

Филиал федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Ростовский  
государственный университет путей сообщения» в г. Воронеж

На правах рукописи

**ТИЩУК Людмила Ивановна**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛОСКИХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ  
КОМПЬЮТЕРНОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Соломонов Константин Николаевич

Воронеж 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
----------------------	----------

### ***Глава 1. АНАЛИЗ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ***

<b>ПРОЦЕССОВ ОМД.....</b>	<b>12</b>
---------------------------	-----------

1.1. Исследования и методики в области технологии и моделирования процессов ОМД.....	12
---	----

1.2. Классификация способов моделирования процессов ОМД.....	15
--	----

1.3. Обзор программных продуктов, используемых при моделировании технологических процессов ОМД.....	23
--	----

1.4. Возможности программных комплексов, базирующихся на методе конечных элементов.....	33
--	----

1.5. Классификация САЕ-систем.....	36
------------------------------------	----

<b>РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....</b>	<b>43</b>
---------------------------------	-----------

### ***Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ***

<b>ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА.....</b>	<b>45</b>
-----------------------------	-----------

2.1. Принципы формоизменения плоских заготовок.....	45
---	----

2.2. Анализ предельных случаев: радиальная и нормальная кинематические схемы течения металла.....	47
--	----

2.3. Промежуточная кинематическая схема течения металла.....	49
--	----

2.4. Влияние трения на кинематическую схему течения металла.....	51
--	----

2.5. Обоснование закономерностей формообразования, являющихся следствием предельных случаев.....	55
---	----

<b>РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....</b>	<b>60</b>
---------------------------------	-----------

### **Глава 3. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ**

<b>МЕТАЛЛА.....</b>	<b>62</b>
3.1. Анализ исследований картины течения металла.....	62
3.1.1. Экспериментальные исследования формообразования в процессах осадки.....	62
3.1.2. Использование «скелета контура» для описания картины течения металла в процессах прессования и волочения.....	63
3.1.3. «Теория тонкого слоя» применительно к прокатке.....	65
3.2. «Эквидистантная теория» течения металла по полотну заготовки.....	67
3.3. Численное решение задачи моделирования формоизменения плоской заготовки.....	73
3.3.1. Общие принципы построения картины течения металла.....	73
3.3.2. Алгоритм построения картины течения металла для кусочно-линейного контура.....	74
3.3.3. Алгоритм построения картины течения металла для кусочно-нелинейного контура.....	81
3.3.4. Алгоритм построения картины течения металла для многоконтурных заготовок.....	92
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....</b>	<b>95</b>

### **Глава 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИНЫ**

#### **ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭПЮРЫ**

<b>КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ.....</b>	<b>97</b>
4.1. Актуальность создания обновленного программного комплекса.....	97
4.2. Моделирование поверхности одинакового ската с помощью графического редактора КОМПАС.....	102
4.3. Моделирование картины течения металла с помощью программного комплекса Deform.....	106

4.4. Моделирование картины течения металла с помощью разработанного программного комплекса EQUI.....	108
4.5. Построение картины течения металла для серийных поковок.....	113
4.6. Визуализация пространственной эпюры контактных давлений с помощью программного комплекса EQUI.....	119
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....</b>	<b>121</b>

<b>Глава 5. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПЛОСКИХ ЗАГОТОВОК.....</b>	<b>123</b>
5.1. Обоснование выбора материала для физического моделирования.....	123
5.2. Экспериментальное подтверждение принципа наименьшего периметра.....	128
5.3. Прогнозирование формоизменения заготовки на основе моделирования картины течения металла .....	135
5.4. Независимость формы сечения деформируемой плоской заготовки от толщины образца.....	137
5.5. Апробация разработанной методики и программного комплекса EQUI в промышленных условиях.....	143
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....</b>	<b>150</b>

<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>152</b>
------------------------	------------

<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>153</b>
-------------------------------	------------

<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>169</b>
------------------------	------------

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальными остаются вопросы создания новых высокоэффективных технологий, направленных на оптимизацию технологических процессов производства деталей различного назначения.

В кузнечно-штамповочном производстве значительную долю составляют поковки, получаемые из плоских заготовок на гидравлических прессах большой мощности. Мощные вертикальные штамповочные гидравлические прессы применяют прежде всего для горячей штамповки крупногабаритных поковок из высокопрочных сплавов, широко используемых в авиакосмической промышленности (силовые и стыковые элементы конструкций, оребренные панели для несущих конструкций крыла и фюзеляжа и т.п.).

Отечественные металлургические заводы, такие как Каменск-Уральский, Красноярский, Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение, выпускают качественные сложноконтурные детали из труднодеформируемых сплавов.

Штампованные детали находят широкое применение во многих областях промышленности, таких, как самолето- и ракетостроение, кораблестроение, автомобилестроение, железнодорожный транспорт, строительство и т.д. Они имеют лучшие физико-механические свойства по сравнению с деталями, полученными в других процессах обработки материалов, у них выше статическая и динамическая прочность, более высокое качество завязки волокон, более экономичное использование материала. При серийном производстве детали, полученные обработкой давлением, дешевле, чем сварные, клепанные или обработанные на металлорежущих станках. Среди них большой класс составляют детали с развитым полотном и ребрами жесткости.

Проблемы проектирования технологии изготовления качественных поковок заключаются в сложности выбора формы заготовки и гравюры штампа, что нередко приводит к ухудшению макроструктуры (завязки волокон) металла и появлению дефектов типа «прострел» или «утяжина», к тому же эксперименты в этой

области весьма дороги. В связи с этим весьма актуально создание новых методик, позволяющих моделировать процессы формообразования поковок различного назначения. Учитывая современные возможности и тенденции развития средств вычислительной техники и программных продуктов, новые методики базируются, как правило, на использовании вычислительных комплексов, позволяющих активно применять компьютерное моделирование в различных формах. Для компьютерного моделирования пластического формоизменения материалов на большинстве металлургических и машиностроительных предприятий в различных странах мира используются, в основном, программные комплексы, базирующиеся на методе конечных элементов. Их, как правило, отличает высокая универсальность: возможность моделирования широкого круга процессов пластического формоизменения, учет большого количества физических параметров (температура, реология, структура металла и прочее). Тем не менее можно упомянуть о некоторых недостатках, являющихся побочным эффектом такой универсальности: весьма высокие требования к параметрам компьютерной техники; значительное время расчета и моделирования одного варианта; сравнительно высокая сложность и низкая скорость создания файла входных данных; существенные затраты на обучения пользователей.

В связи с этим для решения частных проблем, охватывающих узкий класс задач ОМД, целесообразно создание методик моделирования, реализуемых в простых алгоритмах. К таким задачам относится деформационная схема осадки, которая является основной при описании процесса формообразования сложноконтурных поковок, в том числе и с ребрами жесткости, получаемых в процессах объемной штамповки иковки. Поковки подобного класса широко используются в различных отраслях машиностроения.

Вопросы пластического формообразования, к которым относятся практически все процессы ОМД, играют важную роль при проектировании технологии изготовления изделий и конструировании штамповой оснастки.

Эти вопросы хорошо изучены в работах отечественных и зарубежных ученых: Губкина С.И. [1], Гуна Г.Я. [2], Джонсона У. [3], Зибеля Э. [4], Зоббе К. [5],

Ивлева Д.Д. [6], Ильюшина А.А. [7, 8], Овчинникова А.Г. [9], Охрименко Я.М. [10], Полухина П.И. [11], Прагера В. [12], Прандтля Л. [13], Семенова Е.И. [14], Соколовского В.В. [15], Сторожева М.В. [16], Тарновского И.Я. [17, 18], Томленова А.Д. [19], Томсена Э. [20], Унксова Е.П. [21], Хилла Р. [22], Шофмана Л.А. [23] и др.

В настоящее время детально исследованы лишь задачи расчета кинематических и динамических характеристик процесса, и в гораздо меньшей степени вопросы формообразования. Причем автоматизация как расчета параметров, так и моделирования формоизменения, встречает ряд трудностей как теоретического, так и технического характера.

Вместе с тем развитие вычислительной техники и создание доступного программного обеспечения для компьютерного моделирования позволяют решать поставленные задачи быстро и эффективно, получая адекватные модели различных процессов и объектов в удобной для анализа форме, что значительно облегчает работу конструкторов и технологов, повышает надежность деталей и инструмента, экономит время и средства на их разработку и изготовление.

### **Цель и задачи работы.**

Целью диссертационной работы является разработка новой методики проектирования процессов пластического формоизменения металлических плоских заготовок, реализованной в виде программного комплекса, позволяющего проводить экспресс-анализ формообразования поковок.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Анализ разработок в области компьютерного моделирования процессов ОМД для определения степени актуальности проводимых исследований и классификации способов и систем моделирования.

2. Исследование предельных кинематических схем течения металла на основании принципов формоизменения плоских заготовок и обоснование промежуточной схемы, наиболее приближенной к описанию реальных процессов формообразования поковок.

3. Разработка «эквидистантной теории» течения металла по полотну заготовки на основе анализа известных исследований картины течения металла и создание методик и алгоритмов численного решения задачи компьютерного моделирования формообразования поковок.

4. Компьютерное моделирование картины течения металла и пространственной эпюры контактных давлений для многосвязных кусочно-нелинейных контуров и многоконтурных поковок с помощью разработанного программного комплекса EQUI.

5. Апробация разработанных методики и программного комплекса EQUI и экспериментальное подтверждение результатов моделирования.

6. Прогнозирование формоизменения плоских заготовок, а также выработка рекомендаций по обоснованию и использованию технологических приемов, базирующихся на результатах компьютерного моделирования картины течения металла с помощью программного комплекса EQUI.

#### **Методики и методы исследований.**

Для решения поставленных задач применялись методики и методы математического, компьютерного и физического моделирования, базирующиеся на фундаментальных законах и принципах механики сплошных сред и теории пластичности. При проведении лабораторных экспериментов использовалась методология аналогового моделирования процесса осадки материалами с физически схожими свойствами.

#### **Научная новизна работы:**

1. Создана классификационная схема способов моделирования процессов ОМД и предложена классификация САЕ-систем, предназначенных для проектирования формообразования поковок.

2. Обоснована промежуточная кинематическая схема течения металла, подтверждающая принципы и объясняющая особенности формоизменения плоских заготовок.



3. Разработана «эквидистантная теория» течения металла по полотну заготовки, базирующаяся на принципах и закономерностях деформационной схемы осадки.

4. Разработаны методика и алгоритмы построения картины течения металла для сложных многосвязных контуров и многоконтурных поковок.

5. Доказана независимость формы и площади поперечного сечения от начальной толщины деформируемого плоского образца с помощью теоретических выкладок и экспериментальных исследований.

6. Получены эмпирические кривые и на их основании выведены аналитические соотношения, описывающие зависимость формоизменения плоской заготовки от условий трения.

### **Практическая значимость работы.**

Создан удобный и простой инструмент – программный комплекс EQUI – для компьютерного моделирования процессов ОМД, базирующихся на деформационной схеме осадки.

Результаты компьютерного моделирования, с помощью программного комплекса EQUI, картины течения металла в процессах объемной штамповки иковки могут быть использованы для прогнозирования формоизменения плоских заготовок и управление течением металла по полотну поковки, а также выработки рекомендаций по обоснованию применения технологических приемов и конструктивных элементов, при производстве сложноконтурных поволоков на предприятиях авиакосмической промышленности, а также ряда других отраслей машиностроения.

На ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (ВАСО) была проведена апробация результатов работы в опытном производстве. Выполнено компьютерное моделирование пластического течения металла и получены расчетные данные параметров формообразования поковки с технологическим вырезом. Результаты моделирования и расчетов с использованием программного комплекса EQUI при промышленной апробации показали хорошую сходимость с фактическими результатами штамповки выбранных изделий. Ис-

пользование предложенной методики и разработанного на ее основе программного комплекса EQUI позволяет: снизить энергозатраты на штамповку исследуемой поковки за счет устройства технологического выреза с заданными параметрами; снизить затраты на инструмент за счет исключения второго перехода; повысить качество поковки за счет устранения возможного брака на стадии проектирования.

Модели, алгоритмы и экспериментальные исследования внедрены в учебный процесс в Филиале «Ростовского государственного университета путей сообщения» в г. Воронеж по дисциплинам «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение» и могут быть использованы в других образовательных учреждениях технического профиля.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Классификация способов моделирования процессов ОМД.
2. Промежуточная кинематическая схема течения металла, объясняющая особенности формоизменения плоских заготовок.
3. «Эквидистантная теория» течения металла по полотну заготовки, базирующаяся на принципах и закономерностях деформационной схемы осадки.
4. Методика и алгоритмы построения картины течения металла для сложных многосвязных контуров и многоконтурных поковок.
5. Теоретические выкладки и результаты экспериментальных исследований, подтверждающие независимость формы и площади поперечного сечения от начальной толщины плоской заготовки.
6. Аналитические соотношения, описывающие зависимость формоизменения плоской заготовки от условий трения, полученные на основании эмпирических кривых.

**Достоверность результатов исследований обеспечивается:**

1. Использованием современных методов компьютерного и физического моделирования, а также известных лицензионных программных продуктов.
2. Высокой сходимостью результатов, полученных в ходе виртуальных и лабораторных экспериментов, с теоретическими положениями и исследованиями.

3. Успешной апробацией разработанных методики, алгоритмов и программного комплекса в промышленных условиях.

### **Апробация работы.**

Результаты работы представлены и обсуждены на следующих отечественных и зарубежных научных форумах: XV Всероссийской научно-технической конференции «Научные исследования в области авиационных, космических и транспортных систем», Москва-Таруса, 2014; Международной научно-практической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия», Липецк, 2014; Международной научной конференции «Новые технологии и достижения в области металлургии, материаловедения и инженерии производства», Ченстохова (Польша), 2014, 2015, 2016, 2017; Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике», Москва, 2015, 2017; XV Международной конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии», Воронеж, 2015; VIII Международной научной конференции «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий», Воронеж, 2015; VIII Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии», Темиртау (Казахстан), 2015; Международном конгрессе «Процессы пластического деформирования авиакосмических материалов. Наука, технология, производство» («Металлдеформ-2017»), Самара, 2017; XIII Международном конгрессе «Кузнец-2017», Рязань, 2017.

### **Публикации.**

Основное содержание работы отражено в 23 печатных работах, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

### **Структура и объем работы.**

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 143 наименований отечественных и зарубежных авторов, 3 приложений. Диссертация изложена на 179 страницах и включает 61 рисунок и 4 таблицы.

## **Глава 1. АНАЛИЗ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОМД**

### **1.1. Исследования и методики в области технологии и моделирования процессов ОМД**

В настоящее время перспективным направлением развития машиностроения является оптимизация процессов производства металлических изделий, разработка и совершенствование способов моделирования процессов ОМД. В связи с этим в литературе широко освещаются вопросы улучшения качества получаемых изделий и повышения их технологичности.

При обработке металлов давлением на качество изделий, а, следовательно, и на разработку технологических процессов (ТП) существенное влияние оказывает распределение напряжений на поверхности контакта инструмента и заготовки. При осадке в условиях плоской деформации на контактной поверхности в общем случае экспериментально установлено наличие трех характерных зон: скольжения, торможения и застоя. При определении контактных напряжений в этих зонах широко применяется инженерный метод. Решение системы уравнений равновесия сегодня получено только для зоны торможения, для зон скольжения и застоя используются либо численные методы, либо приближенные решения, при этом вносятся ряд допущений, что имеет свои недостатки. Для аналитического расчета контактных напряжений, подчиняющихся закону трения Кулона, при осадке прямоугольной полосы создана специальная методика и на ее основе проведено уточнение существующих зависимостей для определения усилия осадки [24]. Примером использования полученных решений может служить расчет напряженного состояния при прокатке полосы из идеального жесткопластического материала [25] и при ее прессовании через клиновую матрицу [26]. Аналитический расчет процессов осесимметричной пластической деформации по линиям тока при выдавливании цилиндрической заготовки в конической матрице вызывает ряд

трудностей [27], в настоящее время получены формулы, упрощающие такой расчет.

Для новых технологийковки при назначении режима протяжки необходимо учитывать формирование и развитие зон пластического течения в сечении заготовки. Для решения указанной задачи построена модель горячей протяжки стальных цилиндрических заготовок небольшого (до 300 мм) диаметра в кузнечном прессе с комбинированными бойками для получения поковок круглого сечения [28].

В порошковой металлургии наряду с численными методами для моделирования процесса горячей штамповки пористых заготовок на разных стадиях деформирования в закрытом и открытом штампах, который имеет много общего с классическими методами объемной штамповки, используется метод координатных сеток [29]. Исходные заготовки прямоугольной в плане формы с центральным отверстием прессуют из порошка железа и спекают в среде проточного водорода. Спеченные заготовки разрезают в продольном направлении вдоль оси прессования и на поверхность разреза наносят координатную сетку. Затем половинки образцов соединяют точечной сваркой, нагревают и штампуют на дугостаторном прессе с разными степенями деформации. После каждого этапа деформации половинки образцов разъединяют и копируют изображения координатной сетки деформированных образцов с помощью сканера для ее дальнейшей цифровой компьютерной обработки. Затем с помощью программного комплекса (ПК) «Тензор» определяют координаты узлов сетки, и на их основе рассчитывают компоненты тензора деформаций.

При периодической прокатке важным моментом в определении параметров мгновенного очага деформации является определение смещаемого валком объема металла, а также определение мгновенного и полного смещения исходного контура. В связи с этим разработана методика теоретического определения параметра геометрии очага деформации, позволяющая получить значения длины дуги контакта по всей зоне обжатия, а также находить коэффициенты напряженного состояния при расчете энергосиловых параметров процесса при деформации поло-

сового металла на маятниковом стане [30]. Достоверность указанной методики была с достаточно высокой степенью точности подтверждена с помощью экспериментов на полосовом планетарном стане.

Активные разработки новых методик и расчетных схем ведутся учеными зарубежных стран. Особенно ярко результаты этих исследований проявились на проходившей в октябре 2014 года в Нагое (Япония) XI международной конференции по технологии пластичности. Материалы конференции опубликованы в журнале *Procedia Engineering*, 2014, № 81. География участников конференции настолько широка, что позволяет составить достаточно полное представление о зарубежных разработках в области моделирования процессов ОМД. Систематизация этих материалов по географическим кластерам дает возможность судить о теоретических и экспериментальных исследованиях, а также моделировании процессов ОМД в Европе, США и Японии.

В частности, интерес исследователей Европы привлекают новые технологии в области горячего формообразования в процессахковки и объемной штамповки, а также изучение закономерностей пластического формоизменения с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Этому посвящены работы ученых из Франции [31-33], Италии [34], Германии [35-37], Великобритании [38].

Большое внимание в области моделирования и расчетов процессов ОМД ученые США уделяют вопросам влияния трения [39] на формоизменение металла в процессахковки, а также аналитическому и численному моделированию [40] пластического формообразования [41], в основном, с помощью МКЭ.

Особенно широкий интерес к применению методик и способов моделирования процессов ОМД в различных отраслях машиностроения наблюдается в разработках японских ученых и инженеров. Характерным для них является рассмотрение в основном осесимметричных задач [42-45] и использование МКЭ в качестве инструмента моделирования пластического формоизменения [46-49]. В частности, большое количество новых исследований и разработок касается проблем автомобилестроения, где активно внедряются новые технологии и конструкторские решения.

## 1.2. Классификация способов моделирования процессов ОМД

При решении проблем, возникающих при проектировании процессов формоизменения металлов, целесообразно применять различные способы (виды) моделирования (рисунок 1.1) [50]. Деление на виды моделирования весьма условно и не имеет четких границ, т.к. нередко один способ является базой или включает в себя другой. Так, сложно однозначно разделить компьютерное моделирование на численное и изобразительное (графическое). Строго говоря, *геометрическое* моделирование является частью математического и выделено в отдельный вид лишь потому, что составляет основу множества графических программных пакетов [51, 52].

Интеллектуальный и инфологический способы можно отнести к первому уровню моделирования; математическое, геометрическое, аналоговое и физическое – ко второму, а компьютерное – к третьему.

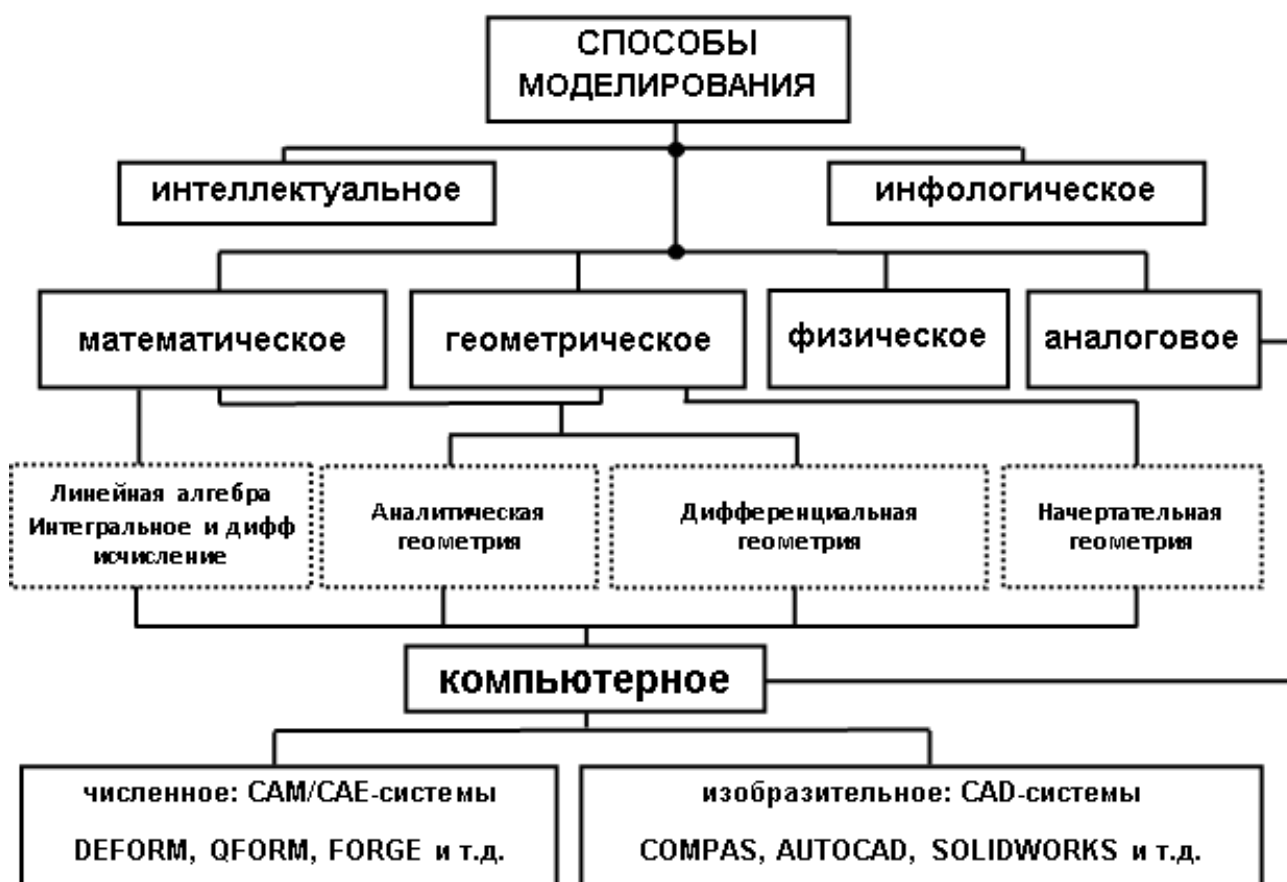


Рисунок 1.1 – Способы моделирования объектов и процессов ОМД

Заметим, что данная классификационная схема дает достаточно полное описание способов моделирования объектов и процессов ОМД. В рамках рассматриваемой диссертационной работы способы первого уровня получили лишь общую характеристику, поскольку автор не ставил целью разработку методик и алгоритмов, направленных на их реализацию.

Тем более, как следует из дальнейшего изложения, способы первого уровня могут эффективно применяться лишь для решения плохо структурированных и информационно-логических задач, а исследуемые нами модели объектов и процессов ОМД к таковым не относятся, по крайней мере, в том контексте, который характеризует поставленные в рамках данной работы задачи.

Остановимся на каждом из представленных в схеме способов в отдельности.

### **Способы моделирования I уровня.**

*Интеллектуальное моделирование*, основанное на создании моделей мышления (так называемая кибернетика «черного ящика»), используется для решения плохо структурированных задач, разработка алгоритмов которых вызывает трудности, и служит основой для создания экспертных систем (ЭС). Ядром любой ЭС является база знаний, структуру которой определяет аналитик, а наполняет эксперт. Создавать ЭС можно двумя способами: либо разрабатывать свои собственные (это долго и дорого), либо наполнять покупные оболочки (это, разумеется, быстрее, но проблематичнее в плане адаптируемости). В базе знаний информационные единицы (знания) представлены в виде моделей. Модели позволяют структурировать знания. Выделяют три основные модели представления знаний: продукционная, семантическая сеть, фреймы.

Применительно к задачам ОМД база знаний может включать в себя информацию о материалах заготовок, оборудовании, инструменте, а также методиках технологического и конструкционного характера.

*Инфологическое моделирование* применяется для решения информационных задач. Отдельные модули представляют собой информационные единицы, объединенные в логическую сеть. Используется в системах управления базами данных (СУБД), например, Access, для создания схем данных, которые представ-



ляют собой инфологические модули (таблицы), связанные с помощью полей в одну цепь. Применительно к задачам ОМД такие базы данных могут содержать технологические цепочки и карты, а также описания различных параметров конструктивных элементов.

### **Способы моделирования II уровня.**

Для решения структурированных задач используют способы моделирования второго уровня. К таким задачам можно отнести моделирование пластического формоизменения материалов в процессах обработки давлением. Способы моделирования второго уровня можно разделить на теоретические (математическое и геометрическое), практические (физическое) и смешанного характера – аналоговое.

Отметим, что в схеме, представленной на рисунке 1.1, ниже способов моделирования второго уровня в пунктирных прямоугольниках показаны инструменты (средства) моделирования.

Ярким примером применения способов II уровня к *математическому моделированию* процессов ОМД может служить теория течения тонкого пластического слоя (ТТТПС) А.А. Ильюшина [8]. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающую напряженно-деформированное состояние металла в таких процессах, как ковка, объемная штамповка и прокатка.

В данном случае для решения задачи о формообразовании заготовки и расчете энергосиловых параметров можно использовать два подхода: либо в систему уравнений ввести максимальное количество параметров (температуру, реологию, трение и т.п.) и получать результат численными методами; либо упростить исходную систему уравнений, вводя допущения и пренебрегая некоторыми параметрами, и благодаря этому свести ее к аналитическим зависимостям. Например, основным параметром считать геометрию заготовки (поковки или профиля). Оба подхода имеют свои плюсы и минусы, но непреложным фактом является утверждение, что в любом случае решение получается приближенное.

Значительного упрощения системы дифференциальных уравнений можно добиться, вводя следующие допущения. Первое – условие полной пластичности – предполагает равенство нулю касательных напряжений; второе – кинематическое условие – заключается в том, что поперечные скорости движения частиц можно считать одинаковыми по толщине слоя. Тогда из общей системы уравнений получаем соотношения для распределения контактного давления по плоскости заготовки, согласно которым пространственная эпюра контактных давлений (ПЭКД) представляет собой поверхность одинакового ската (ПОС), все образующие которой наклонены к плоскости контакта под одинаковым углом. Причем проекции гребней этой поверхности на плоскость контакта являются линиями раздела течения металла (ЛРТМ), а проекции линий ската – линиями тока (ЛТ).

Инструментом для создания математических моделей может служить аппарат *линейной алгебры*, а также *интегральное и дифференциальное исчисление*.

Для решения представленной задачи используются также различные виды *геометрического моделирования*.

В аналитическом виде задача построения ЛРТМ может быть поставлена средствами *дифференциальной геометрии*. Однако найти аналитическое решение в общем виде весьма затруднительно. Поэтому, не сужая рамок технологической задачи, решение можно получить для частных случаев, когда контур представляет собой, например, эллипс [53].

Задачу можно еще более упростить, если считать, что любой контур аппроксимируется прямыми линиями и дугами окружностей, тогда все многообразие сочетаний элементов контура сводится к четырем: прямая-прямая, прямая-окружность, две окружности, окружность в окружности. Аналитическое решение поставленной задачи позволяет утверждать, что ЛРТМ в первом случае – прямая (биссектриса), во втором – парабола, в третьем – гипербола, в четвертом – эллипс. В процессах пластического деформирования эта геометрическая задача моделирует осадку прямоугольной пластины с двумя круглыми вырезами и круглой пластины с круглым нецентральный вырезом [53].

Если строить ЛРТМ средствами *аналитической геометрии* как проекцию гребней ПЭКД, то и в этом случае получим те же результаты, т.е. линия пересечения двух конических поверхностей будет представлять собой либо эллипс, либо гиперболу, что следует из решения системы алгебраических уравнений. Эту же задачу можно решить методами *начертательной геометрии* используя способ вспомогательных секущих плоскостей, и получить идентичное решение [53].

В том случае, когда форма контура очень сложная, и получить решение иными способами трудно, можно использовать аналоговое моделирование [8].

**Аналоговое моделирование** с помощью сыпучих материалов, позволяет не только использовать методику расчета объема пространственной эпюры контактных давлений, но и получать наглядную картину течения металла по полотнуковки [54]. И, что крайне важно, аналоговое моделирование дает возможность однозначно определить форму пространственной эпюры контактных давлений, что играет существенную роль, когда численное решение требует проверки и наглядность его графической интерпретации выдвигается на первый план [55].

К недостаткам аналогового моделирования можно отнести то, что для каждого контура необходимо изготавливать новую физическую модель, кроме того фактический расчет и построение линий тока весьма затруднительны ввиду необходимости ручного вычерчивания проекций линий ската.

Для простых насыпей (конус, пирамида) решение очевидно и не требует изготовления моделей. Однако для сложных насыпей такой способ можно считать единственным средством получения наглядного решения. Этот способ удобен тем, что решение всегда существует и притом единственное. На основании применения метода песчаной аналогии полностью решается задача течения тонкого слоя металла, что подтверждается расчетами [56] и реальной штамповкой изделий [57].

**Физическое моделирование** дает интересные результаты, которые часто не укладываются в принятую теорию. Например, в соответствии с нормальной кинематической схемой течения металла (КСТМ) линии тока направлены по нормали к контуру заготовки. Тогда прямоугольная пластина в ходе осадки должна пре-

вращаться в многоугольник. Такую же схему можно получить в рамках ТТПС на начальной стадии деформирования. Но в реальных процессах прямоугольное сечение в ходе деформирования превращается в эллипс и наблюдаются так называемые «ушки», необъяснимые в рамках общепринятых положений.

Указанные факты описаны в экспериментах К. Зоббе, результаты которых были опубликованы в 1908 году [5]. Однако Зоббе проводил эксперименты не на тонких заготовках, а на образцах, толщина которых соизмерима с другими линейными размерами. Аналогичные результаты были получены Тарновским И.Я. [17] в 50-60 годы прошлого века. Он проводил эксперименты на сравнительно тонких стальных и свинцовых образцах, отношение толщины которых к линейному размеру в плане приблизительно было равно 0,1. В экспериментах на пластилине Абашкина В.П. [58], проводимых с целью физического моделирования операцийковки, наблюдались «выпучивание сторон» и «ушки».

Эксперименты, как известно, могут быть трех видов: лабораторный, промышленный и виртуальный, который достаточно точно имитирует физическую модель процесса. Последний реализуется с помощью компьютера и, хотя, строго говоря, не может считаться натурным, максимально приближает физическую модель к реальному процессу. В соответствии с общепринятой терминологией физическое моделирование отождествляют с лабораторным и промышленным экспериментом.

Поскольку натурный эксперимент – эксперимент, проводимый в реальных условиях, то с натурным экспериментом следует отождествлять промышленный эксперимент. Натурный эксперимент – дорогая по затратам разновидность экспериментов. Поэтому там, где корректность задачи не сильно страдает, применяют более дешевый лабораторный эксперимент.

### **Способы моделирования III уровня.**

*Компьютерное моделирование* сегодня по праву считается самым продуктивным и мощным способом моделирования, которое объединяет и реализует численные и графические методы. Поэтому данный вид моделирования выделен как отдельный уровень. Вследствие своих выигрышных особенностей, минимизи-

рующих рутинную работу и колоссально повышающих производительность труда, компьютерное моделирование можно считать также и инструментом моделирования. Причем, инструментом эффективным и разноплановым, позволяющим перерабатывать информацию любого характера.

Следует отметить, что аналоговое моделирование также реализуемо на компьютере, благодаря возможности построения 3D-моделей геометрических объектов (в том числе и поверхностей одинакового ската) с помощью различных графических программных пакетов, что устраняет необходимость проведения натуральных опытов (в частности, с сыпучими материалами).

По формату представляемой информации компьютерное моделирование можно разделить на *численное* и *графическое (изобразительное)*.

По функциональным возможностям все способы компьютерного моделирования можно условно разделить на две категории: *способы моделирования процессов* (СМП) и *способы моделирования объектов* (СМО) [59].

К СМП можно отнести CAM/CAE и другие системы, которые позволяют моделировать процесс в конкретной предметной области. Такие программы называют прикладными. В области обработки металлов к ним относятся Deform, Forge, ANSYS, QForm, Splen и другие.

К СМО относятся CAD-системы, позволяющие моделировать геометрические объекты (от примитивных до сложных криволинейных поверхностей). Такие системы дают возможность проектировать сложные машины и механизмы и готовить для них конструкторскую документацию. Примерами CAD-систем являются COMPAS, AutoCAD, SolidWorks, Unigraphics [50].

CAM (англ. Computer-aided manufacturing) – это средства технологической подготовки производства (ТПП) изделий, обеспечивающие автоматизацию программирования и управления оборудования с ЧПУ или гибких автоматизированных производственных систем. Русским аналогом термина является АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства.

CAE (англ. Computer-aidedengineering) – это средства автоматизации инженерных расчетов, анализа и симуляции физических процессов, обеспечивающие динамическое моделирование, проверку и оптимизацию изделий.

CAD (англ. Computer-aideddesign/drafting) – это средства автоматизированного проектирования, предназначенные для автоматизации двумерного и/или трехмерного геометрического проектирования, создания конструкторской и/или технологической документации.

Все указанные системы в России принято объединять под одним общим названием – системы автоматизированного проектирования (САПР).

CAD/CAM/CAE системы, так называемые «САПР для машиностроения», подразделяют на три класса (рисунок 1.2): тяжелый, средний и легкий [60].

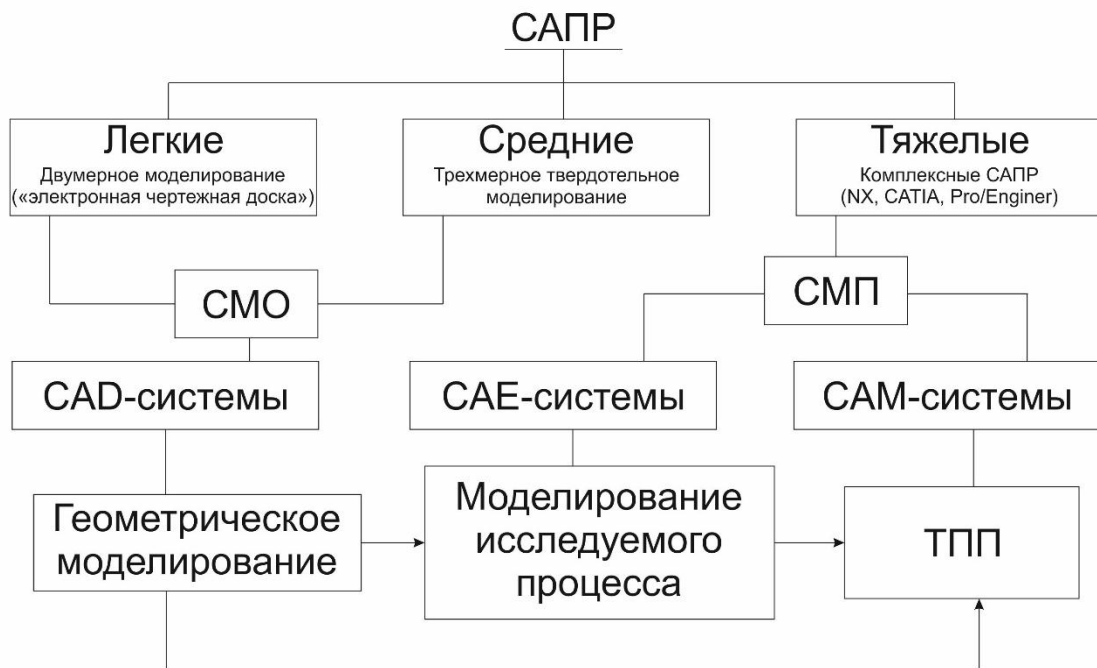


Рисунок 1.2 – Классификация САПР по степени сложности

К тяжелому классу относятся системы, которые обеспечивают весь цикл создания изделия (от концептуальной идеи до реализации), а также создают проектно-технологическую среду для одновременной работы всех участников создания изделия с единой виртуальной электронной моделью этого изделия (NX, CATIA, Pro/ENGINEER). Системы тяжелого класса являются комплексными системами автоматизированного проектирования CAD/CAM/CAE. Но наряду с неоспоримы-

ми достоинствами тяжелые САПР имеют ряд недостатков: они наиболее громоздки и сложны в работе, к тому же имеют высокую стоимость. Кроме того, в этих системах нет инструментов для решения вопросов, связанных с изготовлением изделий методом объемной штамповки в России, так как иностранными разработчиками не были учтены российские стандарты.

Большинство систем среднего класса базируется на трехмерном твердотельном моделировании. Они позволяют проектировать значительную долю деталей общего машиностроения, сборочные единицы среднего уровня сложности, выполнять совместную работу группой конструкторов.

Пакеты программ легкого класса служат для простого двумерного черчения, поэтому их называют «электронной чертежной доской». Современные пакеты этого класса позволяют решать некоторые трехмерные задачи, но в них отсутствуют средства параметрического моделирования, имеющиеся в более мощных системах.

При моделировании различных процессов в САД-системах создаются геометрические модели изделий, которые затем используются в качестве входных данных для САМ-систем и на основе которых в САЕ-системах формируется модель исследуемого процесса.

## **1.2. Обзор программных продуктов, используемых при моделировании технологических процессов ОМД [61]**

Сложность изучаемых и проектируемых процессов в различных областях науки, в том числе и в области обработки металлов давлением, привела к созданию качественно новой техники исследований, использующей аппарат имитации – воспроизведение на компьютере специально организованными системами математических моделей протекания процессов.

Имитационное моделирование на цифровых вычислительных машинах является одним из наиболее мощных средств исследования. Как и любое компьютерное моделирование, оно дает возможность проводить вычислительные экспе-

рименты с еще только проектируемыми системами и изучать системы, натурные эксперименты с которыми из-за соображений безопасности или высокой стоимости нецелесообразны. В то же время, благодаря своей близости к физическому моделированию, этот метод исследования доступен более широкому кругу пользователей.

В настоящее время, когда компьютерная промышленность предлагает разнообразные средства моделирования, любой квалифицированный инженер или технолог должен уметь уже не просто моделировать сложные объекты, а моделировать их с помощью современных технологий, которые реализованы в виде графических сред и пакетов визуального моделирования.

Данное требование было трудновыполнимым до повсеместного проникновения в исследовательскую деятельность персонального компьютера с графическим дисплеем и появления специального программного обеспечения – пакетов визуального моделирования. Системы автоматизации моделирования, разработанные в 1960-70-е годы (Simula, SLAM, НЕДИС и др.), были довольно сложны для широкого круга пользователей, прежде всего из-за сложности текстовой формы описания модели и отсутствия программных реализаций эффективных численных методов. Пакеты же визуального моделирования позволяют пользователю вводить описание моделируемой системы в удобной (преимущественно графической) форме, то есть в буквальном смысле рисовать функциональную схему, размещать на ней блоки и соединять их связями и представлять результаты моделирования в наглядной форме в виде диаграмм, рисунков, анимационных картинок и т.п.

Одним из главных достоинств систем визуального моделирования является и то, что они позволяют пользователю не заботиться о программной реализации модели, а сами создают на компьютере чрезвычайно удобную среду, в которой можно создавать виртуальные функционирующие системы и проводить эксперименты с ними. Таким образом, графическая среда является виртуальной моделью физического испытательного стенда, только вместо сложной и дорогостоящей аппаратуры исследователь имеет дело с ее образом на экране дисплея. Кроме того,



имеется возможность наблюдения и оценки результатов моделирования в ходе эксперимента, а при необходимости и активного вмешательства.

Поскольку программная реализация виртуального стенда скрыта от пользователя, то для проведения экспериментов не требуется особых знаний о компьютерном программировании, операционной системе и математическом обеспечении. Можно сказать, что виртуальный стенд превращает цифровую вычислительную машину в чрезвычайно точную и удобную аналоговую.

Значительную долю программных продуктов составляют расчетные программы, разработанные на основе численных методов. Эти программы в последние годы широко применяются и играют главенствующую роль на предприятиях, где используются операции обработки металлов давлением. Для разработки и оптимизации технологии и инструмента с начала 1990-х годов начали применяться расчетные программы, основанные на МКЭ. Первые варианты программ позволяли моделировать плоскую и осесимметричную деформацию, а с середины 1990-х годов появилась возможность расчета полной трехмерной деформации.

### **КОМПАС-3D (Россия), в латинской транскрипции COMPAS**

КОМПАС-3D (CAD-система) – предназначена для создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе однажды спроектированного прототипа. Многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства.

Система обладает рядом преимуществ, обусловивших ее широкое применение: легка для изучения, особенно конструкторами без опыта работы в 3D; удобна как «электронный кульман»; наличие обширных библиотек стандартизованных по ГОСТ элементов; относительно невысокая стоимость; удобно оформлять чертежи в соответствии с нормами ЕСКД; легко достать, распространяется бесплатная учебная версия; продуманный модуль 2D черчения; есть встроенная система обучения; относительно удобный и несложный для обучения интерфейс.

Наряду с достоинствами имеется ряд недостатков: затруднено последующее переучивание на другие системы; легко чертить, проектировать – сложнее; нет кинематического, прочностного, температурного, частотного анализа; недостаточно продумана система спецификации; систему трудно и дорого модифицировать под свои нужды; иногда возникают проблемы с импортированием моделей из других CAD.

### **«КРЕДО» (Россия)**

Это первая отечественная интегрированная CAE-система автоматизации проектирования и подготовки производства, обладающая возможностями трехмерного моделирования геометрических объектов, оформления конструкторской документации, подготовки управляющих программ для оборудования с ЧПУ и создания архива конструкторско-технологической документации.

Система «КРЕДО» незаменима в качестве средства первоначального обучения методологии и технике работы с трехмерными графическими системами.

Легко интегрируется практически со всеми CAD/CAM системами, присутствующими на российском рынке, и успешно эксплуатируется совместно с ними на многих предприятиях.

### **T-FLEX CAD (Россия)**

T-FLEX – CAD/CAM/CAE-система параметрического проектирования, объединяет в себе 3D- и 2D-функционал, обладает исчерпывающим инструментарием для создания параметрических и непараметрических чертежей деталей и сборок, а также для оформления конструкторской документации. При этом она обеспечивает полную поддержку как ЕСКД, так и зарубежных стандартов.

Достоинства: уникальные средства параметризации, гибкое проектирование, открытость, создание собственных мини-САПР, скорость работы программы, решение сложных задач, широкий набор дополнительных возможностей, экономическая окупаемость, использование существующих наработок и опыта, техническая поддержка.

### **ADEM (Россия)**

ADEM – интегрированная CAD/CAM-система сквозного проектирования. Концентрация и глубокая интеграция инструментов для решения разноплановых задач в одном программном продукте позволяет объединять усилия специалистов и значительно сокращать время, требуемое на подготовку производства.

ADEM предназначена для автоматизации решения проектных, конструкторских и технологических задач в области машиностроения. Система используется в атомной, аэрокосмической, машиностроительной, электро- и приборостроительной и других областях. Система ADEM также ориентирована на проектирование и производство сложной оснастки, инструмента, штампов и пресс-форм.

### **ГЕММА-3D (Россия)**

ГЕММА-3D (разработка ЗАО «НТЦ ГеММа») – система геометрического моделирования и программирования обработки для станков с ЧПУ (CAM-система). Центральной задачей, на решение которой ориентирована система, является получение эффективных программ обработки наиболее сложных деталей на станках с ЧПУ, изготавливаемых с помощью фрезерования, сверления, электроэрозионной резки, вырубки, токарной обработки, гравировки.

Назначение системы: построение математических моделей деталей и агрегатов любой степени сложности; доработка математических моделей в соответствии с требованиями технологического процесса обработки конкретным инструментом на определенном оборудовании с ЧПУ; подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ: фрезерных (2-х, 3-х, 4-х, 5-и координатных), электроэрозионных (2-х, 3-х, 4-х координатных), сверлильных, токарных, гравировальных; подготовка технологических эскизов и технологических карт; обработка результатов измерений изделий для оценки точности изготовления.

