

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»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2018

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

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор
Соломонов Константин Николаевич

Официальные
оппоненты: **Корольков Владимир Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО Воронежский государственный
технический университет,
зав. кафедрой «Самолетостроение»

Яновская Елена Александровна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
доцент кафедры прикладной математики

Ведущая организация: **Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова Российской академии наук**

Защита состоится 14 июня 2018 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.132.09 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте <http://www.misis.ru>.

Справки по телефону: 8-925-074-70-00, e-mail: vachiyan@yandex.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (организации), просим высылать по указанному адресу в диссертационный совет Д212.132.09.

Автореферат разослан _____ мая 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.М. Ионов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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. 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.).

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 актуально создание новых методик, позволяющих моделировать процессы формообразования поковок различного назначения.

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 поковок, в том числе и с ребрами жесткости, получаемых в процессах объемной штамповки иковки.

Развитие средств вычислительной техники и создание доступного программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов ОМД 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 оборудования, 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 «эквилибристической теории» течения металла по полотну заготовки на основе анализа известных исследований картины течения металла и создание методики 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 разработка рекомендаций по обоснованию и использованию технологических приемов, базирующихся на результатах компьютерного моделирования картины течения металла с помощью программного комплекса EQUI.

Научная новизна работы заключается в следующем:

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

На ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (ВАСО) была проведена апробация результатов работы в опытном производ-

стве. 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. 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.

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.

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.

Достоверность полученных результатов 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.

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 поволоков.
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.

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.

Диссертационная 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, научная и практическая значимость, сформулированы цель и задачи.

В первой главе выполнен анализ разработок в области компьютерного моделирования процессов ОМД.

В частности, отмечено, что разработка 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 широко ориентированные программные комплексы (ПК) такие, как ANSYS, ABAQUS, MARS, DEFORM и др., позволяющие не

только выбирать материал из стандартной библиотеки комплекса, но и вариант постановки краевой задачи.

Приведена оригинальная классификация способов моделирования процессов ОМД. Представлено деление способов моделирования на три уровня.

К способам моделирования первого уровня относятся *интеллектуальное и инфологическое моделирование*, применяемые для решения плохо структурированных и информационных задач. Применительно к задачам ОМД, можно использовать, в частности, для создания систем управления базами данных и знаний, включающих информацию о материалах заготовок, оборудовании, инструменте, а также методиках технологического и конструкционного характера.

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.

Примерами *математического моделирования* процессов ОМД могут служить разнообразные математические модели, лежащие в основе практически всех программных комплексов. Базой для *геометрического моделирования* является также аппарат высшей и элементарной математики.

В качестве инструмента для создания математических моделей и геометрического моделирования используются разделы *линейной алгебры*, а также *интегральное и дифференциальное исчисление, дифференциальная геометрия*.

Физическое моделирование дает интересные результаты, которые часто не укладываются в общепринятую теорию. Таким образом, физическое моделирование можно использовать для достижения двух целей: во-первых, получения эмпирических графических и аналитических зависимостей, позволяющих решать инженерно-прикладные задачи; во-вторых, подтверждения результатов теоретических исследований.

Аналоговое моделирование удобно проинтерпретировать на примере методики расчета объема пространственной эпюры контактных давлений в задачах «теории течения тонкого слоя». В таких задачах аналоговое моделирование дает возможность однозначно определить форму пространственной эпюры контактных давлений. При этом, в качестве инструмента моделирования можно использовать как натуральные сыпучие материалы (например, песок, соль и т.п.), так и их компьютерные аналоги, реализованные в каком-либо графическом пакете (например, КОМПАС). Тогда в первом случае аналоговое моделирование можно отнести к физическому моделированию, а во втором – к компьютерному.

Компьютерное моделирование (третий уровень) сегодня по праву считается самым продуктивным и мощным способом моделирования, которое объединяет и реализует численные и графические методы. Поэтому данный вид моделирования выделен на отдельный уровень. Вследствие своих выигрышных особенностей, минимизирующих 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.

Все способы компьютерного моделирования, по характеру исследуемых моделей, можно условно разделить на две категории: способы моделирования процессов (СМП) и способы моделирования объектов (СМО).

К СМП можно отнести САМ/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, 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 КОМПАС, SolidWorks, Unigraphics.

В первой главе также представлен обзор программных продуктов, предназначенных для моделирования технологических процессов ОМД, активно применяемых на отечественных и зарубежных предприятиях, с описанием каждой вычислительной системы в отдельности.

Приведена классификация САЕ-систем, в зависимости от широты охвата предметной области исследований и глубины решаемых задач, по трем категориям: универсальные, специальные, специализированные. Указаны преимущества и недостатки каждой категории. Определено место специализированных ПК в ряду программных продуктов и отмечены их положительные стороны.

