ее перемещения при опускании пуансона производят жесткое защемление периферийной части заготовки прижимом. При этом полость также образуется только за счет утонения заготовки, однако изменение граничных условий изменяет механизм деформирования и распределение напряжений.

8.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Показатели технологических возможностей здесь совершенно иные, чем для ранее рассмотренных операций. Показатель h/d (см. рис. 8.1) мало характеризует формоизменение исходной заготовки, габаритные размеры ее остаются неизменными; он является сравнительным показателем, по его значению можно разделить металлы по способности подвергаться деформированию при данном напряженном состоянии.

Полость диаметром d и высотой h образуется при неизменных внешних размерах заготовки, и поэтому абсолютные размеры полости или отношение h/d будут зависеть от площади заготовки, вовлеченной в пластическое деформирование, от степени и равномерности ее деформации, т. е. от параметров R_{rp}/r и ε_n . Можно условно установить зависимость h/d от R_{rp}/r и ε_n .

Предположим, что полость формируется лишь за счет фланцевой части заготовки; донная ее часть блокируется силами трения на ребре пуансона и деформируется незначительно. Примем R_M и R_{Π} равными нулю. Предположим далее, что стенка полости образуется

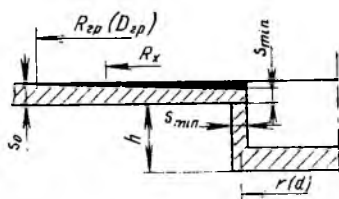


Рис. 8.2. К определению относительной высоты полости (h/d) при формовке

путем утонения фланцевой части, где толщина после формовки будет $s=s_0$ при $R_x=R_{гp}$ и $s=s_{min}$ при $R_x=r$. Максимальное утонение заготовки обычно задается конструктором и, следовательно, значение s_{min} известно. Толщину стенки полости примем равномерной и равной s_{min} . Тогда из условия постоянства объема предполагая, что стенка получается как бы за счет перемещения некоторого объема (на рис. 8.2 — зачернен) металла из фланца, получим

$$\pi/4 (D_{гp}^2 - d^2) \frac{s_0 - s_{min}}{2} = \pi d h s_{min}; \quad (8.5)$$

$$h/d = \frac{(R_{гp}^2/r^2 - 1)(s_0/s_{min} - 1)}{8}.$$

Если допустимо принять $s_{min}=0,7s_0$, то при $R_{гp}=1,65r$, как было определено ранее, высота h получаемой полости может быть разной всего лишь около $0,1d$. Такая круглая полость или рифт как элемент жесткости может во многих случаях соответствовать функциональному назначению, однако в ряде случаев такая глубина может быть недостаточной. Для расширения технологических возможностей необходимо наметить пути увеличения $R_{гp}$ с тем, чтобы охватить пластическим деформированием большую площадь заготовки.

Дифференцированный нагрев заготовки, как и для ранее рассмотренных операций, является эффективным направлением интенсификации. Мы определили $R_{гp}=1,65r$ из уравнения (8.3), приняв $\sigma_{p \max}=\sigma_s$ и предположив, что во всех трех членах уравнения σ_s равны друг другу (упрочнение или разупрочнение отсутствуют). Однако при помощи дифференцированного нагрева свойства металла вдоль радиуса можно сделать неодинаковыми с намерением увеличения $R_{гp}/r$.

Примем пределы текучести: σ_{sr} при $R_x=r$; σ_{sR} при $R_x=R_{гp}$; $\sigma_{ср}=(\sigma_{sr}+\sigma_{sR})/2$ — среднее значение в диапазоне R_x от r до $R_{гp}$. Тогда уравнение (8.3) переписывается так:

$$\sigma_{sr}=\sigma_{ср} \ln(R_{гp}/r) + \sigma_{sR}/2, \quad (8.6)$$

откуда
$$R_{гp}=r \exp \frac{2 - \sigma_{sR}/\sigma_{sr}}{1 + \sigma_{sR}/\sigma_{sr}}. \quad (8.7)$$

Отсюда следует, что чем меньше σ_{sR}/σ_{sr} , тем больше $R_{гp}/r$. При $\sigma_{sR}=0,56\sigma_{sr}$ $R_{гp}=2,72r$; при $\sigma_{sR}=0,2\sigma_{sr}$ $R_{гp}=3,42r$; при $\sigma_{sR} \rightarrow 0$ $R_{гp}=7,39r$.

Из (8.5) можно определить относительную высоту полости при $s_{\min} = 0,7s_0$; $h = 0,43d$ при $R_{rp} = 3r$; $h = 0,8d$ при $R_{rp} = 4r$; $h = 1,9d$ при $R_{rp} = 6r$.

Опыты подтверждают реальные возможности формовки с нагревом заготовки высоких полостей; практически достигнуты $h = 2d$ на заготовках из сплава Д16 с нагревом очага деформаций до $t_{\max} = 450^\circ$ в зоне R_{rp} и $t_{\min} = 300^\circ$ в зоне r [21].

Увеличению R_{rp} способствует предварительная штамповка на заготовке кольцевых рифтов (рис. 8.3). Формовка таких заготовок облегчается тем, что рифт как бы имитирует край заготовки, процесс становится похожим на вытяжку. Давление на рифт прижима способствует его распрямлению и перемещению материала в стенку детали. Рифт может быть расположен на расстоянии $R_{rp} = 2r$ и более (при формовке с нагревом).

Увеличению высоты полостей способствует рациональная форма инструмента и условия деформирования.

Радиус R_m ребра матрицы принимается $6 \dots 8s_0$ с тем, чтобы не перегружать опасного сечения за счет увеличенного слагаемого $\sigma_{\text{изг}}$.

Радиус R_n кромки пуансона должен соответствовать радиусу сопряжения дна со стенкой полости. Малое значение R_n отрицательно сказывается на возможности процесса; из-за трения, возникающего на ребре, исключается участие в пластическом деформировании донной части заготовки. Наилучшие результаты обеспечиваются при $R_n = r$ (сферический пуансон), когда донная часть тоже утоняется и часть металла отсюда переходит в стенку детали.

Зазор между пуансоном и матрицей можно принимать равным s_0 , при этом вовлечение в зазор утоненной заготовки исключает калибровку стенки в зазоре.

Эффективная смазка заготовки и штампа способствует уменьшению P и увеличению глубины h полости.

Форма заготовки в операции формовки определяется конструкцией детали и не влияет на возможности процесса, так как при этой операции внешние размеры изделия сохраняются.

В производственных условиях при формовке круглых полостей на заготовках из алюминиевых сплавов достигается высота $h = 0,2d$, а из стали 1Х18Н10Т $h = 0,3d$. При этом утонение в опасной зоне составляет $25 \dots 35\%$. Те же данные приемлемы для формовки прямоугольных полостей. В этом случае r равен радиусу сопряжения стенок полости в плане. При необходимости формовка производится в несколько операций с промежуточной разупрочняющей термической обработкой.

Формовка широко применяется как предварительная операция перед отбортовкой, что показано на рис. 6.4, б. Формовка менее других изучена теоретически и экспериментально. В настоящее вре-

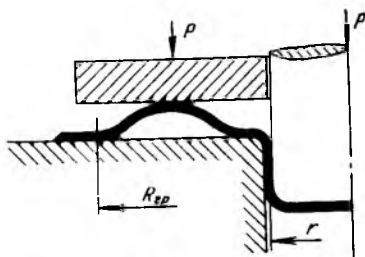


Рис. 8.3. Формовка заготовки с предварительно набранным материалом

мя ведутся работы по формовке деталей в режиме сверхпластичности. Основная задача развития операции заключается в изыскании путей обеспечения равномерности деформации по толщине заготовки, снижения разнотолщинности деталей. Имеются попытки решения этой задачи предварительным профилированием заготовки, созданием переменного поля температур в процессе деформирования, переменного поля давлений, совмещением разных видов нагружения и др. Формовка часто производится не в инструментальных штампах, а резиной, жидкостью или полиуретаном, являющимися универсальными пуансонами или матрицами. Формовка участвует при выполнении других операций; при вытяжке и отбортовке в начальный момент, когда еще не тронулся свободный край заготовки, происходит формовка с образованием полости небольшой высоты.

ГЛАВА 9 ОБТЯЖКА

При выполнении обтяжки заготовка растягивается по внешнему контуру (R) при отсутствии второго контура очага деформаций ($r=0$, см. табл. 1.1). Такая схема нагружения встречается при штамповке в инструментальных штампах в донной части заготовки во время вытяжки, формовки, при выпучивании защемленной по краям заготовки. Устройство перетяжных ребер на матрицах при вытяжке сложных по форме деталей и деталей, не имеющих вертикальных стенок, приближает вытяжку к обтяжке по пуансону. В качестве самостоятельной (не сопутствующей) формообразующей операции формовка в таком варианте применяется редко; наиболее возможным таким случаем является обтяжка по сферическому пуансону или по пуансону, имеющему сложную поверхность.

Однако обтяжка внедрилась в производство деталей самолетов в неосесимметричном варианте для изготовления внешних обшивок планера самолета на специализированных обтяжных прессах. Прямоугольная заготовка обшивки растягивается в этом случае только по длине или только в поперечном направлении; в редких случаях заготовка захватывается и растягивается по двум на-

правлениям, и тогда обтяжка называется биаксиальной. Типы обшивок показаны на рис. 1.1, а на рис. 9.1 показаны технологические схемы поперечной, продольной и кольцевой обтяжки по пуансонам (оправкам) различной формы.

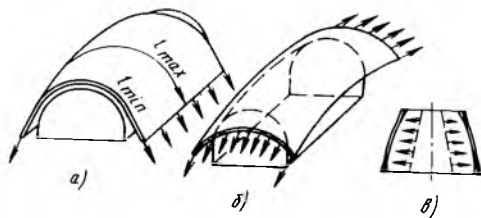


Рис. 9.1. Технологические схемы обтяжки:
а—поперечная; б—продольная; в—кольцевая

К обшивкам предъявляют высокие требования по

точности и шероховатости поверхности, так как именно наружные обшивки окончательно формируют теоретический контур планера, находящегося в полете в набегающем потоке воздуха. Трудовые затраты на изготовление обшивок достигают 15% от всей трудоемкости заготовительно-штамповочных работ. Основные материалы для обшивок — сплавы Д16, В95, а для высокоскоростных машин — титановые сплавы и стали.

Для осесимметричной обтяжки как сопутствующей операции распределение напряжений σ_r и σ_θ по очагу деформаций определяется так же, как и в ранее рассмотренных операциях. Уравнение равновесия при тех же допущениях решается совместно с уравнением пластичности, которое для плоского двустороннего растяжения принимается в виде $\sigma_\theta = \sigma_s$. На рис. 8.1 донная часть заготовки является очагом деформаций обтяжки. Здесь выделен элементарный участок, по границам которого действуют напряжения σ_r и σ_θ ; радиус R_x изменяется в пределах от $R_x=0$ в полярной точке до $R_x=r$ на внешнем контуре очага деформаций. В качестве граничных условий можно принять условие: когда $R_x=r$, то $\sigma_r = \sigma_{r \max}$ ($\sigma_{r \max}$ — максимальное радиальное напряжение, определенное при анализе фланцевой части, подвергающейся формовке). Если рассматривается обтяжка как самостоятельная операция и на внешней границе очага деформаций σ_θ неизвестно и подлежит определению, то можно использовать другое условие при выявлении значений постоянной интегрирования: когда $R_x=0$, то $\sigma_r = \sigma_\theta$.

Обтяжка листов прямоугольной формы — более сложный случай деформирования, так как отсутствует осевая симметрия. Далее мы кратко рассмотрим каждый из показанных на рис. 9.1 видов обтяжки.

9.1. ПОПЕРЕЧНАЯ ОБТЯЖКА

На рис. 9.2 показана схема обтяжки обшивок на специализированном обтяжном прессе (ОП).

Характерным для этого случая обтяжки является то, что растяжение заготовки происходит в поперечном направлении, захваты прессы расположены вдоль длинной стороны листа.

Обтяжка деталей одинарной кривизны (цилиндрических или конических) по напряженно-деформированному состоянию заготовки относится к изгибу с растяжением. Плоская заготовка заправляется в зажимы 6, после чего в нижнюю полость гидроцилиндров 1 подается давление; пуансон (болванка) 4, установленный на столе 3, поднимается штоками двух гидроцилиндров 1 вверх к заготовке, которая обтягиваясь по пуансону, принимает его форму. Сила N натяжения на свободном участке заготовки между болванкой и зажимами зависит от усилия P , развиваемого гидроцилиндрами и передаваемого на пуансон столом прессы, и определяется из уравнения

$$2N \cos \varphi = P. \quad (9.1)$$

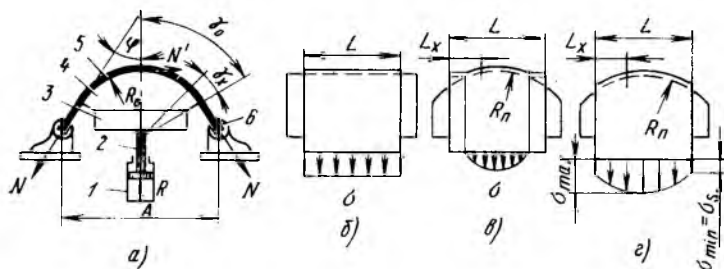


Рис. 9.2. Поперечная обтяжка на обтяжном прессе ОП:

а—схема обтяжки; б—обтяжка деталей одинарной кривизны; в—обтяжка деталей двойной кривизны (промежуточная стадия); г—то же, конечная стадия; 1—гидроцилиндр; 2—шток гидроцилиндра; 3—стол пресса; 4—пуансон (болванка); б—заготовка; б—зажим

Сила N неодинакова по сечениям заготовки и изменяется (уменьшается) за счет контактного трения от сечения к сечению обратно пропорционально множителю Эйлера. В центральной зоне обшивки ($\gamma_x = \gamma_0$, см. рис. 9.2, а) тангенциальная сила растяжения

$$N' = N / e^{\mu \gamma_0}. \quad (9.2)$$

Для достижения наибольшей точности деталей сила N должна в центральной зоне обеспечивать деформацию одного знака по высоте сечения. Тогда можно записать:

$$\left(\sigma'_s + \frac{\Pi s}{2R_0} \right) sL = \frac{P}{2e^{\mu \gamma_0} \cos \varphi}.$$

Здесь σ'_s — экстраполированный предел текучести; Π — модуль упрочнения; s — толщина заготовки; R_0 — радиус нейтрального слоя; L — длина обшивки; μ — коэффициент трения. Отсюда необходимое усилие P привода стола определяется уравнением

$$P = 2Lse^{\mu \gamma_0} \left(\sigma'_s + \Pi \frac{s}{2R_0} \right) \cos \varphi. \quad (9.3)$$

Большинство обшивок имеет малую кривизну, и деформации от изгиба определяются десятными долями процента, поэтому вторым слагаемым в уравнении (9.3) можно пренебречь и записать, что

$$P = 2Lse^{\mu \gamma_0} \sigma'_s \cos \varphi. \quad (9.4)$$

Точность обтяжки цилиндрических обшивок соответствует точности процесса гибки с растяжением. Пружинение деталей конической формы сложнее, чем цилиндрических, вследствие переменной вдоль обшивки радиуса кривизны под нагрузкой.

Совершенно другое распределение напряжений и деформаций имеет место у деталей двойной кривизны (см. рис. 9.2, в). Здесь все усложняется тем, что с появлением продольной кривизны напряжения зависят не только от угла γ_x , но и от координаты L_x (кривизны неодинаковы вдоль обшивки). Зависимость напряжений от двух

параметров (γ_x и L_x) крайне усложняет задачу определения напряжений, но необходимые силовые параметры можно определить упрощенным способом.

После полного прилегания заготовки к пуансону процесс обтяжки заканчивается, но целесообразно продолжить обтягивание и довести растяжение боковых кромок заготовки ($L_x=0$ и $L_x=L$) до деформации ϵ_s (ϵ_s соответствует напряжению σ_s), обеспечив $\sigma_{\min}=\sigma_s$ (см. рис. 9.2, *з*). В этот конечный момент обтяжки разность $\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$ будет обуславливаться только упрочнением металла в центральной зоне ($L_x=L/2$) вследствие разной степени деформации кромок и центральной зоны.

Пусть в центральной зоне длина образующей обшивки в конечный момент обтяжки будет равна $l_{\max}$, а по кромке ($L_x=0$) равна $l_{\min}$ (см. рис. 9.1, *а*). Тогда максимальная относительная деформация примерно будет равна,

$$\epsilon_{\max}=(l_{\max}-l_{\min})/l_{\min}=l_{\max}/l_{\min}-1=k_{\text{обт}}-1. \quad (9.5)$$

Отношение $l_{\max}/l_{\min}$ называется коэффициентом обтяжки $k_{\text{обт}}$, который можно определить заранее для каждой обшивки замером $l_{\max}$ и $l_{\min}$ на поверхности обтяжного пуансона или на макете. Таким образом, можно заранее знать деформации, которые произойдут в обшивках при изготовлении их обтяжкой, а знание деформаций позволяет определить примерное значение напряжений на свободном участке заготовки между пуансоном и зажимами, где на напряженное состояние можно принять линейным. Зная $\epsilon_{\max}$, легко подсчитать $\sigma_{\max}$:

$$\sigma_{\max}=\sigma'_s + \Pi \epsilon_{\max} = \sigma'_s + \Pi (k_{\text{обт}} - 1). \quad (9.6)$$

Силу натяжения N определим ориентировочно по среднему напряжению на свободном участке между пуансоном и зажимами (в зоне передачи усилия):

$$N = sL \frac{\sigma'_s + [\sigma'_s + \Pi (k_{\text{обт}} - 1)]}{2} = sL \left[\sigma'_s + \frac{\Pi}{2} (k_{\text{обт}} - 1) \right]. \quad (9.7)$$

Тогда усилие P , которое должны преодолевать гидроцилиндры подъема стола прессы, согласно уравнению (9.1) будет иметь вид

$$P = 2N \cos \varphi = 2sL [\sigma'_s + (\Pi/2)(k_{\text{обт}} - 1)] \quad (9.8)$$

или, если учесть трение множителем Эйлера, то

$$P = 2sL e^{\mu (\pi/2 - \varphi)} [\sigma'_s + (\Pi/2)(k_{\text{обт}} - 1)] \cos \varphi. \quad (9.9)$$

Схему поперечной обтяжки деталей двойной кривизны мы представили упрощенно в предположении, что s мала по сравнению с R_0 и R_n , а напряжения по толщине одинаковы и равны напряжению срединного слоя.

Для поперечной обтяжки применяются специальные обтяжные прессы ОП нескольких моделей, которые располагают большими технологическими возможностями. На прессе ОП-3 можно обтяги-

вать листы толщиной 2 мм, длиной 3000 мм; наибольшее усилие, развиваемое столом пресса, $3,6 \cdot 10^6$ Н, наибольшее расстояние A между зажимами — 1950 мм (см. рис. 9.2, а), наименьшее — 600 мм, вертикальный ход стола 350 мм. Зажимы на прессе секционные с пневматическим приводом, смонтированы на траверсах, которые можно устанавливать под углом друг к другу (при обтяжке конических деталей) и на уровнях. Пресс ОП-2 развивает усилие $6 \cdot 10^6$ Н, и на нем можно обтягивать обшивки длиной до 4000 мм, толщиной 2 мм.

Поперечной обтяжкой изготавливаются короткие обшивки одинарной и двойной кривизны, секции днищ, детали антиобледенительных устройств и др.

9.2. ПРОДОЛЬНАЯ ОБТЯЖКА

Продольная обтяжка (см. рис. 9.1, б) применяется преимущественно для изготовления обшивок двойной кривизны большой длины. Такие обшивки нецелесообразно изготавливать поперечной обтяжкой, так как осуществление захвата за длинные стороны заготовки связано с большим расходом материала: под зажимы и на свободный участок заготовки между зажимами и пуансоном требуется с каждой стороны заготовки оставлять припуск в 150... 200 мм, который впоследствии удаляется в отходы.

Обшивки двойной кривизны применяются в носовой и хвостовой частях фюзеляжей и корпусов летательных аппаратов. Продольная кривизна их значительно меньше поперечной, длина достигает 7 м и более, а ширина 1,5 м; материал для изготовления — листы алюминиевых и титановых сплавов, жаропрочных сталей.

На рис. 9.3, а приведена схема продольной обтяжки на обтяжном прессе РО. Заготовка 4, закрепленная в зажимах 2, обтягивается по пуансону 5, который поднимается штоками двух гидроцилиндров 7. При этом заготовка одновременно растягивается также перемещением зажимов, установленных на штоках гидроцилиндров 1. Такой двойной привод, т. е. растягивание заготовки пуансоном и одновременно перемещением зажимов, обеспечивает

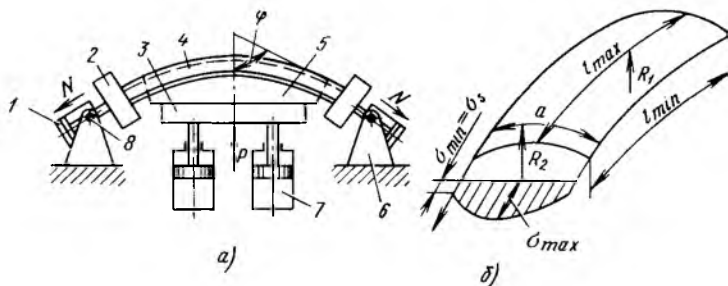


Рис. 9.3. Продольная обтяжка на обтяжном прессе РО:

а—схема операции; б—напряженное состояние заготовки; 1—гидроцилиндры растяжения заготовки; 2—зажимы; 3—стол; 4—заготовка; 5—пуансон; 6—кронштейны; 7—гидроцилиндры подъема стола; 8—ось вращения цилиндров

лучшее обтягивание ее по пуансону при продольной обтяжке. Гидроцилиндры 1 закреплены на кронштейнах 6 станины прессы шарнирно; они поворачиваются на оси 8, ориентируясь по касательной к поверхности пуансона в каждый данный момент обтяжки. Кронштейны можно сближать или удалять друг от друга в зависимости от исходной длины заготовки. Гидроцилиндры 7 подъема стола имеют самостоятельные приводы, что обеспечивает в случае необходимости подъем одной стороны стола.

Как и при описании схемы поперечной обтяжки, мы не будем касаться распределения напряжений и деформаций в очаге деформаций, а определим лишь усилия деформирования по напряжениям на свободном участке заготовки между пуансоном и зажимами. Силу N натяжения заготовки определим по среднему напряжению, приняв $\sigma_{\min} = \sigma_s'$, а $\sigma_{\max} = \sigma_s' + \Pi(k_{\text{отб}} - 1)$, где $k_{\text{отб}}$ есть отношение длины обшивки по наибольшей ($l_{\max}$) и наименьшей ($l_{\min}$) образующим (см. рис. 9.3, б). При этих условиях силу N натяжения, создаваемую штоками гидроцилиндров 1, по аналогии с уравнением (9.7) определим как

$$N = as [\sigma_s' + (\Pi/2)(k_{\text{отб}} - 1)] e^{\mu(\pi/2 - \varphi)}, \quad (9.10)$$

где a — ширина обшивки. Усилие подъема стола

$$P = 2N \cos \varphi = 2as e^{\mu(\pi/2 - \varphi)} \left[\sigma_s' - \frac{\Pi}{2} (k_{\text{отб}} - 1) \right] \cos \varphi. \quad (9.11)$$

Формообразование улучшается применением способа двусторонней (биаксиальной) обтяжки, когда заготовка растягивается при закреплении ее зажимами и за короткие и за длинные стороны. Этот способ иногда применяется для небольших обшивок сложной формы.

Предельные возможности обтяжки определяются коэффициентом обтяжки, зависящим от максимальной относительной деформации в центральной зоне заготовки (по образующей максимальной длины), который можно вычислить по выражению (9.5). Если, далее, мы будем знать допустимую деформацию, то из уравнения (9.5) можно легко определить допустимое значение коэффициента обтяжки.

Как известно, относительное удлинение уменьшается с увеличением длины L образца, поэтому для обшивок большой длины, у которых $L_{\max}$ (длина очага деформаций) достигает нескольких метров, вполне логично принять за предельную деформацию δ_p , т. е. равномерное удлинение.

Следовательно, если $\epsilon_{\max} = \delta_p$, то коэффициент обтяжки будет иметь допустимое значение ($k_{\text{отб}} = k_{\text{доп}}$) и можно записать, что

$$k_{\text{доп}} = 1 + \delta_p. \quad (9.12)$$

Для алюминиевых сплавов в зависимости от типа сплава и его термообработки величина δ_p колеблется в пределах 0,08 ... 0,12.

Определение расчетным путем точность размеров деталей двойной кривизны после обтяжки очень сложно. Задача в данном случае такова: известна форма поверхности обшивки, обтянутой по

пуансону и сохраняющей эту форму под действием внешних сил; определить параметры новой поверхности, которая будет у детали после разгрузки. В такой постановке задачу решать затруднительно, так как радиусы продольной R_1 и поперечной R_2 кривизны обшивок (см. рис. 9.3, б) обычно непостоянные и поверхность обшивки имеет сложную форму. В некоторых случаях при малой продольной кривизне можно принимать $R_1 = \infty$, тогда остаточную поперечную кривизну по каждому сечению можно определять как при гибке с растяжением на основе теоремы о разгрузке.

Упругие деформации при разгрузке приводят к тому, что форма обшивки отличается от формы обтяжного пуансона. Окончательную доводку обшивок производят путем повторной обтяжки по тому же пуансону, но с предварительной термообработкой, или путем дополнительной разводки (выколоткой) на специализированных выколоточных молотах. Сущность *выколотки* заключается в том, что для придания большей кривизны площадь поверхности центральной зоны обшивки увеличивают за счет утонения материала; габаритные размеры детали остаются неизменными. Утонение материала производится частыми и многократными ударами бойка молота по обшивке, лежащей на наковальне; при этом обшивка непрерывно перемещается, чем достигается более или менее равномерная ее деформация по толщине в зоне выколотки.

Применение вторичной обтяжки вместо выколотки рациональнее в серийном производстве, но в опытном производстве выколотка еще широко применяется не только как доводочная операция, но иногда и как основная формообразующая операция для изготовления деталей с небольшой кривизной.

Обшивки из титановых сплавов обтягивают при повышенных температурах, для чего металлические пуансоны нагревают трубчатыми электронагревателями (ТЭНами), а заготовку непосредственно перед обтяжкой нагревают навесными тепловыми экранами.

Для продольной обтяжки применяются обтяжные прессы модели РО (см. рис. 9.3, а). Наиболее распространены прессы РО-1 и РО-3. На прессе РО-1 можно обтягивать листы из алюминиевых сплавов с максимальными размерами $7000 \times 1500 \times 2,5$ мм; наибольшее усилие растяжения 10^6 Н, усилие подъема стола $2 \cdot 10^6$ Н, ход стола 500 мм, а угол наклона стола 10° . Зажимное устройство пресса оборудовано гидравлическим приводом; сменными губками можно зажимать плоский лист или заготовку, предварительно изогнутую по радиусу, примерно соответствующему поперечной кривизне пуансона.

Пресс РО-3 работает по той же схеме, что и пресс РО-1, но оснащен более мощным приводом; на прессе имеется верхний портал со столом, на котором можно закреплять дополнительные пуансоны, что позволяет изготавливать обшивку со знакопеременной кривизной. На прессе можно обтягивать листы из алюминиевых сплавов с максимальными размерами $8000 \times 1800 \times 6$ мм; максимальное усилие растяжения $2,1 \cdot 10^6$ Н, усилие подъема стола — $3 \cdot 10^6$ Н.

Наряду с прессами ОП и РО применяются комбинированные прессы, на которых можно производить как поперечную, так и продольную обтяжку. Эти прессы имеют комплекты продольных и поперечных зажимов, которые используются в зависимости от варианта обтяжки.

Заготовки из алюминиевых сплавов Д16 и В95 обтягиваются в свежезакаленном состоянии. Размеры заготовок определяются по правилу развертки по средней линии с учетом припусков. Например, размер заготовки в направлении действующих сил

$$L = l_{\text{дет}} + 2(l_1 + l_2 + l_3),$$

где $l_{\text{дет}}$ — длина детали по средней линии; l_1 — расстояние от линии обреза детали до края пуансона (40...50 мм); l_2 — расстояние от края пуансона до зажимных губок (до 150 мм); l_3 — припуск на захват заготовки губками (50 мм).

9.3. КОЛЬЦЕВАЯ ОБТЯЖКА

Кольцевая обтяжка применяется для изготовления с замкнутым контуром. В качестве исходных заготовок для таких деталей используют сварные цилиндрические или конические обечайки. Кольцевую обтяжку применяют также для калибровки сварных кольцевых шпангоутов из профилей разных типов. Основными деталями, изготавливаемыми кольцевой обтяжкой, являются: обечайки подвесных баков, а также камеры сгорания, корпусные детали реактивной и заборной частей двигателей.

Формообразование или калибровка деталей при кольцевой обтяжке происходит посредством внутреннего давления, которое создается разжимным, состоящим из отдельных секторов пуансоном.

На рис. 9.4, а показана схема операций кольцевой обтяжки, а на рис. 9.4, б — изготавливаемые детали; пунктиром показаны контуры заготовок. Перед началом операции разжимной пуансон находится в верхнем положении, когда его отдельные секторы 4 сомкнуты (зазор z между ними равен нулю), диаметр пуансона имеет минимальное значение, и это позволяет легко установить на него цилиндрическую или коническую заготовку. Затем получает рабочий ход шток 1 нижнего силового цилиндра, который через верхний прижим 5 опускает вниз секторы пуансона. Секторы пуансона разжимаются и одновременно перемещаются по направляющим конуса 7, жестко закрепленного на столе пресса, деформируя заготовку в радиальном направлении.

