

1553031

На правах рукописи

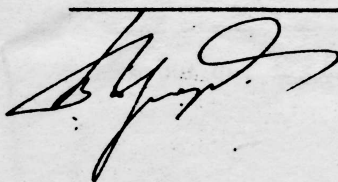
БОРОЗДИН Вячеслав Анатольевич

**КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ
ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ И ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 05 03.05 - Процессы и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва 1996

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки
и техники РФ д.т.н., профессор Овчинников А.Г.

д.т.н., профессор Романцев Е.А.

д.т.н., доцент Сосенушкин Е.Н.

Ведущая организация ГНПШ "Темп"

Защита диссертации состоится "12" 02 1997 г. на заседании диссертационного совета Д053.15.05 при Московском

государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 267-09-63

Автореферат разослан "24"

Ученый секретарь совета
кандидат технических наук, доцент

Подп. к печ. Р24.12.96 Объе
Типография МГТУ им. Н.Э. Баума

1553031



1553031

Бороздин В.А. Комплексная

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

2. Проблема сокращения сроков и стоимости подготовки производства на протяжении последних десятилетий оказывает мощное стимулирующее воздействие на развитие средств автоматизации технологического проектирования. В настоящее время данная проблема усугубляется недостатком инвестиций, высокой стоимостью кредитов и жесткими требованиями товарного рынка, в связи с чем особую актуальность приобретает комплексная автоматизация технологической подготовки производства (ТПП), охватывающая все ее этапы.

Комплексный подход к созданию САПР применяли и прежде, объединяя на единой методологической и информационной основе проектирование технологических процессов и оснастки, а также подготовку управляющих программ для обработки штампового инструмента. Однако область применения указанных САПР ограничивалась типовыми техническими решениями и узким перечнем изделий в пределах составленного классификатора. Узкая специализация САПР затрудняла их тиражирование.

Устранение данного недостатка требует отказа от ограничений на форму образующей поверхности изделия, которые присущи любому классификатору. Ввод геометрической информации в этом случае приобретает ключевую роль. Уровень компьютерной подготовки специалистов в среднем невысок, поэтому ввод данных и другие проектные процедуры должны основываться на мощной интеллектуальной поддержке действий пользователя САПР (от которого требуется лишь построение эскиза изделия и задание размеров на эскизе). Компьютер самостоятельно изменяет пропорции эскиза и строит технологические переходы на основании проставленных размеров). Данные о форме и размерах изделия и переходов используют для математического моделирования формоизменения заготовки, либо для верхней оценки деформирующей силы.

Система ТПП в соответствии с принципом разделения труда выводит решение сложных технических задач за рамки серийного производства, оставляя последнему рутинные функции. С появлением числового программного управления данный принцип распространен и на мелкосерийное производство, однако некоторые виды обработки являются в этом смысле исключением. В частности, программное управление кузнечным оборудованием в принципе возможно, но его реализацию сдерживают объективные трудности: отсутствие детерминированной связи между программируемым перемещением дросселя или крана управления и конечным результатом - фор-

моизменением заготовки. Решение данной задачи на уровне математического моделирования работы кузнечного оборудования придаст системе ТПП законченный характер, серийное производство освободится от операций, требующих высокой квалификации рабочих.

Работа выполнена в соответствии с заданием 016.10 комплексной программы ГКНТ СССР, межвузовской целевой комплексной программы "Порошковая металлургия" на 1982-1989 годы и гранта на фундаментальные исследования в области машиностроения 1995 г.

Цель работы. Создание САПР, охватывающей разные этапы технологической подготовки кузнечно-штамповочного производства и широкую номенклатуру полых осесимметричных и плоских изделий, обеспечивающей сокращение сроков и стоимости проектирования на основе интеллектуализации проектных процедур, математического моделирования формоизменения заготовок и работы оборудования.

