

На правах рукописи

Голенков Денис Вячеславович

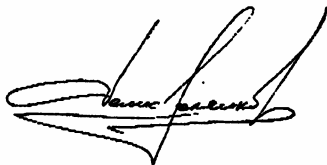
**РАЗРАБОТКА НОВОГО ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ОБТЯЖКОЙ  
ДЕТАЛЕЙ КОРЫТООБРАЗНОГО СЕЧЕНИЯ  
И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 05.03.05 – Технология и машины обработки  
давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Орел, 2002 г.

Работа выполнена в Орловском государственном техническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук,  
профессор Вдовин С.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор Овчинников А.Г.

|                                                                                                                       |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Голенков Д.В.                                                                                                         | 1600093 |
| Разработка нового процесса<br>штамповки обтяжкой деталей<br>корытообразного сечения и<br>методики расчета технолог... |         |
| 2002                                                                                                                  | 0-00    |
| Веду                                                                                                                  |         |
| 24.03.2006                                                                                                            |         |

кандидат технических наук,  
профессор Шпунькин Н.Ф.

ФГУП НПО «Техномаш»

1600093

**ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ**  
обозначенного здесь срока

ЖОМ  
на по

чатью,

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

И.Семенов

## Общая характеристика работы

Актуальность. Листовые профили и другие детали корытообразного сечения составляют значительную часть номенклатуры листоштамповочного производства авиационных и других машиностроительных предприятий. Они служат, в основном, несущими элементами каркасных конструкций и в качестве таковых должны иметь минимальные штамповочные радиусы, высокие показатели точности размеров и формы. Традиционные технологии штамповки указанных деталей не обеспечивают точность угловых размеров и плоскостность стенок на приемлемом уровне из-за разброса значений толщины листов. Также не выполняются требования экономичности: для обеспечения калибрующего воздействия штампа нужны прессы большой мощности и дорогостоящая подгонка подгонка штампового инструмента.

В данной работе показана возможность изготовления деталей корытообразного сечения методом обтяжки, реализуемой на универсальных средствах технологического оснащения, при этом плоскостность наклонных стенок детали обеспечивает натяжение материала, превосходящее начальный предел текучести, пластическое растяжение должно распространяться также на изогнутые участки детали. Плоские краевые стенки детали используют для зажимов, оборудование и оснастка легко переналаживаются на выпуск деталей различных размеров.

Целью работы является создание новой технологии штамповки обтяжкой деталей корытообразной сечения, обеспечивающей высокие показатели точности и качества при минимальных затратах.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Установить возможность обтяжки листом инструмента, скругленного малыми радиусами порядка толщины материала, определить минимально допустимые значения радиусов.

2. Дать количественную оценку плоскостности наклонных стенок деталей, образующихся за счет натяжения материала без контакта с инструментом.

3. Разработать технологию штамповки деталей типа корытообразных профилей с использованием обтяжки штампового инструмента.

4. Выполнить математическое моделирование процесса обтяжки и на его основе разработать методику расчета технологических параметров.

### Научная новизна работы:

экспериментально установлена возможность изготовления обтяжкой листовых профилей из низкоуглеродистых сталей и сплава Д16М с малыми радиусами  $r$  сопряжения стенок порядка толщины материала  $h$ ;

аналитически получена нижняя оценка  $r/h$  в зависимости от отношения  $\sigma_{02}/\sigma_B$  из условия распространения пластического растяжения по радиусным участкам и боковым стенкам корытообразного профиля; для  $\sigma_{02}/\sigma_B = 0,625$  (сталь 08кп)  $r_{\min}/h = 0,7$ .



экспериментально установлено, что при  $r/h$  порядка 1 предельная деформация растяжения боковых стенок профиля для низкоуглеродистой стали и сплава Д16М достигает 5-7%; измеренная неплоскостность стенок детали, образующихся за счет натяжения материала без контакта с инструментом, оказывается в пределах допуска на толщину материала;

при математическом моделировании различных схем завершения операции обтяжки установлена существенная роль пластических деформаций разгрузки, изменяющих пружинение на 50% и более;

определена функция поперечных перемещений при растяжении листа, которая минимизирует функционал работы внутренних сил и адекватно отражает явление утяжки по ширине заготовок из трансверсальноизотропного материала.

Новизна предложенных способа и устройства для изготовления листовых деталей корытообразного сечения подтверждена патентами РФ.

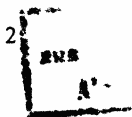
#### На защиту выносятся:

- результаты теоретического анализа обтяжки листом инструмента с малыми радиусами скругления кромок при одновременном и последовательном осуществлении изгиба и растяжения;
- разработанная технология изготовления деталей корытообразного сечения из листовых заготовок и результаты экспериментальной проверки ее возможностей;
- математическая модель растяжения листа с недеформируемыми краями, находящимися под зажимами, учитывающая неравномерное изменение ширины растягиваемого участка по его длине;
- результаты анализа пружинения после изгиба с растяжением с учетом неупругого характера деформаций разгрузки в части сечения листа.

