

Шумков Алексей Петрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ
ШТАМПОВКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ ПОЛИУРЕТАНА**

Специальность 05.02.09 - Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара - 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ) на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Каргин Владимир Родионович;

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 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.215.03 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 07 октября 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Клочков Ю.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ключевой задачей производственных предприятий аэрокосмической отрасли является повышение эффективности технологических процессов и обеспечение высокого качества изготавливаемых изделий. В связи с этим на многих предприятиях внедрены методы изготовления листовых деталей штамповкой эластичной средой - полиуретаном.

Данные методы являются высокоэффективными при годовых программах выпуска до 10 тысяч штук, что обуславливается низкой стоимостью и простотой штамповой оснастки, минимальными сроками подготовки производства, возможностью применения обычного прессового оборудования. Несмотря на необходимость повышенного усилия прессового оборудования для реализации процесса штамповки деталей полиуретаном подобные методы доказали свою значительную эффективность по сравнению со штамповкой деталей в инструментальных штампах в опытном и мелкосерийном производстве, которое характеризуется частой сменой изделий, а также сжатыми сроками подготовки производства.

Классический способ процесса вырубki деталей эластичной средой предусматривает реализацию разделительного процесса в замкнутом объеме универсального контейнера. Однако использование данной технологической схемы ограничено размерами вырубаемых деталей и, соответственно, размерами существующих универсальных контейнеров.

Вместе с тем в конструктивных элементах топливных систем и других агрегатах ракеты-носителя или планера самолета имеют место тонколистовые крупногабаритные детали сложной геометрической формы. К ним относятся: перегородки топливных баков, панели приборных отсеков, развертки шпангоутов и т.д. Штамповка-вырубка полиуретаном таких деталей в замкнутом объеме контейнера не эффективна, так как для этого требуются металлоёмкие крупногабаритные контейнеры, которые сложны в изготовлении, и мощное дорогостоящее прессовое оборудование.

Вместе с тем для реализации разделительных процессов в изготовлении длинномерных листовых деталей возможно использование вырубki с использованием полузамкнутого и полуоткрытого объемов эластичной среды, в том числе фрагментарным способом с применением гидравлических прессов небольших усилий.

Таким образом, задача по разработке и исследованию интенсификации методов разделительной штамповки листовых деталей давлением полиуретана в полузамкнутом и полуоткрытом способах его воздействия на заготовку является крайне актуальной и позволяет решить задачи снижения материальных затрат, повышения производительности труда, качества изготовления деталей и конкурентоспособности предприятия в целом.

Цель работы. Целью настоящей работы являются повышение производительности процесса и снижение энергетических и материальных затрат на технологическое оснащение при разделительной штамповке листовых средне- и крупногабаритных деталей давлением полиуретана в полузамкнутом и полуоткрытом объемах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать технологию разделительной штамповки листовых средне- и крупногабаритных деталей давлением полиуретана, в том числе фрагментарным способом.
2. Разработать математическую модель контактного взаимодействия эластичного инструмента с листовой заготовкой при вырубке деталей в полузамкнутом и полуоткрытом объемах реализации процесса с использованием различной геометрической формы эластичного инструмента.
3. Провести численные и экспериментальные исследования формоизменения заготовки и эластичного инструмента в условиях реализации процесса разделительной штамповки листовой заготовки давлением в полузамкнутом и полуоткрытом объемах эластичной среды.
4. Исследовать напряженно-деформированное состояние листовой заготовки в очаге разделения при использовании различных конструктивных схем вырубного инструмента.

5. Провести исследования условий повышения качества изготавливаемых деталей разделительной штамповкой давлением эластичной среды в полузамкнутом способе ее воздействия на заготовку с применением локализованного вырубного инструмента.

6. Разработать методику расчета энергосиловых параметров процесса разделительной штамповки листовых деталей при деформационном воздействии эластичной среды на заготовку в полузамкнутом объеме.

7. Разработать конструкции опытно-промышленной оснастки для реализации процессов разделительной штамповки листовых деталей давлением эластичной среды в полузамкнутом объеме.

8. Разработать практические рекомендации для применения процесса разделительной штамповки давлением эластичной среды при изготовлении средне- и крупногабаритных листовых деталей в условиях производства.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны технологические основы способа вырубки листовых деталей давлением эластичного элемента в полузамкнутом и полуоткрытом объемах, в том числе фрагментарно, а также разработан целый ряд технологических инноваций.

2. Разработана комплексная математическая модель разделительного процесса штамповки листовых деталей давлением эластичной среды.

3. На основании численных исследований установлены основные технологические факторы и оптимальные параметры процесса вырубки листовых деталей давлением полиуретана в полузамкнутом и полуоткрытом объемах, обеспечивающих повышенный уровень и равномерность распределения нормального контактного давления полиуретановой матрицы по поверхности заготовки, а также условия разделения в очаге деформирования материала заготовки, обеспечивающие высокое качество и точность изготовления деталей.

4. Разработана методика расчета энергосиловых параметров процесса разделения листовых деталей в полузамкнутом и полуоткрытом объемах эластичной среды.

Методы исследований. Численные математические исследования проводились с применением специализированных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов. Экспериментальные исследования заключались в определении нормального давления в зоне контакта эластичной матрицы с заготовкой, напряжений и деформаций в очаге разделения заготовки, с последующим анализом контура среза. Исследования проводились с использованием современных методик.

Автор выносит на защиту:

1. Технологию разделительной штамповки листовых средне- и крупногабаритных деталей давлением полиуретана в полузамкнутом и полуоткрытом объемах, в том числе фрагментарным способом.

2. Результаты исследований комплексной математической модели целого ряда технологических схем реализации процесса вырубки листовых деталей в полузамкнутом и полуоткрытом объемах полиуретана, включая этап разделения заготовки; исследования контактного взаимодействия заготовки со штамповой оснасткой; исследования напряженно-деформированного состояния полиуретанового элемента и материала заготовки в очаге разделения; исследования точности изготавливаемых деталей; исследования касательных напряжений, вызывающих деформацию заготовки после снятия нагрузки в случае малых толщин материала.

3. Методику расчета энергосиловых параметров процесса разделительной штамповки листовых деталей при деформационном воздействии эластичной среды в полузамкнутом и полуоткрытом объемах.

4. Конструкцию опытно-промышленной оснастки для реализации процессов разделительной штамповки листовых деталей давлением эластичной среды в полузамкнутом и полуоткрытом объемах.

5. Практические рекомендации для применения процесса разделительной штамповки давлением эластичной среды при изготовлении средне- и крупногабаритных листовых деталей в условиях производства.

Практическая ценность.

1. Разработана комплексная математическая модель процесса разделительной штамповки листовых заготовок давлением эластичной среды в полузамкнутом и полуоткрытом объемах, которая применима для расчета параметров различных технологических схем реализации процесса; позволяет существенно сократить затраты на НИОКР; максимально сократить затраты на подготовку производства; проводить все экспериментальные исследования.

2. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по расчету и проектированию технологических процессов и оснастки для разделительной штамповки листовых заготовок давлением эластичной среды в полузамкнутом и полуоткрытом объемах.

3. По результатам моделирования и экспериментальных исследований разработаны высокоэффективные конструктивно технологические схемы универсального штампа со целевым сабельным сегментированным контейнером, универсальной штамповой оснастки для фрагментарной пошаговой вырубki длинномерных деталей, универсального штампа для групповой вырубki среднегабаритных деталей в полузамкнутом объеме эластичной среды, а также разработаны конструкции формообразующего вырубного инструмента для изготовления типовых листовых деталей групповым способом и для фрагментарной вырубki в полузамкнутом и полуоткрытом объемах эластичной среды.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 4 Международных научно-технических конференциях.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ. В том числе 4 статьи - в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Работа содержит 132 страницу машинописного текста, 79 рисунков, 8 таблиц и 1 приложение объемом 58 страниц машинописного текста. Список использованных источников содержит 84 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава раскрывает современное состояние вопроса по изготовлению листовых деталей ЛА методами разделительной штамповки с применением давления эластичной среды.

В конструкциях летательных аппаратов используется широкая номенклатура листовых деталей различных геометрических форм и размеров, которые изготавливаются вырубкой-пробивкой на инструментальных штампах или давлением эластичной среды в замкнутом объеме. Разделительные процессы нашли широкое распространение благодаря фундаментальным и прикладным исследованиям в области теории листовой штамповки, в развитие которых значительный вклад внесли Е.А. Попов, Г.А. Смирнов-Аляев, А.Д. Томленов, Е.И. Исаченков, А.А. Ильюшин, С.И. Губкин, И.П. Ренне, Н.А. Аль-Куреши, С. Гарбер и др.

Общим недостатком использования традиционных методов штамповки – вырубki в инструментальных штампах применительно к мелкосерийному производству, являются значительные затраты на проектирование и изготовление штамповой оснастки, высокая металлоемкость штамповой оснастки, неудовлетворительное качество получаемых деталей по контуру разделения.

В последние годы в технологии листовой штамповки произошли качественные изменения благодаря разработке и совершенствованию динамических методов с использованием магнитного поля и электрического разряда в жидкости и квазистатических методов с использованием давления эластоплимерного материала (полиуретана). Большой вклад в изучение данных вопросов внесли

Ю.Н. Алексеев, В.А. Барвинок, В.А. Вагин, А.М. Дмитриев, В.И. Ершов, И.М. Закиров, А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, В.А. Тарасов, В.П. Самохвалов, Ю.В. Федотов, А.С. Чумадин, В.А. Ходырев, Н.А. Шавров, Д. Пирсон, Ч. Янг, Ш. Кобояши и другие отечественные и зарубежные ученые.

Динамическая штамповка электрогидроимпульсным и магнитноимпульсным методами применяется в процессах формообразования деталей гибкой, формовкой, вытяжкой и редко используется в разделительных процессах в виду большой энергоемкости и малой эффективности. Поэтому в мелкосерийном производстве на предприятиях аэрокосмической отрасли целесообразно применять методы разделительной штамповки давлением полиуретана. Однако использование классической технологической схемы штамповки деталей полиуретаном в закрытом объеме ограничено размерами вырубаемых деталей и, соответственно, размерами универсальных контейнеров, а также необходимостью использования мощного прессового оборудования. Вместе с тем в конструктивных элементах топливных систем и других агрегатах планера самолета (или корпуса ЛА) имеют место тонколистовые крупногабаритные детали сложной геометрической формы с размерами в плане до 4000x500 мм и выше: перегородки топливных баков, развертки сегментов шпангоутов, панели приборных отсеков, элементы обшивки и т. п. Штамповка-вырубка полиуретаном таких деталей в замкнутом объеме контейнера не эффективна, так как для этого требуются металлоёмкие крупногабаритные контейнеры, которые сложны в изготовлении, и мощное прессовое оборудование.

Для реализации разделительных процессов в изготовлении длинномерных листовых деталей возможно использование вырубки в полузамкнутом и полуоткрытом объемах полиуретана, в том числе фрагментарно. Однако данные технологические схемы недостаточно изучены.

Обзор научно-технической литературы показывает также, что на эффективность процессов разделительной штамповки листовых деталей давлением полиуретана большое влияние оказывают конструктивные особенности вырубного инструмента, который создает различный механизм разделения заготовки. А это напрямую связано с качеством изготавливаемых деталей и силовыми затратами на реализацию процесса, в чем многие авторы не имеют единого подхода, т.к. не изучен механизм разделения заготовки в каждой конкретной технологической схеме. Кроме того ни один автор работ, связанных с изучением процессов формообразования деталей давлением полиуретана, не уделяет достаточного внимания влиянию касательных напряжений в контактной зоне эластичного инструмента с листовой заготовкой на точность геометрических форм изготавливаемых деталей.

Таким образом, проведенный анализ существующих работ говорит о недостаточной изученности области разделительной штамповки давлением полиуретана.

В целях интенсификации процесса разделительной штамповки листовых деталей предлагается использовать технологические возможности открытых схем взаимодействия эластичного инструмента с листовой заготовкой, разработанных на кафедре ПЛА и УКМ СГАУ (рис.1), а также через изучение механизма разделения заготовки произвести оптимизацию параметров наиболее эффективных видов вырубного инструмента.

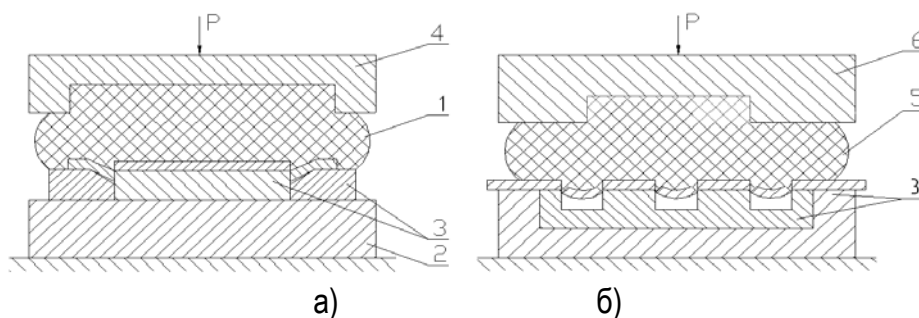


Рис. 1. Технологическая схема реализации процесса разделения листовых деталей
а) в полузамкнутом объеме эластичной среды; б) в полуоткрытом объеме эластичной среды
1 – эластичная матрица; 2 - подштамповая плита; 3 - вырубной инструмент; 4,6 - силовая обойма;
5 – эластичная матрица со ступенчатым выступом центральной части.

Для проведения научно-технических исследований по теме диссертации сформулирована цель работы и связанные с ней задачи.

