

На правах рукописи

Еськина Елена Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ
ПОЛИУРЕТАНА ПРИ СТЕСНЕННОМ ИЗГИБЕ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Самара – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ) на кафедре производства летальных аппаратов и управления качеством в машиностроении

Научный руководитель

член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
Барвинок Виталий Алексеевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор
Костышев Вячеслав Александрович

кандидат технических наук, доцент
Чертков Геннадий Вячеславович

Ведущая организация Федеральное государственное унитарное предприятие государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара)

Защита состоится 12 ноября 2010 года в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.215.03 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ) по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 8 октября 2010 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Клочков Ю.С.

Актуальность работы. В конструкциях летательных аппаратов имеется много силовых деталей, изготовленных методами штамповки из листового материала. Отличительной особенностью листовой штамповки является ее высокая производительность, рациональное использование исходного материала, широкие возможности механизации и автоматизации технологических процессов, возможность изготовления жестких деталей при небольшой их массе.

Процессы штамповки-гибки широко применяются при изготовлении самых разнообразных деталей летательных аппаратов. При этом недостатками профилей, получаемых традиционной гибкой, являются большие радиусы закругления, утонение материала в зонегиба, что резко снижает их прочность и жесткость, а также пружинение детали после снятия нагрузки, что препятствует получению необходимой точности. Для устранения этих недостатков используют процессы гибки листовых деталей методом стесненного изгиба.

Широкими возможностями обладает штамповка с использованием эластомеров, основное достоинство которой – значительное упрощение, снижение металлоемкости и стоимости технологической оснастки. Сочетание процессов стесненного изгиба и использование преимуществ штамповки полиуретаном позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей профилей. Однако, из-за отсутствия достаточно точного количественного описания большого числа факторов, оказывающих влияния на процесс стесненного изгиба листовых деталей с использованием эластомеров, этот процесс изучен недостаточно.

Таким образом, задача по разработке и исследованию стесненного изгиба листовых деталей летательных аппаратов с использованием полиуретана является актуальной и позволит решить важную научно-техническую проблему повышения эффективности заготовительно-штамповочного производства.

Цель работы – повышение производительности, снижение трудоемкости и материальных затрат при изготовлении профилей штамповкой полиуретаном методом стесненного изгиба.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать способ изготовления профилей методом стесненного изгиба с использованием полиуретанового пуансона.
2. Разработать математическую модель процесса стесненного изгиба листовой заготовки с учетом воздействия эластичного пуансона.
3. Провести комплекс теоретических исследований напряженно-деформированного состояния эластичного пуансона и заготовки методом конечных элементов с использованием программного продукта ANSYS.
4. Провести комплекс теоретических и экспериментальных исследований влияния основных параметров процесса на характеристики получаемых деталей (утолщение материала в зонегиба, угол пружинения, радиусгиба).

5. Разработать конструкцию опытно-промышленного штампа для стесненного изгиба листовых деталей.

6. Разработать практические рекомендации для применения процесса стесненного изгиба в штампе с использованием полиуретана в условиях производства.

Автор выносит на защиту

1. Математическую модель процесса стесненного изгиба с использованием полиуретана в условиях сложного силового нагружения.

2. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния заготовки и эластичного пуансона при стесненном изгибе.

3. Результаты исследования влияния основных параметров процесса стесненного изгиба на характеристики получаемых деталей.

4. Конструкцию опытно-промышленного штампа для стесненного изгиба листовых заготовок.

5. Рекомендации для применения процесса стесненного изгиба в штампе с использованием эластомера в условиях производства.

Научная новизна

1. Разработан способ стесненного изгиба листовых деталей с использованием полиуретанового пуансона.

2. Впервые разработана математическая модель процесса стесненного изгиба с использованием эластомера на основе метода конечных элементов с использованием программного продукта ANSYS, учитывающая особенности взаимодействия эластомера с обрабатываемыми изделиями.

3. Установлены закономерности, позволяющие разработать теоретически обоснованные рекомендации для проектирования технологического процесса изготовления деталей методом стесненного изгиба с использованием полиуретана.

Практическая значимость

1. По результатам численных и экспериментальных исследований разработана конструктивно-технологическая схема стесненного изгиба листовых деталей полиуретаном.

2. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по расчету и проектированию технологического процесса стесненного изгиба листовых деталей полиуретаном.

3. Разработана конструкция опытно-промышленного штампа для стесненного изгиба листовых деталей полиуретаном.

Внедрение результатов исследований. Разработанные рекомендации по расчету и проектированию технологического процесса и методика расчета основных параметров стесненного изгиба листовых деталей с использованием эластомера приняты к апробации в условиях производства на ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», могут быть внедрены на ОАО «Авиакор – авиационный завод», авиационных предприятиях Воронежа, Ульяновска и др.

Апробация работы. Исследования проводились по программе областного гранта молодых ученых Самарской области. Получена премия

Министерства образования РФ для поддержки талантливой молодежи. Диссертант является лауреатом конкурса ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» среди молодых специалистов 2006 г. Основные результаты работы докладывались на 5 Международных и 5 Всероссийских научно-технических конференциях.

Публикации

По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 24 печатных работы, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Получено 5 патентов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка использованных источников и приложения. Работа изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследования.

В первой главе выполнен обзор работ, посвященных вопросам получения гнутых профилей методом стесненного изгиба, современное состояние теории, технологии и оборудования для их производства.