### **Cimatron (Израиль)**

Cimatron – интегрированная CAD/CAM-система, представляющая полный комплекс средств для моделирования деталей и сборок, проектирования сложной технологической оснастки и управляющих программ для станков с ЧПУ. Сегодня Cimatron успешно используется в литейных и штамповочных производствах.

### **CATIA (Франция)**

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) – система автоматизированного проектирования французской фирмы Dassault Systemes, основанная на МКЭ.

Это комплексная система автоматизированного проектирования (CAD), технологической подготовки производства (CAM) и инженерного анализа (CAE), включающая в себя передовой инструментарий трехмерного моделирования, подсистемы программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единую базу данных текстовой и графической информации.

Система позволяет эффективно решать все задачи технической подготовки производства – от внешнего (концептуального) проектирования до выпуска чертежей, спецификаций, монтажных схем и управляющих программ для станков с ЧПУ.

Достоинства: огромные возможности расчета (в т.ч. прочностного) методом конечных элементов; отлично реализованы функции работы с поверхностями; удобство совместного проектирования (если участвует более одного разработчика); продуманная система отображения структуры сборки; возможность кинематического анализа механизмов; красивый, продуманный и достаточно удобный интерфейс.

Недостатки: высокая стоимость; почти нет учебной литературы на русском языке; требуется долгое обучение, сложно привыкнуть, особенно после Автокада; для управления требуются сложные сочетания нажатий кнопок мыши, интерфейс сложен и немного непривычен; требует значительных ресурсов ПК; возможности системы построения фотореалистичного изображения невысоки; наши ГОСТы поддерживаются не полностью.

### **AutoCAD (США)**

AutoCAD – двух- и трехмерная система автоматизированного проектирования и черчения, разработанная компанией Autodesk.

Для системы AutoCAD компанией Autodesk также был создан обменный формат данных DXF (англ. Drawing Xchange Format) – открытый формат файлов

для обмена графической информацией между различными приложениями САПР [60]. В настоящее время на сайте Autodesk можно найти спецификации всех версий DXF.

Использование файлов DXF является универсальным способом интеграции различных САПР технологии, оснастки и оборудования для объемной штамповки.

AutoCAD и специализированные приложения на его основе нашли широкое применение в машиностроении, строительстве, архитектуре и других отраслях промышленности (CAD-система).

### **Pro/ENGINEER (США)**

CAD/CAM/CAE-система американской фирмы PTC (Parametric Technology Corporation) является системой САПР верхнего уровня и охватывает все сферы проектирования, технологической подготовки производства и изготовления изделия. Широкий диапазон возможностей аппарата трехмерного моделирования, высокое качество получаемого результата и устойчивость его к последующим изменениям сделали систему Pro/ENGINEER одним из лидеров CAD/CAM/CAE-систем.

Уникальность и преимущество Pro/ENGINEER заключается в том, что все его программные модули являются собственной разработкой компании PTC, благодаря чему пользователь никогда не столкнется с проблемами преобразования или потери данных, неизбежных при совместном использовании программных продуктов от разных производителей.

В Pro/ENGINEER реализовано параметрическое моделирование, т.е. все данные являются параметрами, доступными для изменения на любой стадии их использования. Это достоинство позволяет разработчикам без больших затрат вносить изменения в изделие за рекордно короткое время, находить многовариантные решения конструкции, создавать библиотеки типовых деталей, узлов и технологических процессов.

### **SolidWorks (США)**

SolidWorks (CAD/CAM-система) – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и тех-

нологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Разработана компанией SolidWorks Corporation, ныне являющейся независимым подразделением компании Dassault Systemes (Франция).

Основное назначение SolidWorks – это обеспечение сквозного процесса проектирования, инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения, включая создание интерактивной документации и обеспечение обмена данными с другими системами.

Решаемые задачи: конструкторская подготовка производства; технологическая подготовка производства; управление данными и процессами.

Достоинства: идеальный вариант для трехмерного моделирования; в программе можно решать прикладные задачи; испытать спроектированную с помощью программы деталь можно в условиях, максимально приближенных к реальным, вплоть до температуры детали (такие перспективы открывает далеко не каждая программа); стандартный пользовательский интерфейс, который легко осваивать даже новичкам; может работать с различными приложениями Windows (Excel, Word).

### **Autodesk Inventor (США)**

CAD/CAE-система трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования (САПР) компании Autodesk, предназначенная для создания цифровых прототипов промышленных изделий. Инструменты Inventor обеспечивают полный цикл проектирования и создания конструкторской документации: 2D-/3D-моделирование; создание изделий из листового материала и получение их разверток; разработка электрических и трубопроводных систем; проектирование оснастки для литья пластмассовых изделий; динамическое моделирование; параметрический расчет напряженно-деформированного состояния деталей и сборок; визуализация изделий; автоматическое получение и обновление конструкторской документации (оформление по ЕСКД).

Программа автоматизирует ключевые аспекты процесса проектирования литьевых форм под давлением, позволяет быстро создавать и проверять конструкции форм, а затем экспортировать их в Autodesk Moldflow.

Специальная среда проектирования изделий из листового материала автоматизирует многие аспекты работы. Программа позволяет создавать детали развертки, гнутые профили, формировать фланцы путем 3D-моделирования и вставлять в детали специализированные крепежные элементы.

### **CADKEY (США)**

3D графический пакет для проектирования, твердотельного, поверхностного и каркасного моделирования, визуализации и документирования простых и сложных деталей и сборочных единиц. Система CADKEY автоматизированного проектирования, специально разработанная для решения задач конструирования в машиностроении.

Отличительной чертой CADKEY (по сравнению с аналогичными CAD-системами) является более низкая ее стоимость.

Достоинства: простота, скорость и удобство в работе, обеспечиваемые дружелюбным пользовательским интерфейсом; трехмерная база данных и простой доступ к ее элементам; возможность введения пользовательских макрокоманд и подключения различных периферийных устройств.

### **Think3 (США)**

Think3 – трехмерная САПР для машиностроения среднего уровня. Обеспечивает двумерное проектирование, трехмерное поверхностное и твердотельное моделирование, проектирование изделий из листовых материалов, ассоциативность двумерного чертежа с трехмерной моделью, фотореалистичное представление проекта.

### **Solid Edge (США)**

Solid Edge с синхронной технологией (Synchronous Technology) – комплексная поэлементная 2D/3D CAD-система без дерева построения от компании Siemens PLM Software. Solid Edge построена на основе ядра геометрического моделирования Parasolid и совместима с Microsoft Office. Система предоставляет

возможности для моделирования деталей и сборок, создания чертежей, управления конструкторскими данными и обладает встроенными средствами конечно-элементного анализа.

Специализированные приложения Solid Edge предназначены для проектирования: несущих конструкций, сварных изделий, трубопроводов, электропроводки и литейной оснастки, а также сложных пластиковых деталей.

### **NX (США)**

Разработана американской компанией Siemens PLM Software. Программа использует ядро геометрического моделирования Parasolid.

NX – это CAD/CAM/CAE-система высокого уровня, предназначенная для решения всего комплекса задач, стоящих перед инженерами на всех этапах создания сложных технических изделий (предварительное проектирование, этап инженерного анализа и оптимизации конструкции, изготовление).

Преимущества: позволяет с точностью до микрона строить модели очень сложных форм; возможность корректировать форму изделия на всех этапах разработки; результаты анализа могут быть получены как в графической, так и в численной форме; инструменты визуализации позволяют дизайнеру подготовить наглядные презентации без изготовления дорогостоящих макетов; создание чертежа любой сложности и по любым стандартам; автоматическое создание спецификаций состава изделия; удобные функции задания и редактирования текста.

Обзор представленных программных продуктов позволяет сделать вывод, что при всем многообразии программных комплексов, используемых для симуляции процессов и объектов, немногие из них предназначены для расчетов и моделирования процессов ОМД.

## **1.4. Возможности программных комплексов, базирующихся на методе конечных элементов**

Одним из наиболее эффективных направлений оптимизации процессов производства металлических изделий и совершенствования способов моделирования



процессов ОМД является разработка новых методик компьютерного моделирования.

Создание адекватных компьютерных моделей технологических процессов ОМД производилась до недавнего времени каждым исследователем самостоятельно, поэтому выбирался свой вариант постановки задачи, а на создание алгоритма, разработку, отладку и тестирование программного обеспечения зачастую уходили годы труда целого коллектива. С развитием средств вычислительной техники и снижением стоимости сертифицированного программного обеспечения для компьютерного моделирования все чаще стали применяться специальные ПК такие, как ANSYS, Abaqus, Mars, Deform [62] и др., позволяющие выбрать не только материал из стандартной библиотеки комплекса, но и вариант постановки краевой задачи. Построение компьютерных моделей с использованием современных ПК, в частности, программы ANSYS позволяет решать разноплановые задачи [63]: а) разработки ТП обработки давлением перспективных конструкционных материалов в состоянии сверхпластичности; б) расчетов параметров геометрии очага деформации при прокатке.

Сегодня созданы программные продукты, позволяющие моделировать полный цикл изготовления изделия, включая выполнение комплекта чертежной документации, проектирование технологических процессов и прогнозирование его показателей, а также осуществлять имитационное моделирование действующих при эксплуатации детали нагрузок, определять опасные зоны, допустимые нагрузки и вид разрушения. При этом анализ виртуального производства дает возможность выявить ошибки и возможные дефекты в изделиях еще на стадии проектирования, что приводит к повышению качества продукции и эффективности производства. С этих позиций был рассмотрен автоматизированный расчет и проектирование шаровых пальцев, которые широко применяются в качестве элементов различных шарнирных звеньев, с помощью программы ANSYS [64]. Информацию по режимам упрочняющей технологии шаровых пальцев можно получить только моделированием тепловых и деформационных процессов при их изготовлении [65, 66]. Анализ напряженного и деформированного состояния мате-

риала, а также основных технологических процессов и выбор наиболее эффективной технологической схемы изготовления цилиндрических заготовок успешно осуществляются на основе ПК QForm 2D/3D [67]. Для исследования напряженно-деформированного состояния металла поковки и заполнения полости штампа при полугорячей объемной штамповке также возможно использование ПК QForm [68], а при моделировании процессов осадки для условий плоского деформированного состояния – QForm 2D [69]. Проектирование 3D-моделей штампового и кузнечного оборудования средствами САЕ-систем не всегда поддается автоматизации и представляет собой процесс, который в зависимости от производственной практики во многом определяется опытом конструкторов и технологов. В связи с этим разработана система автоматизированного проектирования (САПР) штамповой оснастки, которая реализует сочетание формализованного автоматизированного процесса определения геометрии штампа для объемной штамповки компрессорных лопаток авиационных двигателей из титановых сплавов с возможностью его интерактивной коррекции на основе производственного опыта и оптимизации его геометрии средствами САЕ-систем [70]. Для высокоскоростной штамповки лопаток из титановых сплавов была разработана методика моделирования микроструктуры в зависимости от термомеханических режимов деформирования, которая основана на уравнениях движения деформируемой поликристаллической среды и аналитической модели процесса рекристаллизации. Моделирование распределения интенсивности деформации в процессе выдавливания заготовки лопатки из сплава ВТ9 проводилось в ПК Deform-3D [71].

При штамповке сплавов, имеющих узкий допустимый температурный интервал деформирования, особенно важно предупредить возникновение брака в результате деформационного разогрева. Штамповая оснастка для мощных гидравлических штамповочных прессов, применяемых для штамповки алюминиевых сплавов, отличается большой массой, а изготовление гравюры штампа – высокой трудоемкостью [72]. Различные приемы для обеспечения точности изготовления штампа и повышения качества приводят к росту себестоимости поковок. Поэтому при разработке применяемого на действующем предприятии ТП горячей объем-

ной штамповки поковок из алюминиевых сплавов также используются основанные на МКЭ программные комплексы Deform-3D и SolidWorks, что позволяет построить зависимость усилия штамповки от рабочего хода пресса и проиллюстрировать процесс деформирования последовательным изменением исходной формы заготовки до конечной формы штампованной поковки. Моделирование с помощью Deform-3D процессов холодной объемной штамповки дает хорошую сходимость с результатами экспериментальных данных [73]. МКЭ используется и при двумерной постановке задачи исследования процессов холодной асимметричной тонколистовой прокатки [74],ковки заготовок в профильных и гладких бойках для анализа зависимости режимов обжатия с размерами заготовки и штампов с профильной поверхностью [75] (Deform-2D). Для проверки адекватности результатов работы программных комплексов в SolidWorks было произведено моделирование цилиндрических образцов с различными соотношениями высоты и диаметра [76], а также при изготовлении штамповой оснастки [77]. Результаты моделирования дают хорошую сходимость с данными реальных процессов, описанных в литературе, что позволяет использовать компьютерное моделирование для дальнейшего анализа процессов ОМД.

Трудоемкостью и высокой себестоимостью производства деталей отличается штамповка изделий без штамповочных уклонов. Такой способ штамповки обычно реализуют в двух штампах: формоизменяющем и калибровочном. В настоящее время разработан способ закрытой штамповки поковок, у которых образующие боковых стенок совпадают с направлениями действия силы штамповки и силы выталкивания поковки из полости штампа [78] (поковки типа шестерен, фланцев и др.). Предложен алгоритм проектирования данного способа изготовления изделий, который реализован компьютерной программой. Программа прошла успешную апробацию: отштампована опытная партия поковок шестерен, которые имели гладкие цилиндрические поверхности обода.

Исследования напряженно-деформированного состояния материала заготовки, полуфабриката и поковки в процессах ковки также могут проводиться с помощью численного моделирования [79]. На основе МКЭ с использованием про-

граммы MSC.SuperForge получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения напряженно-деформированного состояния и температуры при моделированииковки на радиально-ковочной машине с различными углами кантовки, разработана технология получения поковки с равномерной мелкозернистой структурой при использовании совмещенного способаковки с применением наряду с радиально-ковочной машиной протяжки в плоских бойках.

Для теоретического анализа процессов теплодеформированного формообразования предложено большое количество расчетных моделей (аналитических и численных), учитывающих различные параметры. Современные ПК типа ANSYS или Abaqus позволяют довольно точно моделировать эти процессы, но на практике часто приходится решать «обратные» задачи, т.е. требуется определять форму заготовок, порядок и режимы их нагрева для получения деталей с заданной геометрией и свойствами, а также возможность их получения [80]. Недостатком рассмотренных ПК является невозможность достижения требуемой точности размеров и формы получаемых деталей, несмотря на различные существующие способы обработки.

Важным способом повышения качества и конкурентоспособности продукции является интеграция существующих на предприятиях САПР в единую функциональную систему, с учетом взаимосвязи на этапах проектирования и разработки с другими системами [81].

### **1.5. Классификация CAE-систем [82]**

Для инженерного анализа различных процессов в настоящее время успешно используются CAE-системы. Как было указано ранее, в CAD-системах создается геометрическая модель изделия, которая используется в качестве входных данных для САМ-систем и на основе которой в CAE-системах создается модель исследуемого процесса.

В процессах ОМД моделирование картины течения металла весьма затруднительно, т.к. зависит от многих факторов, таких как трение, толщина, вид материала, граничные условия и так далее. Это требуют сложных математических моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние пластического формообразования металла. Современные САЕ-системы с достаточно высокой точностью позволяют моделировать процессы формообразования поковок различного назначения, они позволяют не только показать направление течения частиц металла, но и напряжения, возникающие в деформируемом материале, трехмерную картину формообразованияковки, вероятности образования дефектов и многое другое.

Все САЕ-системы, предназначенные для моделирования процессов ОМД, можно условно разделить на универсальные (ANSYS, SuperForge, Forge, Abaqus), специальные (Deform, QForm, Splen) [83] и специализированные (Parshtamp, EQUI) [84] (рисунок 1.3).

Следует отметить, что приведенная классификация является весьма условной. Так как одни и те же системы можно отнести и к универсальным, и к специальным, а грань между специальными и специализированными вообще едва ощутима. Так, ПК Deform, являясь специальным, позволяет моделировать практически все технологические процессы, применяемые на производстве, с учетом целого ряда параметров.



Рисунок 1.3 – Классификация САЕ-систем

## **ANSYS (США)**

Для моделирования процессов ОМД (и не только) давно и широко применяется многоцелевой программный комплекс ANSYS (CAD/CAE-система).

ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного анализа. Это универсальный пакет, предназначенный для решения в единой среде на одной и той же конечно-элементной модели задач по прочности, теплу, электромагнетизму, гидрогазодинамике, многодисциплинарного связанного анализа и оптимизации.

Улучшенная технология ANSYS [85] содержит в себе множество новых возможностей, которые позволяют сделать процесс вывода изделий на рынок более эффективным, быстрым и менее затратным. Более плотная интеграция позволяет объединять задачи из разных областей физики, что дает возможность прогнозировать поведение изделия в реальных условиях.

ANSYS позволяет моделировать практически все процессы обработки металлов давлением, начиная от простой подгибки или осадки заготовки, заканчивая деформацией многослойных материалов или штамповкой взрывом. При этом в отличие от теоретических расчетов, где есть существенные ограничения по размерам и форме заготовки, здесь практически нет ограничений по этим параметрам.

Основные сложности моделирования – это наличие большого количества разнообразных меню и параметров при вводе, что требует высокой подготовки и глубокого понимания процесса и необходимость высокопроизводительных систем для их решения.

## **SuperForge (США)**

SuperForge [86] представляет собой современную компьютерную систему для моделирования штамповки, которая давно нашла свое применение в области анализа трехмерных процессов объемного формообразования. Этот программный продукт может быть эффективно использован для оценки влияния выбора штамповой оснастки и режима обработки на типичные характеристики процесса: пла-

стические деформации металла, окончательную форму и свойства обрабатываемой заготовки, размеры облоя и др.

В отличие от обычной конечно-элементной сетки, которая изменяется в соответствии с деформациями материала, сетка в SuperForge представляет собой неподвижную систему отсчета, и материал просто протекает сквозь ячейки этой эйлеровой сетки. Благодаря такой особенности система SuperForge в наибольшей степени приспособлена для моделирования больших деформаций материала, возникающих в процессе штамповки, и полностью исключает необходимость применения различных способов регенерации сетки, которые являются основным недостатком в системах трехмерного моделирования штамповки, основанных на традиционном методе конечных элементов.

Для моделирования пластичности материала предусмотрено несколько основных моделей, в том числе упругопластическая модель Мизеса (или Джонсона и Кука), а также модели пластичности конкретных материалов, применяемых при холодной и горячей штамповке. Параметры деформационного упрочнения, входящие в модели и описывающие течение материала при холодной штамповке, зависят от эффективных скоростей деформаций, а при горячей штамповке – от температуры и степеней деформации.

### **Abaqus (США)**

Программный конечно-элементный комплекс Abaqus – универсальная система общего назначения, предназначенная как для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного анализа, так и для научно-исследовательских и учебных целей в самых разных сферах деятельности.

Программный комплекс Abaqus изначально был ориентирован на решение самых сложных и ответственных задач, с учетом всех видов нелинейностей, а также на проведение многодисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма. Такая концепция выгодно отличает Abaqus от других программ подобного уровня (программный комплекс ANSYS для анализа сильно нелинейных и быстротекущих процессов использует стороннюю программу LS-DYNA), что позволяет с помощью Abaqus в рамках единого подхода

решать многоцелевые задачи, сочетая преимущества явной и неявной схем конечно-элементного анализа и их комбинацию.

Программный комплекс Abaqus является эффективным инструментом конечно-элементного моделирования, в частности, с его помощью было проведено исследование напряженно-деформированного состояния при сверхпластической формовке трехслойной ячеистой панели [88].

### **Deform (США)**

Deform – CAD/CAE-система, основанная на МКЭ, разработана американской компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC).

Это специализированный программный комплекс, предназначенный для моделирования практически всех технологических процессов ОМД (ковки, штамповки, прокатки, прессования, вытяжки, высадки и др.), а также операций термической обработки (закалки, старения, отпуска и др.) и механообработки (фрезерования, сверления и др.). Deform позволяет выполнить анализ двухмерного (2D) [89] и трехмерного (3D) [90] поведения материала при различных процессах ОМД, дает важную информацию о течении материала в штампе и распределении температур во время моделирования.

В Deform проводилось исследование влияния температурных условий калибрования стали в монолитной волоке, оценка влияния температуры волочения на долговечность инструмента при получении калиброванной стали заданного качества [91]. Deform используют для исследования процесса упругого деформирования деталей различного назначения, например, для моделирования технологического процесса штамповки поковки «Корпус турбины» из жаропрочного сплава [92], или для исследования упругого деформирования пружинных клемм [93].

С помощью пакета Deform-3D проведено моделирование комбинированного выдавливания сложно-профильных деталей в условиях сверхпластичности [94], процесса холодной штамповки эксцентрических трубных переходов методом «обжим-раздача» [95], и болтов с фланцем, а также разработана конструкция инструмента для формирования шестигранной головки болта [96].



Программный комплекс обладает целым рядом преимуществ: универсальность – программа Deform позволяет моделировать широкий круг технологических процессов, применяемых на производстве; совместимость с большинством программных пакетов; большая база данных по характеристикам материалов и кузнечнопрессового оборудования, а также широкие возможности по их редактированию и добавлению; возможность моделирования различных условий трения между заготовкой и инструментом; простой и удобный интерфейс.

Официальным представителем компании SFTC в России и странах СНГ является компания «ТЕСИС» [97].

### **Forge (Франция)**

Программный комплекс Forge на базе МКЭ пользуется наибольшей популярностью во Франции [87]. Программа использует классический язык, разработанный для отрасли. Использование моделирования и ЭВМ дает возможность осуществить проектирование поковки и штампа, составление монтажных и отдельных чертежей и спецификаций. На дисплее получают оптимальные параметры штамповки, такие как температура, усилия, переходы. Программа Forge позволяет вводить графическую информацию, которая определяет гравюру штампа (диаметр и высота), а также коэффициент теплового расширения деформируемого материала.

### **QForm (Россия)**

Эта программа уже много лет присутствует на рынке программного обеспечения [98]. QForm является одной из немногих российских разработок в области high-tech программного обеспечения, которая применяется на зарубежных предприятиях.

В программе QForm реализован метод двойной конечно-элементной сетки, который наиболее эффективно может использоваться для ускорения расчета процессов с локализованным очагом деформации – свободнойковки, раскатки колец, продольной прокатки, винтовой прошивки, а также для более точного расчета тепловых полей в любых процессах формоизменения металла. Программный

комплекс позволяет проектировать технологию прессования изделий из трудно-деформируемых алюминиевых сплавов [99, 100].

QForm позволяет производить расчет холодной, теплой и горячей объемной штамповки, а также предсказывать возникновение различных штамповочных дефектов [101-103]. Программа имеет большие возможности для моделирования комплексных технологических процессов, основанных на последовательном наборе операций, например, при производстве железнодорожных колес на прессо-прокатных линиях или совмещенного процесса прокатки-прессования [104, 105].

Производственный опыт подтверждает высокую точность компьютерного моделирования горячей объемной штамповки с использованием программы QForm 2D и 3D [106].

QForm 7 наряду с простотой использования и получением полной расчетной картины напряженно-деформированного состояния заготовки и инструмента сохранены базовые функции [107], такие как цепочки 2D и 3D операций, предсказание появления складок и зажимов, дефектов незаполнения формы. Моделирование процесса термического сверления заготовок из жаропрочного сплава в QForm 7 позволяет учесть нагрев и деформацию элементов составной оснастки, а также выполнять моделирование одновременной деформации нескольких заготовок [108, 109].

Сегодня успешно используются новые версии QForm, в частности QForm V8 для моделирования процесса горячей штамповки поковок деталей автомобилей, исследования формообразования и моделирования технологического процесса холодного комбинированного выдавливания полых деталей [110, 111], а также QForm Extrusion VX, которая позволяет проектировать более сложные процессы [112].

### **Splen (Россия)**

С начала 1990-х годов фирмой КОММЕК разрабатывается и совершенствуется программный комплекс Splen для расчета и моделирования процессов пластической деформации [113]. С его помощью выполняется моделирование нелинейных процессов, обладающих высоким уровнем наукоемкости [83], например:

анализ напряженно-деформированного состояния ледяных структур при моделировании криобота для изучения спутника Юпитера Европы и результатов моделирования термонапряженно-деформированного состояния в окрестности электрического ввода в конструкции кольцевого лазера.

На основании проведенного обзора можно сказать, что самыми популярными и удобными для моделирования процессов ОМД являются Simula, Abaqus, ANSYS, Deform-3D, QForm. С помощью программы QForm исследованы деформационные эффекты при ковке-протяжке в бойках со скрещивающимися рабочими поверхностями [114]. Моделирование типовых процессов деформирования цилиндрических образцов одноосным растяжением, сжатием и сдвигом выполняется с помощью программных комплексов ANSYS и Abaqus [115].

К достоинствам рассмотренных программных комплексов можно отнести: широту охвата решаемых задач; удобство работы с программным комплексом; простой, интуитивно понятный интерфейс; точность получаемых результатов, которая зависит от адекватности модели реальному процессу. Однако следует оговориться, что метод конечных элементов, лежащий в основе подавляющего большинства программных комплексов широкого профиля, дает хорошие результаты, главным образом, для малых деформаций.

Недостатки представленных программных продуктов: достаточно высокие требования к параметрам компьютерной техники; значительное время расчета и моделирования одного варианта; сложность и низкая скорость создания файла входных данных; длительность обучения пользователей.

При выборе программных продуктов для использования на промышленных предприятиях следует руководствоваться возможностями конкретного пользователя, предназначением вычислительной системы, вопросами экономии ресурсов.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. В связи с существованием большого разнообразия способов моделирования необходима их детальная классификация, которая позволяет, во-первых,

оценить с разных позиций и разными методами формообразование поковок, а во-вторых, сравнить результаты, полученные с помощью различных способов моделирования.

2. Компьютерное моделирование на сегодняшний день является самым современным, продуктивным и мощным способом моделирования. Рынок программных продуктов, предназначенных для моделирования процессов пластической деформации, представлен универсальными, специальными и специализированными программными комплексами, которые дополняют друг друга.

3. Универсальные и специальные программные комплексы предназначены для решения сложных технологических и конструкторских задач с широким набором моделируемых процессов, большим количеством заданных параметров, максимально приближенных к реальным условиям производства.

4. Подавляющее большинство программных комплексов, применяемых сегодня на промышленных предприятиях различных отраслей машиностроения, базируется на методе конечных элементов.

5. Специализированные программные комплексы ограничены в своих возможностях моделирования технологических процессов, однако позволяют быстро получать результаты, просты в освоении и эксплуатации и не требуют больших затрат при их реализации.

## **Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА**

### **2.1. Принципы формоизменения плоских заготовок [84]**

Формообразование поковок в процессахковки и штамповки в значительной степени определяется КСТМ.

В качестве одного из способов решения задачи моделирования картины течения металла по плоскости контакта в процессахковки и штамповки разработана так называемая «эквидистантная теория» («экви-теория»), основанная на трех известных «минимизационных» принципах [16]:

1. Принцип наименьшего сопротивления, выдвинутый применительно к пластической деформации Треска Г. (1895 г.), сформулирован Губкиным С.И. следующим образом: «В случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях, каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления» [1]. Прямым следствием закона наименьшего сопротивления является, например, образование заусенца при штамповке в открытых штампах. Металл в начальный период штамповки начинает вытекать в стороны за пределы фигуры штампа в зазор между верхним и нижним штампами. Заполнение же элементов полости штампа возможно, если сопротивление течению металла в заусенец увеличивается по мере уменьшения его толщины в процессе движения верхнего штампа, что и обеспечивает в конечном итоге заполнение всех элементов полости. Для практического применения закона наименьшего сопротивления необходимо знать направление траектории, по которой для точек, на ней расположенных, сопротивление течению будет наименьшим.

2. Для случая осадки (сжатия) призматических и цилиндрических тел между параллельными плитами (бойками) при наличии контактного трения эти траектории определяются по принципу кратчайшей нормали, сформулированному Головиным А.Ф. [116], заключающемуся в том, что перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к действию внешней силы, происходит по крат-

чайшей нормали к периметру сечения. Максимальную конечную деформацию тело получит в тех направлениях, по которым будет передвигаться наибольшее количество точек. Пусть, например, осаживается призма с прямоугольным основанием. Согласно принципу перемещения точек по кратчайшей нормали к периметру сечения прямоугольник можно разделить на два треугольника и две трапеции линиями раздела течения, поскольку длина нормалей к периметру сечения по обе стороны из каждой точки, лежащей на этих линиях, будет одинаковой. Учитывая количество точек тела, расположенных на направлениях течения в данном сечении, можно предположить, что после некоторой осадки сечение примет вид многоугольника.

Однако этот принцип вызывает определенные противоречия: в реальных процессах деформации при увеличении степени осадки заготовки периметры его поперечных сечений стремятся к эллипсам, а не превращаются в многоугольники. В дальнейшем при еще большей степени деформации эллипсы преобразуются в круги, после чего движение точек происходит по радиусам окружности.

3. Такая закономерность изменения формы поперечных сечений тела при осадке была замечена еще Зоббе К. (1908 г.), который предложил принцип наименьшего периметра [5]. Этот принцип можно сформулировать следующим образом: любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке его в пластическом состоянии с наличием контактного трения стремится принять форму, имеющую при данной площади наименьший периметр, т.е. в пределе стремится к кругу.

Принцип наименьшего периметра справедлив при перемещении точек деформируемого тела по кратчайшим нормальям к периметрам сечений, перпендикулярных к направлению действующей силы.

В дальнейшем было установлено, что кратчайшая нормаль не всегда является направлением наименьшего сопротивления, а лишь при двух условиях: если трение на поверхностях контакта металла с инструментом изотропно, т. е. одинаково по всем направлениям; если величина контактного трения значительна [18].

При осадке, например, прямоугольного параллелепипеда между плоскими бойками без контактного трения схема перемещения точек отличается от описанной выше, когда прямоугольник превращается в многоугольник, а затем эллипс и круг. Движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению внешней силы, носит радиальный характер, и поперечные сечения в процессе деформации будут оставаться подобными исходным [18].

Рассмотренные выше принципы действительны для деталей, имеющих ярко выраженное полотно (т.е. плоскостные участки). Несмотря на кажущуюся ограниченность области применения данной экви-теории из-за вышеприведенной оговорки, тем не менее, детали с признаком «плоскостности» составляют обширный класс, охватывающий, например, ракето- и самолетостроение, да и в целом машиностроение.

Следствием этих принципов можно считать положения:

- существует линия, вдоль которой скорости перемещения частиц металла равны нулю – так называемая, линия раздела течения металла (ЛРТМ);
- линия раздела течения металла является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура заготовки, т.е. эквидистантой;
- линии тока направлены ортогонально контуру заготовки при коэффициенте трения, близком к единице, и радиально – при минимальном трении;
- в действительности пластическое течение по плоскости контакта происходит в соответствии с промежуточной кинематической схемой течения металла;
- картина течения металла (КТМ) представляет собой совокупность ЛРТМ и линий тока (ЛТ).

## **2.2. Анализ предельных случаев: радиальная и нормальная кинематические схемы течения металла**

До сегодняшнего дня достаточно спорным является вопрос о схеме течения металла в процессах пластического деформирования плоских заготовок (или заготовок с ярко выраженным развитым полотном, в том числе, с ребрами жесткости)

[117]. В теории обработки металлов давлением известны методы анализа пластических деформаций, возникающих в металлах при получении поковок. В результате теоретических и экспериментальных исследований различных схем деформирования материалов Тарновским И.Я., Головиным А.Ф., Губкиным С.И. и др. были получены закономерности формоизменения металла, в частности получены кинематические схемы течения металла [17, 116, 118], две наиболее характерные из них представлены на рисунке 2.1.

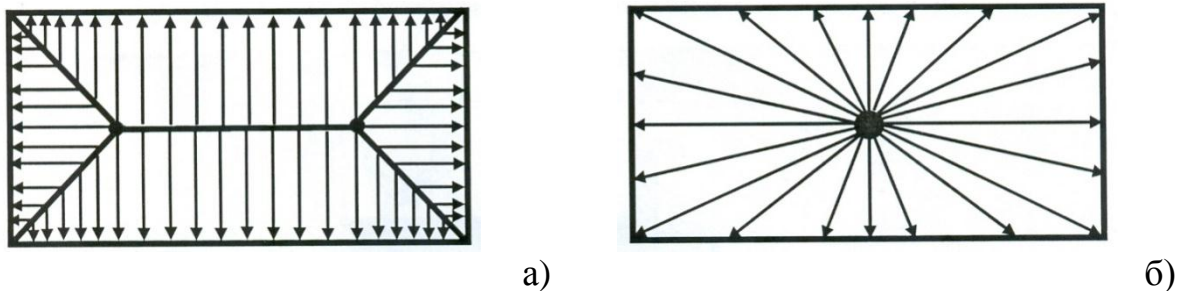


Рисунок 2.1 – Предельные кинематические схемы течения металла:

а) «нормальная» схема А.Ф. Головина;

б) «радиальная» схема И.Я. Тарновского

Головиным А.Ф. была предложена так называемая «нормальная» схема (рисунок 2.1, а), основанная на принципе кратчайшей нормали. При такой схеме течения металла линии тока направлены по нормали к контуру заготовки. Однако здесь мы видим ряд противоречий. В этом случае прямоугольная пластина в ходе осадки должна превращаться в многоугольник. В реальных же процессах прямоугольник после деформации приобретает форму эллипса [116].

На рисунке 2.1, б представлена предложенная Тарновским И.Я. радиальная схема течения металла, в соответствии с которой линии тока направлены вдоль радиусов некоторой окружности, под углом к контуру заготовки. Радиальная схема предполагает, что при свободной осадке прямоугольного параллелепипеда, когда деформация однородна, сечение деформируемого параллелепипеда в «плоскости свободного формоизменения» все время остается подобным прямоугольником (рисунок 2.2, а), а проекции перемещения точек на плоскость свободного формоизменения имеют вид, представленный на рисунке. При такой схеме в процессе



деформирования прямоугольник увеличивается в размерах, но не меняет своей формы [17].

Несмотря на широкое распространение, эти схемы являются приближенными и нуждаются в доработке. Так, «нормальная» схема Головина А.Ф. не учитывает влияние различных условий трения (принимается анизотропия трения) и структуры металла.

Шарапин Е.Ф. при моделировании процесса протяжки показал, что анизотропия контактного трения оказывает существенное влияние на изменение формы сечения, расположенного в плоскости, перпендикулярной действующей силе [119]. При этом трудно обосновать появление зон застоя (рисунок 2.2, б) в центральной части поковки со стороны свободного конца.

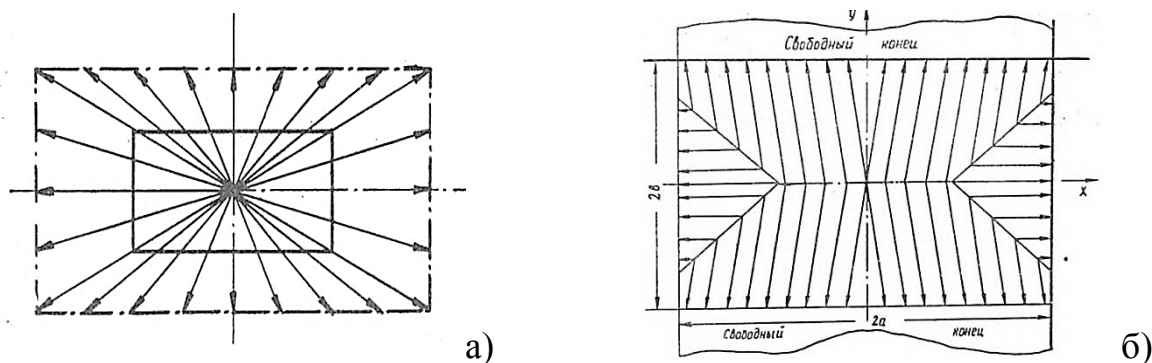


Рисунок 2.2 – Формоизменение прямоугольного образца

Рассмотренные кинематические схемы могут быть реализованы при некоторых идеальных, предельных граничных условиях. Так, радиальная схема Тарновского И.Я., справедлива для коэффициентов трения, близких к нулю, а «нормальная» схема Головина А.Ф. описывает процесс осадки для коэффициентов трения, близких к единице [116]. Очевидно, что на практике реализовать подобные предельные условия не представляется возможным.

### 2.3. Промежуточная кинематическая схема течения металла

Моделирование КСТМ проводилось и ранее. Так, согласно теории тонкого слоя Ильюшина А.А. [8] применимость нормальной кинематической схемы возможна для относительно тонких поковок. Для определения применимости данной

теория к расчету формоизменения поковки, следует использовать критерий  $\hat{h}$  – показатель относительной толщины заготовки, равный отношению толщины заготовки к линейному размеру заготовки в плане (длине или ширине). Если это отношение менее  $1/10$ , то слой можно считать тонким.

Работы Тарновского И.Я. по определению формоизменения заготовки в процессе свободной осадки проводились для различных форм и материалов при различных условиях контактного трения. Схема Головина А.Ф. в значительной степени зависит от коэффициента трения. Авторы предельных кинематических схем (нормальной и радиальной) не скрывали недостатков своих схем и предполагали в действительности существование некоторой «промежуточной схемы» [17].

Попытку объединить нормальную и радиальную схемы советские исследователи предпринимали еще в конце прошлого века [71]. Ими высказывалась идея о том, что в начальный момент деформирования имеет место нормальная КСТМ, а затем – псевдо радиальная, которая сочетает в себе элементы нормальной и радиальной (рисунок 2.3): ЛРТМ в соответствии с ней расположены так же, как в нормальной, но ЛТ имеют разрывы, обусловленные наличием двух зон течения металла [120]. Очевидно, что в реальных процессах это невозможно. Виртуальные и лабораторные эксперименты опровергают представленные схемы. К тому же указанные схемы не объясняют активное формообразование угловых областей поковок. При таком подходе от нормальной схемы мало пользы, т.к. совершенно непонятно, что считать начальным моментом и когда он заканчивается. Реальной, по-видимому, можно считать лишь так называемую «псевдонормальную» КСТМ, которая и наблюдается в ходе всего процесса осадки. Как показывают многочисленные исследования, ЛТ не могут быть перпендикулярны реальному контуру, т.к. это возможно только в предельных случаях, когда трение максимально (фактор трения  $k_\phi$  стремится к единице), или в начальный момент деформирования.

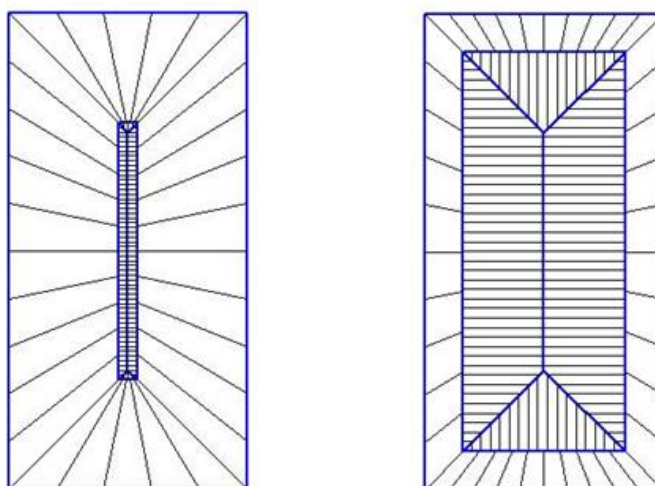


Рисунок 2.3 – Промежуточная КСТМ:  
слева при  $k_\phi \rightarrow 0$ , справа при  $k_\phi \rightarrow 1$

Реальные процессы происходят при довольно больших контактных силах трения, поэтому в начальный момент деформирования движение частиц металла происходит в соответствии с нормальной КСТМ. В дальнейшем ЛТ остаются перпендикулярными, но уже не реальному, а некоторому условному контуру. Поэтому именно «псевдонормальная» схема положена в основу наших исследований, выводов и разрабатываемого ПК, т.к. именно такая КСТМ дает возможность наиболее точно описать картину течения металла.

#### 2.4. Влияние трения на кинематическую схему течения металла [117]

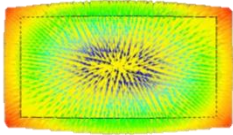
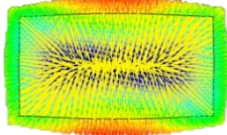
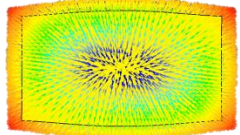
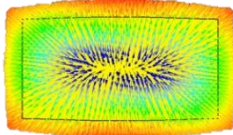
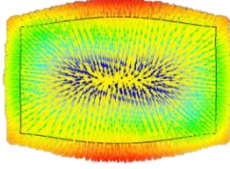
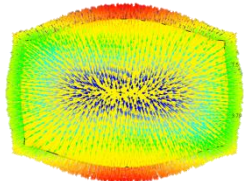
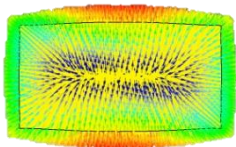
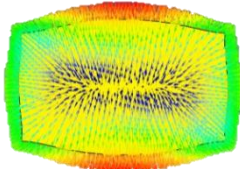
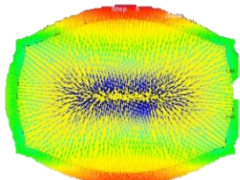
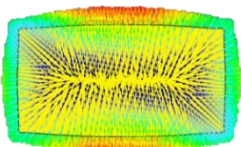
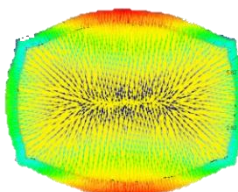
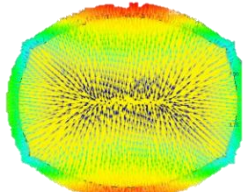
Существование промежуточной схемы течения металла подтверждается также при проведении виртуальных экспериментов с помощью специализированных программ, например, в программном комплексе Deform.

Deform зарекомендовал себя с лучшей стороны на мировом рынке как продукт, позволяющий моделировать практически все процессы обработки металлов давлением, а также исследовать различные факторы, влияющие на схему течения.

При проведении виртуальных экспериментов с помощью ПК Deform было выполнено моделирование процесса свободной осадки образцов из алюминия Aluminium 3003 (соответствует сплаву АМц) при температуре заготовки 420°C,

температуре штампов 400°C, температуре окружающей среды 20°C, с учетом теплообмена со средой и инструментом. В качестве заготовки была выбрана пластина с геометрическими размерами 20x40 мм и толщиной 4 мм. Эксперимент проводился при минимальном и максимальном трении, когда наблюдаются радиальная и нормальная КСТМ соответственно, рассматривался также промежуточный случай для коэффициента трения 0,5. Исследовались образцы при степенях деформации  $\varepsilon = 0,1; 0,25; 0,5$  и  $0,75$ . Результаты моделирования в ПК Deform приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Влияние трения на КСТМ

<div>Фактор трения</div> <div>Степень деформации</div>	$k_f = 0,1$ радиальная схема	$k_f = 0,5$	$k_f = 0,9$ нормальная схема
$\varepsilon = 0,1$			
$\varepsilon = 0,25$			
$\varepsilon = 0,5$			
$\varepsilon = 0,75$			

Как видно из таблицы, с увеличением силы трения наблюдается переход от радиальной схемы к нормальной, и имеет место некоторая промежуточная схема

течения, в которой явно выражена зависимость формообразования от условий трения.

Важно отметить, что количественным показателем, характеризующим трение, является фактор трения, а не коэффициент трения.

Сила трения определяется сложной функцией, для описания которой необходимо учитывать множество факторов: вид трения, физико-химическое состояние контактных поверхностей, наличие в процессе трения химических реакций, температура деформации и т.д. [118]. В связи с этим на практике пользуются упрощенными законами трения и различают коэффициент трения и фактор трения.

Под коэффициентом трения  $k_{\text{тр}}$  понимают коэффициент пропорциональности между контактным касательным напряжением (напряжением трения)  $\tau_{\text{тр}}$  и нормальным напряжением  $\sigma_{\text{к}}$  на контактной поверхности, а именно закон Амонтона-Кулона:

$$k_{\text{тр}} = \frac{\tau_{\text{тр}}}{\sigma_{\text{к}}}.$$

Принято считать, что коэффициент трения изменяется в пределах от 0,1 до 0,5.

При описании контактного трения в процессах горячей объемной штамповки,ковки и прессования, особенно при больших степенях деформации, применяют закон трения по Зибелю. В этом случае трение принимают независимым от нормальной нагрузки и выражают его в долях от величины сопротивления деформации сдвига металла:

$$\tau_{\text{тр}} = k_{\text{ф}} \cdot \tau_s ,$$

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} ,$$

где  $k_{\text{ф}}$  – фактор трения, который изменяется в пределах от 0,2 до 1;

$\tau_s$  – напряжение текучести на сдвиг;

$\sigma_s$  – напряжение текучести на растяжение-сжатие.

