

Громова Екатерина Георгиевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
РОТАЦИОННОЙ ВЫРУБКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДАВЛЕНИЕМ ПОЛИУРЕТАНА**

Специальность 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Самара – 2008

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королева» 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  
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** 30 декабря 2008 года в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д212.215.03 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 28 ноября 2008 года

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук

Клочков Ю.С.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** В настоящее время все предприятия по производству аэрокосмической техники стремятся повысить конкурентоспособность своей продукции, как на внешнем, так и внутреннем рынках, снижая трудозатраты изготовления изделий при обеспечении их высокого качества.

В производстве освоены методы изготовления деталей из листовых и прочих заготовок штамповкой полиуретаном. Простота и дешевизна штамповой оснастки, минимальные сроки подготовки производства, а также возможность изготовления деталей на обычном прессовом оборудовании позволяет считать способы штамповки полиуретаном наиболее экономически эффективными при программах выпуска деталей одного наименования от 10 до 25 тысяч штук. Несмотря на присущий этому способу недостаток: повышенную энергоемкость процесса (требуется большое усилие прессового оборудования) данный метод значительно эффективен по сравнению со штамповкой деталей в инструментальных штампах.

Особенно ценен метод штамповки деталей полиуретаном для опытного и мелкосерийного производства, характеризуемого частой сменяемостью изделий, а также сжатыми сроками подготовки производства.

Вместе с тем, на производстве не всегда имеется мощное прессовое оборудование для внедрения штамповки деталей полиуретаном. В этих случаях наиболее выгодным становятся ротационные способы формообразования, характеризующиеся низкой энергоёмкостью, высокой производительностью и малыми затратами на производственные площади для размещения оборудования. Однако существующие конструктивно-технологические схемы ротационного формообразования не позволяют в полной мере выполнять разделительные операции.

Таким образом, задача по разработке и исследованию ротационной вырубки листовых деталей летательных аппаратов давлением полиуретаном является актуальной и позволит решить важную научно-техническую проблему повышения эффективности заготовительно-штамповочного производства.

**Цель работы** – повышение производительности процесса и снижение энергетических и материальных затрат при ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать технологию ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана.
2. Разработать математическую модель контактного взаимодействия эластичного инструмента с листовой заготовкой для реализации процесса ротационной вырубки.
3. Провести численные и экспериментальные исследования формоизменения эластичного инструмента и уровня контактного давления эластомера в условиях реализации ротационной вырубки листовой детали.
4. Исследовать напряженно-деформированное состояние эластичного инструмента и листовой заготовки в очаге разделения при ротационной вырубки деталей давлением полиуретана.
5. Разработать методику расчета энергосиловых параметров процесса ротационной вырубки листовых деталей полиуретаном.

6. Разработать конструкцию опытно-промышленной ротационной установки для вырубки листовых деталей полиуретаном.

7. Разработать практические рекомендации для применения процесса ротационной вырубки в условиях производства.

#### **Автор выносит на защиту**

1. Технологию ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана.

2. Результаты исследований деформационного процесса ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана с учетом его контактного взаимодействия с заготовкой.

3. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния материала заготовок и эластичного инструмента при ротационной вырубке деталей на локализованном инструменте.

4. Методику расчета технологических параметров ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана.

5. Рекомендации по проектированию и изготовлению вырубного инструмента для ротационной разделительной штамповки.

6. Конструкцию опытно-промышленной ротационной установки для групповой вырубки листовых деталей давлением полиуретана.

#### **Научная новизна**

1. Разработаны технологические основы нового способа ротационной вырубки деталей из листовой заготовки давлением полиуретана.

2. Разработана математическая модель деформационного процесса ротационной вырубки детали из листовой заготовки с учетом ее контактного взаимодействия с эластичным инструментом.

3. На основании численных исследований установлены основные технологические факторы и оптимальные параметры процесса ротационной вырубки листовых деталей, обеспечивающие повышенный уровень и равномерность контактного давления полиуретана в очаге разделения заготовки.

4. Разработана инженерная методика расчета энергосиловых параметров процесса ротационной вырубки листовых деталей с учетом локального деформирования эластичного инструмента.

#### **Практическая ценность**

1. По результатам численных и экспериментальных исследований разработана конструктивно-технологическая схема ротационной вырубки листовых деталей с повышенным уровнем давления полиуретана.

2. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по расчету и проектированию технологических процессов ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана.

3. Разработана конструкция опытно-промышленной ротационной установки для групповой вырубки листовых деталей давлением полиуретана.

#### **Реализация результатов работы**

Результаты работы освоены и используются в заготовительно-штамповочном производстве предприятия Федеральное государственное унитарное предприятие государственный научно-производственный ракетно-космический центр (ФГУП ГНП РКЦ) «ЦСКБ-Прогресс». Экономический

эффект от внедрения процесса ротационной вырубки только 270 наименований деталей небольших габаритов (от 20 дл 150 мм) составил 890000руб.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на 3 Международных и 2 Всероссийских научно-технических конференциях.

### **Публикации**

По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений, в совокупности изложенных на 147 страницах машинописного текста, 55 рисунков, 5 таблиц и 1 приложения.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** изложена актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, научная новизна, практическое значение и основные результаты работы.

**В первой главе** проведен анализ состояния вопроса по изготовлению листовых деталей летательных аппаратов методами разделительной штамповки.