Задачи работы

1. Создание базы знаний для принятия решений по выбору принципиальной схемы обработки заготовок, для расчета деформирующих сил и прогнозирования качества изделия при изготовлении осесимметричных штампованных изделий типовых форм.
2. Разработка методики и соответствующей ей базы САПР процессов изготовления порошковых деталей с изменением технологической наследственности, содержащейся в исходном порошке и связанной с технологией его производства.
3. Создание процедуры ввода формы и размеров осесимметричных и плоских изделий в полной номенклатуре, доступной широкому кругу специалистов, не имеющих компьютерной подготовки.
4. Исследование и уточнение правил задания размеров, принятых в инженерной графике, для обнаружения и идентификации ошибки ввода и редактирования графических данных.
5. Разработка технологий автоматизированного проектирования переходов и инструментов штамповки на основе автоматизации редактирования и параметризации изображений проектируемых объектов.
6. Разработка имитационных моделей и их применение в САПР в качестве альтернативы громоздким расчетам и экспериментальной отладке процессов ковки и штамповки.
7. Исследование и математическое моделирование работы приводного пневматического молота с учетом изменения состояния поковки и внешних

факторов при обработке в режиме непрерывных ударов с целью экономии энергии.

8. Разработка методики автоматизированного проектирования технологических процессовковки на приводных молотах, включая подготовку программ, управляющих работой ковочного комплекса, с обеспечением заданных размеров поковок при наименьшем числе ударов.
9. Практическое применение созданных компонентов САПР для подготовки производства осесимметричных и плоских изделий методамиковки и штамповки.
10. Разработка технологических процессов и штампов, их апробация и внедрение на промышленных предприятиях с целью подтверждения высоких показателей производительности и качества проектирования и внесения значительного вклада в ускорение научно-технического прогресса.

Методы исследования. Теоретические исследования удельных сил, действующих на пуансоны при выполнении формоизменяющих операций, выполнены энергетическим методом. Экспериментальные исследования влияния способов подготовки заготовок и схем нагружения на качество деталей проведены путем многофакторных экспериментов с использованием регрессионного анализа и статистической проверки адекватности моделей.

Основные положения, вынесенные автором на защиту:

- созданная база знаний САПР процессов холодной штамповки изделий наиболее распространенных форм типа стаканов и втулок, предназначенная для автоматического расчета деформирующих сил методом верхней оценки с использованием кинематически допустимого поля скоростей,
- математические модели, позволяющие прогнозировать качество изделий при изготовлении штамповкой деталей типовых форм,
- разработанная методика и соответствующая ей база знаний САПР процессов изготовления порошковых деталей с изменением технологической наследственности, содержащейся в исходном порошке и связанной с технологией его производства,
- созданная новая технология ввода графических данных осесимметричных и плоских изделий с произвольной формой образующей, содержащая построение эскиза, нанесение размеров и автоматическое изменение пропорций эскиза в соответствии с размерными данными; ввод поддерживается контролем достаточности размеров,
- разработанная технология автоматизированного проектирования переходов штамповки по откорректированным размерам изделия, в соответствии

с которой компьютер может изменять не только пропорции, но и топологию образующей,

- разработанная методика дескрипторного имитационного моделирования плоского или осесимметричного деформирования заготовок на основе растровой компьютерной графики, обеспечивающая графическое определение промежуточных размеров заготовок для согласования направляющих поверхностей пуансона и матрицы,
- созданная методика подготовки управляющих программ для производства поковок простых форм, основанная на имитационном моделировании работы ковочного комплекса и установленная при этом функция, отражающая снижение коэффициента трения,
- созданный алгоритм микропроцессорного управления ковочным комплексом, защищенный авторским свидетельством, согласно которому управляющая программа может работать в адаптивном режиме совместно со средствами сбора и обработки в реальном времени информации о состоянии заготовки,
- разработанные технологические процессы и штампы для их реализации, внедрение которых подтвердило высокие показатели производительности и качества проектирования и как результат высокое качество изделий.

Научная новизна.

1. База знаний САПР процессов холодной штамповки изделий типа стакан и втулка из металлопроката и порошковых материалов, предназначенная для расчета деформирующих сил методом верхней оценки и охватывающая типовые формы изделий.
2. Решения методом баланса мощностей задач по определению деформирующих сил при выдавливании цилиндрическим пуансоном с коническим торцем и коническим пуансоном с плоским торцем.
3. Методика изменения технологической наследственности, накопленной в порошковой заготовке, путем выбора рациональных механических схем ее деформирования.
4. Методика ввода произвольной (не типовой) формы и размеров образующей поверхности изделия в виде эскиза полилинии с последующим автоматическим изменением пропорций эскиза в соответствии с заданными значениями размеров.
5. Модель внутримашинного представления полилинии в виде ломаной и таблицы размеров, на которой определены 6 правил обработки данных, охватывающих все корректно заданные комбинации размеров.