Методы исследования. Теоретическое определение минимально допустимых радиусов обтяжки выполнено на основе устойчивости пластического растяжения с учетом контактных напряжений на кромке инструмента, задача расчета утяжки заготовки по ширине решена вариационным методом, экспериментальные исследования проводились на специально сконструированных штампах с использованием узких и широких заготовок, что соответствовало линейной и плоской схемам растяжения.

Практическая ценность. Разработана схема штамповки листовых деталей корытообразного сечения и конструкция штампа для ее реализации, а также методика расчета технологических процессов гибки обтяжкой в штампах, содержащая рекомендации по выбору режимов нагружения и разгрузки, формулы расчета изменения размеров заготовки, пружинения, минимально допустимых радиусов гибки.

Новая технология, по сравнению с применением калибровки, обеспечивает уменьшение неплоскостности стенок деталей на 30 - 50% при одновременном снижении потребной мощности прессов в 3 - 5 раз,



удешевлении и универсализации штамповой оснастки.

Достоверность результатов теоретических исследований определяется учетом влияния контактных напряжений, анизотропии материала и других факторов и подтверждается сходимостью с экспериментальными данными.

Реализация результатов работы. Разработанная технология передана Орловскому предприятию АО Дормаш для использования при подготовке производства новых изделий.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на конференции "Реализация региональных научно-технических программ Центральночерноземного района", - Воронеж, 1996; международном научно-техническом семинаре "Механика и технология в процессах формоизменения с локальным очагом деформации", - Орел, 1997; на 2-й всеукраинской молодежной научно-практической конференции с международным участием "Человек и космос", - Днепропетровск, 2000.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 статей и тезисов докладов, получено 2 патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников в количестве 66 и содержит 117 страниц текста, 51 рисунок, 7 таблиц.

### **Краткое содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель и поставлены основные задачи работы, дана ее краткая характеристика, включающая научную новизну, практическую ценность, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор энергосберегающих методов гибки листовых заготовок, включая процессы обтяжки. Традиционная технология гибки предусматривает приложение больших давлений чеканящего нажима, что является проблематичным при штамповке детали с наклонными боковыми стенками. Они заклиниваются в зазоре между матрицей и пуансоном либо не подвергаются нажиму соответственно при завышенной или заниженной, по сравнению с номинальной, толщине заготовки. В том и другом случае не достигается плоскостность всех стенок, имеет место значительное пружинение.

В отличие от гибки в штампах обтяжка на специальном оборудовании обеспечивает высокие показатели точности, однако такое оборудование относится к разряду уникального и применяется в безальтернативных ситуациях - главным образом, для изготовления пологих оболочек больших габаритов.

Проанализировано состояние теории процессов обтяжки. Исследования Арышенского Ю.М., Гречникова Ф.В., Громовой А.Н., Матвеева А.Д., Мошнина Е.Н., Одингса С.С. и др. относятся к получению пологих оболочек, поэтому в них не учитываются напряжения, нормальные к

поверхности листа, формоизменение рассматривается как монотонный процесс. Особый интерес представляют исследования Матвеева А.Д., относящиеся к обтяжке цилиндрических поверхностей штампового инструмента при фиксированном положении краев листа. Теоретически установлены предельные значения глубины и угла получаемого корытообразного элемента детали - профиля или панели, однако эти данные получены без учета контактных напряжений, т.е. для сравнительно больших отношений радиуса поверхности инструмента к толщине материала.

При поперечной обтяжке деформированное состояние принимают плоским, тогда как продольная обтяжка вызывает значительное уменьшение ширины заготовок, которое рассчитывают с учетом анизотропии. В расчете пружинения используют концепцию упругой разгрузки А.А. Ильюшина.

Из выполненного анализа можно сделать вывод, что возможность изготовления обтяжкой в штампах деталей корытообразного сечения зависит от относительной величины радиусов округлений кромок инструмента и схемы нагружения заготовок, обеспечивающей наиболее равномерное деформирование.

Обзор методов математического моделирования гибки и обтяжки свидетельствует о возрастающем применении вычислительных средств, и прежде всего, МКЭ. Однако высокие затраты, связанные с конечно-элементным моделированием, ограничивают его использование исследователями целями, тогда как практические расчеты выполняют по упрощенным методикам.

Во второй главе проведено теоретическое исследование состояния участков заготовки, обтягиваемых по кромкам инструмента, и соседних прямых участков, подвергаемых растяжению. При одновременном действии изгиба и растяжения в случае малых отношений радиуса  $r$  кромки к толщине листа  $h$  сопротивление радиусных участков растяжению уменьшается и может оказаться недостаточным для перевода в пластическое состояние соседних прямых участков, что не позволит устранить неплоскостность последних. Введем понятие минимального относительного радиуса обтяжки  $r_{\min}/h_0$ , при котором прямые участки переходят из упругого состояния в пластическое одновременно с исчерпанием несущей способности радиусных участков. В этот момент напряжение текучести  $\sigma_s$ ; на радиусном участке можно считать постоянным по толщине. Интегрируем  $\sigma_\theta = 1,15\sigma_s[1 - \ln(R/\rho)]$  по толщине  $h$ , где  $R = r + h_0 - \Delta h$ , и находим погонную растягивающую силу

$$N = 1,15\sigma_s r \ln(R/\rho). \quad (1)$$

Определяем  $N_{\max}$  из условия  $dN/dR = 0$  и приравниваем  $N_{\max} = 1,15\sigma_{02}h_0$ .