Разработкой технологии стесненного изгиба с 1963 года и по настоящее время занимались такие ученые, как Г.В. Проскуряков, И.И. Калужский, В.И. Ершов, А.С. Чумадин, А.М. Дмитриев, В.А. Барвинок, А.Д. Комаров, И.М. Закиров, В.И. Филимонов, Ю.М. Арышенский, И.М. Колганов, В.А. Ходырев, М.В. Хардин, П.Н. Куприн, Д. Пирсон, Ч. Янг и другие отечественные и зарубежные ученые. Ими разработаны различные технологические способы изготовления профилей из ленты и листовых заготовок.

При волочении в инструментальной фильере происходит свертывание заготовки при одновременном действии сжимающих усилий по ее кромке.

Для стесненной гибки-прокатки характерно то, что ролики образуют замкнутый калибр, в котором за счет уменьшения ширины материала происходит его утолщение в местегиба.

Схема гибки волочением в роликах близка к гибке-прокатке, однако здесь ролики не приводные, а свободно вращающиеся. Движение заготовки осуществляется тянущим усилием.

Гибка проглаживанием по пуансону позволяет локализовать тангенциальные усилия в непосредственной близости от зоныгиба, однако происходит нарушение поверхности заготовки из-за значительных аксиальных усилий, прикладываемых к заготовке со стороны матрицы.

При гибке в штампах можно создать большие сжимающие усилия, а следовательно, получить довольно малые радиусыгиба с большим утолщением материала.

Каждая из отмеченных схем стесненного изгиба имеет свои особенности, чем и обусловлена область их применения. Выбор метода производства гнутого профиля зависит от его типоразмера, требований к нему

и имеющегося на предприятии или приобретаемого оборудования, что определяет технологическую эффективность.

Широкими возможностями обладает стесненный изгиб эластомерами. В результате экспериментов по стесненному изгибу эластичной средой в зоне радиуса сопряжения получено утолщение до 8...23%. При этом пружинение изгибаемых бортов уменьшается в несколько раз и при $r/S_0 \leq 3$ не превышает 1° (для сплавов Д16 и АМг6). Недостатком известных способов стесненного изгиба с применением полиуретана является необходимость наличия дополнительной оснастки для осуществления предварительной гибки заготовки.

Анализ теоретических исследований стесненного изгиба показал, что гипотеза плоских сечений, которую принимают при обычной гибке, не правомерна, и ряд авторов предлагает свои решения данного вопроса. Теоретический анализ стесненного изгиба с учетом анизотропии и упрочнения материала приведен профессором Арышенским Ю.М. Для анализа стесненного изгиба использовался метод малого параметра. В результате были получены выражения для определения напряжений и деформаций в любой точке очага деформации. Рядом автором были проведены исследования и получены соотношения для определения предельных возможностей процесса стесненного изгиба, но данные соотношения не могут быть применены для процесса стесненного изгиба с помощью полиуретана из-за возникающих дополнительных факторов, влияющих на процесс.

Процесс стесненного изгиба с помощью эластомера рассмотрен не так широко, в основном исследования проводились профессором А.Д. Комаровым. Им получены выражения для определения угла пружинения и оптимального значения высоты превышения борта, необходимого для осуществления стесненного изгиба.

Использование штампов с применением полиуретана, в которых матрица или пуансон представляет собой эластичную подушку из полиуретана, существенно снижает затраты на производство за счет снижения металлоемкости и трудоемкости наладки штампа. Применение эластомеров в процессе обработки металлов давлением связано с их уникальными механическими свойствами, а именно с тем, что в условиях эксплуатации они находятся в высокоэластичном состоянии. Это прежде всего способность к большим обратимым деформациям при сравнительно небольших значениях модуля упругости, а также способность поглощать и рассеивать механическую энергию, которые проявляются в широком температурном интервале, включая комнатную температуру. В связи с этим при изучении процесса стесненного изгиба листовых деталей с использованием эластомера чисто теоретические исследования слабо применимы.

Таким образом, проведенный анализ существующих работ говорит о необходимости разработки способа реализации стесненного изгиба с использованием полиуретанового пуансона, а также его изучения с применением современного программного продукта, учитывающего особенности взаимодействия эластомера с обрабатываемыми изделиями.

На основании проведенного анализа сформулирована цель и связанные с ней задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты математического моделирования и численных исследований деформационного процесса при стесненном изгибе листовой детали полиуретаном. Исследования проводили методом конечно-элементного моделирования с применением программного комплекса "ANSYS".

Основными этапами математического моделирования с применением метода конечных элементов являются:

1) создание геометрической модели, пригодной для метода конечных элементов; 2) разбиение модели на сетку конечных элементов; 3) задание свойств материалов и констант; 4) приложение к модели граничных условий (закрепление на границе или граничные нагрузки); 5) численное решение системы уравнений; 6) анализ результатов.

Для математического описания процесса деформирования использовали основные уравнения механики деформируемого тела.

В основу теоретической задачи математического моделирования положен принцип виртуальной работы, согласно которому очень малое (виртуальное) изменение внутренней энергии деформаций должно компенсироваться таким же изменением внешней работы приложенных к телу нагрузок, т.е.

$$\delta U = \delta V, \quad (1)$$

где U - энергия деформации (внутренняя работа); V - внешняя работа; δ - символ виртуального приращения.

Нагружение тела считается квазистатическим. При этом массовые и инерционные силы не учитываются. Деформации и напряжения Мизеса вычисляются по известным формулам механики твердого тела.

Материал эластичного инструмента принимается гиперупругим. Для гиперупругих материалов уравнение связи между напряжениями и деформациями представляется в виде упругого потенциала (или плотности энергии деформации) Муни-Ривлина, которое имеет следующий вид для используемой в данном случае двухпараметрической модели:

$$W = a_{10} (I^*_1 - 3) + a_{01} (I^*_2 - 3) + 0,5 k (I^*_3 - 1)^2, \quad (2)$$

где I^*_i - редуцированные инварианты деформации в i -ом направлении; k - объемный модуль; a_{10} , a_{01} - константы Муни-Ривлина для эластоплимерного материала, определяемые экспериментально.