Во второй главе проведено исследование кинематических схем течения металла (КСТМ) в процессах осадки плоских заготовок.

Формообразование заготовок в процессах ковки и штамповки в значительной степени определяется КСТМ. В качестве одного из способов решения задачи моделирования картины течения металла по плоскости контакта в процессах ковки и штамповки предлагается так называемая «эквидистантная теория» («экви-теория»), основанная на трех известных принципах:

1. Принцип наименьшего сопротивления, выдвинутый применительно к пластической деформации Г. Треска, сформулированный С.И. Губкиным следующим образом: «В случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях, каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления».

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

В дальнейшем было установлено, что кратчайшая нормаль не всегда является направлением наименьшего сопротивления, а лишь при условии, что величина контактного трения значительна. При минимальном трении движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению внешней силы, носит радиаль-

ный характер, и поперечные сечения в процессе деформации остаются подобными исходным.

Однако этот принцип содержит противоречия: в реальных процессах пластического формоизменения при увеличении степени деформации плоской заготовки периметры его поперечных сечений стремятся не к многоугольникам, а эллипсам, которые преобразуются в круги, после чего движение точек происходит по радиусам некоторых окружностей.

3. Такая закономерность изменения формы поперечных сечений тела при осадке была замечена еще К. Зоббе, который предложил принцип наименьшего периметра: 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.

Следствием этих принципов являются положения:

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

До сегодняшнего дня достаточно спорным остается вопрос о схеме течения металла в процессах пластического деформирования плоских заготовок. В результате теоретических и экспериментальных исследований различных схем деформирования материалов И.Я. Тарновским, А.Ф. Головиным, С.И. Губкиным и др. были получены закономерности формоизменения металла, в частности предложены предельные кинематические схемы течения металла, одна из которых соответствует максимальному трению, – нормальная, вторая – минимальному, – радиальная (рис. 1).

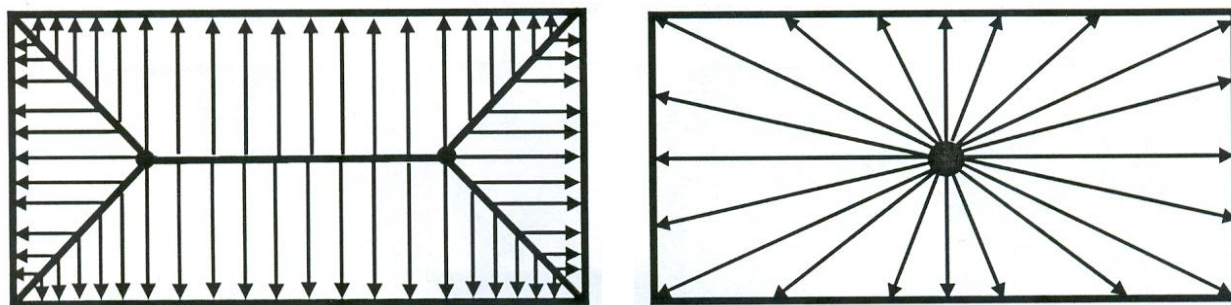


Рисунок 1 – Предельные кинематические схемы течения металла:
слева – нормальная, справа – радиальная

Авторы предельных кинематических схем (нормальной и радиальной) не скрывали их противоречивость реальным процессам пластического формоиз-

менения при осадке плоских образцов и предполагали в действительности существование некоторой промежуточной схемы.

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 такую КСТМ можно называть «псевдонормальной» (рис. 2).

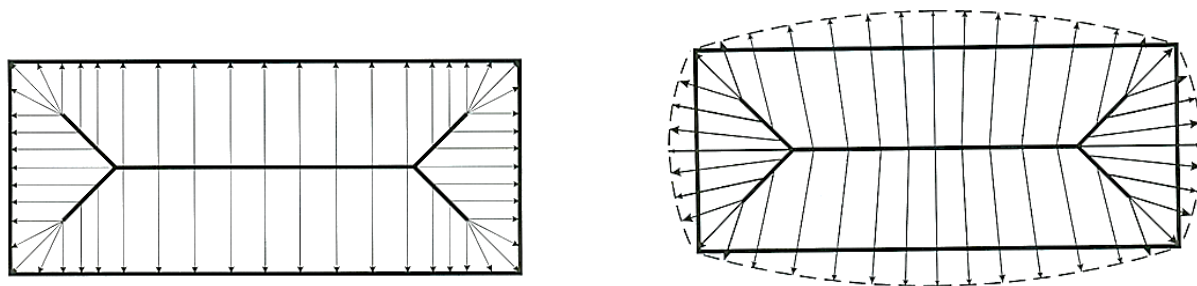


Рисунок 2 – Псевдонормальная схема течения металла

Именно она положена в основу наших исследований, алгоритмов и разработанного ПК.