Степень деформации заготовки зависит от вертикального хода штока, угла конусности конуса и кривизны рабочего контура пуансона. Если рабочий контур пуансона повторяет контур заготовки, то обтяжка производится только для ее калибровки при небольших деформациях. Если контур пуансона отличается от контура заготовки, то обтяжка производит ее формообразование. Например, из цилиндрической заготовки можно изготовить детали с

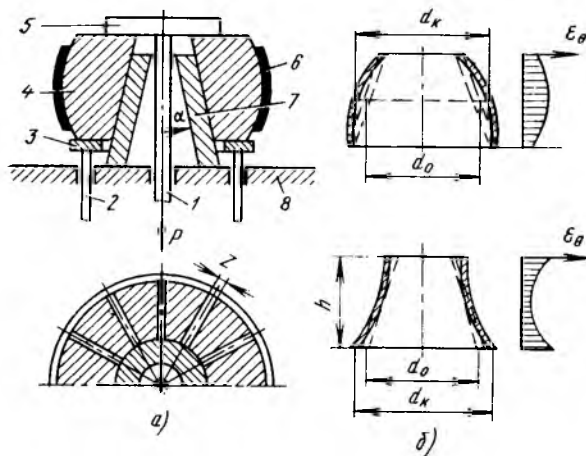


Рис. 9.4. Кольцевая обтяжка на станке типа ПКД:

a—схема операции; *б*—детали, изготавливаемые кольцевой обтяжкой; 1—шток гидроцилиндра; 2—шток цилиндра холостого хода; 3—нижнее кольцо; 4—секторы пуансона; 5—верхний прижим; 6—заготовка; 7—конус; 8—стол

выпуклой или вогнутой образующей, т. е. с переменным по высоте диаметром, и степень деформации в этом случае будет зависеть от отношения диаметров детали и заготовки.

Степень деформации при кольцевой обтяжке можно также характеризовать коэффициентом обтяжки, который для этого случая равен отношению конечного d_k и начального d_0 диаметров (см. рис. 9.4, б). Максимальная относительная деформация растяжения аналогично (9.5) выражается так:

$$\epsilon_{\max} = (d_k - d_0)/d_0 = k_{\text{обт}} - 1. \quad (9.13)$$

Для определения $\epsilon_{\max}$ нужно сравнивать исходный и конечный диаметры заготовки в наиболее деформированной зоне.

По напряженно-деформированному состоянию, возникающему в заготовке, кольцевая обтяжка близка к поперечной обтяжке. Эта аналогия будет еще более понятна, если представить, что разжимной пуансон состоит из двух секторов, каждый из которых можно рассматривать как небольшой обтяжной пуансон, применяемый при поперечной обтяжке.

При кольцевой обтяжке в окружном направлении возникает окружное направление σ_θ растяжения и меридиональное σ_m растяжения, которое возникает по причине торможения силами трения меридиональных деформаций укорочения; на свободных кромках $\sigma_m = 0$, а максимальное значение σ_m достигает в средней части заготовки. $\sigma_{\theta \max}$ возникает в местах, где окружная деформация ϵ имеет наибольшее значение. По окружности заготовки σ_θ также неравномерно; в центре каждого сектора пуансона оно меньше, чем в зазорах между секторами. Примерное значение усилия P , кото-

рое необходимо для продвижения секторов пуансона вниз по конусу, можно подсчитать по формуле [1]

$$P = 2\pi sh [\sigma'_s + \Pi (k_{\text{от}} - 1)] (\mu + \operatorname{tg} \alpha). \quad (9.14)$$

Если пренебречь деформацией вдоль образующей (при большой высоте h деталей эта деформация действительно близка к нулю, так как ее развитию препятствуют силы трения), то из условия $\varepsilon_0 = -\varepsilon_n$ толщина после деформации определяется из уравнения

$$\ln(s_k/s_0) = -\ln(d_k/d_0),$$

где d_0 , s_0 и d_k , s_k — соответственно исходные и конечные диаметры и толщины изделий.

Как и при других видах обтяжки, формообразование детали при кольцевой обтяжке происходит за счет неравномерной деформации растяжения в направлении действующих сил деформирования.

Кольцевая обтяжка небольших деталей выполняется в специальных штампах на универсальных гидравлических прессах, а больших — на специализированном оборудовании, причем наибольшее распространение получили станки ПКД (см. рис. 9.4). На этих станках можно изготавливать детали диаметром до 160 мм и высотой до 1000 мм; усилие P силового гидроцилиндра станка — $4 \cdot 10^6$ Н.

9.4. ПУАНСОНЫ ДЛЯ ОБТЯЖКИ

Пуансоны для обтяжки изготавливаются из древесины, песочно-клеевой массы (ПСК), а при обтяжке с нагревом заготовки из цинка, алюминиевых и магниевых сплавов (реже из стали или чугуна); выбор металла определяется температурой нагрева пуансона. Так как большинство обшивок обтягивается в холодном состоянии, основным материалом для пуансонов служат твердые породы дерева — бук, дуб. Песочно-клеевая масса состоит из 85% чистого речного песка и 15% фенольной смолы (клей ВИАМ-БЗ), служащий связкой. В некоторых случаях применяют эпоксидные смолы и цементные массы с различными наполнителями, корректирующими их механические свойства.

На рис. 9.5 показаны пуансоны деревянный и из песочно-клеевой массы. Деревянные пуансоны набирают из отдельных брусков, которые затем склеивают клеем ВИАМ-БЗ. Облицовочный верхний слой 2 и основание 1 изготавливаются из буковых или дубовых брусков, а внутренний набор 3 — из сосновых; для транспортировки и установки на обтяжные прессы на торцах пуансона предусмотрены такелажные узлы 4.

Для изготовления комплекта пуансонов требуется большая затрата времени и средств, а для складирования — большая площадь. Поэтому делаются попытки упростить конструкцию пуансонов, разделить каркасную и рабочую части, уменьшить габариты рабочей части и ввести унификацию каркасов.

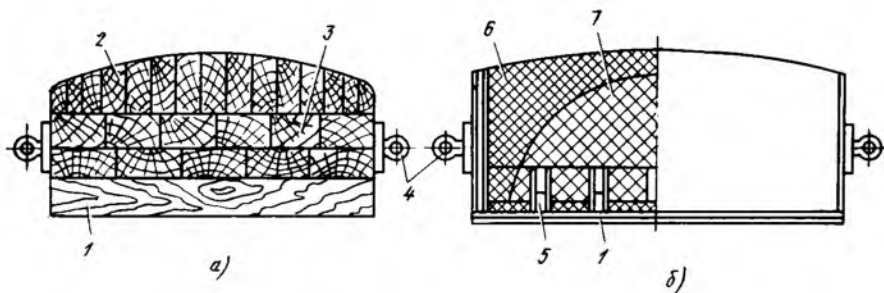


Рис. 9.5. Пуансоны для обтяжки:

а—деревянный; *б*—из песчоклеевой массы; *1*—основание; *2*—облицовочный слой; *3*—внутренний набор; *4*—такелажные узлы; *5*—деревянный каркас; *6*—облицовочный слой из ПСК; *7*—наполнитель

Более подробные сведения по технологии обтяжки, конструкции оснастки и специализированного оборудования можно найти в специализированной литературе [1, 11, 24].

Мы рассмотрели основные формообразующие операции по классификации, приведенной в табл. 1.1. Оставшиеся две операции предназначены для создания утолщений на кромках отверстий ($R \geq 10r$) и на внешних кромках круглых заготовок ($r=0$). При осуществлении этих операций на тонкостенных заготовках требуются специальные приемы: местный нагрев заготовки, ограничение размеров очага деформаций, установка прижимов, упоров и др.

ГЛАВА 10

ОПЕРАЦИИ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

К заготовительно-штамповочным работам кроме операций листовой штамповки относятся и операции объемной штамповки, при помощи которых изготавливают тонкостенные детали пространственной формы. В штампах для объемной штамповки, в отличие от штампов для листовой штамповки, обязательно предусматривается изменение толщины исходной заготовки и перераспределение объема металла.

При объемной штамповке в одних операциях из толстой заготовки изготавливаются детали с более тонкими стенками (например, вытяжка с утончением стенок, ротационное выдавливание, ударное выдавливание), в других — на тонкостенной заготовке создается утолщение и набирается материал (например, при осадке труб, профилей, кромок листов и др.). Поэтому объемной штамповкой можно изготавливать тонкостенные детали с переменной толщиной стенки, т. е. с усилением в зонах действия большей нагрузки и облегчениями в зонах действия меньшей.

Операциями объемной штамповки изготавливаются разнообразные детали летательных аппаратов на универсальных прессах и специализированных станках. Удельный вес этих операций не-

лик, но с каждым годом увеличивается благодаря расширению технологических возможностей объемной штамповки. Большую роль в совершенствовании операций объемной штамповки играет зональный нагрев заготовки, при котором деформированию подвергаются только нагретые зоны заготовки, где необходимо утолщение стенок.

10.1. ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ

На рис. 10.1 приведены схема операции вытяжки с утонением стенки, эпюра напряженно-деформированного состояния заготовки в очаге деформаций, заготовка и полученная из нее деталь. Заготовка 3, имеющая форму стакана, вытягивается в вытяжном штампе, у которого зазор между матрицей 1 и пуансоном 2 меньше толщины заготовки. В результате вытяжки получаем деталь, у которой толщина $s_1 < s_0$, площадь сечения $F_1 < F_0$, а высота $h_1 > h_0$. Внутренний радиус r_0 заготовки не изменился, а наружный радиус $r_{вн}$ стал меньше на величину $\Delta s = s_0 - s_1$. Толщина дна детали осталась равной толщине заготовки, так как донная часть заготовки деформированию не подвергалась. Как следует из схемы рис. 10.1, а, формообразование детали происходит в результате перемещения некоторой части материала в стенках для увеличения высоты h_1 заготовки.

Вытяжка с утонением стенки заготовки применяется для изготовления стаканов большой высоты с тонкой стенкой, получение которых обычной вытяжкой из тонкой плоской заготовки затруднительно. Так изготавливают заготовки для сильфонов, представляющих собой стаканы высотой 200 ... 400 мм с толщиной стенки 0,2 ... 0,3 мм. В некоторых случаях вытяжка с утонением стенки применяется для калибровки толщины стенки стакана после обычной вытяжки.

В очаге деформаций заготовки, как видно из схемы а (см. рис. 10.1), материал испытывает радиальное σ_r и тангенциальное σ_θ напряжения (сжатие) и осевое напряжение σ_z (растяжение). На числовой оси крайними напряжениями будут σ_z (положительное) и σ_θ (наибольшее отрицательное); здесь σ_θ — среднее главное напряжение. Приближенно можно принять, что основной очаг деформации расположен между сечением I—I заготовки с площадью F_0 и сечением II—II с площадью F_1 . Конечная относительная де-

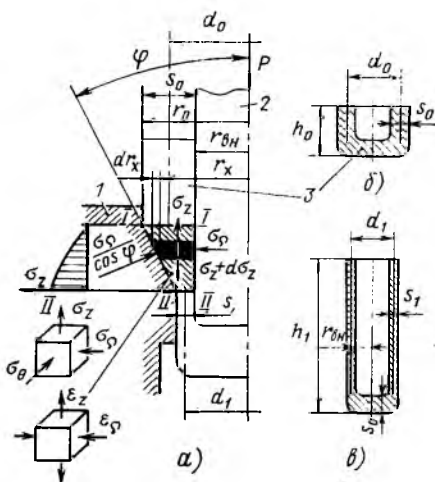


Рис. 10.1. Вытяжка с утонением стенки:

а—схема операции и напряженное состояние в очаге деформаций; б—заготовка; в—деталь; 1—матрица; 2—пуансон; 3—заготовка

формация сужения по сечению $I—I$ заготовки

$$\varepsilon_0 = (F_1 - F_0)/F_0 = -(1 - F_1/F_0) = -(1 - d_1 s_1 / (d_0 s_0)), \quad (10.1)$$

где d_0 , d_1 , s_0 и s_1 — соответственно начальные и конечные средние диаметры и толщины стенок заготовки.

Можно считать, что $d_1/d_0 \approx 1$, так как за одну операцию вытяжки толщина стенки уменьшается на 20...40%; отсюда $s_1 = (0,6 \dots 0,8)s_0$, и при наиболее распространенной относительной толщине заготовок $s_0 = (0,02 \dots 0,04)d_0$ отношение $d_1/d_0 \approx 0,96 \dots 0,99$.

С учетом этого уравнения (10.1) примет вид

$$\varepsilon_0 = -(1 - s_1/s_0) \approx -(1 - m). \quad (10.2)$$

Здесь $m = F_1/F_0 \approx s_1/s_0$ — коэффициент вытяжки, характеризующий технологические возможности операции; чем меньше его значение, тем большая деформация совершается за одну операцию и тем меньше потребуются операций, чтобы получить из толстостенного стакана высокую тонкостенную деталь. Для большинства материалов предельно минимальные коэффициенты вытяжки с утонением стенки заготовки установлены на основе многолетнего производственного опыта. Так, для сплава АМц, АМ, АМг, сталей 10 и 20 коэффициент $m = 0,5 \dots 0,6$; для стали 1Х18Н9Т коэффициент $m = 0,7 \dots 0,8$. Учитывая незначительное сокращение среднего диаметра заготовки в результате проведения одной операции, вытяжку с утонением стенки относят к случаю плоского деформированного состояния металла в очаге деформаций ($\varepsilon_\theta = 0$).

Определим распределение напряжений, придерживаясь принятой ранее методики.

Уравнение равновесия сил, действующих на малый участок, выделенный в очаге деформаций, при проектировании сил на вертикальную ось имеет следующий вид [38]:

$$(\sigma_z - A\sigma_0) 2r_x dr_x + (r_x^2 - r_{\text{нн}}^2) d\sigma_z = 0, \quad (10.3)$$

где $A = 1/\cos \varphi + \mu/\sin \varphi - \mu\alpha/\operatorname{tg} \varphi$; $\alpha = 2r_{\text{нн}}/(2r_{\text{нн}} + s_0 + s_1)$.

Уравнение пластичности для рассматриваемого случая:

$$\sigma_z - \sigma_0 = \sigma_s.$$

Совместное решение этих уравнений при условии, что $\sigma_z = 0$ при $r_x = r_0$ дает:

$$\sigma_z = \frac{A\sigma_s}{A-1} \left[1 - \left(\frac{F_x}{F_0} \right)^{A-1} \right]; \quad (10.4)$$

$$\sigma_0 = -\sigma_s \left\{ 1 - \frac{A}{A-1} \left[1 - \left(\frac{F_x}{F_0} \right)^{A-1} \right] \right\}, \quad (10.5)$$

где F_x — текущее значение площади сечения в очаге деформации с соответствующим радиусом r_x .

Из эпюры распределения напряжений σ_z по высоте очага деформаций видно, что в сечении II—II напряжение σ_z достигает максимального значения. Если в уравнение (10.4) вместо текущего значения площади сечения F_x ввести площадь F_1 , то

$$\sigma_{z \max} = \frac{A\sigma_s}{A-1} \left[1 - \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^{A-1} \right] = \frac{A\sigma_s}{A-1} (1 - m^{A-1}). \quad (10.6)$$

Чтобы использовать уравнение (10.6) для определения усилия вытяжки, в него вместо σ_s нужно ввести среднее сопротивление деформированию

$$\sigma_{s \text{ ср}} = \sigma'_s + \Pi \varepsilon_{\text{ср}}, \quad (10.7)$$

где $\varepsilon_{\text{ср}}$ — средняя деформация по толщине заготовки, которую можно принять равной половине конечной относительной деформации ε_0 .

С учетом (10.2) получим:

$$\sigma_{s \text{ ср}} = \sigma'_s + \frac{\Pi}{2} (1 - m), \quad (10.8)$$

$$\sigma_{z \max} = \frac{A}{A-1} \left[\sigma'_s + \frac{\Pi}{2} (1 - m) \right] (1 - m^{A-1}). \quad (10.9)$$

Тогда усилие деформирования будет определяться уравнением

$$P = \frac{A\pi d_1 s_1}{A-1} \left(\sigma'_s + \Pi \frac{1-m}{2} \right) (1 - m^{A-1}). \quad (10.10)$$

Если принять в качестве предельно допустимого усилия вытяжки $P = \sigma_s F_1$; то из уравнения (10.10) можно определить минимально допустимое значение коэффициента m . Это расчетное значение коэффициента вытяжки будет качественно характеризовать технологические возможности операции.

Размеры s_0 , d_0 и h_0 (см. рис. 10.1, б, в) заготовки определяются из уравнения сохранения постоянства объема материала при деформации. Если принять, что радиусы сопряжений поверхности дна со стенкой для заготовки и детали равны нулю, то объем V_0 заготовки и объем V_1 детали можно выразить уравнениями

$$V_0 = [(\pi(d_0 + s_0)^2)/4] s_0 + \pi d_0 (h_0 - s_0) s_0; \quad (10.11)$$

$$V_1 = [(\pi(d_1 + s_1)^2)/4] s_0 + \pi d_1 (h_1 - s_0) s_1. \quad (10.12)$$

Расчеты размеров заготовки можно производить исходя из разных соображений. Например, исходя из производственных условий задаются количеством n операций вытяжки. Тогда, зная для данного материала минимально допустимое значение коэффициента m , можно определить суммарный коэффициент вытяжки и толщину s_0 стенки заготовки:

$$m_{\Sigma} = m^n = s_1/s_0; \quad s_0 = s_1/m_{\Sigma} = s_1/m^n. \quad (10.13)$$

Средний диаметр d_0 заготовки определяется из условия, что

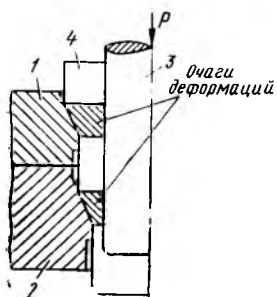


Рис. 10.2. Вытяжка с утонением через две матрицы

1, 2—матрица; 2—пуансон; 4—заготовка

внутренний диаметр заготовки не изменяется. Исходя из геометрических соотношений, ясных из рис. 10.1, получим

$$d_0 - d_1 = \Delta s = s_0 - s_1; \quad d_0 = d_1 + s_0 - s_1.$$

Определив s_0 и d_0 , можно из уравнений (10.11) и (10.12), найти h_0 (учитывая, что $V_1 = V_0$).

Получив размеры заготовки стакана s_0 , d_0 и h_0 , можно затем определить размеры плоской круглой заготовки для изготовления ее вытяжкой без утонения стенок (см. гл. 4).

Для определения размеров заготовки можно наложить дополнительное условие, чтобы заготовка — стакан — была вытянута из плоской заготовки за одну операцию. В этом случае заготовка должна быть более толстой, поэтому потребуется большее число операций редуцирования толщины стенки при вытяжке с утонением. Так, если необходимо изготовить деталь с толщиной стенки 0,2 мм из заготовки с толщиной стенки 2,2 мм, то придется около 10 раз вытягивать стакан, производя в каждой операции обжатие стенки примерно на 20%. В процессе такой многооперационной штамповки потребуется, естественно, несколько раз производить термическую обработку заготовки для снятия нагартовки.

Иногда для сокращения числа штампов применяется вытяжка с утонением стенки одновременно через две-три матрицы (рис. 10.2). В этом случае на заготовке возникают два очага деформаций. Такой способ деформирования дает возможность производить на 10...15% большее обжатие стенки, чем при вытяжке через одну матрицу.

Положительные результаты дает также зональный нагрев очага деформаций (выше сечения II—II на рис. 10.1). При вытяжке алюминиевых сплавов при $t = 350 \dots 450^\circ \text{C}$ обеспечивается $m = 0,4$.

Вытяжку с утонением можно применять и для коробчатых деталей.

Многократное редуцирование стенки налагает высокие требования к обработке рабочих поверхностей штампов и подбору эффективных смазок с целью сохранения надлежащего качества поверхности.

10.2. РОТАЦИОННОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ

На рис. 10.3 приведены две схемы ротационного выдавливания: изготовление конической обечайки из толстой плоской заготовки и тонкостенного цилиндра из цилиндрической толстостенной заготовки. Выдавливание производится на станках типа токарных, оборудованных гидрокопировальной системой для механического перемещения давяльников в строгом соответствии с заданной закономерностью изменения толщины стенки вдоль образующей. Выдавлива-

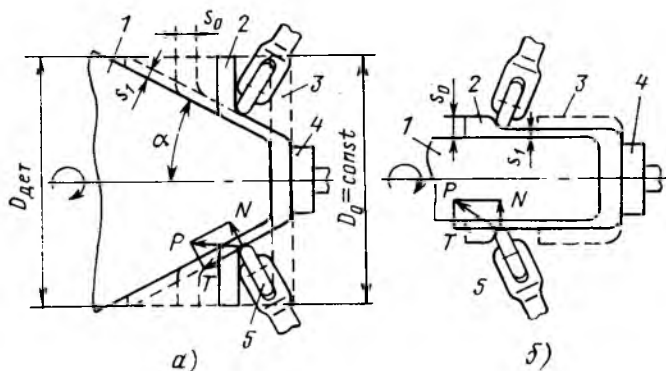


Рис. 10.3. Схема ротационного выдавливания:

а—из плоской заготовки; б—из цилиндрической заготовки; 1—пуансон; 2—промежуточное положение заготовки; 3—исходное положение заготовки; 4—прижим; 5—роликовый давитьник

нием можно обеспечить изготовление деталей с изменяющейся или постоянной толщиной стенки. Для уравнивания силового воздействия на шпиндель в современных станках применяют два-три роликовых давитьника.

Механизм деформирования при выдавливании можно наглядно представить при сравнении с обработкой поверхности на токарном станке проходным резцом. В обоих случаях к заготовке прикладывается сосредоточенное усилие, но острые кромки резца срезают слой металла с поверхности, а округлой формы роликовый давитьник не срезает, а сдвигает слой металла в направлении подачи. При точении заготовка зафиксирована жестко, а при выдавливании еще не деформированная часть заготовки перемещается в направлении подачи.

При выдавливании деталей из жаропрочных хромоникелевых сталей с пределом прочности $\sigma_b = 600 \dots 800$ МПа давитьник создает давление $2000 \dots 3000$ МПа и в зоне действия давления металл, испытывая всестороннее сжатие, течет в направлении наименьшего сопротивления. В зоне находящегося в пластическом состоянии металла происходит сдвиг, который непрерывно распространяется по винтовой линии, а за каждый оборот пуансона заготовка перемещается на величину подачи.

Ввиду сложности напряженного и деформированного состояния металла в очаге деформаций заготовки определить расчетным путем напряжения и деформирующие усилия не представляется возможным. В простейшем случае деформирующее усилие можно определить из условий местного сдвига металла под давитьником. При этом необходимо знать только сопротивление металла сдвигу и площадь сдвига, которая зависит от формы рабочей части роликовых давитьников и от глубины внедрения их в металл, т. е. от ве-

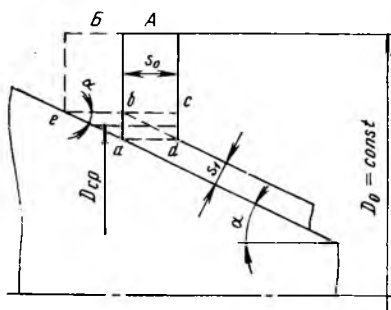


Рис. 10.4. Соотношение между толщиной заготовки s_0 и толщиной детали s_1

При изготовлении конических деталей (см. рис. 10.3, а) величина обжатия стенки полностью определяется геометрической формой детали. Это обуславливается тем, что при выдавливании толстой заготовки по пуансону диаметр ее не уменьшается, а остается неизменным до конца операции, так как усилие, передаваемое заготовке давилником, совершенно недостаточно, чтобы перемещать заготовку по пуансону и обеспечивать формование детали за счет сокращения диаметра фланца. Если же диаметр заготовки не изменяется, то из этого следует, что во-первых, наибольший диаметр конической детали равен диаметру заготовки ($D_0 \approx D_{\text{дет}}$), а во-вторых, что при определенном угле α конусности пуансона мы уже не можем варьировать по своему усмотрению величину обжатия стенки заготовки; толщина стенки детали полностью определяется толщиной заготовки и углом α конусности пуансона. Для уяснения этого рассмотрим два положения заготовки А и Б со смещением их относительно друг друга на величину толщины заготовки (рис. 10.4). При заданных условиях ($D_0 = \text{const}$) объем заготовки, заключенный в кольцевом участке с сечением в виде прямоугольника $abcd$, должен быть равен объему образованной стенки детали, сечение которой имеет вид параллелограмма $aebd$; так как средний диаметр обоих кольцевых участков одинаков, то можно взять не условие равенства объемов кольцевых участков с сечением $abcd$ и $aebd$, а условие равенства площадей их сечений, т. е.

$$s_0 \overline{ab} - s_1 \overline{ae},$$

где $\overline{ab}$ и $\overline{ae}$ — длины сторон прямоугольника и параллелограмма; s_0 и s_1 — толщина заготовки и детали.

Из рис. 10.4 видно, что $\overline{ab} = \overline{ae} \sin \alpha$ (здесь α — угол конусности пуансона), и, следовательно,

$$s_1 = s_0 \sin \alpha. \quad (10.14)$$

Если пытаться получить стенку детали тоньше, чем это обуславливается уравнением (10.14), то в очаге деформаций создаст-

личины обжатия заготовки. Такой подход можно использовать для ориентировочных расчетов силовых параметров операции.

Общее усилие P , передаваемое давилником, можно разложить на составляющие (как при точении): нормальную силу N и силу T подачи.

Режим выдавливания зависит от свойств материала: подача — в пределах 1,02 ... 1,50 мм/об, окружная скорость обработки — до 300 м/мин, относительная деформация стенки ($\Delta s/s_0$) может быть равной 50 ... 80% ($\Delta s = s_0 - s_1$).

ся избыток металла и заготовка должна подвергаться раздаче (диаметр заготовки должен увеличиваться). Если же нужно получить деталь с более толстой стенкой, чем это обуславливается уравнением (10.14), то в очаге деформаций будет не хватать металла и, чтобы образовать такую стенку, дополнительный объем металла должен поступать из фланца за счет уменьшения диаметра заготовки. Как было отмечено выше, ни то, ни другое не выполнимо в силу недостаточности усилия P для деформирования массивного фланца.

Такое ограничение технологических возможностей операции — ее существенный недостаток, так как не позволяет регулировать при необходимости толщину стенки детали. Задача еще более осложняется, если деталь имеет не прямолинейную, а криволинейную форму образующей. В этом случае угол α будет равен углу наклона касательной в данной точке образующей пуансона, и так как образующая имеет продольную кривизну, то угол α будет переменным. Тогда, как следует из уравнения (10.4), для обеспечения постоянной толщины детали s_1 необходимо, чтобы заготовка имела переменную вдоль радиуса толщину s_0 .

Профиль сечения заготовки можно рассчитать из условия равенства в каждой ее точке произведения $s_0 \sin \alpha$ постоянной величине s_1 .

Другое ограничение технологических возможностей операции проявляется при определении предельно возможной степени обжатия стенки заготовки. Для некоторых металлов предельное обжатие стенки может быть равно двойному уменьшению толщины стенки заготовки. Тогда, согласно уравнению (10.14), $s_1/s_0 = 0,5 = \sin \alpha$, откуда $\alpha = 30^\circ$. Следовательно, минимально возможный угол конусности детали равен 30° . Если деталь имеет $\alpha < 30^\circ$, то изготовить ее ротационным выдавливанием из плоской заготовки невозможно. Тем более невозможно выдавливание из плоской заготовки цилиндрических деталей. Для выдавливания цилиндрических деталей применяется также цилиндрическая заготовка, но с более толстыми стенками (см. рис. 10.3, б). В этом случае допускаемая степень обжатия стенки заготовки равна обжатию при выдавливании конических деталей. Как и при вытяжке с утонением из толстого стакана небольшой высоты, в результате одной или нескольких операций ротационного выдавливания получается тонкостенный, но более высокий стакан. Если требуется, в необходимых местах стенки можно создать утолщение в виде поперечных элементов жесткости. Недеформированная часть заготовки перемещается, не изменяя своего диаметра, под действием давяльника по пуансону, преодолевая лишь трение на контактных поверхностях.

Можно успешно выдавливать конические детали с небольшой конусностью из конической же заготовки, но с более толстыми стенками.

На современных станках ротационным выдавливанием можно изготавливать детали диаметром до 1,5 м, длиной до 3 м из корро-

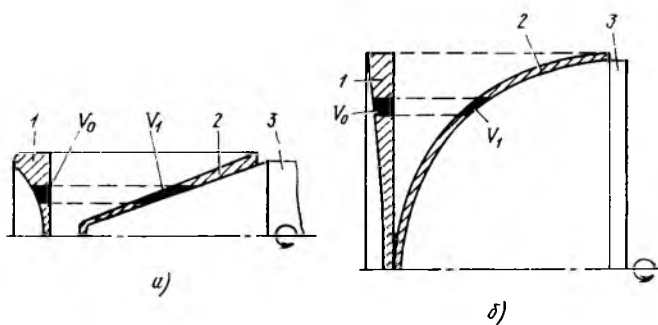


Рис. 10.5. Определение размеров заготовки при выдавливании конических и сферических деталей:

1—заготовка; 2—деталь; 3—пуансон

зионно-стойких и жаропрочных сталей при удельном давлении давилника 2500 ... 2800 МПа.

Выдавливанием можно изготавливать детали с толщиной стенки в несколько десятых долей миллиметра; точность размера по толщине стенки $\pm 0,05$ мм при высокой чистоте поверхности. Титановые сплавы обрабатывают выдавливанием с зональным нагревом заготовки. Сложные по форме детали и детали с малой конусностью ($\alpha = 6 \dots 8^\circ$) изготавливают за несколько операций. На рис. 10.5 приведены схемы выдавливания конической детали с переменной толщиной стенки (схема а) и сферической детали (схема б) из предварительно обработанных заготовок (переменного сечения). Порядок определения толщины заготовки показан на рисунке; толщина заготовки в каждом данном сечении определяется из условия, чтобы объемы металла, заключенные между двумя окружающими сечениями заготовки и детали, были равны между собой ($V_0 = V_1$).

Давильные ролики изготавливаются из быстрорежущих инструментальных сталей. Конструкция роликов зависит от их назначения; рабочий контур характеризуется углом конусности и радиусом закругления кромки. В серийном производстве применяют ролики с универсальным корпусом, на который надевают сменные кольца с разным рабочим профилем; диаметр роликов 250 ... 300 мм.

Для пуансонов применяют обычные углеродистые инструментальные стали. Пуансоны больших размеров изготавливают литыми и пустотелыми с толщиной стенок 40 ... 50 мм. Рабочую поверхность пуансонов обрабатывают очень тщательно (полируют) во избежание перехода следов обработки и других дефектов на поверхность детали.