На первом этапе исследований была создана адекватная конечно-элементная модель процесса стесненного изгиба с использованием эластомера, представленная на рисунке 1. Конечно-элементная модель содержит 4 подконструкции. Первая подконструкция моделирует жесткую матрицу, вторая - моделирует заготовку, третья - эластичный пуансон, четвертая - корпус. Нагружение производилось путем последовательного перемещения жесткого корпуса вниз по оси Y .

На рисунке 2 представлено поэтапное образование П - образной детали из листовой заготовки стесненным изгибом, соответствующее реальной картине деформирования. Как видно из рисунка - на первом этапе деформирования заготовка изгибается вначале в полуцилиндр (рисунок 2а).

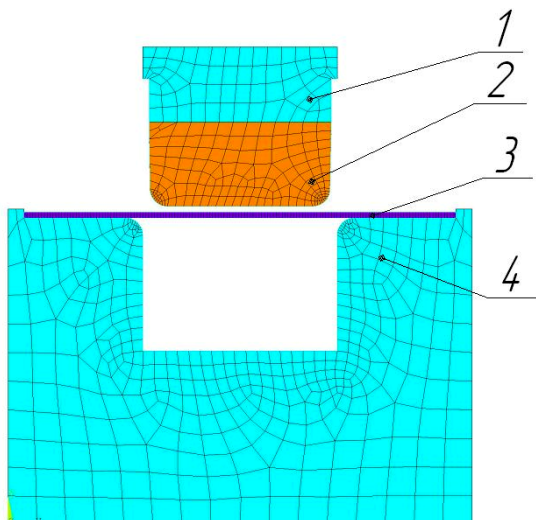


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель:
 1 – корпус; 2 – полиуретановый пуансон;
 3 – заготовка; 4 – матрица

На следующем этапе эластичный пуансон деформируется, изгибая заготовку из полуцилиндрического в уголкового сечение по радиусу, большему минимально допустимого при обычной гибке (рисунок 2б). Окончательное деформирование заготовки производится уступами корпуса, которые передают усилие прессы на торцы изгибаемых полок (рисунок 2в). На рисунке 2г показана деталь после снятия нагрузки.

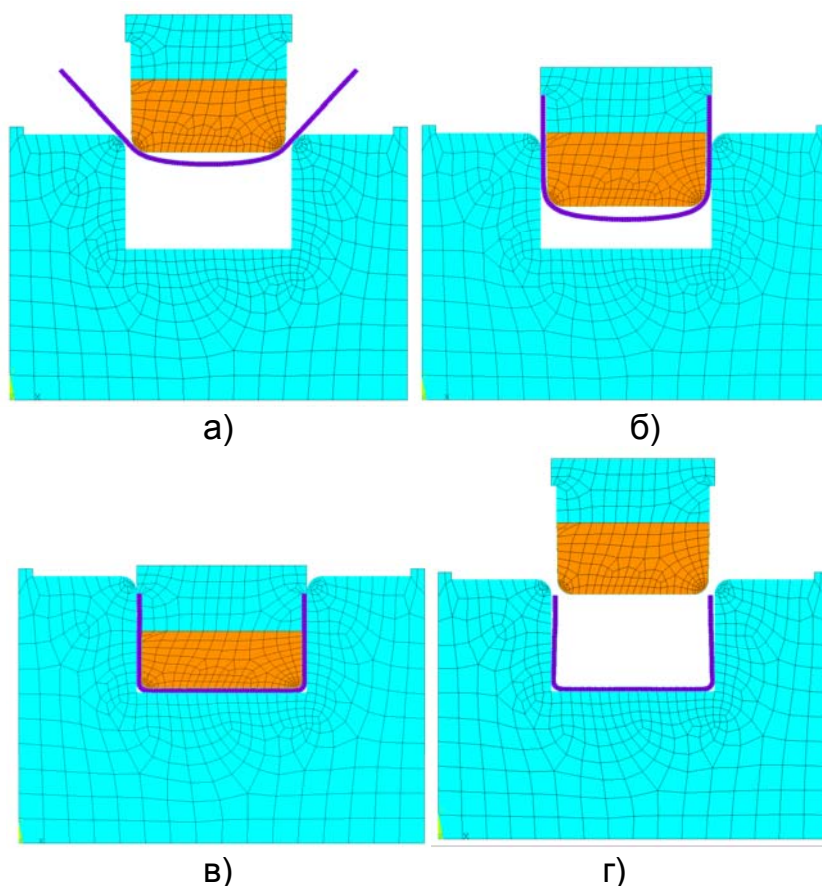


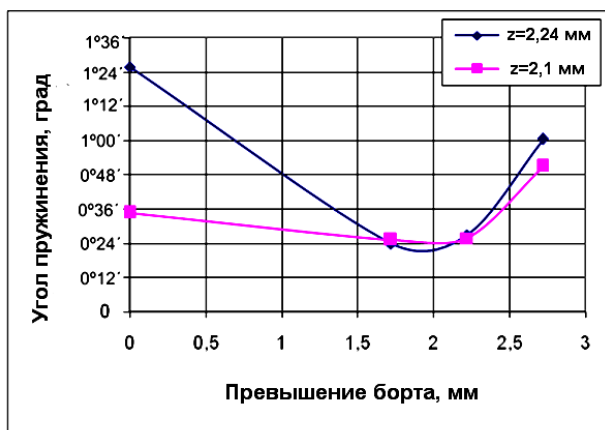
Рисунок 2 – Этапы образования П - образной детали из листовой заготовки стесненным изгибом: а) и б) начальные этапы формоизменения; в) конец передачи усилий с корпуса на торцы заготовки; г) деталь после снятия нагрузки