6. Обобщенные признаки некорректного задания отрезков прямых и дуг окружностей, при котором они не могут быть построены традиционными средствами, несмотря на формальную достаточность данных.
7. Технология автоматизированного проектирования переходов штамповки по откорректированным размерам изделия, в соответствии с которой компьютер изменяет пропорции и форму образующей, а также рассчитывает один из размеров, исходя из постоянства объема металла.
8. Методика дескрипторного моделирования плоского или осесимметричного деформирования заготовок на основе растровой компьютерной графики.
9. Математическая модель рабочих процессов приводного пневматического молота с учетом переменного сопротивления деформированию со стороны поковки и изменения условий трения в механических узлах рабочего цилиндра.
10. Методика программирования работы ковочного комплекса на базе приводного пневматического молота (ППМ) с учетом изменения внешних факторов в течение серии последовательных ударов.

Достоверность результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы обоснована:

- использованием фундаментальных положений теории пластического течения; термодинамики, механики;
- соответствием полученных теоретических результатов данным экспериментов;
- положительным опытом внедрения компонентов САПР и спроектированных технологических процессов.

Практическая ценность.

Созданная методика интеллектуальной поддержки САПР изделий типовых форм, заключающаяся в автоматизированном расчете деформирующих сил по введенным исходным данным (классификационному коду детали, ее размерам и материалу) позволяет при проектировании исключить ошибки в определении необходимых для штамповки сил, связанные с недостаточной подготовкой пользователя в теории обработки давлением. Как результат исключаются ошибки в выборе прессового оборудования.

Применение в САПР технологических процессов изготовления деталей типовых форм разработанных математических моделей для прогнозирования качества поковки позволяет сократить сроки технологической подготовки производства и затраты на штамповку опытных партий повок.

Созданная база данных и методика САПР технологии изготовления деталей из железных и стальных порошков, предусматривающая возможность изменять технологическую наследственность, связанную с методом производства порошкового материала, позволяет изготавливать детали с требуемыми механическими характеристиками при использовании наиболее дешевого порошкового материала.

Разработанная процедура ввода исходных графических данных в виде эскиза полилинии обеспечивает широкую область применения САПР в объеме полной номенклатуры осесимметричных и плоских деталей, позволяет снизить требования к компьютерной подготовке пользователей.

Технологии автоматизированного проектирования переходов и инструментов штамповки на основе математического моделирования формоизменения заготовок и интеллектуализации проектных процедур придают САПР высокие показатели производительности и качества результатов работы.

Комплексный подход к математическому моделированию работы оборудования с учетом внешних факторов, а также единая методология обработки графических данных позволяют распространить САПР на все этапы технологической подготовки производства, включая подготовку управляющих программ для обработки штампового инструмента и для обработки заготовок на ковочных комплексах.

Разработанные компоненты САПР внедрены на МПО “Станкостроительный завод им. С. Орджоникидзе”, Астраханском заводе КПО, на предприятиях п.я. А-1450, п.я. Р-6266, п.я. Г-4249 и п.я. Х-5498, в учебный процесс в МГТУ им. Н.Э. Баумана и Орловском ГТУ.

Материалы работы использованы в учебном пособии по компьютерному конструированию штампов (рекомендованному УМО вузов по образованию в области машиностроения и приборостроения для обучения по специальности “Машины и технология обработки металлов давлением”) и в учебном пособии по статистическим методам математического моделирования (издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Межгосударственной научно-технической конференции в Магнитогорске в 1994 г., Всероссийской научно-технической конференций в Самаре в 1994 г., Международной научно-технической конференции в Ростове-на-Дону в 1994 г., Всероссийской юбилейной научно-технической конференции “100-летие со дня рождения профессора А.И. Зими́на” в 1995 г.,