10.3. ХОЛОДНОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ

Холодное выдавливание выполняют в штампах тремя способами: прямым, обратным и комбинированным. Схемы операции при-

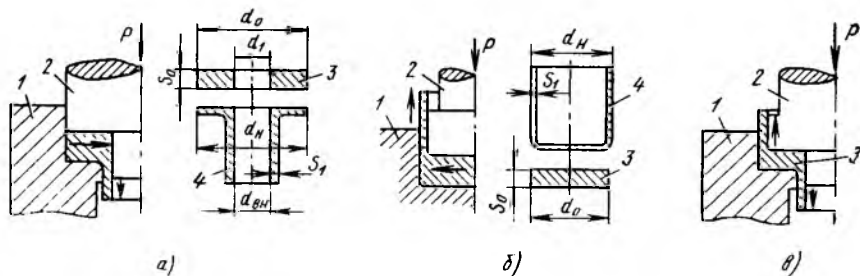


Рис. 10.6. Схемы операции холодного выдавливания:

а—прямого; б—обратного; в—комбинированного; 1—матрица; 2—пуансон; 3—заготовка; 4—деталь

ведены на рис. 10.6; стрелками показано направление течения металла. Сущность операции заключается в том, что металл заготовки, уложенной в матрицу, под большим давлением пуансона вытекает через специальный зазор между пуансоном и матрицей, образуя тонкостенную пространственную деталь круглой, квадратной, прямоугольной и любой другой формы. При прямом способе выдавливания (см. рис. 10.6) металл течет в направлении движения пуансона, при обратном — навстречу движению пуансона; при комбинированном и навстречу и по ходу пуансона.

Усилие, передаваемое заготовке через пуансон при выдавливании, должно привести весь объем металла в пластическое состояние и заставить его вытекать из очага деформаций через зазор между пуансоном и матрицей, поэтому процесс сопровождается значительными энергозатратами. Например, для изготовления алюминиевой детали квадратной формы размером 100×100 мм при давлении 700 МПа необходим пресс, развивающий усилие $7 \cdot 10^6$ Н, если же деталь стальная, то нужен пресс с усилием, превышающим $2 \cdot 10^7$ Н. Это обстоятельство ограничивает использование холодного выдавливания. Способ применяется для изготовления из наиболее пластичных металлов деталей небольших размеров: коробок, кожухов, стаканов, трубок с фланцами или наконечниками, крепежных деталей, деталей арматуры трубопроводов.

По напряженному состоянию заготовки процесс выдавливания относится к объемной схеме; в очаге деформаций металл испытывает всестороннее сжатие и течет из центра заготовки к периферии (см. рис. 10.6, б) или наоборот (см. рис. 10.6, а), в зависимости от назначения операций. Степень деформации по объему заготовки неравномерна. Вследствие большого давления удается получать большое редуцирование толщины заготовки; отношение исходной толщины s_0 заготовки к толщине детали может достигать до 20...25. Минимально допустимая толщина стенки деталей из пластичных цветных металлов может составлять 0,5...0,10 мм, высота — 6...8 диаметров при точности размера по толщине 0,03...0,05 мм. Минимальная толщина стенки стальных деталей составляет 1,0...1,5 мм, а высота — до двух диаметров заготовки.

Для определения усилия выдавливания имеется несколько приближенных формул. Сложность напряженного состояния металла при выдавливании не позволяет точно установить распределение контактных напряжений, поэтому пользуются осредненными значениями давлений. Так, для обратного выдавливания давление q можно определить по следующей формуле:

$$q = a\sigma_{\text{в}} \ln \frac{F_0}{F_0 - F_{\text{п}}}, \quad (10.15)$$

где F_0 и $F_{\text{п}}$ — соответственно площадь заготовки и площадь сечения пуансона; a — коэффициент, учитывающий упрочнение металла и трение (для алюминия и его сплавов $a = 3,5 \dots 4,0$, для сталей $a = 2,5 \dots 3,0$).

Тогда усилие выдавливания можно определить по уравнению

$$P = qF_{\text{п}} = a\sigma_{\text{в}} F_{\text{п}} \ln \frac{F_0}{F_0 - F_{\text{п}}}. \quad (10.16)$$

Значения давления q , определенные опытным путем, составляют при прямом способе: для алюминия 400...600 МПа; для сплава Д16 900...1100 МПа; для малоуглеродистых сталей 1400...1800 МПа.

При обратном способе эти данные увеличиваются на 50...60%.

Уменьшить необходимое давление q можно путем профилирования торцевой части пуансона и матрицы. Например, наклон дна матрицы на несколько градусов уменьшает давление q на 15...20% по сравнению с давлением при плоском дне матрицы. Изменение профиля инструмента совершенно изменяет характер течения металла через зазор между пуансоном и матрицей, уменьшает зоны застоя, в которых металл не участвует в формировании детали, и позволяет выбирать оптимальные условия деформирования.

Размеры заготовки определяют из условия постоянства объема металла детали и заготовки. Расчет упрощается тем, что наружные размеры заготовки равны наружным размерам детали. Для кольцевой заготовки (см. рис. 10.6, а) размеры d_0 и d_1 равны соответствующим размерам детали $d_{\text{н}}$ и $d_{\text{вн}}$; для плоской заготовки без отверстия $d_0 = d_{\text{н}}$ (см. рис. 10.6, б). Равенство размеров заготовки и детали справедливо также и для любой другой формы детали в плане (квадратной, прямоугольной или более сложной формы). Это обстоятельство дает возможность при наличии чертежа детали всегда знать площадь заготовки. Для схем на рис. 10.6, а и 10.6, б площадь заготовки соответственно равна

$$F_0 = (\pi/4)(d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})^2; \quad F_0 = (\pi/4)d_{\text{н}}^2.$$

Определению подлежит только толщина заготовки из выражений

$$F_0 s_0 = F_1 s_1; \quad s_0 = F_1 s_1 / F_0, \quad (10.17)$$

где F_1 и s_1 — соответственно площадь поверхности детали (по срединной поверхности) и толщина стенки; в размерах детали учитывается припуск на обрезку по высоте.

Нормальное протекание операции во многом зависит от подбора эффективных смазок. Для алюминиевых сплавов часто применяют животные жиры и жировые эмульсии (состав имеется в справочной литературе). Стальные заготовки перед обработкой подвергают или омеднению, или фосфатированию и последующей смазке.

Пуансоны и матрицы для выдавливания изготавливают из износостойчивых хромистых инструментальных сталей или из быстрорежущих сталей. Матрицы предварительно запрессовывают в массивные обоймы, которые и воспринимают большие силы, возникающие при выдавливании деталей. В качестве оборудования служат прессы с малым ходом ползуна и с жесткой станиной. В настоящее время нашли применение специальные прессы, рассчитанные на восприятие ударной нагрузки большой мощности.

10.4. ОСАДКА ТРУБ И КРОМОК ЛИСТОВ

До сих пор мы рассматривали операции объемной штамповки, в которых из заготовки значительной толщины изготавливают тонкостенные детали (вытяжка с утонением стенки, ротационное и ударное выдавливание). Но часто бывает необходимо, чтобы на поверхности тонкостенной детали имелись отдельные зоны с большей толщиной, или требуется создать утолщение на трубах (рис. 10.7), листах, профилях, прутках.

Для набора материала в отдельных зонах заготовки и создания утолщения применяется операция осадки.

Основным препятствием, возникающим при наборе материала на тонкостенных заготовках, является потеря устойчивости. Тонкостенная заготовка при осадке не утолщается, а гофрируется, и чем тоньше заготовка, тем реальнее возникновение этого явления.

К настоящему времени освоена осадка труб с относительной толщиной $s_0/d_n \geq 0,02$; в меньшей степени освоена осадка кромок листов, в стадии разработки находится осадка прессованных профилей различных сечений.

На рис. 10.7 приведены примеры использования утолщений стенок концов труб для разных целей, на рис. 10.8 показаны способы осадки труб для набора материала на концах заготовки. Сущность

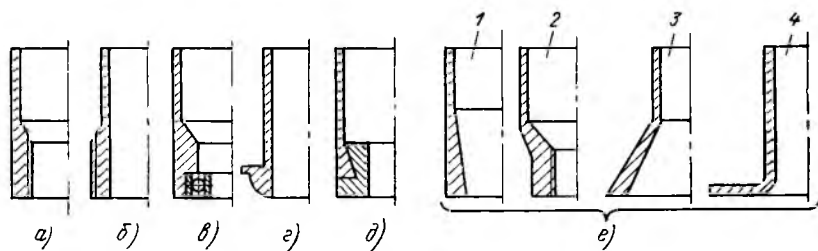


Рис. 10.7. Примеры использования утолщений стенок на концах труб для:

а, б—нарезания резьбы; в—запрессовки подшипника; г—ниппельного соединения; д—соединения со штуцером; е—осадки как предварительной операции (1) перед обжимом (2), разделки (3) и фланцевой (4)

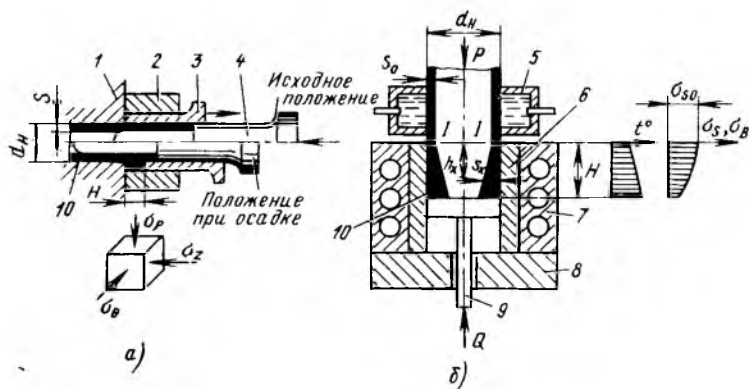


Рис. 10.8. Осадка труб:

a—в холодном состоянии; *б*—с зональным нагревом заготовки; 1—зажим; 2—внешняя обойма; 3—внутренняя обойма; 4—пуансон; 5—охладитель; 6—матрица; 7—электронагревательная коробка; 8—плита; 9—выталкиватель; 10—заготовка

способа, представленного на рис. 10.8, *a*, заключается в том, что в каждый данный момент деформированию подвергается только узкий участок трубы высотой $H \leq 2s$, а вся остальная часть трубы охватывается со всех сторон подвижными и неподвижными элементами штампа. По мере осадки трубы пуансоном 4 и продвижения его влево внутренняя обойма 3 оттягивается вправо, открывая небольшое пространство между заготовкой 10 и внешней обоймой 2 для затекания металла. Таким способом можно производить набор материала на внешней стороне трубы и увеличить ее толщину на небольшом участке в 2—3 раза. Однако если относительная толщина трубы (s_0/d_H) меньше 10%, то процесс становится неустойчивым и на внутренней стороне трубы иногда образуются складки, что совершенно не допускается для трубопроводов, испытывающих вибрационные нагрузки. Этот способ осадки используется для образования ниппелей на трубах диаметром 8 ... 10 мм с толщиной стенки 1 мм. Но при возможности широкого регулирования отношения скоростей перемещения пуансона и внутренней обоймы (положение которой определяет размер H очага деформации) можно производить осадку и тонкостенных труб с еще меньшей толщиной. В очаге деформаций при осадке возникает объемное напряженное состояние — трехстороннее неравномерное сжатие.

Способом, показанным на рис. 10.8, *б*, можно осуществлять осадку с набором материала с внутренней стороны трубы при ее относительной толщине 1,5 ... 2,0% и более, но при этом нужно применять зональный нагрев заготовки. В этом случае заготовка 10, помещенная в нагретую матрицу 6, находящуюся в электронагревательной коробке 7, деформируется осевым усилием P , а удаляется из матрицы после деформирования силой Q . Для предотвращения нагрева недеформированной части трубы (зоны, пере-

дающей усилие) и устранения возможности потери ею устойчивости эта часть трубы искусственно охлаждается охладителем 5, через который пропускается вода. В результате сочетания нагрева и охлаждения в разных зонах заготовки вдоль очага деформаций при установившейся скорости деформирования создается перепад температур и, следовательно, изменяется σ_s , которое и обуславливает успешный набор материала без потери устойчивости. Эпюры распределения температур и пределов текучести схематично показаны на рис. 10.8, б.

Набор материала на тонкостенной заготовке возможен не при любом перепаде температур. Вполне очевидно, что каждое сечение на расстоянии h_x от начального сечения $I—I$ очага деформаций (см. рис. 10.8, б) должно быть способно передать без потери устойчивости усилие для деформирования лежащего ниже участка очага деформаций. Если к сечению на расстоянии h_x от сечения $I—I$ приложить усилие, которое вызовет напряжение, большее $\sigma_{кр}$, то заготовка в месте сечения потеряет устойчивость и набор материала не произойдет. Следовательно, для нормального протекания операции осадки каждое сечение должно обладать одинаковой несущей способностью, что можно выразить уравнением

$$\sigma_{sx} F_x = \text{const.} \quad (10.18)$$

Здесь σ_{sx} и F_x — предел текучести и площадь сечения заготовки на расстоянии h_x от начального сечения очага деформации. Зная изменение F_x по высоте, можно для каждого h_x определить σ_{sx} и соответственно температуру t_x .

Если перепад температур равен $150 \dots 200^\circ \text{C}$ при деформировании труб из алюминиевых сплавов ($t_{\max} = 450 \dots 470^\circ \text{C}$) возможен набор материала и получение толщины стенки, в 3...4 раза превосходящей исходную толщину. Более подробные сведения о наборе материала на тонкостенных заготовках даны в работах [9, 32].

ГЛАВА 11

СОВМЕЩЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Рассмотренные операции классифицировались по напряженно-деформированному состоянию заготовки в основном очаге деформаций. Однако в чистом виде любая операция реализуется редко. Как правило, даже при осесимметричном деформировании, вне зоны очага деформаций основной операции заготовка деформируется в условиях, характерных для других операций. Так, при выполнении многих операций в отдельных зонах заготовка подвергается гибке (на ребрах матриц и пуансонов); при вытяжке и формовке в зоне, расположенной под пуансоном, возникают условия, характерные для обтяжки, и др. Зная теорию элементарных операций, можно провести анализ и наметить рациональные условия деформирования во всех зонах заготовки.

В данной главе мы рассмотрим два вида совмещенных процессов: совмещение в одном процессе двух и более элементарных операций и совмещение в одном процессе двух видов нагружения заготовки — сосредоточенного по границам очага деформаций и распределенного по площади очага деформаций (гидромеханические виды штамповки). Оба эти вида совмещения являются наиболее эффективными направлениями интенсификации листовой штамповки и выявления новых областей ее применения.

11.1. СОВМЕЩЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ

После изучения элементарных операций, их сущности и технологических возможностей можно наметить общий подход к подбору рациональных совмещений, удовлетворяющих тем или другим требованиям производства. Основные положения этого направления интенсификации процессов листовой штамповки даны в работах [30, 9].

В табл. 1.2 показаны некоторые совмещения операций (кроме гибочных) в одном процессе, способствующие увеличению степени деформаций, достигаемых в одном совмещенном процессе. Как следует из эскизов к табл. 1.2, в совмещенных процессах внешними силами нагружаются оба контура очага деформаций.

Подбирая рациональные совмещения, исходят из знания ограничивающих факторов элементарных операций. Дополняемая к основной вторая операция должна или разгружать, или улучшать схему напряженного состояния в опасном сечении во время формоизменения заготовки.

Все возможные совмещенные процессы выявляются в результате последовательного рассмотрения возможных вариантов нагружения обоих контуров очага деформаций внешними силами разных знаков.

На рис. 11.1, а показана схема совмещенного процесса вытяжки с обжимом; приложение растягивающих сил по контуру r и сжимающих сил по контуру R является, в соответствии с нашей клас-

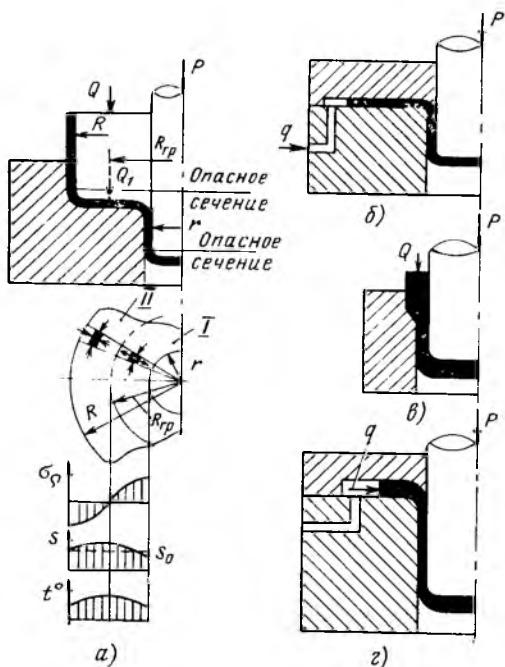


Рис. 11.1. Варианты совмещенных процессов:

а, б—вытяжки и обжима; в—вытяжки с утонением и прессования; г—вытяжки с утонением и обжима

сификацией, признаком реализации операций вытяжки и обжима.

Вытяжка ограничивается разрывом стенки в опасном сечении; приложение сжимающей силы по внешнему контуру R разгружает опасное сечение вытяжки, сила P втягивает, а сила Q заталкивает заготовку в полость матрицы. Обжим силой Q ограничивается потерей устойчивости заготовки в опасном сечении на контуре R ; сила Q своим воздействием способствует разгрузке опасного сечения обжима. Поэтому соединение обжима и вытяжки в одном процессе оказывает положительное взаимное влияние.

С целью упрощения рассмотрим этот совмещенный процесс при идеальных условиях деформирования ($P=0$; $\mu=0$; $\sigma_{изг}=0$; $s=\text{const}$) и плоском очаге деформаций.

Если по обоим контурам очага деформаций действуют внешние силы разных знаков, то естественно предположить, что распределение радиальных напряжений σ_r вдоль радиуса будет таким, как показано на рис. 11.1. Вся площадь очага деформаций разбивается на две зоны: зона I вытяжки ($R_{гр} > R_x \geq r$) и зона II обжима ($R \geq R_x > R_{гр}$). Эти зоны разграничиваются радиусом $R_{гр}$, где σ_r изменяет знак.

Из-за разных схем напряженного состояния в зонах I и II нельзя дать общего решения для всего очага деформаций (от r до R). Поэтому воспользуемся уже установленными зависимостями для вытяжки и обжима.

Для зоны вытяжки:

$$\sigma_r = -\sigma_s \ln(R_{гр}/R_x); \quad \sigma_{r \max} = -\sigma_s \ln(R_{гр}/r). \quad (11.1)$$

Для зоны обжима:

$$\sigma'_r = \sigma_s(1 - R_{гр}/R_x); \quad \sigma'_{r \max} = \sigma_s(1 - R_{гр}/R). \quad (11.2)$$

Чтобы определить $R_{гр}$, надо знать соотношение между $\sigma'_{r \max}$ и $\sigma_{r \max}$ или между Q и P . Определим зависимость $R_{гр}$ от отношения $\sigma'_{r \max}/\sigma_{r \max} = a$. Из уравнений (11.1) и (11.2) получаем;

$$\sigma_s(1 - R_{гр}/R) = a\sigma_s \ln(R_{гр}/r); \quad R_{гр}/r = e^{\frac{1}{a} - \frac{R_{гр}}{aR}}.$$

Разложив в ряд степенную функцию, получаем:

$$R_{гр} = \frac{Rr(1+a)}{aR+r}. \quad (11.3)$$

Если обжим не участвует в процессе ($\sigma'_{r \max} = 0$), то $R_{гр} = R$, т. е. весь очаг деформаций подвергается вытяжке. Если к вытяжке добавляется обжим ($a > 0$), то $R_{гр}$ будет уменьшаться; с возрастанием $\sigma'_{r \max}$ и уменьшением $\sigma_{r \max}$ $R_{гр}$ приближается к r , а при $\sigma_{r \max} = 0$ ($a = \infty$) $R_{гр} = r$, т. е. весь очаг деформаций деформируется обжимом.

Для установления предельных возможностей совмещенного процесса необходимо знать возможности вытяжки и обжима. Из рис. 11.1 видно: $m = r/R_{гр}$; $k_{об} = R_{гр}/R$, а общий коэффициент формоиз-

менения $k_z = r/R = (r/R_{rp})(R_{rp}/R) = mk_{об}$. Если $m = 0,5$; $k_{об} = 0,6$, то $k_z = 0,3$; заготовка сокращается по диаметру более чем в три раза.

Зная m и $k_{об}$ по уравнениям (11.1) и (11.2) можно определить усилия вытяжки P и обжима Q :

$$P = \sigma_{q\max} F = \sigma_s \left(\ln \frac{1}{m} \right) 2\pi r s; \quad (11.4)$$

$$Q = \sigma_{q\max} F = \sigma_s (1 - k_{об}) 2\pi R s.$$

Значения P и Q могут быть подсчитаны более точно с учетом упрочнения трения и изгиба, а также для более сложной пространственной формы очага деформаций.

На рис. 11.1, *а* схематично показано распределение толщин по очагу деформаций при установившемся процессе. Как видно из рисунка, к зоне вытяжки заготовка подходит уже утолщенной за счет обжима. Далее в начальной стадии вытяжки заготовка дополнительно утолщается, а затем при подходе к кромке матрицы — утоняется. Можно подобрать такой режим, чтобы стенка детали имела равномерную толщину, равную заданной.

Весьма эффективно здесь может быть использован дифференцированный нагрев заготовки. Наибольший нагрев должен быть в зоне R_{rp} и пониженный — в зонах опасных сечений, при $R_x = r$ и $R_x = R$ (см. рис. 11.1, *а*).

Совмещение вытяжки и обжима возможно также и тогда, когда заготовка плоская. Здесь рационально применение жидкости для осуществления давления q на торец заготовки (см. рис. 11.1, *б*). Та же идея втягивания заготовки в матрицу с подталкиванием со стороны свободного внешнего контура реализуется при совмещении вытяжки с утонением и прессования, а также вытяжки с утонением и обжима (рис. 11.1, *в* и *г*). В этом случае для алюминиевых сплавов возможно при давлениях на торец заготовки, равных $(3 \dots 4)\sigma_s$, уменьшение толщины в $3 \dots 5$ раз и получение деталей высотой $h = (5 \dots 10)d$ [6]. Проявлению высоких пластических свойств металла способствует в данном случае большое гидравлическое давление.

Такие совмещения как раздача с дополнительным сжатием свободной кромки (на контуре R) и отбортовка с раздачей обеспечивают увеличение степени деформации вследствие улучшения схемы напряженного состояния, увеличения гидростатического давления в опасной зоне (рис. 11.2). Разрыв кромки, находящейся в условиях близких к линейному растяжению, является ограничивающим фактором при выполнении раздачи и отбортовки заготовок; наложение дополнительного сжатия в опасной зоне обеспечивает возникновение плоского разноименного напряженного состояния, более благоприятного для пластического деформирования.

При раздаче с подпором в очаге деформации схема напряженного состояния сохраняется ($-\sigma_q$ и $+\sigma_g$), поэтому для этого случая распределение напряжений может быть определено решением

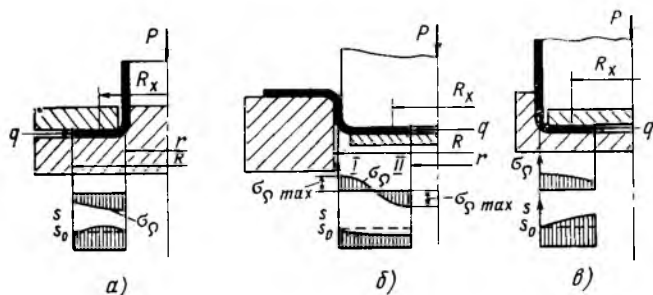


Рис. 11.2. Совмещенные процессы:

а—раздачи со сжатием наружной кромки; *б*—отбортовки с раздачей; *в*—обжима со сжатием внутренней кромки

тех же исходных уравнений, что и для обычной раздачи (см. гл. 5), взяв лишь иные граничные условия ($\sigma_0 = q$ при $R_x = R$ вместо $\sigma_0 = 0$). Тогда уравнения (5.3), (5.4) примут вид

$$\sigma_0 = -[\sigma_s \ln(R_x/r) + q], \quad \sigma_0 = \sigma_s - [\sigma_s \ln(R_x/r) + q]. \quad (11.5)$$

Из уравнений (11.5) видно, что раздача происходит при улучшенной схеме напряженного состояния в опасной зоне. Кроме того, по всему очагу деформаций уменьшены напряжения растяжения, что обеспечивает меньшее утонение заготовки. При $q \geq 0,5\sigma_s$ по всему очагу деформаций $|\sigma_0| > |\sigma_s|$ и утонения не будет.

При отбортовке с раздачей (см. рис. 11.2, б) в очаге деформаций радиальные напряжения σ_0 изменяют знак при $R_x = R_{гр}$; при $R \geq R_x \geq R_{гр}$ (зона I) заготовка подвергается отбортовке ($+\sigma_0$ и $+\sigma_s$), в зоне II при $R_{гр} \geq R_x \geq r$ заготовка подвергается раздаче ($-\sigma_0$ и $+\sigma_s$). Распределение напряжений в каждой зоне описывается соответствующими уравнениями (6.2), (6.3), (5.3), (5.4); $R_{гр}$ определяется при заданном отношении $\sigma'_{0 \max}/\sigma_{0 \max}$ так же, как при совмещении вытяжки с обжимом. При данном совмещении уменьшается утонение заготовки.

Обжим с подпором кромки давлением q (см. рис. 11.2, в) обеспечивает большее утолщение заготовки в очаге деформации, набор материала. Схема напряженного состояния, по отношению к обычному обжиму, не изменяется ($-\sigma_0$ и $-\sigma_s$); изменяются лишь условия на границах очага деформаций: $\sigma_0 = q$ при $R_x = r$. Радиальные напряжения, определенные при новых граничных условиях

$$\sigma_0 = \sigma_s(1 - k_{об}) + q. \quad (11.6)$$

При совмещении раздачи и обжима (рис. 11.3, а) общий коэффициент формоизменения определяется произведением коэффициентов совмещаемых операций: $k_s = k_p k_{об}$. Для достижения большей степени деформации можно производить зональный нагрев заготовки, при котором можно получить конусные детали с соотношением диаметров торцов 1:5. В этом совмещении имеется два самостоятельных очага деформаций, разделенных вертикальной стенкой; соединение их происходит лишь в конце операции.

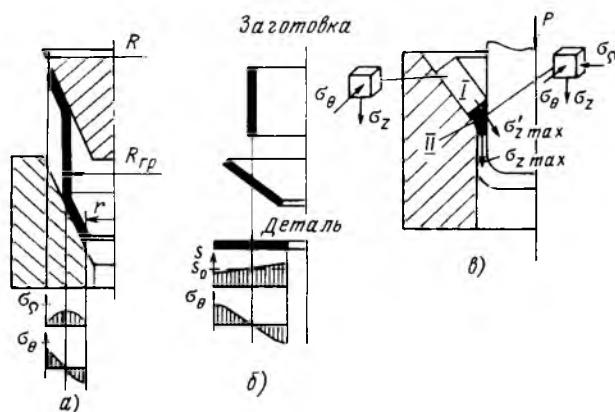


Рис. 11.3. Совмещенные процессы:

а, б—раздачи и обжима; в—вытяжки и вытяжки с утонением

Совмещение раздачи и обжима может быть эффективно использовано при изготовлении плоских деталей из трубчатых заготовок (см. рис. 11.3, б). Хорошие результаты показали опыты по совмещению вытяжки и вытяжки с утонением (рис. 11.3, в). В этом случае возникает два очага деформаций: в очаге деформаций *I* — плоское равнонапряженное напряженное состояние ($+\sigma_\theta$ и $-\sigma_\theta$), присущее вытяжке, в очаге *II* — объемное напряженное состояние ($-\sigma_\theta$, $-\sigma_\theta$ и $+\sigma_z$), присущее вытяжке с утонением. Для расчета усилия и технологических возможностей совмещенного процесса вначале определяется $\sigma'_{z \max}$ для очага деформаций *I*, затем $\sigma'_{z \max}$ для очага *II* и здесь в граничных условиях учитывается $\sigma'_{z \max}$ первого очага. Полное усилие P деформирования определяется сопротивлением деформированию металла в обоих очагах деформаций. Анализ этого совмещенного процесса и выявление его возможностей даны в работе [7].

Мы кратко остановились лишь на некоторых совмещенных процессах штамповки, где реализуются одновременно две элементарные операции; возможны более сложные совмещения трех и более операций. Это направление в настоящее время интенсивно развивается и соединяется с другими направлениями усовершенствования технологических процессов. Например, добавление зонального нагрева заготовки, добавление к очагу деформаций распределенного давления жидкостью или эластичными средами заметно повышает эффективность и расширяет область применения совмещенных процессов.

11.2. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ШТАМПОВКИ

До сих пор мы рассматривали операции, в которых формоизменение заготовки в основном происходило вследствие приложения внешних нагрузок по границам очага деформаций. Сам очаг деформаций по всей своей поверхности не подвергался давлению; исключением служат случаи, когда в операции участвовал прижим, как складкодержатель, однако действие его незначительно и существенного влияния на формоизменение не имело. Теперь мы рассмотрим совмещенные процессы, в которых заготовка нагружается сосредоточенными силами по границам очага деформаций и распределенными — по всей его площади. В таком сочетании являются варианты, обеспечивающие изготовление деталей, которые обычными способами изготавливать нельзя.

На рис. 11.4 показаны два варианта гидромеханической вытяжки конических деталей из плоской заготовки. В этих схемах фланец заготовки, выйдя из-под прижима, не остается свободным и не теряет устойчивость, как при обычной вытяжке, а прижимается к пуансону давлением резины или жидкости, предотвращая потерю устойчивости; то же давление блокирует и выводит из деформирования опасную зону, обеспечивая штамповку высоких деталей за одну операцию. Коэффициенты вытяжки m_1 и m_2 уменьшаются на 10...15% [34]. Давление q в контейнерах может достигать $6 \cdot 10^5 \dots 10^6$ ГПа. Жидкость под высоким давлением может оттеснить заготовку от ребра матрицы, заполняя зазор между заготовкой и поверхностью матрицы и облегчая протекание вытяжки за счет снижения сил трения. Гидромеханическая вытяжка обеспечивает высокое качество наружной поверхности деталей.