Во второй главе представлены результаты комплексного математического моделирования проведенной работы. В данной работе была создана математическая модель, позволяющая проводить весь процесс разделения с последующим анализом любых интересующих результатов моделирования. Исследования проводили методом конечно-элементного моделирования с применением программного комплекса «Ansys».

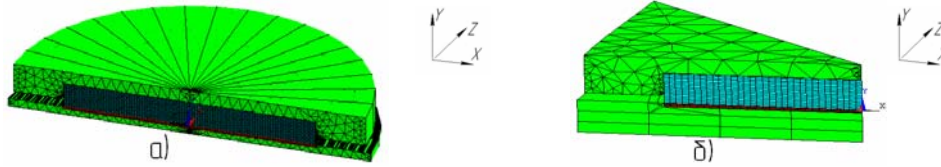


Рис. 2. Физические модели деформирования и квазистатического разделения листовой заготовки в полузамкнутом объеме эластичной среды: а) трехмерная объемная модель реализации процесса при круговой форме эластичного элемента; б) трехмерная объемная модель реализации процесса при квадратной форме эластичного элемента

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 внешней работы приложенных к телу нагрузок должно компенсироваться таким же изменением внутренней энергии деформаций, т.е.

$$\delta U = \delta V, \tag{1}$$

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

Уравнение равновесия для одного конечного элемента:

$$([Ke] + [Ke]f) \{u\} = \{Fe\}pr + \{Fe\}nd, \tag{2}$$

где $[Ke] = \int vol [B]^T [D] [B] d(vol)$ - матрица жесткости элемента;
 $[Ke]f = k \int areaf [Nn]^T [Nn] d(areaf)$ - матрица жесткости основания;
 $\{Fe\}pr = \int areap \{Nn\}^T \{P\} d(areap)$ - вектор сил давления;
 $\{Fe\}nd$ - работа узловых сил.

Матрицы и векторы нагрузок для конечного элемента могут быть получены с помощью модифицированного метода Лагранжа, который в этом случае приводит к следующим уравнениям:

$$[K^*] \Delta u_i = \{F^{app}\} - \{F^{nr}\}, \tag{3}$$

где $\{F^{app}\}$, $\{F^{nr}\}$ - векторы нагрузок; $[K^*]$ - матрица касательной жесткости:

$$[K^*] = [Ke] + [S_i]; \tag{4}$$

$[S_i] = \int [G_i]^T [\tau_i] [G_i] d(vol)$ - матрица, которая определяет вклад в повышение жесткости за счет роста напряжений; $[G_i]$ - матрица производных функции формы; $[\tau_i]$ - матрица текущих напряжений Коши (истинных) $\{\sigma_i\}$.

В узловых точках элемента деформации и напряжений вычисляются с помощью уравнений:

$$\{\varepsilon_{el}\} = [B] \{u\}, \quad \{\sigma\} = [D] \{\varepsilon_{el}\}, \tag{5, 6}$$

где $\{\varepsilon_{el}\} = [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{xz} \varepsilon_{yz}]^T$ - вектор деформации; $[B]$ - матрица деформации-перемещения в точке интегрирования; $\{u\}$ - вектор узловых перемещений; $[D]$ - матрица упругости; $\{\sigma\} = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T$ - вектор напряжений.

Эквивалентные напряжения:

$$\sigma_e = 2 \varepsilon_e G, \tag{7}$$

где $G = E / (2(1 + \nu))$ - модуль сдвига; E - модуль Юнга; ν - коэффициент Пуассона.

Материал эластичной матрицы принимается гиперупругим, для которого принимаем двухпараметрическую модель Муни-Ривлина. В таком случае функция плотности энергии деформации:

$$W = a_{10} \cdot (I_1^* - 3) + a_{01} \cdot (I_2^* - 3) + 0.5 \cdot k \cdot (I_3^* - 1)^2, \quad (8)$$

где a_{10}, a_{01} - константы Муни-Ривлина; $k = \frac{2 \cdot (a_{10} + a_{01})}{(1 - 2 \cdot \nu)}$ - объемный модуль; ν - коэффициент Пуассона; I_i^* - редуцированные инварианты деформации в i -ом направлении.

Соотношения между напряжениями и деформациями для эластомера:

$$S_{ij} = \partial W / \partial E_{ij} \equiv 2 \partial W / \partial C_{ij}, \quad (9)$$

где S_{ij} - компоненты второго тензора напряжений Пиола-Киркхофф; $E_{ij} = 0.5 (C_{ij} - \delta_{ij})$ - компоненты тензора деформации Лагранжа; $C_{ij} = f_{ik} f_{kj}$, - компоненты правого тензора деформации Коши-Грина; $f_{ij} = \partial X_i / \partial x_j$; X_i - недеформированное положение точки в направлении i ; $x_i = X_i + u_i$ - деформированное положение точки в направлении i ; u_i - перемещение точки в направлении i .

Условие деактивации элемента при разрушении материала заготовки:

$$\sigma_{ij} > [\sigma]; \quad \varepsilon_{ij} > [\varepsilon], \quad (10)$$

где σ_{ij} - j -тое напряжение i -го элемента; $[\sigma]$ - предельно допустимое напряжение; ε_{ij} - j -тая деформация i -го элемента; $[\varepsilon]$ - предельно допустимая деформация.

Чтобы модель учитывала исчезновение элемента, его не нужно удалять физически, а достаточно придать этому элементу нулевой модуль упругости. Это осуществляется умножением матрицы жесткости элементов $[K^e]$ на осязательный коэффициент уменьшения. Этот коэффициент принимаем равным $1.0 \cdot 10^{-6}$.

На базе разработанной математической модели проведены численные исследования происходящих деформационных и разделительных процессов с учетом контактного взаимодействия эластичного инструмента с листовой заготовкой. В результате численных исследований установлено следующее:

Распределение нормального контактного давления эластичной матрицы по заготовке имеет неравномерный характер (рис. 3) с резким убыванием ее $2/3$ ширины зоны контакта до периферии.

Уровень неравномерности составляет от 30% до 50%. При этом с увеличением масштабного фактора эластичной матрицы (размеров матрицы в плане, $a/a_0, b/b_0$) и уменьшением ее коэффициента формы (H/a) уровень неравномерности снижается, а величина нормального давления увеличивается.

Уровень нормального контактного давления существенно возрастает с увеличением относительной величины осадки эластичной матрицы по высоте. При осадке выступающей части полиуретана от 25% до 35% (в пределах упругих деформаций) величина нормального давления возрастает в 1,5 раза.

Численный расчет нормального давления для прямоугольной геометрической формы (в плане) эластичной матрицы при оптимальных параметрах процесса (для полузамкнутой схемы $\varepsilon=35\%$; $\bar{H} = H/b=0,05..0,06$; $b=2a$; $\bar{h} = h/H=0,33..0,4$; $r=2..3$ мм; $\Delta z=0,6$ мм) величина нормального давления в центральной зоне (на $2/3$ площади) составляет 140...180 МПа и на периферии 95...120 МПа.