Всероссийской научно-технической конференции в Ульяновске в 1995 г., Международной научно-технической конференции в Минске в 1995 г., дважды на научных семинарах кафедры по профилю специальности в МГТУ им. Баумана в 1995 и 1996 гг.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы представлено в 2 учебных пособиях, 33 статьях, трудах и тезисах докладов конференций, авторских свидетельствах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения с основными выводами по работе, списка литературы из 238 наименований, приложений. Общий объем диссертации 270 страниц машинописного текста, 24 таблицы и 116 рисунков. К диссертации приложены документы о внедрении и практическом использовании результатов работы в промышленности и учебном процессе, результаты расчетов, программа управления автоматизированным ковочным комплексом, фотографии экспериментальных установок.

Автор благодарит профессоров А.М. Дмитриева и С.И. Вдовина за консультации при подготовке представленной диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, научная новизна и практическая ценность. Сформулированы требования, относящиеся к САПР в целом и к ее основным процедурам, призванные обеспечить комплексную автоматизацию технологической подготовки производства, сокращение ее сроков и стоимости, высокое качество результатов проектирования.

В первой главе выполнен анализ состояния проблемы и дана развернутая постановка задач работы. Комплексный характер создаваемой САПР обуславливает необходимость проведения исследований в широком спектре.

Важным преимуществом автоматизированного проектирования процессов обработки металлов давлением является использование вычислительных возможностей компьютера для повышения точности расчета и оптимизации режимов формоизменения заготовок.

При обратном и прямом выдавливании металл заготовки сразу или почти сразу заполняет полость штампа, а затем вытекает в зазор между матрицей и пуансоном, образуя цилиндрическую стенку или стержень изделия.

Деформирующую силу рассчитывают на основании кинематически допустимого поля скоростей, что представляет собой метод верхней оценки. В его разработку внесли основополагающий вклад Н.С. Петров, Э. Зибель, И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго. Реализация метода верхней оценки применительно к расчетам операции выдавливания осесимметричных изделий представлена в трудах А.Г. Овчинникова, Л.Г. Степанского, В.А. Евстратова, А.М. Дмитриева.

По сравнению с методом конечных элементов с его громоздкими вычислениями формулы верхней оценки сил достаточно просты, однако они не универсальны и должны быть представлены в САПР в соответствии с принятым классификатором типовых форм изделий. За основу может быть принят каталог, предложенный проф. Евстифеевым В.В. для изделий типа тел вращения, изготавливаемых холодным выдавливанием. Для части представителей каталога получены формулы сил выдавливания, остальные необходимо получить с использованием граничных условий и заданных разрывов скоростей на границах зон пластического течения.

Дальнейшее развитие автоматизированного проектирования требует интеллектуализации проектных процедур. Концепция представления и обработки знаний предусматривает отказ от жестких алгоритмов в пользу правил, сконцентрированных в базы знаний и экспертные системы. Это относится, в частности, к формулам усилий штамповки типовых изделий, а также правилам принятия решений при назначении маршрута обработки. Значительное влияние на методологию САПР, в том числе и экспертных систем, оказали труды Г.К. Горанского, Л. Заде, Н.М. Капустина, М. Минского, И.П. Норенкова, Г.П. Тетерина, Г.В. Орловского, С. Осуга и др. Системный подход к автоматизации ТПП штампованных изделий развит Л.Б. Аксеновым, А.Э. Артесом, М. Грувером, В.А. Осиповым, В.В. Павловым, Ю.М. Соломенцевым, Ф.-Л. Шпуром и др.

Одной из ключевых проблем САПР технологических процессов и оснастки является ввод графических данных. Работы ведутся по двум направлениям: совершенствование системы компьютерного черчения типа Автокад и разработка методов параметрического конструирования. Последнее преследует цель повышения производительности конструирования путем варьирования значениями параметров программ, выполняющих построение параметризованных объектов в автоматическом режиме. Работы последних лет С.Е. Богомолова, А.Г. Горелика, Г.Б. Евгенева, Д. Роллера, Х. Хагена указывают на то, что однозначно лучшего метода параметризации не существует -

все зависит от вида работ и класса объектов, на которые ориентирована САПР.