В реализации численных исследований коэффициент Пуассона эластоплимерного материала принимался $\nu=0,496$, коэффициенты трения по контактными поверхностям имеют фиксированные значения. Основными варьируемыми параметрами при исследованиях являлись материал заготовки, превышение борта, относительная осадка полиуретанового пуансона и гарантированный зазор между пуансоном и матрицей. С

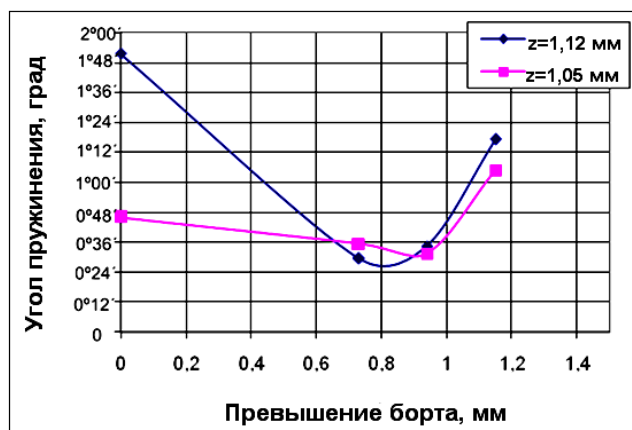
использованием разработанной конечно-элементной математической модели на первом этапе исследовалось влияние превышения борта ($\Delta H = \frac{S_0/2}{r_0 + S_0/2} \cdot \frac{\pi(r_0 + S_0)}{2}$ от 0 до 2,72 мм, где S_0, r_0 – толщина заготовки и радиус скругления) на основные параметры детали (угол пружинения, утолщение материала в зонегиба). Исследования проводились для материалов АМцМ, АМг6М, Д16АМ, Д16АТ толщиной от 0,8 до 3 мм с радиусом скругления от 1 до 4 мм.

Численными исследованиями установлено следующее:

1. Угол пружинения (упругой отдачи) имеет отрицательное значение. С увеличением превышения борта угол пружинения борта уменьшается, но до определенного момента, затем увеличивается (рисунок 3). При $r/s = 1$ оптимальным значением превышения борта является 2,12 мм, при $r/s = 2 - 0,94$ мм.



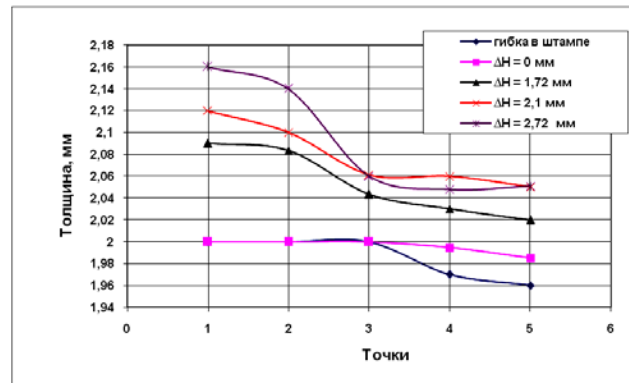
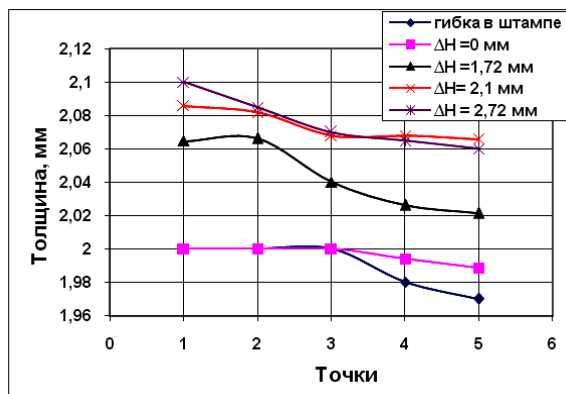
а)



б)

Рисунок 3 – Характер зависимости угла пружинения от превышения борта на примере материала АМг6М (z – зазор между пуансоном и матрицей): а) $r = 2$ мм, $s = 2$ мм; б) $r = 2$ мм, $s = 1$ мм

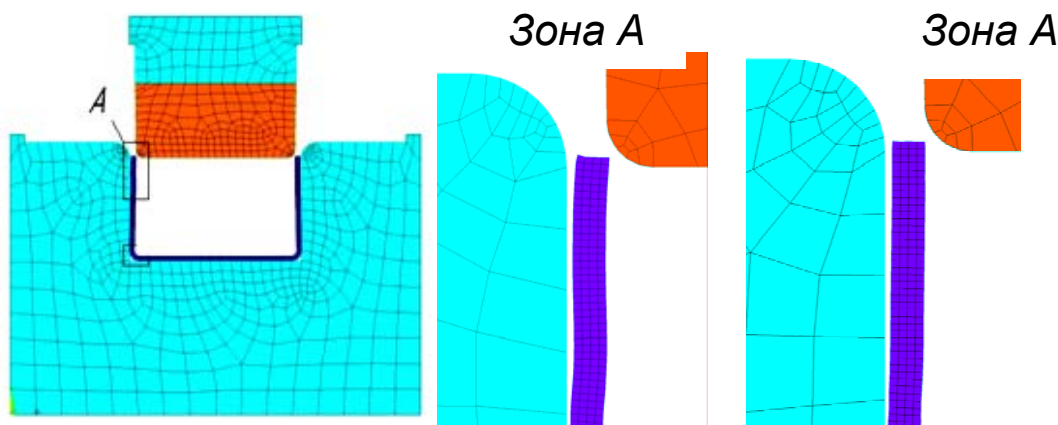
2. С увеличением превышения борта наблюдается утолщение материала изгибаемой детали как в зонегиба, так и в изгибаемых полках. Причем при значительном превышении борта ($\Delta H = 2,72$ мм) набор толщин происходит в большей степени в зоне вертикальной стенки, а не в зоне скругления (рисунок 4), в краевой области стенки наблюдается образование гофров (рисунок 5).
3. С увеличением превышения борта в зоне скругления детали возникают большие сжимающие деформации и, соответственно, напряжения, которые могут привести к возникновению трещин в зоне скругления (рисунок 6). Так, например, для материала заготовки АМг6М при превышении борта на 2,72 мм в зоне изгиба формируются сжимающие напряжения порядка 915МПа, что значительно превышает прочностные параметры материала АМг6М. При превышении борта на 2,1мм в зоне изгиба формируются максимальные сжимающие напряжения равные 278 МПа, что ниже предела прочности $\sigma_B = 330$ МПа.