В полуоткрытом способе заделки эластичной матрицы распределение нормального давления эластичной среды по листовой заготовке несколько выше, чем в полузамкнутом, на 10..20%.

Для квадратной геометрической формы (в плане) эластичной матрицы при оптимальных параметрах процесса ($\varepsilon=35\%$; $(H+h)/a=0,07..0,09$; $H/h=0,6..0,8$; $d/D=0,6..0,8$; $r=2..3$ мм; $\Delta z=0,6$ мм) уровень нормального контактного давления эластичной матрицы для полузамкнутого ее воздействия по листовой заготовке составляет 140...175 МПа в центральной зоне (на $2/3$ площади) и 100...125 МПа на периферии (для квадратной формы матрицы в плане).

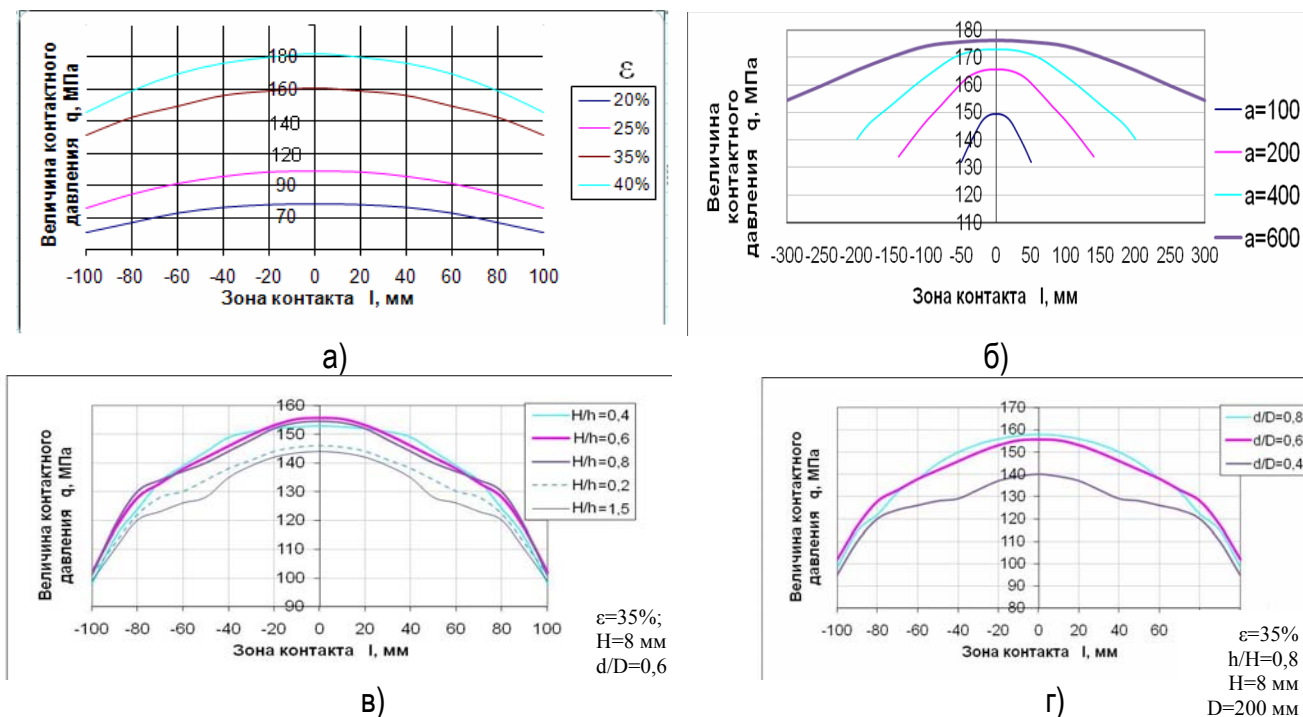


Рис. 3. Примеры зависимостей величины нормального давления: а) от величины деформации полиуретана по высоте ε при использовании полузамкнутого объема эластичной среды; б) от масштабного фактора эластичной пластины в полузамкнутом объеме; в) от относительной высоты центрального выступа H/h в полуоткрытом объеме; г) от относительного диаметра центрального выступа d/a_0 в полуоткрытом объеме

Для практического использования результатов предлагаются диаграммы распределения контактного давления по всей площади контакта эластичной матрицы, по средствам которых возможно провести анализ целесообразности вырубки деталей в полузамкнутом и полуоткрытом объемах эластичной среды. А именно изучение возможности изготовления детали заданной конфигурации внешнего и внутреннего контура, из заданных материалов, заданной толщины. Примеры таких диаграмм представлены на рис. 4.

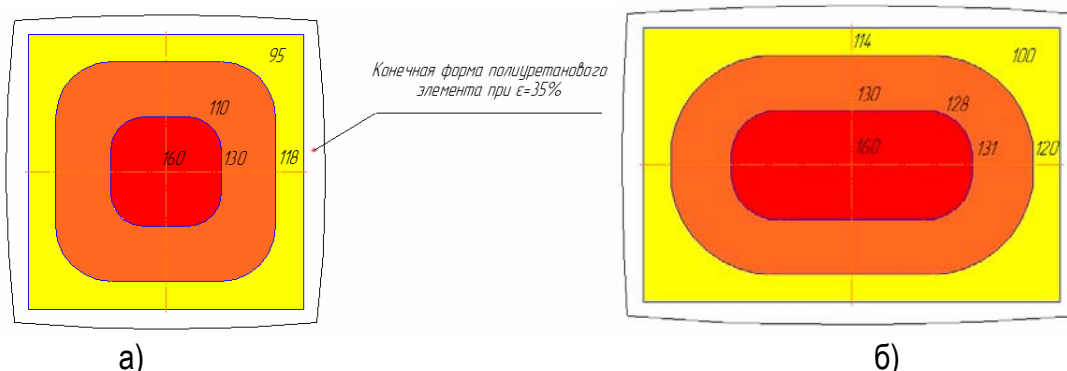


Рис. 4. Диаграммы распределения нормального давления в (МПа) полиуретана (полузамкнутый объем) по плоскости листовой заготовки (технологические параметры $a=200$ мм; $\bar{H} = H/a = 0,05$; $\bar{h} = h/H = 0,33$; $r=3$ мм; $\Delta z=0,6$ мм; $\varepsilon = 35\%$): а) квадратная форма эластичной матрицы (в плане); б) прямоугольная форма эластичной матрицы ($b=1,5a$)

С использованием разработанной математической модели были проведены также численные исследования распределения контактного давления применительно к реализации разделительного процесса в щелевых прямоугольных и сабельных контейнерах с открытыми торцами, которые

используются в изготовлении длинномерных деталей, в том числе фрагментарным способом (рис.5).

Численные расчеты показывают, что уровень нормального давления на заготовку с применением щелевых контейнеров с открытыми торцами выше на 10..15%, чем у таких же по геометрическим соотношениям прямоугольных силовых обжим с полузамкнутой и полуоткрытой заделкой полиуретана.