В изделиях, выпускаемых предприятиями аэрокосмической отрасли значительную долю составляют листовые детали небольших габаритов, которые изготавливаются вырубкой-пробивкой. 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 другие отечественные и зарубежные ученые.

В последние годы в технологии листовой штамповки произошли качественные изменения благодаря разработке и совершенствованию динамических методов с использованием энергии магнитного поля и электрического разряда в жидкости и квазистатических методов с использованием давления эластоплимерного материала (полиуретана). Большую работу в изучении данных направлений провели Ю.Н. Алексеев, В.А. Барвинок, В.К. Борисевич, В.А. Вагин, А.М. Дмитриев, В.И. Ершов, И.М. Закиров, А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, В.А. Тарасов, В.П. Самохвалов, А.С. Чумадин, В.А. Ходырев, Н.А. Шавров, Д. Пирсон, Ч. Янг, Ш Кобояши и др.

Динамические методы штамповки находят большое применение в процессах формообразования деталей гибкой, формовкой, вытяжкой и редко используются в разделительных процессах в виду большой энергоемкости и малой эффективности. Поэтому в условиях мелкосерийного производства аэрокосмической техники широкое применение находят методы разделительной штамповки давлением полиуретана. Реализация методов производится с применением мощного прессового оборудования. Однако в настоящее время парк прессового оборудования на предприятиях морально устарел, отличается

громоздкостью и большими энергетическими затратами, поэтому требуется интенсификация методов разделительной штамповки деталей давлением полиуретана. Одним из направлений совершенствования данных процессов являются ротационные методы формообразования без применения прессов, а с использованием компактного ротационного оборудования.

В ротационном формообразовании деталей находят широкое применение двухвалковые машины, один из валков которых имеет эластичное покрытие. Для всех типов валковых машин характерна деформация эластичного покрытия в открытом объеме. Ротационные машины в основном используются для выполнения формообразующих операций (гибка, формовка рельефа и т.п.) и частично для разделительных операций (раскрой тонких листов на полосы, локальное перфорирование металлической ленты).

Общими недостатками ротационной вырубki на всех типах валковых машин в силу некоторых особенностей их конструктивно-технологических схем являются:

- низкий уровень рабочего давления (не более 30 МПа), что недостаточно для вырубki деталей полиуретаном широкого диапазона толщин и марок материалов;
- ограниченный диапазон геометрических контуров вырубаемых тонколистовых деталей;
- небольшой радиус кривизны эластичных валков, что уменьшает равномерность контактного давления полиуретана, ширину рабочей зоны деформирования заготовки и как следствие ограничивает возможность выполнения разделительных операций.

Обзор научно-технической литературы также показал, что до сих пор не существует единого подхода в расчетах энергосиловых параметров процесса штамповки деталей полиуретаном, в частности, не учитываются энергетические затраты на локальное деформирование полиуретана.

Кроме того, авторы ни одной научной публикации не дают оценку стойкости эластомера в условиях производства деталей.

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

В целях интенсификации процесса ротационной вырубki предлагается увеличить радиус кривизны валковой оправки (рис. 1) и осуществлять

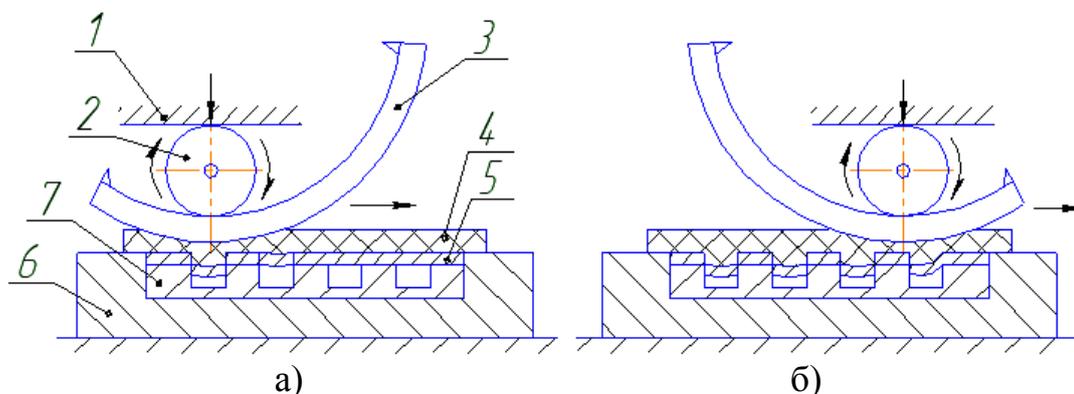


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема ротационной вырубki листовых деталей полиуретаном: 1 – траверса; 2 – ролик; 3 – криволинейная оправка; 4 – полиуретановая пластина; 5 – заготовка; 6 – силовая обойма; 7 – вырубной инструмент

на заготовку высокого давления полиуретана путем создания силовой локальной зоны контакта при перекачивании криволинейной оправки по принципу “пресс-папье”. Такая конструктивно-технологическая схема процесса вырубке позволит увеличить уровень контактного давления полиуретана на заготовку в относительно широкой зоне, достаточной для реализации процесса разделения листовой заготовки широкого диапазона толщин.

Для изучения технологических возможностей данного способа ротационной вырубке листовых материалов сформулирована цель работы и связанные с ней задачи исследований.

**Во второй главе** представлены результаты математического моделирования и численных исследований деформационного процесса при ротационной вырубке 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 МКЭ; 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;  $\delta$  - символ виртуального приращения.

Нагружение тела считается квазистатическим. При этом массовые и инерционные силы не учитываются.