В теории ОМД существует также и комбинированная модель трения, учитывающая закон Зибеля и Кулона. Одним из вариантов такого подхода является модель трения Леванова:

$$\tau_{\text{тр}} = k_{\phi} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} (1 - e^{-1.25\sigma_k/\sigma_s}).$$

В основе используемого при проведении виртуальных экспериментов ПК Deform лежит математическая модель, основанная на учете фактора трения по Зибелю, что дает возможность выполнять моделирование и проводить анализ предельных случаев КСТМ при значениях трения, близких к 0 или 1.

Рассматривая вопросы влияния материала на схему течения, обратим внимание на реологические характеристики исследуемых металлов. Так, в работах Смирнова О.М., посвященных исследованию реологии металлов [121, 122], используемых в ОМД, показано, что реологическое поведение средне- и мелкозернистых материалов со средним размером зерна от 100 до 0,01 мм может быть описано моделью вязкопластической среды со значимой долей вязкого компонента. Поэтому при деформировании в условиях теплой, полугорячей и горячей деформации при скоростях, типичных для большинства процессов ОМД, их целесообразно рассматривать как вязкопластические материалы. При таком подходе можно сказать, что и условия для течения металла будут схожи для материалов, относящихся к средне- и мелкозернистым. Следовательно, и применимость кинематических схем течения металла для таких материалов будет одинаковой. Важно отметить, что к таким материалам можно отнести большинство конструкционных материалов, используемых в процессахковки и штамповки, например, деформационные сплавы алюминия или конструкционные стали.

Таким образом, анализируя результаты виртуальных экспериментов и используя накопленные данные, относящиеся к реологическим особенностям материалов, а также опыт исследования уже существующих кинематических схем течения металла и зависимость их от различных факторов, можно предположить, что промежуточная кинематическая схема содержит элементы как нормальной, так и радиальной схем течения металла.

## 2.5. Обоснование закономерностей формообразования, являющихся следствием предельных случаев

Как уже было отмечено выше, с увеличением трения наблюдается переход от радиальной схемы к нормальной, и имеет место некоторая промежуточная схема течения. Зависимость формообразования от условий трения довольно подробно изучена, однако исследования в основном проводились для относительно тонких заготовок, для которых показатель трения является решающим фактором при определении КСТМ.

Анализ предельных случаев, положенных в основу построения КСТМ, позволяет получить достаточно очевидный график зависимости радиуса реального контура заготовки  $R$  от фактора трения  $k_\phi$ . Однако мы можем с точностью определить только два крайних положения этого графика. А именно, при факторе трения, близком к единице, радиус реального контура  $R$  имеет вполне определенное значение  $R^*$ , а при факторе трения, стремящемся к нулю, радиус контура стремится к бесконечности. Поведение же графика в промежуточной зоне остается неизвестным (рисунок 2.4, слева). При этом очевидно, что при любом трении радиус контура  $R$  имеет конечное значение.

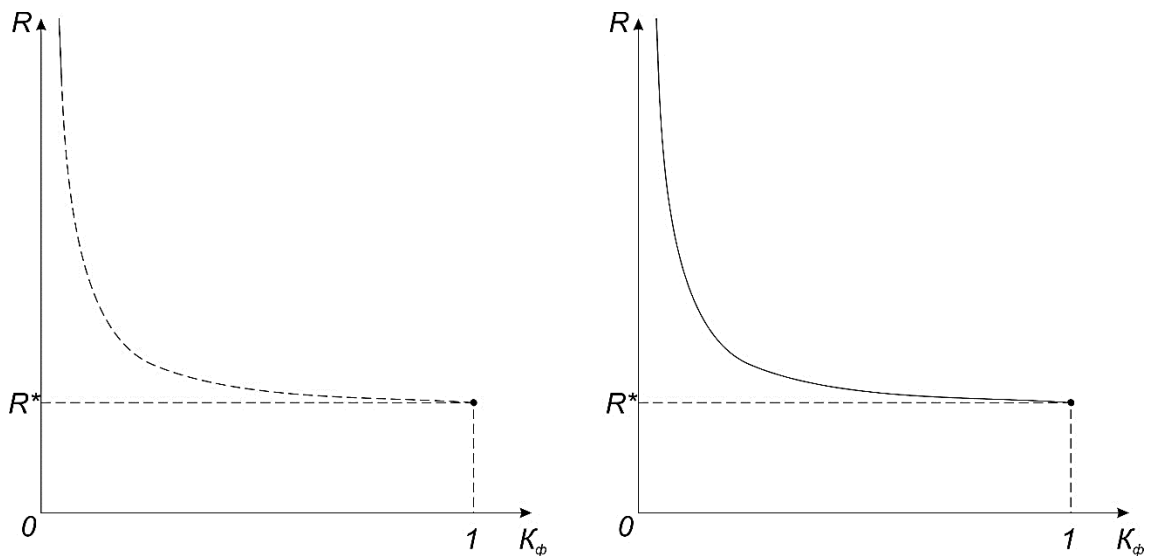


Рисунок 2.4 – Зависимость радиуса реального контура заготовки  $R$  от условий трения

Для уточнения формы указанного графика были проведены исследования по изучению зависимости КСТМ от начальной толщины заготовки и условий трения. В ходе виртуальных экспериментов в ПК Deform моделировалось формообразование пластин с геометрическими размерами: длина 40 мм, ширина 20 мм из алюминиевого сплава при различных условиях трения и степени деформации. В первом случае толщина пластины задавалась равной 4 мм, во втором – 20 мм.

На основании полученных результатов были построены графики зависимости радиуса контура заготовки  $R$  от фактора трения  $k_\phi$ . Графики зависимости радиуса действительного контура, отнесенного к начальной толщине заготовки  $h_0$ , от фактора трения  $R/h_0 = f(k_\phi)$  для пластины с геометрическими размерами 20x40 мм толщиной 4 мм приведены на рисунке 2.5, а для пластины с такими же размерами, но толщиной 20 мм – на рисунке 2.6. Эти зависимости изображены сплошными линиями.

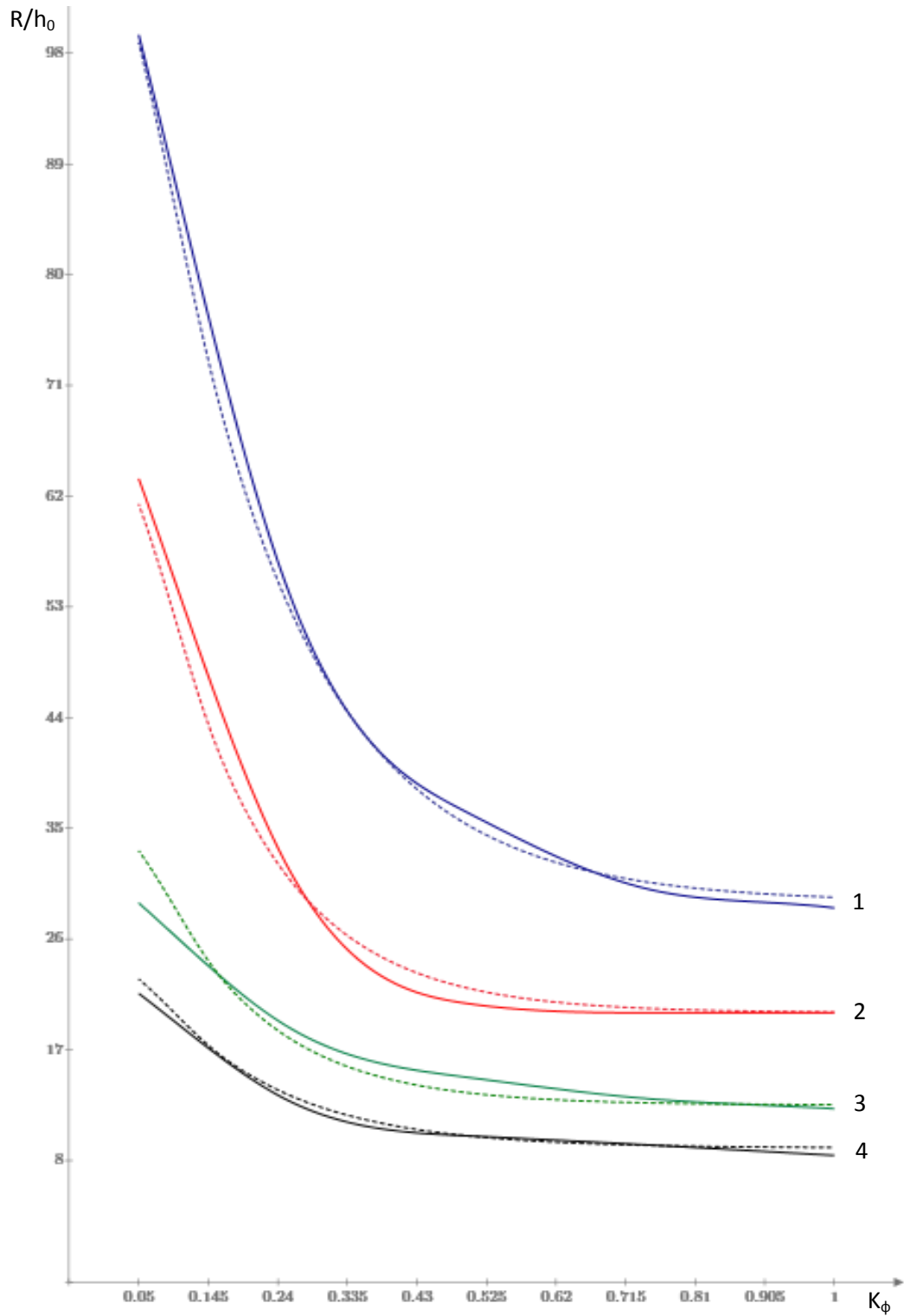
Анализ полученных на рисунках 2.5 и 2.6 зависимостей позволяет сделать вывод, что график на рисунке 2.4 может иметь вид либо показательной, либо обратной функции (гипербола) (рисунок 2.4 справа). Тогда на основании приведенных графических зависимостей можно получить аналитические зависимости. И для тонких, и для толстых пластин эти зависимости описываются показательной функцией вида

$$R/h_0 = a^{(bk_\phi - c)} + d.$$

На рисунках 2.5 и 2.6 графики, построенные по полученным формулам, изображены пунктирными линиями.

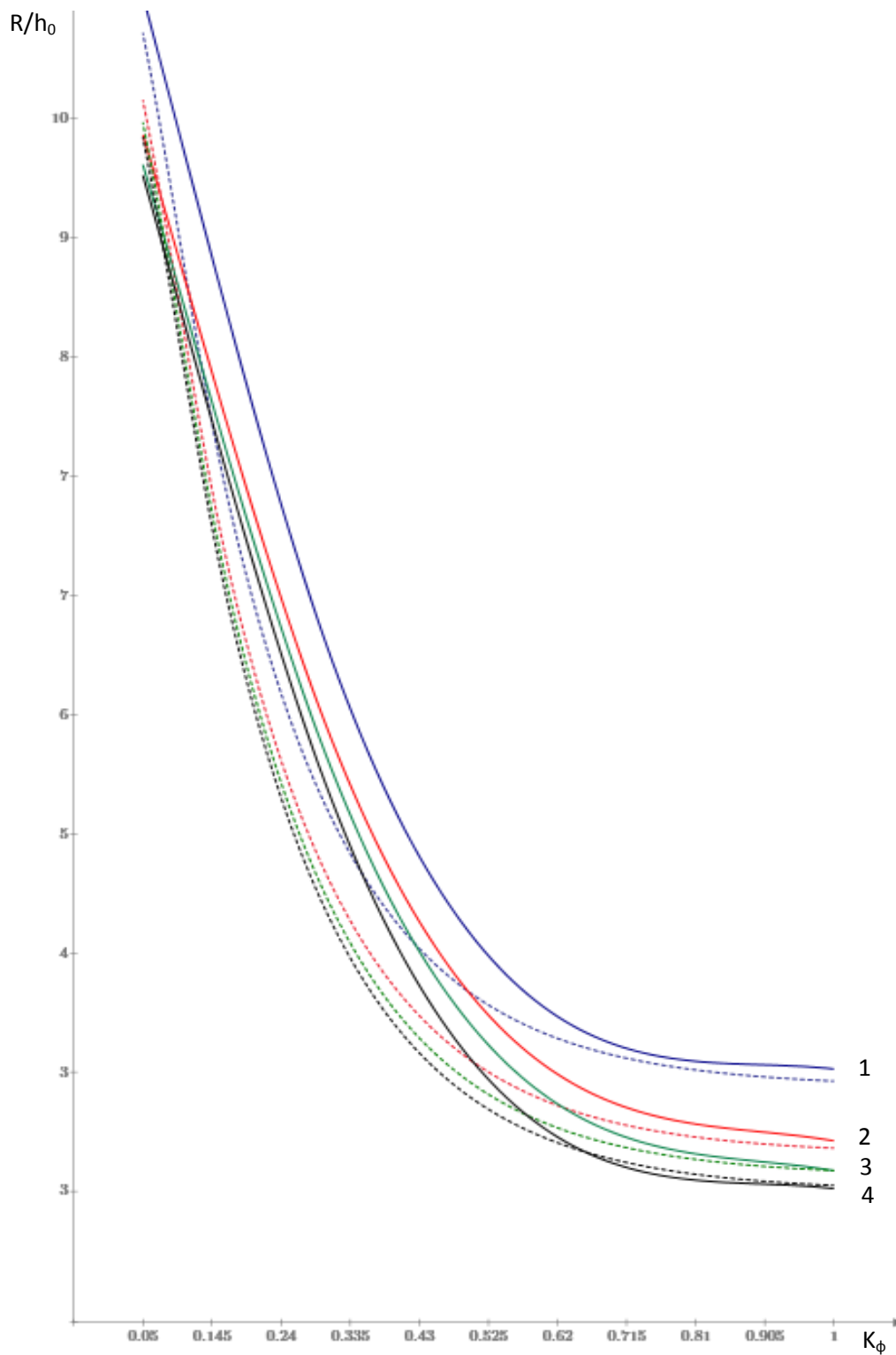
Сравнение эмпирических кривых, полученных на основании результатов виртуальных экспериментов, и кривых, описанных вышеприведенными аналитическими зависимостями, показывает их незначительное расхождение. Следовательно, можно считать использование показательной функции в качестве аппроксимирующей кривой вполне оправданным.





- 1 – при  $\varepsilon = 0,25$  аналитическая зависимость имеет вид  $R/h_0 = 0,4^{(6K_\phi-5)} + 29$ ;  
 2 – при  $\varepsilon = 0,38$  аналитическая зависимость имеет вид  $R/h_0 = 0,5^{(10K_\phi-6)} + 20$ ;  
 3 – при  $\varepsilon = 0,5$  аналитическая зависимость имеет вид  $R/h_0 = 0,5^{(10K_\phi-5)} + 12,5$ ;  
 4 – при  $\varepsilon = 0,6$  аналитическая зависимость имеет вид  $R/h_0 = 0,55^{(10K_\phi-5)} + 9$ .

Рисунок 2.5 – Графики зависимости  $R/h_0 = f(K_\phi)$  для пластины толщиной 4 мм



- 1 – при  $\varepsilon = 0,58$  зависимость имеет вид  $R/h_0 = 0,4^{(6K_\phi - 2,5)} + 3,2$ ;  
 2 – при  $\varepsilon = 0,64$  зависимость имеет вид  $R/h_0 = 0,4^{(6K_\phi - 2,5)} + 2,75$ ;  
 3 – при  $\varepsilon = 0,68$  зависимость имеет вид  $R/h_0 = 0,4^{(6K_\phi - 2,5)} + 2,6$ ;  
 4 – при  $\varepsilon = 0,7$  зависимость имеет вид  $R/h_0 = 0,4^{(6K_\phi - 2,5)} + 2,5$ .

Рисунок 2.6 – График зависимости  $R/h_0 = f(k_\phi)$  для пластины толщиной 20 мм

Таким образом, можно сделать вывод, что формоизменение сечений заготовок, перпендикулярных к действию внешней силы, независимо от начальной толщины подчиняется одним и тем же закономерностям.

Это легко доказать аналитически, по крайней мере в рамках предположения о независимости площади деформированной заготовки от ее начальной толщины.

В соответствии с законом постоянства объема:

$$V = S_0 \cdot h_0 = S_i \cdot h_i,$$

где  $S_0$  и  $S_i$  – площади заготовки при нулевой и  $i$ -й степени деформации соответственно;

$h_0$  – исходная толщина заготовки;

$h_i$  – толщина заготовки при степени деформации  $\varepsilon_i$ .

Следовательно,

$$S_i = \frac{S_0 \cdot h_0}{h_i}. \quad (2.1)$$

Формулу для  $i$ -й степени деформации можно записать в виде

$$\varepsilon_i = \frac{h_0 - h_i}{h_0} = 1 - \frac{h_i}{h_0},$$

откуда

$$\frac{h_0}{h_i} = \frac{1}{1 - \varepsilon_i}.$$

Тогда, после подстановки в (2.1), площадь заготовки при любой степени деформации:

$$S_i = S_0 \cdot \frac{1}{1 - \varepsilon_i}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что КСТМ не зависит от начальной толщины заготовки. Поэтому можно считать, что «экви-теория», в отличие от «теории тонкого слоя», применима для описания процессов осадки не только тонких пластин, но и толстых заготовок.

Оговоримся, что, тем не менее, в рамках экви-теории заготовки не могут быть сколь угодно толстыми, так как при значительной начальной толщине заготовки в процессе осадки наблюдается бочкообразование, и формулу (2.1) нельзя считать строго корректной, а лишь с определенной погрешностью.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В реальных процессах пластической деформации, при факторе трения  $0,2 \div 0,6$ , течение металла подчиняется некоторой псевдонормальной кинематической схеме течения металла, в соответствии с которой в начальный момент деформирования движение частиц металла происходит по нормальям к контуру заготовки, а в ходе дальнейшей деформации линии тока направлены под углом к контуру.

2. Различные вариации промежуточной кинематической схемы течения металла служат некоторой масштабной моделью закона наименьшего сопротивления, при котором радиальная и нормальная схемы являются предельными случаями промежуточной кинематической схемы течения металла.

3. На кинематическую схему течения металла существенное влияние оказывает трение, что подтверждается многочисленными виртуальными и натурными экспериментами. С увеличением трения наблюдается переход от радиальной схемы к нормальной.

4. На основании анализа результатов виртуальных экспериментов в программном комплексе Deform построены графики зависимости радиуса контура заготовки от условий трения. И для тонких, и для толстых пластин зависимость радиуса действительного контура заготовки, отнесенного к ее начальной толщине, от трения описывается показательной функцией вида

$$R/h_0 = a^{(bk_\phi - c)} + d.$$

5. Формоизменение сечений поковок, перпендикулярных к действию внешней силы, независимо от начальной толщины заготовки подчиняется одним и тем же законам, т.к. начальная толщина заготовки не оказывает принципиального влияния на кинематическую схему течения металла.

## Глава 3. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА

### 3.1. Анализ исследований картины течения металла

#### 3.1.1. Экспериментальные исследования формообразования в процессах осадки

Еще в начале прошлого века с целью изучения закономерностей формообразования металла немецкий ученый Карл фон Зоббе проводил эксперименты на стальных образцах, результаты которых были опубликованы в 1908 году в статье «Технология горячейковки» [5].

Им было проведено множество экспериментов по осадке цилиндрических и призматических образцов достаточно большой толщины с квадратной и прямоугольной формой поперечного сечения. Например, сжималась стальная квадратная призма со стороной квадрата 90 мм и высотой 210 мм (рисунок 3.1, а). После сжатия до 46 мм ( $\epsilon = 0,78$ ) стороны поперечного сечения приняли дуговую форму, приближая ее к кругу (рисунок 3.1, б).

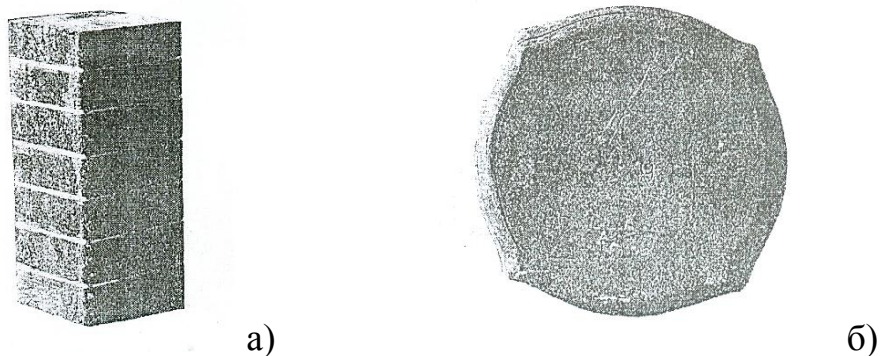


Рисунок 3.1 – Осадка стальной призмы по Зоббе К.

Карл фон Зоббе отмечал образование выступов в виде «ушек» в угловых зонах. Он объяснял их появление тем, что начальные изделия имели острую кромку, к тому же углы, по словам Зоббе К., более всего подвержены охлаждению и образуют самые холодные места слитка, поэтому течение металла в них затрудняется. Зоббе утверждал: «Достаточно прессованные изделия квадратного поперечного сечения, у которых углы скруглены небольшим радиусом, в процессе осадки при-

обретают почти полностью круглую форму». На рисунке 3.2 показан стальной слиток со стороной квадрата 80 мм, но со скругленными углами, и высотой 110 мм до и после осадки.

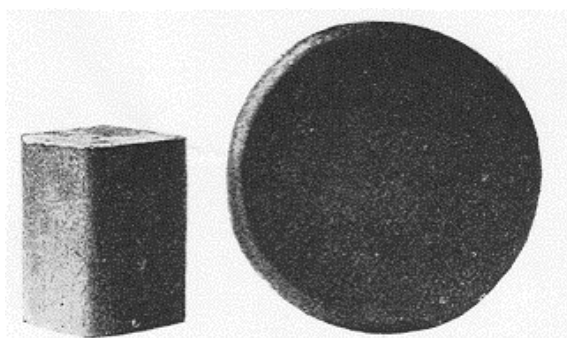


Рисунок 3.2 – Осадка квадратной призмы со скругленными краями

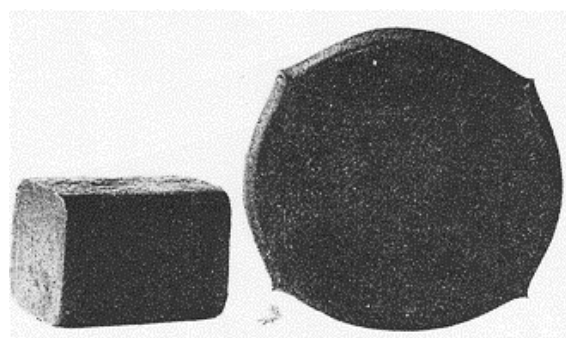


Рисунок 3.3 – Осадка прямоугольной призмы

На рисунке 3.3 показан тот же слиток, но в положении лежа на продольной поверхности, т.е. давление приложено к прямоугольному сечению. В результате осадки поперечное сечение приобрело форму близкую к кругу, с образованием «ушек». Приведенные эксперименты полностью подтверждают указанный ранее принцип наименьшего периметра.

### 3.1.2. Использование «скелета контура» для описания картины течения металла в процессах прессования и волочения [123, 124]

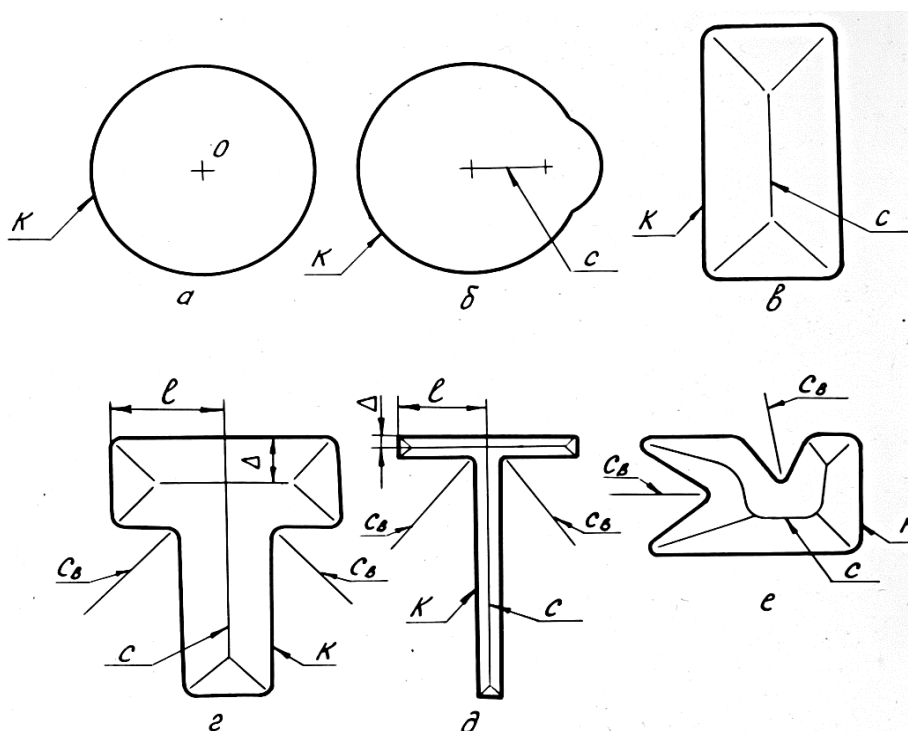
При анализе геометрии гладких контуров Петров А.И. предложил использовать понятие скелета контура. Гладким контуром он называл границу односвязной замкнутой области, образованную отрезками прямых и дугами окружностей, в каждой точке которой имеется непрерывно изменяющаяся касательная.

Внутренним скелетом контура называется геометрическое место точек – центров окружностей, лежащих внутри контура и касающихся его, по крайней мере, в двух различных точках.

Скелетом внешней области контура называют геометрическое место точек – центров окружностей, лежащих вне контура и касающихся его, по крайней мере, в

двух различных точках. В отличие от внутреннего, точки внешнего скелета могут находиться в бесконечности.

На рисунке 3.4 показаны внутренние и внешние скелеты окружности, прямоугольника со скругленными углами и более сложных контуров.



К – контур профиля; С, С<sub>в</sub> – внутренний и внешний скелеты соответственно

Рисунок 3.4 – Внутренние и внешние скелеты контура

Внутренний скелет контура отображает след ребра поверхности постоянно-го ската (линия раздела течения), относительно которого сориентировано поле скоростей течения металла вблизи плоской выходной границы очага деформации.

Как отмечалось выше, внутренний скелет контура, с помощью которого можно моделировать ЛРТМ, – это геометрическое место точек – центров окружностей, находящихся внутри контура и касающихся его в двух точках [123], а это и есть эквидистанта контура.

Внутренние скелеты контура являются отражением физической аналогии с «песчаной насыпью», с их использованием можно решать различные прикладные задачи, например, моделировать линии раздела течения металла.



Внутренние скелеты контура целесообразно использовать для моделирования геометрии контура в процессе пластического деформирования. Разработана и успешно применялась методика использования скелета контура при проектировании технологических переходов и инструмента для операций волочения, прессования, холодной и горячей прокатки профилей.

Область применения аналогии с «песчаной насыпью» и скелета контура не ограничивается указанными процессами. Наилучшими характеристиками обладают детали, у которых волокна макроструктуры расположены в направлении наибольших нормальных напряжений. Используя скелет контура, можно проектировать процессы обработки давлением таким образом, чтобы получить наилучшее расположение волокон в детали, полученной литьем или обработкой давлением. С помощью скелета контура можно также описывать температурное поле заготовки в процессах термической обработки. Использование скелета контура эффективно при автоматизации построения траекторий движения инструмента, при котором наибольшую трудность представляет корректное построение эквидистант. Построение же эквидистант на базе скелета контура не вызывает особых затруднений.

### 3.1.3. «Теория тонкого слоя» применительно к прокатке

Исследователи часто описывают различные физические процессы с помощью наглядных физических аналогий.

В своих работах при изучении процессов пластической деформации Ильюшин А.А. указывал, что в некоторых процессах ОМД течение пластического вещества происходит в виде сравнительно тонкого слоя между двумя движущимися жесткими поверхностями рабочих органов машины [8].

С помощью полученных уравнений он доказал, что если пластическое течение металла в виде тонкого слоя между двумя движущимися с одинаковой скоростью жесткими поверхностями инструмента происходит при одинаковых услови-

ях трения, то существует аналогия между эпюрой обобщенного давления в области течения и эпюрой «песчаной насыпи».

Ильюшин А.А. получил аналитическое решение, позволяющее найти обобщенное давление в задаче течения слоя на основании опыта с песчаной насыпью, с помощью которого можно найти истинное контактное давление слоя на рабочие органы машины. Наибольшие давления в области течения будут возникать на линиях, соответствующих ребрам насыпи в песчаной аналогии, причем нормальная проекция ребра на основную поверхность соответствует линии разветвления потока, т.е. линии нулевой скорости. Из этого условия определяется скорость течения слоя в каждой точке любой линии тока. Таким образом, задача течения слоя полностью решается на основании песчаной аналогии.

С помощью «песчаной насыпи» определяют линии тока и распределение скоростей течения, при этом линии, соответствующие ребрам «песчаной насыпи», отражают геометрическое место точек наибольшего давления. Данные линии являются аналогом ЛРТМ в соответствии с принципом наименьшего сопротивления, наименьшего периметра и нормальной к поверхности заготовки схемой течения внутри любого контура [16].

Теория течения между жесткими поверхностями может быть применима и к прокатке, если длина области захвата  $a$  (рисунок 3.5) значительно больше начальной толщины слоя [8].

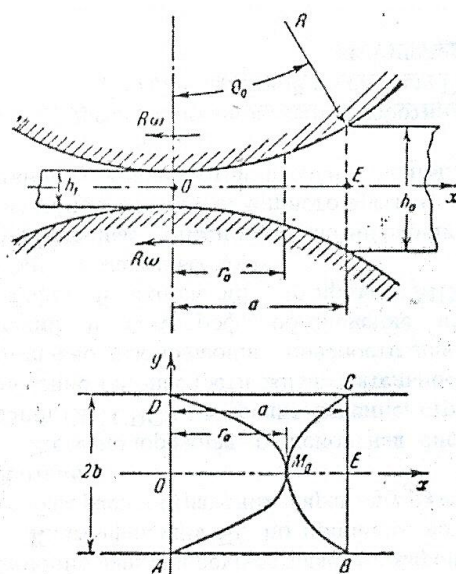


Рисунок 3.5 – Схематическое изображение процесса прокатки

На основании полученных аналитических зависимостей Ильюшин А.А. показал, что, если полоса прокатывается в валках большой длины, при ширине листа, превосходящей длину участка захвата, уширение не зависит от ширины листа, а только от его толщины, степени деформации и радиуса валков; наиболее интенсивное уширение происходит у входа листа в валки. Расчетные формулы получены для малых деформаций, но они применимы и для произвольной деформации.

### **3.2. «Эквидистантная теория» течения металла по полотну заготовки**

Процессы ОМД весьма сложны в создании математической модели, описывающей напряженно-деформированное состояние пластического формоизменения металла. Полная система дифференциальных уравнений, описывающая поведение нагретого металла при пластическом деформировании, содержит множество параметров (температуру, время, реологию, напряжения, деформации, плотность и т.д.), благодаря чему модель процесса максимально приближена к реальным условиям. Такая система уравнений может быть решена лишь численными методами, да и то с существенными погрешностями. Ярким примером такого подхода служит метод конечных элементов, положенный в основу практически всех современных CAD/CAE систем и имеющий вышеупомянутые особенности.

Другой принципиально отличный подход заключается в упрощении математической модели еще на стадии ее разработки, а, следовательно, и облегчении решения системы дифференциальных уравнений и сведении ее в ряде случаев к аналитическим зависимостям. Например, одним из способов решения задачи моделирования картины течения металла и построения пространственной эпюры контактных давлений является так называемая «теория тонкого слоя» [7], основанная на допущениях, упрощающих исходную систему дифференциальных уравнений. В таких случаях приходится отказываться от всеобщности математической модели и ограничиваться описанием нескольких процессов ОМД, прене-

брегая зачастую температурными и реологическими параметрами. Некоторые процессы ОМД (например, те из них, которые проходят при температуре рекристаллизации, благодаря чему упрочнением металла можно пренебречь) позволяют это делать без больших погрешностей.

В процессах ОМД значительную долю составляют плоские заготовки, при формоизменении которых ПЭКД представляет собой поверхность одинакового ската [74]. В механике сплошных сред такое описание процесса формоизменения материала известно, как «песчаная аналогия» [125]. В таком случае ПЭКД представляет собой поверхность одинакового ската, все образующие которой наклонены к плоскости контакта под одинаковым углом [7].

Проецируя ПЭКД на плоскость контакта инструмента и заготовки, получаем КТМ, которая состоит из ЛРТМ и ЛТ. При этом ЛРТМ – проекция гребней ПЭКД, а ЛТ – проекции образующих поверхности ПЭКД. Эти понятия, характеризующие пластическое течение металла по плоскости, имеют физический смысл, а в рамках «песчаной аналогии» им соответствуют геометрические понятия (таблица 3.1).

Тогда задача сводится к чисто геометрической, а именно нахождению эквидистанты некоторой замкнутой гладкой (или кусочно-гладкой) линии (контура), которая является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура заготовки.

Зная КТМ, можно прогнозировать распределение потоков металла по плоскости контакта в условиях пластической деформации.

Расширение области исследуемых объектов и явлений обеспечивается благодаря трем известным принципам [16]: наименьшего сопротивления, кратчайшей нормали и наименьшего периметра, – лежащим в основе экви-теории.

Экви-теория позволяет рассмотреть пока лишь общие вопросы пластического течения металла по жестким плоским поверхностям. Тем не менее, она, в отличие от «теории тонкого слоя», рассматривает процессы осадки не только тонких пластин, но и толстых заготовок.

Таблица 3.1 – Таблица соответствия

Название	Аббре- виатура	Физический смысл	Проективный смысл	Геометрический смысл
Пространственная эпюра контактных давлений	ПЭКД	Поверхность, каждая точка которой определяет величину контактного дав- ления инструмента на заготовку		Поверхность одинакового ската (ПОС) (или поверхность равного уклона). Предельная насыпь
Гребень (ребро) ПЭКД		Линия, вдоль которой контактные дав- ления достигают локального экстре- ма		Линия пересечения отдельных участ- ков ПОС
Граничные контактные давления	ГКД	Контактные давления инструмента на заготовку вдоль границы (контура) за- готовки, которой являются места резко- го изменения толщины заготовки		
Линия тока	ЛТ	Касательная к траектории движения ча- стиц металла, характеризующая поле скоростей, задающая направление дви- жения частиц металла	Проекция линии ската ПЭКД на плоскость контакта инструмента и заготовки	Нормаль (перпендикуляр) к действи- тельному или условному контуру
Линия раздела течения металла	ЛРТМ	Линия (плоскость), вдоль которой ско- рости движения частиц равны нулю	Проекция гребня ПЭКД на плоскость контакта инструмента и заготовки	Эквидистанта (геометрическое место точек, равно- удаленных от контура)
Картина течения металла	КТМ	Визуальная характеристика распределе- ния потоков металла по плоскости кон- такта инструмента и заготовки с указа- нием направления движения частиц ме- талла, содержащая ЛРТМ, ЛТ и контур заготовки	Проекция ПЭКД на плоскость контак- та инструмента и заго- товки	Изображение, содержащее граничную линию (контур), эквидистантную ли- нию, состоящую, как правило, из не- скольких участков отрезков прямых и кривых, а также нормали к контуру со стрелками
Плоскость контакта		Поверхность контакта инструмента и заготовки	Горизонтальная плос- кость проекций	
Действительный контур		Линия, ограничивающая область пла- стического течения по плоскости кон- такта инструмента и заготовки		Кусочно-линейная функция, которую можно аппроксимировать отрезками прямой и дугами окружности
Условный контур				Линия, к которой ЛТ всегда направле- ны перпендикулярно

Стоит особо отметить, что ТТПС дает возможность рассчитать силовые параметры процесса, а экви-теория – только деформационные, т.е. ТТПС позволяет вычислить объем ПЭКД, а, следовательно, и подсчитать потребные усилия прессы, в то время как экви-теория позволяет моделировать только формообразование. Можно утверждать, что на основании ПЭКД можно построить ЛРТМ, т.е. из ПОС следует эквидистанта, но положение и форма ЛРТМ (то есть эквидистанты) не позволяют корректно построить и оценить ПЭКД.

Предложенная методика базируется на следующих положениях [126]:

- Принцип кратчайшей нормали на начальной стадии деформирования обуславливает направление линий тока ортогонально контуру поковки, который представляет собой линию резкого изменения толщины слоя (в том числе ребра жесткости или возвышения по полотну поковки).

Тогда на начальной стадии деформирования, когда граничные давления одинаковы вдоль контура, потоки металла движутся ортогонально контуру и количество затекшего металла в каждой точке на границе определяется количеством смещающегося вдоль линий тока металла.

- В процессе деформирования граничные условия изменяются, и вдоль контура контактные давления становятся неодинаковыми. В связи с этим линии тока будут направлены под острым углом к контуру поковки. Однако, учитывая то, что пространственная эпюра контактных давлений представляет собой линейчатую поверхность, линии ската (следовательно, и линии тока) направлены ортогонально линиям уровня этой поверхности. Проецируя объемную картину на плоскость контакта, можно ввести условный контур, вдоль которого контактные давления равны между собой. Тогда линии тока ортогональны этому условному контуру [127, 71].

- В общем случае условный контур представляет собой довольно сложную кривую. В соответствии с принципом наименьшего периметра плоская заготовка стремится принять форму круга в плане. Следовательно, можно считать, что линии тока направлены по радиусам некоторой дуги окружности. Тогда условный контур является дугой окружности, и схема течения металла по полотну поковки

будет радиальной по отношению к действительному контуру, но по отношению к условному контуру она будет нормальной, поскольку ЛТ будут направлены перпендикулярно (т.е. по нормали) к условному контуру. Такую схему, как указывалось выше, можно считать псевдонормальной.

Следует отметить, что нормальная схема течения металла носит более универсальный характер, чем радиальная. Она применима также для поковки, контур которой состоит из участков кривых линий. Аппроксимируя контур поковки дугами окружности, можно применять нормальную схему и в начальный момент деформирования, когда ЛТ перпендикулярны и к действительному, и к условному контурам, так как они совпадают.

- Учитывая вышесказанное, пространственная эпюра контактных давлений представляет собой сочетание конических поверхностей на любом этапе деформирования заготовки, кроме начального. Граничные контактные давления при этом лежат в вертикальных плоскостях, пересекающих эти поверхности.

- Величина граничного контактного давления в любой момент деформирования для произвольной точки на контуре зависит от нескольких параметров: толщины полотна поковки, размеров полости штампа, ширины заусенечной канавки, величины затекшего в полости металла. Учет всех этих параметров вынуждает применять достаточно сложные формулы для вычисления граничного контактного давления [53].

- Так как пространственная эпюра контактных давлений представляет собой поверхность одинакового ската, то линия раздела течения металла является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура поковки. Контур поковки можно аппроксимировать прямыми и дугами окружности. Следовательно, задача построения линии раздела течения металла сводится к отысканию геометрического места точек, равноудаленных от окружностей и прямых.

- Поскольку любой многосвязный контур с достаточной степенью точности можно аппроксимировать отрезками прямых и дугами окружностей, можно считать, что поверхность пространственной эпюры контактных давлений состоит из

плоских и конических участков. Линии их пересечения образуют ребра (так называемые гребни).

- Фронтальная и профильная проекции этих ребер позволяют определять объем эпюры контактных давлений, а, следовательно, и силы, необходимые для деформирования металла; горизонтальная проекция (вид в плане) представляет собой линию раздела течения металла, которая характеризует распределение потоков металла на контактной поверхности.

Указанные положения подтверждаются полученными экспериментальными данными [128], а также исследованиями Тарновского И.Я. [18], Соломонова К.Н. и Свирина В.В. [129].

Под руководством профессора Тарновского И.Я. – представителя уральской научной школы – в 50-ые годы прошлого века велись интенсивные исследования закономерностей течения металла при осадке плоских заготовок из стали и алюминиевых сплавов, которые дают схожее изображение линий раздела течения металла (рисунок 3.6, а).

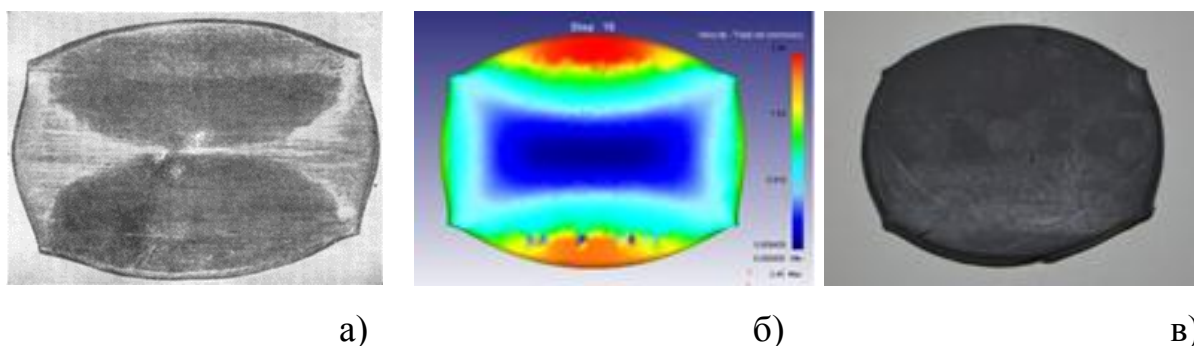


Рисунок 3.6 – Результаты экспериментов по осадке плоских заготовок:

а) Тарновского И.Я., б) Свирина В.В., в) Тищук Л.И.

Аналогичные картины (рисунок 3.6, б) получены в наше время Свириным В.В. – представителем школы МИСиС, – который с помощью известного и хорошо себя зарекомендовавшего пакета программ Deform проводил виртуальные эксперименты по осадке прямоугольных пластин разной толщины и размеров в плане при изменяющихся значениях коэффициента трения. Преимущество компьютерного моделирования (кроме экономии средств) заключается еще и в том,



что можно отследить весь процесс постадийной осадки. При этом скорость получения результата не сопоставима с натурным экспериментом.

Проводились также лабораторные эксперименты на пластилине. Выбор пластилина упрощает проведение экспериментов, сокращает время и расходы на их проведение. Полученные результаты совпадают с результатами виртуальных экспериментов, проведенных в Deform (рисунок 3.6, в).

Формообразование заготовки определяет КТМ, показанная на рисунках 3.6, а и 3.6, б. Из сравнения образцов на рисунке 3.6, полученных в результате осадки, можно сделать вывод, что формообразование заготовок в плане (в плоскости, перпендикулярной направлению действующей нагрузки) подчиняется одним и тем же принципам и законам. Из чего следует, что контуры деформированных заготовок совпадают не зависимо от способа моделирования и материала, используемого в экспериментах.

### **3.3. Численное решение задачи моделирования формоизменения плоской заготовки**

#### **3.3.1. Общие принципы построения картины течения металла [130]**

Течение металла в некоторых процессах ОМД (прокатка, ковка, объемная штамповка) подчиняется закономерностям, которые определяют деформационную схему осадки металлических образцов. Формоизменение исходной плоской заготовки в значительной мере определяется КТМ, представляющей собой контур детали, ЛРТМ и ЛТ. Разработанный алгоритм построения КТМ базируется на представлении ЛРТМ в виде эквидистанты контура. Таким образом задача сводится к чисто геометрической: построению эквидистанты.

Контур поковки с достаточной точностью можно аппроксимировать фрагментами прямых и дуг окружностей [54]. В рамках разработанной методики при необходимости возможна аппроксимация фрагментов контура любыми кривыми.

В текстовом файле содержатся исходные данные:

а) Точность расчетов, которая может быть задана в нормализованном виде. Чем меньше заданное число, тем выше точность расчетов и больше время работы программы.

б) Шаг разбивки контура, позволяющий весь контур разбить на точки так, что расстояние между любыми соседними точками будет не больше заданной величины. Чем меньше заданное число, тем выше точность расчетов и больше время работы программы.

в) Параметры формы контура, записанные для каждого фрагмента в отдельную строку. Первые два поля строки должны содержать координаты начала фрагмента. Следующее поле определяет тип линии фрагмента и должно содержать служебные слова «прямая» или «окружность». На этом строка должна закончиться. Конечной точкой текущего фрагмента является начальная точка следующего фрагмента. Конечной точкой последнего фрагмента является начальная точка самого первого фрагмента. Начинать можно с любого фрагмента, но необходимо делать это последовательно, обходя контур против часовой стрелки. Количество строк с информацией о фрагментах контура определяет фактическое количество фрагментов контура, которое должно быть меньше допустимого.

На основании представленной методики разработаны алгоритм и ПК EQUI, позволяющий моделировать КТМ на плоскости контакта инструмента и заготовки в процессахковки и объемной штамповки, в которых наблюдается деформационная схема осадки.