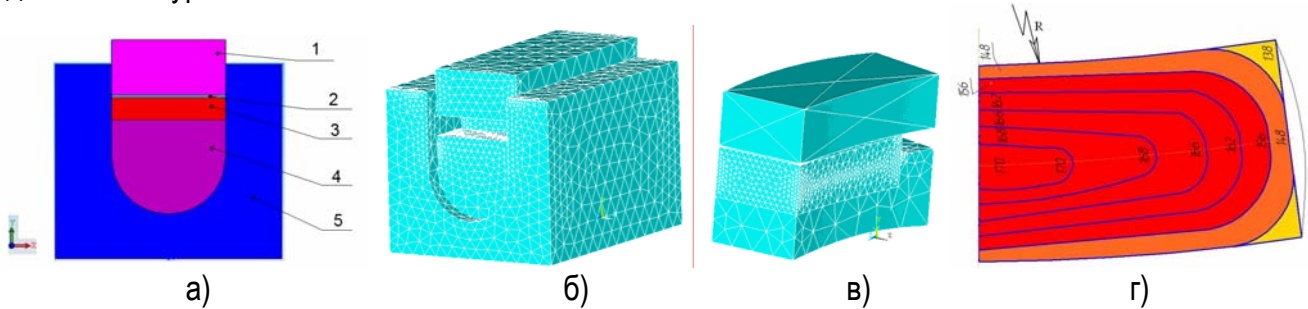


Рис. 5. Щелевой контейнер: а) конструктивная схема (прямоугольный тип): 1 – пуансон-матрица; 2 – заготовка; 3 – эластичная матрица; 4,5 – элементы щелевого контейнера; б) конечно-элементная модель нагружения (прямоугольный тип); в) конечно-элементная модель нагружения (сабельный тип); г) пример диаграммы распределения контактного давления эластичной матрицы по площади заготовки в щелевом сабельном контейнере

Используя метод «смерти» элементов и разработанную математическую модель, были проведены исследования механизма разделения листовой заготовки с применением четырех схем конструктивного исполнения вырубного инструмента (рис. 6).

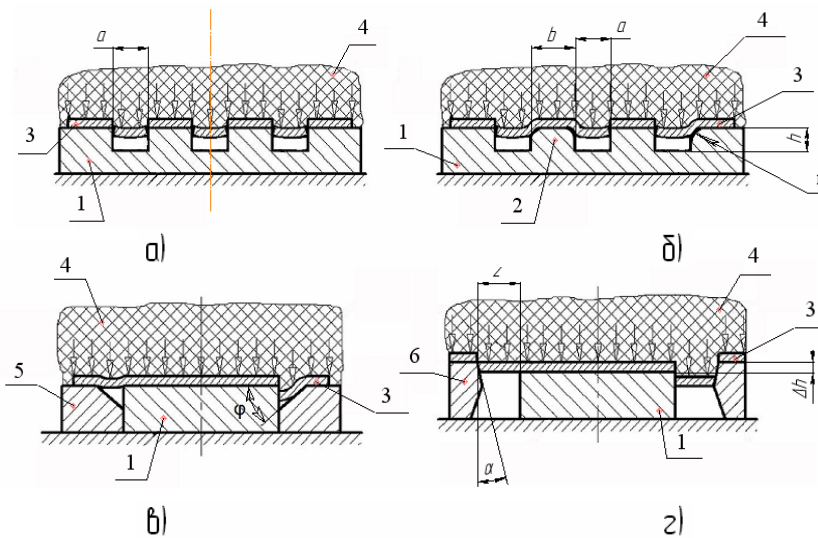


Рис. 6. Конструктивно-технологические схемы вырубного инструмента: а) локализованный инструмент без промежуточной опоры; б) локализованный инструмент с промежуточной опорой; в) шаблон с наклонной опорной рамкой; г) шаблон с боковым подпором отхода:
 1 – вырубной шаблон;
 2 – промежуточная опора;
 3 – заготовка; 4 - полиуретан;
 5 – наклонная опорная рамка

Фрагменты поэтапного разделения заготовок для каждой из предложенных схем вырубки представлены на рисунках 7...9.

Характерными параметрами процессов является относительная глубина прогиба $\Delta \bar{l} = \Delta l / S$ и относительная величина пластического сдвига отхода $\Delta \bar{x} = \Delta x / S$, где S – толщина заготовки (рис.7).

Оптимизирующими факторами процессов принимаются конструктивные параметры вырубного инструмента: ширина паза a между режущими кромками инструмента (рис. 6 а, б); глубина паза h (рис. 6 б); ширина b и радиус скругления r промежуточной опоры (рис. 4 б); угол конусности ϕ опорной рамки (рис. 6 в); превышение опорной рамки Δh , зазор между опорной рамкой и вырубным шаблоном z (рис. 6 г), угол конусности опорной рамки α (рис. 6 а).

Эффективность процессов оценивалась по параметрам, характеризующим качество контура разделения, а именно: минимальное отклонение вырубного контура, вертикальность профиля

среза (выражается через угол скола β).

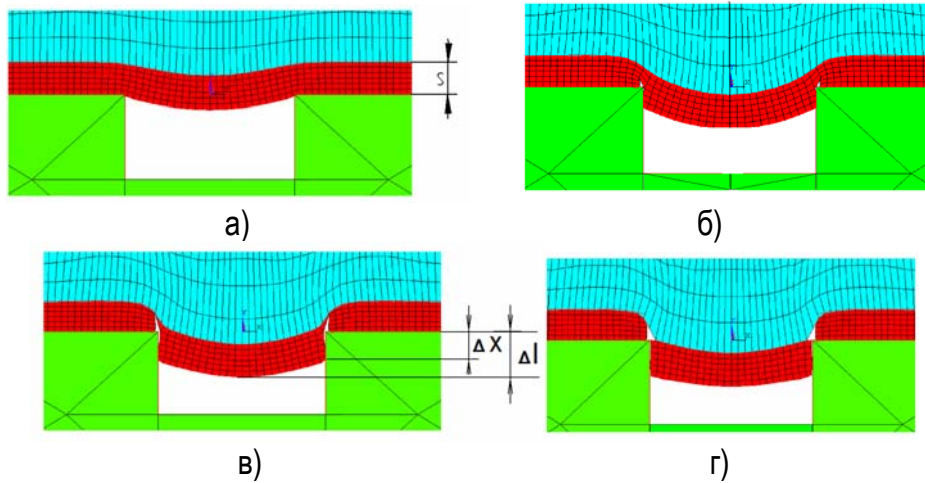


Рис. 7. Поэтапное разделение фрагмента заготовки при вырубке детали на локализованном инструменте без дополнительной опоры