Уравнение равновесия для одного конечного элемента имеет вид:

$$([K_e] + [K_e]^f) \{u\} = \{F_e\}^{pr} + \{F_e\}^{nd}. \quad (2)$$

Здесь  $[K_e] = \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol)$  - матрица жесткости элемента;

$[K_e]^f = k \int_{areaf} [N_n]^T [N_n] d(areaf)$  - матрица жесткости основания,

$\{F_e\}^{pr} = \int_{areap} \{N_n\}^T \{P\} d(areap)$  - вектор сил давления,

$\{F_e\}^{nd}$  - вектор узловых сил.

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

$$\{\varepsilon^{el}\} = [B] \{u\}, \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\}, \quad (4)$$

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;

$\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$  - вектор напряжений;

$[D]$  - матрица упругости.

Деформации и напряжения Мизеса вычисляются по известным формулам механики твердого тела.

Эквивалентные напряжения связаны с эквивалентными деформациями следующим соотношением:

$$\sigma_e = 2 \varepsilon_e G, \quad (5)$$

где  $G = E / (2 (1 + \nu))$  - модуль сдвига,

$E$  – модуль Юнга,

$\nu$  - коэффициент Пуассона.

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:

$$W = a_{10} (I^*_1 - 3) + a_{01} (I^*_2 - 3) + 0,5 k (I^*_3 - 1)^2, \quad (6)$$

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 для изучения изменения формы эластичного инструмента при ротационном нагружении была создана объемная конечно-элементная модель, представленная на рис. 2. В реализации численных исследований принимались следующие значения характерных констант эластоплимерного материала: модуль упругости полиуретана  $E=12$ МПа, коэффициент Пуассона  $\mu=0.496$ , коэффициенты трения по контактным поверхностям имеют фиксированные значения. С использованием данной модели при варьировании значениями параметров (толщиной эластичного инструмента  $H_0$  от 8 до 12мм; относительной высотой осадки полиуретана  $\varepsilon = \frac{H_0 - H}{H_0}$  от 25 до 35%; радиусом кривизны

криволинейной оправки  $R$  от 150 до 250мм; радиусом сгругления кромки криволинейной оправки  $r$  от 2 до 5мм; значениями коэффициентов контактного трения между соответствующими конструктивно-технологическими элементами процесса) численными исследованиями установлено следующее:

1. Эластичный инструмент при ротационном нагружении приобретает за пределами криволинейной оправки волнообразную геометрическую форму в плоскости  $XOY$  и  $YOZ$ , как показано на рис. 3. Такое представление конфигурации периферийной зоны эластичного инструмента (полиуретановой пластины) позволяет обеспечить правильное ее закрепление жесткой рамкой по внешнему контуру.
2. Распределение нормального контактного давления в зоне взаимодействия эластичного инструмента с заготовкой в плоскости  $XOY$  имеет неравномерный характер (рис.4) с резким убыванием в 2/3 ширины зоны контакта. Более равномерный характер контактного давления наблюдается в плоскости  $YOZ$ , с резким убыванием лишь в 1/10 ширины зоны контакта. Причем, при оптимальном сочетании значений конструктивно-технологических параметров ( $H_0 = 10$ мм,  $R = 250$ мм,  $\varepsilon = 35\%$  и т.д.) распределение нормального давления эластичной среды в центре контакта достигает 140...150МПа, а на периферии активной зоны контакта – 100...120МПа. При этом ширина активной зоны

контакта составляет от 20 до 30мм, что является достаточным условием для реализации последовательного фрагментарного разделительного процесса листовой заготовки.