Укрупненная блок-схема разработанного ПК представлена на рисунке 3.7.

Развернутая структурная блок-схема разработанного ПК приведена в приложении А.

### 3.3.2. Алгоритм построения картины течения металла для кусочно-линейного контура [131]

Большинство деталей, применяемых в машиностроении, ввиду требований к технологичности конструкции, состоят из поверхностей вращения и многогран-

ников. Поэтому в практике кузнечно-штамповочного производства немало деталей, получаемых из плоских заготовок, имеют элементы плоскостного характера.

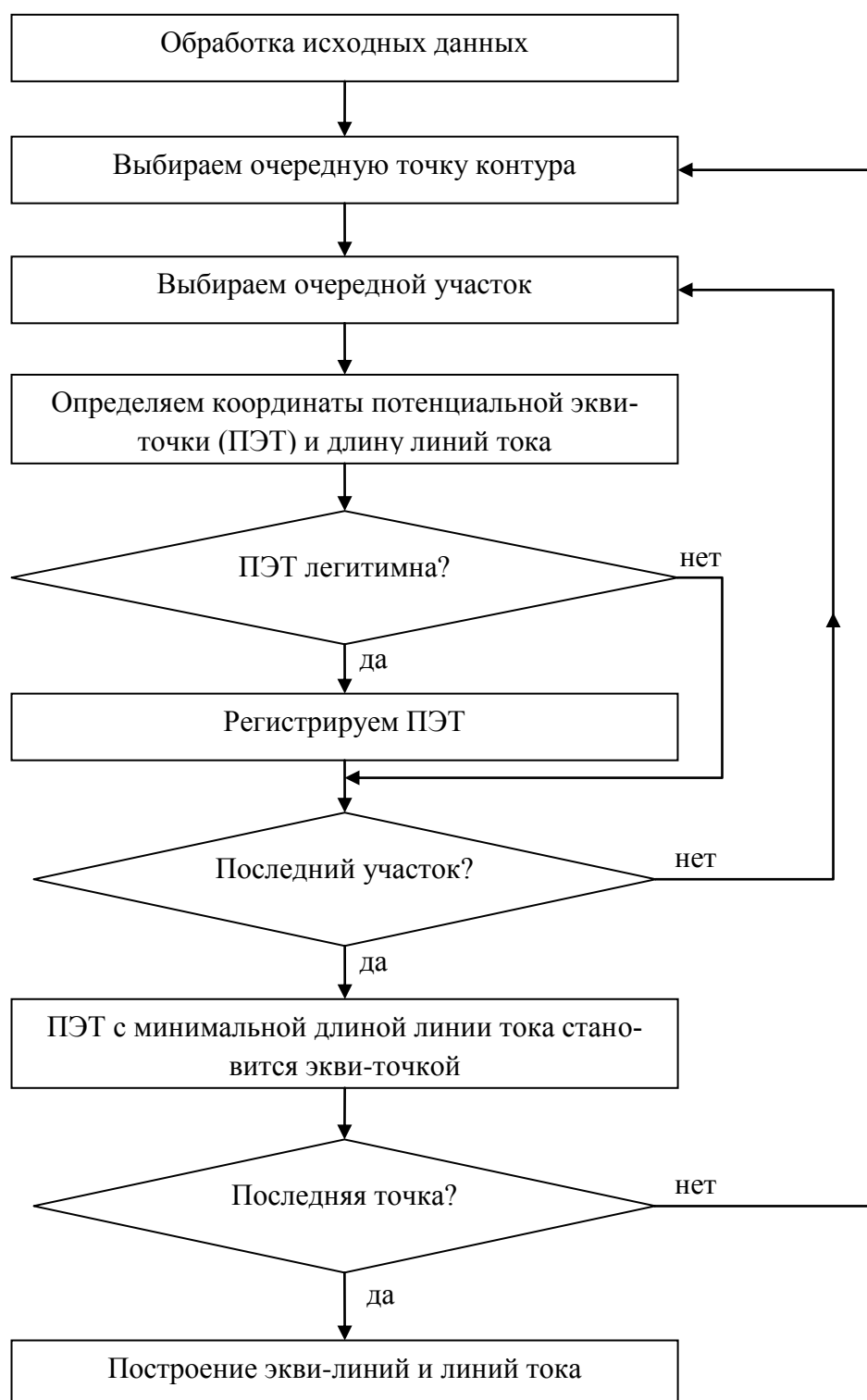


Рисунок 3.7 – Укрупненная блок-схема ПК EQUI

На основании вышеприведенных положений разработан алгоритм построения эквидистанты для контура, представляющего собой кусочно-линейную замкнутую линию, т.е. многоугольник (рисунок 3.8).

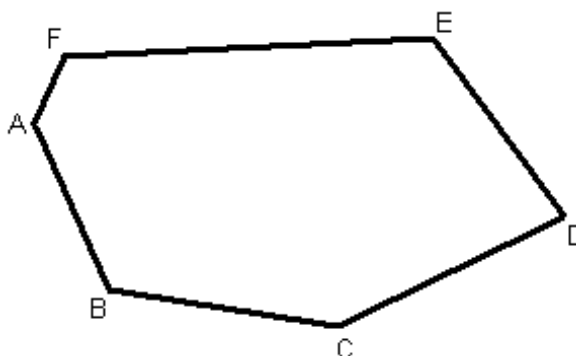


Рисунок 3.8 – Исходный контур

Пусть контур задан ломаной линией, состоящей из отрезков прямых. Допустимое количество отрезков устанавливается при начальной инициализации программы построения экви-линия EQUILINE.EXE и ограничивается только возможностями компьютера.

Контур должен быть выпуклым, т.е. каждый внутренний угол многоугольника, образованного заданным контуром, должен быть меньше  $180^\circ$ . EQUILINE контролирует выпуклость контура и в случае нарушения этого положения прекращает работу с выдачей соответствующего сообщения.

Координаты точек излома контура должны быть заданы в текстовом файле EQUILINE.TXT. Этот файл может быть создан (или отредактирован) при помощи блокнота NOTEPAD или любой другой программы редактирования и сохранен в формате «текстовый файл».

Каждая строка файла EQUILINE.TXT должна содержать два числа, разделенных как минимум одним пробелом. Первое число – это координата по оси абсцисс, вторая – по оси ординат. Если отсутствует одно число или оба (пустая строка), выдается сообщение об ошибке и выполнение программы останавливается. Если координаты действительные числа, дробная часть от целой должна отделяться десятичной точкой. Допустимо вводить координаты точек в нормализованном виде, например,  $-1e2(-100)$  или  $1.2E-2(0.012)$ .

Пример фрагмента файла EQUILINE.TXT:

```

.....
15                      -12
-8.16                   7.3
1E1                     8
.....

```

Количество строк в файле EQUILINE.TXT определяет количество точек излома контура (и, соответственно, количество отрезков). Если это количество окажется больше допустимого, установленного при инициализации программы, работа программы будет остановлена и выдано соответствующее сообщение об ошибке.

При формировании координат точек излома контура следует учитывать следующее. Система координат – декартова. Начало координат может находиться где угодно. Точки должны располагаться последовательно и так, чтобы получался обход контура против часовой стрелки. Начинать можно с любой точки контура. Программа EQUILINE не контролирует ошибки положений, указанных в данном абзаце, она просто работает неправильно.

При запуске программы EQUILINE появляется стандартное диалоговое окно, в котором пользователь должен указать путь к файлу данных EQUILINE.TXT (пример такого окна показан на рисунке 3.9).

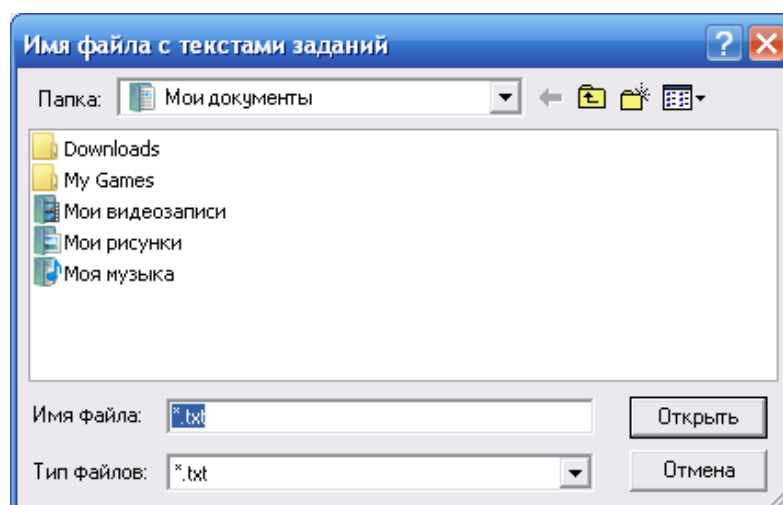


Рисунок 3.9 – Диалоговое окно программы EQUILINE

Если исходные данные контура сформированы правильно, начинаем построение экви-линий. Параллельно будем рассматривать пример построения экви-линий для контура, показанного на рисунке 3.8.

Сначала EQUILINE находит самый малый внутренний угол контура (в примере – это угол D). Эквидистантой двух прямых, образующих угол, является биссектриса этого угла [132]. Поэтому самой первой экви-линией контура является биссектриса самого малого угла (D). Далее проводим биссектрисы двух соседних углов (C и E) до пересечения с биссектрисой самого малого угла (в примере – это точки G и H на рисунке 3.10).

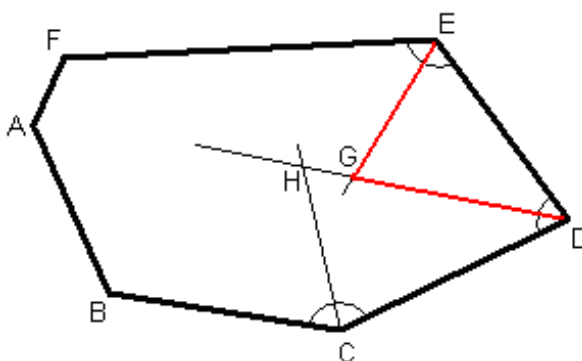


Рисунок 3.10 – Алгоритм построения эквидистанты – шаг 1

Заканчиваются первые экви-линии в ближайшей точке пересечения с биссектрисами соседних углов (в точке G). Первые линии DG и EG получены.

Далее убираем из рассмотрения сторону контура, биссектрисы прилежащих углов к которой образовали экви-линии (DE на рисунке 3.10). Продолжаем до пересечения стороны контура, соседние с отброшенной линией (FE и CD на рисунке 3.10). Получаем точку I (рисунок 3.11).

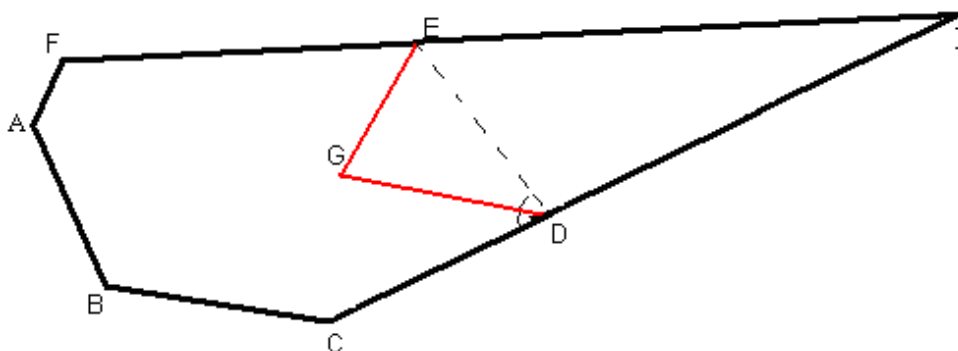


Рисунок 3.11 – Алгоритм построения эквидистанты – шаг 2

Размерность контура уменьшилась на единицу (вместо шестиугольника ABCDEF теперь будет рассматриваться пятиугольник ABCIF). Очевидно, что теперь наименьшим углом в многоугольнике контура будет вновь полученный угол (в примере – I, так как  $\angle D = \angle I + \angle DEI \Rightarrow \angle I < \angle D$ ). Процедура повторяется, только новая экви-линия строится не от угла контура, а от точки окончания последней экви-линии (в примере – G). Получим новые экви-линии (GJ и CJ на рисунке 3.12).

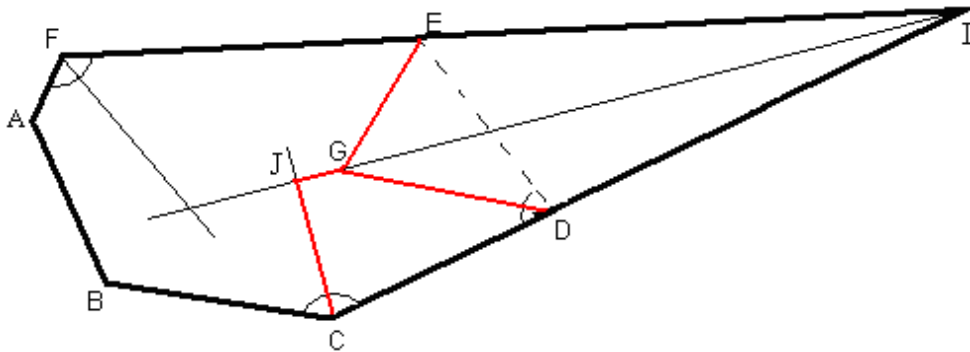


Рисунок 3.12 – Алгоритм построения эквидистанты – шаг 3

Теперь следует выбросить очередную сторону (в примере – CI) и повторять последовательность указанных действий, пока не возникнет ситуация, как в рассматриваемом примере, когда соседние с отбрасываемой стороны образуют угол совсем в другой стороне (в примере стороны BC и FI, соседние с отбрасываемой стороной CI, образуют угол не справа, а слева). В случае параллельности прямых построение ветви экви-линий также прекращается. Заметим, что, в силу особенностей численного моделирования, параллельными будем считать любые прямые, образующие угол меньше наперед заданного малого числа, устанавливаемого при инициализации программы.

Далее вновь ищем наименьший угол контура среди оставшихся (в примере это угол F из имеющихся F, A и B) и повторяем вышеописанный алгоритм действий, пока многоугольник контура не будет сведен фактически к треугольнику (в примере это треугольник KIC на рисунке 3.13; точка K на рисунке не поместилась).

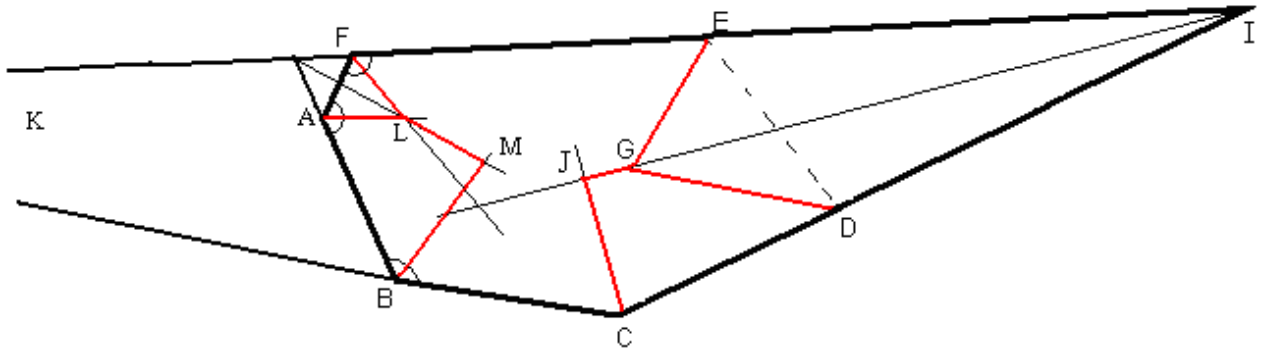


Рисунок 3.13 – Алгоритм построения эквидистанты – шаг 4

Как известно из геометрии, в треугольнике биссектрисы всегда пересекаются в одной точке (для треугольника KCI это точка J), поэтому для завершения построения эквидистантных линий достаточно соединить точки, в которых происходила остановка последовательных действий (в примере это точки M и J). Построение завершено (результат примера показан на рисунке 3.14).

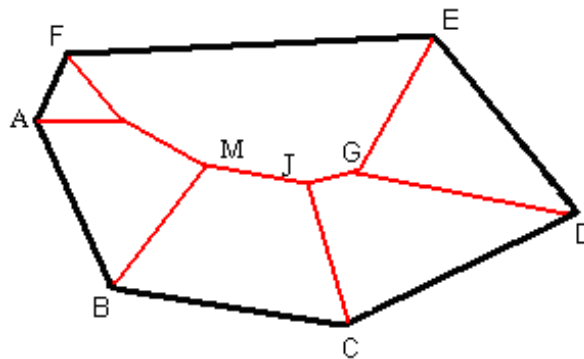


Рисунок 3.14 – Эквидистанта многоугольника

Результаты работы программы EQUILINE будут представлены на экране (картинка аналогичная показанной на рисунке 3.14) и сохранены в файле RESULTATLINE.TXT, который будет находиться в той же папке, что и файл EQUILINE.TXT. Каждая строка файла RESULTATLINE.TXT определяет одну экви-линию, задаваемую крайними точками. Поэтому каждая строка файла RESULTATLINE.TXT содержит четыре числа: координата X 1-й точки; координата Y 1-й точки; координата X 2-й точки; координата Y 2-й точки. Применительно к рассмотренному примеру первая строка файла результатов будет содержать: координата X точки D; координата Y точки D; координата X точки G; координата Y точки G. Вторая строка – координаты точек E и G и т.д.



Данный алгоритм позволяет строить ЛРТМ для односвязного кусочно-линейного контура. Подобный алгоритм разработан для кусочно-нелинейного многосвязного контура.

### 3.3.3. Алгоритм построения картины течения металла для кусочно-нелинейного контура [133]

Пусть контур состоит из фрагментов прямых и дуг окружностей. При необходимости возможна реализация фрагментов контура в виде любых кривых. Допустимое количество фрагментов задается при инициализации программы EQUICOURVE.EXE (в настоящее время 100). Следует учитывать, что в пределах одного фрагмента контура зависимость между координатами  $Y$  и  $X$  должна быть однозначна. Например, недопустимо указывать в качестве фрагмента дугу окружности более  $180^\circ$ . В этом случае дугу следует разбить минимум на два фрагмента.

Любой контур должен состоять как минимум из двух фрагментов.

Контур с заданной точностью разбивается на последовательность точек. При наличии у контура внутреннего угла большего  $180^\circ$ , последовательность точек дополняется последовательностью «псевдоточек», имеющих одни и те же координаты (координаты вершины соответствующего угла контура), но разные значения производной, последовательно изменяющиеся от значения производной входящего участка в рассматриваемую вершину контура до значения производной исходящего участка. Затем в некоторой точке контура строится перпендикуляр к касательной контура. Далее последовательно строятся перпендикуляры ко всем остальным точкам контура, ищется точка пересечения с первым перпендикуляром, сравниваются расстояния до соответствующих точек контура. Если эти расстояния близки и точка пересечения находится внутри контура, то такая точка считается потенциальной экви-точкой (ПЭТ). Когда пройдены все точки контура, среди выбранных ПЭТ ищется точка, имеющая минимальное расстояние от рассматриваемой точки контура – это и будет экви-точка.

Исходные данные для работы программы EQUICOURVE должны содержаться в текстовом файле EQUICOURVE.TXT. Все величины должны быть выражены в одних и тех же единицах. Данные в этом файле можно сопровождать комментариями, взятыми в фигурные скобки. Комментарии на работу программы не влияют, они используются для удобства пользователя.

В первой строке файла EQUICOURVE.TXT задается точность расчетов, т.е. программа считает два вещественных числа равными, если их разница по модулю меньше заданного положительного числа. Также EQUICOURVE считает число, обратное заданной точности, бесконечно большой величиной. Точность может быть задана в нормализованном виде. Чем меньше заданное число, тем выше точность расчетов и больше время работы программы.

Во второй строке файла EQUICOURVE.TXT должен быть задан шаг разбивки контура, т.е. весь контур будет разбит на точки так, что расстояние между любыми соседними точками будет не больше заданной величины. Чем меньше заданное число, тем выше точность расчетов и больше время работы программы. Кроме того, следует учитывать, что количество точек, на которое может быть разбит контур, ограничено. Допустимое количество точек задается при начальной инициализации программы (в настоящее время 1.000.000).

Каждая следующая строка (или пара строк) содержит информацию об одном фрагменте контура.

Первые два поля строки (поле – это набор информационных символов, отделенных пробелами или табуляцией) должны содержать координаты начала фрагмента. Следующее поле определяет тип линии фрагмента и должно содержать служебные слова «прямая» или «окружность». На этом строка должна закончиться. Если фрагмент является дугой окружности, то следующая строка должна иметь четыре поля: в первых двух должны быть заданы координаты центра этой окружности, в третьем – радиус окружности, а в четвертом – «1» или «-1». Последний параметр необходим только в том случае, если фрагмент представляет собой полуокружность: «1» означает, что полуокружность располагается выпуклостью вниз, «-1» – выпуклостью вверх. В случае если дуга окружности

меньше  $180^\circ$ , этот параметр программой игнорируется, а соответствующее поле может отсутствовать.

Конечной точкой текущего фрагмента является начальная точка следующего фрагмента. Конечной точкой последнего фрагмента является начальная точка самого первого фрагмента. Начинать можно с любого фрагмента, но необходимо делать это последовательно, обходя контур против часовой стрелки. Количество строк с информацией о фрагментах контура определяет фактическое количество фрагментов контура, которое должно быть меньше допустимого.

Пример файла EQUICOURVE.TXT:

```
1e-6    { точность расчетов }
0.005   { шаг разбивки контура }
0       0 прямая { координаты начала 1-го участка }
4       0 окружность { 2-й участок }
6 0 2 1
8 0 окружность
4 0 4 -1
```

В рассматриваемом примере расчеты выполняются с точностью в одну миллионную, каждая единица длины контура разбивается не менее, чем на 200 точек, контур состоит из 3-х фрагментов: прямая от точки (0; 0) до точки (4; 0), полуокружность от точки (4; 0) до точки (8; 0) выпуклостью вниз и полуокружность от точки (8; 0) до точки (0; 0) выпуклостью вверх.

Пользователь сам должен побеспокоиться о корректности исходных данных: обход контура против часовой стрелки, в узловых точках контура может пересекаться только два фрагмента, фрагменты контура пересекаются только в узловых точках, дуги окружностей не должны превосходить  $180^\circ$ . В случае несоблюдения этих требований программа будет работать некорректно.

При запуске программы EQUICOURVE.EXE появляется окно, показанное на рисунке 3.15.

Если пользователь не желает, чтобы на рисунке с построенными эквивилиниями присутствовали номера узловых точек контура, соответствующий флажок на панели нужно убрать.



Рисунок 3.15 – Диалоговое окно

Далее следует кликнуть по кнопке «Начать», после чего появится стандартное диалоговое окно (рисунок 3.9), в котором пользователь должен указать путь к файлу данных EQUICOURVE.TXT. После выбора файла и нажатия кнопки «Открыть» программа выполнит свою работу. Так для примера, рассмотренного выше, результат будет выглядеть так, как показано на рисунке 3.16.

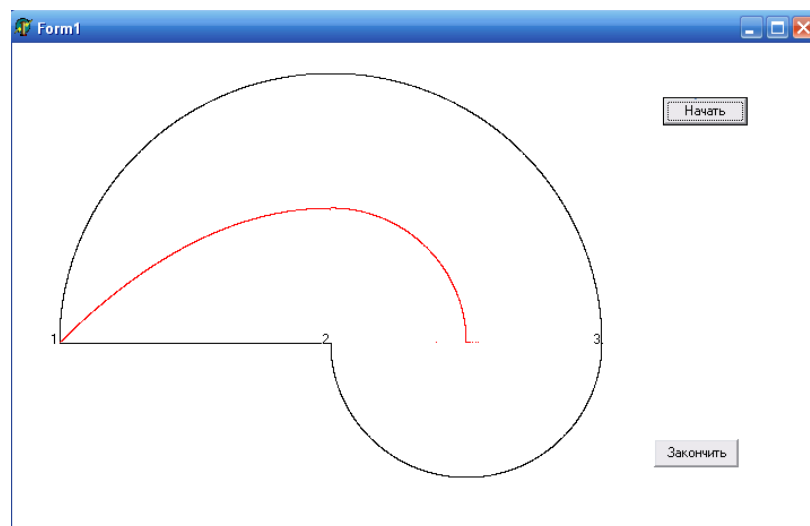


Рисунок 3.16 – Результат работы программы

Размеры окна, в котором осуществляется построение, фиксированы, а показываемый контур всегда масштабируется так, чтобы занимать максимально полно все пространство окна.

Из-за того, что расчеты выполняются приблизительно с заданной точностью, в предельных случаях возможно появление точек на рисунке, явно отклоняющихся от экви-линии (например, на рисунке 3.16 у правого конца экви-линии виден короткий шлейф). Повышение точности и уменьшение шага разбивки улучшает общую картину, но не решает эту проблему. Такие точки следует игнорировать или удалять вручную.

Одновременно с построением на экране программа создает в той же папке, где находится файл EQUICOURVE.TXT, файл выходных данных RESULTATCOURVE.TXT, содержащий координаты найденных точек экви-линий, а также координаты ближайших к ним точек контура, что позволяет строить линии тока. Начальный фрагмент такого файла показан на рисунке 3.17.

1	Координаты эквиточек		Координаты точек тока			
	X	Y	X1	Y1	X2	Y2
3	0.0050	0.0052	0.0050	0.0000	0.0000	0.0040
4	0.0100	0.0101	0.0100	0.0000	0.0000	0.0084
5	0.0150	0.0151	0.0150	0.0000	0.0000	0.0139

Рисунок 3.17 – Фрагмент файла выходных данных

Нажав на кнопку «Начать», можно инициировать построение для другого контура.

Завершается работа программы нажатием на кнопку «Закончить».

Алгоритм действия программы EQUICOURVE основан на следующем.

После чтения исходных данных программа проверяет необходимость коррекции введенных данных. Если в какой-либо точке контура производная стремится к бесконечности, то происходит переполнение ячейки и процессор аварийно прекращает выполнение программы. Чтобы избежать этого, программа предварительно корректирует исходные данные: если фрагмент контура – вертикальная прямая, то начальная точка этого фрагмента смещается по линии предыдущего фрагмента, руководствуясь следующим.

Если предыдущий фрагмент тоже прямая линия, то новые координаты узловой точки  $(x; y)$  будут определены так:

$$x = x_0 - \text{sign}(x_0 - x_p) \cdot \delta \quad (3.1)$$

$$y = \gamma(x_0 - x_p) + y_p$$

где  $\gamma = \frac{y_0 - y_p}{x_0 - x_p}$  – тангенс угла наклона предыдущего фрагмента;

$x_0, y_0$  – заданные координаты начала модифицируемого фрагмента;

$x_p, y_p$  – координаты начала предыдущего фрагмента;

$\delta$  – заданная точность вычислений;

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0 \\ -1, & \text{если } x < 0 \end{cases} \text{ – единичная функция.} \quad (3.2)$$

Если предыдущий фрагмент – окружность, то координаты  $(x; y)$  точки этой окружности, отстоящей на расстояние  $\delta$  от другой точки этой же окружности с координатами  $(x_0; y_0)$ , можно определить так. Имеем два уравнения:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R_c^2 \quad (3.3)$$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \delta^2$$

где  $x_c, y_c$  – координаты центра окружности;

$R_c$  – радиус окружности.

Раскрыв скобки и вычитая из первого уравнения второе, получим:

$$-2x_c x + x_c^2 - 2y_c y + y_c^2 + 2x_0 x - x_0^2 + 2y_0 y - y_0^2 = R_c^2 - \delta^2.$$

Перегруппировав, можем выразить (при условии, что  $y_0 \neq y_c$ )

$$y = \frac{-2(x_0 - x_c)x + R_c^2 - \delta^2 + x_0^2 + y_0^2 - x_c^2 - y_c^2}{2(y_0 - y_c)} = kx + \lambda, \quad (3.4)$$

$$\text{где } k = -\frac{x_0 - x_c}{y_0 - y_c},$$

$$\lambda = \frac{R_c^2 - \delta^2 + x_0^2 + y_0^2 - x_c^2 - y_c^2}{2(y_0 - y_c)}.$$

Подставляя (3.4) в первое выражение (3.3), получим квадратное уравнение

$$(x - x_c)^2 + (kx + \lambda - y_c)^2 = R_c^2,$$

$$\begin{aligned}
& x^2 - 2x_c x + x_c^2 + k^2 x^2 + 2k(\lambda - y_c)x + (\lambda - y_c)^2 = R_c^2, \\
& (1 + k^2)x^2 - 2(x_c - k(\lambda - y_c))x + x_c^2 + (\lambda - y_c)^2 - R_c^2 = 0.
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Отметим, что при выполнении условия  $\delta < 2R$  решение уравнения (3.5) всегда существует, причем корней – два. Дискриминант квадратного уравнения (3.5)

$$\begin{aligned}
D &= (x_c - k(\lambda - y_c))^2 - (1 + k^2)(x_c^2 + (\lambda - y_c)^2 - R_c^2) = \\
&= x_c^2 - 2kx_c(\lambda - y_c) + k^2(\lambda - y_c)^2 - x_c^2 - (\lambda - y_c)^2 + R_c^2 - k^2x_c^2 - \\
&- k^2(\lambda - y_c)^2 + k^2R_c^2 = -(\lambda - y_c)^2 - 2kx_c(\lambda - y_c) - k^2x_c^2 + (1 + k^2)R_c^2 = \\
&= (1 + k^2)R_c^2 - (kx_c + \lambda - y_c)^2
\end{aligned}$$

Корни уравнения (3.5)

$$x_{1,2} = x_c - k(\lambda - y_c) \pm \sqrt{D}. \tag{3.6}$$

Если  $x_0 > x_c$ , то используется корень  $x_2 = x_c - k(\lambda - y_c) - \sqrt{D}$ , а если  $x_0 < x_c$ , то корень  $x_1 = x_c - k(\lambda - y_c) + \sqrt{D}$ .

Если фрагмент контура – полуокружность на участке от  $x_n$  до  $x_k$ , в крайних точках производная стремится к бесконечности. Поэтому заменяем данную окружность другой, у которой радиус будет больше на величину  $\delta$ . Соответственно координата центра окружности будет смещена по оси ординат на величину

$$\Delta y = \mp \sqrt{\left(\frac{x_k - x_n}{2} + \delta\right)^2 - \left(\frac{x_k - x_n}{2}\right)^2} = \mp \sqrt{\delta(x_k - x_n + \delta)}. \tag{3.7}$$

В выражении (3.7) знак выбирается противоположно тому, который был задан в файле EQUICOURVE.TXT (параметр, определяющий положение полуокружности выпуклостью вверх или вниз).

Далее EQUICOURVE приступает к разбивке контура с соблюдением заданного максимального шага. Простой итерационный процесс: начиная с начальной точки контура, делается шаг по оси абсцисс, равный величине максимального шага, определяется значение по оси ординат, вычисляется расстояние от полученной точки до предыдущей. Если это расстояние больше величины максимального шага, процедура повторяется, только с шагом, уменьшенным вдвое. Координаты по-

лученной точки сохраняются вместе со значениями производной в этой точке контура. Производная вычисляется соответственно

$$\text{для прямой} \quad y' = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}},$$

$$\text{для окружности} \quad y' = -\frac{x - x_c}{y - y_c},$$

где  $x, y$  – координаты текущей точки контура;

$x_{i-1}, y_{i-1}$  – координаты начальной точки текущего фрагмента контура;

$x_i, y_i$  – координаты конечной точки текущего фрагмента контура;

$x_c, y_c$  – координаты центра кривизны текущего фрагмента контура.

При разбивке контура учитываются особенности его формы. В узловых точках контура проверяется условие его выпуклости

$$(y_{i+1} - y_{i-1}) \cos \beta - (x_{i+1} - x_{i-1}) \sin \beta > 0,$$

где  $x_{i-1}, y_{i-1}$  – координаты любой точки, находящейся на луче, выходящем из рассматриваемого узла контура и имеющем направление, совпадающее с касательной к фрагменту, заканчивающемуся в этом узле;

$x_{i+1}, y_{i+1}$  – координаты любой точки, находящейся на луче, выходящем из рассматриваемого узла контура и имеющем направление, совпадающее с касательной к фрагменту, начинающемуся в этом узле;

$$\beta = \arctg \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} - \text{угол положения рассматриваемой вершины контура от-}$$

носительно  $i-1$ -й точки ( $\beta \in [0; 2\pi)$ );

$x_i, y_i$  – координаты рассматриваемой вершины контура.

Если внутренний угол контура более  $180^\circ$  (контур не выпуклый), то возникает ситуация, когда линии тока с определенной части внутренней поверхности рассматриваемой заготовки будут сходиться именно в вершине этого угла. Поэтому при разбивке контура программа считает, что в таких узловых точках сосредоточено множество бесконечно малых отрезков прямых, последовательно осуществляющих поворот от направления угла наклона предыдущего фрагмента к



последующему на величину избыточного угла (избыточный угол – это величина внутреннего угла контура минус  $180^\circ$ ). Другими словами, программа генерирует последовательность точек (псевдоточек), имеющих одни и те же координаты, но имеющих производные, отличающиеся на определенную величину. Величина шага угла наклона определяется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2h}{x_i - x_{i-1}},$$

где  $h$  – величина заданного максимального шага разбивки.

Далее начинается главное – поиск эквидистантных точек (экви-точек).

Схематично последовательность действий такова. Последовательно в каждой  $i$  – й точке контура восстанавливается перпендикуляр к касательной, а затем по очереди перпендикуляры к касательным во всех остальных  $j$  – х точках контура до пересечения с первым перпендикуляром. Первым делом проверяется – находится ли полученная точка пересечения внутри контура. Если нет – переходим к следующей  $j + 1$  – й точке. Если да, то сравниваем расстояния от точки пересечения перпендикуляров до  $i$  – й и  $j$  – й точек. Если эти расстояния оказываются близки друг к другу, то координаты такой точки запоминаются. Когда все  $j$  – е точки будут пройдены, то из всех запомненных точек выбирается одна, у которой расстояние до  $i$  – й точки минимально. Это и есть экви-точка. Далее можно переходить к следующей  $i + 1$  – й точке.

Теперь уточним детали поиска экви-точек. При нахождении точки пересечения двух перпендикуляров к касательным руководствуемся следующим. Знаем, что через точку с координатами  $(x_1; y_1)$  проходит прямая с тангенсом угла наклона  $k_1$ , а через точку  $(x_2; y_2)$  – прямая с тангенсом угла наклона  $k_2$  ( $|k_1| < \Omega$  и  $|k_2| < \Omega$ , где  $\Omega$  – бесконечно большое число, определяемое точностью расчетов). Координаты точки пересечения перпендикуляров к этим прямым определяются из решения системы

$$\begin{cases} y = -\frac{1}{k_1}(x - x_1) + y_1 \\ -\frac{1}{k_1}(x - x_1) + y_1 = -\frac{1}{k_2}(x - x_2) + y_2 \end{cases}$$

Если обе прямые горизонтальны ( $k_1 = k_2 = 0$ ), то принимаем координаты точки пересечения

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

$$y = \Omega.$$

Если  $k_1 = 0$ , а  $k_2 \neq 0$ , то

$$x = x_1$$

$$y = -\frac{1}{k_2}(x - x_2) + y_2.$$

Если  $k_1 \neq 0$ , а  $k_2 = 0$ , то

$$x = x_2$$

$$y = -\frac{1}{k_1}(x - x_1) + y_1.$$

Если  $k_1 = k_2 \neq 0$ , то

$$x = \text{sign}(k_1) \cdot \Omega$$

$$y = \Omega.$$

Если  $k_1 \neq 0$ ,  $k_2 \neq 0$  и  $k_1 \neq k_2$ , то

$$x = \frac{k_1 x_2 - k_2 x_1 + k_1 k_2 (y_2 - y_1)}{k_1 - k_2}$$

$$y = -\frac{1}{k_1}(x - x_1) + y_1.$$

Проверка нахождения точки внутри контура основана на следующем принципе. Подсчитываем количество точек контура, имеющих такую же абсциссу и расположенных выше рассматриваемой точки. Если это количество нечетно – точка внутри контура, если четно – вне его.

Определение координат точки, равноотстоящей от точек с номерами  $i$  и  $j$  соответственно, организовано следующим образом. Как только соответствующая точка пересечения перпендикуляров к касательным для  $i$ -й и  $j$ -й пары точек контура оказывается внутри контура, определяется знак величины  $d_i - d_j$  ( $d_i$  – расстояние от найденной точки пересечения перпендикуляров до  $i$ -й точки контура;  $d_j$  – расстояние до  $j$ -й точки). Затем процедура повторяется для пары  $i$ -й и  $j+1$ -й точек. Если точка пересечения оказалась вне контура, то процесс прекращается, т.е. кандидата на экви-точку пока нет. Если точка осталась внутри контура, сравниваем знак выражения  $d_i - d_{j+1}$  со знаком  $d_i - d_j$ . Если знак не изменился, берем следующую  $j+2$ -ю точку и т.д. до тех пор, пока не найдем такую  $j+k$ -ю точку, чтобы знаки выражений  $d_i - d_{j+k}$  и  $d_i - d_{j+k+1}$  были различными. Линейной аппроксимацией находим координату по оси абсцисс промежуточной точки

$$x = x_{j+k} + \mu(x_{j+k+1} - x_{j+k}),$$

где  $x_{j+k}, x_{j+k+1}$  – координаты  $j+k$ -й и  $j+k+1$ -й точек контура;

$$\mu = \left| \frac{d_i - d_{j+k}}{d_{j+k+1} - d_{j+k}} \right| - \text{коэффициент.}$$

Далее определяется координата по оси ординат промежуточной точки, строится перпендикуляр к касательной в этой точке, и точка пересечения этого перпендикуляра с перпендикуляром к касательной в  $i$ -й точке регистрируется в качестве ПЭТ.

Если  $i$ -я или  $j+k$ -я точки окажутся псевдоточками, то тогда аппроксимируется не координата по оси абсцисс, а производная в этой точке. Например, для  $j+k$ -й псевдоточки

$$y' = y'_{j+k} + \mu(y'_{j+k+1} - y'_{j+k}),$$

где  $y'_{j+k}, y'_{j+k+1}$  – производные в  $j+k$ -й и  $j+k+1$ -й точках контура.

И в качестве искомой точки берется точка пересечения перпендикуляра к касательной в  $i$  – й точке и прямой, проведенной через  $j + k$  – ю псевдоточку с тангенсом угла наклона  $y'$ .

В частном случае, когда  $i$  – я точка является псевдоточкой, а  $j$  – я точка находится на дуге окружности, координаты центра которой совпадают (точнее, находятся вблизи) с координатами  $i$  – й псевдоточки (или наоборот), возникает коллизия, когда вышеописанный алгоритм практически не работает, потому что приходится искать точку пересечения почти параллельных прямых. Но выход очевиден: ПЭТ находится на середине отрезка, соединяющего  $i$  – ю и  $j$  – ю точки.

### 3.3.4. Алгоритм построения картины течения металла для многоконтурных заготовок

Выше описаны алгоритмы построения эквидистант для кусочно-линейного и кусочно-нелинейного контуров в одноконтурных поковках. Однако, в машиностроении подавляющее большинство заготовок многоконтурные. Далее приведен алгоритм построения эквидистант для многоконтурных заготовок, который частично совпадает с алгоритмами, описанными в предыдущих пунктах, но имеет свои особенности.

Данный алгоритм основан на том же разбиении контуров на точки, также выбирается первоначальная точка, но далее цикл идет не по точкам, а по участкам контура. Другими словами, ищется точка, равноудаленная от первоначальной и участка контура. Эта точка становится ПЭТ и далее как в предыдущем алгоритме.

После чтения исходных данных проверяется необходимость их коррекции. Если в какой-либо точке контура производная стремится к бесконечности, выполнение алгоритма прекращается. Чтобы избежать этого, необходимо предварительно скорректировать исходные данные следующим образом.

Если предыдущий фрагмент прямая линия, новые координаты узловой точки  $(x; y)$  определяются в соответствии с (3.1).

Если предыдущий фрагмент дуга окружности, то координаты  $(x; y)$  смещенной точки этой окружности

$$x = x_c + R \cos \xi,$$

$$y = y_c + R \sin \xi,$$

где  $x_c, y_c$  – координаты центра окружности,  $R$  – радиус окружности;

$$\xi = \arccos \left( \cos \psi - \text{sign}(\cos \psi) \cdot \text{sign}(x_0 - x_p) \cdot z \cdot \frac{\delta}{R} \right) \quad \xi \in [0; 2\pi)$$

$$\psi = \arctg \frac{y_0 - y_c}{x_0 - x_c} \quad \psi \in [0; 2\pi).$$

Если фрагмент контура дуга окружности, в крайних точках которой производная стремится к бесконечности, заменяем данную окружность другой, у которой радиус будет больше на величину  $\delta$ .

Разбивка контура выполняется с соблюдением заданного максимального шага.

Производная в точке вычисляется соответственно

для прямой  $y' = \frac{y_k - y_0}{x_k - x_0};$

для окружности  $y' = -\frac{x_i - x_c}{y_i - y_c}.$

где  $x_k, y_k$  – координаты конца рассматриваемого фрагмента;

$x_i, y_i$  – координаты текущей точки контура.

Величина шага угла наклона псевдокасательной в рассматриваемой узловой точке определяется соотношением

$$\Delta \varphi = \frac{2h}{|x_k - x_0|},$$

где  $h$  – величина заданного максимального шага разбивки контура.

Длина ЛТ для фрагмента, являющегося прямой, вычисляется по формуле

$$d = \frac{(x_i - x_k) \cos \gamma_u + (y_i - y_k) \sin \gamma_u}{1 - \cos(\gamma_i - \gamma_u)},$$

где  $\gamma_i$  – направление перпендикуляра к касательной в рассматриваемой точке контура;

$\gamma_u$  – направление перпендикуляра к рассматриваемому фрагменту.

Если  $d < 0$ , то ПЭТ для этого фрагмента нет.

Длина ЛТ для фрагмента, являющегося окружностью, вычисляется по формуле

$$d = \frac{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 - R^2}{2(R - (x_i - x_c)\cos\gamma_i - (y_i - y_c)\sin\gamma_i)}.$$

Если  $d < 0$ , то ПЭТ находится внутри рассматриваемой окружности, если  $d > 0$ , то – вне ее.

Затем дополнительно проверяется, находится ли экви-точка внутри рабочего сектора, образованного радиусами, проведенными в начальную и конечную точки фрагмента.

Чтобы исключить ненужные экви-точки, выполняется проверка условия

$$\min(x_0, x_k) \leq x_u \leq \max(x_0, x_k).$$

Если в результате описанных действий выясняется, что ПЭТ для этого фрагмента нет, то необходимо проверить краевые точки фрагмента.

Если в краевой точке рабочий угол является развернутым, то длина ЛТ вычисляется по формуле

$$d = -\frac{(x_i - x_q)^2 + (y_i - y_q)^2}{2(x_i - x_q)\cos\gamma_i + 2(y_i - y_q)\sin\gamma_i},$$

где  $x_q, y_q$  – координаты краевой точки рассматриваемого фрагмента.

Дополнительно проверяется, находится ли ПЭТ в рабочей зоне ячейки, образованной перпендикулярами к касательным фрагментов, сходящихся в рассматриваемой узловой точке. Если оказывается, что всем условиям удовлетворяют ПЭТ от обоих краев фрагмента, то в качестве ПЭТ принимается та из них, для которой  $d$  будет наименьшим.

Если мы нашли ПЭТ для рассматриваемого фрагмента, тогда сравниваем длину ЛТ с минимальной длиной ЛТ всех предшествующих фрагментов всех кон-

туров рассматриваемой ячейки. Если эта длина меньше минимальной, то минимальной назначается именно она. После того, как выполнены расчеты для всех фрагментов всех контуров рассматриваемой ячейки, экви-точкой назначается ПЭТ, для которой длина ЛТ оказалась минимальной.

Разработанные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса EQUI в среде визуального программирования DELPHI.

В результате реализации данного алгоритма время работы программы значительно уменьшилось. Для обеспечения наглядности процесса ввода исходной информации и повышения удобства работы в структуру программы встроен модуль, позволяющий при вводе узловых точек контура оперативно отображать введенные участки контура, редактировать уже существующие файлы данных, использовать при построении контуров простейшие примитивы (круг, квадрат, наклонный прямоугольник), заменять острые углы дугами соответствующего радиуса.

В разработанном ПК реализовано представление полученных результатов в виде пространственной фигуры, в основании которой находится заданный контур, экви-точки образуют ребра пространственной фигуры, а ЛТ – линии ската боковых поверхностей. Как было указано ранее, поверхности одинакового ската имитируют пространственную эпюру контактных давлений. Таким образом, EQUI позволяет не только провести экспресс-анализ КТМ, но и построить ПЭКД.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Анализ исследований картины течения металла, выполненных отечественными и зарубежными учеными, позволил выявить закономерности формоизменения заготовок, в основе которых лежит деформационная схема осадки.