а)

б)

Рисунок 4 - Изменение толщины борта для различных значений превышения борта (материал АМг6М, $r = 2$ мм, $s = 2$ мм): а) $z = 2,1$ мм; б) $z = 2,24$ мм

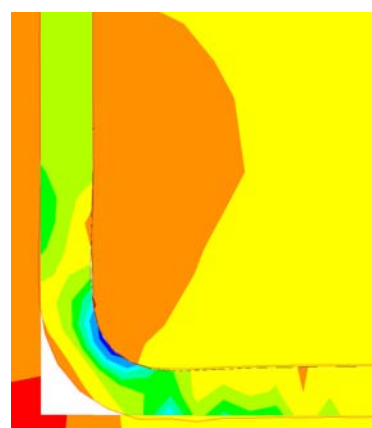
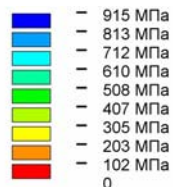
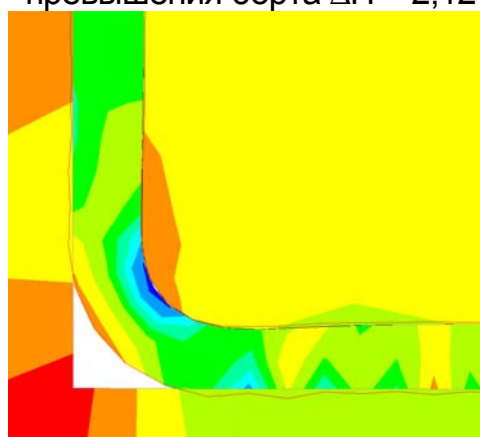


а)

б)

в)

Рисунок 5 – Вид борта при различных превышениях борта: а) общий вид модели; б) при величине превышения борта $\Delta H = 2,72$ мм; в) при величине превышения борта $\Delta H = 2,12$ мм



а)

б)

Рисунок 6 – Напряженно-деформированное состояние детали из материала АМг6М в зонегиба: а) при превышении борта $\Delta H = 2,72$ мм; б) при превышении борта $\Delta H = 2,12$ мм

На втором этапе исследований было изучено влияние высоты полиуретанового пуансона и его относительной осадки на параметры стесненного изгиба. Исследования проводились на материалах АМцМ,

Д16АМ, Д16АТ, АМг6М для превышения борта 2,12 мм, отношения $r/s = 1$. Высота полиуретанового пуансона бралась 38, 41 и 44 мм.

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что с увеличением осадки пуансона значительно возрастает пружинение (рисунок 7) и утолщение борта, при этом утолщение материала в зонегиба не наблюдается, также возрастают напряжения в зоне скругления материала заготовки. Поэтому оптимальной будет осадка полиуретанового пуансона на 14-21%.



Рисунок 7 - Зависимость пружинения от относительной осадки полиуретанового пуансона при $r = 2$ мм, $s = 2$ мм (материал АМг6М)

На третьем этапе численных исследований рассмотрен характер влияния высоты самого борта на параметры детали (утолщение). Исследование проводилось на материалах АМцМ, Д16АМ, Д16АТ, АМг6М для борта высотой 10, 20, 30, 40, 50 мм; $r = 2$ мм, $s = 2$ мм; превышение борта составляло 2,11 мм. При уменьшении высоты борта утолщение происходит более равномерно, при высоте борта равной 50 мм наблюдается потеря устойчивости борта, выражающаяся в искривлении его в осевом направлении.

Это объясняется тем, что усилие формоизменения передается в очаг деформации через борт. В результате численных исследований установлено, что наиболее равномерного распределения материала по толщине детали удастся достигнуть для материалов АМцМ и Д16АМ. Углы пружинения для этих же материалов минимальны в сравнении с другими материалами. Установлено также, что распределение утолщения для материала Д16АТ не равномерное.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований деформационных процессов при стесненном изгибе листовых деталей с использованием полиуретана.

Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован при участии автора и изготовлен экспериментальный штамп, который позволяет реализовать новый способ изготовления профилей методом стесненного изгиба с помощью полиуретана (рисунок 8). В экспериментальных исследованиях использовался гидравлический пресс марки РУЕ-250. С целью оценки адекватности созданных математических моделей процесса стесненного изгиба с использованием эластомера была проведена серия экспериментов. Экспериментальное исследование влияния величины превышения борта, относительного сжатия полиуретанового пуансона и зазора между пуансоном и матрицей на качество получаемых деталей проводилось на алюминиевом сплаве АМг6М, толщиной 2 мм.