Существование промежуточной схемы течения металла подтверждается также виртуальными экспериментами с помощью специализированных программ, например, программного комплекса DEFORM (табл.).

Таблица. Моделирование пластического течения металла в DEFORM

<div>Фактор трения</div> <div>Степень деформации</div>	$k = 0,1$	$k = 0,5$	$k = 0,9$
$\varepsilon = 0,1$			
$\varepsilon = 0,5$			
$\varepsilon = 0,75$			

Таким образом, анализируя результаты виртуальных экспериментов и используя накопленные данные, относящиеся к реологическим особенностям ма-

териалов, а также опыт исследования уже существующих КСТМ и зависимость их от различных факторов, можно предположить, что промежуточная кинематическая схема течения металла является псевдонормальной.

Анализ предельных случаев, положенных в основу построения КСТМ, позволяет получить достаточно очевидный график зависимости радиуса реального контура заготовки R от фактора трения k . Однако мы можем с точностью определить только два крайних положения этого графика: при максимальном трении радиус R реального контура имеет вполне определенное значение R^* , а при отсутствии трения радиус контура стремится к бесконечности. Поведение же графика в промежуточной зоне остается неизвестным. При этом очевидно, что при любом трении радиус контура R имеет конечное значение.

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 толщиной 4 и 20 мм.

На основании полученных результатов были построены графики (рис. 3) зависимости радиуса контура заготовки R , отнесенного к ее начальной толщине h_0 , от фактора трения k .

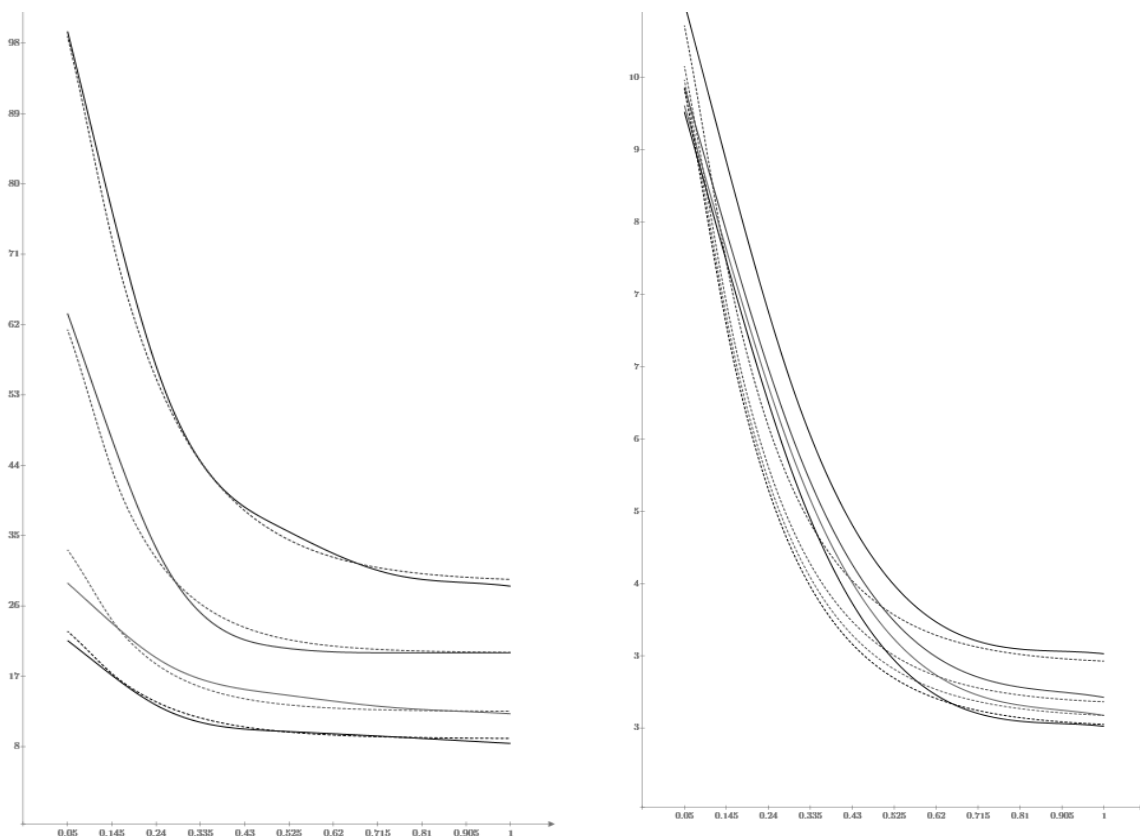


Рисунок 3 – Графики зависимости $R/h_0 = f(k)$ для «тонкой» (слева) и «толстой» (справа) пластин

Анализ полученных кривых позволяет сделать вывод, что графики имеют вид либо показательной, либо обратной функции. Тогда на основании приведенных графических зависимостей можно получить аналитические зависимо-

сти, которые описываются показательной функцией вида: $R/h_0 = a^{(bk-c)} + d$, где a, b, c, d – коэффициенты, характеризующие форму и положение функции. Таким образом, можно утверждать, 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. Несложные преобразования позволяют получить соотношение:

$$S_i = S_0 / (1 - \varepsilon_i),$$

из которого следует, что при любой степени деформации ε_i на любой i -ой стадии осадки формоизменение сечений заготовок, количественно определяемых начальной S_0 и текущей S_i площадью, перпендикулярных к действию внешней силы, не зависит от начальной толщины заготовки.