2. На основании известных принципов разработана «эквидистантная теория», позволяющая моделировать формообразование и прогнозировать распределение потоков металла по плоскости контакта в условиях пластической деформации.

3. Разработанные алгоритмы построения картины течения металла для контуров любой сложности, а также многоконтурных заготовок базируются на представлении линий раздела течения металла в виде эквидистанты контура и позволяют автоматизировать методику решения поставленной задачи. Возможность аппроксимации контура поковки отрезками прямой и дугами окружности позволяет исчерпать все многообразие эквидистантных линий кривыми второго порядка.

4. На основе разработанных алгоритмов в среде визуального программирования DELPHI создан многоцелевой программный комплекс EQUI, позволяющий моделировать картину течения металла по полотну заготовки.



## **Глава 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭПЮРЫ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ**

### **4.1. Актуальность создания обновленного программного комплекса**

Компьютерное моделирование КТМ дает возможность получить схему формообразования поковки еще на стадии разработки. Такие процессы, как ковка и штамповка, протекают при наличии значительных сил трения, следовательно, нормальная схема течения более предпочтительна, чем радиальная.

Наряду с многочисленными математическими моделями и программными комплексами, для моделирования КТМ и ПОС применяется графо-аналитическая методика экспресс-анализа картины течения металла [71]. Сущность метода заключается в построении поверхностей одинакового ската, которые имитируют пространственную эпюру контактных давлений, и анализе линий их пересечения, а также построении проекций этих линий на плоскость контакта инструмента и заготовки, которые представляют собой линии раздела течения металла. Изменять положение ЛРТМ, а, следовательно, влиять на распределение потоков металла по плоскости контакта, можно с помощью известных приемов: технологического выреза или технологической выемки. Тогда, перемещая их по заготовке и меняя размеры, можно получать различные картины течения металла, в дальнейшем выбрав наиболее благоприятную в смысле формоизменения заготовки. Достаточно подробно методика и примеры ее применения к процессу протяжки изложены в работе [133].

Моделирование ПОС средствами геометрии не вызывает сложностей, особенно с помощью современных систем автоматизированного проектирования. Как отмечалось выше, для моделирования процессов ОМД на большинстве предприятий используются различные САПР: универсальные, например, ANSYS, SuperForge, Forge, Abaqus, и специальные, такие как Deform, QForm, Splen и т.д.

Универсальные ПК позволяют моделировать практически все процессы обработки металлов давлением, начиная от простой подгибки или осадки заготовки, заканчивая деформацией многослойных материалов или штамповкой взрывом, с учетом термической обработки, фазовых превращений и микроструктурного анализа сталей и цветных сплавов. Некоторые из них ориентированы на решение самых сложных и ответственных нелинейных задач, а также на проведение многодисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма.

Специальные ПК позволяют моделировать весь технологический процесс, включая подготовительные и промежуточные операции: нагрев, охлаждение, обрезку облоя, пробивку отверстий и непосредственно саму деформацию металлов в горячем, холодном и теплом состоянии. Эти ПК, в отличие от универсальных, имеют более узкое применение.

Выбор конкретного вида САПР для проектирования или анализа в значительной мере зависит от возможностей предприятия, но с учетом современной тенденции развития САПР растут возможности их интеграции с другими системами, экспорта или импорта баз данных и отдельных элементов ПК с учетом применимости к различной геометрии исследуемых поверхностей.

Сегодня вопросам геометрического моделирования на основе САПР уделяется достаточно много внимания и, следовательно, геометрия как наука во всех ее проявлениях стремится к интеграции в различные области прикладных наук, в том числе и металлургию. В последнее время появляется много систем различного анализа геометрии деталей на стадии проектирования. Большинство из них основаны на методе конечных элементов, который получил весьма широкое распространение и успел завоевать доверие. Однако метод конечных элементов нуждается в совершенствовании. Одним из его недостатков является сложность овладения тонкостями и нюансами предварительного задания условий какого-либо процесса, в то время как знание основных принципов и свойств геометрических объектов, например поверхностей одинакового ската, облегчает процесс проектирования и, как следствие, ведет к повышению качества изделий.

Универсальные и специальные ПК, как отмечалось выше, обладают рядом неоспоримых преимуществ: они охватывают широкий класс решаемых задач, содержат простой, понятный интерфейс, обеспечивают высокую точность получаемых результатов.

Наряду с преимуществами имеется и ряд недостатков: достаточно высокие требования к параметрам компьютерной техники, сложность и низкая скорость создания файла входных данных, длительность обучения пользователей, а также значительное время расчета и моделирования одного варианта. Например, процесс штамповки в системе SolidWorks может моделироваться несколько часов, хотя в результате такого моделирования будет получено векторное поле течения частиц металла. К тому же такие системы достаточно дороги.

В некоторых случаях, особенно на стадии проектирования и предварительного анализа технологии производства поковки, временные затраты можно сократить другими средствами моделирования ПОС, которые позволяют получить результат за несколько минут и не предполагают наличия навыков владения САЕ-системами.

Специализированные ПК, ориентированные на моделирование одного-двух процессов ОМД (например, получения поволоки в процессах объемной штамповки и ковки), имеют следующие преимущества: низкие требования к характеристикам компьютерной техники; высокую скорость расчетов; ускоренный ввод исходной информации; быстрое и легкое обучение пользователей. При этом следует иметь в виду, что в последние годы область применения рассматриваемых моделей активно расширяется: к «традиционным» самолето- и ракетостроению присоединяются автомобилестроение и вагоностроение.

При создании программных продуктов следует руководствоваться возможностями конкретного пользователя, назначением вычислительной системы, вопросами экономии ресурсов.

В связи с этим ряд исследователей пришли к решению о необходимости создания собственных специализированных ПК, ориентированных на узкие конкретные задачи и лишенных указанных недостатков. Так, группой исследователей

под руководством проф. Соломонова К.Н. был разработан простой и удобный специализированный программно-технический комплекс Parshtamp [51, 54], предназначенный для моделирования пластического формоизменения плоских заготовок.

В ряде специальных периодических изданий, приведенных ниже, имеются сведения о подобных специализированных ПК, предназначенных для выполнения узких конкретных задач.

При осадке свободная поверхность образца образована геометрическим местом точек, представляющим собой траектории главных направлений напряжений и деформаций. Для практического использования необходимо знать углы поворота главных направлений по отношению к осям координат. Использование распространенных ПК, например, QForm-3D, Deform и т.д. связано со сложностью задания граничных условий и адекватного учета различных факторов, например, контактного трения. В данном случае также целесообразно создание и использование недорогого, работающего в режиме реального времени программного продукта, основанного на методе главных траекторий, позволяющего выполнять экспресс-анализ влияния основных технологических факторов на протекание и результат процесса осадки и визуально и численно [69, 134].

Зачастую для того, чтобы воспользоваться широко известными мощными программами, нужно на стадии постановки задачи ввести значения параметров, которые определяются посредством проведения экспериментов, что не всегда выполнимо и весьма дорого [135]. Подобными причинами обусловлена разработка простого и доступного «своего» ПК для моделирования процесса штамповки без штамповочных уклонов [78], а также автоматизированной системы формообразования специального инструмента в виде модуля, обеспечивающего взаимосвязь с другими системами, например, Teamcenter, которая обеспечивает разработку нового инструмента на этапах проектирования и изготовления [81].

Исходя из этого на основании «эквивалентности» и представленного в предыдущей главе алгоритма был разработан узкоспециальный ПК EQUI, позволяющий моделировать КТМ по плоскости контакта инструмента и заготовки в процессах

ковки и объемной штамповки, в которых наблюдается деформационная схема осадки [84, 126].

Разработанный ПК EQUI обладает следующими преимуществами: он быстр, прост, не требователен к характеристикам компьютерной техники. Создание файла входных данных занимает несколько минут, расчет одного варианта – несколько секунд. Высокая скорость расчетов достигается благодаря упрощению математической модели и исходной системы уравнений. Это сужает круг решаемых задач и процессов ОМД, зато дает возможность свести систему дифференциальных уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние материала, к аналитическим зависимостям.

EQUI дает возможность получения полноценной КТМ для сложных многоконтурных заготовок, позволяет построить контур заготовки, линии раздела течения металла, линии тока, ПЭКД, а также позволяет определить положение технологических и конструктивных элементов, с помощью которых можно управлять течением металла.

Ввод данных о геометрии поковки осуществляется достаточно быстро и просто: сначала контур реальной поковки аппроксимируют прямыми и дугами окружностей, затем их нумеруют, после вносят информацию во входной файл в произвольной последовательности. Туда же помещают данные о шаге расчета, положении начальной точки, для каждого отрезка прямой – координаты начала и конца отрезка, для каждой дуги окружности – координаты центра, радиус и угол раствора.

Благодаря указанным преимуществам разработанный ПК незаменим, если требуются экспресс-анализ картины течения металла и быстрая (пусть и приближенная) оценка пластического формоизменения заготовки.

Ряд задач по моделированию КТМ и ПЭКД без учета механических свойств процесса можно решать с помощью известных графических пакетов, позволяющих создать 3D-модель объекта.

## 4.2. Моделирование поверхности одинакового ската с помощью графического редактора КОМПАС [136]

Известный графический редактор КОМПАС дает возможность легко и быстро получить наглядное изображение ПЭКД, благодаря чему оценить КТМ в процессах пластического формоизменения плоских заготовок. Выбор графического пакета КОМПАС обусловлен его простотой в освоении и использовании, что выгодно отличает указанный ПК от более сложных программ, таких как Solid-Works.

CAD-система КОМПАС 3D позволяет упростить задачу построения ПОС благодаря наличию операции «выдавливания». КОМПАС можно использовать как для односвязных, так и для многосвязных контуров, что весьма удобно при моделировании осадки заготовки с технологическим вырезом (или вырезами).

Особенность операции «выдавливания» заключается в том, что образующие любой поверхности, представляющей собой твердотельную модель «детали», наклонены под одним углом к основанию, т.е. любая поверхность, полученная «выдавливанием», – это поверхность одинакового ската [137]. Следовательно, такая поверхность моделирует ПЭКД. При этом контур основания может быть многосвязным и представлять весьма сложную линию (рисунок 4.1).

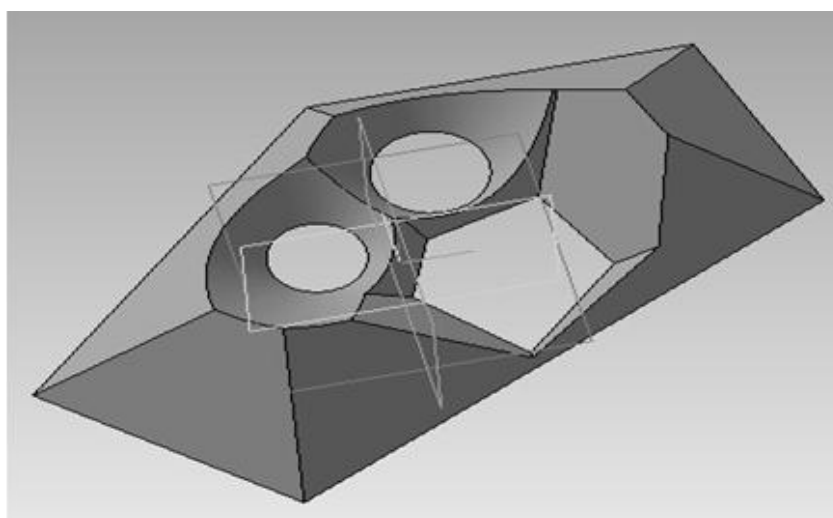


Рисунок 4.1 – Твердотельная модель ПЭКД в КОМПАСе

В ходе исследований выяснилось, что имеются существенные ограничения в моделировании не только для сложных гладких кривых, задаваемых в КОМПАСе с помощью кривой Безье, но и для многоугольников, из-за пересечения направляющих. Однако не все САПР сталкиваются с такой проблемой [138]. Получение поверхности одинакового ската в ПК SolidWorks значительно легче, так как конфликт с пересечением направляющих устранен (рисунок 4.2).

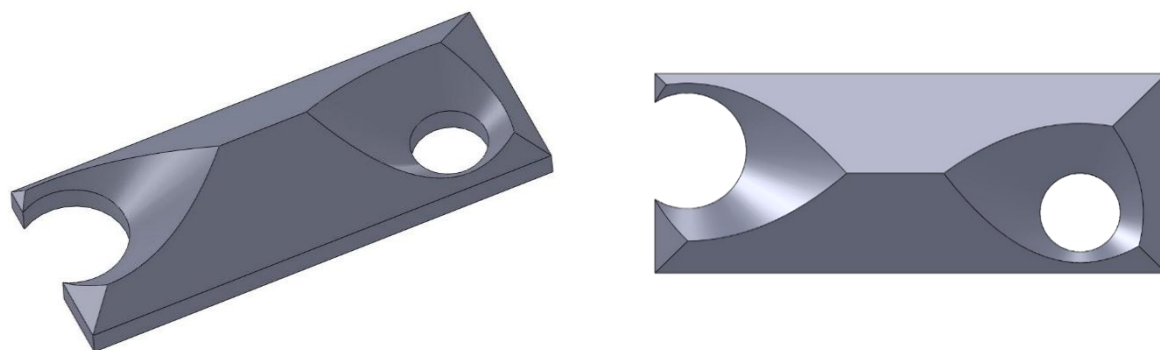


Рисунок 4.2 – Моделирование поверхности одинакового ската  
в SolidWorks

Здесь получение проекций гребня ПЭКД на плоскость контакта, т.е. построение ЛРТМ, не представляет затруднений. Таким образом, моделирование ПОС и, как следствие, получение эпюры контактных давлений в SolidWorks достаточно удобно. Еще одно удобство: система SolidWorks обладает свойствами экспорта данных в САЕ-системы. Решение задач ОМД в такой системе предполагает широкий спектр данных, получаемых в процессе анализа, хотя и занимает достаточно много времени.

В ходе дальнейших исследований возможностей моделирования ПОС в ПК КОМПАС удалось выявить причину сужения круга решаемых задач, в том числе и для линий в форме многоугольника.

Для анализа использовали односвязный контур того же многоугольника, что и для первого случая, только без внутренних линий, т.е. рассмотрели внешний пятиугольник. Очевидно, что этот контур гораздо проще предыдущего, по крайней мере, в геометрическом смысле. Однако не удалось на таком «простом» контуре построить твердотельную модель. Оказалось, что «выдавливание» поверхности

заканчивается в тот момент, когда два соседних ребра пересекаются между собой. Насыпь в этом случае образуется, но не предельная (рисунок 4.3), что противоречит требованиям разработанной методики.

Тем не менее, был придуман способ устранения указанного ограничения. Предложено при достижении поверхностью предельной высоты закончить выдавливание. Затем на полученном верхнем основании (на первом «этаже») построить новый контур, полностью совпадающий с предыдущим. На этом контуре построить второй «этаж», и так далее до полного построения «предельной насыпи». В данном примере хватило четырех «этажей» (рисунок 4.3).

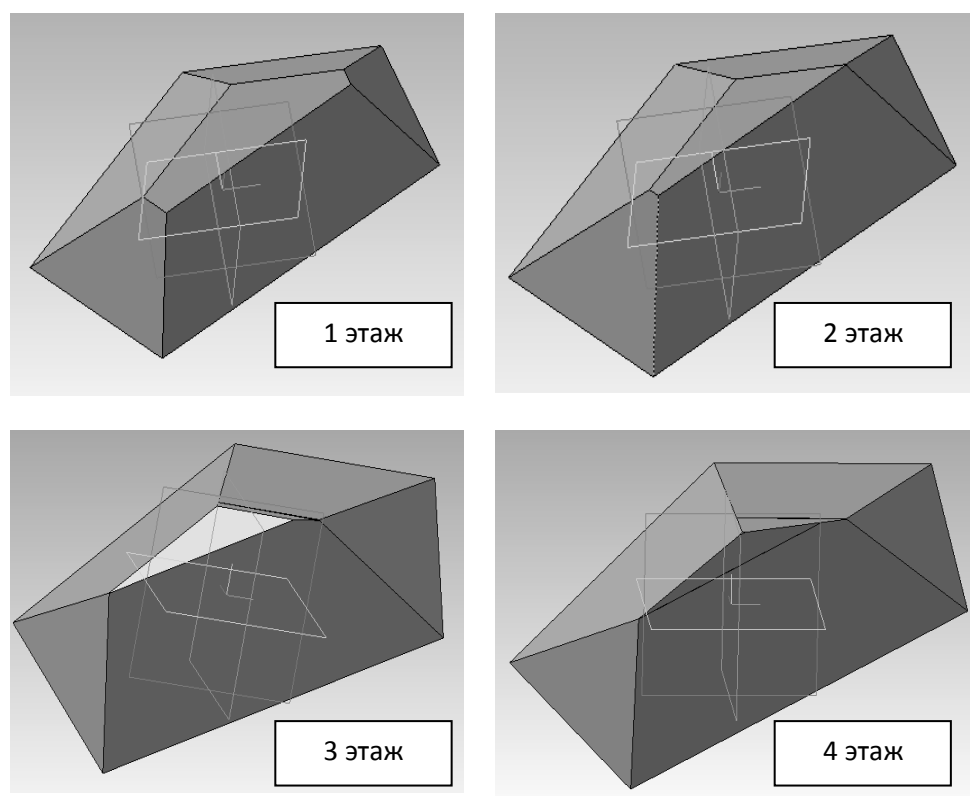


Рисунок 4.3 – Построение ПЭКД в четыре «этажа»

При проецировании ребер (гребней) такой поверхности, аналогичной ПЭКД, на плоскость контакта получаем изображение эквидистанты контура, т.е. ЛРТМ, что представляет дополнительный практический интерес (рисунок 4.4).



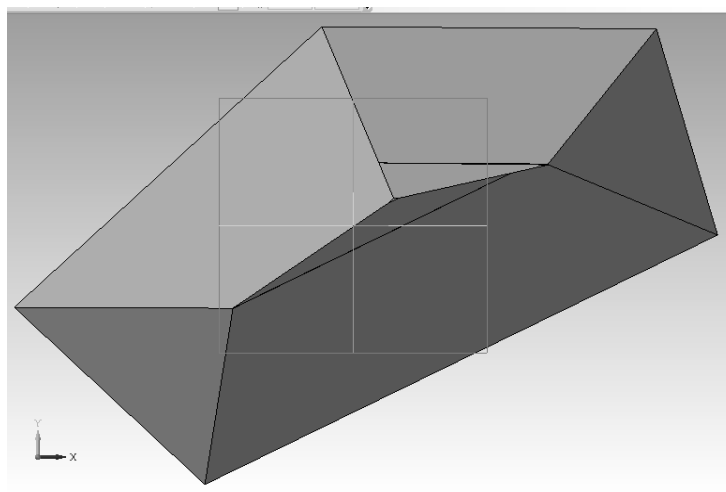


Рисунок 4.4 – Эквидистанта контура

К сожалению, когда вопрос касается построения ПОС, опирающейся на гладкую кривую, применение указанного способа сталкивается с непреодолимыми трудностями. Причина в том, что практически невозможно повторить контур кривой на любом верхнем этаже, т.к. кривая Безье, очевидно, представляет собой сплайн-функцию, для которой существенное значение имеет расположение точек «перегиба», положение которых угадать заранее не представляется возможным. Понятно, что с некоторой точностью, тем не менее, задачу решить можно, однако практически это крайне неэффективно, т.к. требует построения большого количества «этажей». При этом трудно предсказать «многоэтажность» такой поверхности.

Задача построения ПОС имеет не только прикладное, но и чисто теоретическое значение, т.к. названные поверхности представляют собой весьма малоизученный класс поверхностей.

Прикладное использование таких поверхностей вовсе не исчерпывается областью моделей процессов пластического формоизменения, рассмотренных здесь. Изучение свойств поверхностей одинакового ската полезно для решения широкого круга практических задач, связанных, к примеру, с устройством железнодорожных насыпей.

#### **4.3. Моделирование картины течения металла с помощью программного комплекса Deform [139]**

В производстве поковок с ребрами жесткости из плоских заготовок существенную роль играет неравномерность течения металла по контактной поверхности. В этих процессах решающее значение имеют закономерности, которым подчиняется процесс осадки полотна поковки.

Неправильная оценка неравномерности формообразования поковок, в значительной степени зависящая от неоднородности граничных условий, в ряде случаев приводит к образованию дефектов (недооформление, прострел, плохая завязка волокон и т.п.) в местах резкого изменения толщины поковки. Это относится в основном к поковкам, имеющим ребра жесткости и другие конструктивные элементы.

Следует учитывать, что неравномерность течения металла по полотну заготовки может играть и положительную роль, поскольку позволяет управлять потоками металла. Это особенно проявляется, если поковка имеет явно выраженный плоскостной характер.

Для управления течением металла в производственной практике используются технологические приемы и конструкционные элементы (бобышка, рассекаТЕЛЬ, технологический вырез, ложное ребро или полотно и т.д.), дающие возможность предотвратить образование дефектов без нарушения конструкции детали. Рациональное применение различных технологических методик обеспечивается компьютерным и физическим моделированием процессов пластического формоизменения.

Экспериментальные дорогостоящие методы на сегодня утратили свое значение, в основном благодаря резкому скачку в развитии способов и средств компьютерного моделирования. Поэтому создание программных комплексов, предназначенных для моделирования формоизменения заготовок в процессах пластической деформации, позволяющих указать места возможного образования дефектов, в настоящее время играет первостепенную роль.

Наряду с традиционными методами экспериментальных исследований (такими, как промышленный и лабораторный эксперименты, аналоговое моделирование [140]) широкое распространение получил, так называемый, виртуальный эксперимент [129], позволяющий с большой достоверностью моделировать процессы пластического формоизменения.

Для процессов ОМД, характеризующихся осадкой полотна поковки, которая имеет ярко выраженные «плоскостные участки», основным можно считать вопрос о построении КТМ на плоскости контакта инструмента и деформируемой заготовки.

В последние годы для моделирования процессов ОМД на металлургических и машиностроительных предприятиях широко применяются программные комплексы, способные прогнозировать формообразование поковок. Виртуальные эксперименты с помощью современных CAD/CAE-систем позволяют с высокой точностью моделировать различные процессы и оснастку на любых этапах производства, что в значительной мере повышает качество готовых изделий, повышает их технологичность и резко сокращают затраты времени и средств. Одной из таких, хорошо зарекомендовавших себя на различных предприятиях мировой промышленности, считается CAD/CAE-система Deform, учитывающая различные параметры (реологию, температуру, трение, марку материала и т.п.) процессов пластического деформирования.

В качестве примера использования ПК Deform был проведен виртуальный эксперимент по штамповке гаечного ключа (рисунок 4.5) из плоских заготовок различной формы. Для упрощения расчетов в силу симметрии рассматривается половина исследуемого образца [141].

В качестве самого простого образца была выбрана прямоугольная в плане заготовка, перекрывающая гравюру штампа. Попытка получения гаечного ключа из такой заготовки не увенчалась успехом (рисунок 4.6, *а*), т.к. для формирования головки ключа не хватило металла, поскольку значительный его объем в зоне ручки ключа ушел в облой.

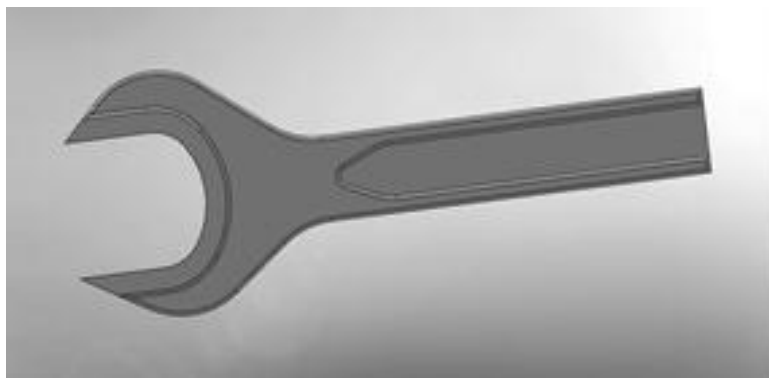


Рисунок 4.5 – Модель гаечного ключа, полученная в SolidWorks

С целью уменьшения потоков металла в зоне ручки гаечного ключа в прямоугольной заготовке сделали выемку. В этом случае удалось получить требуемую поковку, но тем не менее большое количество металла также ушло в облой (рисунок 4.6, б).

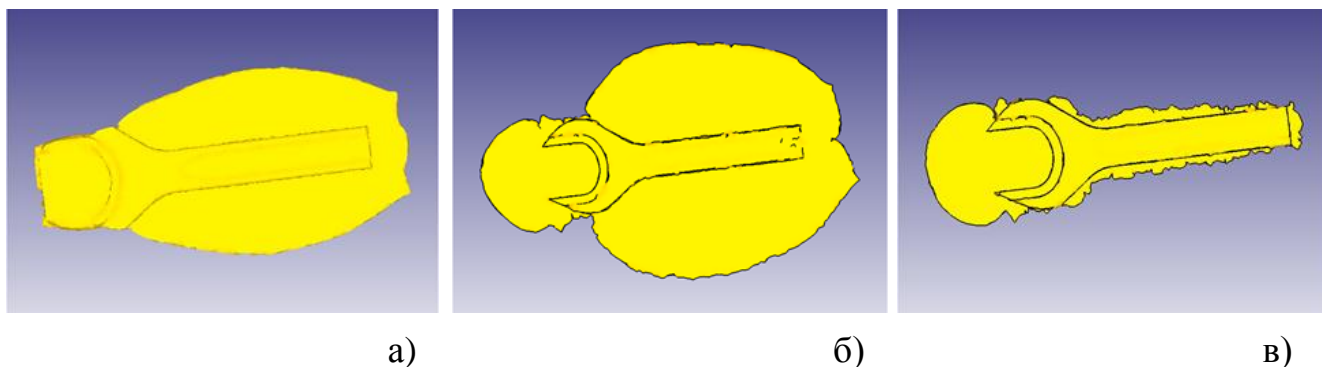


Рисунок 4.6 – Модель штампованного гаечного ключа в Deform

Чтобы сократить расходование металла в облой, создали профилированную заготовку с углублением. В этом случае при штамповке поковки был получен удовлетворительный результат (рисунок 4.6, в). При этом расход металла в облой, по крайней мере в зоне формирования ручки, удалось минимизировать.

#### **4.4. Моделирование картины течения металла с помощью разработанного программного комплекса EQUI**

С целью апробации разработанного на основе «эквидистантной теории» ПК EQUI выполнено компьютерное моделирование формообразования профильных

заготовок при осадке. При этом в качестве КСТМ выбрана нормальная схема течения металла, обеспечивающая направление линий тока ортогонально контуру заготовки. Такое допущение возможно в первом приближении для общей оценки распределения потоков металла по контактной плоскости. В ходе деформирования КСТМ изменяется и превращается в псевдонормальную, когда ЛТ направлены к контуру под некоторым углом, отличным от  $90^\circ$ . Тем не менее, это не мешает использовать экви-теорию, благодаря введению, так называемого, «условного контура» [71], к которому линии тока ортогональны.

Методику построения КТМ и основные закономерности формоизменения удобно проиллюстрировать на примере штамповки четырехугольной поковки с вырезом (рисунок 4.7, а).

КТМ для заготовки с круглым вырезом строится относительно действительного контура до тех пор, пока граничные условия однородные. Как только граничные условия становятся неоднородными (рисунок 4.7, б), для построения КТМ используется условный контур (рисунок 4.7, в), который можно считать продолжением ПОС (т.е. ПЭКД) до пересечения с плоскостью контакта инструмента и заготовки.

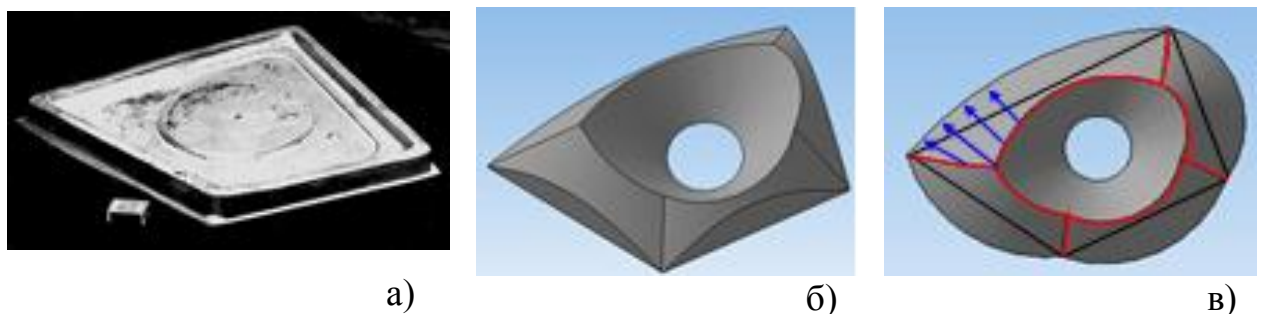


Рисунок 4.7 – Штампованная поковка с круглым вырезом и модель ПЭКД

В качестве примера было рассмотрено использование ПК EQUI для оценки КТМ при штамповке гаечного ключа также из плоских заготовок различной формы.

Для удобства сравнения при моделировании в EQUI (версия 1) также сначала использовали прямоугольную в плане заготовку (рисунок 4.8, а). Как показал анализ компьютерного моделирования КТМ (рисунок 4.8, г), в этом случае для

формирования головки ключа может не хватить металла в силу того, что его значительный объем уйдет в облой в зоне ручки ключа, в то время как головка ключа не получит достаточного количества металла на ее формирование, что и было подтверждено выше при моделировании в Deform.

На рисунке 4.8 (а, б, в) ЛРТМ показаны пунктирными толстыми линиями, ЛТ – сплошными тонкими прямыми.

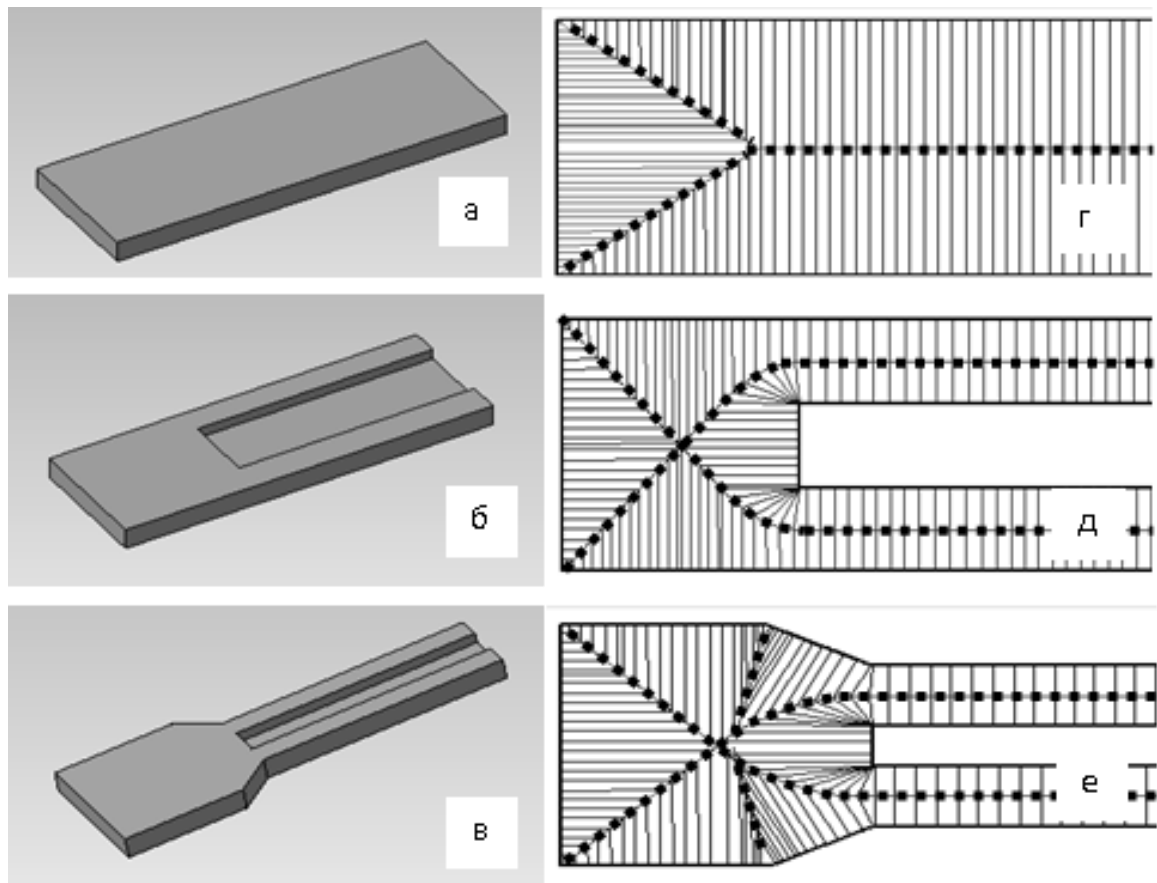


Рисунок 4.8 – Анализ формообразования гаечного ключа

Получение требуемой поковки возможно из прямоугольной заготовки с углублением (рисунок 4.8, б). Анализ КТМ (рисунок 4.8, д) позволяет сделать вывод, что в этом случае действительно ручка должна формироваться с меньшей скоростью, и тогда головка ключа может догнать ее в своем формировании. Тем более, уменьшится объем металла, участвующего в формообразовании головки ключа, что соответствует конструкции выемки под гайку. Однако и в таком варианте значительное количество металла сместится в облой.

Наилучший результат был получен при штамповке поковки из профилированной заготовки с углублением (рисунок 4.8, в). Как видно из анализа КТМ (рисунок 4.8, е), в этом случае расход металла в облой должен быть наименьшим. Однако в практике производства с точки зрения технологичности этого варианта придется оценить, насколько выгоднее производство профилированной заготовок и по сравнению с прямоугольной. И в том, и в другом случае придется делать обрезку излишков металла (либо в исходной заготовке, либо в полученной поковке).

Таким образом, сравнение моделей поковок, полученных в ходе виртуального эксперимента в ПК Deform, и КТМ, полученной с помощью ПК EQUI (версия 1), позволяет убедиться в достаточно высокой степени достоверности предложенных рекомендаций.

Для оценки возможностей и проверки работоспособности ПК EQUI было проведено моделирование КТМ при осадке плоских заготовок, ограниченных односвязными контурами (кусочно-линейными и кусочно-нелинейными) (рисунок 4.9).

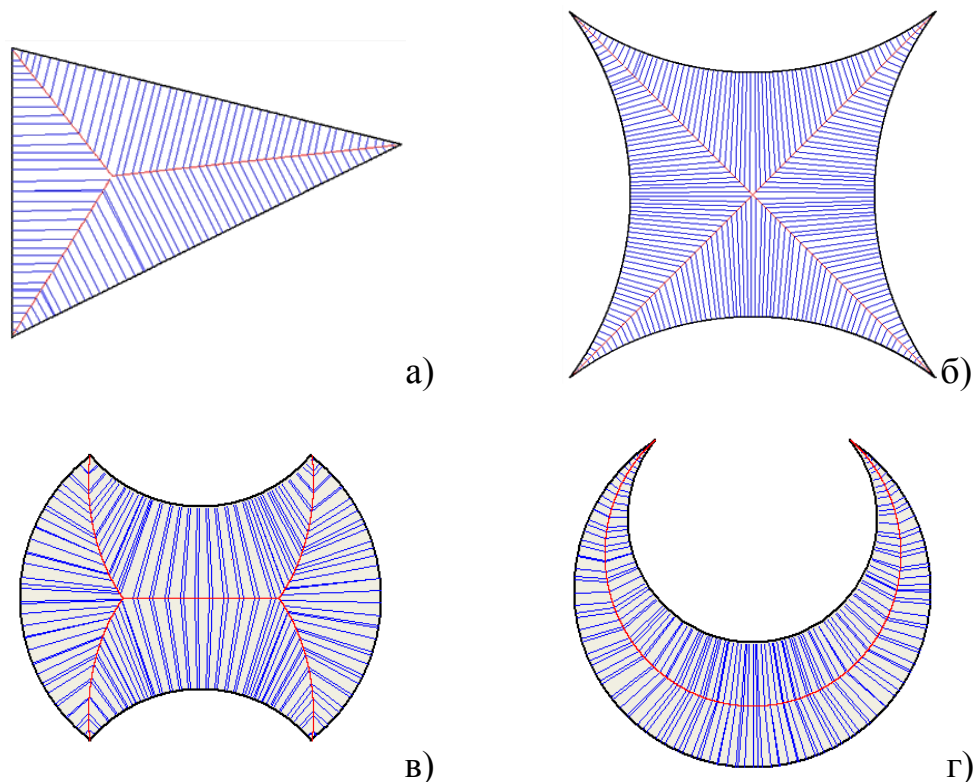


Рисунок 4.9 – Картина течения металла для односвязных контуров

Из анализа КТМ для заготовки в виде треугольника видно, что наиболее интенсивного течения металла следует ожидать в центральных зонах (рисунок 4.9, а).

Исходя из анализа КТМ для односвязных контуров (рисунок 4.9), можно сделать вывод, что центральные зоны заготовок, состоящих из дуг окружностей (рисунок 4.9, б) и внутренние зоны вогнутых дуг (рисунок 4.9, в, г) будут формироваться более активно, т.к. в этих зонах ожидается наиболее интенсивное течение металла; наименее интенсивного формообразования следует ожидать в угловых зонах, где траектории вдоль ЛТ имеют наименьшую длину. Таким образом, заготовки в ходе деформации должны по форме приближаться к кругу.

Разработанный ПК EQUI дает возможность моделировать КТМ не только для односвязных, но и для многосвязных контуров как с центральными, так и с нецентральными вырезами произвольной формы, что значительно расширяет область его применения.

Полученная в результате моделирования в EQUI КТМ для многосвязных контуров приведена на рисунок 4.10.

На рисунках 4.9 и 4.10 синим цветом обозначены ЛТ, а красным – ЛРТМ.

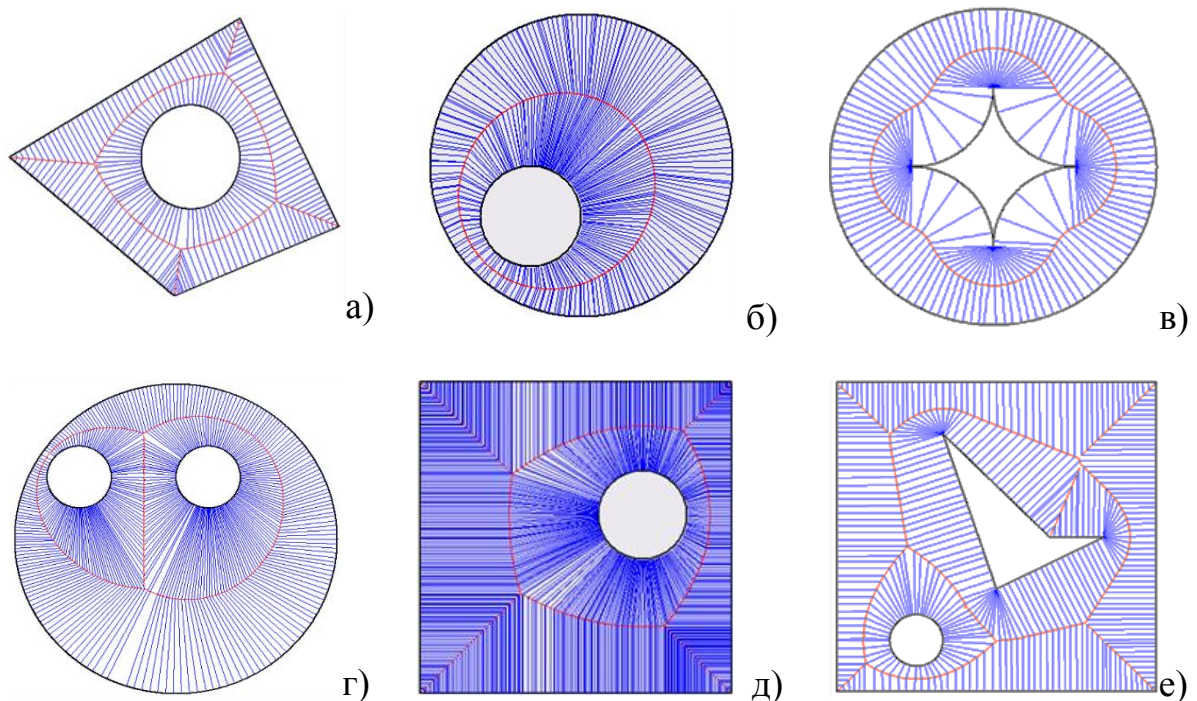


Рисунок 4.10 – Картина течения металла для многосвязных контуров



Формоизменение круглых заготовок с вырезами различной формы (рисунок 4.10, б, в, г) в значительной степени определяется наличием самих вырезов, которые в ходе деформации будут уменьшаться в размерах, пока окончательно не исчезнут. Анализ КТМ для заготовок в форме неправильного четырехугольника и квадратов с нецентральными вырезами (рисунок 4.10, а, д, е) показывает, что наиболее интенсивного течения металла следует ожидать в центральных зонах, а наименьшего – в угловых точках. Следовательно, и эти заготовки в ходе деформации по форме также должны приближаться к кругу.

#### **4.5. Построение картины течения металла для серийных поковок**

Основой всех расчетов и компьютерного моделирования формообразования поковок служит выявление закономерностей течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки. Тогда важнейшей можно считать задачу построения КТМ по полотну заготовки. Она определяет распределение потоков металла на плоскости контакта и в том случае, когда деталь содержит ребра жесткости или иные конструктивные элементы (бобышки, рассекатели и т.д.).

Возможности разработанной методики и ПК EQUI проверены при моделировании формообразования штампованной одноконтурной поковки с оребрением [126]. С целью экспресс-анализа целесообразности применения бобышки (или выреза) в поковке, показанной на рисунке 4.11, а, с помощью разработанного ПК смоделировали КТМ при изменении положения центра окружности и величины ее радиуса. Анализ полученных результатов показывает, что отток металла в сторону бобышки (или выреза) уменьшает неравномерность затекания металла в полость штампа. Следовательно, ее применение целесообразно.

При моделировании надо учитывать следующие требования. Можно изменять лишь те геометрические элементы, которые не влияют на конструкцию получаемого изделия, например, ширину и высоту порога заусенечной канавки, радиус бобышки, начальную толщину исходной заготовки или шаг осадки. Радиус бобышки относится к этим переменным потому, что в чистовой детали на ее ме-

сте должно быть отверстие диаметром 240 мм, и следовательно, при механической обработке бобышку можно удалить. В процессе расчета размер бобышки играет роль управляющего фактора, с помощью которого можно получать различные варианты течения металла по зеркалу гравюры штампа, а, следовательно, и разные профили ребра жесткости.

Полученная в результате моделирования КТМ по полотну поковки показана на рисунке 4.11, б.

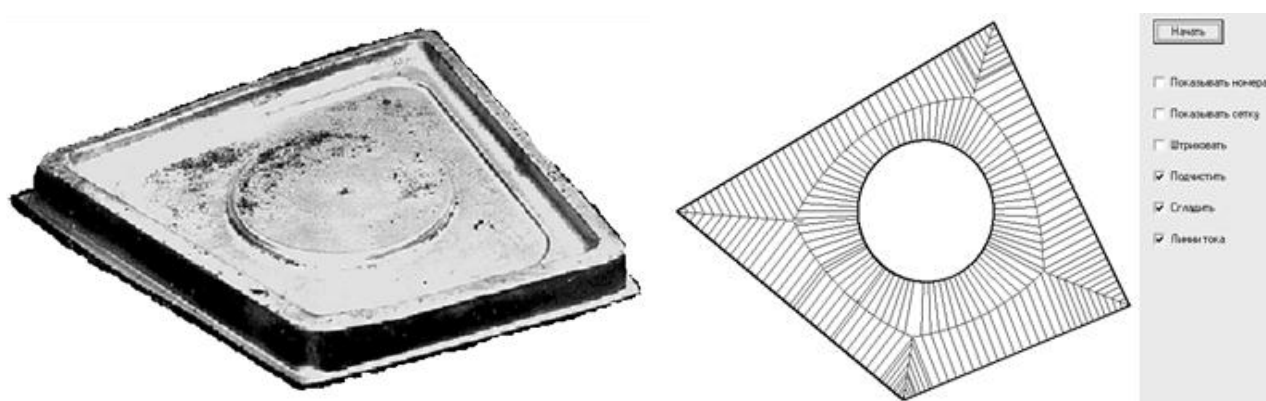


Рисунок 4.11 – Штампованная поковка с технологическим вырезом:

слева – штампованная деталь;  
справа – модель картины течения металла

Для проверки результатов расчета формообразования штампованной поковки с контурным оребрением был проведен эксперимент в промышленных условиях по осадке заготовки из сплава АК6 на гидравлическом прессе усилием деформирования 150 МН [53].