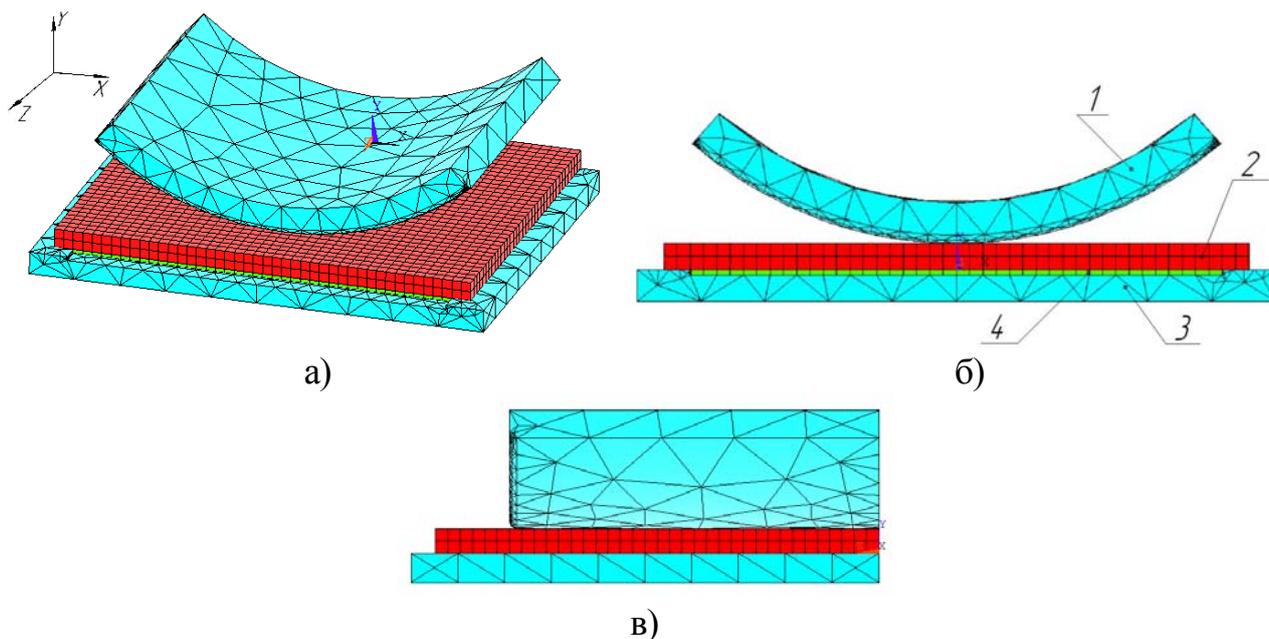


Рисунок 2 - Расчетная модель деформационного процесса формоизменения полиуретановой пластины: а) объемная модель; б) вид в плоскости XOY; в) вид в плоскости YOZ

1 – криволинейная оправка; 2 – полиуретановая пластина; 3 – вырубной инструмент; 4 – заготовка;

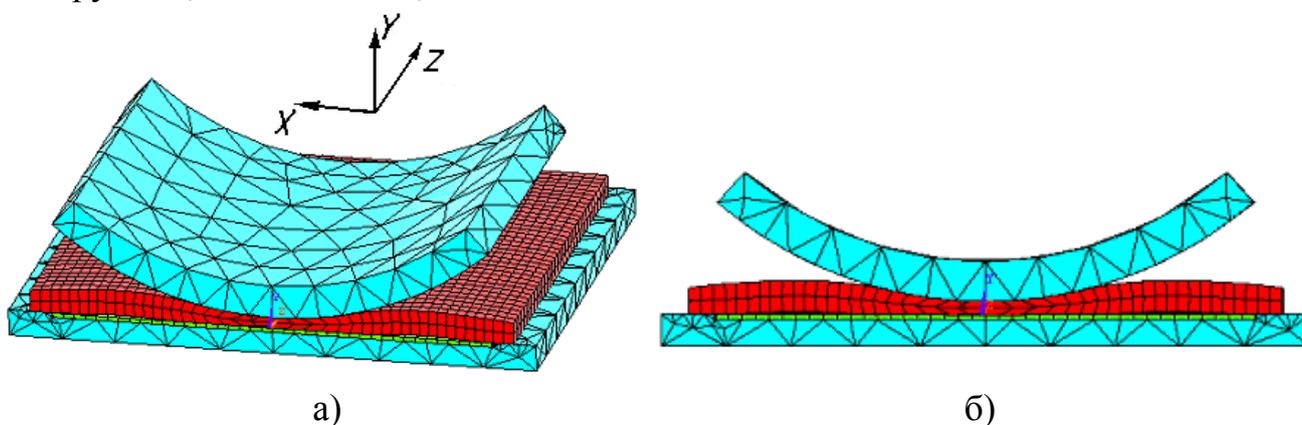


Рисунок 3 - Изменение геометрической формы полиуретановой пластины при  $\epsilon=30\%$ : а) объемная модель; б) вид в плоскости XOY

Для практического использования результатов численных исследований расчетным путем построены диаграммы распределения контактного давления полиуретана в активной зоне по всей горизонтальной плоскости контакта эластомера для различных сочетаний значений конструктивно-технологических параметров (рис. 5).

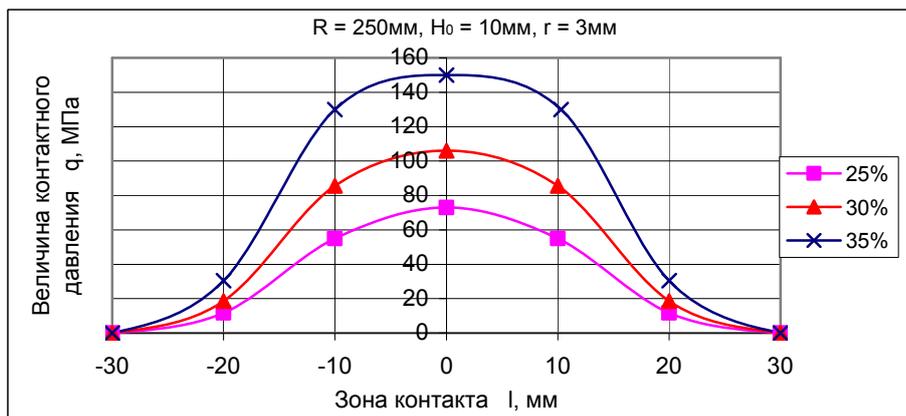
На втором этапе для изучения деформационного процесса вырубki листовой заготовки с учетом взаимодействия с эластичным инструментом в очаге разделения была принята плоская модель процесса вырубki листовой детали на локализованном инструменте с дополнительной опорой (рис. 6). Численными исследованиями предусматривалось изучение поэтапного деформирования отхода, включая момент разделения; определение напряженно-деформированного

состояния заготовки и энергетических затрат на локальное формоизменение эластомера, а также оценка напряжений в эластомере в очаге разделения. В моделировании процесса разрушения материала листовой заготовки был применен метод “смерти” и “рождения” конечных элементов. Для этого в матрице жесткости обнуляется значение модуля упругости. В результате моделирования получена картина поэтапного разделения заготовки и деформирования отхода (рис. 7). Для каждого этапа были определены значения напряжений и деформаций, а по расчету значений показателя деформированного состояния