Получаем трансцендентное уравнение, связывающее минимально допустимое значение  $r$  и относительное утонение  $\Delta h/h_0$ , (последнее является аргументом степенной функции упрочнения  $\sigma_s = A(\psi)^n$ ), в результате  $r_{\min}/h_0$

выражаем через  $n$  и отношение  $\sigma_{02}/\sigma_b$ , см. рисунок 1. Графики 1, 2, 3 построены для различных значений показателя функции упрочнения  $n = 0,1; 0,15; 0,2$ . Они соответствуют минимальным радиусам обтяжки, рассчитанным из условия устойчивости растяжения, при этом пластические свойства материалов должны быть достаточно высокими, в противном случае разрушение произойдет до того, как растягивающая сила достигнет экстремального максимума.

При последовательном приложении момента  $M$  и силы  $N$  сопротивление изогнутого участка растяжению может оказаться не сниженным, как это имеет место при одновременном действии  $M$  и  $N$ , а повышенным, так как при изгибе лист подвергается упрочнению при незначительном утонении. В результате сила  $N_{\max}$ , подсчитанная из условия устойчивого растяжения прямого участка, может оказаться недостаточной для выравнивания эпюры напряжений по толщине листа на изогнутом участке. С учетом трения и угла изгиба  $\alpha$  максимальная сила в конце изогнутого участка  $N = N_{\max} \exp(-f\alpha)$ , где  $f$  - коэффициент трения. Выражая  $N$  по формуле (1) при  $R = r + h_0$  и учитывая упрочнение, полученное при изгибе, получаем зависимость между  $r/h_0$  и  $fa$ . Соответствующие графики 1, 2, 3 построены на рисунке 2 для  $n = 0,1; 0,15; 0,2$ .

Как следует из графиков, значения  $r/h_0$ , при которых растяжение распространяется на предварительно изогнутые участки профиля, намного больше, чем  $r_{\min}/h_0$  при одновременном действии силы и момента. Однако в данном случае  $r$  не означает минимально допустимый радиус кромки инструмента. Обтяжку можно выполнять и при меньших радиусах, но при этом на изогнутых участках частично сохранятся сжимающие напряжения изгиба, соответственно пружинение после разгрузки не будет минимальным.

Проведенные теоретические исследования показали принципиальную возможность изготовления обтяжкой деталей с малыми радиусами округлений порядка толщины материала.

В третьей главе содержатся результаты экспериментального исследования обтяжки в штампах. Обтяжку выполняли при фиксированном положении краев заготовки, исключающем их взаимное сближение, таким образом, корытообразный профиль формируется за счет утонения его боковых стенок и радиусных участков. В отличие от обтяжки на специальных прессах с программным управлением не обеспечиваются оптимальные режимы деформирования, и тем не менее данный процесс может быть использован для штамповки неглубоких профилей. Кроме того он моделирует штамповку одновременно нескольких углублений трапециевидного сечения на деталях типа панель, что практикуется при определенных соотношениях размеров углублений.

Выполнено две группы экспериментов. Первая относится к определению допустимых радиусов  $r$  округления кромок инструмента обтяжки. Был изготовлен штамп с секциями матрицы, которые можно

устанавливать в восемь различных положений, варьируя значениями  $r$  с дискретностью 0,3...0,5мм. Накладывая на секции фольгу в несколько слоев, получали практически любое требуемое значение  $r$ . Использовали заготовки толщиной 1мм, ширина составляла 20мм, что в несколько раз меньше длины участка деформирования, т.е. напряженное состояние при растяжении было близко к линейному. Процесс доводили до разрушения заготовки, считая допустимыми значения  $r$ , при которых линия разрыва располагалась вне радиусных участков. Их сопротивление растяжению уменьшено из-за давления со стороны кромок инструмента, что однако может компенсироваться упрочнением, вызванным изгибом. Соотношение этих двух факторов зависит от радиуса кромок. Понятие допустимого радиуса означает в данном случае гарантию того, что заготовки не разрушатся на кромках инструмента обтяжки.

Найденные для стали 08кп допустимые значения  $r/h > 0,55$ , что примерно на 30% больше значений  $r_{\min}/h_0$ , установленных теоретически из условия перевода в пластическое состояние прямых участков заготовки. Данное несовпадение закономерно, поскольку в эксперименте деформирование доводили до разрушения. Для сплава Д16М допустимые  $r/h > 1,2$  оказались существенно больше теоретических, что объясняется его недостаточной пластичностью.

Установлено, что деформации растяжения, предшествующие разрушению, составляют 10 - 15%, соответственно угол наклона боковых стенок корытообразного углубления приближается к 45°. Указанное значение угла меньше применяемого в конструкциях элементов силовых каркасов, однако оно может оказаться приемлемым для панелей и других деталей. Следовательно, в принципе возможна штамповка обтяжкой заготовок с фиксированными краями при условии, что утонение не имеет жесткого ограничения.