В третьей главе рассматривается методика построения картины течения металла (КТМ) по полотну заготовки.

Вначале приводится анализ исследований КТМ отечественными и зарубежными учеными прошлого века. В частности, К. Зоббе экспериментами по осадке цилиндрических и призматических образцов достаточно большой толщины полностью подтвердил принцип наименьшего периметра. А.А. Ильющин доказал, что если пластическое течение металла в виде тонкого слоя между двумя движущимися с одинаковой скоростью жесткими поверхностями инструмента происходит при одинаковых условиях трения, то существует аналогия между эпюрой обобщенного давления в области течения и эпюрой «песчаной насыпи». Эти идеи легли в основу «теории течения тонкого слоя». А.А. Ильющин 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. С помощью «песчаной насыпи» определяют линии тока и распределение скоростей течения, при этом линии, соответствующие ребрам «песчаной насыпи», отражают геометрическое место точек наибольшего давления. Эти линии в проекции на плоскость контакта и есть ЛРТМ в соответствии с принципом наименьшего сопротивления. Базируясь на «теории тонкого слоя» А.И. Петров 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. Внутренний скелет контура, с помощью которого можно моделировать ЛРТМ, – это геометрическое место точек центров окружностей, находящихся внутри контура и касающихся его в двух точках, то есть эквидистанта контура. А.И. Петров успешно использовал «скелет контура» для моделирования операций волочения, прессования, холодной и горячей прокатки профилей.

Далее в третьей главе рассмотрены гипотезы и закономерности, положенные в основу нами разработанной, так называемой, «эквипотенциальной теории».

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 допущениями. Ярким примером такого подхода служит метод конечных элементов, положенный в основу практически всех современных CAD/CAE систем и имеющий вышеупомянутые ограничения.

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 КТМ и построения пространственной эпюры контактных давлений (ПЭКД) является упомянутая «теория течения тонкого слоя», основанная на допущениях, упрощающих исходную систему дифференциальных уравнений. В таких случаях приходится отказываться от всеобщности математической модели и ограничиваться описанием всего нескольких процессов ОМД, пренебрегая 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 формообразовании которых ПЭКД представляет собой поверхность одинакового ската. При этом ЛРТМ – проекция гребней ПЭКД, а ЛТ – проекции образующих поверхности ПЭКД. 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 вышеуказанным принципам: наименьшего сопротивления, кратчайшей нормали и наименьшего периметра, – лежащим в основе «экви-теории». «Экви-теория» дает возможность 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 плит.

Приведены алгоритмы построения КТМ для односвязных и многосвязных контуров в форме многоугольников, кусочно-нелинейных функций. Подробно рассмотрен алгоритм построения КТМ для многоконтурных поковок, которые охватывают все многообразие реальных изделий. Алгоритм основан на разбиении контуров на точки, из которых выбирается первоначальная точка. Далее цикл идет не по точкам, а по участкам контура. Другими словами, ищется точка, равноудаленная от первоначальной и участка контура.

Если фрагмент прямая линия, новые координаты узловой точки $(x; y)$ определяются из соотношений

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

$$y = \gamma(x - x_p) + y_p,$$

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

x_0, y_0 – координаты начала рассматриваемого фрагмента;

x_p, y_p – координаты начала предыдущего фрагмента;

δ – точность вычислений.

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

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

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

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 δ .

Разбивка контура выполняется с соблюдением заданного максимального шага.

Производная в точке вычисляется соответственно

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

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

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 γ_i – направление перпендикуляра к касательной в рассматриваемой точке контура;

γ_u – направление перпендикуляра к рассматриваемому фрагменту.

Если $d < 0$, то потенциальной экви-точки (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 найдена ПЭТ для рассматриваемого фрагмента, тогда сравниваем длину ЛТ с минимальной длиной линий тока всех предшествующих фрагментов всех контуров 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.

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

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 известно, поверхности одинакового ската имитируют пространственную эпюру контактных давлений. Таким образом,

EQUI позволяет не только провести экспресс-анализ КТМ, но и построить ПЭКД.