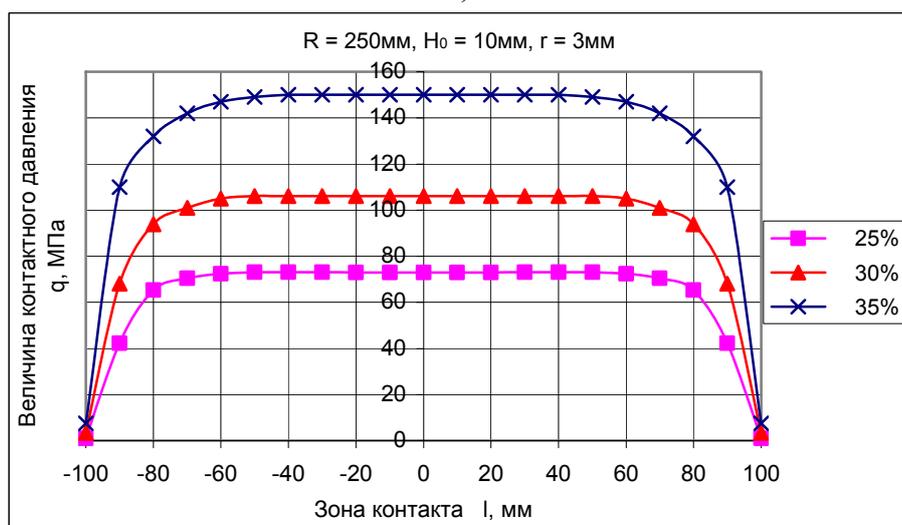
$$v_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_3 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_i$  - главные компоненты деформаций

построена зависимость (рис. 8), которая по уровню значений данного показателя  $v_\varepsilon$  в каждой узловой точке конечных элементов характеризует сдвиговой характер разделения листовой заготовки при вырубке контура детали на локализованном вырубном инструменте. Расчет оптимальных условий разделения листовой заготовки обеспечивает высокое качество ротационной вырубке листовой детали и возможность оценки энергосиловых затрат классической инженерной методикой.



а)



б)

Рисунок 4 – Распределение нормального контактного давления в зоне взаимодействия полиуретана с заготовкой в плоскостях XOY и YOZ: а) плоскость XOY; б) плоскость YOZ

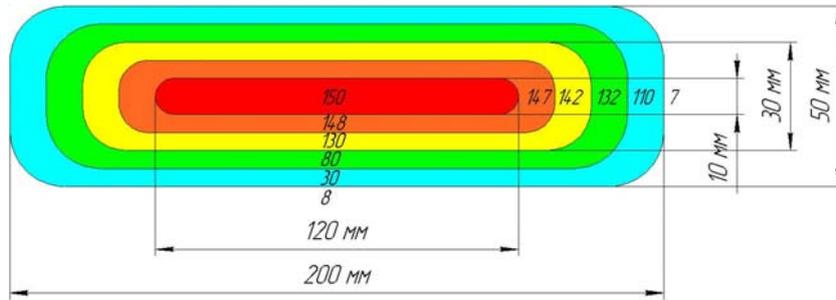


Рисунок 5 – Диаграмма распределения нормального давления в зоне контакта полиуретана с заготовкой при  $\epsilon = 35\%$ ;  $R = 250\text{мм}$ ;  $H_0 = 10\text{мм}$

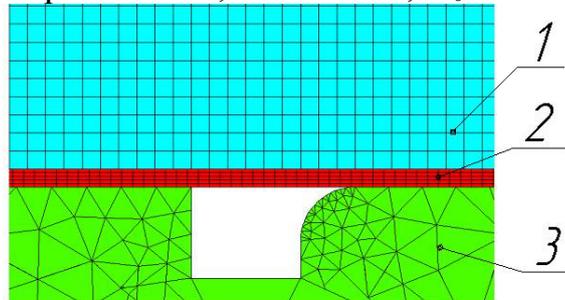


Рисунок 6 - Расчетная модель исследования напряженно-деформированного состояния заготовки: 1 – полиуретановая пластина; 2 – заготовка; 3 – фрагмент вырубного локализованного инструмента с дополнительной опорой

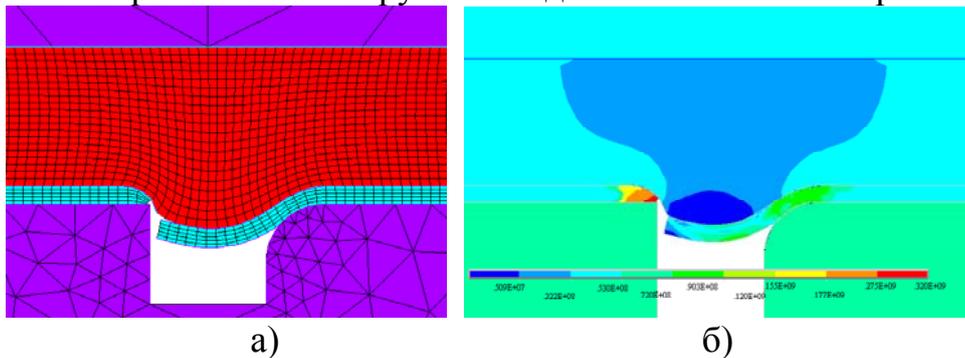


Рисунок 7 – Момент полного разделения заготовки  
а) деформация сетки конечных элементов; б) напряжения по Мизесу;