На рис. 11.5 показана схема гидромеханической штамповки труб, где наряду с внутренним давлением жидкости, производящим раздачу, действует сосредоточенная осевая сила P , облегчающая радиальное перемещение заготовки. Подача силой P некоторого объема в очаг деформаций за счет сокращения длины заготовки способствует увеличению диаметра полости и снижению утонения стенки. Таким методом можно штамповать различные полости в трубах, рифты и отводы осесимметричных форм (см. 11.5, б, в, г); показателем формоизменения служит коэффициент раздачи $k_p = r/R$. Этот способ широко распространен для изготовления сильфонов (см. рис. 11.5, д) из сталей X18H10T толщиной $s = 0,2 \dots 0,3$ мм и диаметром от 50 до 100 мм при $R = (1,5 \dots 2,0)r$. Осесимметричное деформирование деталей с осевым

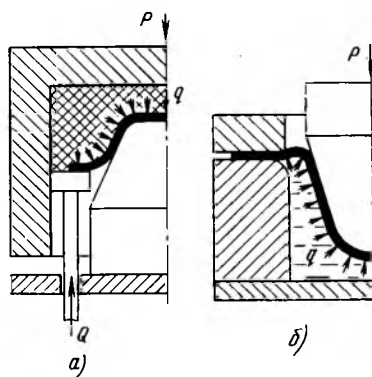


Рис. 11.4. Гидромеханическая вытяжка:

а — резиновой матрицей; б — с противодавлением жидкости

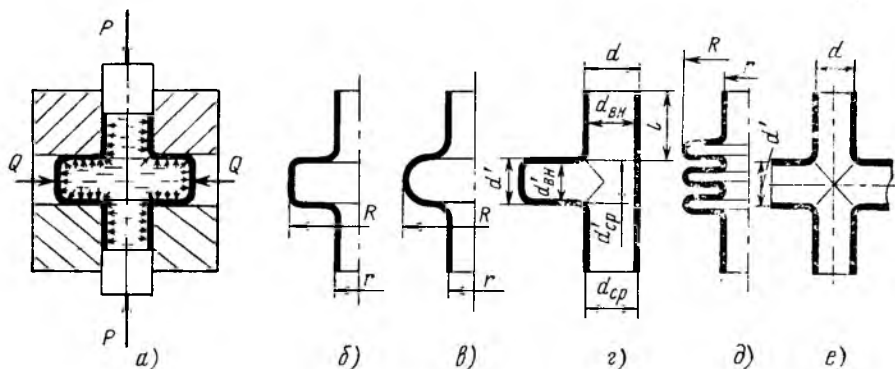


Рис. 11.5. Схема гидромеханической штамповки (раздачи и формовки) и детали, изготавливаемые этим способом:

а—схема штамповки; б, в, д—детали, полученные осесимметричной раздачей; г—тройник; е—крестовина

сжатием увеличивает окружную деформацию в 2 раза ($R=1,65r$) по сравнению с раздачей жидкостью при $P=0$ ($R=1,30r$), а утонение уменьшается в 2,0 ... 2,5 раза [6].

Весьма эффективное применение этот совмещенный процесс получил для штамповки отводов на трубопроводах — тройников и крестовин (см. рис. 11.5, г и е). Неосесимметричное течение металла делает этот процесс весьма сложным, и параметры процесса подбираются в большей степени опытным путем. Выявлено, что для нормального протекания процесса внутреннее давление q и подпор Q в обозначениях рис. 11.5 должны быть равны [6]:

$$q=0,13\sigma_s+1,15\frac{\sigma_s s}{d'}; Q=q\frac{\pi(d'_{\text{вн}})^2}{4}-1,2\sigma_s\pi d'_{\text{ср}}s, \quad (11.7)$$

а осевое усилие P :

$$P=q\frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4}+\pi d_{\text{ср}}s(1,15\sigma_s+q)+\pi\mu ld\left[q+\frac{s(1,15\sigma_s+2q)}{d_{\text{ср}}}\right]. \quad (11.8)$$

Опыт показывает, что для штамповки тройников и крестовин из коррозионно-стойкой стали внутреннее давление составляет $2\cdot 10^6 \dots 3\cdot 10^6$ ГПа, а из алюминия — до 10^6 ГПа. Матрицы, необходимые для штамповки деталей, показанных на рис. 11.5, должны иметь продольный разъем.

На рис. 11.6 показано применение гидромеханической штамповки для набора материала.

Набор материала на трубах возможен при высоких внутренних давлениях q путем осадки осевой силой P . Утолщенные места могут располагаться как на концах, так и в средних частях заготовки, а само утолщение может составлять три-четыре толщины исходной заготовки.

Высокое гидростатическое давление может оказывать весьма положительное влияние на пластическое деформирование при раздаче, отбортовке, обжиме и других операциях.

Среди других совмещенных процессов следует отметить также развивающееся в настоящее время совмещение формоизменения заготовки с ее термической обработкой (закалкой) в штампе. Такое совмещение имеет ряд преимуществ по отношению к разделительному формоизменением и термической обработкой заготовки: повышается точность деталей и степень деформаций, уменьшается усилие деформирования и др.

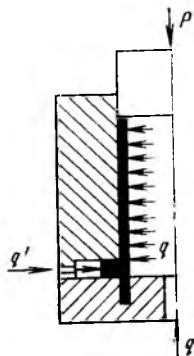


Рис. 11.6. Штамповка утолщений гидромеханическим способом

ГЛАВА 12

ДРУГИЕ МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ

В предыдущих главах, касающихся анализа отдельных операций, мы основывались главным образом на инструментальном варианте их выполнения (в инструментальных штампах). Однако в практике самолетостроения применяют ряд специфических методов, отличающихся большей универсальностью и меньшими затратами труда и средств на подготовку производства. С некоторыми из таких методов мы уже познакомились: гибка прокаткой, обтяжка, раскрой на фрезерных станках и др. Распространение этих методов связано с мелкосерийным видом производства самолетов, где большие затраты на технологическое оснащение не окупаются.

Здесь мы рассмотрим: штамповку эластичными средами и жидкостью, штамповку на листоштамповочных молотах, высокоскоростные методы штамповки, штамповку в режиме сверхпластичности, ротационные методы.

12.1. ШТАМПОВКА ЭЛАСТИЧНЫМИ СРЕДАМИ И ЖИДКОСТЬЮ

Под таким названием объединяют все методы штамповки, где в качестве универсальных пуансонов или матриц применяются резина, полиуретан, жидкость, газ или комбинация этих сред. На рис. 12.1 показаны наиболее употребительные схемы штамповки пластическими средами и жидкостью.

При штамповке по схеме рис. 12.1, а плоскую заготовку 2 помещают на пуансон (формблок) 1, находящийся на нижней плите

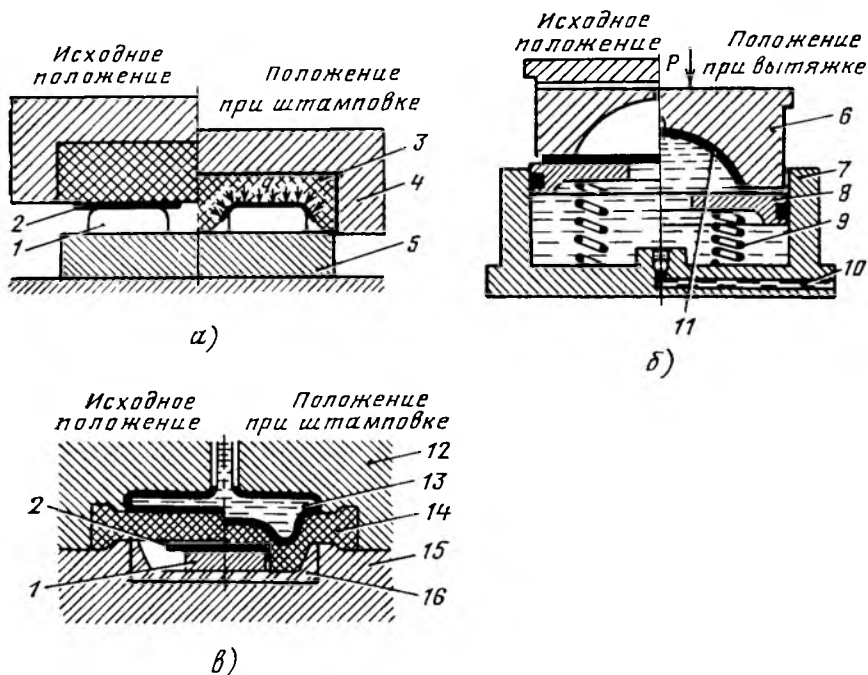


Рис. 12.1. Схемы штамповки:

а—резиной (полиуретаном); б—жидкостью; в—жидкостью через резиновую диафрагму; 1—пуансон (формблок); 2—заготовка; 3—резина; 4—контейнер; 5—нижняя плита; 6—матрица; 7—корпус штампа; 8—прижим; 9—пружины прижима; 10—канал для подачи жидкости; 11—деталь; 12, 15—верхняя и нижняя части корпуса; 13—контейнер для жидкости; 14—резиновая диафрагма; 16—плита

те 5; универсальной матрицей служит контейнер 4, внутренняя полость которого заполнена резиной или полиуретаном.

При движении вниз плунжера прессы и закрепленного на нем контейнера внутренняя полость контейнера замыкается нижней плитой 5, и в его полости начинает увеличиваться давление резины; под воздействием давления q заготовка прижимается к пуансону и начинает деформироваться. В конечной стадии процесса штамповки давление достигает максимального значения, заготовка полностью обжимается по пуансону и принимает его форму.

Для штамповки по этой схеме применяют специализированные гидропрессы усилием $2,5 \cdot 10^7$ и $5 \cdot 10^7$ Н. Размеры рабочей зоны контейнеров соответственно равны 1×2 м и $3,5 \times 1,3$ м. Давление в контейнере $8 \cdot 10^4 \dots 10^5$ ГПа. Рабочая площадь контейнеров позволяет осуществлять групповую штамповку; для этого на нижнюю плиту одновременно устанавливают несколько формблоков с заготовками и за один рабочий ход плунжера на каждом из них штампуют отдельные детали.

В последнее время стали применять для этих целей более мощные прессы, обеспечивающие давление в контейнере до 10^6 ГПа.

Аналогичным образом происходит деформирование по двум другим схемам; в схеме, показанной на рис. 12.1, б, также предусмотрено использование пресса, смыкающего верхнюю часть штампа с нижней и вытесняющего силой жидкость из контейнера, где давление регулируется клапаном. По схеме, представленной на рис. 12.1, в, работают установки автономного действия, которые можно назвать бесплунжерными прессами; давление здесь создается нагнетанием в контейнер жидкости от насосной станции высокого давления. Такие специализированные прессы для штамповки резиной (ПШР) имеют общее усилие $4,6 \cdot 10^7$ Н с контейнером размером $0,7 \times 1,5$ м (ПШР-0) и $9,6 \cdot 10^7$ Н с контейнером $1,2 \times 2,0$ (ПШР-1). Наибольшее давление в контейнере $4 \cdot 10^5$ ГПа, наибольшая высота штампуемых деталей до 100 мм; время рабочего цикла 1 мин. Конструктивно эти прессы представляют собой жесткий корпус, состоящий из двух массивных частей — верхней 12 и нижней 15, стянутых болтами. Внутри корпуса имеется рабочая полость — контейнер, который внизу закрыт резиновой диафрагмой 14; давление жидкости на заготовку передается через диафрагму. В рабочую зону пресса подаются по рольгангу плиты 16 с формблоками и заготовками.

Как видно из схемы, операция штамповки очень проста, специальной оснасткой является только формблок; контейнер и нижняя плита (выполненная по его внутренним размерам) являются универсальными. Низкая стоимость и простота изготовления оснастки, а также короткие сроки технологической подготовки производства обусловили широкое применение штамповки резиной в производстве летательных аппаратов.

При штамповке резиной заготовка испытывает распределенное давление только со стороны резиновой подушки, края заготовки деформируются свободно. Поэтому если в зоне деформирования возникают напряжения сжатия, то заготовка легко теряет устойчивость, появляются складки, которые не всегда можно устранить обжатием на пуансоне в конце операции. В этом случае складки устраняют последующей ручной доработкой. При возникновении в зоне деформирования напряжений растяжения возможности процесса ограничиваются давлением q , создаваемым резиновой подушкой контейнера.

При помощи штамповки резиной изготавливают детали главным образом из алюминиевых сплавов: нервюры, шпангоуты и их детали, диафрагмы, стенки, перегородки, полупатрубки и др. (см. рис. 1.1). Отличительной чертой таких деталей являются: большие размеры (длина до 3 м) малая жесткость, сравнительно небольшая деформация заготовки при изготовлении детали. Эти детали проектируют с учетом технологических возможностей именно штамповки резиной, так как изготовление их другими способами, например, в металлических штампах, значительно дороже. Конструктивно эти детали представляют собой плоские стенки с бортами по краям, с отбортованными отверстиями, с элементами жесткости, выполненными в виде рифтов и глухих полостей.

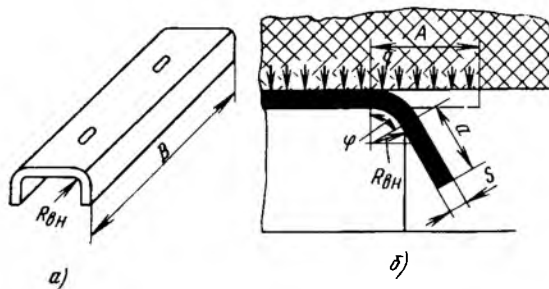


Рис. 12.2. Гибка П-образного профиля эластичной средой

Оборудование для штамповки при повышенных ($4 \cdot 10^5$ ГПа) и высоких (10^6 ГПа) давлениях, дало возможность перевести с менее производительных методов на штамповку эластичными средами ряд сложных деталей не только из алюминиевых сплавов, но и из сталей и титановых сплавов.

Штамповкой эластично-жидкостными средами осуществляется: гибка, образование бортов по вогнутому контуру и контуру отверстий (отбортовка), по выпуклому контуру (вытяжка), образование на стенках рифтов жесткости и глухих выштамповок (формовка) и др.

Этим способом изготавливают несколько тысяч наименований деталей самолета, трудоемкость выполнения этих операций достигает 15% от общей трудоемкости заготовительно-штамповочных работ.

Расчет давлений q при групповой штамповке необходим для выбора деталей для изготовления этим способом при заданном давлении; размеры деталей подбирают по размерам контейнера. Штамповка эластичными средами является одним из основных методов изготовления деталей самолетов, особенно клепаной конструкции из алюминиевых сплавов.

Гибка. Отличительная особенность операции в том, что внешний изгибающий момент создается не сосредоточенной силой, а распределенным давлением. На рис. 12.2, а показан профиль П-образной формы, при изготовлении которого плоскую заготовку можно деформировать резиновой матрицей по формблоку; линии перегиба бортов — прямолинейные. На рис. 12.2, б приведена схема операции.

Как и при гибке в металлических штампах, здесь необходимо определить длину заготовки, внешние силы и угол пружинения. Все эти параметры определяются по методике, изложенной в гл. 3. Необходимое давление q резиновой подушки в контейнере определяют из условия равенства изгибающих моментов внутренних и внешних сил. Если для простоты принять, что давление q на заготовку по всей площади отгибаемого борта одинаково, то дефор-

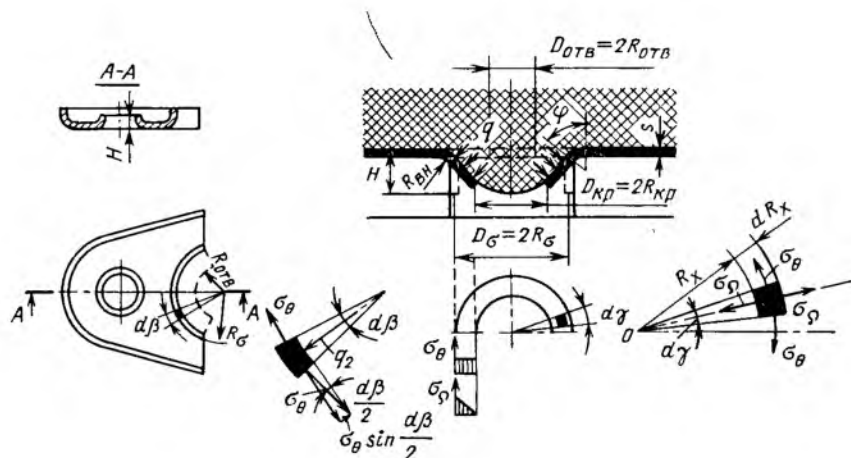


Рис. 12.3. Отбортовка отверстия и края нервюры эластичной средой

мирующая сила при выполнении операции будет равна aBq , а плечо равно $a/2$. Тогда изгибающий момент

$$M_B = qa^2B/2. \quad (12.1)$$

Момент внутренних сил можно принять по уравнению (3.28) или (3.30). Приравнявая выражения (12.1) и (3.30), получим (в обозначениях рис. 12.2):

$$q = \sigma_s \frac{s^2}{2a^2} \quad \text{или} \quad q = \sigma_s \frac{s^2}{2(A - R_{\text{нн}}\varphi)}. \quad (12.2)$$

Как видно из выражения (12.2), давление q с увеличением угла φ возрастает, достигая максимального значения в конце операции. Давление зависит главным образом от свойств материала (σ_s), толщины заготовки (s) и радиуса $R_{\text{нн}}$ изгиба. В уравнении (12.2) можно предусмотреть также упрочнение металла, приняв значение момента внутренних сил по формуле (3.28).

При давлении 10^6 ГПа можно изгибать резиной заготовки из алюминиевых сплавов толщиной 3 мм по радиусу 6...9 мм с высотой борта 40...50 мм.

Отбортовка. На рис. 12.3 приведена схема отбортовки отверстия в носовой части нервюры. Очагом деформаций является площадь кольца внешним диаметром $D_{\text{б}}$ (диаметр борта) и внутренним диаметром кромки отверстия $D_{\text{кр}}$. На торцевой части той же нервюры производится отбортовка по вогнутому незамкнутому контуру.

Давление q , необходимое для деформирования борта по вогнутому контуру, можно определить, представляя его в виде суммы $q = q_1 + q_2$ [15], где q_1 — давление, необходимое для гибки борта по ребру матрицы; q_2 — давление, необходимое для пластического растяжения борта в тангенциальном направлении. Величину q_1 определяют как q для гибки плоского борта уравнением (12.2), а q_2 приближенно подсчитывают из условия равновесия малого участка

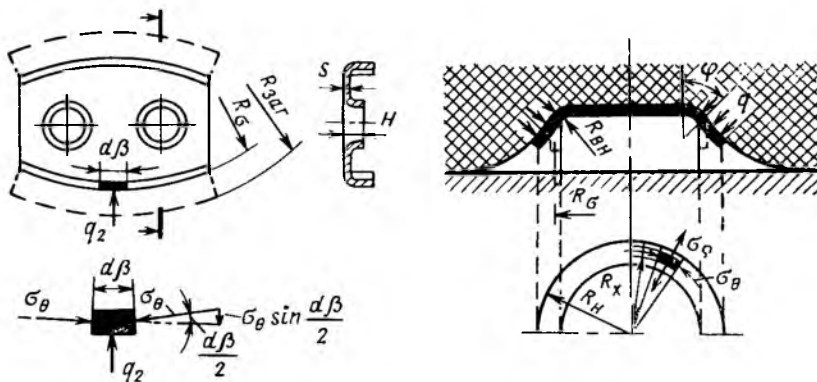


Рис. 12.4. Образование бортов по выпуклому контуру (вытяжка) нервюры эластичной средой

борта, ограниченного углом $d\beta$ (см. рис. 12.3). Проецируя силы, действующие на малый участок, на ось, проходящую посередине этого участка, получим:

$$R_6 d\beta H q_2 = 2sH\sigma_\theta \sin \frac{d\beta}{2}; \quad q_2 = \frac{\sigma_\theta}{R_6} \frac{2 \sin (d\beta/2)}{d\beta}. \quad (12.3)$$

Имея в виду, что по условию пластичности $\sigma_\theta = \sigma_s$, а синус малого угла равен самому углу, а также приняв значения q_1 и q_2 по уравнениям (12.2) и (12.3), находим:

$$q = \frac{\sigma_s s^2}{2(A - R_{\text{нн}}\varphi)^2} + \frac{\sigma_s s}{R_6}. \quad (12.4)$$

При известном q по уравнению (12.4) можно приближенно определять параметры изделий, которые можно штамповать резиной.

Напряженное и деформированное состояние определяется уравнениями, приведенными в гл. 6.

Вытяжка. Штамповку борта по выпуклому контуру часто применяют при изготовлении деталей нервюр и шпангоутов (см., например, борт по обводу носовой части нервюры на рис. 12.3). На рис. 12.4 показаны средняя часть нервюры с бортом выпуклого контура и штамповка ее резиной на формблоке. По напряженно-деформированному состоянию эта операция относится к вытяжке (без прижима и по незамкнутому контуру).

При штамповке борта по выпуклому контуру, когда в тангенциальном направлении действуют деформации сжатия, толщина заготовки несколько увеличивается, а если напряжения σ_θ больше критического значения, то заготовка теряет устойчивость и технологические возможности операции ограничиваются образованием складок. Эпюры распределения напряжений σ_θ и ε по очагу деформаций соответствуют уравнениям для вытяжки. Однако если борт образуется по незамкнутому контуру, то распределение напряжений будет несколько другое, чем при вытяжке, вследствие

влияния свободных концов борта, где, например, $\sigma_\theta = 0$; но для большей части борта распределение напряжений, определяемое уравнениями (4.8) и (4.9), можно считать реальным.

Необходимое для отбортовки давление q можно определить при условии отсутствия потери устойчивости заготовкой. Как и ранее, примем, что $q = q_1 + q_2$, где q_1 — давление, необходимое для гибки борта по ребру пуансона. Значения q можно принять по уравнению (12.2); q_2 — давление, необходимое для пластического сжатия борта в тангенциальном направлении. Значения q_2 можно приближенно определить из условия равновесия малого участка борта, ограниченного углом $d\beta$ (см. рис. 12.4). Проецируя силы, действующие на малый участок, на ось, проходящую через центр этого участка, получим:

$$HR_6 d\beta q_2 = 2Hs\sigma_0 \sin(d\beta/2); \quad q_2 = \sigma_0 s / R_6. \quad (12.5)$$

Напряжение σ_0 переменено по высоте борта. В зависимости от текущего радиуса R_x это напряжение изменяется в соответствии с уравнением (4.9) от значения σ_s на кромке, когда $R_x = R_H$, до значения $\sigma_s[1 - \ln(R_H/R_6)]$, когда $R_x = R_6$. В уравнение (12.5) можно подставить среднее значение напряжения σ_0 :

$$\sigma_{0cp} = \frac{\sigma_s + \sigma_s [1 - \ln(R_H/R_6)]}{2} = \sigma_s \left(1 - 0,5 \ln \frac{1}{m}\right). \quad (12.6)$$

Переход от R_H/R_6 к $1/m$ в выражении (12.6) основан на том, что для начального момента деформирования наружный радиус R_H свободной кромки равен радиусу R_3 заготовки ($R_H = R_3$), а $R_6/R_3 = m$ — коэффициент вытяжки.

Подставляя σ_{0cp} в уравнение (12.5), получим

$$q_2 = \frac{\sigma_s s}{R_6} \left(1 - 0,5 \ln \frac{1}{m}\right). \quad (12.7)$$

В этих вычислениях не учитывается упрочнение металла, а толщина заготовки принимается неизменной. Поэтому значение q , определяемое суммой $q_1 + q_2$, следует принимать как приближенное.

Очень затруднительно определение минимально допустимых значений коэффициента вытяжки. Поэтому мы приведем лишь данные, полученные в результате обобщения большого практического опыта штамповки резиной при давлении $q = 8 \cdot 10^4 \dots 10^5$ ГПа.

При штамповке деталей из дуралюмина и сплава В95 толщиной 0,5 ... 1,2 мм заготовка не теряет устойчивости при $R_6/R_3 = m \geq 0,97$, т. е. при относительном сжатии (ε_0) материала на кромке, равном всего 3%. При большей степени деформации заготовка в очаге деформаций теряет устойчивость, на поверхности борта появляются гофры. Эти складки можно устранить ручной доработкой, если их размеры не выходят за пределы некоторых предельных значений. Установлено, что складку можно устранить путем посадки материала и утолщения стенки в тех случаях, когда ее высота не превышает ее ширины. Этим условиям соответствует штамповка бортов при R_6/R_3 , равном от 0,9 (при $s = 0,5$ мм) до 0,8 (при $s =$

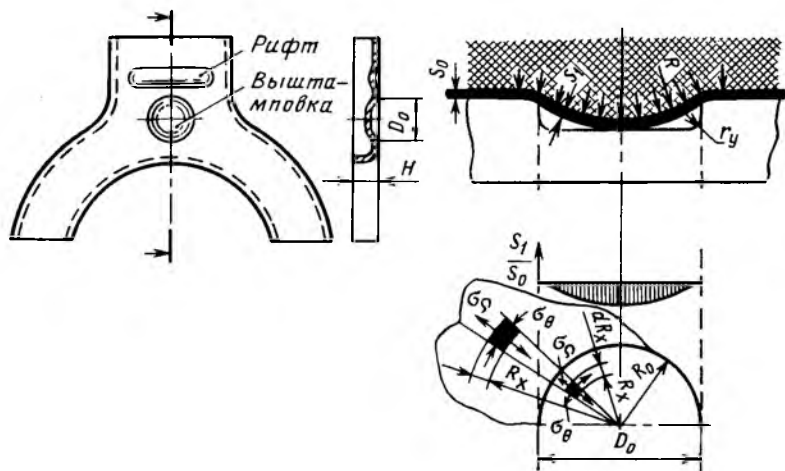


Рис. 12.5. Штамповка эластичной средой элементов жесткости

$= 1,2 \dots 1,5$ мм). При меньших значениях R_6/R_3 борт делают разрезным или допускают гофр, обращенный внутрь контура.

При повышенных давлениях в контейнере посадка гофров происходит более интенсивно и допускается большая окружная деформация сжатия.

Формовка и обтяжка. При формовке и обтяжке на заготовке нет свободных кромок. Под давлением эластичной среды происходит выпучивание заготовки (рис. 12.5); полость образуется здесь только за счет утонения стенки. Необходимое давление q может быть определено приближенно по уравнению Лапласа:

$$\sigma_0/R_0 + \sigma_\theta/R_\theta = q/s, \quad (12.8)$$

где R_0 и R_θ — радиус кривизны очага деформаций в радиальном и окружном направлениях.

Для свободного выпучивания можно приближенно принять форму очага деформаций в виде сферы, для которой $R_0 = R_\theta$ и $\sigma_0 = \sigma_\theta = \sigma_s$. Тогда без учета упрочнения и утонения материала

$$q = 2\sigma_s s_0/R. \quad (12.9)$$

Однако наибольшее давление q необходимо в момент формирования радиусов r_y сопряжения стенок с дном полости. На этой стадии давление может быть примерно определено по формуле

$$q = \sigma_s s_0/r_y.$$

Может быть достигнута глубина полостей, равная $0,2d$ для алюминиевого сплава и $0,3d$ для коррозионно-стойкой стали; при этом утонение заготовки может составлять $20 \dots 25\%$. Глубина элементов жесткости в стенках нервюр и шпангоутов обычно ниже пре-

дельного значения. В данном случае важнее определить минимальный радиус r_y , исходя из заданных значений q .

Штамповка эластичными средами и жидкостью отличается большим разнообразием. Развитие этого метода идет в направлении повышения давлений q , обеспечивающих не только формообразование более толстых и прочных заготовок, но и повышение пластичности металла вследствие наложения дополнительных гидростатических давлений. Более подробно с этим видом штамповки можно ознакомиться в работах [15, 23, 41].

12.2. ШТАМПОВКА НА ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫХ МОЛОТАХ

На летательных аппаратах применяют большое число крупногабаритных и сложных по форме деталей: двери и люки, окантовки дверей и люков, зализы и обтекатели, законцовки крыльев и хвостового оперения, полупатрубки, элементы жесткости, детали заборной части двигателей, капотов, гондол двигателей и др. Изготовление таких деталей в инструментальных штампах при опытно- и мелкосерийном производстве неэкономично вследствие высокой стоимости штампа, а также длительных сроков их изготовления и отладки. Поэтому сложные крупногабаритные детали штампуют на так называемых листоштамповочных (падающих) молотах в свинцово-цинковых штампах упрощенной конструкции, изготавливаемых при помощи литья.

Штамповка на листоштамповочных молотах не обеспечивает высокой производительности труда и хорошей точности деталей. При этом методе штамповки, как и при штамповке резиной, необходима ручная доработка, на которую затрачивается в несколько раз больше времени, чем на основную операцию. Тем не менее, по сравнению с другими этот метод экономически выгоден. Если при штамповке резиной для изготовления деталей нужно изготовить только один формблок, то при штамповке на молотах нужно отлить матрицу из цинка, а пуансон из свинца, на что не требуется больших затрат времени и труда.

Трудоемкость штамповки на листоштамповочных молотах составляет 10...15% от общей трудоемкости заготовительно-штамповочных работ.

Листоштамповочный молот отличается от прессы принципом действия. На прессе деформирующее усилие, прикладываемое к заготовке ползуном, создается механическим или гидравлическим приводом, на молоте это усилие создается кинетической энергией, развиваемой падающими из верхнего (исходного) положения частями молота (стесселем и пуансоном). Чем больше кинетическая энергия, развиваемая при падении стесселя, тем больших размеров и толщины можно штамповать детали. Силовые параметры листоштамповочных молотов определяются не усилием, как у прессов, а весом падающих частей. На рис. 12.6 приведена схема листоштамповочного молота, основными частями которого являются: шабот 1 (стол), верхняя плита станины 2 и пневмоцилиндр 3 подь-

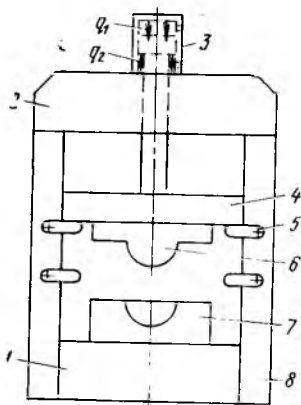


Рис. 12.6. Листоштамповочный молот:

1—шабот (стол); 2—верхняя плита станины; 3—пневмоцилиндр; 4—стессель; 5—замки; 6—пуансон; 7—матрица; 8—боковые стойки станины

ема стесселя 4, закрепленного на штоке пневмоцилиндра. Верхняя рабочая часть штампа — пуансон 6 — присоединена к стесселю, а нижняя — матрица 7 — закреплена на столе. Пневматический привод применяется для подъема стесселя в исходное положение, в котором он удерживается специальными замками 5. Боковые стойки 8 станины служат одновременно и основанием для закрепления направляющих стесселя. При рабочем ходе замки убираются и стессель с пуансоном падает на матрицу.