Во второй группе экспериментов определяли количественные показатели точности процесса обтяжки, варьируя деформацией  $\varepsilon$  растяжения наклонных стенок профиля. Прямолинейность образующей измеряли с помощью индикаторной головки с ценой деления 0,01мм, профиль закрепляли на столе фрезерного станка и перемещали, выдерживая заданный шаг измерения по шкале маховичка ручной подачи. Значения  $\varepsilon$  вычисляли по результатам измерения размеров поперечного сечения заготовок до и после деформирования.

На рисунке 3 показаны отклонения  $\delta$  от прямолинейности образующей при  $\varepsilon = 0,04$ ; 0,07 и 0,11 - графики 1, 2, 3. Они свидетельствуют о том, что значения  $\delta$  меньше стандартного допуска на толщину листа низкоуглеродистой стали повышенной и высокой точности - соответственно  $\pm 0,09$ мм и  $\pm 0,07$ мм. Минимальные значения  $\delta$  составили около 0,1мм. Эти данные относятся к одновременному изгибу и растяжению заготовок.



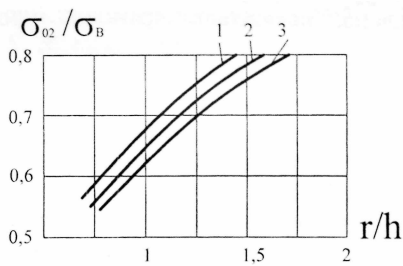


Рисунок 1

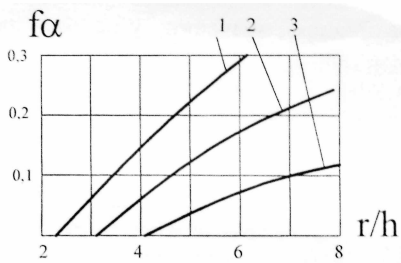


Рисунок 2

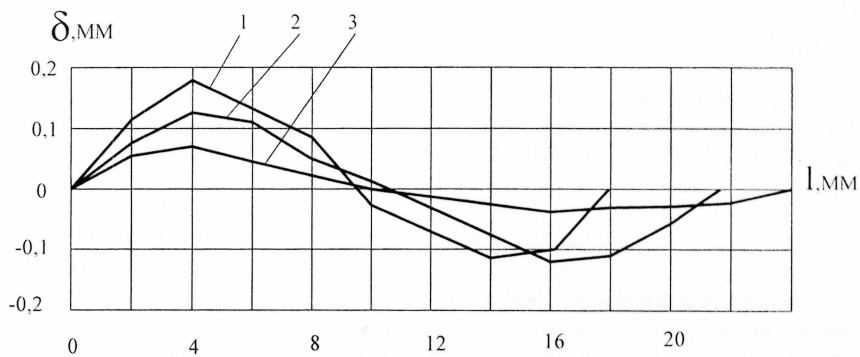


Рисунок 3

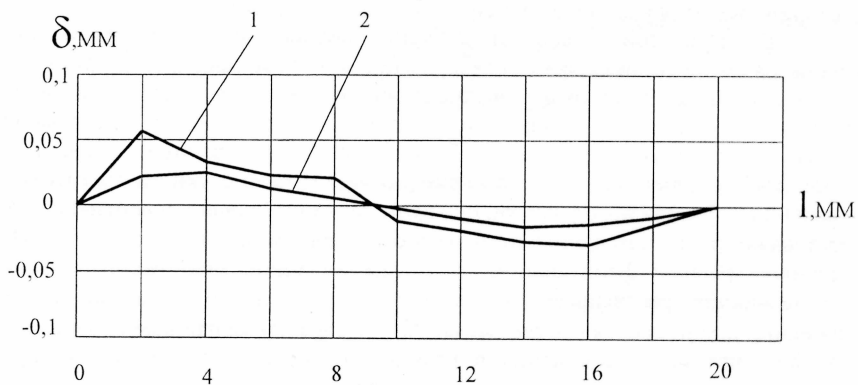


Рисунок 4

Если подвергнуть боковые стенки профиля растяжению при неизменном значении угла их наклона, показатели прямолинейности образующей существенно улучшаются, что видно по графикам 1, 2 на рисунке 4, относящимся к заготовкам из стали 08кп и сплава Д16М. Соответствующий эксперимент проводили на заготовках, предварительно изогнутых в профиль типа сдвоенный зет, с прямыми углами изгиба. При последующем растяжении боковых стенок значения  $\delta$  уменьшались в несколько раз и не превышали 0,05мм при  $\varepsilon < 5\%$ .

Приведенные точностные показатели процесса обтяжки, полученные на узких заготовках, подтверждены при штамповке профилей корытообразного сечения в экспериментальном штампе. Длина профиля  $L$  на порядок превышает поперечные размеры стенок, поэтому их деформированное состояние можно считать плоским. Однако на торцах профилей наблюдалась утяжка материала:

при этом на боковых стенках профиля  $L \approx 296\text{мм}$ , тогда как на краях, под зажимами  $L = 300\text{мм}$ . Следовательно, необходимо предусматривать припуски на обрезку торцов профилей корытообразного сечения, полученных обтяжкой.