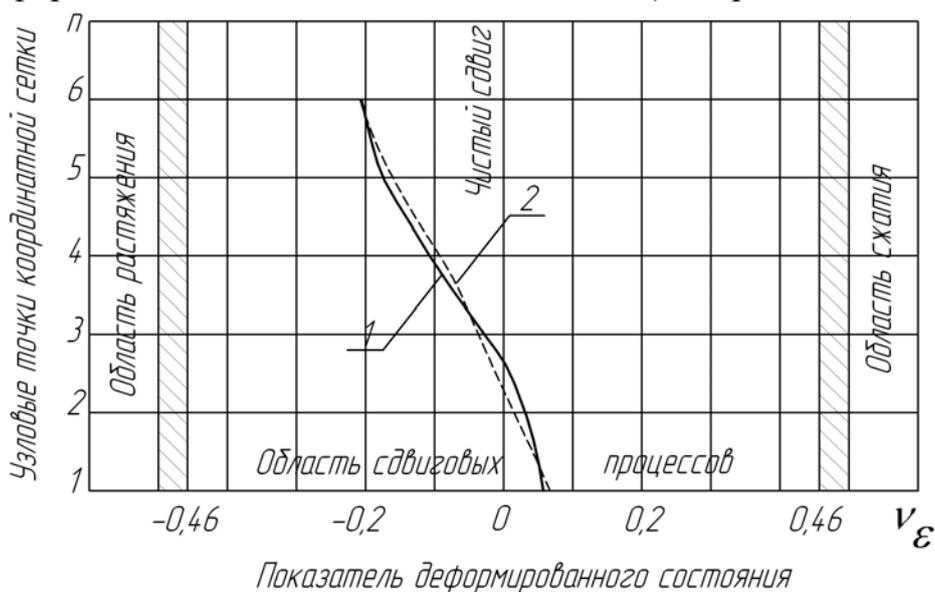


Рисунок 8 – Деформированное состояние заготовки в очаге разделения при вырубке: 1 – экспериментальная диаграмма; 2 – диаграмма, полученная по результатам численных исследований

Численные исследования позволили установить уровень напряжений в эластичном инструменте в очаге разделения и глубину их проникновения (рис. 7,б), а также определить дополнительные силовые затраты на локальное деформирование полиуретана в зависимости от уровня суммарного давления и глубины его локального деформирования (рис. 9). Полученные зависимости хорошо аппроксимируются логарифмической функцией следующего вида:

$$q_{\text{п/у}} = q_p \cdot \left( c + m \cdot \ln \frac{d(b)}{\Delta h} \right), \quad (8)$$

где  $q_p$  - суммарное давление изгиба отхода и сдвига листовой заготовки;  $\Delta h$  - глубина локального смещения (затекания) эластомера;  $c$  и  $m$  – коэффициенты аппроксимации, зависящие от вида контура локального деформирования эластомера;  $d, b$  - параметры контура локального деформирования.