В четвертой главе анализируется актуальность создания нового программного комплекса и приводится сравнение с уже используемыми: показаны возможности моделирования ПЭКД и КТМ с помощью САД-систем КОМПАС и SolidWorks; представлено моделирование КТМ для сложных контуров с помощью ПК DEFORM.

Подробно рассмотрено моделирование КТМ и ПЭКД с помощью разработанного ПК EQUI. Вначале приводятся результаты моделирования КТМ для односвязных и многосвязных контуров (рис. 4).

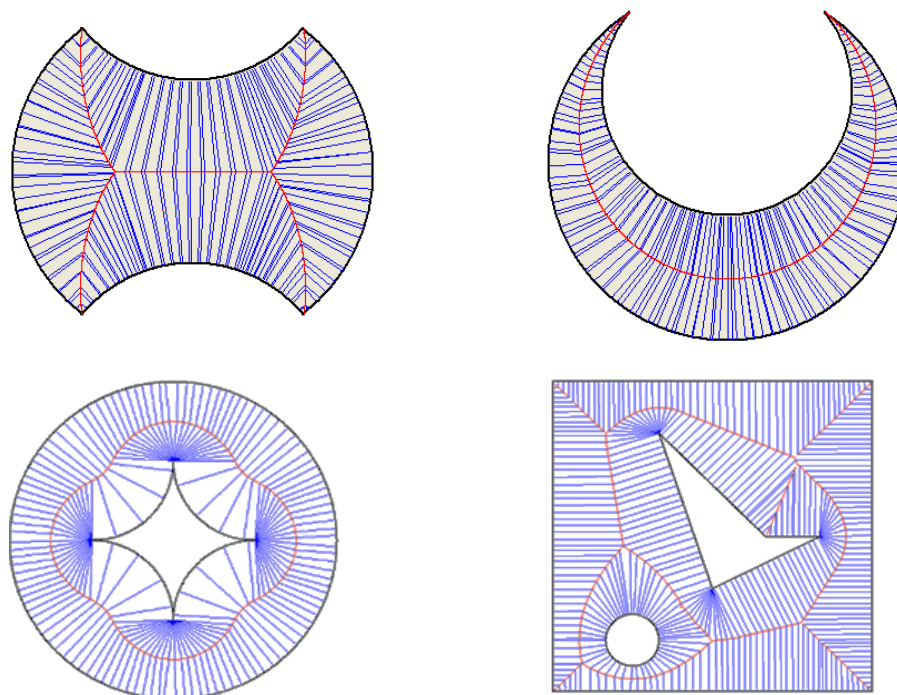


Рисунок 4 – Картина течения металла для односвязных (верхний ряд) и многосвязных (нижний ряд) контуров

Исходя из анализа КТМ для односвязных контуров, можно сделать вывод, что центральные зоны заготовок, состоящих из дуг окружностей и внутренние зоны вогнутых дуг будут формироваться более активно, т.к. в этих зонах ожидается наиболее интенсивное течение металла. Наименее интенсивного формообразования следует ожидать в угловых зонах. Для многосвязных контуров формоизменение круглых заготовок с вырезами различной формы 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 и квадратов с нецентральными вырезами показывает, что наиболее интенсивного течения металла следует ожидать в центральных зонах, а наименьшего – в угловых точках. Следовательно, заготовки в ходе деформации по форме должны приближаться к кругу.

Основой всех расчетов и компьютерного моделирования формообразования серийных поковок служит выявление закономерностей течения металла по

плоскости контакта инструмента и заготовки. При этом 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.).

С целью исследования КТМ и сравнения результатов было выполнено моделирование процесса осадки сложных многоконтурных серийных поковок с помощью ПК Parshtamp и разработанного ПК EQUI. Результаты моделирования представлены на рис. 5 (ЛРТМ обозначены красным цветом, ЛТ – синим).