Для относительно простых геометрических объектов, какими являются осесимметричные и плоские изделия, оптимальным решением представляется создание процедуры ввода образующей с автоматическим приданием ей свойств параметризованного объекта. Варьируя значениями размеров, можно изменять пропорции образующей и ее топологию, получая таким образом изображения переходов и инструментов штамповки. Обеспечивается высокая производительность проектирования и снижаются требования к компьютерной подготовке пользователей САПР. Технологи смогут вводить эскиз изделия на глаз с помощью одной команды, тогда как их общее число в компьютерной графике составляет десятки. Конструкторы штампов получают возможность параметризовать изображения различных деталей, не прибегая к составлению программ.

Создание новых технологий ввода и редактирования графических объектов на основе варьирования размерами требует разработки алгоритмов и программ интеллектуальной поддержки действий пользователя. Замена размерных построений рисованием эскиза повышает вероятность задания некорректных комбинаций размеров. Наиболее трудна идентификация ошибок, когда с формальной точки зрения размеры заданы правильно, однако по ним нельзя выполнить построения или расчет образующей традиционными средствами. Данная проблема прежде не исследовалась, но в связи с развитием компьютерных технологий черчения и конструирования становится весьма актуальной.

В условиях мелкосерийного производства штампованные заготовки часто оказываются экономически невыгодными из-за высокой стоимости специальных штампов. Альтернативная технология получения заготовок свободной ковкой характеризуется низкими показателями производительности и точности обработки. Для их улучшения предпринимаются попытки перевода ковочного оборудования с ручного управления на программное. Пока дело ограничивается экспериментальными образцами, поскольку задача чрезвычайно сложна. Особенно много проблем связано с программированием работы оборудования ударного действия. Необходимо учитывать сопротивление поковки деформированию, увеличение кинетической энергии падающих частей вследствие осадки заготовки на предыдущем ударе, а также определить функциональную зависимость скорости рабочего поршня от управляемых перемещений крана.

Сформулированная задача может быть решена двумя путями. Первый предполагает имитацию обработки конкретных заготовок с использованием математического моделирования работы ковочного комплекса. Имитационное моделирование позволяет выбрать режимы, при которых число ударов является минимальным, и управляющее воздействие в течение серии ударов также минимально, либо вообще отсутствует.

Второй подход заключается в создании адаптивной системы управления. Подобные системы применяют в некоторых видах обработки давлением, в частности для управления трубогибными машинами. Система датчиков регистрирует изменение размеров заготовки и выдает информацию для оперативной корректировки положения управляемого органа. Учитывая реальные производственные условия, система управления ковочным комплексом должна обладать высоким быстродействием, устойчивостью к вибрациям и повышенным температурам.

Оба подхода к решению задачи создания программного управления являются наукоемкими, требуют проведения исследований (включая натурные эксперименты), математического моделирования работы ковочного оборудования.

Во второй главе описаны методы САИР, основанные на применении классификаций и формализованного описания деталей. Эти методы применены к технологическим процессам изготовления полых осесимметричных деталей. Рассмотрена технология изготовления деталей холодной объемной штамповкой (ХОШ). Спецификой операций ХОШ является большая величина удельных сил, действующих на поверхность деформирующего инструмента и во многих случаях ограничивающих применение ХОШ для изготовления деталей из среднеуглеродистых и легированных сталей. В настоящее время с развитием методов решения задач, связанных с выбором маршрута обработки в зависимости от классификационного кода детали, все большее внимание уделяют проблемам методологии проектирования, в частности, интеллектуальной поддержке для определения удельных сил штамповки в зависимости от относительных размеров детали и ее материала.

В данной работе разработана методика интеллектуальной поддержки САИР, основанная на установлении в зависимости от классификационного кода детали комбинации типовых схем очагов пластической деформации. Создан банк подходящих функций, описывающих скорости течения для каждого из рассматриваемых типовых схематизированных очагов и граничных условий. Эти функции используют при применении метода баланса мощно-

стей для определения сил штамповки. В тех случаях, когда в заготовке имеют место не один, а два или более очагов пластической деформации, применяется соответствующий перерасчет усилия штамповки. Все описанные действия ПЭВМ выполняет автоматически по заданному классификационному коду детали.