Результаты, полученные в данной главе, согласуются с данными теоретических исследований и подтверждают возможность изготовления обтяжкой деталей с малыми штамповочными радиусами и высокими требованиями к точности. Наиболее благоприятный режим деформирования заключается в одновременном изгибе и растяжении, желательно, чтобы растягивающая сила была достаточной для выравнивания эпюры напряжений на изогнутых участках, а по окончании изгиба возрастала до величины, при которой сводится к минимуму неплоскостность прямых участков.

В четвертой главе выполнено математическое моделирование процесса обтяжки, включая стадию разгрузки. С помощью метода конечных элементов проанализировано распространение растягивающих деформаций при обтяжке листа, предварительно изогнутого по кромке инструмента, скругленной малым радиусом  $r$ . В числе исходных данных задавали  $l$  - фронтальное перемещение узлов конечно-элементной сетки на достаточном удалении от радиусного участка, при этом горизонтальная  $u$  и вертикальная  $v$  составляющие перемещения связаны соотношением:  $u = (l - v \cos \alpha) / \sin \alpha$ . При заданном равном фронтальном перемещении узлов приложенные к ним составляющие растягивающей силы в общем случае неодинаковы, их проекции подчиняются соотношению  $N_y = N_x \operatorname{ctg} \alpha$ . Аналогичные ограничения накладывают на перемещения и реакции, относящиеся к узлам, которые имеют контакт с поверхностью инструмента.

В результате установлено, что при весьма малых  $r/h$  порядка 0,5 резко возрастает роль сдвиговых деформаций, которые приводят к разрушению заготовки до того, как нарушится устойчивость пластического растяжения. Поэтому помимо изложенных выше расчетов рекомендуется проверять сопротивление сдвигу сечения радиусного участка, ориентированного под

углом наклона прилегающей боковой стенки профиля.

Процесс растяжения наклонных стенок детали корытообразного сечения сопровождается уменьшением их ширины  $\Delta b$ . Последним обычно пренебрегают, однако в случае значительного удлинения стенок  $\Delta l$  даже небольшое относительное сужение заготовки  $\Delta b/b$  приведет к утяжке, т.е. местному изменению ширины стенок деталей типа профилей, поскольку размер  $b$  может составлять порядка 1 метра. Крайние стенки профиля закреплены в процессе обтяжки и практически не деформируются. Проверочный расчет  $\Delta b$  позволяет уточнить размер заготовки, при необходимости его увеличивают на величину утяжки и предусматривают обрезку профиля по торцам после формообразования.

Математическое моделирование утяжки при растяжении листа с недеформируемыми краями выполнено с использованием классического вариационного метода из условия минимизации функционала работы внутренних сил, заданного на классе подходящих функций. В качестве последнего предложено множество функций поперечного перемещения

$$u_y = a \frac{y^2}{b^2} \left( \frac{x^2}{l} - \frac{2x^3}{3l^2} - \frac{l}{3} \right), \quad (2)$$

где  $a$  - варьируемый параметр;

$b, l$  - 1/2 ширины и длины области растяжения соответственно.

Функция (2) отвечает условиям:  $\partial u_y / \partial x = 0$  при  $x = 0, l$  и  $u_y = 0$  при  $x = l$ . Принимаем  $\varepsilon_x = \text{Const} = \Delta l / l$ ,  $u_z = -z\varepsilon_x - z\varepsilon_y$ ,  $\partial u_x / \partial y = 0$ ,  $\partial u_y / \partial z = 0$ ,  $\partial u_x / \partial z = 0$ .

Выражая  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  через частные производные перемещений, определим варьируемый параметр  $a$  из уравнения:

$$\int_0^h dz \int_0^b dy \int_0^l \frac{\partial \varepsilon_i^2}{\partial a} dx = 0.$$

Интенсивность деформаций с учетом коэффициента анизотропии

$$\mu_{1-2}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \mu_{1-2}} \left[ \frac{\varepsilon_x^2 + 2\varepsilon_x\varepsilon_y\mu_{1-2} + \varepsilon_y^2}{1 - \mu_{1-2}} + \frac{1}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Пренебрегая незначительным влиянием относительной толщины заготовки  $h/b$  и  $h/l$  на величину  $\Delta b$ , получаем

$$\frac{\Delta b}{b} \approx \frac{\mu_{1-2}}{\frac{l}{b} + 0,24(1 - \mu_{1-2})} \frac{b}{l}.$$

При  $b/l$  порядка 1 и менее зависимость между  $\Delta b$  и  $l$  близка к линейной; с увеличением  $b/l$  эта зависимость приближается к гиперболической. Практическая проверка показала, что фактические значения  $\Delta b$  при  $l/b = 10$  меньше расчетного на 30-40%, если принять в качестве  $b$  ширину деформируемой части заготовки. Это можно объяснить влиянием трения заготовки о пуансон, тормозящим ее утяжку по ширине. При назначении припуска на обрезку торцов профиля указанная погрешность моделирования утяжки является приемлемой, поскольку создает определенный запас.