По предложенной на заводе-изготовителе технологии поковку не удалось отштамповать за один переход из-за нехватки усилий гидравлического пресса. На последней из исследуемых стадий осадки бобышка уже полностью оформилась, в то время как одна из угловых зон не достигла проектируемой высоты.

Были промоделированы различные варианты получения указанной серийной поковки. Анализ моделей позволил дать рекомендации по проектированию штампа и технологии получения рассматриваемой серийной поковки. Так как введение бобышки большого радиуса не устраняет неравномерность формирова-

ния отдельных ребер жесткости, что может привести к дефектам, то было предложено штамповку осуществлять в два перехода в одном окончательном штампе, вырезая в центре поковки после первого перехода отверстие.

Штамповка в промышленных условиях с учетом рекомендаций подтвердила их правомерность: для получения качественного изделия хватило усилий гидравлического пресса мощностью до 100 МН. При этом макроструктура штампованной поковки была значительно улучшена.

Ранее под руководством проф. Соломонова К.Н. был разработан специализированный ПК Parshtamp, который обладал рядом недостатков. Ядром указанного ПК служил блок построения ЛРТМ. Поэтому было принято решение в первую очередь обновить именно его.

С целью сравнения результатов работы ПК Parshtamp и обновленного ПК EQUI выполнено моделирование КТМ при осадке сложных многоконтурных серийных поковок. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.12 (ЛРТМ обозначены красным цветом, а ЛТ – синим).

В промышленных условиях реальные поковки состоят из нескольких многоконтурных контуров. Разработанный ПК EQUI позволяет успешно решить задачу построения экви-линий для любых многоконтурных заготовок, причем построение выполняется одновременно по всем контурам.

На рисунке 4.13 показана заготовка, состоящая из трех контуров. Анализ КТМ показывает, что наименее интенсивного течения металла следует ожидать в угловых точках, таких, например, как 7, 8, 11, 13 для контура 1-13. А наиболее интенсивного для этого же контура – в точках 2 и 5. Для контура 1-4 в начальный момент деформирования, когда КСТМ можно считать нормальной, течение металла подчиняется традиционной схеме. На последующих стадиях деформирования, как было указано ранее, КСТМ переходит в псевдонормальную.

Поскольку при изготовлении поковок, имеющих ребра жесткости, требуются значительные усилия пресса, то для снижения усилий пресса и управления течением металла применяются, как указано ранее, технологические приемы и кон-

структивные элементы, которые позволяют управлять формообразованием поковки и снижать усилия прессы.

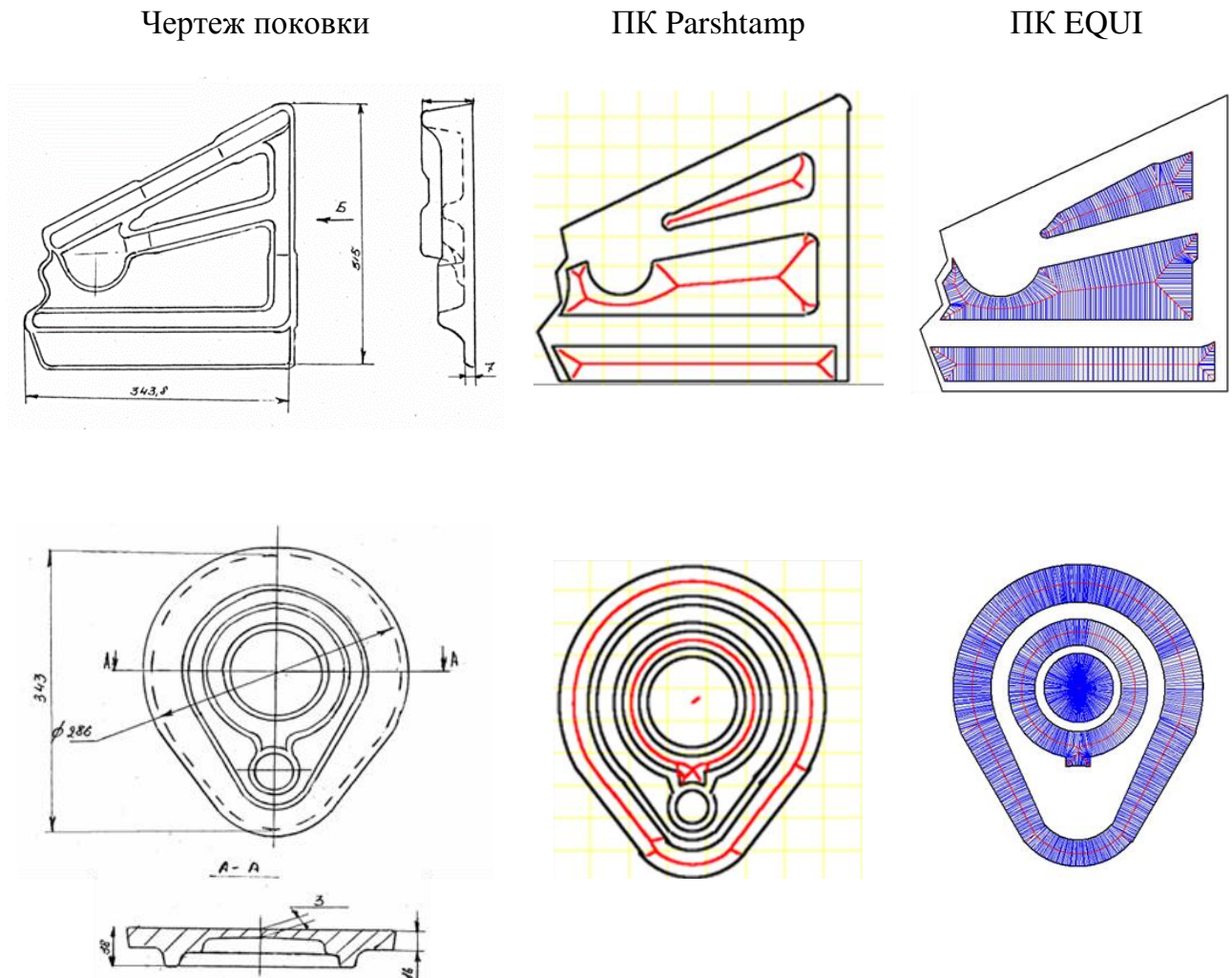
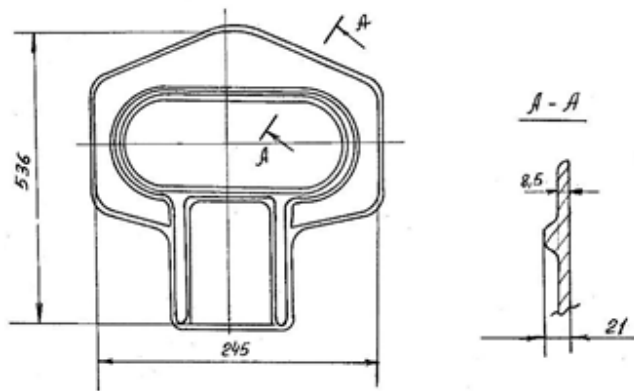
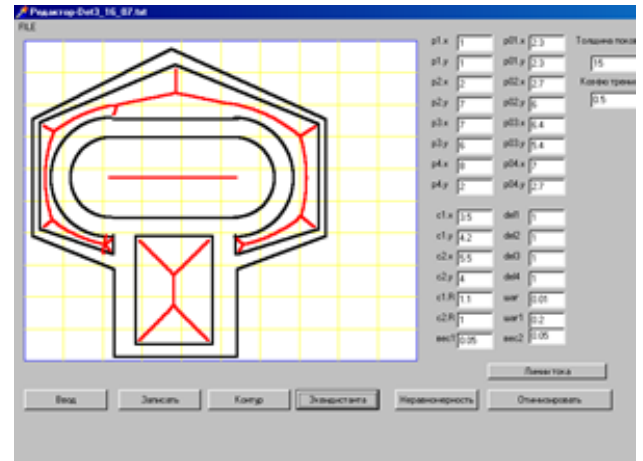


Рисунок 4.12 – Построение ЛРТМ и КТМ с помощью ПК Parshtamp и EQUI

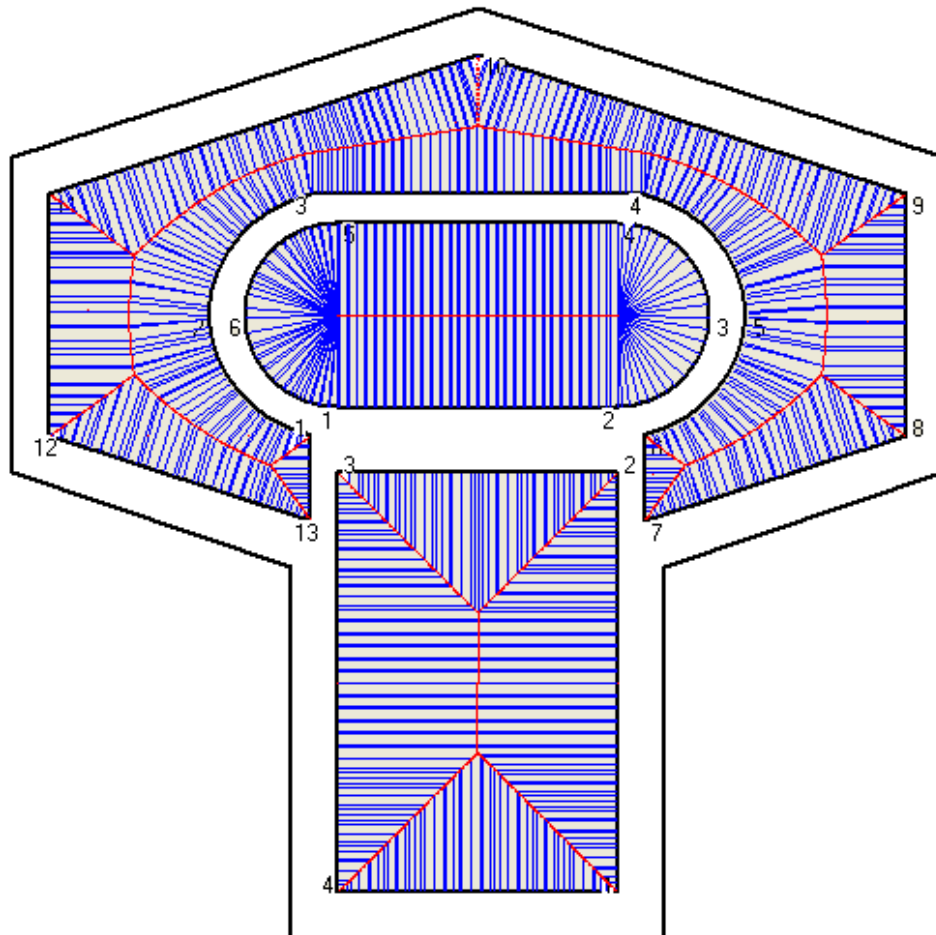
Для демонстрации возможностей нового ПК намеренно усложнена форма двух контуров введением вырезов (рисунок 4.14). Такие вырезы, как известно, служат эффективным инструментом для управления формоизменением заготовки в плоскости контакта с инструментом, перераспределяя потоки металла должным образом. Как видно на рисунке, это нисколько не мешает получению полноценной модели КТМ.



Чертеж поковки



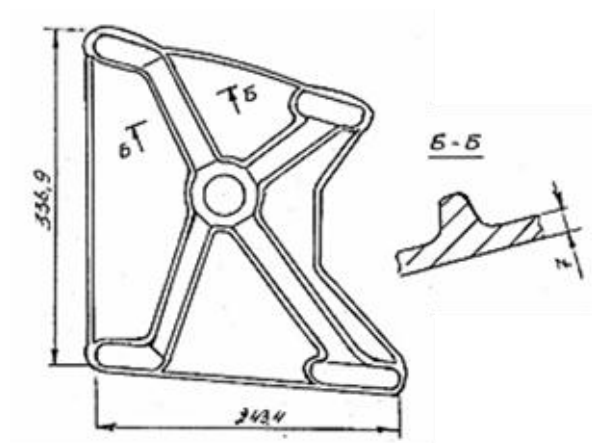
ПК Parshtamp



ПК EQUI

Рисунок 4.13 – Моделирование КТМ для многоконтурной заготовки

Чертеж поковки



ПК EQUI

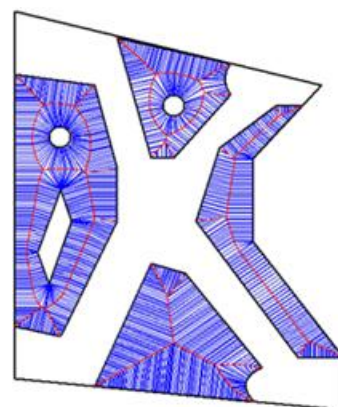


Рисунок 4.14 – Моделирование КТМ для заготовки с вырезами

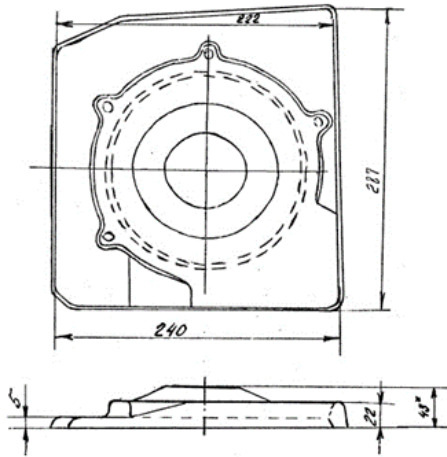
Разработанный ПК EQUI дает возможность получить наглядную картину расположения ЛРТМ (рисунок 4.15, внизу слева), за счет чего оценить неравномерность течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки. Анализ КТМ сплошной заготовки (рисунок 4.15, внизу в центре) и заготовки с технологическим вырезом (рисунок 4.15, внизу справа) позволяет сделать вывод, что заготовка с вырезом будет иметь более равномерное формирование в центральной части.

Сравнение результатов моделирования в ПК EQUI и Parshtamp показывает практически полное совпадение КТМ, формы и расположения экви-линий, являющихся моделью ЛРТМ.

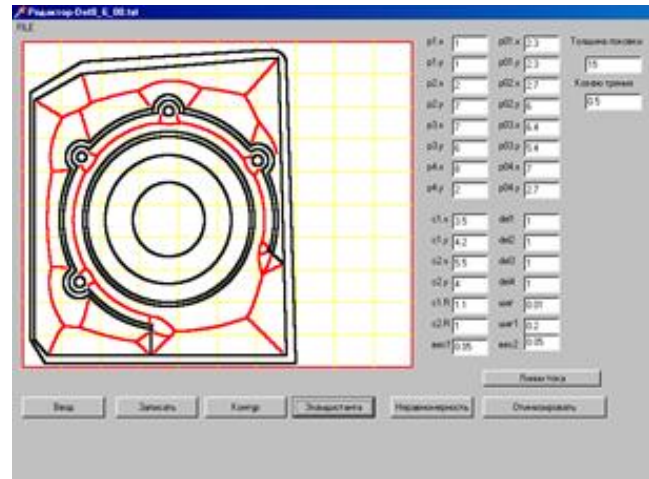
Подводя итоги, следует констатировать преимущества нового ПК EQUI по сравнению с ПК Parshtamp:

- построение эквидистант для многосвязных контуров в ПК Parshtamp было весьма ограничено, в то время как ПКЕQUI позволяет выполнять такие построения для контуров любой сложности;
- новый ПК EQUI позволяет построить КТМ для любых многоконтурных заготовок, причем построение выполняется одновременно для всех контуров (во всех ячейках), что не было предусмотрено в ПК Parshtamp;
- ПК EQUI позволяет выбрать любой ракурс при визуализации ПЭКД.

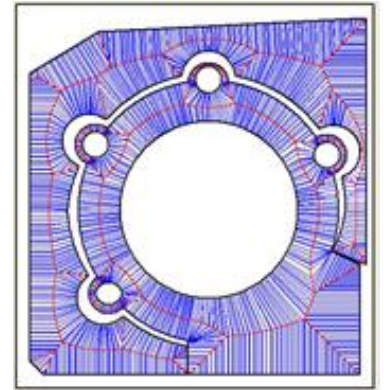
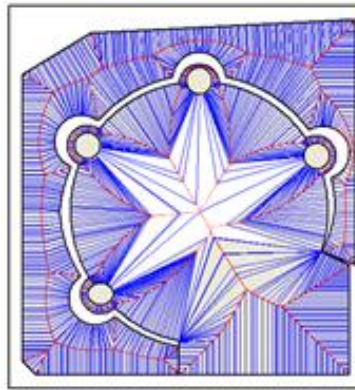
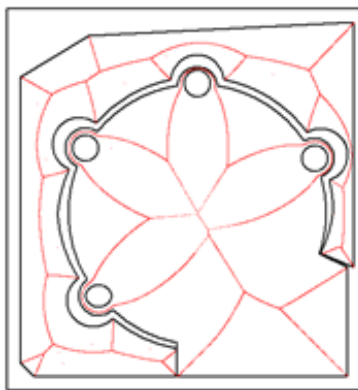




Чертеж поковки



ПК Parshtamp



ПК EQUI

Рисунок 4.15 – Моделирование КТМ для серийной поковки с вырезом

#### 4.6. Визуализация пространственной эпюры контактных давлений с помощью программного комплекса EQUI

Разработанный ПК EQUI позволяет строить ПЭКД для любых по сложности и по форме многосвязных контуров. При этом наглядность получаемого изображения обеспечивается благодаря «прозрачности» моделируемых поверхностей. Вместе с тем, удобство анализа формы ПЭКД заключается в возможности рассмотрения полученных поверхностей с разных ракурсов.

ПОС для односвязного контура, построенные в ПК EQUI и показанные с разных ракурсов, приведены на рисунке 4.16.

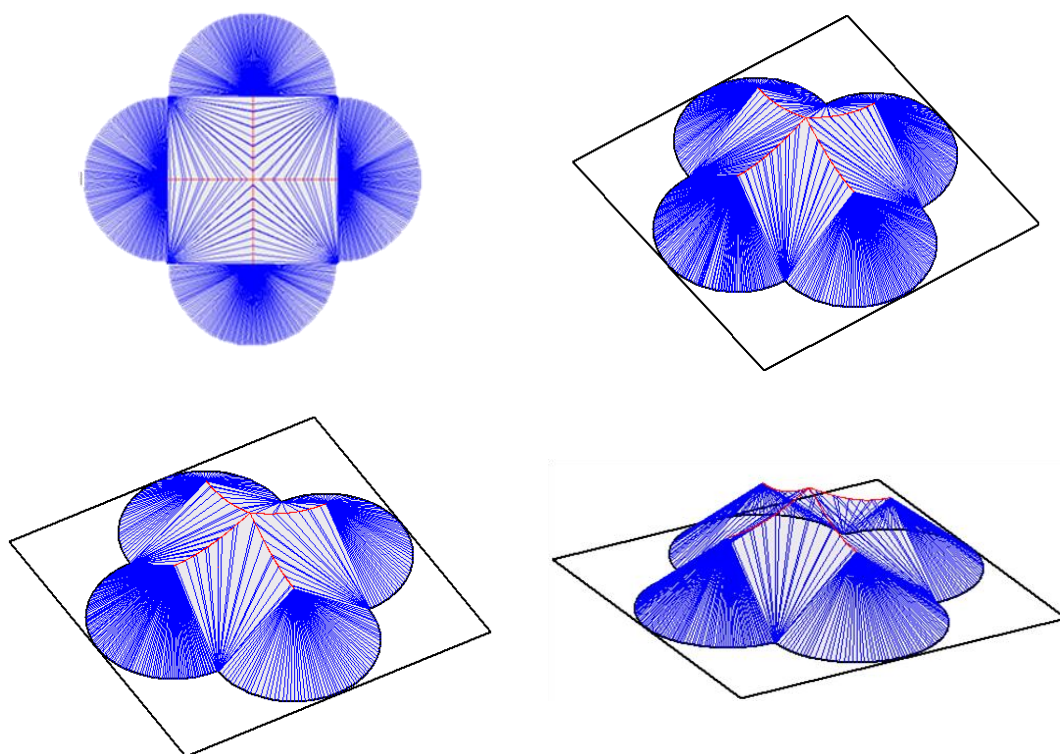


Рисунок 4.16 – Поверхности одинакового ската для односвязных контуров

В промышленных условиях реальные поковки состоят из нескольких многосвязных контуров. Разработанный ПК EQUI позволяет успешно решить задачу построения ПОС, которая в физическом смысле являются ПЭКД, и для многосвязных контуров (рисунок 4.17), и для сложных многоконтурных заготовок (рисунок 4.18).

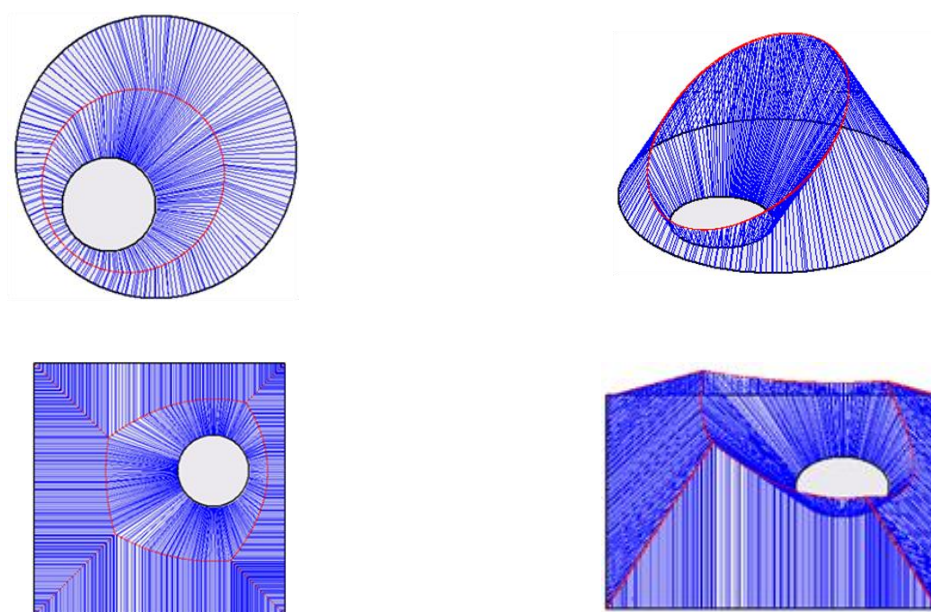


Рисунок 4.17 – Поверхности одинакового ската для многосвязных контуров



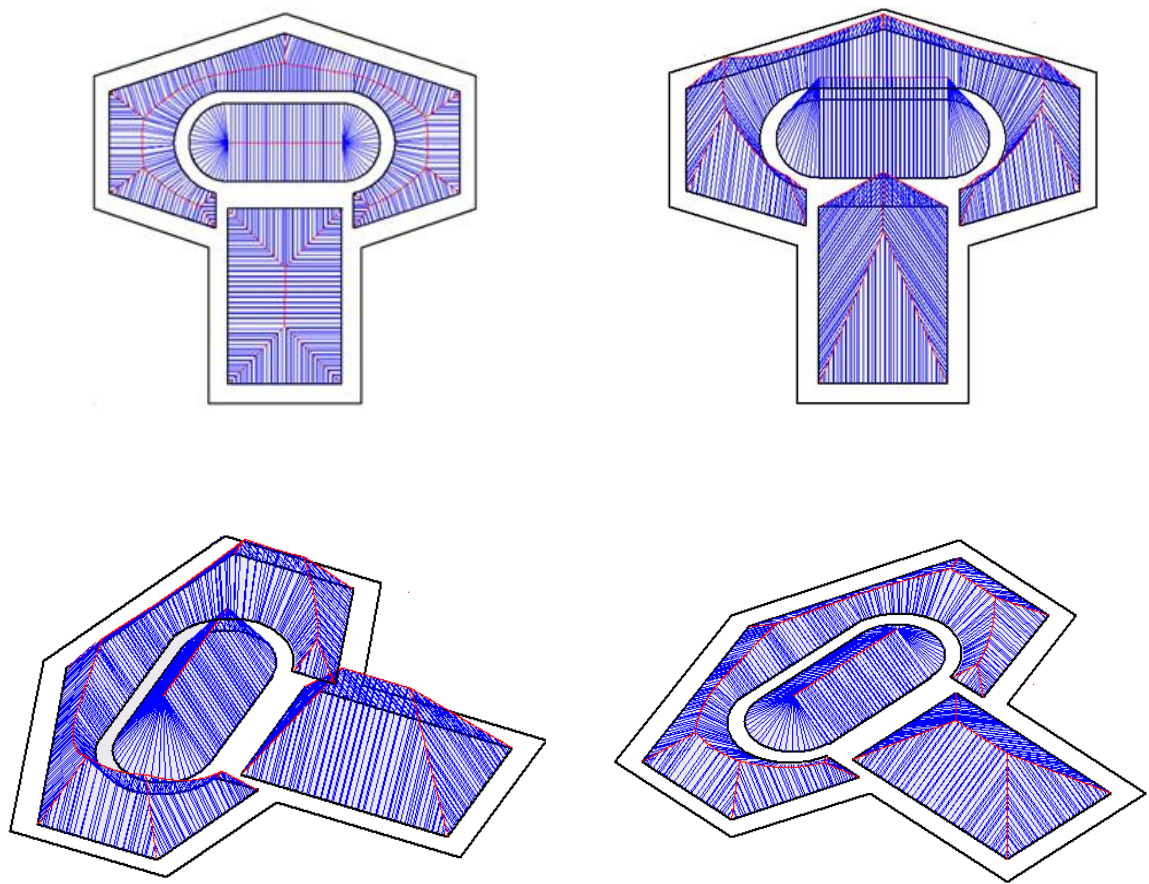


Рисунок 4.18 – Поверхности одинакового ската для серийной многоконтурной поковки

Неоспоримым преимуществом обновленного ПК EQUI является удобство анализа формы ПЭКД, заключающееся в возможности исследования полученных поверхностей с разных ракурсов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработанный программный комплекс EQUI дает возможность наглядного моделирования картины течения металла и, за счет этого, оценки неравномерности течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки. ПК EQUI может служить эффективным инструментом исследования картины течения металла при осадке плоских заготовок.

2. Программный комплекс EQUI позволяет моделировать пространственную эпюру контактных давлений, представленную в виде поверхности одинакового ската, и дает возможность визуализировать ее под любым ракурсом.

3. Задача построения поверхностей одинакового ската имеет не только прикладное, но и чисто теоретическое значение, т.к. эти поверхности представляют собой весьма малоизученный класс.

4. Разработанный программный комплекс EQUI носит специализированный характер и обладает рядом преимуществ по сравнению с универсальными комплексами, в частности, позволяет выполнять экспресс-анализ картины течения металла и быструю оценку пластического формоизменения заготовки.

## **Глава 5. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПЛОСКИХ ЗАГОТОВОК**

### **5.1. Обоснование выбора материала для физического моделирования [128]**

С целью проверки обоснованности и уточнения выдвинутых гипотез и предположений о влиянии условий трения на КСТМ, а также сравнения результатов, полученных при моделировании КТМ с помощью разработанного ПК EQUI, с реальными процессами пластического формообразования поковок, были проведены натурные эксперименты по осадке пластилиновых образцов.

Выбор пластилина в качестве материала для данных опытов обусловлен тем, что, согласно утверждениям Губкина С.И., для моделирования процессов обработки металлов и получения представлений о картине формоизменения возможно использование высокопластичных глин или различных пластичных масс [118]. Поэтому пластилин издавна признан исследователями как один из наиболее подходящих материалов для моделирования процессов пластического формообразования.

Влияние материала на формоизменение плоских заготовок исследовалось в работах Тарновского И.Я. [18]. Сравнение уширения параллелепипедов, изготовленных из различных металлов (свинец, медь, алюминий, сталь), при осадке на сухих сильно шероховатых плитах показало, что вид материала очень незначительно влияет на формоизменение и на уширение (рисунок 5.1).

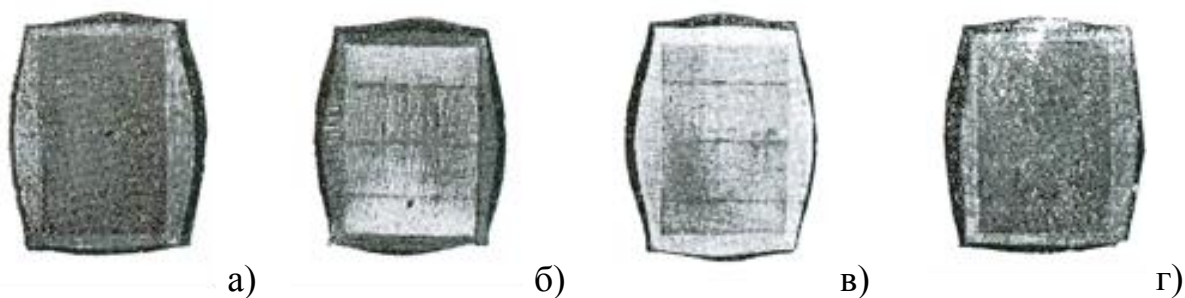


Рисунок 5.1 – Фотографии образцов из различных материалов после осадки:

а – свинец; б – медь; в – алюминий; г – сталь.

Для подтверждения правильности выбора пластилина в качестве материала для лабораторных экспериментов был проведен сравнительный анализ осадки свинцовых и пластилиновых образцов одинаковой формы и толщины (рисунок 5.2), который показал практически полное совпадение их формы.

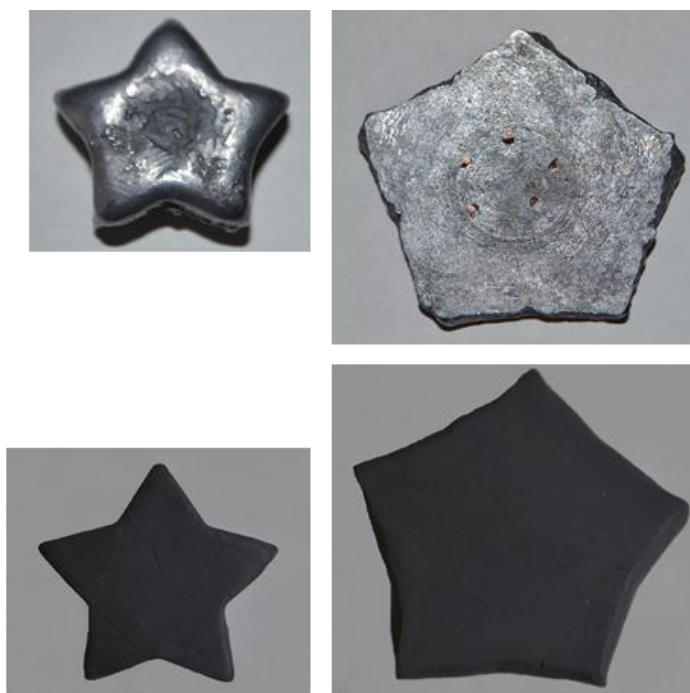


Рисунок 5.2 – Результаты лабораторного эксперимента по осадке свинцовых (вверху) и пластилиновых (внизу) образцов:

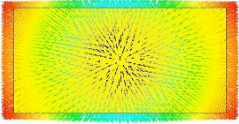
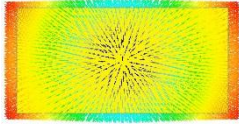
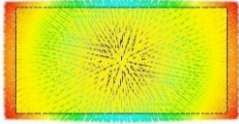
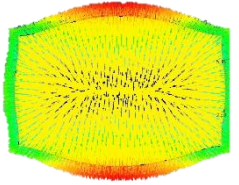
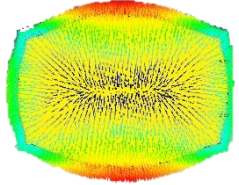
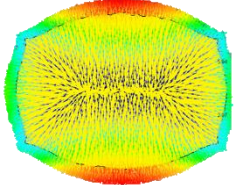
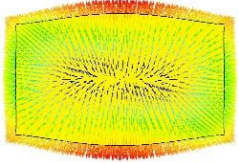
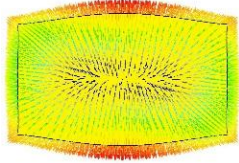
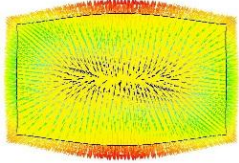
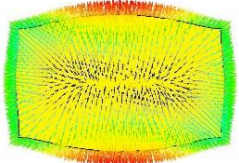
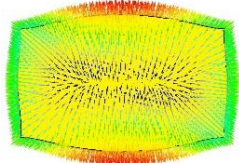
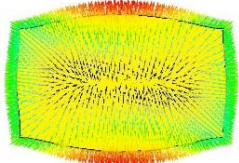
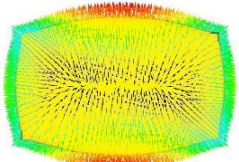
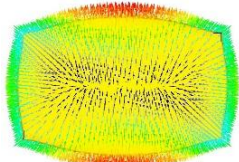
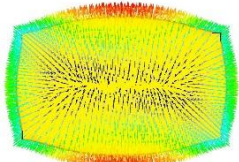
слева – до деформации, справа – после осадки

С целью более детального исследования влияния материала на формообразование было проведено моделирование с помощью ПК Deform свободной осадки прямоугольных пластин размером 20x40 мм и толщиной 4 мм из различных материалов. Образцы исследовались при степени деформации  $\varepsilon = 0,5$ . В ходе эксперимента были рассмотрены, в том числе, предельные случаи КСТМ в процессе свободной осадки пластин из различных материалов при отсутствии сил трения и при максимальном трении, когда наблюдаются радиальная и нормальная схемы соответственно, а также промежуточные случаи для различных условий трения.

Результаты моделирования осадки прямоугольных образцов из разных материалов, при различных условиях трения, проведенного с помощью ПК Deform,

подтвердило сделанные ранее выводы о том, что материал очень незначительно влияет на формоизменение (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Влияние материала на формоизменение заготовки

Материал Фактор трения	Алюминиевый сплав АМц	Сталь 35	Идеально пластичный материал
0,001 Радиальная схема			
0,999 Нормальная схема			
0,25			
0,5			
0,75			

Для уточнения КСТМ, а также для более корректного исследования влияния материала и условий трения на формоизменение плоских образцов было проведено сравнение результатов компьютерного моделирования и лабораторных экспериментов на пластилине. Компьютерное моделирование осуществлялось при помощи ПК Deform. В ходе лабораторного эксперимента проводилось свободное осаживание прямоугольного пластилинового параллелепипеда с геометрическими размерами: высота  $H = 20$  мм, длина  $L = 40$  мм, ширина  $B = 20$  мм. В виртуальном эксперименте использовались образцы с такими же размерами из алюминия Aluminium 3003 (соответствует сплаву АМц) при температуре заготовки  $420^{\circ}\text{C}$ , температуре штампа  $400^{\circ}\text{C}$ , температуре окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$ , с учетом теплообмена со средой и инструментом.

Для удобства сравнения результатов компьютерного и физического моделирования сопоставление проводилось при одинаковой степени деформации  $\varepsilon = 0,7$ . Условия трения в виртуальном и лабораторном экспериментах также максимально схожи. На рисунке 5.3 приведены результаты виртуальных экспериментов в Deform и фотографии лабораторных экспериментов на пластилиновых образцах при различных условиях трения.

На рисунках 5.3, а и 5.3, б изображены исходные параллелепипеды ( $\varepsilon = 0$ ). Форма образцов после осадки в виртуальном и лабораторном экспериментах при незначительном трении (ПК Deform позволяет точно задавать показатель трения, в данном случае 0,1) показана на рисунках 5.3, в и 5.3, г соответственно. В лабораторном эксперименте для уменьшения трения в качестве смазки использовалось машинное масло. Как видим, и при компьютерном моделировании, и при физическом образец после деформации сохранил форму, близкую к прямоугольнику, что соответствует радиальной схеме Тарновского И.Я.

На рисунках 5.3, д и 5.3, е показаны результаты виртуального и лабораторного экспериментов соответственно при максимальном трении (в Deform – 0,9). В лабораторном эксперименте осадка проводилась между двумя неполированными металлическими плитами без смазки. На рисунке видно, что и при максимальном



трении результаты компьютерного моделирования в Deform и лабораторного эксперимента также практически полностью совпадают. В этом случае КСТМ соответствует нормальной схеме Головина А.Ф.: прямоугольный образец после осадки приобрел форму эллипса.

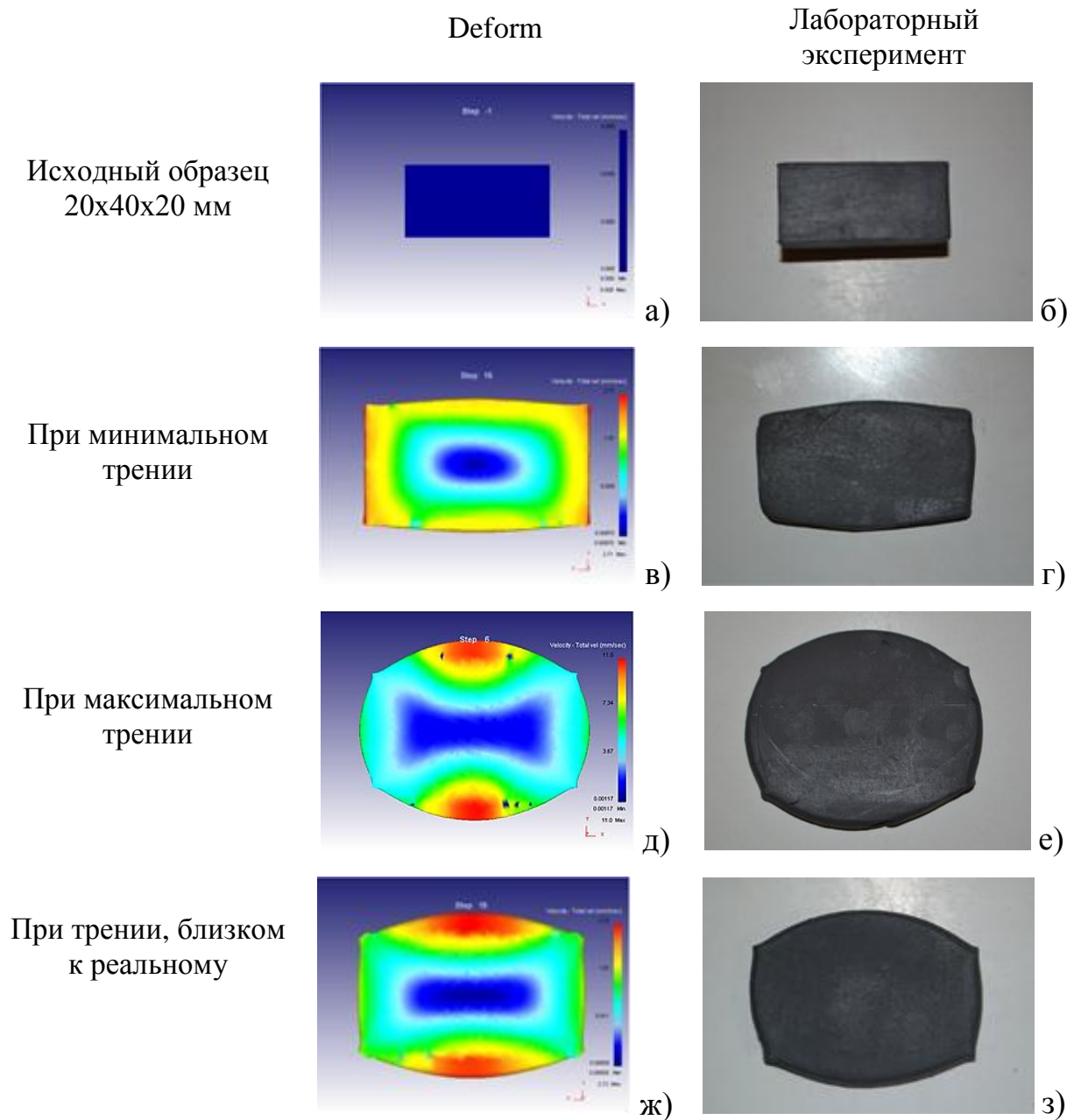


Рисунок 5.3 – Компьютерное и физическое моделирование при различных условиях трения

Результаты экспериментов при реальных условиях трения (в Deform – 0,5), приведены на рисунках 5.3, ж и 5.3, з. В этом случае образцы осаживались на

шлифованных плитах, а для смазки использовалась мука. Для таких условий трения, которые можно считать приближенными к реальным, результаты виртуального и лабораторного экспериментов также совпадают.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет утверждать:

- во-первых, в соответствии с экспериментами Тарновского И.Я. род металла не влияет на формоизменение заготовки;

- во-вторых, сравнение результатов лабораторных экспериментов на свинцовых и пластилиновых образцах показывает, что формообразование пластилина аналогично формообразованию металла;

- в-третьих, результаты виртуального эксперимента дают практически полное совпадение картины течения металла и формоизменения плоского образца при любой степени деформации;

- в-четвертых, осаженные образцы в виртуальном эксперименте на металле и лабораторном эксперименте на пластилине совпадают по форме при любых условиях трения.

Таким образом, использование пластилина в качестве материала для моделирования процессов формообразования в ОМД вполне оправдано, пластилин к тому же дешевле, удобнее и доступнее любого металла.

## **5.2. Экспериментальное подтверждение принципа наименьшего периметра**

Согласно принципу наименьшего периметра, сформулированному еще в начале прошлого века немецким ученым Карлом фон Зоббе, любая форма поперечного сечения призматического тела при осадке с наличием контактного трения в пределе стремится принять форму круга. В литературных источниках имеется множество указаний на эксперименты Зоббе К. [5], Тарновского И.Я. [17, 18], Березкина В.Г. [142] и др., подтверждающих этот принцип.

Активные исследования в этом направлении проводились группой советских ученых под руководством Тарновского И.Я. В экспериментах Тарновского



И.Я. металлические параллелепипеды осаживались при различных условиях внешнего трения (рисунок 5.4). Как видно из этой фотографии, наибольшую неравномерность деформации имеет образец на рисунке 5.4, а, осаженный на сильно шероховатых чугуновых плитах. Образец на рисунке 5.4, б, осаженный на чугуновых гладких плитах, имеет несколько меньшую неравномерность деформации. И еще несколько меньше эта неравномерность проявилась у образца на рисунке 5.4, в, осаженого на полированных стальных плитах. Образец на рисунке 5.4, г был осажен на стальных полированных плитах со смазкой смесью графита с маслом. Это резко изменило характер деформации образца. Неравномерность деформации почти отсутствует, небольшая выпуклость одной из боковых сторон объясняется неравномерной смазкой поверхности образца [18].

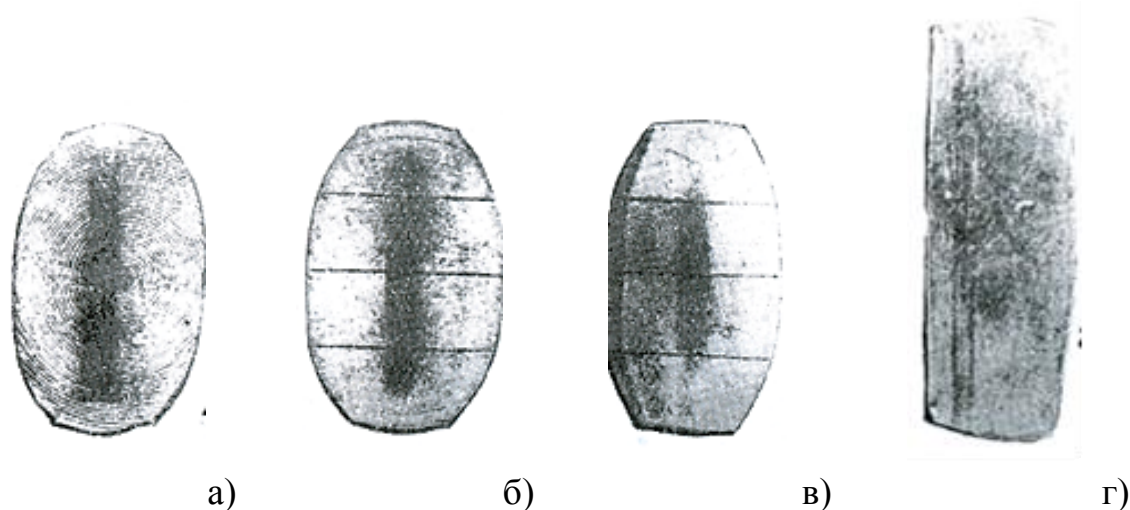


Рисунок 5.4 – Эксперименты группы Тарновского И.Я. по осадке металлических образцов при различных условиях внешнего трения

В результате этих экспериментов было доказано, что прямоугольные в плане заготовки в ходе осадки преобразуются в эллипсовидные. Для того чтобы превратиться в круглые, им не хватает лишь большей степени деформации. Еще одной, возможной и вполне вероятной причиной «непревращения» прямоугольного сечения в круглое, может служить весьма незначительная сила трения, которая обычно вызвана двумя условиями: обильной смазкой или хорошей полировкой поверхностей деформирующего инструмента.