На листоштамповочных молотах можно производить гибку, вытяжку, отбортовку и формовку как за одну, так и за несколько операций; толщина заготовок из алюминиевых сплавов $s \leq 3$ мм, из сталей $s \leq 2$ мм. При изготовлении сложных крупногабаритных деталей в разных зонах заготовки может одновременно возникнуть напряженно-деформированное состояние, характерное для нескольких операций.

На листоштамповочных молотах можно широко регулировать энергию удара путем изменения веса падающих частей и скорости их падения. Скорость V стесселя в зависимости от высоты H его падения изменяется согласно уравнению $V = \sqrt{2gH}$; скорость можно уменьшать задержкой сжатого воздуха в нижней полости пневмоцилиндра (под поршнем) или увеличивать, когда поршень будет подталкиваться сжатым воздухом, подаваемым в верхнюю часть цилиндра. Это обеспечивает возможность штамповать на одном молоте разные детали, согласуя лишь их размеры с размерами стола. В тех случаях, когда необходимо определить энергетические данные молота, чтобы проверить возможность штамповки на нем деталей с заданными размерами, эта задача при заданной характеристике молота сводится в расчеты необходимого веса падающих частей и сравнению его с действительным весом. Наилучшим для расчета является энергетический метод: сравнение энергии, необходимой для пластического деформирования детали, с кинетической энергией, развиваемой падающими частями молота.

Как известно, энергия A свободно падающего тела весом G и массой m с высоты H равна

$$A = mV^2/2 = GH. \quad (12.10)$$

Работа A_d пластического деформирования выражается уравнением [38]

$$A_d = \int_V \int \sigma_i \varepsilon_i dV. \quad (12.11)$$

Здесь σ_i , ε_i — интенсивность напряжений и деформаций в деформируемом объеме V заготовки.

При рассмотрении различных операций мы могли убедиться, что во всех случаях деформирования имеет место неравномерное распределение по заготовке напряжений и деформаций, тем более, если изделия имеют сложные несимметричные формы. Поэтому решение уравнения (12.11) представляет большие трудности, так как в деформируемом объеме переменными являются и σ_i и ε_i . Для примерных расчетов можно принять $\varepsilon_i = \varepsilon_{i\text{cp}} = \text{const}$ и соответствующую ей среднюю интенсивность напряжений $\sigma_i = \sigma_{i\text{cp}} = \sigma_s' + P\varepsilon_{i\text{cp}}$. Величину $\varepsilon_{i\text{cp}}$ для некоторых операций применительно к изготовлению осесимметричных деталей можно определить по рекомендациям, изложенным в [28]. Зная $\varepsilon_{i\text{cp}}$, находим:

$$A_d = (\sigma_s' + P\varepsilon_{i\text{cp}}) \varepsilon_{i\text{cp}} V. \quad (12.12)$$

Приравняв (12.10) и (12.12), с учетом к. п. д. молота η получаем:

$$G = \frac{\sigma_s' + P\varepsilon_{i\text{cp}}}{H\eta}. \quad (12.13)$$

Листоштамповочные молоты имеют падающие части весом: 8; 15; 30 и 50 кН; площадь столов увеличивается пропорционально весу стесселя и находится в пределах: $0,7 \times 0,9$ м для молота 8 кН и $1,8 \times 3,1$ м для молота 50 кН. Величина хода (H) стесселя достигает $0,85 \dots 1,50$ м.

Как уже было отмечено, в качестве материалов для штампов применяют цинк и свинец. Выбор этих материалов обуславливается их свойствами, которые удовлетворяют требованиям рассматриваемого способа штамповки в мелкосерийном производстве. Цинк и свинец обладают низкой температурой плавления, хорошими литейными качествами, что обеспечивает возможность применения несложного литейного оборудования, а также многократное использование металла путем переплавки штампов. Эти материалы имеют низкие механические свойства и малую твердость, что обуславливает легкость обработки контуров рабочих частей штампа после литья. Разность температур плавления цинка и свинца примерно 100° , вследствие чего можно упростить технологию изготовления штампа и отливать в землю только одну цинковую матрицу, а для отливки свинцового пуансона в качестве формы использовать уже отлитую цинковую матрицу. Кроме того, цинк и свинец обладают хорошей коррозионной стойкостью, что упрощает хранение штампов.

Цинк и свинец обладают низкой прочностью, поэтому стойкость свинцово-цинковых штампов всего $200 \dots 300$ деталей из алюминиевых сплавов и до 100 стальных деталей. Для изготовления большего количества деталей штампы выполняют из более прочных материалов: сплава АЦ13 (алюминиево-цинковый), чугуна.

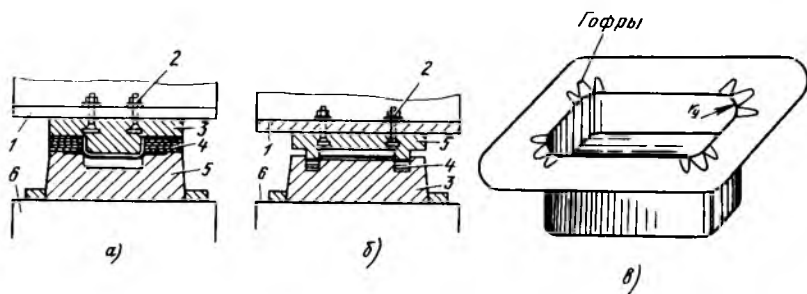


Рис. 12.7. Применение рамок для предотвращения гофров:

а—штамповка «на вытяжку»; б—штамповка «на обжим»; в—деталь, подлежащая доводке; 1—стессель; 2—болты крепления пуансона к стесселю; 3—пуансон; 4—рамки; 5—матрица; 6—шабот

При штамповке на молотах применяют специальные способы для увеличения производительности труда, уменьшения ручной доводки и облегчения труда рабочего.

Применяют рамки (рис. 12.7), которые задерживают образование гофров и ограничивают глубину внедрения пуансона в матрицу при изготовлении деталей вытяжкой, когда обычно имеет место потеря устойчивости во фланце заготовки. Контуры рамок повторяют контуры прижима в инструментальных штампах; по наружному контуру рамки ограничиваются размерами заготовки, по внутреннему — полостью матрицы. На рис. 12.7, а показано положение набора рамок, уложенного по краям заготовки, лежащей над полостью матрицы. Перед операцией вытяжки высота набора рамок подбирается из условия допустимой глубины внедрения пуансона в матрицу, т. е. из условия, чтобы гофры, возникающие в угловых участках детали (см. рис. 12.7, в), можно было устранять последующей доводкой. При опускании стесселя средняя часть пуансона давит на заготовку и проталкивает ее в матрицу, а заплечики пуансона, давя на набор рамок, уплотняют его. Нижняя рамка начинает работать как прижим, сдерживая развитие гофров, а в целом набор рамок задерживает ход пуансона на определенном уровне, ограничивая степень деформации заготовки. После первого удара стесселя рабочий снимает рамки, устраняет ручной доводкой гофры, а перед вторым ударом снова устанавливает набор рамок, но уже меньшей высоты, обеспечивая, таким образом, более глубокое внедрение пуансона в полость матрицы и увеличение глубины вытяжки. Этот цикл повторяется многократно, но перед каждым последующим ударом стесселя рабочий снимает одну-две рамки (толщина рамки 2...4 мм), уменьшая высоту набора; последний удар стесселя происходит уже без рамок, и при этом пуансон окончательно оформляет контуры детали по матрице.

При применении рамок рабочий освобождается от регулирования силы удара стесселя и степени формоизменения заготовки, что устраняет возможность возникновения высоких гофров, разгладить которые невозможно.

Расположение матрицы (на шаботе или на стесселе) выбирают исходя из удобства фиксации заготовки и доработки деталей непосредственно на нижней части штампа. Штамповка «на вытяжку» производится при таком расположении рабочих частей штампа, когда матрица помещена на шаботе, а пуансон закреплен на стесселе (см. рис. 12.7, а); штамповка «на обжим» производится при расположении матрицы на стесселе, а пуансона — на шаботе (см. рис. 12.7, б). «На вытяжку» штампуют все детали, для которых требуется глубокая вытяжка, а «на обжим» — узкие удлиненные детали типа профилей разного сечения, которые править ручными средствами гораздо удобнее на пуансоне, чем на матрице.

Прокладки из листовой и пластинчатой резины также широко применяют для калибровки труднодеформируемых участков заготовки, ограничения хода пуансона и устранения образования гофров. Резина способствует увеличению давления со стороны пуансона в соответствующей зоне заготовки, обеспечению развития местного деформирования и получению более четкого оформления подсечек, радиусов сопряжения стенок, рифтов и других элементов рельефа поверхности деталей.

Успешное применение резины для окончательного формования рельефа деталей на падающих молотах привело к разработке нового способа штамповки. При этом способе вместо пуансона на стесселе закреплен контейнер, заполненный резиной, который играет роль универсальной матрицы; пуансон установлен на шаботе молота. При падении стесселя заготовка обжимается по контуру пуансона давлением резины. Преимущество этого метода — универсальность, так как для штамповки деталей необходимо изготавливать только один пуансон.

Штамповка часто сочетается с разводкой или посадкой материала заготовки на вспомогательном оборудовании.

12.3. ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ МЕТОДЫ ШТАМПОВКИ

Скоростная характеристика процессов штамповки оценивается двумя показателями: скоростью деформаций и скоростью деформирования. Под *скоростью деформаций* понимается изменение степени деформации ϵ в единицу времени ($d\epsilon/dt$), а *под скоростью деформирования* — скорость перемещения деформирующего инструмента.

Штамповка обычными способами выполняется при сравнительно небольшой скорости деформирования. Так, скорость хода плунжера гидравлического пресса находится в пределах 0,05 ... 0,10 м/с, ползуна механического пресса — 2 ... 3 м/с, а стесселя листоштамповочного молота — 3 ... 4 м/с. При штамповке на указанном оборудовании принимается, что заготовка нагружается внешними силами статически, а напряженное состояние ее определяется из условия равновесия. Силами инерции ввиду их малости пренебрегают.

Высокоскоростные способы штамповки характеризуются скоростями, в десятки и сотни раз большими, чем достигаемые на обыч-

ном оборудовании. Большие скорости достигаются на установках, где в качестве источника энергии используются детонирующие (бризантные или фугасные) взрывчатые вещества. Здесь заготовка деформируется под воздействием движущейся со скоростью 50...70 м/с передающей среды. В установках пушечного типа, где пуансон разгоняется в стволе пушки, скорость деформирования может достигать до 300...400 м/с. Меньшие скорости (50...100 м/с) имеют место на установках, работающих на основе объемного расширения газов, выделяющихся при химическом сгорании горючих смесей газов или порохов.

Наиболее известные способы высокоскоростной штамповки. штамповка взрывом, электрогидравлическая и магнитно-импульсная штамповка.

Резкое повышение скоростей штамповки под действием энергии ударных волн передающей среды приводит к некоторым качественным изменениям пластического деформирования металлов. Увеличивается сопротивление деформированию, сказывается влияние сил инерции, существенно изменяются кинематика процессов, условия трения; большинство металлов, в том числе и труднодеформируемые, проявляют несколько лучшие пластические свойства, что обусловлено, очевидно, влиянием дополнительного гидростатического давления. Однако для некоторых металлов выявляются критические скорости деформаций, после которых пластичность снижается. При высоких скоростях легко обеспечить повышенные контактные напряжения при соударении заготовки со штампом, что положительно сказывается на точности процессов. Здесь характерно импульсное приложение к заготовке внешней нагрузки; пластическое деформирование заготовки происходит более длительное время, чем время внешнего силового воздействия. Основное формоизменение заготовки происходит за счет расходования кинетической энергии, приобретенной ею на активной стадии процесса. Поэтому перемещения и деформации в отдельных зонах заготовки зависят от поля скоростей и ускорений этих зон в активной стадии.

Возрастающий интерес к высокоскоростным методам обуславливается также их определенной экономичностью. Во-первых, это беспрессовые методы и для штамповки крупногабаритных деталей не требуется строительства дорогостоящего оборудования; во-вторых, эти методы обладают универсальностью, для их реализации необходимо изготовить лишь одну половину штампа, матрицу или пуансон, роль второй половины выполняет жидкость или другая передающая среда.

Высокоскоростные методы применяют как для объемной, так и для листовой штамповки. Типовыми деталями являются: днища, обечайки, полупатрубки, крупногабаритные и сложные детали из сталей и титановых сплавов. Типовые операции: штамповка и калибровка раздачей и обжимом, штамповка концов труб и др.

Штамповка взрывом. В качестве источника энергии при штамповке взрывом используют: детонирующие взрывчатые вещества — тротил порошкообразный и литой, аммонит порошкообразный

и прессованный; пороха — пироксилиновые, нитроглицериновые, дымные; горючие газовые смеси — ацетилен, метан, пропан и другие газы в смеси с кислородом или воздухом.

Бризантные взрывчатые вещества отличаются большой удельной концентрацией энергии и большими скоростями детонации, поэтому время превращения вещества в газообразные продукты исчисляется миллионными долями секунды; давление, возникающее в зоне заряда, достигает тысяч мегапаскалей.

Пороха относятся к горящим взрывчатым веществам; горение распространяется со скоростью 1 ... 3 м/с. Образующиеся при сгорании пороха газы, расширяясь, оказывают давление на передающую среду или непосредственно на заготовку, производя полезную работу деформирования.

Необходимым условием применения газовых смесей является их предварительное сжатие перед сжиганием. Давление продуктов сгорания горючих смесей в значительной степени зависит от предварительного сжатия на 10^3 ГПа давление в камере сгорания увеличивается на $7 \cdot 10^3 \dots 10^4$ ГПа.

На рис. 12.8 приведена схема установки для штамповки взрывом в воде. Матрица 4 установлена на дне бассейна 5 вместе с прижимом 3 и заготовкой 7. Через канал 6 из полости матрицы выкачивают воздух для создания вакуума, чтобы уменьшить сопротивление вытесняемого из полости матрицы воздуха в процессе деформирования заготовки. В результате взрыва взрывчатого вещества в воде образуется движущаяся волна, которая, достигнув заготовки, деформирует ее по контуру матрицы.

На схеме показан штамп для вытяжки деталей, подобных днищу бака.

Передающая среда. Энергия взрыва характеризуется большой концентрацией. Для передачи этой энергии на большую площадь заготовки и для равномерного ее деформирования взрыв заряда производят не в воздухе, а в воде. В качестве передающей среды вода смягчает удар и обеспечивает нагружение заготовки по всему очагу деформаций.

От свойств передающей среды значительно зависит механизм деформирования. Вода рассредоточивает давление от взрыва лучше воздуха, а сыпучая среда (песок) обеспечивает наиболее равномерную деформацию.

Дистанция взрыва. Под дистанцией взрыва понимают расстояние заряда от подлежащей деформированию заготовки. От этого параметра в значительной степени зависит профиль ударной вол-

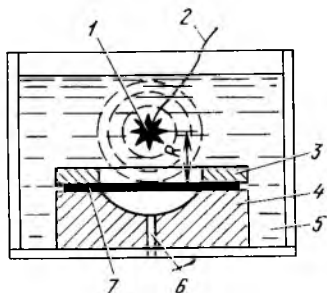


Рис. 12.8. Схема установки для штамповки (вытяжки) взрывом (бассейновый вариант):

- 1—заряд взрывчатого вещества;
- 2—провод электрического детонатора;
- 3—прижим;
- 4—матрица;
- 5—бассейн;
- 6—канал для удаления воздуха;
- 7—заготовка

ны при подходе к заготовке, а следовательно, и механизм деформирования при формировании детали.

Для наиболее рационального использования энергии взрыва выгоднее располагать заряд ближе к заготовке; в этом случае на деформирование заготовки расходуется большая часть энергии. Однако следует отметить, что заряд, расположенный близко от заготовки, вызывает при взрыве локализацию деформации, большое утонение и разрушение заготовки. Особенно заметно это влияние при взрыве заряда сферической формы. Если заряд I (см. рис. 12.8) сферической формы расположить близко к заготовке 7 , то ударная волна, имеющая при подходе к заготовке значительную кривизну, произведет большую местную деформацию в центральной зоне и выштамповка будет иметь не сферическую, а коническую форму. Если заряд поднять очень высоко над заготовкой, то ударная волна подойдет к заготовке ослабленной и ее энергии не хватит для совершения полезной работы деформирования. Только при правильной дистанции взрыва (для заряда заданной массы) можно обеспечить полное деформирование заготовки и правильную форму детали. Сферический заряд следует располагать от заготовки на расстоянии R , равном $0,8 \dots 2,0$ ее диаметра. Плоский или кольцевой заряд можно располагать ближе к заготовке. В таких операциях, как чеканка, калибровка и правка плит, резка фасонного материала заряд в виде пластин помещают непосредственно в заготовку. Скорость деформирования от плоского, наложенного на заготовку заряда достигает $70 \dots 120$ м/с, в то время как при дистанционном взрыве сферического заряда скорость деформирования достигает лишь $40 \dots 65$ м/с.

Форма заряда. Форма заряда определяет форму волны, воздействующей на заготовку (это утверждение наиболее справедливо для заготовки, расположенной близко от заряда). Сферический заряд создает волну сферической формы, цилиндрический (в виде стержня или шнура) — цилиндрической формы, плоский — плоскую волну. Применение заряда той или иной формы зависит от конструкции штампуемых деталей. Например, для штамповки деталей с небольшой высотой из плоской заготовки наиболее выгодной формой заряда является плоская пластина или шнур, свернутый в спираль; для раздачи трубчатых заготовок применяется заряд в виде стержня. В некоторых случаях эффективен заряд конической или кольцевой формы. Применяются также заряды в виде пластины и стержней непостоянной толщины, причем утолщенную часть заряда располагают над наиболее сильно деформированной зоной заготовки, где необходимо большее давление.

Масса заряда. Успешная штамповка деталей взрывом зависит от того, насколько правильно определена масса заряда при заданной его форме и дистанции взрыва. Массу заряда можно определить расчетным путем исходя из энергетических условий при равенстве выделенной и потребляемой энергии. Количество взрывчатого вещества в заряде должно быть таким, чтобы энергия взрыва заряда $F_{\text{взр}}$ (с учетом потерь) была достаточной для создания

энергии A_d , совершающей пластическое деформирование заготовки, т. е. чтобы

$$A_{взр} = A_d / \eta, \quad (12.14)$$

здесь η — к. п. д. установки.

С методикой определения энергии пластического деформирования мы познакомились ранее при расчете массы падающих частей листоштамповочного молота. Напомним, что работу пластического деформирования можно определить по уравнению (12.12), но при штамповке взрывом в этом случае следует принимать во внимание повышение сопротивления деформированию при динамических нагрузках. Значения предела текучести σ_s нужно принимать на 30...50% выше значений, полученных при стандартных испытаниях на растяжение, а среднюю интенсивность деформации $\epsilon_{i\text{ ср}}$ можно примерно определять, если деталь имеет осесимметричную форму. Так, при штамповке взрывом детали, имеющей форму части сферы, среднее значение интенсивности деформации будет равно

$$\epsilon_{i\text{ ср}} = \frac{4}{3} \frac{H^2}{r_0^2}, \quad (12.15)$$

где r_0 — радиус сферической поверхности; H — высота детали.

Работа пластического деформирования с учетом уравнения (12.12) определяется по формуле

$$A_d = V \epsilon_{i\text{ ср}} (\sigma'_s + \Pi \epsilon_{i\text{ ср}}) = V \frac{4}{3} \frac{H^2}{r_0^2} \left(\sigma'_s + \Pi \frac{4}{3} \frac{H^2}{r_0^2} \right). \quad (12.16)$$

Объем V металла, участвующего в пластическом деформировании, равен объему части плоской заготовки, находящейся над полостью матрицы (диаметр этой части заготовки равен $2r_0$), а объем $V = 2\pi r_0^2 s$.

Интенсивность деформации и работу деформирования для вытяжки, раздачи и других операций можно определить по методике, изложенной в работах [27, 28].

Коэффициент полезного действия η установок при штамповке взрывом в бассейне открытых деталей типа днищ составляет примерно 10%, а при раздаче трубчатых заготовок достигает 15%. На повышение к. п. д. установки значительное влияние оказывают устройства, направляющие ударную волну на заготовку (отражатели), подбор такой формы заряда, которая создает направленный взрыв; штамповка в матрицах одновременно двух деталей, расположенных по разные стороны от заряда, и пр.

Зная энергию ω , выделяющуюся при взрыве единицы массы взрывчатого вещества, и к. п. д. установки, можно определить массу m заряда на основании уравнения (12.14):

$$A_{взр} = m\omega = A_d / \eta; \quad m = A_d / (\eta\omega). \quad (12.17)$$

Масса заряда (в кг) зависит от многих параметров, которые не удастся точно учесть в расчете, поэтому при расчете масс заря-

да при бассейновой штамповке рекомендуется использовать упрощенные формулы [28]:

— для сферического заряда (при $R > 10r_0$)

$$m = [875qasR^{1,8}]^{0,8}, \quad (12.18)$$

где a — потребная энергия формообразования единицы поверхности заготовки; s — толщина заготовки (см); R — дистанция взрыва (м); q — плотность заготовки;

— для погонного метра линейного заряда:

$$m = [450qasR^{0,55}]^{0,8}. \quad (12.19)$$

Для других форм зарядов, а также для схем с близкой дистанцией взрыва соответствующие формулы приведены также в работе [28].

Кинематика движения заготовки. При штамповке взрывом в водной среде наблюдается совершенно другая картина перемещения заготовки, чем при штамповке жидкостью в статических условиях. При взрыве плоского или удаленного от заготовки на достаточное расстояние сферического заряда ударная волна при подходе к заготовке имеет фронт, близкий по форме к плоскому, и часть заготовки, находящаяся над плоскостью матрицы, сначала опускается параллельно исходному положению (рис. 12.9), деформируясь незначительно; вертикальная стенка образуется в большей степени вследствие движения фланца. На этой активной стадии деформирования ударная волна сообщает заготовке запас кинетической энергии, и в определенный момент перемещение заготовки начинает опережать движение потока жидкости, заготовка отрывается от него, и между ней и жидкостью образуется разреженное пространство (явление кавитации). На этой пассивной стадии деформирования происходит формирование донной части детали при помощи накопленной заготовкой кинетической энергии. При точном расчете массы заряда заготовка достигает дна матрицы со скоростью, равной 0; при избыточной массе заряда происходит соударе-

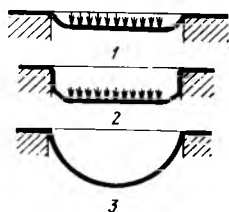


Рис. 12.9. Стадии перемещения заготовки под воздействием ударной волны подвального взрыва:

1, 2—активная стадия деформирования; 3—пассивная стадия

ние заготовки с матрицей. В зависимости от определенных соотношений масс заготовки и жидкости на пассивной стадии деформирования поток жидкости может догнать заготовку, заполнить кавитационную полость и, сообщив заготовке дополнительный импульс, увеличить скорость ее перемещения.

При штамповке толстостенных деталей толщиной более 6 ... 7% диаметра детали отрыв заготовки от потока жидкости не наблюдается.

Технологическая оснастка. Штамповка взрывом производится в специальных установках, представляющих собой подземный или надземный бассейны, оборудованные подъемно-транспортными средствами, вакуумными установками и соответствующей аппаратурой управления и кон-

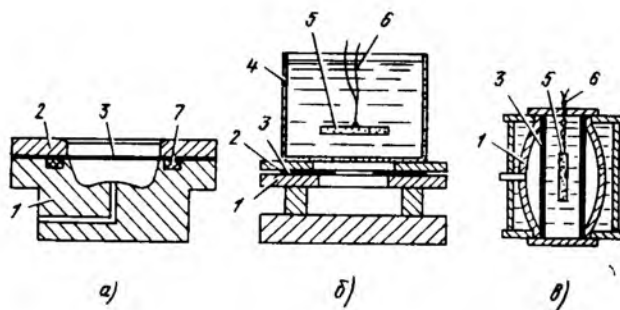


Рис. 12.10. Технологическая оснастка для штамповки взрывом:

а—матрица для вытяжки (устанавливается в бассейне); *б*—установка для отбортовки; *в*—установка для раздачи; 1—матрица; 2—прижим; 3—заготовка; 4—контейнер разового назначения; 5—заряд; 6—провода детонатора; 7—уплотнительное кольцо

троля. Стенки бассейнов (вертикальные или наклонные) бетонируют и облицовывают листовой сталью.

Стенки и дно бассейна изолированы энергопоглощающими средами для предотвращения распространения ударной волны на основании близко расположенных зданий. В таких бассейнах можно штамповать детали диаметром в несколько метров.

Так как штамповка взрывом применяется в мелкосерийном производстве, технологическая оснастка делается упрощенной конструкции из дешевых материалов и не рассчитана на большую стойкость. В качестве материалов для оснастки применяют малоуглеродистые стали, цинково-алюминиевый сплав АЦ13, железобетон (при штамповке крупных деталей), твердые породы дерева, эпоксидные смолы. Часто применяют комбинированные матрицы — железобетонные матрицы, облицованные эпоксидной смолой. В нижней части матрицы имеется канал, который гибким шлангом соединяется с вакуумным насосом, создающим вакуум в полости матрицы.

На рис. 12.10 показана технологическая оснастка для выполнения операций вытяжки, отбортовки и раздачи. При вытяжке на матрицу 1 (рис. 12.10, *а*) вне бассейна устанавливают заготовку 3 и прижим 2. Для обеспечения герметичности полости матрицы предусмотрена канавка, в которую вставлено уплотнительное резиновое кольцо 7. Прижим крепится к матрице болтами или скобами. После сборки штампа из полости матрицы откачивается воздух; при создании достаточного разрежения система вакуумирования отключается. Укомплектованная матрица на тросах опускается краном на дно бассейна, заполненного водой.

На рис. 12.10, *б* показана установка для отбортовки отверстий, в которой для воды используется контейнер разового назначения из картона, пропитанного органическими смолами. При подрыве заряда ударная волна взрыва разрушает дно бассейна и устремившийся вниз поток воды отбортовывает отверстие в заготовке. Для

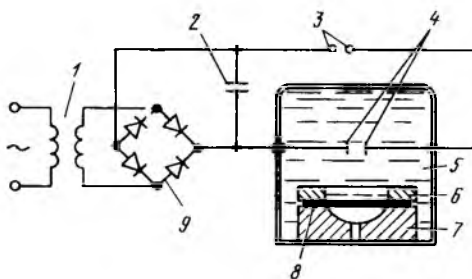


Рис. 12.11. Схема установки для электрогидравлической штамповки:

1—трансформатор; 2—конденсаторы; 3—разрядник; 4—зазор между электродами; 5—резервуар с водой; 6—прижим; 7—матрица; 8—заготовка; 9—выпрямитель

благоприятного распределения давления по очагу деформаций применяется плоский заряд.

На рис. 12.10, в показана установка для раздачи трубчатой заготовки. Установка — закрытого типа, взрыв происходит в заполненном водой замкнутом объеме, что обеспечивает более рациональное использование энергии взрыва. Так как заготовка и деталь имеют удлиненную форму, то и заряд применяется также удлиненной формы (в виде стержня).

Матрица разъемная; между рабочей поверхностью матрицы и наружной стенкой установки залита вода, которая играет роль амортизатора.

Установки закрытого типа применяются также для штамповки листовых заготовок.

Электрогидравлическая штамповка. Формование деталей электрогидравлическим способом производят с помощью высоковольтного электрического разряда в жидкой среде, которая создает ударную волну, воздействующую на заготовку.

На рис. 12.11 показана схема установки для электрогидравлической штамповки. Переменный ток трансформируется в ток более высокого напряжения, затем пропускается через выпрямитель 9 и попадает в так называемый разрядный контур, состоящий из конденсаторов 2 и рабочего искрового зазора между электродами 4, находящимися в резервуаре 5 с водой. Как только на конденсаторе достигается потенциал определенной величины, происходит пробой зазора в воздушном разряднике 3 и накопленная в конденсаторах электроэнергия мгновенно выделяется в виде искрового разряда в рабочем зазоре между электродами. Мощный искровой разряд подобен взрыву. В результате разряда в жидкости возникает волна, которая, дойдя до заготовки, оказывает на нее силовое воздействие и осуществляет деформирование ее по матрице. Если для полного деформирования заготовки одного импульса недостаточно, то рабочий цикл может быть повторен. Как и при штамповке взрывом, под заготовкой полости матрицы создается вакуум. Электрогидравлическая штамповка применяется при многих операциях листовой штамповки для изготовления таких небольших и средних размеров (длиной до 1000 мм, толщиной до 3 мм) деталей, как различные элементы жесткости, окантовки, полупатрубки, законцовки, обечайки и др. Процесс отличается импульсным характером и высокой скоростью приложения нагрузки. Конденсаторы разряжаются за 40...50 мкс и выделяют электроэнергию огромной мощно-

сти; в рабочем промежутке разрядника возникают давления, равные сотням мегапаскалей, а ударная волна, распространяющаяся в жидкости с большой скоростью, несет в себе большую энергию, часть которой расходуется на полезную работу деформирования.

Электрогидравлическая штамповка имеет перед штамповкой взрывом такие преимущества как простота регулирования количества выделяемой энергии, возможность производить штамповку за несколько импульсов и поэтому изготовлять постепенным деформированием детали сложной формы при большом формоизменении заготовки; при осуществлении этого способа можно также получать более высокий коэффициент использования энергии. Но создание мощных установок для штамповки крупногабаритных толсто-стенных деталей этим способом гораздо сложнее, чем при штамповке взрывом.

По физической сущности силового воздействия на заготовку электрогидравлическая штамповка аналогична штамповке взрывом в воде. Изменять форму ударной волны в этом случае можно путем изменения взаимного расположения электродов и применения так называемой иницирующей проволоочки, которая соединяет электроды в рабочем зазоре разрядника.