На точность угловых размеров влияет пружинение, вызываемое перемещениями разгрузки радиусных участков профиля. Особенность разгрузки в данном случае заключается в том, что в части сечения листа она вызывает дополнительные пластические деформации того же знака, что и при нагружении.

Упрощенные эпюры напряжений на рисунке 5 иллюстрируют данное положение при двухстадийной разгрузке, когда сначала снимают внешнюю силу  $N$ , а затем - момент  $M$ . На 1-й стадии изменение тангенциального напряжения  $\Delta\sigma_{\theta 1} < 0$ , поэтому в части сечения листа, где напряжение изгиба  $\sigma_{\theta} = -\sigma_s$ , эпюра не изменяется. В результате указанной особенности момент эпюры  $\sigma_{\theta} + \Delta\sigma_{\theta 1}$  уменьшается по сравнению с моментом изгиба, что приводит к уменьшению пружинения на 2-й стадии разгрузки, когда остаточные напряжения  $\sigma_{ост}$  самоуравновешиваются.

Рисунок 6 относится к другой последовательности разгрузки. Снятие момента при сохранении растягивающей силы также сопровождается пластическими деформациями, что показано разрывом эпюры  $\Delta\sigma_{\theta 1}$ . В данном случае это приводит к увеличению пружинения по сравнению с обычным, т.е. полностью упругим, характером разгрузки.

При обтяжке в штампе разгрузка происходит по схеме типа той, что иллюстрирует рисунок 5. Для расчета угла пружинения необходимо учитывать возможность пластических деформаций, а также упрочнение материала и влияние радиального напряжения при малых радиусах инструмента. Специальное оборудование для обтяжки позволяет реализовать любой режим разгрузки, при этом можно управлять процессом пружинения в определенном диапазоне.

Изменение кривизны листа относительно большей ширины при разгрузке

$$\Delta\xi = -M(1-0,5\nu)/(EI),$$

где  $E$ ,  $\nu$  - модуль Юнга и коэффициент Пуассона,  $I$  - момент инерции

сечения листа.

При первоочередном снятии силы уменьшение  $M$  и соответственно  $\Delta\xi$  может быть весьма значительным - 25% при  $c = h/4$  и 50% при  $c \rightarrow h/2$ . Другая схема разгрузки (рисунок 6) вызывает увеличение  $\Delta\xi$ , так как в расчете момента инерции  $I$  не учитывают часть сечения листа, в которой снятие момента сопровождается пластическими деформациями разгрузки, при этом погонное значение  $I = h^3/12 + c_1^3/6 - c^3/3 - c_1c^2/2$ .

В пятой главе разработана технология штамповки деталей корытообразного сечения с применением обтяжки. По этой технологии наклонные стенки детали образуются без контакта со штамповым инструментом, их плоскостность обеспечивается пластическим растяжением, рисунок 7.

При выполнении подобных операций на оборудовании с программным управлением вертикальное и горизонтальное перемещения краев заготовки согласовывают исходя из заданной растягивающей деформации. Предусматривают монотонное возрастание последней и дополнительное растяжение калибрующей силой  $N$  по достижении требуемого угла гибки  $\alpha$ .

Предлагается схема штамповки деталей корытообразного сечения, согласно которой сближение краев заготовки в начальной стадии формоизменения обеспечивается горизонтальными реакциями натяжения материала. Секции матрицы 2 и прижимы 3 (см. рисунок 7) установлены в штампе с возможностью горизонтального перемещения, сначала они двигаются в направлении пуансона 1, а по достижении заданного угла гибки  $\alpha$  начинают взаимодействовать с клиньями 4, и направление их горизонтального перемещения изменяется на обратное.

В результате происходит дополнительное растяжение наклонных стенок детали - калибровка, улучшаются показатели их плоскостности. На данный способ штамповки и устройство для его реализации получены патенты РФ.

Предложенные способ и устройство применимы для штамповки плоских заготовок либо для калибровки предварительно изогнутых полуфабрикатов. В результате сводятся к минимуму отклонения от заданной формы по плоскостности и углу наклона боковых стенок.

К числу важных технологических параметров относится изменение толщины деформируемого листа. При одновременном растяжении и изгибе утонение радиусных участков  $\Delta h$  профиля находим с учетом  $N_{\min} = 1,15\sigma_{02}h_0$ ,  $\sigma_s = A(\Delta h/h_0)^n$ ,  $R = r + h_0 - \Delta h$ . Подставляя эти выражения в (1), получаем

$$\Delta h = r + h_0 - r \exp \left[ \frac{\sigma_{02} h_0^{n+1}}{Ar(\Delta h)^n} \right] \quad (3)$$