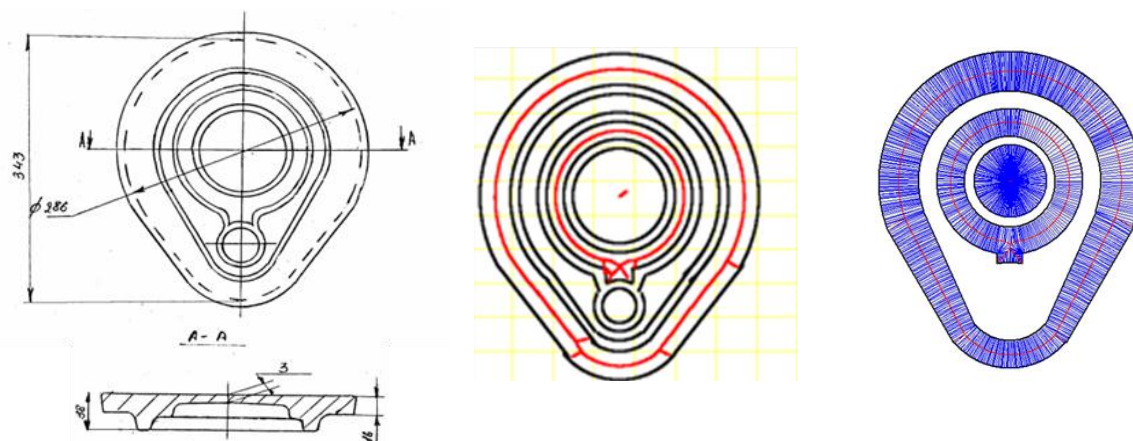


Рисунок 5 – Построение ЛРТМ с помощью ПК Parshtamp и КТМ с помощью ПК EQUI

В промышленных условиях реальные поковки состоят из нескольких многосвязных контуров. Разработанный ПК EQUI позволяет успешно решить задачу построения КТМ для любых многоконтурных поковок, причем построение выполняется одновременно во всех ячейках.

Разработанный ПК EQUI дает возможность получить наглядную картину расположения ЛРТМ (рис. 6) и оценить неравномерность течения металла по

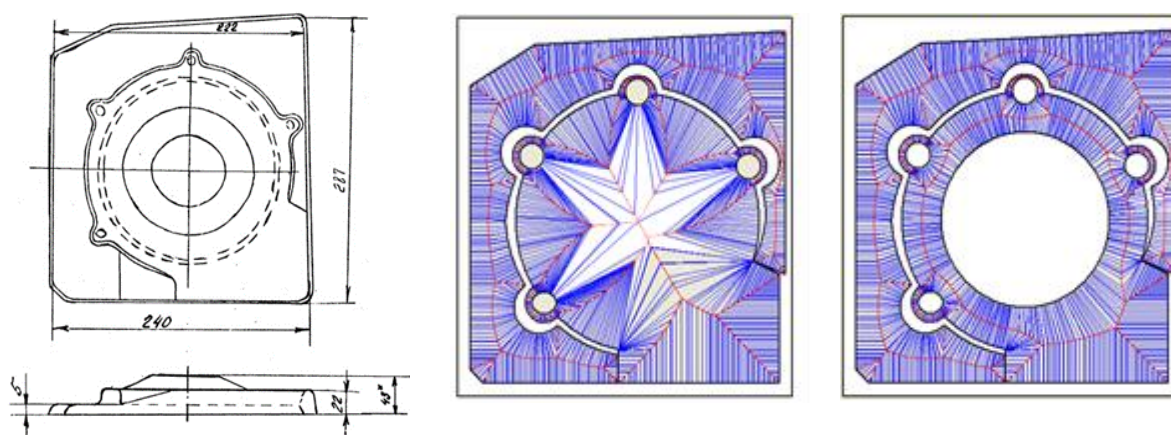


Рисунок 6 – Сравнение результатов моделирования для серийной поковки без выреза и с вырезом

плоскости контакта инструмента и заготовки. Анализ КТМ сплошной заготовки и заготовки с технологическим вырезом позволяет сделать вывод, что заготовка

с вырезом будет иметь более равномерное формирование в центральной части, кроме этого, использование технологического выреза позволяет снизить потребные усилия пресса.

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 в разных ракурсах (рис. 7).