При первом способе между электродами в момент достижения определенной разности потенциалов возникает дуга с высокой температурой и в рабочем зазоре некоторая часть жидкости как бы «взрывается», мгновенно испаряясь. Форма газового пузыря определяет форму ударной волны, а следовательно, и кинематику перемещения заготовки. При малом зазоре эффект разряда близок к эффекту от взрыва сферического заряда, при большом зазоре — от заряда линейной формы (шнура, стержня). Максимальная величина зазора обуславливается разностью потенциалов, которая в применяемых установках достигает 30 кВ.

Если же электроды соединены проволочкой, то при разряде конденсаторов вследствие большой мощности выделяемой энергии «взрывается» проволочка, по которой проходит ток в несколько тысяч ампер, и превращается в плазму за время, исчисляемое микросекундами. При этом вдоль оси проволоки возникает газовый канал с огромным давлением, обуславливающим мгновенное расширение паров и возникновение мощной волны, которая аналогична волне, возникающей при подрыве заряда линейной формы. Взрывающаяся проволочка дает возможность управлять направлением волны.

Расчет накопленной энергии производится на основании определения энергии, необходимой для пластического деформирования заготовки. Основное уравнение $A_0 = A_d / \eta$ определяет зависимость затрачиваемой электрической энергии от энергии деформирования A_d . Энергия A_0 , накопленная в конденсаторе, определяется формулой

$$A_0 = CU^2/2, \quad (12.20)$$

где C — емкость конденсатора; U — напряжение на конденсаторе.

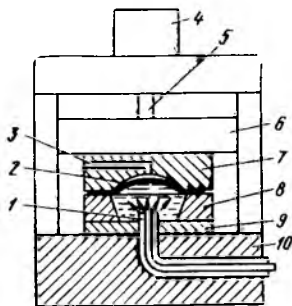


Рис. 12.12. Установка для электрогидравлической штамповки:

1—электроды; 2—заготовка; 3—канал для вакуумирования полости матрицы; 4—гидроцилиндр; 5—шток гидроцилиндра; 6—траверса; 7—матрица; 8—резервуар с водой; 9—плита; 10—стол

Методика расчета энергии пластического деформирования изложена выше. При электрогидравлической штамповке к. п. д. установок для изготовления открытых деталей из плоской заготовки может достигать 15%, а при раздаче трубчатых заготовок — 20%. В полузакрытых и закрытых системах эффект использования электроэнергии повышается. При наиболее оптимальных условиях разряда для создания фронта волны, отвечающего требованиям деформирования заготовки, к. п. д. может быть увеличен до 30%.

Накопляемая в конденсаторах энергия определяется назначением установки. Например, для деформирования труб из алюминиевых сплавов диаметром до 75 мм и толщиной 3 мм необходим запас энергии до 25 кДж. На современных установках для штамповки деталей из плоских заготовок можно обеспечить энерги-

гию до 200 кДж при диаметре и высоте резервуара с водой $1,5 \times 2,0$ м.

В технологический блок входят резервуар с водой, система электродов и устройства для регулирования положения электродов, матрица, прижим и другие элементы, участвующие в процессе штамповки. Расположение электродов зависит от формы штампуемых деталей. Если расположить электроды очень близко от заготовки, то, как и при штамповке взрывом, это вызывает локализацию деформации. В зависимости от потребностей ударная волна, создаваемая электрическим разрядом в жидкости, может обеспечить давление на заготовку от нескольких десятков до нескольких сотен мегапаскалей.

На рис. 12.12 приведена схема установки, выполненной в виде прессы, в которой электрический разряд в жидкости используется в качестве источника энергии. Установка по конструкции и условиям работы приближена к конструкции и условиям работы прессового оборудования. Резервуар 8 с водой и электроды 1 расположены внизу, а матрица 7 — наверху. Матрица опускается на резервуар с водой при помощи гидропривода. Гидроцилиндр 4 расположен на верхней плите станины, шток 5 гидроцилиндра соединен с подвижной траверсой 6. Гидропривод служит только для опускания и подъема матрицы; во время воздействия на матрицу ударной волны матрица удерживается над резервуаром клиновыми (или другой конструкции) запорами. Резервуар с водой и полость матрицы должны быть герметичными. Такая механизированная установка весьма производительна. Процесс электрогидравлической штамповки можно легко автоматизировать, и в этом его существенное преимущество.

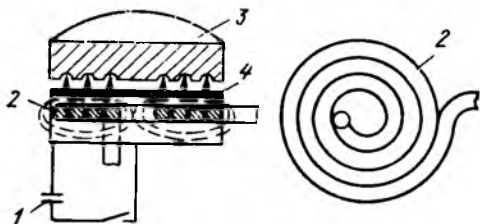


Рис. 12.14. Схема штамповки плоской заготовки:

1—конденсаторы; 2—плоский спиральный индуктор; 3—матрица; 4—заготовка

контуру другой, относятся: соединение концов труб, соединение труб с фитингами, запрессовка в трубы колец, заглушек, опрессовка наколенников на электроггутах, бандажирование, а также такие соединения, к которым предъявляются требования герметичности, обеспечения передачи осевых усилий или крутящих моментов. Большое равномерное давление на заготовку под воздействи-

ем магнитного поля дает возможность создавать такие соединения без дополнительных соединительных деталей и герметизирующих материалов.

В приведенных на рис. 12.13 схемах деформирование трубчатой заготовки, индуктор охватывает заготовку (обжим) или вставлен в нее (раздача). Однако так деформировать можно и плоские заготовки, для чего применяют не круглый, а плоский спиральный индуктор (рис. 12.14).

Определение необходимой для каждого отдельного случая штамповки накопленной в конденсаторах энергии производится также исходя из условий энергозатрат.

Если известны энергия A_d , расходуемая на пластическое деформирование заготовки, и к. п. д. установки, то, как и ранее, накопленная энергия $A_0 = A_d / \eta$.

К. п. д. электромагнитных установок не очень высок и зависит от разных факторов, в особенности от конструкции соленоида и электропроводности заготовки. При наиболее оптимальных условиях штамповки деталей из металла с высокой электропроводностью коэффициент η составляет 5...10%, а при штамповке материалов с низкой электропроводностью — 3...5%.

Для повышения эффективности использования энергии при электромагнитной штамповке можно сосредоточивать большее давление от магнитного поля в тех зонах заготовки, где необходима большая степень деформации. Для этого между заготовкой и соленоидом помещают дополнительно элемент — концентратор (также из токопроводящего материала). Профиль концентратора выполнен так, что обеспечивает меньший зазор между заготовкой и концентратором в тех местах, где требуется повышенное давление. Введение такого элемента позволяет концентрировать магнитный поток в определенных зонах заготовки и оставлять его ослабленным в других зонах, регулируя, таким образом, силовое поле в необходимом направлении. На рис. 12.15 иллюстрируется концентрация магнитного потока в двух зонах АА.

Для повышения эффективности использования энергии при штамповке материалов с низкой электропроводностью применяют

прокладки из материала с высокой электропроводностью («спутники»), которые также помещают между заготовкой и соленоидом. Магнитно-силовое поле воздействует на эту прокладку, а через нее, как через передающую среду, оказывает давление на заготовку. Такие материалы, как алюминий и его сплавы, медные сплавы, малоуглеродистые стали и другие материалы с удельным сопротивлением ниже 15 мкОм/см, штампуются без использования «спутников». При штамповке материалов с высоким сопротивлением — жаропрочных хромоникелевых сталей, титановых сплавов, неметаллических материалов — применяют прокладки из алюминиевых сплавов. Неметаллические материалы можно штамповать непосредственно, если на их поверхность нанести небольшой слой токопроводящего металла. Этот слой может сильно нагреваться, а при малой толщине даже испариться, но при правильном подборе электрических и технологических параметров деформирование заготовки может быть успешно произведено. Возможность соединения силового воздействия на заготовку с нагревом ее вихревыми токами до определенной температуры, увеличивающей пластичность металла, — преимущество описываемого способа.

Имеются также установки, действующие по принципу взаимодействия магнитных полей, возбуждаемых вокруг двух проводников, одним из которых является заготовка из токопроводящего материала. Максимальный силовой эффект при электромагнитной штамповке имеет место при минимальном зазоре между заготовкой и соленоидом, поэтому величину зазора подбирают только из условия обеспечения необходимой изоляции и удобства эксплуатации — установки заготовки и снятия детали, для чего достаточен зазор в 0,3 ... 0,5 мм.

Зазор между заготовкой и матрицей или пуансоном подбирают исходя из других условий. Здесь необходимо предусматривать зазор для разгона заготовки перед встречей с инструментом и для получения ею необходимого запаса кинетической энергии.

Мы коснулись лишь общих сведений быстро развивающихся высокоскоростных методов штамповки. Более подробно с этим перспективным направлением можно ознакомиться в специальной литературе [28, 37, 43].

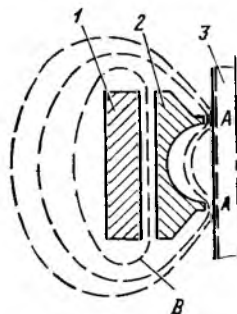


Рис. 12.15. Концентрация магнитного потока в двух зонах АА:

1—индуктор; 2—концентратор; 3—заготовка

12.4. ШТАМПОВКА В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

До сих пор мы сталкивались с деформационным упрочнением металла, т. е. с увеличением сопротивления деформированию с ростом холодной деформации. Упрочнение мы учитывали в основном линейной связью напряжений и деформаций $\sigma = \sigma_s' + \rho \epsilon$; в более

общем случае эта связь записывается степенной зависимостью $\sigma = A\epsilon^n$, где A и n — константы материала. При горячем деформировании при температурах выше температуры рекристаллизации металла деформационное упрочнение отсутствует ($n=0$ и $A=\sigma_s$). В этих условиях сопротивление деформированию становится чувствительным к скорости деформации $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$. Зависимость между σ и $\dot{\epsilon}$ записывается также степенной зависимостью $\sigma = A\epsilon^m \dot{\epsilon}^m$.

При совместном действии деформационного и скоростного упрочнения можно характеризовать свойства металла уравнением

$$\sigma = A\epsilon^n \dot{\epsilon}^m, \quad (12.21)$$

которое известно как уравнение состояния вязкопластического тела [18].

Упрочнение оказывает большое влияние на механизм деформирования; в частности, оно способствует выравниванию деформаций, устойчивому протеканию процесса. Чем более чувствителен металл к тому или другому упрочнению, тем больше степень его деформации без образования шейки.

При горячих процессах деформирования можно проследить влияние на пластичность металлов скоростного упрочнения, характеризуемого показателем m . Установлено, что при $m > 0,3$ деформация протекает устойчиво, особая чувствительность к скоростному упрочнению предотвращает локализацию деформаций, процесс протекает без заметной склонности к образованию развитой шейки. В сочетании с соответствующей температурой деформирования и мелкозернистой структурой исходного материала относительное удлинение при одноосном растяжении увеличивается с ростом показателя m , достигая 500...1000%.

Деформирование в условиях сверхпластичности — наглядный пример эффективного использования способности металла изменять сопротивление деформированию σ_s с изменением одного из параметров (в данном случае — скорости деформации), влияющих на протекание пластической деформации. Такое же стабилизирующее воздействие оказывает деформационное упрочнение, если оно заметно по ходу деформации увеличивает сопротивление деформированию (рис. 12.16, а). Чем больше угол β ($\operatorname{tg} \beta = P$ — модуль упрочнения), тем дольше удерживается устойчивая стадия деформирования, потому что, как только образуется шейка и деформация в ней будет увеличиваться, так вследствие повышения σ_s деформация в этой зоне будет приостанавливаться и перемещаться на соседние, менее деформированные участки. Это условие прекращения деформации в шейке при растяжении образца можно записать так:

$$\sigma_{sш}(\epsilon_{ш}) F_{ш} > \sigma_{sp}(\epsilon_p) F_p, \quad (12.22)$$

где $\sigma_{sш}$ — напряжение текучести в шейке, соответствующее деформации $\epsilon_{ш}$; $F_{ш}$ — площадь сечения в шейке; $\sigma_{sp} F_p$ — напряжение текучести и площадь сечения образца за пределами шейки, где деформация соответствует ϵ_p — равномерной стадии. Из диаграммы

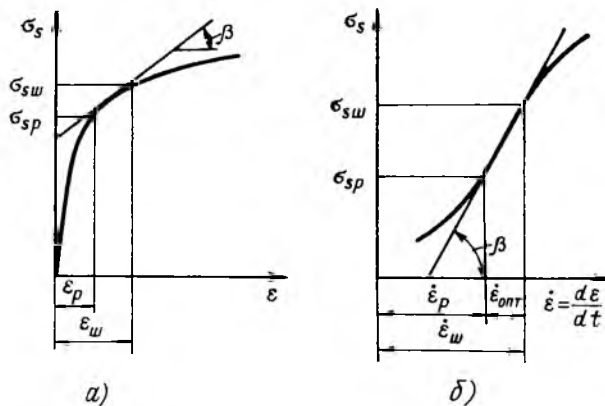


Рис. 12.16. Диаграммы, иллюстрирующие упрочнение металла в процессе пластического деформирования:

а—деформационное; б—скоростное

рис. 12.16, а видно, что $\epsilon_{sh} > \epsilon_p$, $\sigma_{sh} > \sigma_{sp}$, что и обеспечивает реализацию указанного неравенства при $F_{ш} < F_p$. Чем более чувствителен металл к упрочнению с ростом деформации, тем меньшая разница сечений $F_{ш}$ и F_p .

При описанном механизме холодного деформирования растяжение образца будет происходить как бы при блуждающей шейке, что дает возможность получать большие, без заметной локализации, деформации; уровень развития каждой шейки зависит от значения модуля упрочнения Π в заданном интервале деформаций. Интенсивно упрочняющиеся металлы, например хромоникелевые аустенитные стали, имеют относительное удлинение 40...45%, а весьма пластичные, но неинтенсивно упрочняющиеся алюминиевые сплавы — до 20%. Обеспечение больших деформаций за счет положительного влияния деформационного упрочнения не может быть достигнуто, так как интенсивность его, как видно из рис. 12.16, а, с ростом деформаций снижается и не может сдерживать локализацию деформации.

При деформировании в горячем состоянии превалируют разупрочняющие процессы, упрочнение металла или незначительно или вообще отсутствует, однако здесь в качестве стабилизирующего фактора выступает скоростное упрочнение (см. рис. 12.16, б). Упрощенно механизм деформации при растяжении образца в данном случае можно представить так: в начальный момент растяжения совершается некоторая равномерная по всей длине образца деформация; затем в ослабленном по той или иной причине месте образца образуется шейка, скорость деформации здесь начинает увеличиваться, что приводит к существенному упрочнению, к увеличению сопротивления деформированию, и как следствие этого к прекращению деформации в шейке. Деформироваться начинают соседние участки, ранее деформировавшиеся с меньшей скоростью

или вообще не деформировавшиеся. Условие перехода деформации из шейки на соседние участки, обеспечивающее деформирование при блуждающей шейке, можно записать так:

$$\sigma_{sш}(\dot{\epsilon}_{ш}) F_{ш} > \sigma_{sp}(\dot{\epsilon}_p) F_p. \quad (12.23)$$

Разность между площадями сечений $F_{ш}$ и F_p или уровень развития шейки зависит от интенсивности скоростного упрочнения, характеризуемого наклоном прямой или касательной к кривой упрочнения (углом β на рис. 12.16, б); по аналогии с предыдущим случаем $\operatorname{tg} \beta = P'$ может быть назван *модулем скоростного упрочнения*. Естественно предположить, что наибольшую эффективность может обеспечить тот диапазон скоростей деформаций, в котором модуль P' имеет наибольшее значение. Для некоторых металлов этот диапазон является довольно узким и лежит в зоне малых скоростей деформаций.

В противоположность деформационному упрочнению скоростное упрочнение слабо зависит от величины деформации, что дает возможность при растяжении получать необычно высокую степень равномерной деформации.

Условия, при которых металл деформируется при такой высокой степени деформации, названы условиями или режимом *сверхпластичности*, а само явление — *сверхпластичностью*. Это явление реализуется при малых скоростях деформации, при температурах нагрева заготовок, несколько больших температуры начала рекристаллизации и при мелкозернистой структуре. В большинстве случаев деформирование в режиме сверхпластичности обеспечивает повышение на один порядок степени деформации и снижение, тоже на один порядок, сопротивления деформированию [25].

Существенными преимуществами штамповки листовых деталей в режиме сверхпластичности являются: низкое сопротивление деформированию, что дает возможность производить формоизменение давлением аргона при $q = 3 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^3$ ГПа на специальных установках (рис. 12.17) (этот способ получил название пневмотермической формовки); прессовое оборудование может быть маломощным; высокая степень предельной деформации обеспечивает изготовление деталей при меньшем числе операций; обеспечивается штамповка деталей более рациональной конструкции, которые трудно или вообще невозможно получить традиционными способами. К особо важным достоинствам относится возможность совмещения формоизменения деталей и их соединения диффузионной сваркой, так как режимы этих процессов для некоторых металлов совпадают. В этом варианте может быть обеспечено создание более совершенных авиационных конструкций.

Режим сверхпластичности реализуется при следующих условиях: алюминиевый

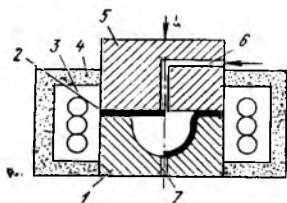


Рис. 12.17. Схема установки для пневмотермической штамповки детали в режиме сверхпластичности:

1—матрица; 2—заготовка; 3—нагревательное устройство; 4—теплоизоляция; 5—прижим; 6—канал для подачи воздуха; 7—дренажное отверстие

сплав АМг6 — $t=400 \dots 440^\circ \text{C}$, $\dot{\epsilon} = (2 \dots 5) \times 10^{-3} \text{ 1/с}$; магниевый сплав МА8 — $t=380 \dots 420^\circ \text{C}$, $\dot{\epsilon} = (2 \dots 8) \times 10^{-3} \text{ 1/с}$; сплавы на основе титана — $t=850 \dots 950^\circ \text{C}$ и $\dot{\epsilon} = (4 \dots 5) \times 10^{-4} \text{ 1/с}$; сопротивление деформированию составляет 6—12 МПа. Для хромоникелевых сталей температура деформирования составляет около 1000°C , а скорость деформаций $10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ 1/с}$ [18, 35].

Практическая реализация возможностей сверхпластичности в операциях листовой штамповки сопряжена с определенными трудностями. Выдерживание скоростей деформаций в определенном интервале приводит к тому, что при штамповке в инструментальных штампах необходимо регулировать по ходу процесса скорость перемещения плунжера прессы. Во многих случаях при формообразовании заданной заготовки в деталь нужных размеров соблюдение этого условия по всем зонам заготовки вообще невозможно, поэтому при штамповке конкретных деталей в отдельных частях заготовки деформирование идет с соблюдением режима сверхпластичности, а в остальных частях происходит обычное деформирование нагретой заготовки без соблюдения оптимальной скорости деформации. При такой сложной кинематике процесса, очевидно, необходимую скорость деформации надо обеспечивать в труднооформляемых или опасных зонах детали регулированием движения инструментов.

Режим ($\dot{\epsilon}$, t^0 и др.) сверхпластического деформирования отрабатывается при испытаниях образцов на одноосное растяжение или сжатие при равномерной стадии, когда несложно обеспечить по всей длине образца условие $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt = \text{const}$. Во всех других случаях, даже при выполнении элементарных операций (вытяжки, раздачи, отбортовки, формовки и др.), поле скоростей деформаций весьма сложно и необходимо ориентироваться при обеспечении режима сверхпластичности на опасные зоны и на те деформации, которые лимитируют возможности процесса. Например, при раздаче, отбортовке, при гибке профилей и полос «на ребро» опасной зоной является свободная кромка, где при деформациях растяжения, превышающих предельные, наступает локализация деформаций и разрыв; поэтому при штамповке в режиме сверхпластичности нужные скорости деформаций следует рассчитать и обеспечивать именно для этих зон.

Сущность кинематических расчетов заключается в определении закономерности изменения скорости движения инструмента при поддержании постоянной и оптимальной по величине скорости деформации в опасной зоне. Например, при раздаче трубчатой заготовки свободная кромка (опасная зона) подвергается растяжению (см. рис. 5.2). Деформация здесь ($R_x = R_0$) лимитирует степень формоизменения заготовки. Если принять вместо ϵ_i и $\dot{\epsilon}_i$ максимальные окружные ϵ_θ и $\dot{\epsilon}_\theta$, то для кромки

$$d\epsilon_\theta = \frac{dR_0}{R_0}; \quad \frac{d\epsilon_\theta}{dt} = \frac{1}{R_0} \frac{dR_0}{dt}; \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{1}{R_0} v_{R_0},$$

где v_{R_0} — скорость движения кромки в направлении радиуса.

Без учета утонения кромки заготовки скорость v_{R_0} ее движения определяем по формуле $v_{R_0} = v_{пл} r / R_0$ ($v_{пл}$ — скорость перемещения плунжера прессы). Тогда

$$\dot{\varepsilon}_\theta = v_{пл} r / R_0^2.$$

Решая это уравнение относительно $v_{пл}$ и имея в виду $\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta \text{ опт}}$, получим

$$v_{пл} = \dot{\varepsilon}_{\theta \text{ опт}} R_0^2 / r. \quad (12.24)$$

Как видно из последнего уравнения, по мере увеличения при раздаче радиуса R_0 кромки заготовки скорость $v_{пл}$ плунжера должна также увеличиваться, если мы хотим сохранить $\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta \text{ опт}} = \text{const}$. В начальный момент раздачи, когда $R_0 = r$, скорость движения плунжера $v_{пл} = \dot{\varepsilon}_{\theta \text{ опт}} r$.

Если раздача производится на конусном пуансоне, то (см. рис. 5.3):

$$\dot{\varepsilon}_{\theta \text{ опт}} = \frac{v_{пл}}{\sin \alpha} \frac{r}{R_0^2} \quad \text{и} \quad v_{пл} = \frac{R_0^2}{r} \dot{\varepsilon}_{\theta \text{ опт}} \sin \alpha.$$

Более точно скорость перемещения кромки и скорость ее тангенциальной деформации $\dot{\varepsilon}_\theta$ может быть рассчитана с учетом изменения толщины стенки в очаге деформаций.

Давление q воздуха для необходимого формоизменения заготовки при пневмотермической формовке можно подсчитать, используя уравнение Лапласа.

Температура нагрева заготовки должна быть близкой к температурам фазовых превращений; оптимальный диапазон температур деформирования подбирается экспериментально.

Проявлению сверхпластичности способствуют не только температуры и скорости деформирования. Сверхпластичность зависит от внутреннего строения сплавов: не все металлы проявляют это свойство, а те металлы, которые обладают сверхпластичностью, проявляют ее не во всех состояниях внутреннего строения. Опытными установлено, что деформация в условиях сверхпластичности происходит главным образом за счет межкристаллитной деформации, чему способствует мелкозернистая структура исходных заготовок. Если обычные деформируемые металлы имеют размеры зерен 10 ... 100 мкм, то для штамповки в режиме сверхпластичности желательно размельчение зерен до размеров 1 ... 5 мкм [25, 38].

Деформирование в условиях сверхпластичности — сравнительно новое направление интенсификации операций листовой штамповки. Небольшой опыт реализации этих условий при выполнении некоторых операций свидетельствует о том, что устойчивое течение металла обеспечивает значительно большее формоизменение заготовки за одну операцию. Например, при отбортовке заготовок из сплава АМг6 достигается $k_{отб} = 0,16$ при окружном растяжении кромок отверстия $\varepsilon_{\theta \text{ кр}} = 525\%$, а из магниевых сплавов МА8 $k_{отб} = 0,063$ и $\varepsilon_{\theta \text{ кр}} = 1480\%$ [26]. Глубокие полости получаются формовкой.

Для штампов, работающих в условиях высоких температур, подбирают термостойкие материалы и смазки.

Реализация возможностей сверхпластичности в операциях листовой штамповки при определенных градиентах деформаций, напряжений, давлений, скоростей деформаций приводит к большим перепадам толщин деталей. Этот недостаток может быть частично устранен регулированием поля температур (в допустимом интервале), поля давлений, предварительной подготовкой структуры или профилированием заготовки.

В некоторых случаях процесс штамповки в режиме сверхпластичности может быть выгоден из-за уменьшения затрат на технологическое оснащение, однако производительность процесса невысока.

Более подробно с физической сущностью явления сверхпластичности и с практическим его применением можно ознакомиться в специальной литературе [4, 18, 25, 35].

12.5. ШТАМПОВКА С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМ НАГРЕВОМ

Мы неоднократно обращались к этому виду штамповки при анализе операций гибки, вытяжки, раздачи, обжима, формовки и др. Во всех случаях наблюдалось положительное влияние зонального нагрева заготовки, создающего переменное вдоль радиуса R_x заготовки сопротивление деформированию. Эффективность зонального нагрева объясняется разгрузкой опасного сечения, что дает возможность значительно увеличить формоизменение заготовки, достигаемое за одну операцию.

Дело в том, что любая, даже простейшая технологическая операция, совершается при неравномерном распределении напряжений и деформаций по площади заготовки. Эту мысль мы старались отделить по ходу изложения материала об основных операциях выделением на заготовке основного очага деформаций, где величина и распределение деформаций соответствует сущности и назначению операции, зоны передачи усилия в очаг деформаций и опасного сечения. В разных зонах различно и напряженно-деформированное состояние. Некоторые участки напряжены незначительно, и здесь нет опасности нарушения устойчивости пластической деформации; другие участки весьма нагружены, и здесь обязательно определяют сечение, где при недогрузке и неполном исчерпании ресурса пластичности других участков возникает реальная опасность потери устойчивости деформации, локализации ее и появления трещины или складки. Если к заготовке внешнее усилие прикладывается по одной из границ очага деформаций (см. табл. 1.1), то здесь и образуется опасное сечение, так как через него передается усилие максимального значения, необходимое для деформирования всего очага деформаций (от r до R для вытяжки). Через сечение, определяемое радиусом R_x , передается только некоторая доля усилия, необходимая для деформирования лишь части очага деформаций от R_x до R . Чем ближе сечение к свободной кромке, тем меньше уси-

лие передается через него для деформирования последующих участков. Показатели сопротивления деформированию по всему очагу деформаций одинаковы, а если учесть упрочнение, то с приближением к свободной кромке сопротивление деформированию даже увеличивается. Следовательно, проведение процессов при неизменном или, еще менее желательно, увеличивающемся сопротивлении деформированию не способствует проявлению возможностей операций, при этом необоснованно перегружается опасное сечение и ограничивается формоизменение заготовки. При таком режиме передача от сечения к сечению деформирующего усилия осуществляется нерационально. Сопротивление деформированию должно уменьшаться от начального сечения очага деформаций, где приложено внешнее усилие, к свободной кромке. Тогда $\sigma_{q\max}$ в опасном сечении любой операции, данной в классификации (см. табл. 1.1), будет уменьшено, опасное сечение — разгружено и вследствие этого можно увеличить формоизменение заготовки.

Распределение напряжения в очаге деформаций при дифференцированном нагреве заготовки можно упрощенно определить, если задать закономерность изменения σ_s по R_x . Так, если для вытяжки в идеальных условиях ($\mu=0$; $P=0$; $\sigma_{изг}=0$)

$$\sigma_p = \sigma_s \ln(R/R_x); \quad \sigma_{q\max} = \sigma_s \ln(1/m), \quad (12.25)$$

то, приняв $\sigma_s = \sigma_{s0} r/R_x$ и решив уравнение равновесия (4.5) совместно с уравнением пластичности в виде $\sigma_q - \sigma_0 = \sigma_{s0} r/R_x$ (σ_{s0} — сопротивление деформированию в начальном сечении очага деформаций), получим [31]:

$$\sigma_q = \sigma_{s0} (r/R_x - r/R_n); \quad \sigma_{q\max} = \sigma_{s0} (1 - r/R_n). \quad (12.26)$$

В последнем случае $\sigma_{q\max}$ меньше, чем при обычной вытяжке.

В общей постановке при штамповке с дифференцированным нагревом в очаге деформаций заготовки должно выполняться не только условие пластичности, но и дополнительное условие: каждое сечение должно быть способно передать необходимое усилие для деформирования последующих участков очага деформаций, т. е. условие некоторой равнопрочности заготовки, ее неразрушаемости.

В машинах и сооружениях условие равнопрочности выполняется изменением площади сечений отдельных элементов; в наших условиях снятие опасных зон возможно только изменением сопротивления деформированию σ_s . И, как следует из уравнений (12.26), для вытяжки в идеальных условиях благодаря изменению σ_s по R_x имеются реальные предпосылки существенной интенсификации операции: для предельного случая, когда $\sigma_{q\max} = \sigma_{s0}$, имеет место $m=0$. В реальных условиях при вытяжке цилиндрических деталей с дифференцированным нагревом достигаются на алюминиевых сплавах коэффициенты вытяжки 0,33...0,37; на магниевых сплавах — 0,25. Особенно эффективен данный способ при вытяжке коробчатых деталей. Экспериментально установлено, что в этом случае показатели технологических возможностей не зависят от радиусов r_y закругления стенок коробчатых деталей. При вытяжке

квадратных и прямоугольных деталей из сплава Д16М возможно получать за одну операцию предельные высоты $H = (1,5 \dots 1,9)A$ (A — размер стороны детали) при $r_y = 0,05 \dots 0,5 A$ [17].

При выполнении обжима с дифференцированным нагревом возможно достижение $k_{об} = 0$.