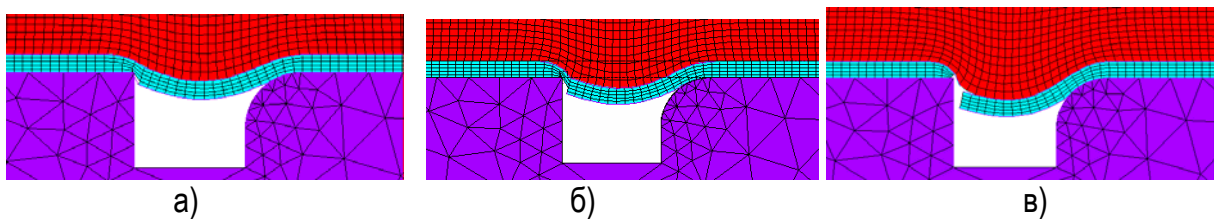


Рис. 8. Поэтапное разделение фрагмента заготовки при вырубке детали на локализованном инструменте с дополнительной опорой

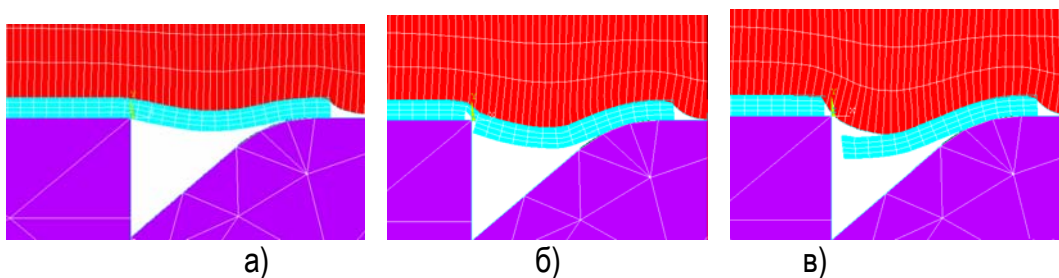


Рис. 9. Поэтапное разделение фрагмента заготовки при вырубке детали на локализованном инструменте с наклонной опорной рамкой вокруг шаблона

Следует отметить, что численные исследования проводились для наиболее распространенных в аэрокосмической отрасли марок алюминиевых сплавов (АмцАМ, Д16АМ, Амг6М, Д16АТ).

В результате моделирования поэтапного разделения заготовок (для каждой технологической схемы вырубке) численно определены главные напряжения и главные деформации материала заготовки в очаге разделения.

Для оптимальных значений конструктивных параметров вырубного инструмента, как показали вычисления характеристик качества контуров среза заготовки, численно определены значения показателя деформированного состояния материала заготовки v_ε , по формуле

$$v_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_3 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}, \quad (11)$$

где ε_i - главные компоненты деформаций.

По значениям показателя деформированного состояния (v_ε) построены соответствующие графические зависимости по высоте контура среза (рис. 10).

Как видно из зависимостей (рис. 10) разделение заготовки с применением локализации находится в области сдвиговых процессов ($-0,46 < \nu_\varepsilon < 0,46$), в результате чего обеспечивается повышение качества контура среза детали.

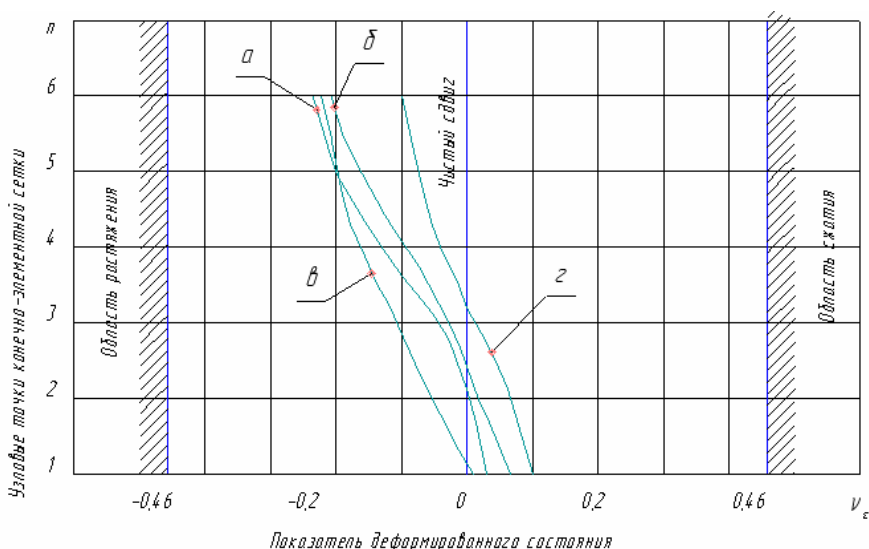


Рис. 10. Зависимости показателя деформированного состояния в каждой узловой точке по толщине листовой заготовки при вырубке контура детали: а) на локализованном инструменте без дополнительной опоры; б) на локализованном инструменте с дополнительной опорой; в) на вырубном инструменте с наклонной опорной рамкой вокруг шаблона; г) на вырубном инструменте с боковым поджатием

Математическое моделирование позволило проанализировать качество получаемых деталей. Численные расчеты показали, что при нагружении тонколистовых заготовок выше 500...750 кН с последующей разгрузкой при сухом трении листы толщиной менее 0,5...0,8 мм подвергаются дефектному деформированию (короблению) вследствие контактирующих с полиуретаном поверхностных слоев (рис. 11).

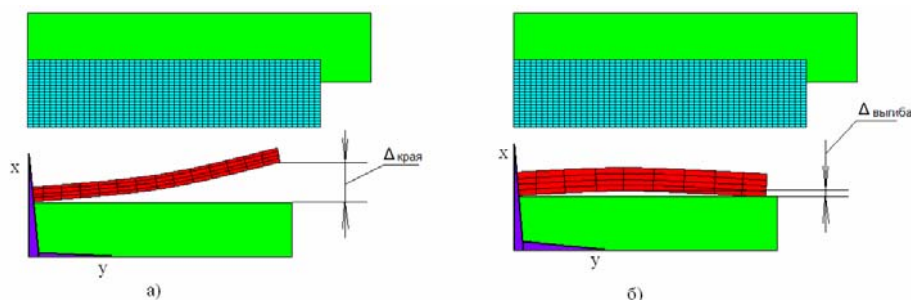


Рис. 11. Деформация листовых деталей после разгрузки: а) толщина листа 0,5 мм; б) толщина листа 0,8 мм.

Для исключения коробления детали после разгрузки как показали численные исследования целесообразно использовать эластичную матрицу с внутренней конусностью (рис.12) (с углом конусности γ не мене $0,5^\circ$), что обеспечивает равномерность распределения нормального давления.