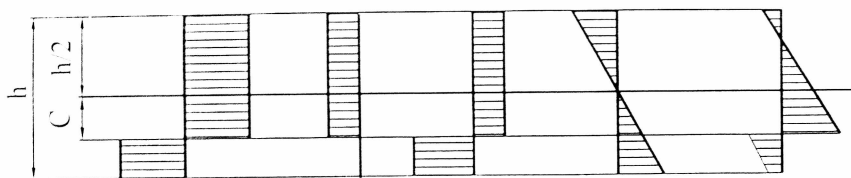


Рисунок 5

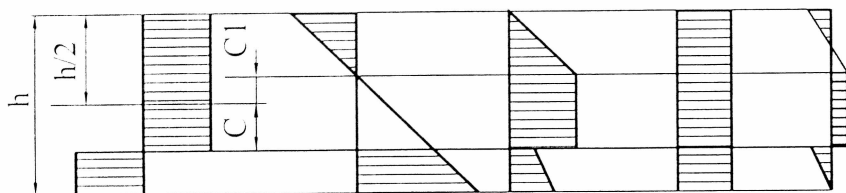


Рисунок 6

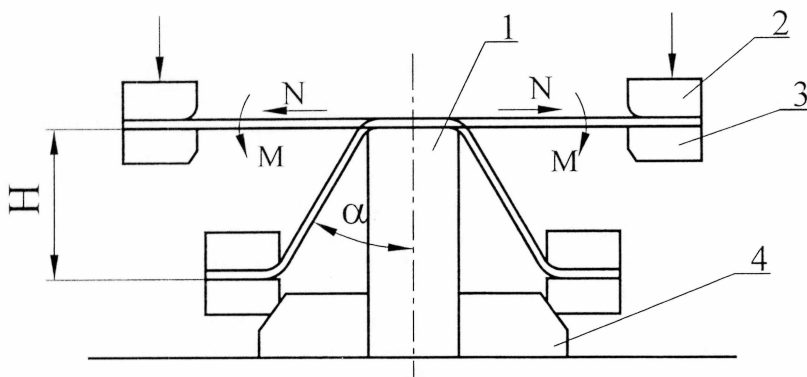


Рисунок 7

Данная формула служит для проверки возможности совмещения изгиба с пластическим растяжением. По заданным значениям  $r$ ,  $h_0$  и показателей механических свойств, получаем нижнюю оценку утонения, фактическое утонение будет несколько больше, так как напряжение пластического растяжения невозможно точно ограничить величиной  $\sigma_{02}$ . Уравнение (3) имеет два корня, физический смысл их состоит в том, что сила  $N_{\min}$  может быть достигнута дважды: до превышения предела устойчивого растяжения и после. Для стали 08кп и  $r/h = 1$  значения этих корней:  $\Delta h/h = 0,04$  и  $0,4$ . Если нейтральный радиус гибки совпадает с внутренней поверхностью листа, т.е.  $\rho_n = r$ , то  $\Delta h/h = 0,27$ . Следовательно, пластическое

растяжение стенок профиля обеспечивается с запасом.

Расчет пружинения радиусных участков профиля алгоритмизирован следующим образом. Рассчитывается положение нейтрального слоя, при котором составляющая эпюры напряжений равна растягивающей силе, и последующее изменение напряжений при разгрузке с учетом пластического характера последней в части толщины материала. Изменение кривизны нейтрального слоя  $\Delta\xi = 1/\rho_{H2} - 1/\rho_{H1}$  связано с изменением угла  $\Delta\alpha = a\rho_{H1}\Delta\xi$ . В диссертации приведены таблицы расчетных углов пружинения  $\Delta\alpha/a$  при изгибе с одновременным растяжением листов из различных материалов. Из этих данных следует, что приложение растягивающей силы уменьшает пружинение изогнутых заготовок до десяти раз. Наименьшие отношения  $|\Delta\alpha|/a$  соответствуют минимальным радиусам гибки. Углы пружинения заготовок из титановых сплавов на порядок больше ввиду интенсивного упрочнения и низкого модуля упругости этих материалов, также в этом случае сказываются относительно большие значения радиусов гибки.

### Основные результаты и выводы

1. Традиционные технологии формообразования деталей корытообразного сечения методами листовой штамповки и профилирования не удовлетворяют требованиям к точности профилей и других элементов конструкций ответственного назначения, наиболее перспективной представляется обтяжка в штампах при условии достаточной пластичности обрабатываемых материалов, позволяющей формировать относительно малые штамповочные радиусы  $r$  порядка толщины листа  $h$ .

2. Нижняя оценка  $r/h$  при изгибе листа с одновременным растяжением получена теоретически из условия распространения пластических деформаций за пределы изогнутых участков, что обеспечивает плоскостность стенок деталей: в зависимости от отношения  $\sigma_{02}/\sigma_b = 0,6...0,7$  значения  $r_{min}/h = 0,7...1,0$ . В случае предварительного изгиба на угол около  $45^\circ$  последующее пластическое растяжение распространяется на изогнутые участки лишь при относительно больших  $r/h \geq 4...10$ .

3. Изгиб на кромках инструмента неоднозначно влияет на сопротивление изогнутых участков листа растягивающей силе: по сравнению с плоскими участками оно может быть пониженным вследствие давления кромок либо повышенным в результате дополнительного упрочнения от изгиба; при испытании образцов на обтяжку до разрушения в зависимости от отношения радиуса кромок к толщине листа  $r/h$  разрушается изогнутый или плоский участок. Установлены значения  $r/h$ , при которых исключается разрушение листа на кромках инструмента: они ограничены по минимуму значениями 0,55 и 1,2 соответственно для стали 08кп и сплава Д16М, что превышает на 20-30% минимальные радиусы, приведенные в справочной литературе для гибки на  $90^\circ$  без растяжения материала.