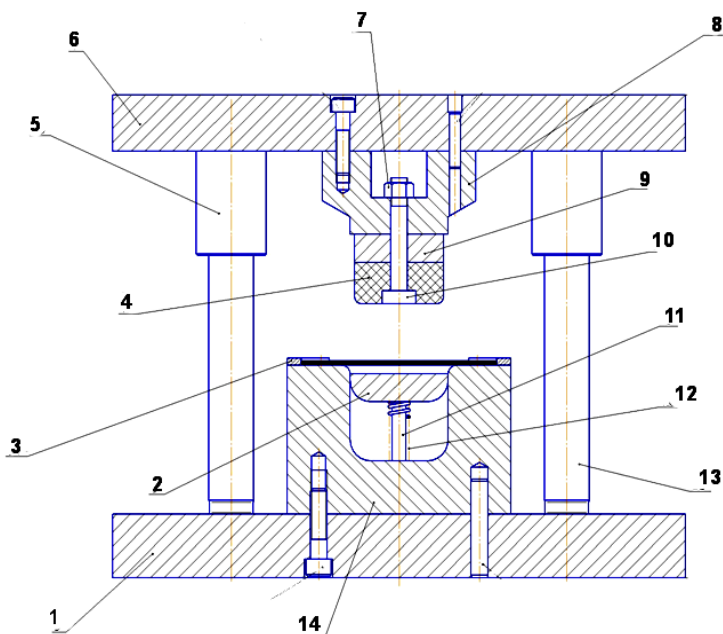
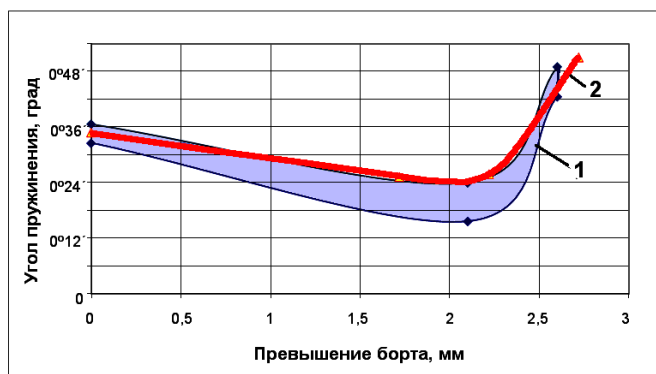
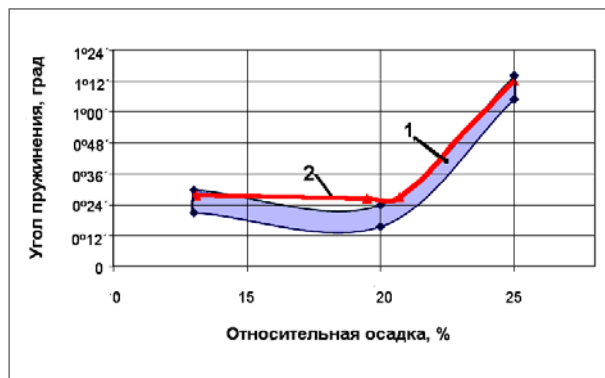


Рисунок 8 –Схема экспериментального штампа (Патент № 40230 РФ): 1- нижняя монтажная плита; 2- выталкиватель; 3- фиксаторы; 4 – полиуретановый пуансон; 5 – направляющая втулка; 6 – верхняя монтажная плита; 7 – гайка; 8 – корпус; 9- пуансонодержатель; 10- болт; 11 – шпилька; 12 – пружина; 13 – направляющая колонка; 14 – матрица

На рисунке 9 показано сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов процесса стесненного изгиба с использованием эластомеров.



а)



б)

Рисунок 9 – Сравнение результатов экспериментальных данных (1) и математического моделирования (2) процесса деформирования материала АМг6М, $r=2$ мм, $S_0 = 2$ мм; $z = 2,1$ мм: а) зависимость угла пружинения от превышения борта (относительная осадка полиуретана – 20%); б) зависимость угла пружинения от относительной осадки полиуретана ($\Delta H = 2,1$ мм)

Исследование возможностей процесса деформирования тонколистовых металлов с различными механическими свойствами проводились на материалах АМцМ, Д16АМ, АМг6М, Д16АТ. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что математическая модель процесса стесненного изгиба с использованием эластомера имеет в целом хорошую сходимость с экспериментальными результатами с погрешностью в пределах 11-14 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели реальному процессу.

В четвертой главе для повышения эффективности процесса, а именно для снижения времени подготовительных работ была усовершенствована конструкция экспериментального штампа. Данный штамп позволяет за один ход пресса производить отрезание заготовки от полосы и стесненный изгиб

двухугольных деталей. Основными элементами конструкции штампа, являются полиуретановый пуансон, матрица и нож, осуществляющий отрезание заготовки от полосы (Патент № 64115 РФ, 65797 РФ).

Для практической реализации процесса стесненного изгиба листовых деталей с использованием полиуретана приведены технологические рекомендации для реализации. Для этого, используя результаты численных исследований, установлены оптимальные значения конструктивно-технологических параметров данного метода стесненного изгиба и зависимости относительного радиуса пуансона r_p/r (r_p - радиус пуансона, r – радиус скругления) от толщины детали S (рисунок 10).