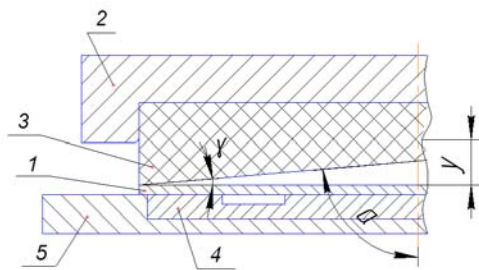


Рис. 12. Конструктивная схема эластичной матрицы с внутренней конусностью в схеме с заделкой эластичной матрицы в полузамкнутом объеме: 1 - заготовка; 2 - силовая обойма; 3 - эластичная матрица; 4 - формообразующий инструмент; 5 - технологическая обойма

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований контактного давления эластичной матрицы и механизма разделения листовой заготовки в процессах штамповки деталей полиуретаном.

Для проведения экспериментов по оценке контактного давления был спроектирован и изготовлен специальный штамп, который позволяет производить переналадку технологической схемы на тот или иной принцип передачи давления эластичной среды на заготовку. Схема экспериментального штампа показана на рис. 13. В экспериментальных исследованиях использовался гидравлический пресс марки ПСУ-500.

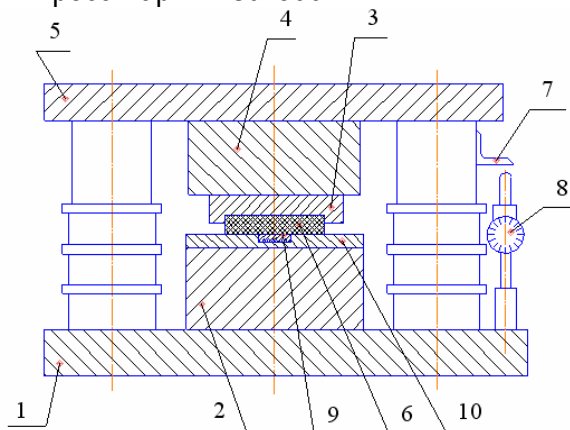


Рис. 13. Схема экспериментальной оснастки для измерения нормального давления, передаваемого эластичным инструментом при нагружении: 1,5- нижняя и верхняя плиты; 2, 4 - верхнее и нижнее основания; 3 - силовая обойма; 6 - сменная эластичная матрица; 7 - упор; 8 - индикатор часового типа; 9 - датчики давления; 10 - технологическая пластина с насечками и углублением для датчиков давления; 11 - пластина фиксирующая точность установки датчиков

В работе использовался метод рототабельного планирования второго порядка. В качестве примера ниже приведены результаты экспериментов применительно к технологической схеме нагружения полиуретана в полузамкнутом объеме. На основании проведенных экспериментов, статистической обработки данных, расчёта коэффициентов уравнения регрессии и проверки его адекватности получена расчетно-экспериментальная модель влияния технологических факторов на распределение контактного давления эластичной среды в полузамкнутом способе её воздействия на заготовку:

$$\begin{aligned}
 q = & 123,7 + 2,35x_1 - 1,57x_2 + 1,46x_3 - 1,75x_4 + 3,8x_5 - 1,34x_1^2 + 1,52x_2^2 + \\
 & + 0,87x_3^2 - 0,69x_4^2 - 1,43x_5^2 + 0,83x_1x_2 + 0,7x_1x_3 + 0,53x_1x_4 + 1,35x_1x_5 - \\
 & - 0,42x_2x_3 - 0,65x_2x_4 - 0,57x_2x_5 - 0,48x_3x_4 + 0,68x_3x_5 - 0,55x_4x_5.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Уравнение регрессии (12) показывает степень влияния конструктивно-технологических факторов (в кодированном их выражении) на величину контактного давления полиуретана. Проведя анализ данного уравнения можно сделать вывод, что наибольшее влияние на величину контактного давления при воздействии эластичной среды на заготовку в полузамкнутом объеме оказывают такие

технологические факторы, как размер и величина относительной жесткости полиуретановой матрицы (кодированные обозначения, соответственно, x_5 и x_1). Наименьшее влияние оказывают относительная высота выступания полиуретана за пределы силовой обоймы и глубина насечки силовой и технологической обойм (кодированное обозначение, соответственно, x_2 и x_4). Причем при увеличении глубины насечки и величины относительной деформации сжатия полиуретана, а также его геометрических размеров в плане и уменьшении относительной высоты полиуретана контактное давление возрастает.

В результате проведенных экспериментальных исследований подтверждена возможность создания нормального давления эластичным инструментом до уровня 100...200 МПа при его прямолинейном нагружении в полуоткрытом и полузамкнутом объеме; что является достаточным условием для выполнения разделительных операций при изготовлении деталей вырубкой-пробивкой широкого диапазона толщин и марок материалов.

Экспериментальные исследования характера и уровня распределения нормального давления эластомера (полиуретана) по площади контакта с листовой заготовкой при прямолинейном нагружении в полуоткрытом и полузамкнутом объеме эластичного инструмента совпадают с результатами численных исследований. Погрешность результатов исследований находится в пределах 5...10%.

Для проверки результатов численных исследований НДС материала в очаге разделения листовой заготовки в экспериментальных исследованиях применялся метод деформирования координатных сеток, наносимых на торцевую поверхность, предварительно разрезанных по диаметральной плоскости заготовок, половинки которых составлялись вместе, после чего производилась вырубка с использованием различных конструкций вырубного инструмента и замер параметров деформирования координатной сетки.

Далее расчетным путем по известным формулам определялись, главные компоненты деформации и вычислялся показатель деформированного состояния.

По результатам расчета построена графическая зависимость, аналогичная численным исследованиям (рис. 10). Анализируя данные зависимости, можно отметить, что экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния листовой заготовки в очаге разделения также подтвердили результаты численных исследований о соответствии условий разделения заготовки сдвиговому процессу при вырубке деталей на локализованном инструменте. Сравнение значений показателя деформированного состояния материала заготовки в очаге разделения, полученных экспериментальным путем, со значениями, полученными в результате численных исследований, также имело удовлетворительную сходимость результатов с погрешностью в пределах 10...12%, что подтверждает адекватность разработанной математической модели реальному процессу разделительной штамповки листовых деталей давлением полиуретана в полуоткрытом и полузамкнутом объемах с локализацией очага разделения.

В четвертой главе приведены технологические рекомендации для реализации процессов разделительной штамповки листовых средне и крупногабаритных деталей давлением эластичной среды в полузамкнутом и полуоткрытом объемах. Для этого, используя результаты численных исследований, построены диаграммы контактного давления для эластичных матриц квадратной и прямоугольной форм различного масштабного фактора. Применительно к вырубному инструменту, локализирующему очаг деформации, определены оптимальные геометрические параметры, обеспечивающие высокое качество контура разделения.

Для оценки силовых параметров четырех методов разделения листовых деталей с локализацией очага деформации разработана инженерная методика расчета необходимого давления полиуретана с учетом его локального деформирования.

Для практической реализации процессов разделительной штамповки разработана методология последовательности расчета необходимых параметров и проектирования основных

этапов технологии вырубки-пробивки деталей в полузамкнутом и полукоткрытом объемах, в том числе пошаговым методом.