В проведенных опытах (рисунки 5.3, 5.4) четко прослеживается влияние внешнего трения на схему течения материала. Рассмотренные в п. 5.1 случаи приближаются к идеальным, так как на практике невозможно обеспечить коэффициент трения, равный 0 или 1. Таким образом, в реальных условиях при коэффициентах трения в интервале  $0,4 \div 0,6$  наиболее вероятной является некоторая промежуточная КСТМ, переходная от радиальной схемы Тарновского, к нормальной схеме Головина. Такую схему можно считать «псевдонормальной» (рисунок 5.5).

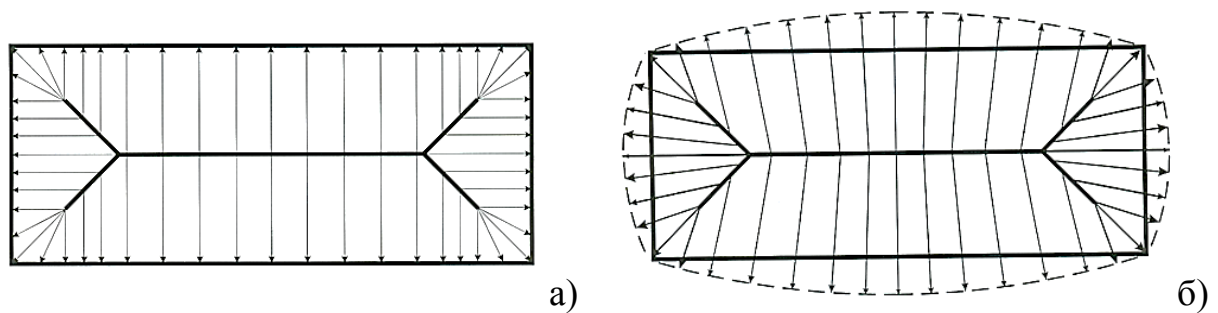


Рисунок 5.5 – Реальная кинематическая схема течения металла

Указанная схема течения полностью подтверждается представленными лабораторными и виртуальными экспериментами и не имеет противоречий, присущих нормальной и радиальной КСТМ. На начальном этапе деформирования имеет место так называемая нормальная КСТМ, при которой течение металла происходит по нормальям к действительному контуру заготовки. Именно такая схема положена в основу разработанного ПК EQUI. При малой степени деформации течение металла подчиняется схеме, приведенной на рисунке 5.5, а. Далее, при увеличении степени деформации, движение частиц металла также происходит по нормальям, но уже не к действительному, а к условному контуру, который представляет собой дугу некоторой окружности. При этом поперечное сечение прямоугольного образца постепенно приобретает форму эллипса (рисунки 5.6, б-д). КСТМ приобретает вид, приведенный на рисунке 5.5, б, а эллипс в сечении образца при большой степени деформации приобретает форму круга (рисунок 5.6, е).

а) Исходный образец,  $\varepsilon = 0$ б)  $\varepsilon = 0,2$ в)  $\varepsilon = 0,4$ г)  $\varepsilon = 0,6$ д)  $\varepsilon = 0,7$ е)  $\varepsilon = 0,85$ 

Рисунок 5.6 – Постадийная осадка пластилинового образца  
с исходными размерами 20x40x20 мм

И в виртуальных экспериментах при помощи ПК Deform, и в лабораторных экспериментах на пластилиновых или металлических образцах даже при малых степенях деформации наблюдается появление «ушек» в угловых зонах. В рамках общепринятых нормальной и радиальной КСТМ их появление объяснить трудно. Немецкий ученый Карл фон Зоббе [5] для устранения этого эффекта в своих экспериментах использовал исходные заготовки со скругленными углами, в этом случае «ушки» не образуются.

Предлагаемая реальная КСТМ (рисунок 5.5) позволяет объяснить появление «ушек» в угловых зонах деформируемого образца. В соответствии с такой схемой в угловых зонах заготовки в процессе деформации образуются области радиального течения, тогда как в остальных частях материал течет по нормальям к условному контуру. В результате вблизи углов имеет место течение материала вдоль ЛРТМ, что и определяет появление «ушек».

Все указанные выше эксперименты проводились на цилиндрических и призматических образцах с квадратным или прямоугольным основанием. С целью проверки применимости принципа наименьшего периметра к непризматическим заготовкам и заготовкам призматической формы, имеющим в основании произвольный многоугольник, был проведен лабораторный эксперимент по осадке пластилиновых плоских заготовок.

Образцы, имеющие в основании многоугольники произвольной формы (рисунок 5.7), осаживались поэтапно до степени деформации  $\varepsilon = 0,2; 0,4; 0,6; 0,85$ . Исходная толщина заготовки равнялась 40 мм, конечная – 6 мм. Для предотвращения прилипания пластилина к рабочим поверхностям пресса, в условиях необходимости обеспечения достаточно большого коэффициента трения, применялась полиэтиленовая пленка толщиной 15 мкм. Смазка не использовалась.

Следует заметить, что в тех местах контура исходной заготовки, где угол между соседними участками больше  $90^\circ$ , после деформации «ушки» гораздо менее выражены или не образуются вовсе. Такая же ситуация наблюдается, если в исходной заготовке углы выполнить скругленными.

Непризматические образцы (рисунок 5.8) осаживались поэтапно также до степени деформации  $\varepsilon = 0,2; 0,4; 0,6; 0,85$ . Начальная и конечная толщина заготовок, а также условия проведения эксперимента аналогичны.

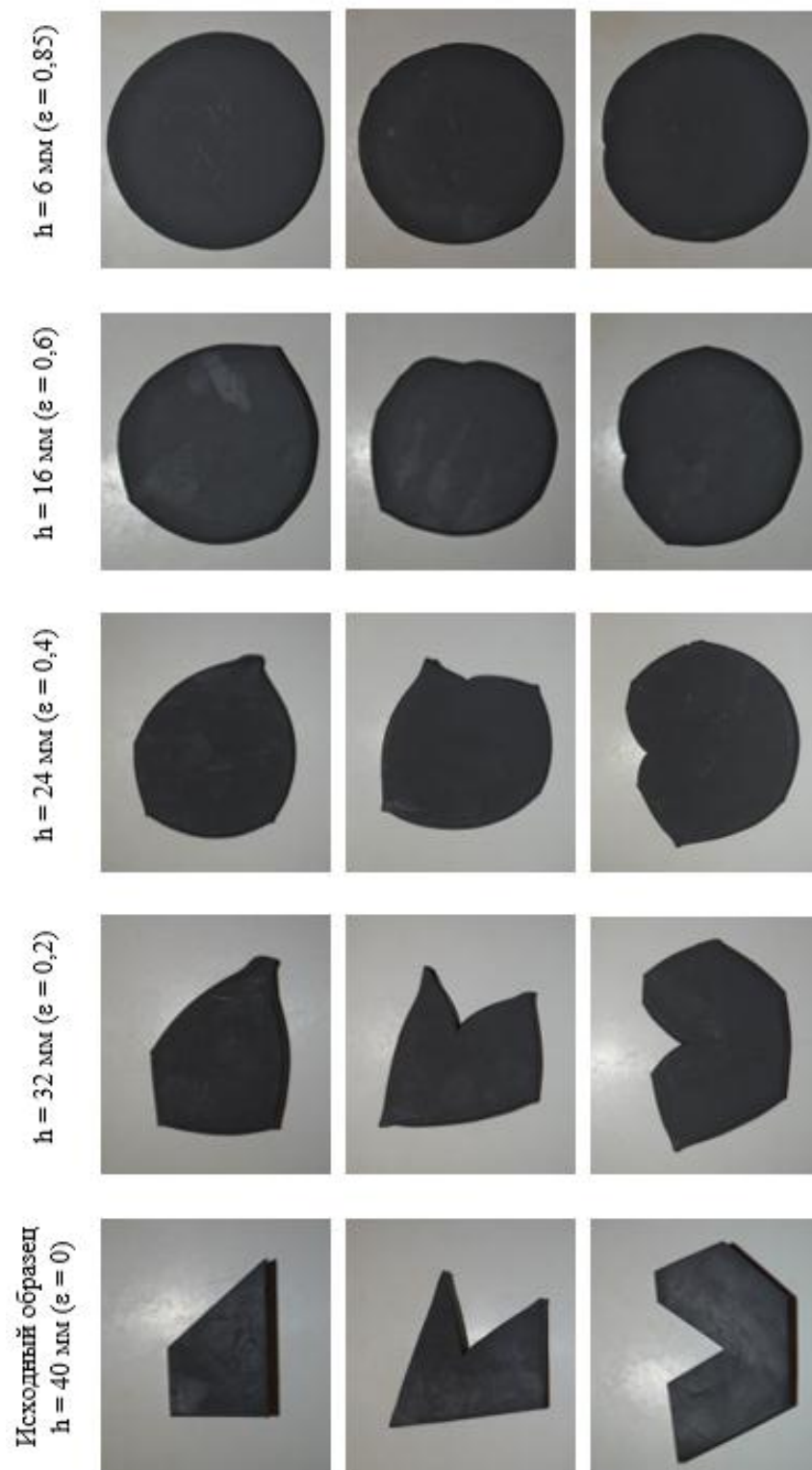


Рисунок 5.7 – Лабораторный эксперимент по осадке пластилиновых образцов, имеющих в основании многоугольник произвольной формы

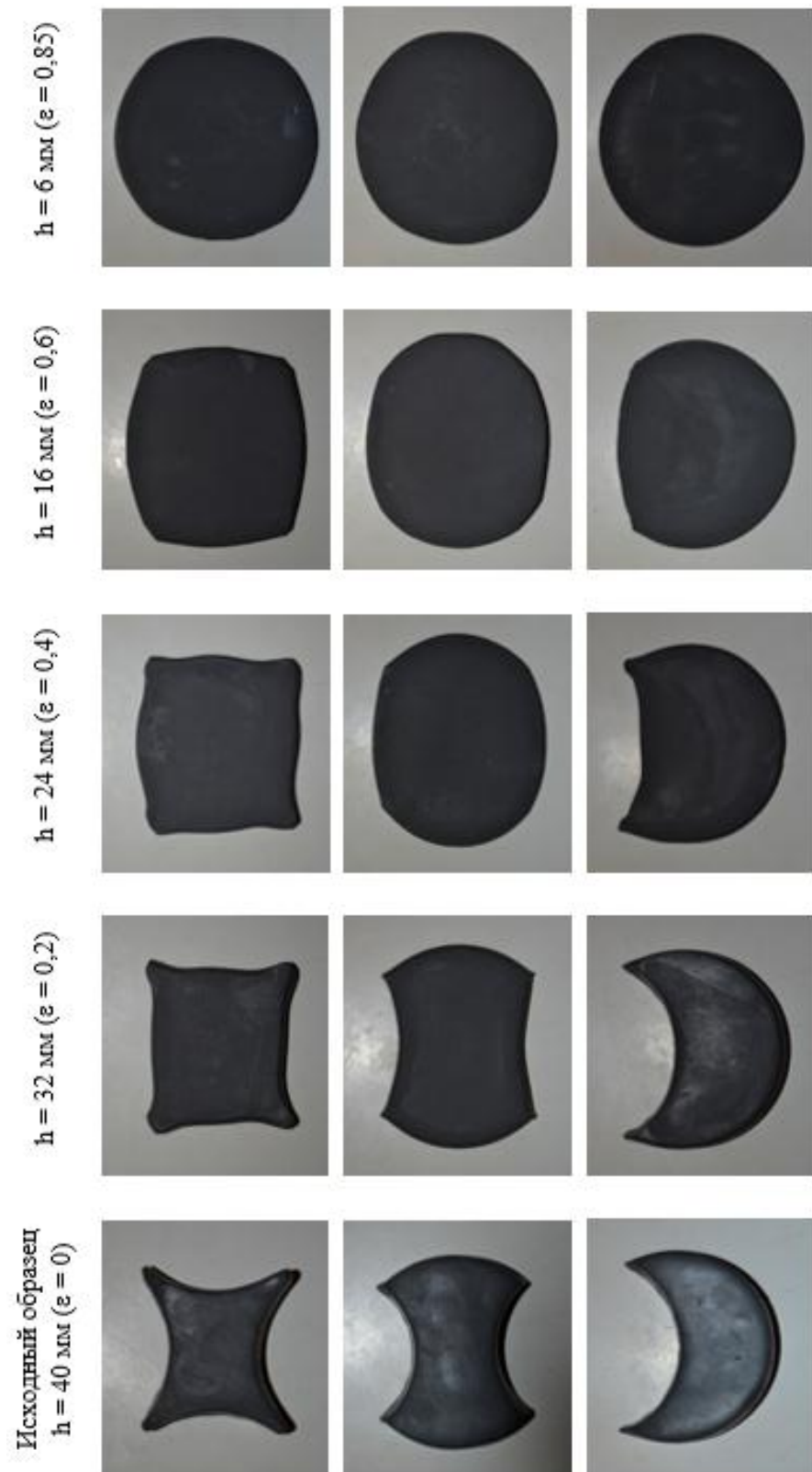


Рисунок 5.8 – Лабораторный эксперимент по осадке пластилиновых непрямоугольных образцов



Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что при достаточно большой степени деформации и наличии значительного контактного трения в круг превращаются сечения не только симметричных цилиндрических и призматических в плане заготовок, но и поперечные сечения непризматических образцов, а также образцов, имевших до осадки форму любого многоугольника (в том числе и невыпуклого).

Это утверждение содержится в различных литературных источниках и со ссылкой на экспериментальные исследования кажется не требующим доказательства. Однако в подавляющем большинстве эксперименты проводились на прямоугольных образцах. Для образцов произвольной формы, формоизменение которых не выглядит очевидным, не удалось найти экспериментального подтверждения принципа наименьшего периметра.

### 5.3. Прогнозирование формоизменения заготовки на основе моделирования картины течения металла [143]

С целью апробации разработанного ПК EQUI было проведено моделирование КТМ при осадке плоских заготовок, имеющих форму «звезда» и «четырёхлистник» (рисунок 5.9).

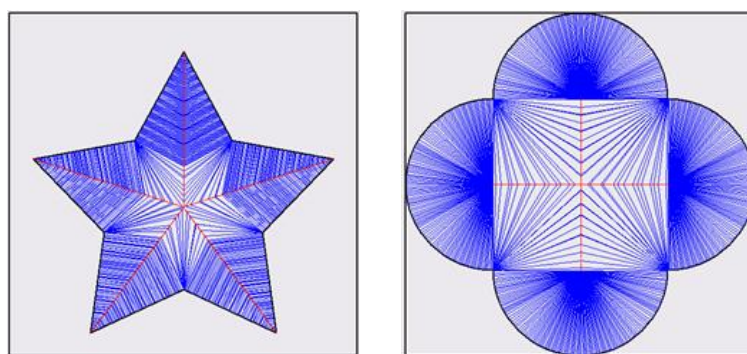


Рисунок 5.9 – Картина течения металла для односвязных контуров:  
синим цветом обозначены ЛТ, а красным – ЛРТМ

Выбор формы исходных заготовок в виде «звезды» и «четырёхлистника» обусловлен необходимостью проверки моделей КТМ, полученных с помощью ПК EQUI, на разных контурах – как прямолинейных, так и криволинейных (как призматических, так и непризматических).

Анализ КТМ показывает, что наиболее интенсивного течения материала следует ожидать во внутренних угловых зонах. Это объясняется большим притоком материала в эти точки, т.к. в них сходится пучок ЛТ, в то время как вдоль контура с гладкими участками ЛТ распределены равномерно, и никаких «всплесков» в распределении потоков материала по плоскости контакта не прогнозируется. Тогда, в соответствии с рассмотренными гипотезами и положениями, можно предположить, что заготовка в форме «звезды» в ходе деформации сначала превращается в выпуклый многоугольник, а затем должна по форме приближаться к кругу.

Из анализа КТМ для заготовки в форме «четырёхлистника» следует, что в ходе деформации «четырёхлистник» также должен по форме превращаться в круг ввиду того, что внутренние угловые зоны и в этом случае формируются наиболее интенсивно. Это объясняется тем, что ЛТ, как и в предыдущем случае, также сходятся в угловых зонах, и именно здесь следует ожидать наиболее интенсивного притока материала и формирования этих зон, тогда как на скругленных участках ЛТ разрежены и приток материала здесь минимален.

С целью сравнения результатов моделирования в ПК EQUI с реальными процессами пластической деформации, был проведен натурный эксперимент по осадке пластилиновых плоских заготовок, также имеющих форму «звезды» и «четырёхлистника».

Образцы осаживались поэтапно до степени деформации:  $\varepsilon = 0,33, 0,54, 0,75$  и  $0,83$  (рисунок 5.10). Начальная толщина заготовки равнялась 24 мм, конечная – 4 мм. Образцы деформировались между жесткими гладкими плоскими поверхностями. Смазка не применялась, однако для предотвращения прилипания пластилина к деформирующим поверхностям пресса использовалась в качестве прокладки полиэтиленовая пленка. Осадка производилась на ручном прессе.



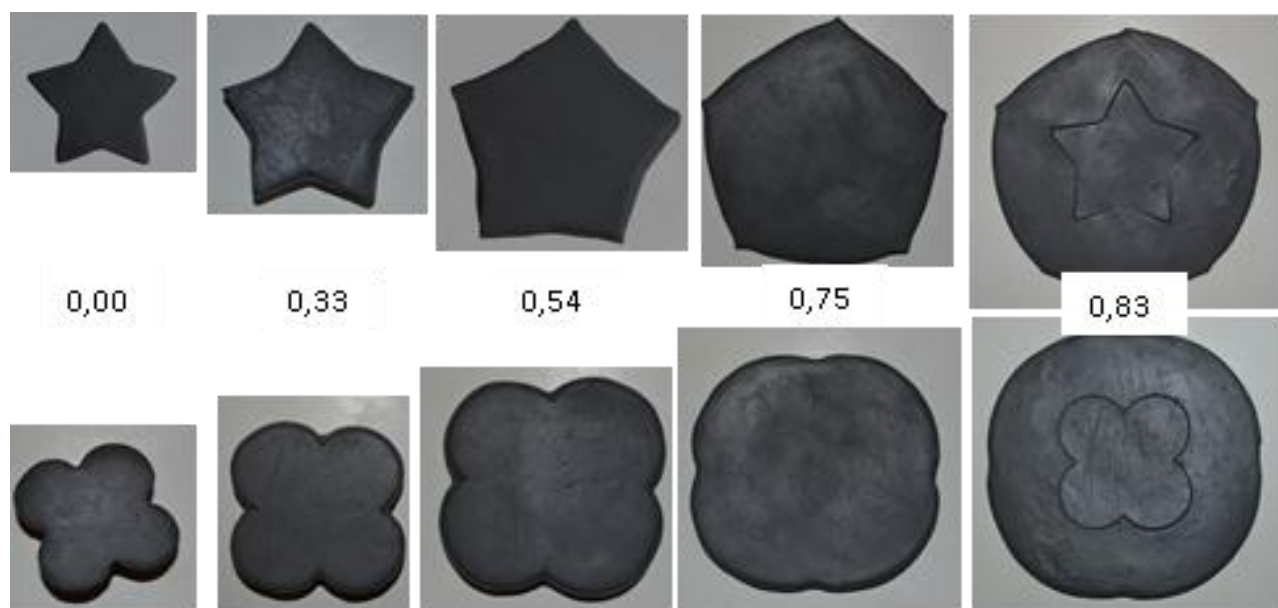


Рисунок 5.10 – Постадийная осадка пластилиновых образцов в форме «звезда» и «четырёхлистник»

Как видим, внутренние угловые зоны заготовок формируются наиболее интенсивно, и с увеличением степени деформации каждая из них на виде в плане постепенно превращается в круг, что вполне соответствует рассмотренным принципам и предположениям о формообразовании заготовок, сделанным на основании компьютерного моделирования с помощью ПК EQUI.

Таким образом, анализ результатов компьютерного моделирования КТМ в ПК EQUI и лабораторных экспериментов по осадке пластилиновых образцов, позволяет сделать вывод, что прогноз верен.

#### **5.4. Независимость формы сечения деформируемой плоской заготовки от толщины образца**

Лабораторные эксперименты преследуют цель не только подтвердить результаты теоретических исследований, но и служат основой для новых теоретических выводов.

В п. 2.5 были получены графические и аналитические зависимости, указывающие, что толщина заготовки не оказывает влияния на ее формоизменение. Та-

ким образом, т.к. площадь заготовки зависит только от степени деформации, то при одинаковой степени деформации площади «тонкой» и «толстой» заготовок должны быть идентичны, что является следствием закона постоянства объема.

То есть площадь образца в ходе деформирования не зависит от начальной толщины заготовки, а зависит только от степени деформации. Тогда, если площади двух плоских образцов, деформируемых между жесткими плоскопараллельными плитами, равны до осадки, то они должны быть равны и после осадки при одинаковой степени деформации. Данное утверждение является следствием закона постоянства объема, т.к. в ходе деформирования не меняются плотность материала и вес образца.

Действительно, исходя из закона постоянства объема, имеем:

$$V_1 = V'_1,$$

$$V_2 = V'_2,$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – начальные объемы первой и второй заготовок соответственно;  
 $V'_1$  и  $V'_2$  – объемы первой и второй заготовок соответственно после деформации.

Следовательно,

$$S_1 \cdot h_1 = S'_1 \cdot h'_1, \quad (5.1)$$

$$S_2 \cdot h_2 = S'_2 \cdot h'_2, \quad (5.2)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – начальная площадь первой и второй заготовок соответственно;  
 $S'_1$  и  $S'_2$  – площадь первой и второй заготовок соответственно после деформации;  
 $h_1$  и  $h_2$  – начальная толщина первой и второй заготовок соответственно;  
 $h'_1$  и  $h'_2$  – толщина первой и второй заготовок соответственно после деформации.

Разделив (5.1) на (5.2), получим:

$$\frac{S_1 \cdot h_1}{S_2 \cdot h_2} = \frac{S'_1 \cdot h'_1}{S'_2 \cdot h'_2}.$$

Поскольку исходные образцы имеют одинаковую площадь, то есть  $S_1 = S_2$ , то

$$\frac{h_1}{h'_1} = \frac{h_2}{h'_2} \cdot \frac{S'_1}{S'_2}.$$

Так как образцы рассматриваются при одинаковой степени деформации, очевидно

$$\varepsilon = \frac{h_1}{h'_1} = \frac{h_2}{h'_2}.$$

Следовательно,

$$S'_2 = S'_1.$$

Для подтверждения того, что и форма деформируемого образца не зависит от начальной толщины заготовки были проведены лабораторные эксперименты по осадке «толстых» и «тонких» образцов.

Качественная картина наглядно продемонстрирована на рисунке 5.11, а количественная оценка проведена с помощью изображения полученных образцов в натуральную величину на масштабной-координатной бумаге (рисунки 5.12 и 5.13).

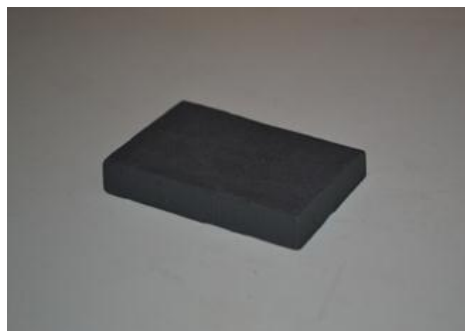
Площадь «толстого» образца при  $\varepsilon = 0,5$  составляет 5330 мм<sup>2</sup>, площадь «тонкого» при той же степени деформации – 5570 мм<sup>2</sup>. Сравнение результатов показывает, что расхождение размеров сечений толстого и тонкого образцов составляет 4,3%.

При  $\varepsilon = 0,75$  площадь «толстого» образца 9524 мм<sup>2</sup>, площадь «тонкого» – 9838 мм<sup>2</sup>. Расхождение составляет менее 4%.

Таким образом, площадь и форма заготовки в ходе деформирования не зависят от ее начальной толщины. Независимость формы следует из проведенных лабораторных экспериментов, а независимость площади – из полученных аналитических соотношений.



40x60x40 мм



8x60x40 мм

а) исходные образцы,  $\varepsilon = 0$ 

30x70x52,5 мм



6x74x58 мм

б)  $\varepsilon = 0,25$ 

20x84x69 мм



4x86x73 мм

в)  $\varepsilon = 0,5$ 

10x112x105 мм



2x116x108 мм

г)  $\varepsilon = 0,75$ 

Рисунок 5.11 – Осадка «толстого» и «тонкого» образцов



20x84x69 мм

$S = 5330 \text{ мм}^2$



4x86x73,5 мм

$S = 5570 \text{ мм}^2$

Рисунок 5.12 – «Толстый» и «тонкий» образцы в натуральную величину  
при степени деформации  $\varepsilon = 0,5$



10x112x105 мм;  $S = 9524 \text{ мм}^2$



2x116x108,5 мм;  $S = 9838 \text{ мм}^2$

Рисунок 5.13 – «Толстый» и «тонкий» образцы в натуральную величину  
при степени деформации  $\epsilon = 0,75$

### **5.5. Аprobация разработанной методики и программного комплекса EQUI в промышленных условиях**

Разработанная методика и компьютерное моделирование формообразования поковок рассматриваемого класса с помощью ПК EQUI базируется на закономерностях течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки, основой для которых служат исследования КТМ по полотну заготовки. КТМ определяет распределение потоков металла на плоскости контакта и в том случае, когда деталь содержит ребра жесткости или иные конструктивные элементы (например, бобышки или вырезы).

С целью апробации разработанного ПК EQUI и обоснования рекомендаций по улучшению технологии производства промышленной поковки, а также для иллюстрации основных закономерностей формоизменения и методики построения КТМ выполнено компьютерное моделирование формообразования штампованной профильной поковки, представленной на рисунке 5.14. Результаты моделирования приведены на рисунке 5.15 (красным цветом показаны ЛРТМ, синим – ЛТ).

В общих чертах технологию изготовления данной поковки можно описать следующим образом. В качестве исходной заготовки используется прутки диаметром 110 мм из сплава АК6Т1. Перед штамповкой выполняется горячая осадка прутка до плоской заготовки толщиной 25 мм. С целью экономии ресурсов в штампе получают одновременно две детали. Для штамповки поковок вырезают заготовку в виде трапеции в плоскости. На первом переходе при температуре 400°С выполняется предварительная штамповка. Затем подрезаются припуски и на втором переходе производится штамповка в окончательном штампе. Впоследствии отштампованную поковку разрезают на две детали, производят старение и гальваническую обработку.





Анализ чертежа готовой поковки показывает, что для ее полного формирования необходима большая степень деформации ( $\varepsilon = 0,8 \div 0,9$ ) и значительные усилия прессы, что обуславливает ее штамповку в два перехода. Для снижения усилий прессы и управления течением металла предлагается применение такого технологического приема, как вырез. Для экспресс-анализа целесообразности применения выреза в поковке, представленной на рисунке 5.14, выполнено моделирование КТМ при наличии круглого выреза. В ходе деформации отверстие должно уменьшаться в размерах, пока окончательно не «захлопнется».

Результаты постадийного моделирования КТМ на различных стадиях осадки заготовки с технологическим вырезом, полученные с помощью разработанного ПК EQUI, приведены на рисунке 5.16. В соответствии с результатами моделирования отверстие в заготовке уменьшается и достигает минимального диаметра. При этом форма зоны смещаемого металла с полотна заготовки в отверстие, за счет чего оно и уменьшается, остается практически подобной себе на всех стадиях деформирования.

В соответствии с законом постоянства объема «смещаемый объем» за одну стадию осадки  $\Delta h = h_i - h_{i+1}$  равен приросту объема отверстия:

$$(S_i^{\text{ЛР}} - S_i^{\text{ОТВ}}) \cdot (h_i - h_{i+1}) = (S_i^{\text{ОТВ}} - S_{i+1}^{\text{ОТВ}}) \cdot h_{i+1}, \quad (5.3)$$

где  $S_i^{\text{ЛР}} - S_i^{\text{ОТВ}} = S_i^{\text{СМ}}$ ,

$S_i^{\text{СМ}}$  – площадь смещаемого с полотна заготовки в отверстие металла на  $i$ -й стадии осадки;

$S_i^{\text{ЛР}}$  – площадь заготовки, ограниченная линиями раздела течения металла на  $i$ -й стадии осадки;

$S_i^{\text{ОТВ}}, S_{i+1}^{\text{ОТВ}}$  – площадь технологического выреза (отверстия) на  $i$ -й и на следующей стадиях осадки соответственно;

$h_i, h_{i+1}$  – толщина заготовки на  $i$ -й и следующей стадиях осадки соответственно (рисунок 5.17).

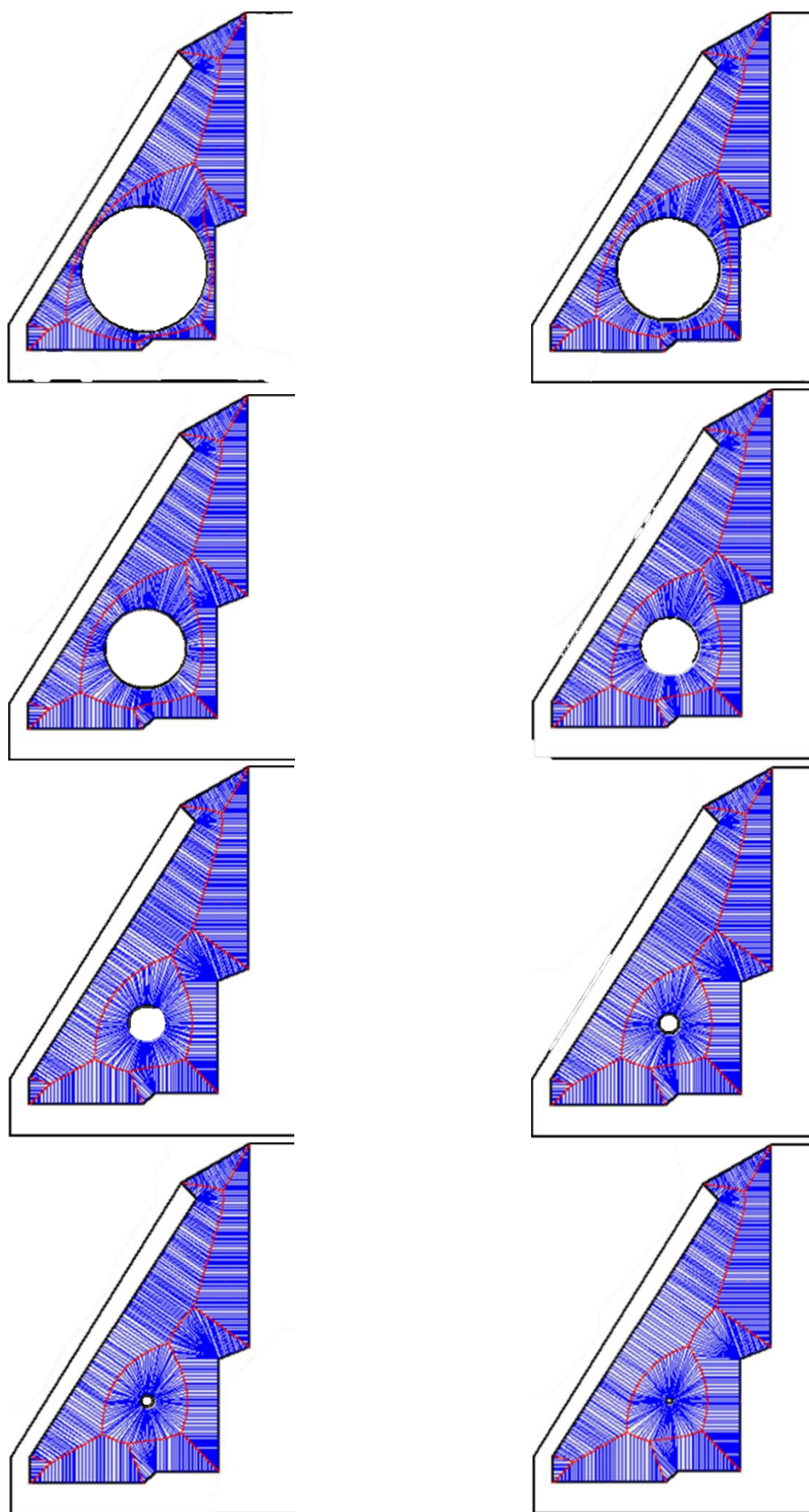


Рисунок 5.16 – Результаты моделирования КТМ на различных стадиях осадки

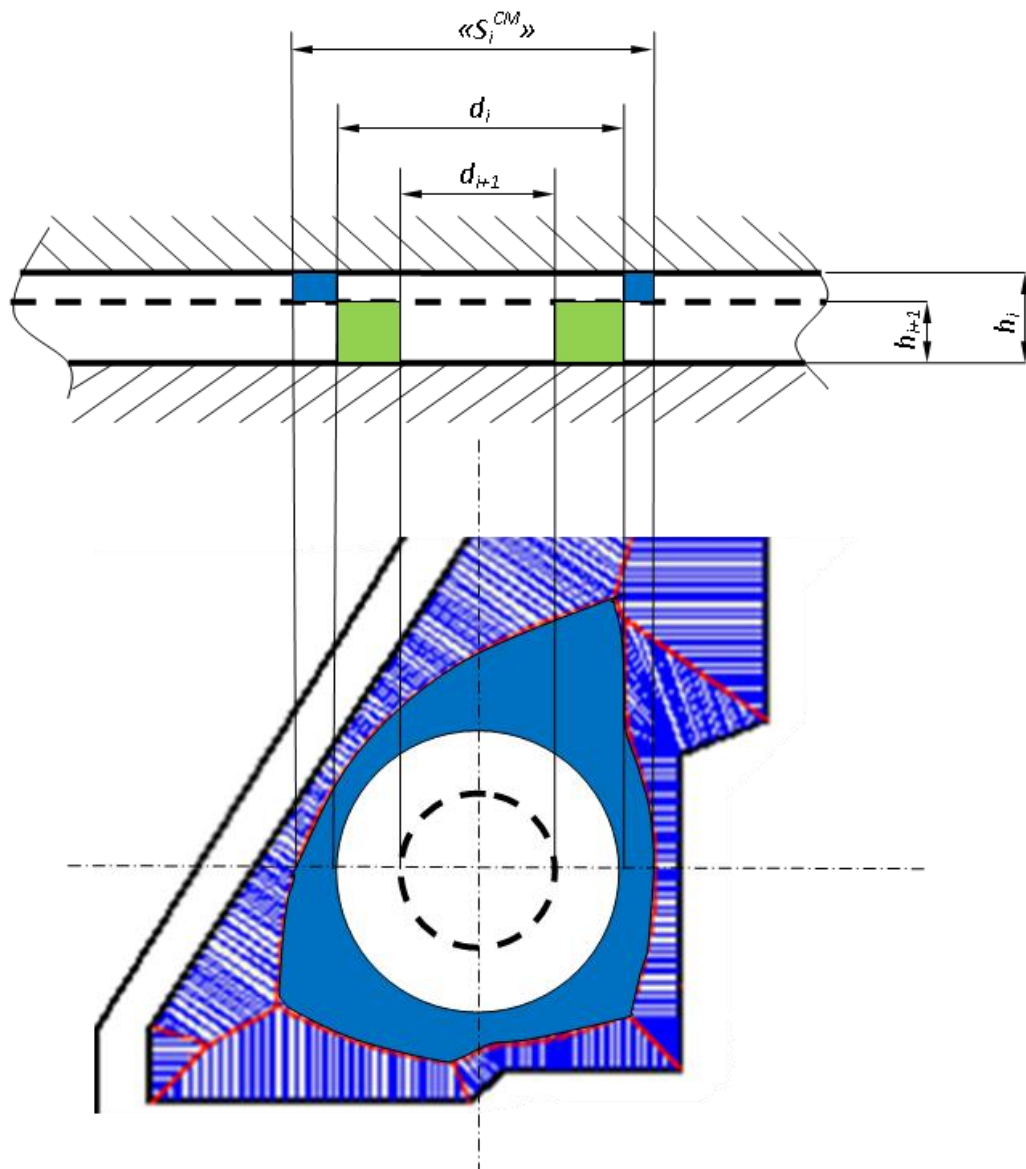


Рисунок 5.17 – К расчету формоизменения промышленной заготовки

Исходя из формулы (5.3), можно получить соотношение для расчета толщины детали на любой стадии осадки:

$$h_{i+1} = \frac{(S_i^{LP} - S_i^{OTB}) \cdot h_i}{S_i^{LP} - S_{i+1}^{OTB}}. \quad (5.4)$$

На основании результатов моделирования КТМ, представленных на рисунке 5.16, получены числовые значения площади отверстия (технологического выреза) и соответствующих им «смещаемых» площадей (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Зависимость «смещаемой» площади от диаметра технологического выреза

№ стадии	Диаметр отверстия $d$ , мм	Площадь отверстия $S^{\text{отв}}$ , мм <sup>2</sup>	«Смещаемая» площадь $S^{\text{см}}$ , мм <sup>2</sup>
1	58	2641	1626
2	48	1809	1804
3	38	1134	1859
4	28	615	1823
5	18	254	1667
6	8	50	1488
7	5	20	1397
8 (конечная)	2	3	1319

Поскольку в готовой детали отверстие не предусмотрено, то необходимо обеспечить условия, при которых это отверстие гарантированно «захлопнется» до окончания штамповки. Тогда нужно рассчитать толщину заготовки, при которой отверстие будет минимальным ( $d_{\text{кон}} = 2$  мм). Мы не можем производить расчеты для  $d_{\text{кон}} = 0$  мм, т.к. в этом случае КТМ кардинально перестраивается (см. рисунок 5.15).

В соответствии с приведенной технологией изготовления толщина исходной заготовки равна 25 мм.

В расчетах принимаем первой стадией  $h_i = 25$  мм, а следующей – конечную, когда отверстие уменьшится до  $d_{\text{кон}} = 2$  мм.

Подставляя численные значения из таблицы 5.2, получим:

$$h_{\text{кон}} = \frac{1626 \cdot 25}{2641 + 1626 - 3} = 9,5 \text{ мм}.$$

Таким образом, если исходная толщина заготовки  $h_i = 25$  мм, то по формуле (5.4) получим, что отверстие с начальным диаметром 58 мм превратится в отверстие диаметром 2 мм при толщине поковки 9,5 мм.

Соотношение (5.3) дает возможность решить обратную задачу. Исходя из нее, можно получить формулу, позволяющую определить максимальный размер

отверстия в заготовке, которое «захлопнется» при уменьшении толщины деформируемой поковки до заданного значения:

$$S_i^{\text{отв}} = \frac{S_i^{\text{лп}} \cdot (h_i - h_{i+1}) + S_{i+1}^{\text{отв}}}{h_i}. \quad (5.5)$$

Поковка осаживается в два этапа до толщины 3 мм. Предположим, что при толщине поковки 5 мм отверстие гарантированно «захлопнется». Тогда максимальная площадь отверстия в исходной заготовке должна быть равна (данные из таблицы 5.2):

$$S_i^{\text{отв}} = \frac{(2641 + 1626) \cdot (25 - 5) + 3}{25} = 3413 \text{ мм}^2.$$

Рассчитанной площади соответствует отверстие диаметром  $d_i = 65$  мм.

### **Рекомендации по улучшению технологии производства сложноконтурных поковок**

1. Для снижения усилий пресса рекомендуется в исходной плоской заготовке предусмотреть технологический вырез в форме окружности.

2. Исходя из геометрических особенностей готовой поковки (наличия ребер жесткости определенной конфигурации и разнотолщинности полотна), рекомендуется технологический вырез в исходной плоской заготовке выполнить диаметром 58 мм.

В соответствии с анализом пространственной эпюры контактных давлений, следующей из картины течения металла, можно предполагать, что требуемые усилия пресса при этом значительно снизятся. Следовательно, для штамповки рассматриваемой поковки можно использовать пресс с меньшими номинальными усилиями, что обеспечит снижение энергозатрат.

3. Так как в готовой детали отверстие не предусмотрено, рекомендуется проверка по формуле (5.4) его гарантированного «захлопывания» при толщине заготовки, превышающей толщину готовой поковки. Полученное значение толщи-

ны равно 9,5 мм, что значительно больше минимальной толщины полотна поковки  $h_{\text{кон}} = 3$  мм.

4. Исходя из условия, что отверстие должно гарантированно «захлопнуться» не ниже, чем при конечной толщине полотна поковки 5 мм, допустимо выполнять отверстие в исходной плоской заготовке максимальным диаметром 65 мм.

5. Благодаря устройству технологического выреза в исходной плоской заготовке, за счет чего не только снижаются потребные усилия прессы, но и «выравнивается» распределение потоков металла по полотну штампуемой заготовки, рассматриваемую поковку можно штамповать за один переход в окончательном штампе, что приведет к экономии штамповой стали. Устранение второго перехода позволяет сэкономить все ресурсы (не только энергетические), потребные для него, а именно людские, на нагрев заготовки, затраты на смазку и т.п.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Формоизменение плоской заготовки не зависит от рода материала, поэтому в качестве материала для моделирования процессовковки и штамповки возможно использование любого пластичного материала, в том числе пластилина.

2. В ходе лабораторных экспериментов на пластилиновых образцах было выявлено, что формообразование образца проявляется уже на начальной стадии деформирования в зависимости от условий трения: по мере увеличения трения кинематическая схема течения металла плавно переходит от радиальной к нормальной.

3. Лабораторные эксперименты подтверждают принцип наименьшего периметра, в соответствии с которым любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке его в пластическом состоянии с наличием контактного трения стремится принять форму, имеющую при данной площади наименьший периметр, т.е. в ходе деформирования превращается в круг.

4. Результаты компьютерного моделирования картины течения металла в ПК EQUI позволяют прогнозировать формоизменение заготовки, что подтверждается лабораторными экспериментами.

5. Площадь поперечного сечения и форма плоской заготовки в ходе деформирования не зависят от ее начальной толщины при одинаковой степени деформации.

6. Апробация разработанной методики и программного комплекса EQUI в промышленных условиях показала их эффективность и полезность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ разработок в области компьютерного моделирования процессов ОМД показал актуальность выполненных исследований и позволил произвести классификацию способов и систем моделирования.

2. Исследование предельных кинематических схем течения металла на основании принципов формоизменения плоских заготовок позволило обосновать промежуточную схему, наиболее точно описывающую реальные процессы формообразования поковок.

3. На основе анализа известных исследований картины течения металла разработана «эквидистантная теория» течения металла по полотну заготовки и созданы методика и алгоритмы численного решения задачи компьютерного моделирования формообразования поковок.

4. Выполнено компьютерное моделирование картины течения металла и пространственной эпюры контактных давлений для многосвязных кусочно-нелинейных контуров и многоконтурных поковок с помощью разработанного программного комплекса EQUI.

5. Проведена апробация разработанных методики и программного комплекса EQUI. Результаты моделирования и расчетов с использованием программного комплекса EQUI при промышленной апробации показали хорошую сходимость с фактическими результатами штамповки выбранных изделий.

6. Осуществлено прогнозирование формоизменения плоских заготовок, а также разработаны рекомендации по обоснованию и использованию технологических приемов, базирующиеся на результатах компьютерного моделирования картины течения металла с помощью программного комплекса EQUI.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.
2. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением: учебник для вузов / Г.Я. Гун. – М.: Metallurgiya, 1980. – 456 с.
3. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров: пер. с англ. / У. Джонсон, П. Меллор. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
4. Зибель, Э. Обработка металлов в пластическом состоянии: учеб. для металлург. вузов / Э. Зибель. – М.: Металлургиздат, 1934. – 197 с.
5. Sobbe, C. Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens / C. Sobbe // Werkstattstechnik. – 1908. – № 9. – S. 457-471.
6. Ивлев, Д.Д. Теория идеальной пластичности: учебник / Д.Д. Ивлев. – М.: Наука, 1966. – 232 с.
7. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. – 376 с.
8. Ильюшин, А.А. Полная пластичность в процессах течения между жесткими поверхностями, аналогия с песчаной насыпью и некоторые приложения / А.А. Ильюшин // Прикладная математика и механика. – 1955. – т. XIX. – вып. 6. – С. 693-713.
9. Овчинников, А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прес-сах / А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
10. Охрименко, Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства: учеб. для вузов / Я.М. Охрименко. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
11. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.П. Галкин. – М.: Metallurgiya, 1976. – 488 с.
12. Прагер, В. Теория идеально-пластических тел: пер. с англ. / В. Прагер, Р. Ходж. – М.: ГИИЛ, 1956. – 398 с.