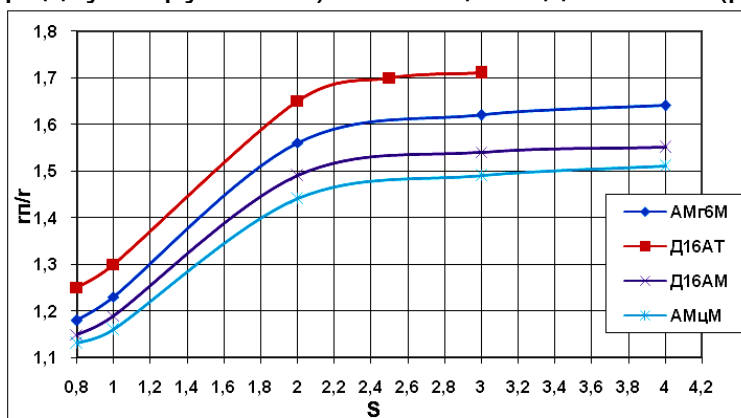


Рисунок 10 – Зависимость относительного радиуса пуансона от толщины детали

Для оценки силовых параметров стесненного изгиба листовых заготовок и технологических возможностей разработана инженерная методика расчета необходимого технологического усилия. Так как процесс изготовления детали происходит в два этапа (вначале отрезка заготовки, а затем стесненный изгиб), то

необходимое усилие пресса принимают по его наибольшему значению, рассчитанному по формулам (3) и (4):

$$P_0 = 0,4 \frac{S^2}{\operatorname{tg} \varphi} \sigma_B, \quad (3)$$

где φ – угол створа ножа в градусах; $\sigma_{ср}$ – сопротивление материала срезу

$$P = P_3 + P_{II} + P_{np}, \quad (4)$$

где P_0 - усилие отрезания заготовки; P_3 - усилие, необходимое для стесненного изгиба заготовки; P_{II} - усилие, необходимое для деформирования эластичного пуансона; P_{np} - усилие сжатия пружины.

Проведен теоретический анализ механизма передачи усилия пресса на нож для отрезки заготовки от полосы через подпружиненный ролик. Получена зависимость усилия ножа от силы пружины, действующей на ролик, радиуса ролика и его положения в гнезде ножа:

$$P_0 = Q \frac{\sqrt{2RH - H^2}}{R - H}, \quad (5)$$

где Q – сила пружины, действующей на ролик; R – радиус ролика; H – величина западания ролика в гнездо ножа в долях радиуса R , то есть $H = n \cdot R$, где $n = 0 \dots 1$.

Разработанный штамп для отрезания заготовки и осуществления стесненного изгиба листовых деталей принят к внедрению на предприятии ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Основные результаты и выводы по работе

1. Решена задача по повышению эффективности производства деталей-профилей, снижению трудоемкости и материалоемкости, повышению производительности процесса за счет разработки способа реализации стесненного изгиба с использованием полиуретанового пуансона.

2. Разработана математическая модель процесса стесненного изгиба с применением эластомера на основе метода конечных элементов с использованием программного продукта ANSYS, учитывающая особенности взаимодействия эластомера с обрабатываемыми изделиями.

3. На основании численных исследований установлено оптимальное значение превышения борта ΔH , обеспечивающего минимальное пружинение бортов при стесненном изгибе листовых деталей с использованием полиуретана. По сравнению с гибкой моментом наблюдается снижение пружинения в 1,5...2,0 раза, минимального радиуса сгиба в 1,8...2,5 раза.

4. Исследования показали, что оптимальная осадка полиуретанового пуансона, при которой достигается минимальное пружинение и наиболее плавно происходит утолщение, составляет 15-21%.

5. Экспериментальные исследования подтвердили достоверность выбранной математической модели процесса. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 11-14 %.

6. Для реализации метода стесненного изгиба листовых деталей с использованием полиуретана разработана конструкция опытно-промышленного штампа.

7. Разработаны практические рекомендации для применения процесса стесненного изгиба в штампе с использованием полиуретанового пуансона в условиях производства.

8. Технология стесненного изгиба листовых деталей с использованием полиуретана принята к апробации в условиях производства на ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», что позволит повысить примерно в 2 раза производительность процесса, снизить трудоемкость в 1,5 раза, получить при изготовлении 24 наименований деталей годовой экономический эффект 96830 в ценах 2009 г.

Основное содержание диссертации опубликовано

в ведущих рецензирующих научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией

1. Комаров, А.Д. Штамп для стесненного изгиба листовых заготовок [Текст]/ А.Д. Комаров, В.А. Барвинок, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко, А.А. Шаров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением.- М.: машиностроение, 2005. - №12. – С. 12-17.

2. Комаров, А.Д. Разработка и исследование процесса стесненного изгиба в штампе с использованием эластичного пуансона [Текст]/ А.Д. Комаров, **Е.В. Еськина**, Н.Ю. Паникарова // Вестник СГАУ.- Самара: СГАУ, 2009. - № 2 (18). –С. 75-81.

в других изданиях

3. Комаров, А.Д. Стесненный изгиб листовых деталей [Текст]/ А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // Тезисы док.