С целью эффективного использования разработанной технологии спроектированы универсальные средства технологического оснащения, а именно, универсальный штамп с быстросменным вырубным инструментом для групповой или фрагментарной вырубки листовых деталей (с габаритными размерами от 300 до 1500 мм), универсальный сегментированный сабельный контейнер с открытыми торцами для вырубки длинномерных криволинейных деталей (с радиусом от 500 до 2000 мм); универсальная оснастка для фрагментарной вырубки крупногабаритных длинномерных деталей (длиной до 4000...5000 мм, с толщиной заготовки от 0,5 до 2 мм) в полукоткрытом объеме эластичной среды.

Использование данных средств технологического оснащения на базовом предприятии ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», что позволяет при изготовлении только 320 наименований деталей обеспечить годовой экономический эффект 1'052'000 рублей в ценах 2009 г.

В номенклатуре изготавливаемых листовых деталей давлением полиуретана в полузамкнутом и полукоткрытом объемах алюминиевые сплавы (АД1, АМцАМ, АМг6, Д16АМ), магниевые (МА2, МА8) и титановые (ОТ4 и ВТ14), нержавеющие стали, латунь (Л62) и медь (М2) широкого диапазона толщин от 0,3 мм до 2 мм и геометрических размеров в плане от 100 до 4000 мм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Решена задача повышения эффективности процесса разделительной штамповки листовых деталей за счет разработки новой технологии вырубки давлением полиуретана в полукоткрытом и полузамкнутом объемах.

2. Разработана комплексная математическая модель деформационного процесса вырубки листовых деталей в полузамкнутом и полукоткрытом объемах полиуретана, учитывающая контактное взаимодействие эластичного инструмента с заготовкой. Адекватность математической модели подтверждена проведенными экспериментами.

3. На основании численных исследований установлены оптимальные параметры процесса и эластичного инструмента, при которых достигается равномерность уровня контактного давления эластичной среды на листовую заготовку в пределах 160...180 МПа для полузамкнутой и 155...175 МПа для полукоткрытой схем нагружения эластомера.

1. На основании исследований напряженно-деформированного состояния материала заготовки в очаге разделения установлены оптимальные параметры процесса и конструктивных схем вырубного локализованного инструмента, обеспечивающие сдвиговой характер разделения листовой заготовки и повышение качества вырубного контура детали.

2. Разработана методика расчета энергосиловых параметров процесса разделительной штамповки листовых деталей при деформационном воздействии эластичной среды в полузамкнутом и полукоткрытом объемах с использованием инструмента с локализацией очага разделения.

3. Разработаны конструкции опытно-промышленной оснастки для реализации процессов разделительной штамповки листовых деталей давлением эластичной среды в полукоткрытом и полузамкнутом объемах, в том числе фрагментарным способом.

4. Применение разработанных конструкций штамповой оснастки позволяет сократить трудоемкость изготовления листовых длинномерных деталей в 3...5 раз, затраты на средства оснащения в десятки раз (к примеру, при изготовлении 320 наименований деталей - в 30 раз).

5. Для реализации процессов разделительной штамповки давлением эластичной среды при изготовлении средне- и крупногабаритных листовых деталей в условиях производства разработана методология расчета основных параметров и основных этапов технологии, что сократило сроки подготовки производства в 2...3 раза.

6. Технология разделительной штамповки листовых деталей давлением полиуретана в полукоткрытом и полузамкнутом объемах апробирована в условиях производства на предприятии

ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», что позволяет получить при изготовлении только 320 наименований деталей годовой экономический эффект 1'052'000 рублей в ценах 2009 г.

Основные положения диссертации опубликованы

в изданиях рекомендованных Высшей аттестационной комиссией:

1. Барвинок В.А. Математическое моделирование контактного взаимодействия эластичного инструмента в процессах ротационного раскроя листовых деталей изделий машиностроения [Текст] / Барвинок В.А., Федотов Ю.В., Громова Е.Г., **Шумков А.П.**, Поникарова Н.Ю. // Проблемы машиностроения и автоматизации – 2008. - №1. – С. 128-132.

2. Федотов Ю.В. Исследование контактного взаимодействия эластичного инструмента в процессах ротационного раскроя листовых деталей изделий машиностроения [Текст] / Федотов Ю.В., Громова Е.Г., **Шумков А.П.**, Шаров А.А., Еськина Е.В., Федотова И.Ю. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Спец. выпуск Четверть века изысканий и экспериментов по созданию уникальных технологий и материалов для авиаракетостроения УНТЦ-ФГУП ВИАМ. Том 3. 2008. – С. 159-167.

3. Барвинок В.А. Повышение эффективности технологии разделительной штамповки листовых деталей полиуретаном за счет использования различных схем открытого воздействия эластомера на заготовку [Текст] / Барвинок В.А., Федотов Ю.В., **Шумков А.П.**, Рыжаков С.Г., Федотова И.Ю. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 12, №4 (2), 2010. – С. 362-369.

4. Федотов Ю.В. Исследование механизма разделения листовых материалов при различных способах вырубке деталей полиуретаном [Текст] / Федотов Ю.В., Моисеев В.К., **Шумков А.П.**, Рыжаков С.Г., Федотова И.Ю., Громова Е.Г. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 12, №4 (2), 2010. – С. 449-457.

в других изданиях:

5. Барвинок В.А. Математическое моделирование контактного взаимодействия эластоплимерной матрицы с листовой заготовкой в разделительных процессах [Текст] / Барвинок В.А., Федотов Ю.В., Громова Е.Г., **Шумков А.П.**, Алешин А.В. // «Актуальные проблемы трибологии» Сб. трудов международной научно-технической конференции июнь 2007 г. – М.: Машиностроение, 2007г., в 2-х томах. Т.1. – с. 93-104. Барвинок В.А. Повышение эффективности методов разделительной штамповки при изготовлении листовых деталей летательных аппаратов [Текст] / Барвинок В.А., Федотов Ю.В., Громова Е.Г., **Шумков А.П.** // «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» Сб. трудов международной научной конференции 19-23 ноября 2007г. – М.: Машиностроение, 2007г., С.132-137.

6. Федотов Ю.В. Разработка безотходной технологии лезвийной обработки эластичных элементов штамповой оснастки [Текст] / Федотов Ю.В., Громова Е.Г., **Шумков А.П.**, Федотова И.Ю. // «Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXIII Академических чтений по космонавтике» Сб. трудов международной научной конференции январь 2009. –М.: Изд-во РАН, 2009. – С.530.

7. Федотов Ю.В. Штамповка длинномерных криволинейных деталей полиуретаном в сабельных контейнерах [Текст] / Федотов Ю.В., Громова Е.Г., **Шумков А.П.**, Федотова И.Ю. // «Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXIII Академических чтений по космонавтике» Сб. трудов международной научной конференции январь 2009. –М.: Изд-во РАН, 2009. – С.531.