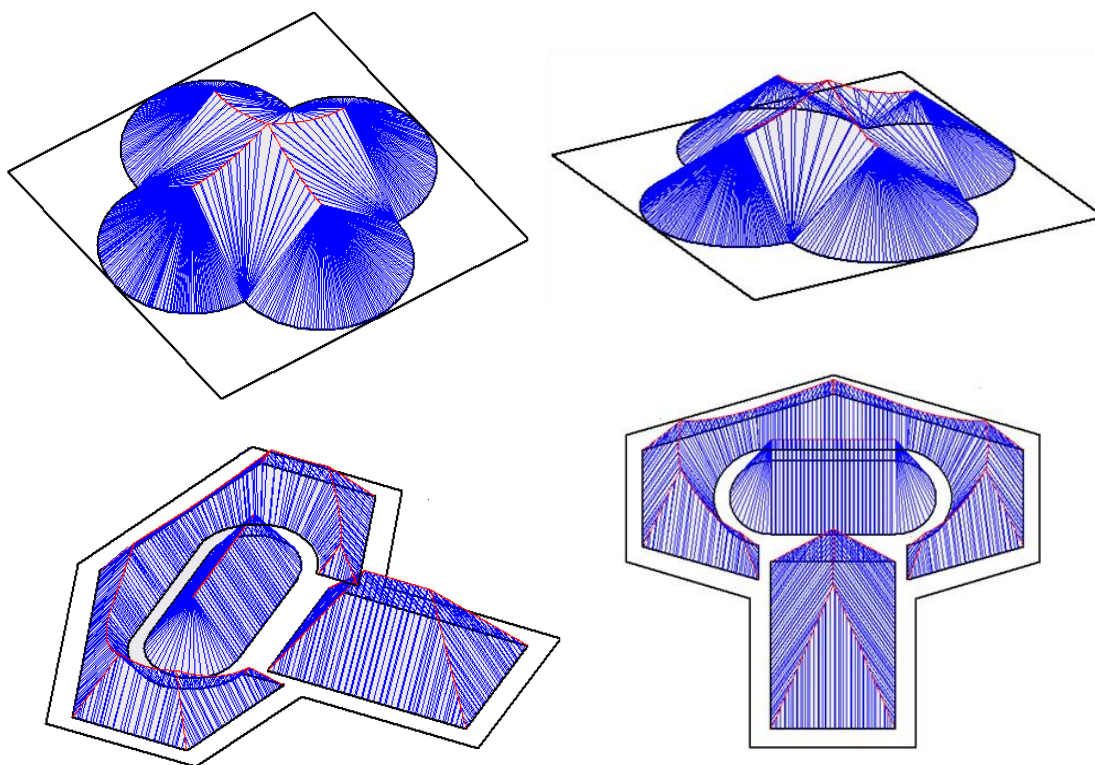


Рисунок 7 – Результаты моделирования ПЭКД
в разных ракурсах

В пятой главе проведено физическое моделирование формоизменения плоских заготовок.

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 лабораторные эксперименты по осадке пластилиновых образцов.

Вместе с тем с целью апробации разработанного ПК EQUI было проведено компьютерное моделирование КТМ при осадке плоских заготовок, имеющих форму «звезда» и «четырёхлистник» (рис. 8).

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 положи-

ями, можно предположить, что заготовка в форме «звезды» в ходе деформации сначала превращается в выпуклый многоугольник, а затем должна по форме приближаться к кругу.

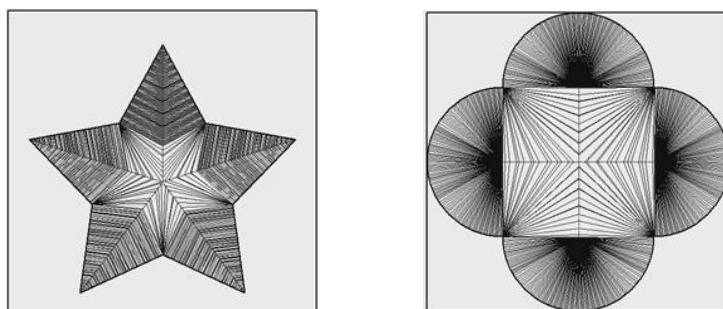


Рисунок 8 – Картина течения металла для тестовых контуров

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 лабораторный эксперимент по осадке пластилиновых плоских заготовок, имеющих форму «звезды» и «четырёхлистника». Образцы осаживались поэтапно до степени деформации: $\varepsilon = 0,33, 0,54, 0,75$ и $0,83$ (рис. 9).

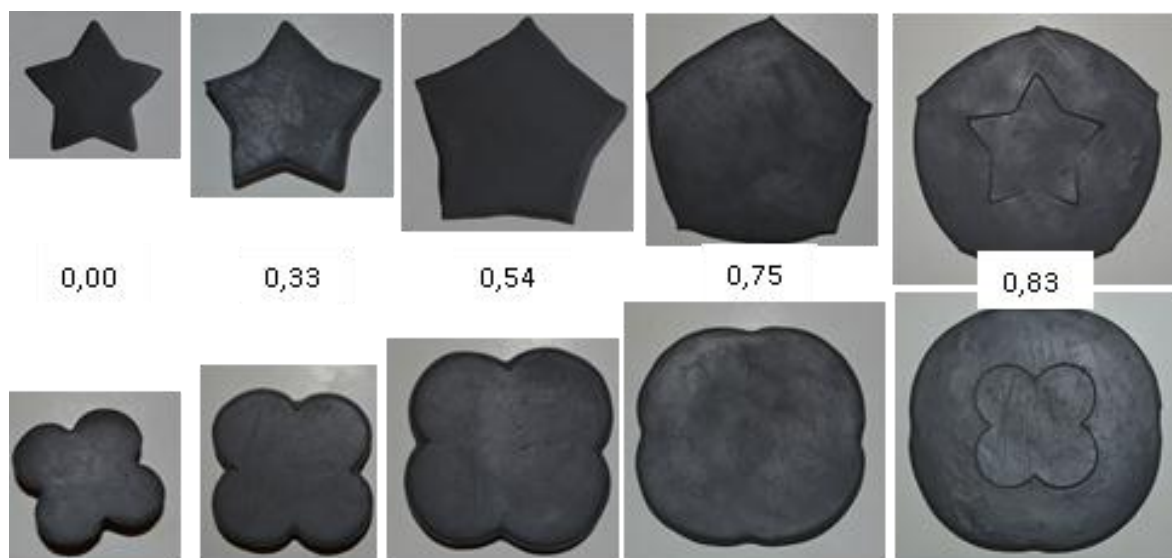


Рисунок 9 – Постадийная осадка пластилиновых образцов в форме «звезда» и «четырёхлистник»

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 дефор-

мирующим поверхностям пресса в качестве прокладки использовалась полиэтиленовая пленка.