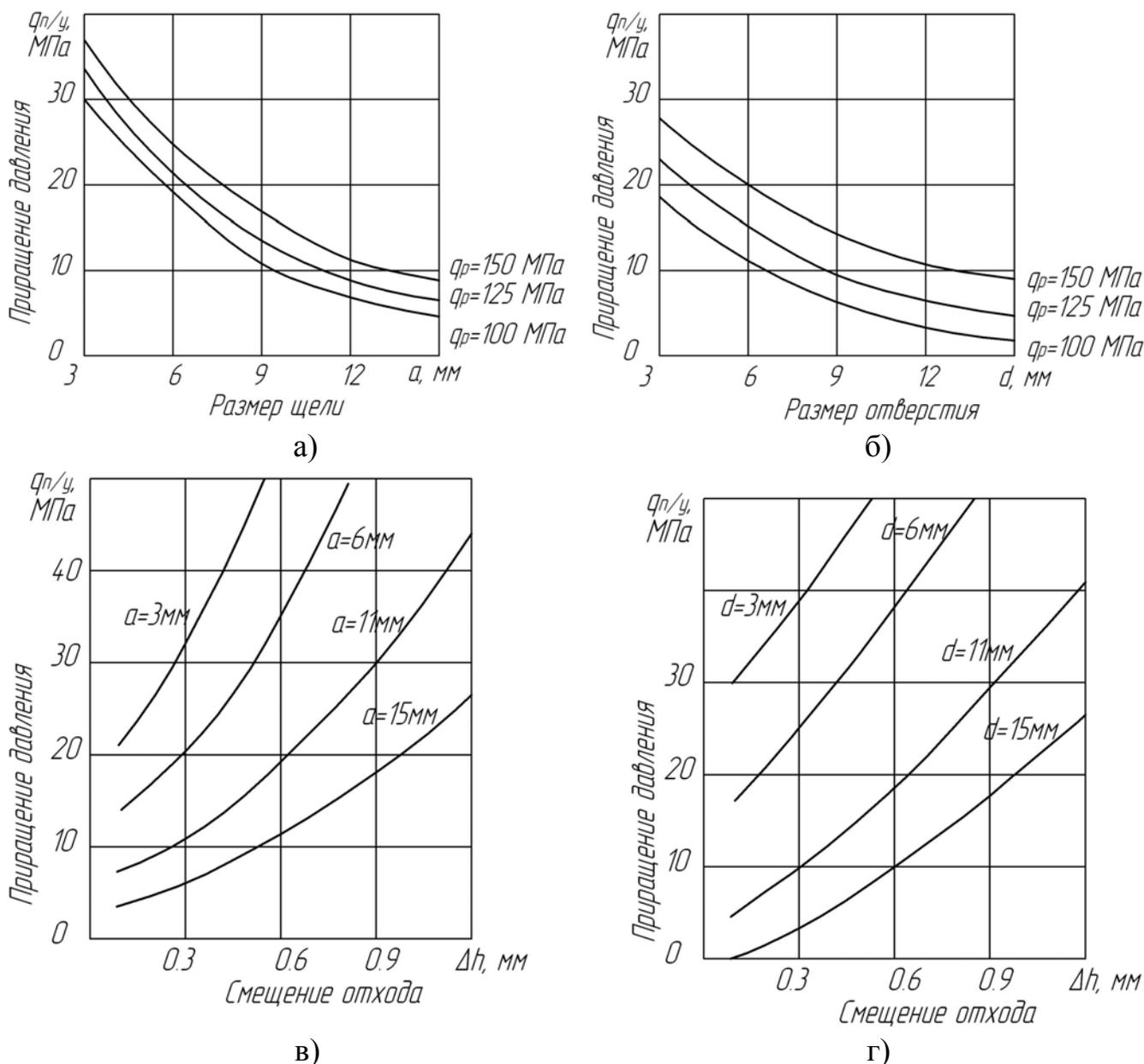


Рисунок 9 - Влияние технологических факторов на величину удельного усилия локального деформирования полиуретана при затекании: а) и в) в щель; б) и г) в отверстие

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований деформационных процессов при ротационной разделительной штамповке листовых деталей давлением полиуретана.

Экспериментальные исследования производилось на специальной оснастке, имитирующей процесс ротационного нагружения эластичного инструмента. Измерение контактного давления производилось с помощью профилированных листовых датчиков, изготовленных из пластичных материалов (из свинца или алюминиевого сплава АД 1) методом отпечатка специальным инструментом и протарированных при их осадке на различный уровень давления полиуретана в замкнутом объеме контейнера. Абсолютные значения контактного давления определялись по измерению параметров деформируемых “гребешков” контактных датчиков и сравнением их значений с тарировочными. В исследованиях применялось математическое планирование экспериментов и статистическая обработка проводимых измерений.

В работе использовался метод композиционного рототабельного планирования второго порядка.

По результатам экспериментов и их статистической обработки получено уравнение регрессии, отражающее взаимное влияние технологических факторов на величину контактного давления полиуретана при ротационном способе его воздействия на заготовку:

$$\begin{aligned} q = & 49,37 + 9,13x_1 + 14,61x_2 + 11,94x_3 - 8,74x_4 - 28,46x_5 - 3,61x_1^2 - 3,75x_2^2 - \\ & - 2,53x_3^2 - 1,79x_4^2 - 8,31x_5^2 + 2,55x_1x_2 + 3,17x_1x_3 - 4,9x_1x_4 - 0,96x_1x_5 + \\ & + 4,09x_2x_3 - 3,77x_2x_4 - 1,37x_2x_5 - 4,12x_3x_4 - 1,83x_3x_5 + 2,69x_4x_5. \end{aligned} \quad (9)$$

где  $x_i$  – кодированные значения конструктивно-технологических факторов процесса ротационного нагружения эластичного инструмента;  $x_1$  - толщина полиуретановой пластины;  $x_2$  - относительная высота осадки полиуретановой пластины;  $x_3$  - радиус кривизны оправки;  $x_4$  - коэффициент формы полиуретановой пластины;  $x_5$  - координата замера давления в зоне контакта.

С использованием данного уравнения расчетно-экспериментальным путем построены диаграммы экспериментального распределения контактного давления для оптимальных значений технологических факторов и произведено их графическое сравнение с аналогичными диаграммами, полученными численными исследованиями. Отклонение результатов численных и экспериментальных исследований не превышают 10...12%.

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 детали на локализованном инструменте и замер параметров деформированной координатной сетки.

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

По результатам расчета построена графическая зависимость (рис. 8) аналогичная численным исследованиям. Анализируя данные зависимости, можно отметить, что при вырубке с дополнительной опорой условия разделения

соответствуют сдвигу, так как показатель деформированного состояния изменяется в пределах от -0,18 до +0,1.

Сравнение значений показателя деформированного состояния, полученных экспериментальным путем со значениями, полученными в результате численных исследований (рис. 8) имело удовлетворительную сходимость, погрешность в пределах 8...12%.

Положительные результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность математической модели реальному процессу исследуемого способа ротационной вырубки листового материала.

**В четвертой главе** приведены технологические рекомендации для реализации разделительного процесса изготовления листовых деталей с применением разработанного способа ротационной вырубки. Для этого, используя результаты численных исследований, установлены оптимальные значения конструктивно-технологических параметров данного метода вырубки. Для различного сочетания значений параметров построены диаграммы распределения контактного давления полиуретана в зоне его активного контакта с листовой заготовкой (шириной до 30...40 мм) с равномерным распределением давления от 100МПа (на периферии) до 140МПа (в центральной зоне), достаточного для реализации разделительного процесса.

Для оценки силовых параметров ротационной вырубки листовых заготовок и технологических возможностей вырубки того или иного геометрического контура или пробивки минимальных пазов и отверстий (в деталях из различных марок материалов) разработана инженерная методика расчета необходимого давления полиуретана с учетом его локального деформирования эластомера.

Для практической реализации процесса разработана методология последовательности расчета и проектирования технологии ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана данным методом и рекомендации по проектированию вырубного локализованного инструмента.