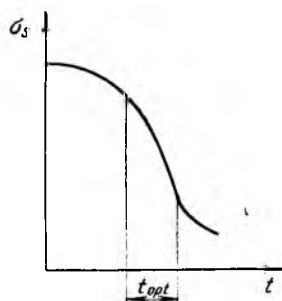


Рис. 12.18. Зависимость предела текучести материала от температуры испытаний

Распределение по очагу деформаций нужным образом сопротивления деформированию σ_s достигается соответствующим распределением температур нагрева заготовки. Для алюминиевых сплавов наиболее приемлемым способом нагрева является нагрев заготовок от инструмента, на котором создается необходимое поле температур. Для этих сплавов наибольшая возможная температура нагрева составляет $450 \dots 470^\circ \text{C}$; при такой температуре инструментальные стали проявляют удовлетворительную стойкость. Во многих случаях для создания необходимого перепада температур требуется сочетать нагрев в одних зонах и охлаждение в других. При небольших размерах очага деформаций обеспечение требуемого перепада вызывает определенные трудности вследствие выравнивания (из-за теплопроводности) температур на штампах. Поэтому диапазон температур нагрева следует выбирать на основе диаграммы $\sigma_s = f(t^\circ)$. Оптимальным диапазоном может считаться тот, в котором наиболее интенсивно с изменением температур изменяется сопротивление деформированию σ_s (рис. 12.18). Верхний предел нагрева ограничивается возможным укрупнением зерна металла; при назначении нижнего предела не следует ориентироваться на низкие температуры, так как это вызывает технические трудности, а эффективность невелика: при небольших температурах нагрева незначительно изменяется σ_s . Для алюминиевых сплавов диапазон $300 \dots 450^\circ \text{C}$ может оказаться достаточным для получения эффективных результатов. Напряжение текучести σ_s при $t = 300^\circ \text{C}$ равно примерно 120 МПа, при $t = 450^\circ \text{C}$ — приблизительно 30 МПа; тогда в опасном сечении $\sigma_s = 120$ МПа, в очаге деформаций $\sigma_s = (120 + 30)/2 = 75$ МПа. Эффективность такого перепада вполне очевидна и количественно может быть определена коэффициентом вытяжки по уравнению (4.36), коэффициентом обжима — по уравнению (7.17) и др.

Интенсификация операций листовой штамповки применением дифференцированного нагрева заготовки выгодно отличается от других направлений (уменьшение сил контактного трения, сопротивления изгиба и др.) тем, что здесь не только возможно увеличение степени деформации за счет некоторой разгрузки очага деформаций, но и вообще возможна штамповка без образования опасных зон (в операциях, в которых лимитирующим фактором является σ_{Qmax}).

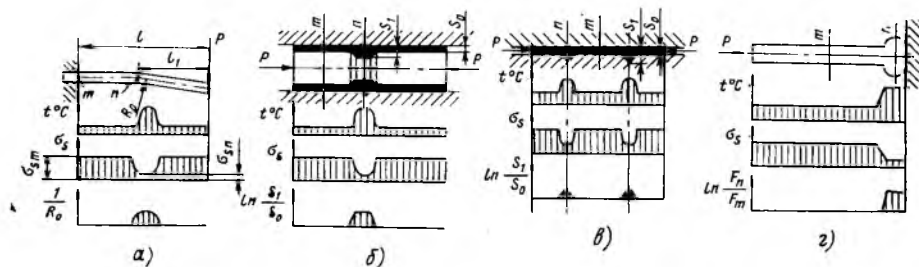


Рис. 12.19. Штамповка с местным нагревом:

а—гибка; б—набор материала на трубе; в—набор материала на листовой заготовке; г—то же, на прутке

В совмещенных процессах, где внешние силы прикладываются к обеим границам очага деформаций, возникают две опасные зоны, так как с двух сторон очага действуют напряжения $\sigma_{0\max}$, которые могут привести к нарушению устойчивости процесса. В данном случае применение дифференцированного нагрева оказывается еще более эффективным. Здесь интенсивному разупрочнению должна быть подвергнута только центральная часть очага деформаций, в то время как на границах металл должен быть прочнее. Пример рационального распределения температур показан на рис. 11.1 применительно к совмещенному процессу вытяжки с обжимом.

Дифференцированный нагрев в ряде операций может способствовать образованию очага пластической деформации в той зоне, где это необходимо. На рис. 12.19 показаны варианты местного нагрева с целью получения требуемой деформации в нужном месте заготовки. Исходя из конкретной схемы нагружения заготовки могут быть рассчитаны силовые параметры и перепад σ_s . Так, для гибки без учета упрочнения металла будем иметь для стадии, близкой к начальной (рис. 12.19, а), изгибающие моменты внешних и внутренних сил в сечениях m и n

$$Pl = \sigma_{sm}Bs^2/4; Pl_1 = \sigma_{sn}Bs^2/4.$$

Заготовка будет изгибаться одновременно в точках m и n при равенстве $l/\sigma_{sm} = l/\sigma_{sn}$, а чтобы кривизна образовалась только в сечении n , должно выполняться условие

$$\sigma_{sm} < \sigma_{sn}l_1/l, \quad (12.27)$$

На рис. 12, а показана эпюра кривизны заготовки. То обстоятельство, что концевые участки остаются прямолинейными без применения дополнительных средств (кроме создания перепада σ_s) является подтверждением эффективности применения местного нагрева. Этот метод используется в станках для гибки профилей и труб.

Для других случаев условием местной деформации должно быть:

$$\sigma_{sn} < \sigma_{sm}F_m/F_n. \quad (12.28)$$

Подобное условие используется в электровысадочных станках, в станках для штамповки концов труб и др.

Штамповка с дифференцированным нагревом — развивающееся и прогрессивное направление в листовой штамповке. Более подробно с этим методом можно ознакомиться по работам [9, 17, 32].

12.6. РОТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

Ротационные методы деформирования относятся к поэлементной штамповке, когда в широтном направлении деформирование происходит не одновременно, а постепенно, путем локальной деформации вращающейся заготовки роликом или давилником другой формы. Наибольшее распространение ротационные методы получили для выполнения операций вытяжки, раздачи, обжима, отбортовки и др. Достоинством этих методов является то, что небольшим усилием можно произвести пластическое деформирование больших объемов металла, можно изготавливать крупногабаритные детали, имеющие форму тел вращения, при сравнительно несложной оснастке. Для осуществления процесса требуется только пуансон, а роль матрицы играет универсальный давящий инструмент.

На рис. 12.20 показана вытяжка на токарно-давилном станке конической детали из круглой плоской заготовки. Заготовка 2 совмещается своим центром с осью шпинделя станка и прижимается к пуансону 1 прижимом 3, установленным в задней бабке 4; пуансон закреплен в патроне 6 станка. При включении станка пуансон, заготовка и прижим начинают вращаться; под действием усилия, передаваемого через давилник 5, заготовка начинает прижиматься к пуансону.

Давилник перемещается вдоль образующей пуансона. Усилие P давилника раскладывается на нормальную составляющую Q и усилие подачи T , действующее вдоль образующей оправки. Пунктиром показано положение заготовки на разных стадиях обработки. По мере деформирования заготовка, уменьшаясь в диаметре, становится стенкой детали, что напоминает операцию вытяжки. Отличительной особенностью выдавливания является деформирование заготовки не по всей площади фланца, как это имеет место при вытяжке, а вытягивание ее в каждый данный момент лишь на узком участке (секторе) в зоне действия усилия P , передаваемого давилником. При вращении этот очаг деформаций перемещается, обегая всю окружность за один оборот пуансона.

Пластическая деформация под воздействием давилника распространяется по винтовой линии с небольшим шагом, который равен здесь величине подачи, что

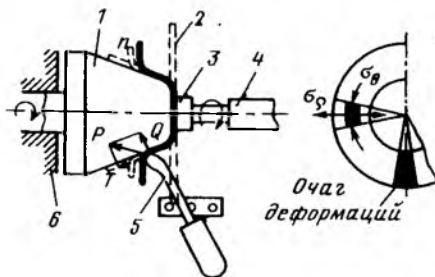


Рис. 12.20. Схема вытяжки на токарно-давилном станке:

1—пуансон; 2—заготовка; 3—прижим; 4—задняя бабка; 5—давилник; 6—патрон станка

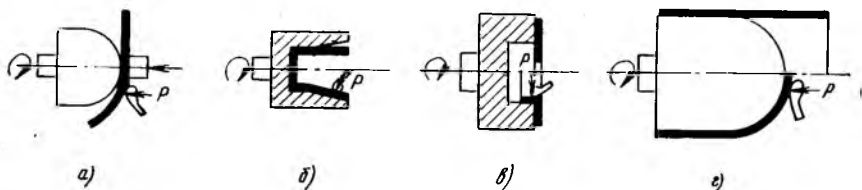


Рис. 12.21. Варианты ротационной штамповки:

а—вытяжка; б—раздача; в—отбортовка; г—обжим

обеспечивает постепенное возрастание стенки детали, прилегающей к оправке, за счет уменьшения диаметра заготовки, т. е. за счет перемещения металла из фланца. В тангенциальном (окружном) направлении происходит деформация сжатия ϵ_θ , в радиальном (перидиальном) — деформация растяжения ϵ_r .

Напряжения в очаге деформации (фланце) имеют те же, что и деформации, знаки ($+\sigma_r$ и $-\sigma_\theta$); соотношения этих напряжений определяют знак деформации по толщине заготовки. Однако толщина стенки детали зависит не только от соотношения напряжений σ_r и σ_θ , но в большей степени определяется нормальным давлением, создаваемым усилием P давяльника. Неумелое ведение процесса, сильное нажатие давяльника на заготовку может вызвать столь большое утонение стенки, что это не только устранило утолщение, полученное стенкой в результате уменьшения фланца, но может так уменьшить стенку, что она станет значительно тоньше исходной заготовки. Деформирование в данном случае совершается при объемном напряженном состоянии.

Выдавливание на токарно-давяльных станках применяется в мелкосерийном и опытном производствах, в особенности при запуске таких полых деталей, как обтекатели, детали передних и задних отсеков подвесных топливных баков, днищ баков, деталей воздухопровода реактивных двигателей и др. На токарно-давяльных станках при использовании разборной оправки можно изготавливать детали с выпукло-вогнутой образующей, детали, сужающиеся к открытой части, которые невозможно изготовлять вытяжкой в инструментальных штампах.

Аналогом вытяжки с утонением является ротационное выдавливание (см. рис. 10.3); раздачи — развальцовка (см. рис. 5.6, б). На рис. 12.21 показаны другие варианты ротационной штамповки. Следует отметить, что деформирование с локальным, перемещающимся очагом деформаций обеспечивает во многих случаях большую степень формоизменения заготовки, чем при обычных способах. Так, при обжиме труб достигается полное закрытие дна, что используют при изготовлении баллонов различного назначения и размеров, крупногабаритных днищ и др. Увеличенные возможности операций обуславливаются большей устойчивостью малого локального очага деформаций, окруженного недеформирующимся металлом.

Большим преимуществом ротационных методов является выигрыш в силовом режиме. Сравнительно небольшим усилием давилльников, роликов или валков при небольших размерах очага деформаций изготовляют крупногабаритные, толстостенные детали. Гибка прокаткой на роликовых или валковых станках является также разновидностью ротационных методов.

Режимы деформирования подбирают большей частью опытным путем. Чем толще заготовка и прочнее металл, тем меньшие применяют окружные скорости и подачи.

Ротационные методы применяют в большом разнообразии вариантов для изготовления широкой номенклатуры деталей. Более подробно с этим видом штамповки можно ознакомиться в трудах [10, 19].

ГЛАВА 13

ШТАМПОВКА ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНЫХ ФОРМ

13.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К деталям сложных форм мы отнесем все детали, не имеющие осевой симметрии. Это можно объяснить тем, что более или менее стройная теория операций листовой штамповки касается лишь осесимметричных деталей, при штамповке которых напряжения и деформации являются функцией лишь одной координаты (в нашем случае — R_x). При отсутствии осевой симметрии напряжения σ_θ и σ_ϕ становятся зависимыми не только от R_x , но и от угла θ поворота этого радиуса. При таком распределении напряжений по очагу деформаций дифференциальное уравнение равновесия получается в частных производных и решение его совместно с уравнением вызывает определенные трудности.

Анализ операций применительно к сложным деталям базируется чаще всего на разбиении очага деформаций на отдельные зоны с последующим рассмотрением каждой зоны отдельно при соблюдении условий на границах с другими зонами. Мы уже встречались с таким приемом при анализе вытяжки коробчатых прямоугольных деталей (см. разд. 4.6), где весь очаг деформаций мы разделили на участки (угловые), где совершается вытяжка, и на участки, лежащие против прямолинейных зон контура детали, где совершается гибка на ребре матрицы при переходе заготовки из фланца в стенку детали.

Наиболее трудным даже при упрощенном рассмотрении штамповки сложных деталей является определение формы и размеров заготовки. Вместе с тем только при знании формы и размеров детали и заготовки можно намечать зоны с различным напряженно-деформированным состоянием, характерным для той или другой элементарной операции. Общий подход к анализу механизма деформирования при штамповке сложных деталей в большинстве случаев базируется на закономерностях элементарных операций, отнесенных к отдельным участкам сложного очага деформаций.

Учитывая то обстоятельство, что данная тема в общем виде не рассматривалась и умение штамповать сложные детали различных типовых форм базируется в основном на накопленном экспериментальном материале и производственном опыте, дадим здесь лишь весьма ориентировочные рекомендации по последовательности решения поставленной задачи:

— на основе размеров детали определяется примерная форма и размеры заготовки; если заготовка выбирается плоской, тогда деталь как бы выкладывается или развертывается на плоскость; если заготовка выбирается пространственной формы, то определяется ее форма и примерные размеры; в некоторых случаях может быть приемлем способ определения размеров заготовки как развертки по отдельным сечениям;

— сравниваются контуры детали в плане с противолежащими контурами заготовки, форма контуров (дуги окружности, прямые линии, лекальные кривые, эквидистантность, выпуклость, вогнутость и др.);

— в общем очаге деформации намечаются участки с различными условиями деформирования; границы отдельных участков могут совпадать с точками, в которых изменяется характер очертаний контуров детали и заготовки;

— основываясь на знании элементарных операций и ориентируясь на их признаки, приведенные в табл. 1.1, определяются операции, которые будут реализованы в намеченных участках очага деформаций;

— производятся примерные расчеты сил, моментов, предельных возможностей, уточняется контур заготовки, определяется число операций, возможное пружинение и др.; при необходимости определяются примерные контуры промежуточных переходов.

Естественно, не во всех случаях такая последовательность может быть приемлема. Нельзя обольщаться тем, что, следуя описанной методике, можно сразу, без последующей корректировки, спроектировать реальный технологический процесс. Для более качественных разработок необходимо привлечение опытного материала, обобщенных данных по различным группам сложных деталей.

К сложным деталям в самолетостроительном производстве можно отнести: полупатрубки, зализы, детали нервюр и шпангоутов, панели, люки, двери и их окантовки и др.; сюда же можно отнести некоторые группы осесимметричных, но сложных по форме деталей: конические, ступеньчатые, с широкими фланцами и др.

Ниже мы приведем некоторые примеры анализа и построения переходов применительно к отдельным группам деталей.

13.2. ШТАМПОВКА ПОЛУПАТРУБКОВ

Воздушные и газовые бортовые системы низкого давления включают трубопроводы средних и больших размеров, изготовление которых во многих случаях производится штамповкой двух половин (полупатрубок) с последующей их сваркой.

На рис. 13.1 показана простейшая конструкция криволинейного полупатрубка и схема штампа для его изготовления из плоской заготовки. Примерная развертка поверхности его на плоскость дает заготовку в виде сектора кольца; два криволинейных контура ее R_1 и R_2 являются эквидистантными контурам R_1' и R_2' полупатрубка в плане, а прямолинейные — лежат в плоскостях торцовых срезов. Предположим, что патрубок изогнут по дуге окружности и все могут быть заданы радиусами. Тогда радиус R_{rp} , совпадающий с осью патрубка, разделяет очаг деформаций заготовки на два участка, в которых будут разные схемы напряженного и деформированного состояния при формообразовании из нее детали. На участке I от R_{rp} до R_1 внешнее усилие P приложено по внутреннему контуру (R_{rp})

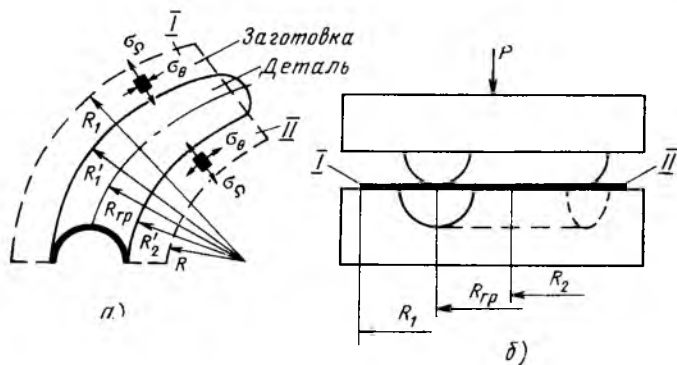


Рис. 13.1. Криволинейный полупатрубок (а) и схема его штамповки (б):

I—участок вытяжки; II—участок отбортовки

и имеет знак растяжения. Радиус R_1 при формообразовании будет уменьшаться и совпадет в конечной стадии с радиусом R_1' ; здесь возникнут напряжения $+\sigma_\theta$ и $-\sigma_\theta$. Как следует из описания, при штамповке заготовки на участке I возникнет операция вытяжки.

На участке II от R_2 до $R_{гр}$ деформирование будет производиться тем же усилием растяжения P , приложенным по контуру $R_{гр}$, который для данного участка является внешним контуром. Контур R_2 заготовки в процессе формоизменения будет увеличиваться и в конечной стадии совпадает с контуром R_2' детали. В очаге деформации участка II возникнет двустороннее растяжение $(+\sigma_\theta \text{ и } +\sigma_\theta)$, характерное для операции отбортовки.

Далее, зная конкретные размеры и материал детали и примерные размеры заготовки, можно сделать расчеты необходимого усилия, предельных деформаций, уточнить размеры заготовки. На участке I следует опасаться гофрообразования и необходимо предусмотреть прижим; на участке II возможен разрыв кромки. Вполне очевидно также, что при свободном формообразовании заготовки участок II будет перемещаться в матрицу быстрее, чем участок I, в силу того, что площадь его меньше и он окажет меньшее сопротивление. Чтобы создать условия для равномерного движения в полость матрицы участков I и II, следует уравновесить их сопротивления движению, для чего участок II можно придерживать прижимом или дать здесь припуск на заготовке для увеличения сопротивления путем увеличения объема металла, подвергаемого пластической деформации. Эта задача может быть решена соответствующим расчетом баланса работ.

С учетом конкретных данных о материалах деталей и их размерах, об объеме и масштабе производства можно исходя из экономических соображений определить метод их производства: в инструментальных штампах, на листоштамповочных молотах в свинцово-цинковых штампах или резиной на гидропрессах.

На рис. 13.2 показан более сложный полупатрубок — с отводом. Здесь намечается уже три зоны: I — вытяжка, II — отбортовка, III — гибка. Наиболее опасным здесь может быть участок II: при небольшом радиусе R_2' детали и достаточном удалении контура R_2 заготовки на этом участке свободная кромка при формообразовании детали может испытывать большие деформации в тангенциальном направлении с образованием трещин. Деформация ϵ_θ кромки определяется формулой

$$\epsilon_{\theta_{кр}} = (R_2' - R_2) / R_2 = R_2' / R_2 - 1.$$

Если $\epsilon_{\theta_{кр}}$ будет больше предельной деформации, допускаемой при отбортовке, то принимают меры к торможению движения кромки за счет припуска, за счет увеличения ширины этого участка (прибавляются участки II', см. рис. 13.2). Если припуск II' будет большой по площади, то характер деформирования на участке II и III существенно изменится. Вместо отбортовки и гибки здесь может возникнуть новый и единый очаг деформаций — формовка. В этом случае кромка во время формообразования может оставаться на месте или передвигаться на небольшую величину, а оформление контура детали произойдет за счет утонения материала, т. е. увеличения площади заготовки.

13.3. ШТАМПОВКА ЗАЛИЗОВ

На рис. 13.3, а показана конструкция зализа, закрывающего стыки, например кили (стабилизатора) с фюзеляжем; одна часть его (верхняя) присоединяется

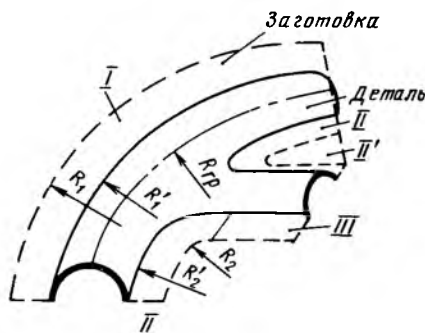


Рис. 13.2. Криволинейный полупатрубок с отводом:

I—участок вытяжки; II—участок отбортовки; II'—возможный припуск заготовки; III—участок гибки

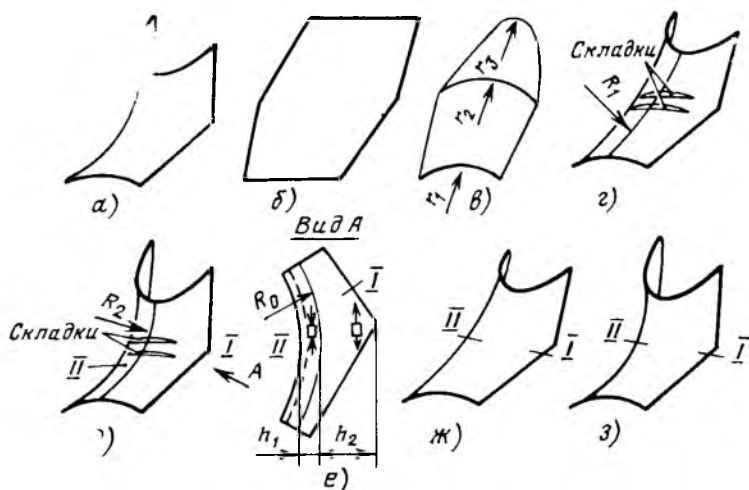


Рис. 13.3. Стадии изготовления зализа:

а—конструкция зализа; б—примерная форма заготовки; в—первая стадия штамповки заготовки; г, д—вторая стадия штамповки; е—характер деформаций в зонах I и II при второй стадии штамповки; ж, з—наиболее рациональные промежуточные формы зализа

к каркасу киля, другая (нижняя) к каркасу фюзеляжа. Для примерного определения формы заготовки необходимо сделать развертку по нескольким поперечным сечениям и по плоскости симметрии; ориентировочные контуры ее показаны на рис. 13.3, б.

Формоизменение плоской заготовки в деталь указанной формы в данном случае сопровождается совмещенным процессом гибки, когда при штамповке образуется и поперечная и продольная кривизна. Этот процесс может быть представлен по стадиям: на первой создается переменная поперечная кривизна с радиусами r_1, r_2, r_3 (см. рис. 13.3, в), а на второй — полученному профилю придается продольная кривизна с последовательным оформлением по радиусу R_1 и R_2 (см. рис. 13.3, г и д). Вполне очевидно, что на первой стадии деформирование не должно сопровождаться потерей устойчивости или разрывами, потому что гибка ведется при большом относительном радиусе. На второй стадии, при образовании продольной кривизны, гибке подвергается сложный профиль переменного сечения по некоторому среднему радиусу R_0 — нейтральной поверхности (см. рис. 13.3, е); заготовка по разные стороны нейтрального слоя подвергается растяжению на выпуклой стороне и сжатию — на вогнутой. Возникает реальная опасность разрыва и образования складок.

При совмещенном образовании поперечной и продольной кривизны достаточно изготовить два штампа с промежуточной более плавной формой поверхности и с окончательной формой (см. рис. 13.3, ж и з). Однако при этом расположение опасных зон I и II сохраняется. Очевидно, в зоне I большой припуск давать нельзя, так как с увеличением припуска (h_2 на рис. 13.3, е) в этой зоне увеличивается деформация растяжения и возможен разрыв кромок. Кроме того, при увеличении h_2 радиус R_0 возрастает, вследствие чего увеличивается расстояние h_1 от нейтрального слоя до внешней вогнутой поверхности, что может вызвать более интенсивное гофрирование.

Детали типа зализов обычно штампуют на листоштамповочных молотах, поэтому, чтобы облегчить формоизменение заготовки в штампах упрощенной конструкции, параллельно производят разводку зоны I на выколочных молотах, посадку гофров, подрезку припусков, чередуя использование доводочного оборудования и штамповку на свинцово-цинковых штампах.

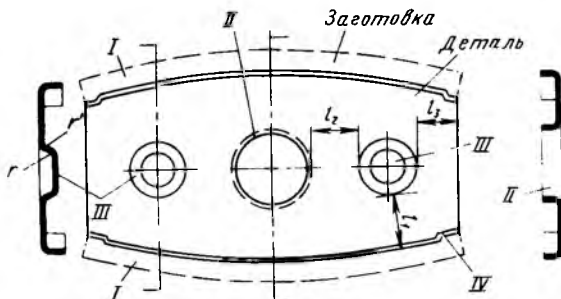


Рис. 13. 4. Конструкция нервюры:

I—участки вытяжки; *II*—участок отбортовки; *III*—участок формовки; *IV*—участок подсечки

13.4. ШТАМПОВКА ДЕТАЛЕЙ НЕРВЮР

Детали нервюр, шпангоутов, стенок лонжеронов, диафрагм, перегородок, не смотря на сравнительную несложность их форм, имеют в разных участках различные схемы напряженно-деформированного состояния. При штамповке стенки нервюры, показанной на рис. 13.4, реализуются в разных участках такие операции: *I* — вытяжка, *II* — отбортовка, *III* — формовка, *IV* — подсечка. Следовательно, при проектировании или перед изготовлением таких деталей следует сравнить получающиеся деформации с допустимыми, определить деформирующие силы по участкам и общее усилие, выбрать метод штамповки и наметить конструкцию штампа. Как указывалось выше, детали такой конструкции обычно штампуют резиной или полиуретаном; в этом случае необходимо проверить возможность оформления всех конструктивных элементов давлением q , создаваемым в контейнере гидропресса.

Наиболее типовым недостатком штамповки эластичными средами является пружинение и неполное предотвращение складкообразования, что обуславливает необходимость ручной доводки до окончательной формы и размеров. Для предотвращения искажения формы за счет пружинения необходимо доработать оснастку на величину упругой деформации, используя при малой кривизне бортов уравнивания, полученные для операции гибки (при расчете углов $\Delta\varphi$ пружинения). Пределные возможности штамповки исходя из устойчивости заготовки достаточно подробно рассмотрены в разд. 12.1.

Подсечки на краях нервюры обеспечивают подсоединение ее на одном уровне с поясом лонжерона. Здесь также следует доработать штамп с учетом пружинения и, если необходимо, предусмотреть установку в этих зонах дополнительных наклонных направляющих для увеличения давления q со стороны пластической массы.

Отбортованное отверстие и глухая выштамповка служат элементами жесткости; сквозное отверстие используется также для проводки коммуникаций. Необходимо проверить достаточность давления q для оформления малых радиусов r и r' сопряжения отдельных частей выштамповок (см. рис. 13.4). На участках *III* формовки необходимо определить достаточность размеров l_1 , l_2 и l_3 , чтобы предотвратить деформацию краев нервюры или отбортованного отверстия. Сравнивая площадь заготовки и выштамповки, следует рассчитать возможное утонение и сверить его с допускаемым по чертежу.

Как правило, геометрические размеры различных конструктивных элементов на стенках нервюр и шпангоутов определяются при их проектировании из расчета возможности штамповки на имеющемся оборудовании с контейнером определенных размеров и с известным давлением эластичной среды внутри его. Все перечисленные расчеты поэтому должны быть выполнены заранее, до поступления чертежей в штамповочный цех.

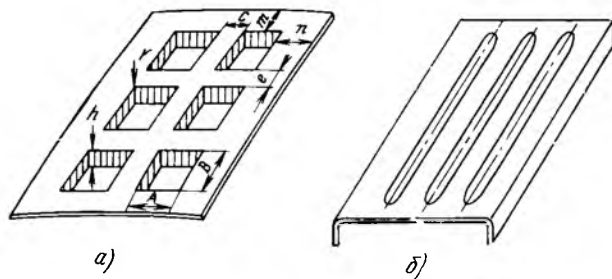


Рис. 13.5. Конструкция ячеистых панелей

13.5. ШТАМПОВКА ЯЧЕИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ

На рис. 13.5 показана ячеистая панель, которая закрывается внутренней и внешней обшивками и представляет собой как бы внутренний наполнитель, придающий панели жесткость. Такая конструкция применяется для створок люков, дверей и др.

Конструктивно деталь представляет собой лист, имеющий сложную поверхность двойной кривизны (повторяет внешний обвод определенной зоны планера), в котором выполнен ряд глухих полостей (ячеек) с размерами и частотой, определяемой размерами готовой панели и эксплуатационными требованиями по жесткости и прочности. С технологической точки зрения размерами, существенно влияющими на процесс штамповки детали, являются радиусы r скругления стенок полостей, их высоты h , размеры A и B полостей в плане, величина перемычек c и e между полостями, а также расстояние m полостей от краев деталей; важны также некоторые относительные размеры: h/r , e/A , e/B , r/s , h/s .

Здесь мы не можем рассматривать каждую полость отдельно и развернуть ее на плоскости с тем, чтобы определить размеры заготовки. Заготовка в данном случае должна быть определена для всей детали. Изготовление такой детали происходит в основном формовкой, так как все полости будут образовываться за счет увеличения площади заготовки и уменьшения ее толщины; подача материала в полости с краев заготовки затрудняется тем, что движение кромки будет затормаживаться участками, лежащими против перемычек между полостями.

При определении ширины и длины заготовки здесь правомочен такой подход:

— если перемычки m на краях детали имеют такой размер, который исключает движение кромки при формовке полостей, то габаритные размеры заготовки можно принять близкими к окончательным размерам детали с учетом лишь не точной фиксации заготовки на штампе. Примерным критерием этого может служить равенство $n \approx 3A$; $m \approx 3B$;

— если перемычки $n < 3A$ или $m < 3B$, то на участках заготовки, расположенных против полостей, возможно перемещение края заготовки (см. рис. 13.5. а), и в этом случае от края детали до края заготовки необходимо дать припуск не менее $0,5A$.

При штамповке в холодном состоянии допустимая высота полости $h = (0,4 \dots 0,5)r$ (алюминиевые сплавы). С уменьшением внутренних перемычек c и e технологические возможности операции формовки снижаются. Перемычки c и e являются зонами передачи усилия, и здесь при большой высоте полостей возможно образование трещин. На участках заготовки, расположенных против закруглений стенок полостей, будут образовываться складки, которые необходимо выправлять в процессе штамповки или в штампе предусматривать прижим.

В силу сложности форм подобные детали с глубокими полостями штампуют в упрощенных свинцово-цинковых штампах на листоштамповочных молотах или на электрогидравлических установках; при неглубоких полостях детали штампуют резиной.