Как видно из эксперимента, 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.

Экспериментально и теоретически доказана независимость формы и площади сечения деформируемого образца от начальной толщины заготовки.

Представлена апробация разработанных методики и ПК EQUI в промышленных условиях на примере моделирования КТМ для серийной поковки. На основании полученных результатов выработаны рекомендации по улучшению технологии производства сложноконтурных поковок.

Основные результаты и выводы:

1. Анализ разработок в области компьютерного моделирования процессов ОМД показал актуальность выполненных исследований и позволил выполнить 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. Признано, что научно обоснованной является «псевдонормальная» схема, в которой линии тока ортогональны условному контуру.

3. Разработана «эквидистантная теория» течения металла по полотну заготовки, положенная в основу методики и алгоритмов численного решения задачи компьютерного моделирования формообразования поковок, на базе которых создан программный комплекс EQUI.

4. Компьютерное моделирование картины течения металла для многосвязных кусочно-нелинейных контуров и многоконтурных поковок с помощью программного комплекса EQUI позволило произвести экспресс-анализ формообразования тестовых и серийных поковок.

5. При промышленной апробации разработанных методики и программного комплекса EQUI результаты моделирования и расчетов показали хорошую сходимость с фактическими результатами штамповки выбранных изделий.

6. Разработаны рекомендации по обоснованию и использованию технологических приемов, базирующиеся на результатах компьютерного моделирования картины течения металла с помощью программного комплекса EQUI. В частности, предложено поковку штамповать за один переход в окончательном штампе, что приведет к экономии штамповой стали и других ресурсов.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. 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.

2. 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 государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2014. – С. 209-215.

3. 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.

4. 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.

5. 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. – С. 203-208.

6. Соломонов, К.Н. Особенности применения САД-систем к моделированию необратимых процессов / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук // Необратимые процессы в природе и технике: труды восьмой Всероссийской конференции. – М., 2015. – С. 91-94.

7. Соломонов, К.Н. Компьютерное моделирование формообразования поковок / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, А.К. Соломонова // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XV Международной конференции. – Воронеж, 2015. – С. 426-430.

8. Соломонов, К.Н. Автоматизация проектирования процессов изготовления поковок / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, А.К. Соломонова // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий: сборник трудов VIII Международной научной конференции. – Воронеж, 2015. – С. 340-342.

9. Тищук, Л.И. Использование неразрушающего контроля для определения несплошности металлоизделий / Л.И. Тищук, К.Н. Соломонов // Научно-технический прогресс в металлургии: труды VIII Международной научно-практической конференции. – Темиртау, 2015. – С. 160-164.

10. 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.

11. 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.

12. Solomonov, K. Picture of metal flow in the processes of forging of flat workpieces / K. Solomonov, L. Tishchuk // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2016. – No 4. – P. 437-442.
13. 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.
14. Соломонов, К.Н. Автоматизация расчетной схемы формообразования поковок / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, Е.Ф. Романенко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Техника и технологии». – 2016. – № 3. – С. 60-67. [**Рекомендован ВАК**].
15. Соломонов, К.Н. Применение технологических приемов в процессах получения поковок / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, Д.Н. Романенко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Техника и технологии». – 2016. – № 4. – С. 31-36. [**Рекомендован ВАК**].
16. 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.
17. Соломонов, К.Н. Моделирование технологических методик пластического деформирования / К.Н. Соломонов, Н.И. Федоринин, Л.И. Тищук // Известия Самарского НЦ РАН. – 2017. – № 1. – С. 517-519. [**Рекомендован ВАК**].
18. 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. [**Рекомендован ВАК**].
19. 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.
20. 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. – С. 190-193.
21. Соломонов, К.Н. Закономерности формообразования плоской заготовки в процессахковки и штамповки / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, Н.И. Федоринин // Collective monograph on the XVIII International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering and physics». – Czestochowa, 2017. – P. 258-265.
22. Соломонов, К.Н. Моделирование пластилином формоизменения металла при горячей деформации / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук // Кузнец-2017: сборник научных статей и докладов XIII Международного конгресса. – Рязань, 2017. – С. 318-320.
23. Тищук, Л.И. Влияние трения на формоизменение плоской заготовки / Л.И. Тищук, К.Н. Соломонов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – № 3. – С. 251-253. [**Рекомендован ВАК**].