- Всеросс. научно-технич. конференции «Новые материалы и технологии НМТ-2004»-М.: ИЦ «МАТИ» – РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2004г. - С. 171-172.
4. Комаров, А.Д. Штамп для стесненного изгиба листовых деталей [Текст]/ А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // Решетневские чтения: материалы VIII Всеросс. науч.конф. с междунар. участием – СибГАУ. – Красноярск,2004. – С. 135-136.
5. **Овчинникова, Е.В.** Штамп для стесненного изгиба листовых деталей [Текст]/ **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // XII Туполевские чтения: международ. молодежная науч. конференция. Казань, 2004г. Том 1.-С. 54-55.
6. Патент 40230 РФ, 7 В 21 D 22/10. Штамп для изгиба листовых деталей[Текст]/ А.Д.Комаров, В.К. Моисеев, Е.В. Овчинникова и др./№ 2004112655; Заявлено 27.04.2004; Оpubл. 10.03.2004 Бюл. № 25 – 2004.
7. **Овчинникова, Е.В.** Исследование влияния разброса мех. свойств и толщин листовых материалов в пределах допусков на величину упругой отдачи при гибке [Текст]/ **Е.В. Овчинникова** // Студ.наука аэрокосмическому комплексу. Сб.трудов студентов и аспирантов факультета ЛА. Выпуск 7. Самара: СГАУ,2005.- С. 75-78.
8. **Овчинникова, Е.В.** Стесненный изгиб листовых деталей [Текст]/ **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // Студенческая наука аэрокосмическому комплексу. Сборник трудов студентов и аспирантов факультета летательных аппаратов. Выпуск 7. Самара: СГАУ.2005.- С. 79-82.
9. **Овчинникова, Е.В.** Штамп для отрезки и стесненного изгиба листовых деталей [Текст]/ **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // XII Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, посвященная 1000-летию города Казани. - Казань: Изд-во Казан.гос.техн. ун-та. 2005. – С.62-63.
10. Комаров, А.Д. Штамп для отрезки заготовок и стесненного изгиба листовых деталей [Текст]/ А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // Решетневские чтения: материалы IX Международной науч. конф.– СибГАУ. – Красноярск,2005. – С. 185-186.
11. Патент 46954 РФ, В 21 D 22/10. Штамп для отрезки заготовки и изгиба листовых деталей / А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, **Е.В. Овчинникова** и др./ № 2004138433/22; Заявлено 27.12.2004; Оpubл. 10.08.2005. Бюл. №22.-2005.
12. Барвинок, В.А. Стесненный изгиб листовых деталей [Текст]/ В.А. Барвинок, А.Д. Комаров, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко// Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXX Академических чтений по космонавтике /Под ред. А.К. Медведевой. М.: комиссия РАН по разработке науч.наследия пионеров освоения космич. пространства, 2006.-С. 416-417.
13. Комаров, А.Д. Повышение качества изготовления деталей из листа стесненным изгибом [Текст]/ А.Д. Комаров, **Е.В. Овчинникова**, А.А. Докукина // Сборник материалов пятой всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством», ГОУ ВПО «МАТИ» - Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского.- М.:МАТИ, 2006.- С. 50-51.
14. Барвинок, В.А. Интенсификация процесса стесненного изгиба деталей из листа [Текст]/ В.А. Барвинок, А.Д. Комаров, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // Материалы и технологии XXI века: сборник статей IV Междунар.

научно-технической конференции. – Пенза, 2006. – Пенза.: Приволж. дом знаний, 2006. – С. 102-104.

15. Барвинок, В.А. Стесненный изгиб листовых деталей/ [Текст]/ В.А. Барвинок, А.Д. Комаров, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко, А.А. Шаров // Проблемы и перспективы развития двигателестроения/ Материалы докладов междунар.науч.-техн.конф.– Самара: СГАУ, 2006. – В 2 Ч. - С. 113-115.

16. Комаров, А.Д. Стесненный изгиб листовых деталей [Текст]/ А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // 5-я международная конференция «Авиация и космонавтика-2006».- М.: Изд-во МАИ, 2006.-С. 206-207.

17. **Овчинникова, Е.В.** Штамп для отрезки заготовок и стесненного изгиба деталей из листовых материалов [Текст]/ **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // Студенческая наука аэрокосмическому комплексу. Сб. трудов студентов и аспирантов факультета ЛА. Выпуск 8. Самара: СГАУ, 2006.- С. 66-69 .

18. **Овчинникова, Е.В.** Квалиметрическая оценка качества деталей, полученных из листа стесненным изгибом [Текст]/ **Е.В. Овчинникова**, Н.А. Терехина // IX Королевские чтения: материалы Всероссийской молодежной научной конференции с международ. участием.- Самара: СГАУ, 2007.- С. 142.

19. **Овчинникова, Е.В.** Исследование процесса стесненного изгиба листовых заготовок эластомерами [Текст]/ **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко // IX Королевские чтения: материалы Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием.- Самара: СГАУ, 2007.- С. 305.

20. **Овчинникова, Е.В.** Повышение качества процесса получения деталей из листа стесненным изгибом [Текст]/ **Е.В. Овчинникова** // Сборник научно-технических проектов финалистов и победителей конкурса идей молодых специалистов ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс».- Самара: ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2007.- С. 56-66.

21. Патент 64115 РФ, В 21 D 22/10. Штамп для изгиба листовых деталей/ А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, А.Ю. Костенюк, **Е.В. Овчинникова** / № 2006141265/22; Заявлено 21.11.2006; Оpubл. 27.06.2007; Бюл. № 18.- 2007.

22. Патент 65797 РФ, В 21 D 22/10. Штамп для отрезки заготовки и стесненного изгиба листовых деталей/ А.Д. Комаров, **Е.В. Овчинникова**, И.С. Ткаченко/ № 2006136695/22; Заявлено 16.10.2006; Оpubл. 27.08.2007; Бюл. № 24.- 2007.

23. Патент № 73624 РФ, В 21D 22/10. Штамп для изгиба листовых деталей/ А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, **Е.В. Овчинникова**, К.А. Хивинцев/ № 2008100992; Заявлено 09.01.2008; Оpubл. 27.05.2008; Бюл. № 15.- 2008.

24. Громова, Е.Г. Разработка высокоэффективной технологии обеспечения прочности, точности и надежности листовых деталей изделий ракетно-космической техники методом стесненного изгиба [Текст]/ Е.Г. Громова, **Е.В. Еськина** //IV Всеросс. студ. науч. конф. «Студенческая наука и медицина XXI века: традиции, инновации и приоритеты».- Самара: СГАУ, 2010. – С. 69-70.