4.Опытная штамповка профилей с применением обтяжки, а также по традиционной схеме штамповки, предусматривающей калибровку стенок деталей нормальным давлением, подтвердила преимущества обтяжки:

- неплоскостность стенок деталей при степени растяжения 5-7% не превышает допуска на толщину материала;

- отклонения толщины листа от номинальной не влияют на показатель неплоскостности, тогда как при традиционной штамповке они снижают эффект калибровки;

- взаимная подгонка пуансона и матрицы обтяжки не требуется, они имеют простую форму, универсальную по отношению к угловым размерам и глубине детали.

5.При штамповке профилей с зафиксированными краями заготовок предельный угол наклона боковых стенок составляет около  $45^\circ$ , при этом наблюдается местная утяжка заготовок по ширине, что требует назначения припусков на обрезку профиля по торцам. Дальнейшее увеличение угла возможно за счет встречного перемещения краев заготовки в процессе обтяжки либо путем предварительного формирования профиля и последующего растяжения его наклонных стенок.

6.На основании теоретического и экспериментального исследования разработана схема нагружения заготовок при гибке-обтяжке в штампах, согласно которой изгиб сопровождается возрастающим натяжением материала и заканчивается дополнительным растяжением при постоянном значении угла наклона боковых стенок профиля, которые формируются без контакта со штамповым инструментом. Соответствующие способ и устройство защищены патентами РФ.

7.Разработана методика расчета утонения заготовок в процессе обтяжки, а также пружинения при разгрузке от действия момента и растягивающей силы; установлена существенная роль пассивных пластических деформаций, которые вызывают уменьшение или увеличение пружинения на величину порядка 50% в зависимости от схемы разгрузки.

8.Разработанная математическая модель пружинения радиусных участков профиля алгоритмизирует численный расчет изгибающего момента до начала разгрузки и эволюцию напряженного состояния в процессе разгрузки с учетом неупругого характера последней в части толщины листа. При одновременном изгибе и растяжении заготовок из стали 08кп расчетные углы пружинения не превышают 0,3% от угла гибки.

9.Разработанная технология штамповки обтяжкой, по сравнению с применением калибровки, обеспечивает уменьшение неплоскостности стенок деталей на 50 - 70% при одновременном снижении потребной мощности прессов в 3 - 5 раз, удешевлении и универсализации штамповой оснастки. Разработанная технология передана Орловскому предприятию АО Дормаш для использования при подготовке производства новых изделий.



**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих работах:**

1. Прогрессивные технологические процессы гибки листовых заготовок / С.И.Вдовин, Д.В.Голенков, В.А.Жердов, С.В.Семен //Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – № 1. – С. 19 – 21.
2. Вдовин С.И., Голенков Д.В. Тестирование программ, моделирующих пластическое деформирование //Моделирование и критерии подобия процессов развитого пластического формоизменения: Тезисы докладов. Международный научно-технический симпозиум. – Орел, 1996. – С. 26 – 27.
3. Вдовин С.И., Голенков Д.В. Гибка-обтяжка листа на малый радиус //Механика и технология в процессах формоизменения с локальным очагом пластической деформации: Тезисы докладов. Международный научно-технический семинар. – Орел, 1997. – С. 5.
4. Вдовин С.И., Голенков Д.В., Жердов В.А. Применение операции обтяжки для листовой штамповки изделий корытообразного сечения //Исследования в области теории, технологии и оборудования обработки металлов давлением. Межвузовский сборник научных трудов. – Орел-Тула, 1998. – С. 175 – 179.
5. Пат. 2122479 (РФ) В21D 22/02. Способ гибки деталей корытообразного сечения / С.И.Вдовин, Д.В.Голенков – №97101301; Заявлено 30.01.97; Опубл. 27.11.98. //Изобретения. – М.: 1998. – Бюлл. №13.
6. Пат. 2122480 (РФ) В21D 22/02. Штамп для гибки деталей корытообразного сечения / С.И.Вдовин, Д.В.Голенков – №97101529; Заявлено 30.01.97; Опубл. 27.11.98. //Изобретения. – М.: 1998. – Бюлл. №13.
7. Вдовин С.И., Голенков Д.В. Обтяжка листового металла по скругленным кромкам пуансона. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – №7. – С. 3 – 4.
8. Вдовин С.И., Голенков Д.В. Новая технология изготовления листовых профилей корытообразного сечения //Человек и космос: Тезисы докладов 2-й всеукраинской научно-практической конференции с международным участием. – Днепропетровск, 2000. – С. 168.
9. Голенков Д.В. Одноосное растяжение листа с защемленными краями //Механика деформируемого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ, – 2002. – Ч. 1. – С. 59 – 61.

Подписано в печать 09.10.2002. Формат бумаги 60X84 1/16.  
Офсетная печать. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ №16/40

Отпечатано на полиграфической базе  
Орловского государственного технического университета  
Адрес: 302020, г.Орел, Наугорское шоссе, 29