13. Прандтль, Л. Примеры применения теоремы Генки к равновесию пластических тел / Л. Прандтль // Теория пластичности. – М.: ГИИЛ, 1948. – С. 102-113.
14. Семенов, Е.И. Ковка и объемная штамповка: учеб. для вузов / Е.И. Семенов. – М.: Высшая школа, 1972. – 352 с.
15. Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
16. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: учеб. для вузов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
17. Тарновский, И.Я. Формоизменения при пластической обработке металлов: (ковка и прокатка) / И.Я. Тарновский. – М.: Metallurgizdat, 1954. – 535 с.
18. Тарновский, И.Я. Деформации и усилия при обработке металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго. – М.: Машгиз, 1959. – 304 с.
19. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М.: Metallurgiya, 1972. – 408 с.
20. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов: пер. с англ. / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
21. Унксов, Е.П. Инженерная теория пластичности. Методы расчета усилий деформирования / Е.П. Унксов. – 2-е изд., перераб. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.
22. Хилл, Р. Математическая теория пластичности: учебник / Р. Хилл. – М.: ГИТЛ, 1956. – 408 с.
23. Шофман, Л.А. Основы расчета процессов штамповки и прессования / Л.А. Шофман. – М.: Машгиз, 1961. – 340 с.
24. Баранов, Г.Л. Определение контактных напряжений при осадке прямоугольной полосы / Г.Л. Баранов // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 25-31.

25. Баранов, Г.Л. Анализ контактных напряжений в зоне очага пластической деформации со знакопеременными силами трения / Г.Л. Баранов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 3. – С. 192-196.
26. Баранов, Г.Л. Контактные напряжения при пластическом течении металла в клиновидном канале / Г.Л. Баранов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 429-433.
27. Александров, А.А. К расчету процессов деформации по линиям тока / А.А. Александров, В.В. Евстифеев, А.И. Ковальчук // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 282-283.
28. Базайкин, В.И. Напряжения начала протяжки цилиндрической заготовки при горячей ковке в комбинированных бойках / В.И. Базайкин, М.В. Темлянцев, Б.Ю. Бобров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 100-105.
29. Баглюк, Г.А. Особенности деформированного состояния пористых заготовок при их закрытой и открытой горячей штамповке / Г.А. Баглюк, А.И. Хоменко // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 57-62.
30. Арюлин, С.Б. Теоретическое определение параметра геометрии очага деформации при маятниковой прокатке / С.Б. Арюлин, Д.Т. Камоничкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 7 – С. 22-28.
31. Saby, M. Understanding and modeling of void closure mechanisms in hot metal forming processes / M. Saby, M. Bernacki, P.-O. Bouchard // Procedia Engineering. – 2014. – No 81. – P. 137.
32. Baya, F. Electromagnetic forming processes: material behaviour and computational modelling / F. Baya, A.-C. Jeanson, J. A. Zapata // Procedia Engineering. – 2014. – No 81. – P. 793.
33. Finite element simulation of multi material metal forming / J.-L. Chenot, C. Béraudo, M. Bernacki, L. Fourment // Procedia Engineering. – 2014. – No 81. – P. 2427.

34. Influence of geometrical ratios in forgeability of complex shapes during hot forging of Ti-6Al-4V titanium alloy / A. Ducato, G. Buffa, L. Fratini, R. Shivpuri // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 516.
35. Forging of Al-Mg compounds and characterization of interface / C. Binotsch, D. Nickel, A. Feuerhack, B. Awiszus // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 540.
36. Behrens, B.-A. Hot stamping of load adjusted structural parts / B.-A. Behrens, A. Bouguech, C. M. Gaebel and others // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 1756.
37. Wohletz, S. Temperature influence on bond formation in multi-material joining by forging / S. Wohletz, P. Groche // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 2000.
38. Mohamed, M. A new test design for assessing formability of materials in hot Stamping / M. Mohamed, J. Lin, A. Foster and others // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 1689.
39. Kim, H. Effects of surface finish and die temperature on friction and lubrication in forging / H. Kim, T. Altan // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 1848.
40. Alzahrani, B. Analytical and numerical modeling of thick tube hydro forging / B. Alzahrani, G. Ngaile // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 2223.
41. Microstructure and texture evolutions in AISI 1050 steel by flow forming / V. Bedekar, P. Pauskar, R. Shivpuri, J. Howe // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 2355.
42. Wang, Z. A new forming method of triple cup by plate forging / Z. Wang, Y. Yoshikawa // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 389.
43. Abe, Y. Multi-stage stamping including thickening of corners of drawn cup / Y. Abe, K. Mori, T. Ito // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 825.
44. Suzuki, T. Effect of plastic deformation of bulk material on frictional behavior in dry metal forming / T. Suzuki, Z. Wang, Y. Yoshikawa // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 1872.

45. Asai, K. Estimation of frictional property of lubricants for hot forging of steel using low-speed ring compression test / K. Asai, K. Kitamura // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 1970.
46. Mechanism of crack initiation and propagation in single-side piercing process for hollow forged parts / T. Ishiguro, E. Abe, N. Yukawa, T. Ishikawa // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 364.
47. Analytical and FEM investigations on boss forming process by compression drawing method / W. Dong, Q. Lin, Y. Li, Z. Wang // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 383.
48. Sasaki, S. Improvement in prediction accuracy by finite element methods of stretch-formed aluminum alloy sheets with a large aspect ratio / S. Sasaki, A. Kono, S. Takahashi // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 927.
49. Kubota, Y. Electro-thermo-mechanical finite element analysis on DC pulse resistance pressure sintering process of zirconia part / Y. Kubota, K. Hayakawa, T. Okano and others // *Procedia Engineering*. – 2014. – No 81. – P. 2421.
50. Solomonov, K.N. Classification of the Simulation Methods for Various Applications / K.N. Solomonov // *New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: proceedings of the XIII International Scientific Conference*. – Czestochowa, 2012. – P. 522-528.
51. Соломонов, К.Н. Моделирование процессов объемной штамповки иковки плоских заготовок: монография / К.Н. Соломонов, И.В. Костарев, В.П. Абашкин. – М.: Изд. дом МИСиС, 2008. – 128 с.
52. Костарев, И.В. Совершенствование технологического инструмента для штамповки ребристых деталей из алюминиевых сплавов: монография / И.В. Костарев, К.Н. Соломонов, А.О. Харитонов – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 172 с.
53. Соломонов, К.Н. Совершенствование методов разработки технологических процессов и инструмента для штамповки тонкостенных оребренных поковок на основе графо-аналитического компьютерного моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.05 / Соломонов Константин Николаевич. – М., 2004. – 426 с.

54. Соломонов, К. Моделирование формообразования поковок: исследования, гипотезы, разработки / К. Соломонов. – Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 165 с.
55. Соломонов, К.Н. Применение «песчаной аналогии» для моделирования процессов ОМД / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Липецк, 2014. – Часть 1. – С. 203-208.
56. Чумаченко, Е.Н. Экспресс-расчет основных параметров штамповки длинномерных поковок / Е.Н. Чумаченко, В.Н. Корзо, Л.П. Степаненкова // Вестник машиностроения. – 2015. – № 2. – С. 84-88.
57. Соломонов, К.Н. Использование САПР для решения прикладных задач / К.Н. Соломонов, В.В. Свирин, А.И. Фролов // САПР и графика. – 2011. – № 2. – С. 88-90.
58. Соломонов, К.Н. Выбор схемы течения металла в процессахковки плоских заготовок / К.Н. Соломонов, В.П. Абашкин // Необратимые процессы в природе и технике: сборник научных трудов. – М., 2010. – С. 144-150.
59. Тищук, Л.И. Классификация вычислительных систем, используемых для моделирования процессов пластической деформации / Л.И. Тищук, К.Н. Соломонов // Научные исследования в области авиационных, космических и транспортных систем: труды XV Всероссийской научно-технической конференции. – Москва-Таруса, 2014. – С. 73-79.
60. Шibaков, В.Г. Системы автоматизированного проектирования в ОМД и выбор формата файла обмена информацией между ними / В.Г. Шibaков, Р.И. Мулюков, И.З. Вильданов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4. – С. 31-34.
61. Тищук, Л.И. Анализ рынка программных продуктов, предназначенных для моделирования технологических процессов / Л.И. Тищук, К.Н. Соломонов // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. – 2013. – № 2. – С. 50-55.

62. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки давлением конструкционных сверхпластичных материалов / В.Р. Ганиева, О.П. Тулупова, Ф.У. Еникеев, А.А. Круглов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 63-69.
63. Арюлин, С.Б. Теоретическое определение параметра геометрии очага деформации при маятниковой прокатке / С.Б. Арюлин, Д.Т. Камоничкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 7. – С. 22-28.
64. Вильданов, И.З. Формирование конструкторско-технологической документации на ответственные детали, получаемые пластическим деформированием, с учетом их эксплуатационных свойств / И.З. Вильданов, В.Г. Шibaков, Р.В. Шibaков // Вестник машиностроения. – 2015. – № 6. – С. 55-58.
65. Сосенушкин, Е.Н. Показатели эффективности процесса равноканального углового прессования / Е.Н. Сосенушкин, Л.М. Овечкин, А.Е. Сосенушкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 12. – С. 23-28.
66. Сосенушкин, Е.Н. Технология углового прессования и ее анализ с помощью компьютерных и физических моделей / Е.Н. Сосенушкин, Л.М. Овечкин, А.Е. Сосенушкин // Вестник машиностроения. – 2016. – № 7. – С. 81-85.
67. Яковлев, С.С. Редуцирование профильным пуансоном трубных заготовок через коническую матрицу / С.С. Яковлев, О.Н. Митин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 10. – С. 16-24.
68. Моделирование в QForm-3D штамповки шестерни из шаровой заготовки / М.В. Филиппова, М.В. Темлянцев, В.Н. Перетятько, С.В. Сметанин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 8. – С. 14-18.
69. Мамаев, В.Б. Моделирование влияния технологических факторов на протекание и результаты процессов осадки на основании метода траекторий главных нормальных направлений / В.Б. Мамаев, М.В. Мамаев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 12. – С. 13-19.
70. Хаймович, И.Н. Проектирование и реализация системы автоматизированного проектирования штамповки компрессорных лопаток из титановых спла-

вов / И.Н. Хаймович, А.И. Хаймович // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 37-43.

71. Костышев, В.А. Аналитическое моделирование эволюции микроструктуры титановых сплавов при высокоскоростной штамповке лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Костышев, А.И. Хаймович // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 49-56.

72. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковки из алюминиевого сплава АК6 / И.Л. Константинов, И.Ю. Губанов, И.О. Астрашабов и др. // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 45-48.

73. Выбор рациональных режимов угловой раскатки деталей с фланцами на основе компьютерного моделирования в программном комплексе Deform-3D / В.Н. Востров, П.В. Кононов, В.В. Мишин, П.А. Глухов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 8. – С. 26-32.

74. Песин, А.М. Моделирование кинематики течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 4. – С. 26-31.

75. Богатов, А.А. Конечно-элементное моделирование кузнечной протяжки полос без изменения формы и размеров в условиях знакопеременной деформации / А.А. Богатов, Д.Ш. Нухов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 422-428.

76. Антощенко, Ю.М. Исследование процесса осесимметричной осадки методами компьютерного моделирования / Ю.М. Антощенко, И.М. Таупек // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 49-53.

77. Кузин, А.О. Экспериментальное подтверждение теоретических результатов исследования штампа для гибки плоских заготовок с упругим элементом / А.О. Кузин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 7. – С. 18-21.

78. Поксеваткин, М.И. Алгоритмизация закрытой штамповки изделий без штамповочных уклонов / М.И. Поксеваткин, Е.В. Трещеткин, С.Ю. Скорых //



Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 9. – С. 19-21.

79. Определение рациональных режимов деформирования сталей и сплавов при использовании совмещенных процессовковки / С.А. Машеков, Н.Т. Смайлова, А.Е. Нуртазаев, А.М. Алшынова // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 32-36.

80. Коробова, Н.В. Бесштамповые методы формообразования пространственных листовых деталей пластическим деформированием / Н.В. Коробова, М.А. Вишенков, А.В. Минаев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 11. – С. 45-48.

81. Симонова, Л.А. Имитационное моделирование формообразования специального дискового инструмента на этапе технологической подготовки производства на примере сферической фрезы / Л.А. Симонова, Р.М. Хисамутдинов, И.З. Сунгатов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 3. – С. 30-33.

82. Solomonov, K.N. Review of software for simulation of metal forming processes / K.N. Solomonov, L.I. Tishchuk // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: collective monograph on the XV International Scientific Conference. – Czestochowa, 2014. – P. 287-291.

83. Математическое моделирование в нелинейной механике (обзор программных комплексов для решения задач моделирования сложных систем) / Е.Н. Чумаченко, Т.В. Полякова, С.А. Аксенов и др. – М.: ИКИ РАН, 2009. – 42 с.

84. Соломонов, К.Н. Закономерности формообразования плоской заготовки в процессахковки и штамповки / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, Н.И. Федорин // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics: collective monograph on the XVIII International Scientific Conference. – Czestochowa, 2017. – P. 258-265.

85. Илюшкин, М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки): учебно-методическое пособие / М.В. Илюшкин. – Ульяновск: УлГУ, 2013. – 112 с.

86. Салиенко, А.Е. Виртуальное производство. MSC.Software – революция в промышленности / А.Е. Салиенко, А.Н. Солдаткин, А.М. Рудис // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – № 10. – С. 43-48.
87. Feretti, M. Bildschirmarbeit: CAD und Simulationsverfahren erleichtert Konstruktion von Schmiedeteilen / M. Feretti // Maschinenmarkt. – 1994. – № 49. – S. 42-44.
88. Моделирование сверхпластической формовки многослойных ячеистых конструкций в программном комплексе ABAQUS / В.К. Бердин, Н.В. Бердин, В.В. Лукьянов, А.В. Колесников // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 1. – С. 32-38.
89. Шестаков, Н.А. Технология получения объемных заготовок с мелкозернистой структурой / Н.А. Шестаков, В.Н. Субич, А.В. Шукшин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 8. – С. 19-23.
90. Коробова, Н.В. Применение программного комплекса DEFORM 3D для исследования холодного выдавливания стаканов из спеченных порошковых заготовок / Н.В. Коробова, М.Д. Петров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4. – С. 25-27.
91. Решетникова, Е.С. Моделирование температурных условий процесса калибрования стали для прогнозирования ресурса монолитной волоки / Е.С. Решетникова, Е.А. Свистунова, И.А. Савельева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 6. – С. 29-31.
92. Моделирование процесса штамповки детали «Корпус турбины» из жаропрочного сплава ЭП666 для получения оптимальной микроструктуры / А.А. Шитиков, Г.Г. Кривенко, В.Е. Харсеев и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 1. – С. 40-45.
93. Малаканов, С.А. Исследование конструкции упругой клеммы на основе критериальной оценки формы поперечного сечения / С.А. Малаканов, В.А. Ар-

замасцева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 2. – С. 25-28.

94. Слобода, А.А. Моделирование в программном комплексе Deform-3D процесса комбинированного выдавливания в условиях низкотемпературной сверхпластичности / А.А. Слобода, В.В. Астанин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 6. – С. 38-42.

95. Стругов, С.С. Моделирование процесса холодной штамповки эксцентрических трубных переходов комбинированным методом «обжим-раздача» / С.С. Стругов, В.А. Иванов, Ю.М. Погорелов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 2. – С. 29-32.

96. Решетникова, Е.С. Моделирование процесса холодной штамповки болтов с фланцем / Е.С. Решетникова, Л.В. Дерябина, Е.А. Свистунова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 4. – С. 30-32.

97. Шестаков, Н.А. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программном комплексе Forming: учеб. пособие / Н.А. Шестаков, А.В. Власов. – М.: МГИУ, 2008. – 102 с.

98. Биба, Н.В. QForm – программа, созданная для технологов / Н.В. Биба, С.А. Стебунов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – № 9. – С. 38-41.

99. Герасимов, Д.А. Использование метода двойной конечно-элементной сетки при численном моделировании процессов формоизменения металла в программе QForm / Д.А. Герасимов, А.А. Гартвиг // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 12. – С. 32-35.

100. Данилин, А.В. Совершенствование методики проектирования технологии прессования изделий из труднодеформируемых алюминиевых сплавов путем создания математических регрессионных моделей / А.В. Данилин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 6. – С. 25-38.

101. Резвых, Р.В. Актуализация модели для расчетов процессов холодной объемной штамповки в программе QForm / Р.В. Резвых // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 6. – С. 25-30.

102. Оптимизация процесса горячей объемной штамповки путем моделирования в программном комплексе QForm / А.К. Шмаков, А.В. Колесников, Н.В. Максименко, А.С. Станиславчик // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4. – С. 28-31.

103. Логинов, Ю.Н. Моделирование в программном комплексе QForm образования пресс-утяжины при прессовании / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 7. – С. 42-46.

104. Некоторые примеры использования программного комплекса QForm в НИТУ «МИСиС» и в его Выксунском филиале / Д.Б. Ефремов, П.В. Беляев, И.С. Кириченко и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 2. – С. 29-33.

105. Возникновение зон неконтактной деформации в процессе прокатки-прессования пористого прутка / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов, Н.Н. Загиров, Е.В. Иванов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 3. – С. 38-41.

106. Вакалов, А.А. Применение компьютерного моделирования при разработке процессов горячей штамповки поковок лопаток / А.А. Вакалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 1. – С. 36-41.

107. Элингхаузен, Т. QForm 7 – новое слово в моделировании процессов обработки металлов давлением / Т. Элингхаузен, С.А. Стебунов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 2. – С. 31-34.

108. Хайруллин, Р.А. Повышение эксплуатационных свойств и ресурса наплавленных штампов горячего деформирования / Р.А. Хайруллин, О.Н. Смир-

нова, Р.В. Шibaков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 2. – С. 26-28.

109. Особенности формообразования отверстий в заготовках из жаропрочных сплавов методом термического сверления / Д.М. Забелян, И.А. Бурлаков, С.В. Морозов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 12. – С. 36-40.

110. Воронцов, С.А. Применение программы моделирования QForm на кузнечном заводе ПАО «КАМАЗ» / С.А. Воронцов, И.Ж. Харисов, Ю.А. Гладков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 12. – С. 40-44.

111. Полая деталь с эксцентриком для дизельных двигателей / Ю.Г. Калинин, Ю.К. Филиппов, В.И. Воронков и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 4. – С. 31-36.

112. Гладков, Ю.А. Моделирование прессования алюминиевых профилей в новой версии программы QFORM Extrusion VX: совместная деформационная задача / Ю.А. Гладков, С.С. Каневский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 11. – С. 41-48.

113. Моделирование и расчет течения металла при штамповке на КГШП с использованием вычислительного комплекса SPLEN-S / Е.Н. Чумаченко, Л.Э. Роголевич, М.Б. Свешников и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2000. – № 4. – С. 37-42.

114. Тюрин, В.А. Оценка моделированияковки с макросдвигами / В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 1. – С. 37-40.

115. Бердин, В.К. Упруго-вязкопластическое поведение материала в задачах численного моделирования одноосного сжатия, растяжения и чистого сдвига / В.К. Бердин, Н.В. Бердин, В.В. Лукьянов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 3. – С. 33-42.

116. Головин, А.Ф. Прокатка. Часть 1. Теория пластичной деформации / А.Ф. Головин. – М.: Металлургиздат, 1933. – 135 с.

117. Соломонов, К.Н. Анализ схем течения металла с помощью DEFORM-3D / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук // Механическое оборудование металлургических заводов: международный сборник научных трудов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та, 2014. – С. 209-215.
118. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1961. – 306 с.
119. Шарапин, Е.Ф. Элементы теории обработки металлов давлением / Е.Ф. Шарапин. – М.: Металлургиздат, 1964. – 208 с.
120. Свирин, В.В. Исследование влияния различных факторов на кинематическую схему течения металла в процессахковки и штамповки / В.В. Свирин, К.Н. Соломонов, Л.О. Мокрецова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 7. – С. 34-37.
121. Чумаченко, Е.Н. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии: монография / Е.Н. Чумаченко, О.М. Смирнов, М.А. Цепин. – М.: КомКнига, 2005. – 320 с.
122. Смирнов, О.М. Влияние реологических свойств легких сплавов на особенности их течения при прессовании / О.М. Смирнов, В.Н. Щерба // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1997. – № 1. – С. 26-32.
123. Петров, А.И. Разработка научных основ и практика проектирования технологии производства прецизионных профилей на волочильных и прокатных станах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.05 / Петров Альберт Иванович. – М., 1984. – 366 с.
124. Петров, А.И. Моделирование геометрического преобразования контура заготовки в процессе обработки / А.И. Петров, В.И. Корольков // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 11. – С. 40-42.
125. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Иностранная литература, 1954. – 647 с.
126. Solomonov, K. Simulation of forming a flat forging / K. Solomonov, L. Tishchuk, N. Fedorinin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 918. – article no. 012038.

127. Лисунец, Н.Л. Объемная штамповка алюминиевых заготовок: монография / Н.Л. Лисунец, К.Н. Соломонов, М.А. Цепин. – М.: Машиностроение, 2009. – 171 с.
128. Тищук, Л.И. Влияние трения на формоизменение плоской заготовки / Л.И. Тищук, К.Н. Соломонов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2018. – № 3 – С. 251-253.
129. Соломонов, К.Н. Анализ кинематических схем течения металла с помощью виртуального эксперимента / К.Н. Соломонов, В.В. Свирин // Технология легких сплавов. – 2010. – № 3. – С. 58-64.
130. Тищук, Л.И. Исследование картины течения металла при осадке / Л.И. Тищук, К.Н. Соломонов, И.П. Мазур и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2017. – № 3. – С. 37-44.
131. Соломонов, К.Н. Методика построения линии раздела течения металла для кусочно-линейного контура / К.Н. Соломонов, Н.И. Федоринин, Л.И. Тищук // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2016. – № 1. – С. 68-74.
132. Соломонов, К.Н. Моделирование процесса осадки / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, Н.И. Федоринин // Необратимые процессы в природе и технике: труды девятой Всероссийской конференции. – М., 2017. – Часть I. – С. 190-193.
133. Соломонов, К.Н. Методика построения линии раздела течения металла в процессах осадки плоских заготовок / К.Н. Соломонов, Н.И. Федоринин, Л.И. Тищук // Вестник научно-технического развития. – 2016. – № 2. – С. 36-55.
134. Мамаев, В.Б. Условие пластичности и граничные условия на примере исследования напряженного состояния в процессах осадки / В.Б. Мамаев, М.В. Мамаев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 10. – С. 24-31.
135. Фомичев, А.Ф. Компьютерное исследование кузнечной разгонки полотна диска из стали 20Х13 / А.Ф. Фомичев, С.Ю. Панин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – № 4. – С. 33-36.

136. Соломонов, К.Н. Особенности применения CAD-систем к моделированию необратимых процессов / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук // Необратимые процессы в природе и технике: труды восьмой Всероссийской конференции. – М., 2015. – Часть II. – С. 91-94.

137. Solomonov K.N. Application of CAD/CAM Systems for Computer Simulation of Metal Forming Processes / K.N. Solomonov // Materials Science Forum. – 2012. – Vol. 704-705. – P. 434-439.

138. Соломонов, К.Н. Исследование картины течения металла в процессах плоской деформации / К.Н. Соломонов, С.Н. Лежнев, Л.И. Тищук // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: collective monograph on the XVI International Scientific Conference. – Czestochowa, 2015. – P. 230-235.

139. Соломонов, К.Н. Моделирование технологических методик пластического деформирования / К.Н. Соломонов, Н.И. Федоринин, Л.И. Тищук // Изв. Самарского НЦ РАН. – 2017. – № 1. – С. 517-519.

140. Соломонов, К.Н. Моделирование эпюры контактных давлений с помощью песчаной аналогии / К.Н. Соломонов, В.В. Свирин, В.П. Абашкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 4. – С. 41-45.

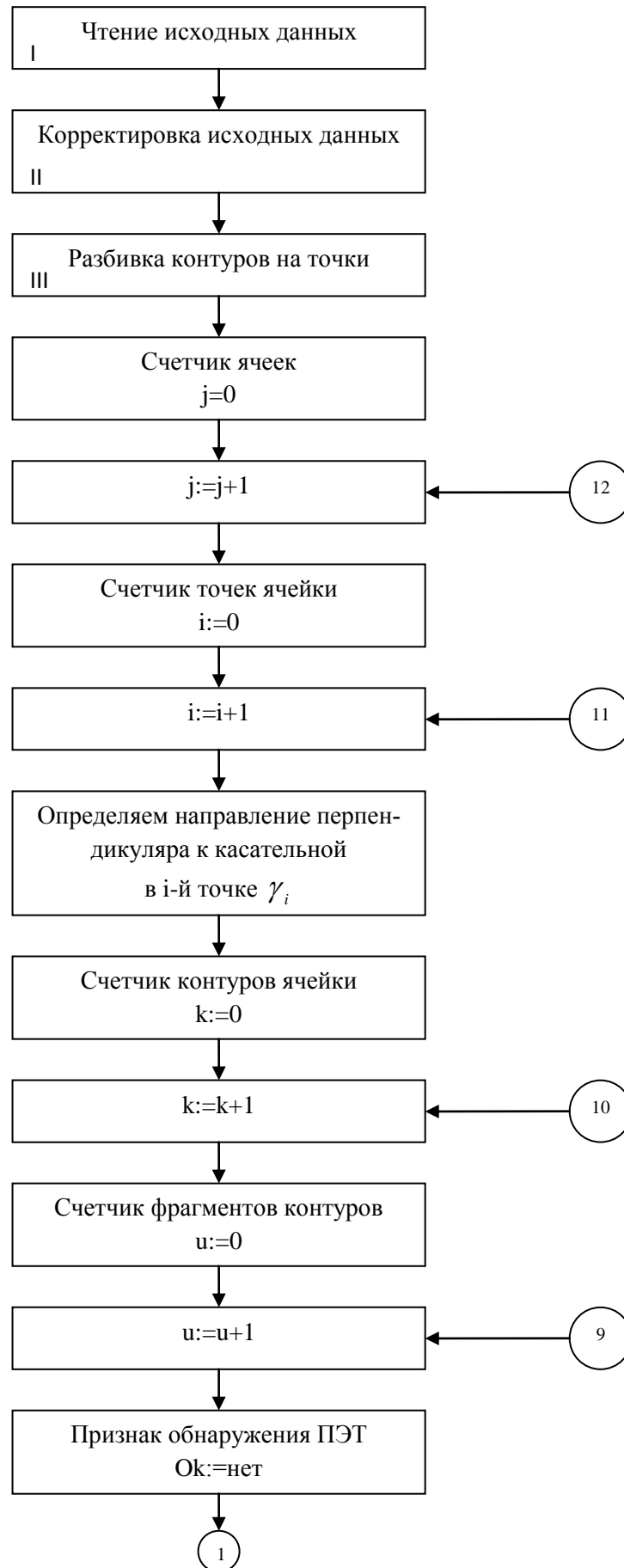
141. Solomonov, K.N. Control of metal flow using technological constructional elements / K.N. Solomonov, L.I. Tishchuk // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: collective monograph on the XVII International Scientific Conference. – Czestochowa, 2016. – P. 358-361.

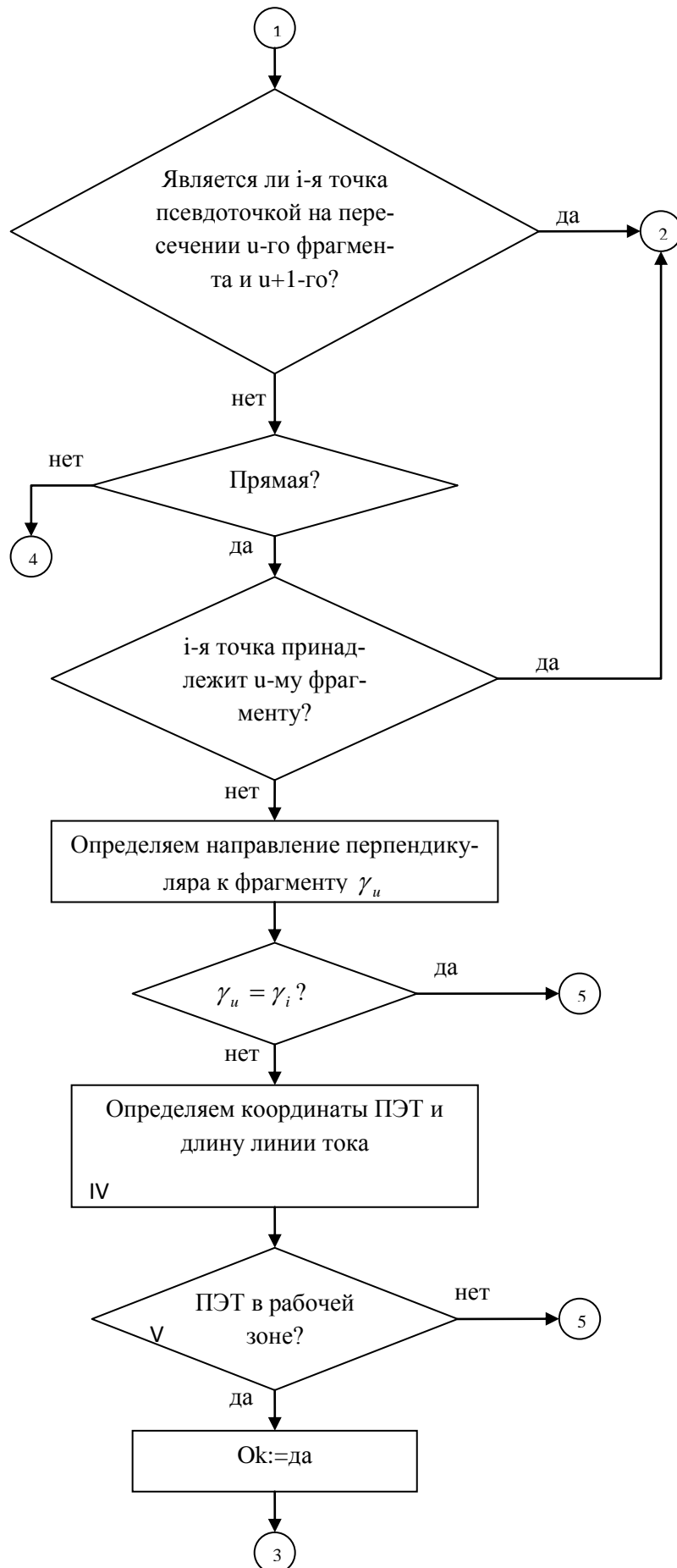
142. Березкин, В.Г. Формоизменение при обработке металлов давлением / В.Г. Березкин. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.

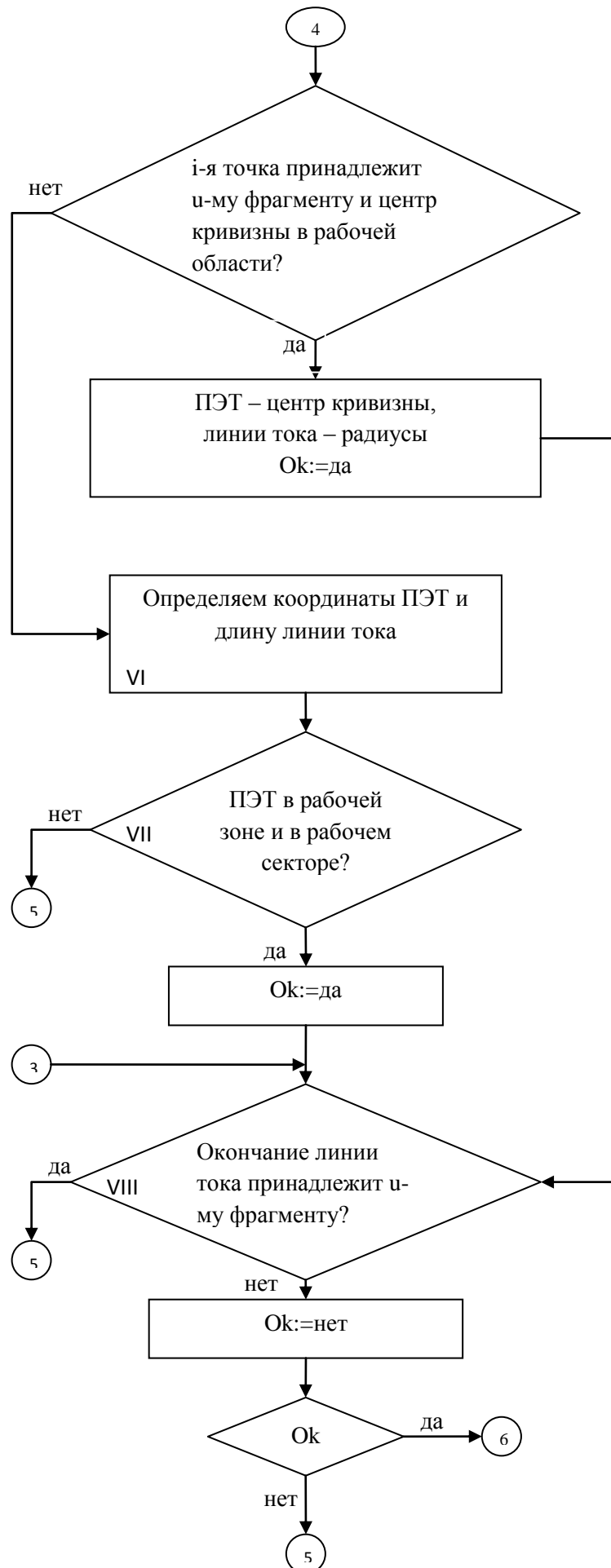
143. Соломонов, К.Н. Моделирование пластилином формоизменения металла при горячей деформации / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук // Кузнец-2017: сборник научных статей и докладов XIII Межд. конгресса. – Рязань, 2017. – С. 318-320.

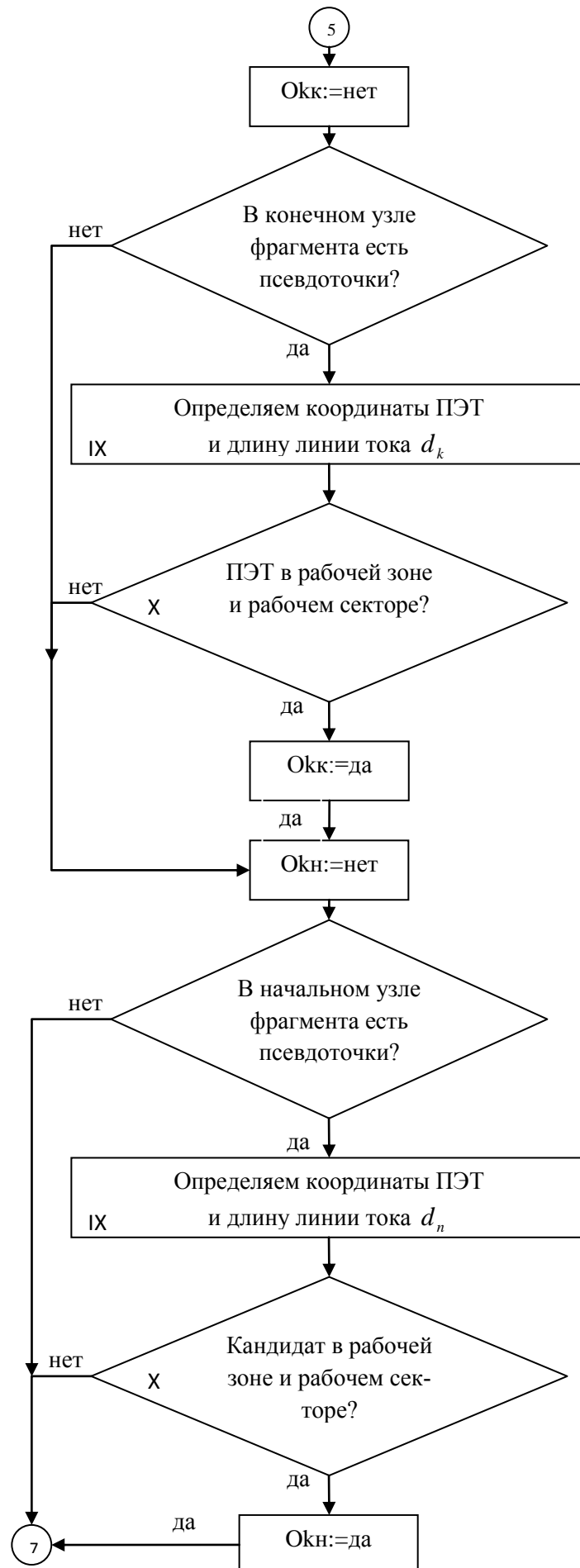


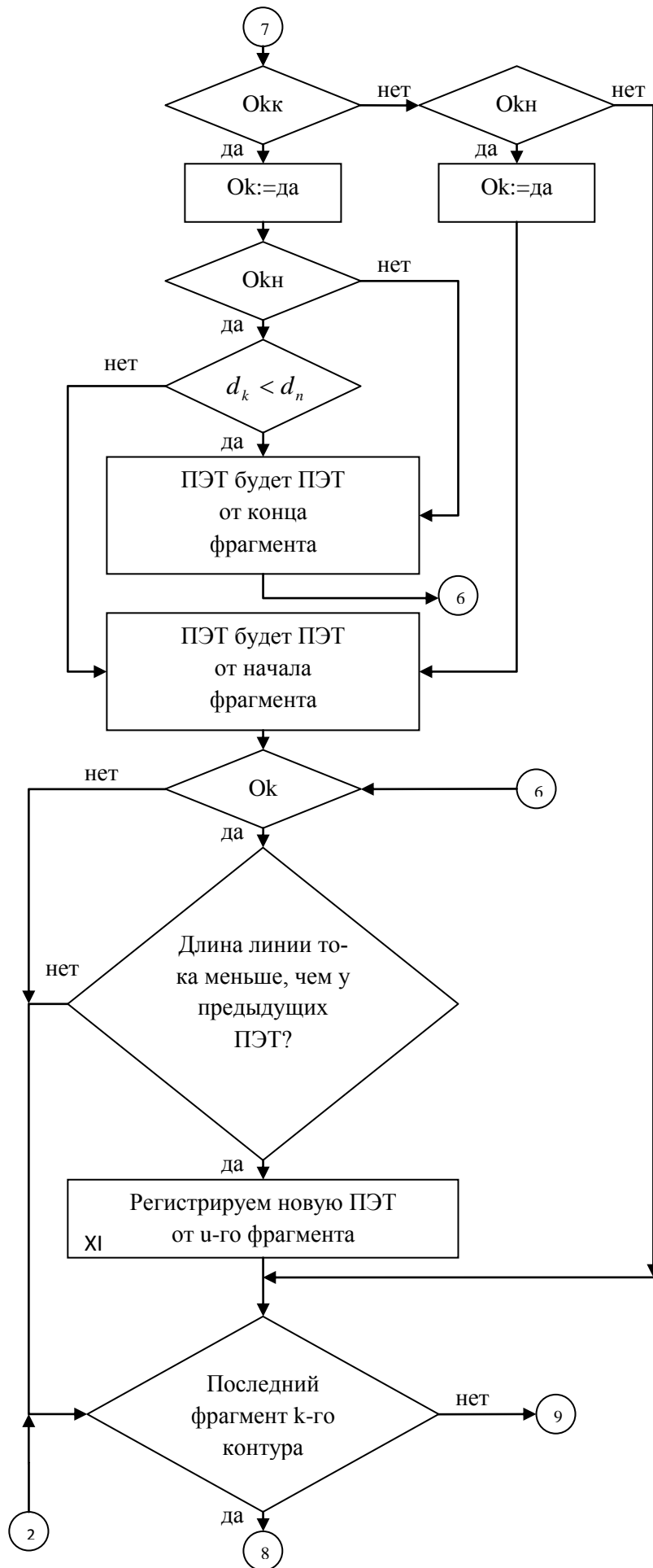
РАЗВЕРНУТАЯ БЛОК-СХЕМА  
РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
EQUI

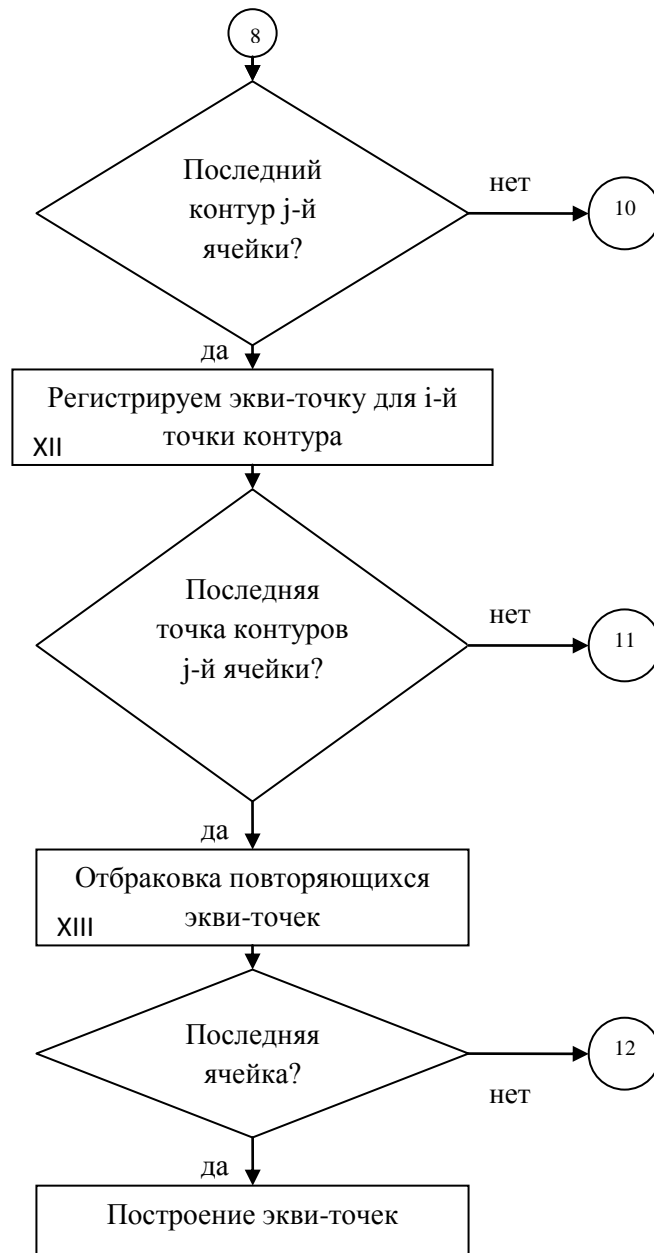












АКТ  
о внедрении результатов научных исследований  
в учебный процесс



«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор Филиала РГУПС  
в г. Воронеж



О.А. Лукин

« 16.04 » 2018 г.

### АКТ

о внедрении результатов научных исследований  
в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс Филиала ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» в г. Воронеж следующих результатов диссертационной работы Тишук Людмилы Ивановны на тему «Разработка методики проектирования процессов пластического формоизменения металлических плоских заготовок на основе компьютерного и физического моделирования»:

1. Алгоритм построения линии раздела течения металла в процессах осадки плоских заготовок.
2. Алгоритм построения картины течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки при пластическом формоизменении плоских заготовок.
3. Алгоритм построения пространственной эпюры контактных давлений в процессахковки и штамповки плоских заготовок.
4. Модель эквидистанты кусочно-нелинейного односвязного и многосвязного контуров.
5. Модель поверхности одинакового ската, способная располагаться под разными ракурсами, для многоконтурных эскизов набора плоских линий.
6. Программный комплекс EQUI, предназначенный для моделирования картины течения металла в процессах пластического формоизменения плоских заготовок.

Заместитель директора по учебной,  
научной и инновационной деятельности  
Филиала РГУПС в г. Воронеж

Д.Г. Жиликов

АКТ  
об апробации результатов работы  
в опытном производстве

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Технический директор ПАО «ВАСО»  
 М.П. \_\_\_\_\_ А.А.Анохин  
 (подпись)  
 «18» января 2018 г.

### Технический акт

об апробации результатов работы «Разработка методики проектирования процессов пластического формоизменения металлических плоских заготовок на основе компьютерного и физического моделирования»

Мы, нижеподписавшиеся, главный металлург ПАО «ВАСО» А.Б.Коломенский и директор Филиала Ростовского государственного университета путей сообщения в г. Воронеж Лукин Олег Анатольевич, составили настоящий акт о том, что на ПАО «ВАСО» было проведено опробование в опытном производстве результатов работы «Разработка методики проектирования процессов пластического формоизменения металлических плоских заготовок на основе компьютерного и физического моделирования».

Выполнено компьютерное моделирование пластического течения металла и получены расчетные данные параметров формообразования штамповки с технологическим вырезом.

Результаты моделирования и расчетов с использованием программного комплекса EQUI при промышленном опробовании показали хорошую сходимость с фактическими результатами штамповки выбранных изделий.

Опробование показало, что использование предложенной методики и разработанного на ее основе программного комплекса EQUI позволяет:

- снизить энергозатраты на штамповку исследуемой поковки за счет устройства технологического выреза с заданными параметрами;
- снизить затраты на инструмент за счет исключения второго перехода;
- повысить качество поковки за счет устранения возможного брака на стадии проектирования.

От ПАО «ВАСО»  
 Главный металлург,  
 д-р техн. наук, профессор  
 \_\_\_\_\_ А.Б.Коломенский

От Филиала РГУПС в г. Воронеж  
 Директор,  
 к. ф.-м.н., доцент  
 \_\_\_\_\_ О.А. Лукин