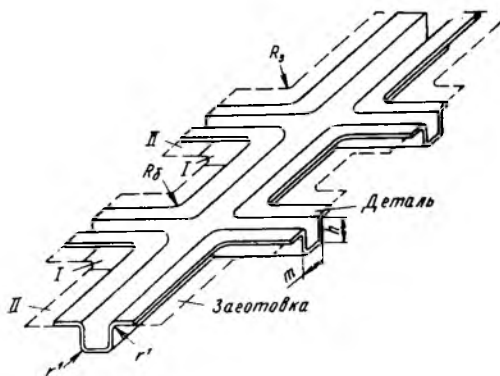


Рис. 13.6. Конструкция крестовины:
I—участки отбортовки; II—участки гибки

На рис. 13.5,б показана пакель с ячейками в виде рифтов, являющимися элементами жесткости. Такие рифленые панели применяют в силовом внутреннем наборе планера, в частности в заливных отсеках. При штамповке таких деталей реализуется операция формовки; боковые борта образуются гибкой. При штамповке рифтов возможны деформации на краях заготовки, поэтому изготовление деталей производится в два этапа: сначала на плоской заготовке штампуют рифты, а затем, после обрезки припуска, отгибают борта. Отметим сходство формовки рифтов с предыдущим случаем штамповки по влиянию на процесс отдельных конструктивных элементов: глубины рифтов, их радиусов, внутренних и внешних перемычек и др.

13.6. ШТАМПОВКА КРЕСТОВИН

Под таким условным названием имеются в виду каркасные детали (рис. 13.6), употребляемые в качестве подкрепляющих элементов для панелей различного назначения, в качестве элементов каркасов под остекление и др. При связи с наружным обводом планера форма их может иметь двойную кривизну, а размеры определяются назначением. На ход процесса штамповки наибольшее влияние оказывают радиусы r сопряжения крестовин, высота h ребер, ширина m профиля, а также радиусы r' изгиба профиля.

В данном случае следует развернуть деталь на плоскости; примерный контур заготовки показан на рис. 13.6. По всему очагу деформаций чередуются участки отбортовки I и участки гибки II. Однако расчет может показать, что $k_{отб} = k_3/k_6$ меньше допустимого значения, и тогда возможно образование трещин на участках I. В этом случае на участках I следует дать припуск, чтобы дополнительным сопротивлением затормозить движение кромки и произвести формообразование здесь частично отбортовкой, а частично формовкой. В результате проработки вариантов контура и размеров заготовки может оказаться, что наиболее приемлем такой вариант, когда формовка осуществляется не только на участке отбортовки I, но и на участке гибки II (см. рис. 13.6 справа).

Штамповка таких деталей производится на листоштамповочных молотах из упрощенных свинцово-цинковых литых штампах с включением ручной доработки, подрезки припуска, разводки и др.

13.7. ШТАМПОВКА СТУПЕНЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ

На рис. 13.7,а показана полая деталь ступенчатой формы; три ступени детали имеют диаметры d_1 , d_2 и d_3 . Для такой детали заготовка определяется из условия постоянства площади детали и заготовки, которая имеет форму круга диаметром D_0 . Формоизменение заготовки в деталь будет совершаться вытяжкой, однако не одной операцией, а несколькими. Количество операций вытяжки определяется количеством ступеней детали, если отношения d_1/D_0 , d_2/d_1 и d_3/d_2

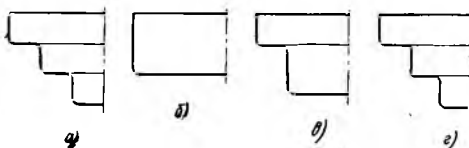


Рис. 13.7. Последовательность штамповки деталей ступенчатой формы:

а—деталь; б, в, г—промежуточные формы детали после первой, второй и третьей операций вытяжки

так как в этой операции производится набор материала и для третьей ступени. В третьей операции часть высоты переходит в третью ступень диаметром d_3 , причем величину хода ползуна нужно строго ограничивать, чтобы получить нужные значения высоты h_2 и h_3 (см. рис. 13.7, г). Вполне очевидно, что ошибки в величине хода ползуна скажутся на размерах h_2 и h_3 и могут привести к браку детали. Брак может быть и в том случае, если будет допущена ошибка в определении диаметра исходной заготовки. Если заготовка будет меньше необходимой, то одна из ступеней будет меньше требуемой; при излишнем материале — больше необходимой.

лежат в пределах допустимых коэффициентов m_1 и m_2 вытяжки. В первой операции вытягивается промежуточный полуфабрикат диаметром d_1 с высотой h_1' , которая больше высоты h_1 детали (см. рис. 13.7, б). Во второй операции вытягивается полуфабрикат диаметром d_2 , при этом величину хода ползуна нужно отрегулировать так, чтобы вытяжка прекратилась в тот момент, когда высота первой ступени будет равна h_1 (см. рис. 13.7, в). Высота h_2' второй ступени будет больше h_2 детали,

13.8. ШТАМПОВКА ДЕТАЛЕЙ КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Изготовление вытяжкой полых деталей конической формы затруднительно. Дело в том, что если плоскую заготовку проталкивать в полость матрицы коническим пуансоном, то между матрицей и пуансоном образуется большой зазор, на заготовку не будет воздействовать давление прижима, и она потеряет устойчивость: вдоль образующей детали возникнут складки. Наиболее рациональна в этом случае вытяжка многоступенчатой детали необходимой высоты с последующей калибровкой (рис. 13.8, а). Деталь перед калибровкой должна иметь неглубокие ступени, так как в противном случае ее трудно будет откалибровать и получить гладкую поверхность с прямолинейной образующей. Расчеты промежуточных форм детали, регулирование величины хода ползуна и определение размера заготовки отличаются в этом случае большой строгостью. Если площадь поверхности заготовки будет существенно отличаться от площади поверхности готовой детали, то при калибровке могут получиться кольцевые складки (при $F_{\text{дет}} < F_3$) или высота детали будет меньше требуемой (при $F_{\text{дет}} > F_3$).

В некоторых случаях используется другой прием: наклонная стенка детали формируется постепенно, как бы наращивается на определенную величину в каждой последующей операции, как показано на рис. 13.8, б.

Те же приемы применяют и для деталей с более сложной криволинейной образующей.

Существенным недостатком такой многооперационной вытяжки являются следы ступеней на поверхности готовой детали. Для устранения этого дефекта часто применяют дополнительную операцию проглаживания деталей на токарно-давильных станках (см. рис. 12.6). Увеличение ступеней и уменьшение их глубины облегчают калибровку и улучшают качество поверхности, однако при этом требуется большое число штампов.

13.9. ШТАМПОВКА ДЕТАЛЕЙ С ШИРОКИМ ФЛАНЦЕМ

На рис. 13.9 показана деталь с широким фланцем, при штамповке которой при $d_n/d_0 = m < m_1$, также требуются специальные приемы. В этом случае конечный диаметр d_n достигается постепенно путем многократного формообразования внутренней полости заготовки при сохранении полученного в первой операции диаметра фланца $d_{\text{фл}}$ постоянным. Показанные на рис. 13.9 формы детали пос-

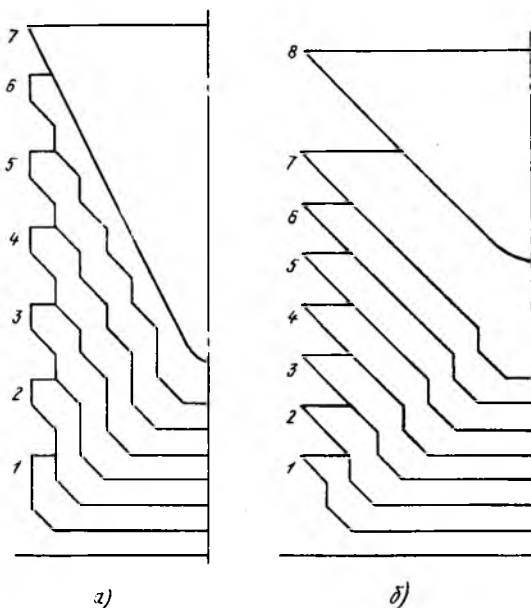


Рис. 13.8. Последовательность операций штамповки деталей конической формы:

a—первый вариант — вытяжка многоступенчатой детали с последующей ее калибровкой; *б*—второй вариант — последовательное образование конической части детали; 1...8—форма полуфабриката после соответствующих операций вытяжки

ле первой, второй и последующих операций рассчитаны так, чтобы отношения d_1/D_0 , d_2/d_1 , d_{n-1}/d_n и d_n/d_{n-1} не выходили за пределы минимальных значений коэффициентов вытяжки m_1 и m_2 . В каждой последующей операции ши-

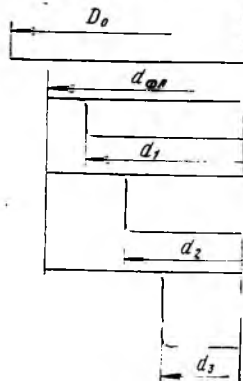


Рис. 13.9. Последовательность изготовления деталей с широким фланцем:

1, 2, 3—номера операций

рина фланца увеличивается за счет уменьшения внутреннего диаметра полости заготовки.

В каждой операции вытяжки следует определять высоту h промежуточных форм детали $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$, по которой устанавливают величину хода ползуна и производят отладку штампа на прессе. Высоту определяют из условия сохранения постоянства площади поверхности детали после каждой операции вытяжки. В промежуточных формах деталей диаметр ступеней и радиус их сопряжения известен (эти величины определяются размерами рабочих элементов штампа), неизвестна только высота, которую определить легко. Приводим формулу для определения высоты последующей формы детали h_n через известную высоту предыдущей формы h_{n-1} :

$$h_n = \frac{h_{n-1} - 0,86r_{n-1}}{m_n} + 0,86r_n,$$

где r_{n-1} и r_n — радиусы сопряжения стенки с фланцем и дном ступеней промежуточных форм детали, а m_n — коэффициент вытяжки конечной операции, равный отношению d_n/d_{n-1} .

13.10. ВЫТЯЖКА В ЛЕНТЕ

Этот способ применяется для изготовления за несколько операций небольших деталей с фланцем, колпачков, корпусов гаек. Сущность способа в том, что при этом не предусматриваются заготовки, а детали вытягиваются непосредственно из ленты в многопозиционном штампе, состоящем из нескольких пуансонов и

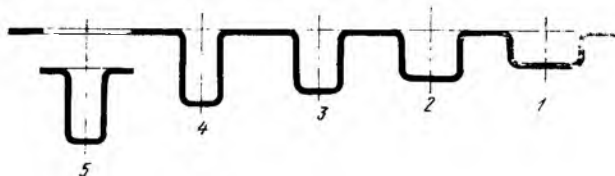


Рис. 13.10. Последовательность операций при штамповке в ленте:

1...5—последовательность операций

матриц. Окончательная форма детали образуется последовательно, с увеличением степени деформации от операции к операции, в последней операции деталь отделяется от ленты путем вырубки.

На рис. 13.10 показана последовательность образования окончательной формы детали при подаче ленты справа налево на определенный шаг после каждого рабочего хода ползуна. За первые четыре хода ползуна деталь приобретает окончательную форму, а при пятом — отделяется от ленты; каждый последующий ход ползуна сопровождается отделением новой детали.

В технологические расчеты входят определение ширины ленты, числа переходов, шага подачи ленты. Иногда для облегчения течения металла делают вырезы, чтобы «округлить» заготовку и приблизить процесс вытяжки из ленты к вытяжке из отдельной заготовки. Для уяснения специфики расчетов следует обратиться к дополнительной литературе [13, 34].

13.11. ШТАМПОВКА ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Штамповка деталей из неметаллических и композиционных материалов имеет некоторую специфичность. Намекаем три группы этих материалов: однородные неметаллические материалы (картон, фибра, листовая резина, органическое стекло, миканит, гетинакс, текстолит и др.); композиционные материалы на неметаллической основе (матрице); композиционные материалы на металлической матрице.

Разделительные операции производятся различными способами в зависимости от свойств материала и масштаба производства. В качестве общих требований при раскрое неметаллических материалов являются: острота режущих кромок инструмента, меньшие зазоры (2...3% от s) и надежный прижим заготовки во время резания. Такие материалы как твердые сорта резин, гетинакс, фибру, картон можно раскраивать на гильотинных ножницах при хорошо заточенных ножах и отрегулированном зазоре.

На рис. 13.11, а показана схема вырубного штампа для неметаллических материалов, особенность которого состоит в том, что матрица имеет заостренную режущую кромку, что способствует большей локализации очага деформаций и снижает опасность появления на кромке среза трещин. Для мягких материалов (резина, фетр, картон, фибра и др.) применяется односторонняя вырезка деталей из полос заостренными ножами; вместо ответной рабочей детали (пуансона или матрицы) применяют плиту — подкладку из дерева или пластичного металла (см. рис. 13.11, б). Угол заточки ножей для резины и картона — 15...18°, для фибры, текстолита 45°.

Для твердых и хрупких пластмасс получение качественной кромки среза достигается зачисткой в зачистных штампах.

Органическое стекло раскраивается в штампах при $s < 1$ мм с нагревом до 100...120°С; эбонит — с нагревом до 60...80°С. Более толстые листы раскраиваются на ленточных пилах или фрезерованием.

Большие сложности вызывает раскрой композиционных материалов, армированных стекло-боро- или углеволокнами из-за хрупкости волокон; при раскрое на ножницах или в штампах возникает реальная опасность растрескивания волокон около кромок среза. Для раскроя деталей из стеклотекстолита в штампах

пуансон и матрица изготавливаются по второму классу точности, по скользящей посадке; прижим-съемник также изготавливается точно по контуру пуансона. То же относится к алюминию и его сплавам, армированным волокнами бора; отверстия небольшого диаметра рекомендуется получать сверлением во избежание разрушения волокон вокруг отверстий при пробивке.

Формоизменяющие операции листовых и профильных неметаллических материалов производятся в большинстве случаев с нагревом заготовки; лишь при малой степени формоизменения, сопровождающейся небольшими деформациями, листовые и профильные заготовки укладывают в приспособления и соединяют в узлы без предварительной пластической деформации. Органическое стекло нагревают до $120 \dots 140^\circ \text{C}$, текстолит — до $150 \dots 170^\circ \text{C}$, эбонит — до $70 \dots 80^\circ \text{C}$, винипласт — до $80 \dots 120^\circ \text{C}$, миканит — до $150 \dots 200^\circ \text{C}$. Картон и фибру пластически деформируют без нагрева, но в увлажненном состоянии.

Для формовки деталей из оргстекла, в частности блистеров, выступающих за пределы обводов планера и имеющих форму полусфер, применяют вакуумные установки, в которых формоизменение нагретой заготовки происходит атмосферными давлением (рис. 13.12, а), и установки, в которых формообразование производится сжатым воздухом (рис. 13.12, б). В вакуумной установке круглая заготовка 4 укладывается на верхнюю фланцевую часть корпуса 1, накрывается кольцевым прижимом 3 и весь этот пакет стягивается струбцинами 2 с обеспечением герметичности внутреннего объема установки. После этого включается ламповый электронагреватель 5; после нагрева заготовки включается вакуумный насос, через штуцер 7 из внутренней полости откачивается воздух и атмосферное давление производит формовку заготовки до соприкосновения с ограничителем 6. Диаметр заготовки остается неизменным, поэтому толщина ее принимается с учетом утонения, которое в полярной точке доходит до $30 \dots 35\%$, а у некоторых изделий — до 50% .

При формовке сжатым воздухом заготовки нагреваются в подвешенном положении в воздушном циркуляционном шкафу. Как и в предыдущем случае, заготовка укладывается на фланцевую часть установки, закрывается крышкой, весь пакет стягивается струбцинами и сжатый воздух с давлением $1200 \dots 1300 \text{ ГПа}$ подается через штуцер в нижнюю внутреннюю полость, чем и обеспечивается формовка блистера. Сигналом к прекращению процесса служит соприкосновение заготовки 4 с ограничителем 6.

В обоих случаях детали формуются без контакта с инструментом, что дает возможность сохранить чистой поверхность деталей и обеспечить надлежащий уровень оптических свойств.

Из композиционных материалов на неметаллической основе силовые элементы конструкции планера самолета, а также изделия внутреннего оборудования изготавливают не из листовых полуфабрикатов пластическим деформированием, а укладыванием составляющих материала непосредственно на болванках, копирующих обводы будущего узла, с последующей полимеризацией и отверждением

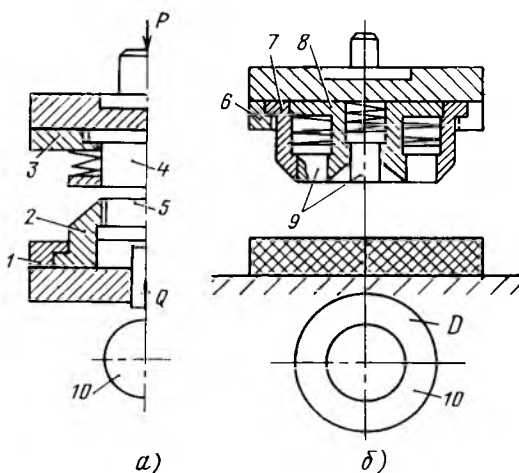


Рис. 13.11. Штампы для изготовления деталей из пластмасс:

а—для вырубки; б—для вырубки и пробивки; 1—матрицедержатель; 2—матрица; 3—пуансонодержатель; 4—пуансон; 5—прижим-выталкиватель; 6—матрицедержатель; 7—матрица для вырубки; 8—пуансон для пробивки; 9—выталкиватель; 10—деталь

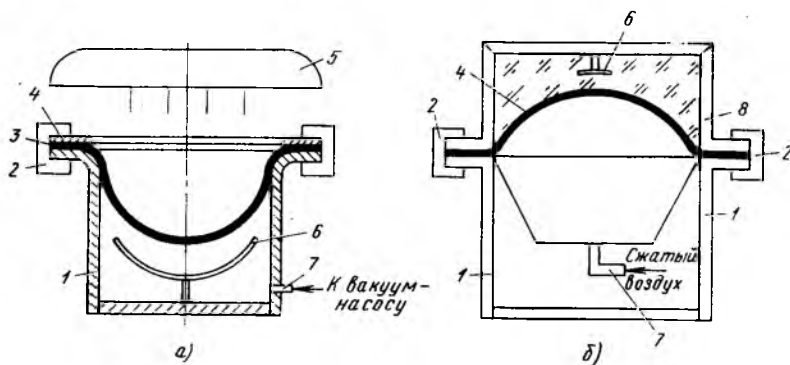


Рис. 13.12. Установки для формовки оргстекла:

а—вакуумная; б—работающая на сжатом воздухе; 1—корпус; 2—струбины; 3—кольцо прижима; 4—заготовка; 5—нагреватель; 6—ограничитель; 7—штуцер; 8—крышка

связующего. Наибольшее распространение, при надлежащей форме изделий, получило изготовление узлов путем намотки наполнителя (стеклолент, стекловолокна) со связующим (например, эпоксидной смолой) на оправки соответствующей формы.

При небольших деформациях детали из стеклотекстолита изготавливают гибкой и формовкой из листовых заготовок при нагреве до 230° С.

Из композиционных материалов на металлической основе наиболее перспективными для авиастроения являются алюминий и его сплавы, армированные нитями коррозионно-стойких сталей, бора, углеродными волокнами и др. Объемная доля стальных волокон может составлять 10...15%, нитей бора — 30...40% (толщина нитей — до 0,1 мм). Композиционный материал алюминий — сталь имеет удовлетворительную технологическую пластичность. Боралюминий имеет существенные преимущества перед другими композиционными материалами по механическим характеристикам; при объемной доле волокон бора 55% предел прочности материала составляет 810 МПа, а модуль упругости 242000 МПа [20]. Однако этот материал имеет низкую пластичность. Деформирование его производится гибкой при малых относительных деформациях. Из плоских листов боралюминия нельзя изготавливать детали сложных форм нужной толщины; их можно получать «выкладывая» в несколько слоев тонких пластин боралюминия на оправках, имеющих форму будущих деталей, с последующим соединением этих пластин пайкой или сваркой. Толщина пластин легко определяется по заданной допустимой деформации и заданной максимальной кривизне деталей: $\epsilon_{\text{доп}} = (s/2R_{\text{min}})$; $s = 2\epsilon_{\text{доп}}R_{\text{min}}$. Если допустимая деформация в направлении волокна составляет 0,5%, а $R_{\text{min}} = 20$ мм, то толщина пластин не должна превышать 0,2 мм.

Изготовление деталей из композиционных волокнистых материалов сопряжено с определенными трудностями технического характера и с увеличением трудоемкости. Однако дальнейшее развитие авиационной техники связано с повышением весовой отдачи конструкций, и одним из эффективных путей облегчения самолета является внедрение композиционных материалов. Вот почему успешное применение волокнистых материалов в отечественной и зарубежной практике самолетостроения будет оказывать влияние на развитие методов и средств производства, на разработку новых технологических процессов, направленных на экономичное изготовление изделий из этих материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов А. Исследование процесса формообразования оболочек замкнутых контуров растяжением. — Труды МАТИ. М.: Машиностроение, № 65, 1966, с. 60—85.
2. Аверкиев Ю. А. Исследование обжима полых цилиндрических заготовок. — В кн.: Инженерные методы расчета процессов обработки давлением. Л.: Машгиз, 1957, с. 167—196.
3. Бебрис А. А. Устойчивость заготовки в формообразующих операциях листовой штамповки. Рига: Зинатне, 1978. 127 с.
4. Бекофен В. Процессы деформации. М.: Металлургия, 1977. 284 с.
5. Белый И. В., Фертик С. М., Хименко Л. Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. 165 с.
6. Богоявленский К. Н., Камнев П. В. Изготовление деталей пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1975. 420 с.
7. Валиев С. А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. М.: Машиностроение, 1973. 171 с.
8. Вигдорчик С. А. Технологические основы проектирования и конструирования самолетов. М.: Изд. МАИ, 1974. 139 с.
9. Горбунов М. Н. Штамповка деталей из трубчатых заготовок. М.: Машгиз, 1960. 186 с.
10. Гредитор М. А. Давильные работы и ротационное выдавливание. М.: Машиностроение, 1971. 232 с.
11. Громова А. Н., Завьялова В. И., Коробов В. К. Изготовление деталей из листов и профилей при серийном производстве. М.: Оборонгиз, 1960. 340 с.
12. Ершов В. И., Кийко И. А., Каширин М. Ф. Гибка листа с дополнительным нагруженным очага деформаций. — Известия вузов, сер. авиастроение, 1976, № 1, с. 41—48.
13. Зубцов М. Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1967. 494 с.
14. Ильюшин А. А. Пластичность. М.: Государственное издательство технико-экономической литературы, 1948. 376 г.
15. Исаченков Е. И. Штамповка эластичными и жидкостными средами. М.: Машиностроение, 1976. 360 с.
16. Исаченков Е. И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1978. 206 с.
17. Исследования в области глубокой вытяжки металлов/Горбунов М. Н., Попов О. В., Катков В. Ф., Ключарев Н. А., Ганелин И. Н. — Труды МАТИ, № 29. Оборонгиз, 1956. 142 с.
18. Кайбышев О. А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975. 270 с.
19. Капорович В. Г. Производство деталей из труб обкаткой. М.: Машиностроение, 1978. 130 с.
20. Колпашиников А. И., Мануйлов В. Ф., Ширяев Е. В. Армирование цветных металлов и сплавов волокнами. М.: Металлургия, 1974. 247 с.
21. Красов А. С. Местная формовка листового материала с нагревом. — Кузнечно-штамповочное производство, 1972, № 10, с. 14—17.
22. Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методом гибки. М.: Машиностроение, 1966. 240 с.

23. Мещерин В. Т. Листовая штамповка: атлас схем. М.: Машиностроение, 1975. 226 с.
24. Мошнин Е. Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. М.: Машгиз, 1959. 250 с.
25. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. М.: Машиностроение, 1976. 555 с.
26. Пашкевич А. Г., Орехов А. В., Каратаева Н. Ю. Использование эффекта сверхпластичности при отбортовке. — Кузнечно-штамповочное производство, 1978, № 10, с. 27—29.
27. Пихтовников Р. В., Завьялова В. И. Штамповка листового металла взрывом. — М.: Машиностроение, 1964. 171 с.
28. Пихтовников Р. В., Хохлов Б. А. Бассейная листовая штамповка взрывом. Харьков: Прапор, 1972. 165 с.
29. Платонов М. А. Вытяжка с конусным складкодержателем. — Кузнечно-штамповочное производство, 1962, № 3, с. 12—15.
30. Попов Е. А. Анализ операций осесимметричного обжима, раздачи и отбортовки. — В кн.: Основы теории обработки металлов давлением. М.: Машгиз, 1959, с. 405—460.
31. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 275 с.
32. Попов О. В. Изготовление цельно-штампованных тонкостенных деталей переменного сечения. М.: Машиностроение, 1974. 116 с.
33. Предотвращение гофрообразования при обжиме тонкостенных цилиндрических оболочек/Горбунов М. Н., Пашкевич А. Г., Каширин М. Ф., Орехов А. В. — Кузнечно-штамповочное производство, 1977, № 1, с. 18—19.
34. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 513 с.
35. Сверхпластичность металлических материалов/Шоршоров М. Х., Тихонов А. С., Булат С. И. — М., Наука, 1973. 218 с.
36. Скворцов Г. Д. Основы конструирования штампов для холодной штамповки. — М.: Машиностроение, 1974. 307 с.
37. Степанов В. Г., Шавров И. А. Высокэнергетические импульсные методы обработки металлов. — Л.: Машиностроение, 1975. 275 с.
38. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. — М.: Машиностроение, 1977. 412 с.
39. Технология самолетостроения/Абибов А. Л., Бирюков Н. М., Бойцов В. В., Григорьев В. П., Зернов И. А. — М.: Машиностроение, 1970. 598 с.
40. Хилл Р. Математическая теория пластичности. — М.: Техничко-теоретическая литература, 1956. 398 с.
41. Ходырев В. А. Проектирование, изготовление и эксплуатация штампов с полиуретаном. Пермское книжное издательство, 1975. 360 с.
42. Шофман Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1964. 365 с.
43. Штамповка взрывом/Анучин М. А., Антоненков Ю. П., Носиков С. М., Кулагин А. Ф. М.: Машиностроение, 1972. 148 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Глава 1. Общая характеристика заготовительно-штамповочных работ	5
1.1. Сущность и область применения	5
1.2. Классификация операций	8
✓ 1.3. Технологическая характеристика материалов	16
1.4. Методика теоретического анализа операций	21
Глава 2. Раскройные работы (разделительные операции)	21
2.1. Основные требования	21
2.2. Классификация процессов раскроя	23
2.3. Раскройные карты	25
2.4. Механизм деформирования	26
2.5. Определение сил и технологических параметров	29
2.6. Раскрой на ножницах	33
2.7. Раскрой на фрезерных станках	35
2.8. Раскрой в штампах	37
2.9. Улучшение качества кромки среза	41
Глава 3. Гибка	44
3.1. Общие сведения	44
3.2. Напряженно-деформированное состояние	45
3.3. Расчет усилий при гибке	51
3.4. Пружинение при гибке	55
3.5. Минимальный радиус гибки	59
3.6. Определение длины развертки	60
3.7. Способы гибки листовых заготовок	61
3.8. Особенности гибки профилей и труб	67
3.9. Гибка с тангенциальным растяжением	78
3.10. Гибка с тангенциальным сжатием	84
3.11. Гибка с радиальным сжатием	85
3.12. Другие совмещенные процессы гибки	86
3.13. Гибка раскаткой	87
Глава 4. Вытяжка	88
4.1. Общие сведения	88
4.2. Напряженно-деформированное состояние заготовки	90
4.3. Усилие вытяжки и прижима	96
4.4. Определение диаметра заготовок	98
4.5. Минимальные значения коэффициентов вытяжки и расчет числа операций	100
4.6. Особенности вытяжки деталей коробчатой формы	102
4.7. Рациональные условия деформирования	105
Глава 5. Раздача	111
5.1. Общие сведения	111
5.2. Напряженно-деформированное состояние заготовки	112
5.3. Усилие деформирования	115
5.4. Технологические возможности	116
5.5. Размеры заготовки	118
5.6. Рациональные условия деформирования	118

	<i>Стр.</i>
Глава 6. Отбортовка	121
6.1. Общие сведения	121
6.2. Напряженно-деформированное состояние	122
6.3. Усилие деформирования	123
6.4. Технологические возможности	124
6.5. Размеры заготовки	125
6.6. Рациональные условия деформирования	126
Глава 7. Обжим	128
7.1. Общие сведения	128
7.2. Напряженно-деформированное состояние заготовки	129
7.3. Определение усилий	130
7.4. Технологические возможности	131
7.5. Размер заготовки	133
7.6. Рациональные условия деформирования	134
Глава 8. Формовка	136
8.1. Напряженно-деформированное состояние и определение усилий	138
8.2. Технологические возможности	139
Глава 9. Обтяжка	142
9.1. Поперечная обтяжка	143
9.2. Продольная обтяжка	146
9.3. Кольцевая обтяжка	149
9.4. Пуансоны для обтяжки	151
Глава 10. Операции объемной штамповки	152
10.1. Вытяжка с утонением стенки	153
✓ 10.2. Ротационное выдавливание	156
10.3. Холодное выдавливание	160
10.4. Осадка труб и кромок листов	163
Глава 11. Совмещенные процессы	165
11.1. Совмещение операций	166
11.2. Гидромеханические способы штамповки	171
Глава 12. Другие методы выполнения операций	173
12.1. Штамповка эластичными средами и жидкостью	173
12.2. Штамповка на листоштамповочных молотах	181
12.3. Высокоскоростные методы штамповки	185
12.4. Штамповка в условиях сверхпластичности	197
12.5. Штамповка с дифференцированным нагревом	203
12.6. Ротационные методы	207
Глава 13. Штамповка деталей сложных форм	209
13.1. Общие сведения	209
13.2. Штамповка полупатрубков	210
13.3. Штамповка заливов	211
13.4. Штамповка деталей нервюр	213
13.5. Штамповка ячеистых панелей	214
13.6. Штамповка крестовин	215
13.7. Штамповка ступенчатых деталей	215
13.8. Штамповка деталей конической формы	216
13.9. Штамповка деталей с широким фланцем	216
13.10. Вытяжка в ленте	217
13.11. Штамповка деталей из неметаллических и композиционных материалов	218
Список литературы	221