С целью эффективного использования разработанной технологии вырубки спроектирован и изготовлен опытно-промышленный образец ротационной установки для групповой вырубки листовых деталей. Основными параметрами установки являются: рабочая площадь зоны для раскроя деталей 200x500мм; толщина сменной эластичной диафрагмы (пластины) 8...12 мм; радиус сменной криволинейной оправки  $R = 200$  и  $250$  мм, при ширине 150, 200 и 250 мм; давление в гидросистеме телескопических гидроцилиндров, обеспечивающих возвратно-поступательное перемещение с вращением по внутренней поверхности криволинейной оправки до 15МПа. Ротационная установка при общих габаритах 600x900x1100 мм и указанной площади рабочей зоны штамповки листовых деталей с давлением эластичной среды до 150 МПа сравнима по эквивалентному энергосиловому действию с гидравлическим прессом усилием 10000 кН. Опытный-промышленный образец ротационной установки прошел апробацию в условиях производства базового предприятия ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Использование данной установки в изготовлении только 270 наименований деталей небольших габаритов (от 20 дл 150 мм) обеспечивает годовой экономический эффект 890000руб.

В номенклатуре изготавливаемых ротационным способом вырубки листовых деталей, алюминиевые сплавы (АД1, АМцАМ, АМг6, Д16АМ), магниевые (МА2 и МА8) и титановые сплавы (ОТ4 и ВТ14), нержавеющей стали, латунь (Л62) и медь (М2) широкого диапазона толщин от 0,2 мм до 1,5 мм и геометрических размеров в плане от 20 мм до 150 мм.

### **Основные результаты и выводы по работе**

1. Решена задача повышения эффективности процесса разделительной штамповки листовых деталей за счет разработки новой технологии ротационной вырубки давлением полиуретана.

2. Разработана математическая модель деформационного процесса ротационной вырубки деталей из листовой заготовки с учетом ее контактного взаимодействия с эластичным инструментом.

3. На основании численных исследований установлены основные конструктивно-технологические факторы и оптимальные параметры разделительного ротационного процесса, обеспечивающие повышенный уровень и равномерность контактного давления полиуретана, достаточный для вырубки листовых деталей широкого диапазона толщин и марок материала.

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

5. Численными исследованиями установлены напряжения и деформации в эластичном инструменте в очаге разделения листовой заготовки и глубина их распространения при ротационном нагружении.

6. Разработана методика расчета энергосиловых параметров процесса ротационной вырубки листовых деталей на локализованном инструменте.

7. Разработаны методические рекомендации для расчета необходимых параметров и проектирования технологии ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана.

8. Для реализации процесса ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана спроектирована и изготовлена компактная опытно-промышленная установка, обеспечивающая повышение производительности процесса вырубки листовых деталей в 2...3 раза и снижение энергосиловых затрат в десятки раз.

9. Технология ротационной вырубки листовых деталей давлением полиуретана апробирована в условиях производства. При изготовлении только 270 наименований деталей небольших габаритов (от 20 до 150 мм) обеспечивается годовой экономический эффект 890000 рублей.

### **Основное содержание диссертации опубликовано**

в ведущих рецензирующих научных журналах и изданиях, определенных 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., Ю.В. Федотов, **Е.Г. Громова**, А.П. Шумков, Н.Ю. Поникарова // 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]/ Ю.В. Федотов, **Е.Г. Громова**, А.П. Шумков, А.А. Шаров, Е.В. Еськина, И.Ю. Федотова // 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. – С. 159-167.

в других изданиях

3. Федотов, Ю.В., Совершенствование процесса ротационного группового раскроя тонколистовых материалов давлением эластичной среды [Текст]/ Ю.В. Федотов, А.В. Манаинков, **Е.Г. Громова**// Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии НМТ-2004», Том 3 -М.: ИЦ «МАТИ» – РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2004г., С. 171-172.

4. Манаинков, А.В., Разработка технологии ротационной вырубки листовых деталей давлением эластичной среды [Текст]/ Манаинков А.В., **Е.Г. Громова**, И.Ю. Федотова // Сб. трудов студентов и аспирантов «Студенческая наука аэрокосмическому комплексу», Вып. 7 Самара: СГАУ, 2004.,С.62.

5. Барвинок, В. А., Повышение эффективности процесса ротационного раскроя листовых материалов давлением эластоплимерной среды [Текст]/ Барвинок В. А., Ю.В. Федотов, **Е.Г. Громова** // «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» материалы докладов Международной научно-технической конференции 21-23 июня 2006 г.- Самара:РИО СГАУ,2006.- 2 Ч. – С.155.

6. Барвинок, В.А., Математическое моделирование контактного взаимодействия эластоплимерной матрицы с листовой заготовкой в разделительных процессах [Текст]/ Барвинок В.А., Ю.В. Ю.В. Федотов, **Е.Г. Громова**, А.П. Шумков, А.В. Алешин // «Актуальные проблемы трибологии» Сб. трудов международной научно-технической конференции июнь 2007 г. – Москва: издательство «Машиностроение», 2007г., в 2-х томах. Т.1. – с. 93-104.

7. Барвинок, В.А., Повышение эффективности методов разделительной штамповки при изготовлении листовых деталей летательных аппаратов [Текст]/ Барвинок В.А., Ю.В. Федотов, **Е.Г. Громова**, А.П. Шумков // «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» Сб. трудов международной научной конференции 19-23 ноября 2007г. – Москва: издательство «Машиностроение», 2007г., С.132-137.