При создании банка подходящих функций и их использовании в решениях методом баланса мощностей задач обработки давлением решены две новые задачи. Это определение удельной силы при внедрении цилиндрического пуансона с коническим торцем (рис. 1, а) и внедрение конического пуансона с плоским торцем (рис. 1, б).

Для области I очага пластической деформации на рис. 1,а скорости течения описаны следующими функциями:

$$v_{\rho} = \frac{v_0 \rho}{2h}; \quad v_z = -\frac{v_0}{h}(\rho \cdot \operatorname{ctg} \alpha - z)$$

Эти функции отвечают граничным условиям: $v_{\rho}(\rho=0)=0$, $v_z(z=\rho \cdot \operatorname{ctg} \alpha)=0$; $v_z(z=\rho \cdot \operatorname{ctg} \alpha + h)=-v_0$, где v_0 - скорость перемещения пуансона.

В области II на рис. 1,а скорости течения заданы, как в известных решениях по выдавливанию деталей типа стакана.

Для области III очага пластической деформации на рис. 1,б скорости течения описаны следующими функциями:

$$v_{\rho} = \frac{[1+(z-h)\operatorname{ctg} \alpha](R^2-\rho^2)\operatorname{ctg} \alpha}{\rho\{R^2-[1+(z-h)\operatorname{ctg} \alpha]^2\}^2}; \quad v_z = -\frac{v_0}{R^2-[1+(z-h)\operatorname{ctg} \alpha]^2}$$

Эти функции отвечают граничным условиям: $v_{\rho}(\rho=R)=0$; $v_n = v_z \cos \alpha - v_{\rho} \sin \alpha$; $v_z(z=h)=-\frac{v_0}{R^2-1}$, где v_n - скорость, нормальная к конической поверхности пуансона.

Для областей I и II на рис. 1,б скорости течения заданы, как в известных решениях по выдавливанию деталей типа стакана.

Применение разработанной методики для решения конкретных задач и сопоставление расчетных результатов с экспериментальными показало, что расхождение между ними не превышает 13%.

В этой же главе приведены исследования, направленные на прогнозирование качества деталей, в частности, прогнозирование полу-

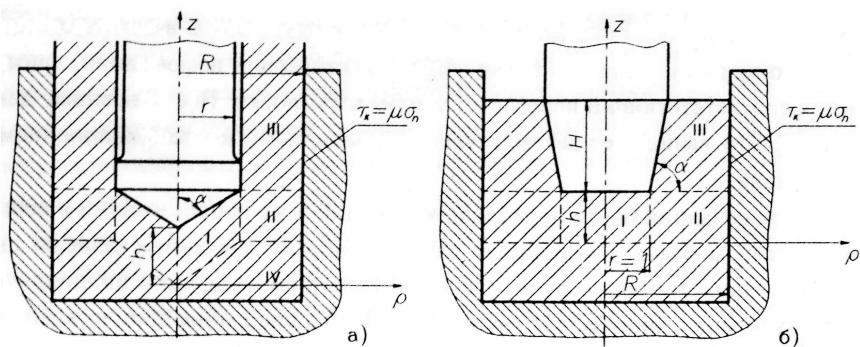


Рис. 1. Схемы операций выдавливания: а - цилиндрическим пуансоном с коническим торцем; б - коническим пуансоном с плоским торцем.

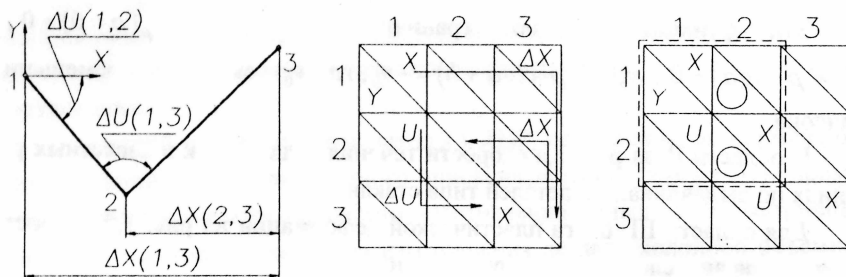


Рис. 2. Обработка данных по правилам треугольника и квадрата 2×2

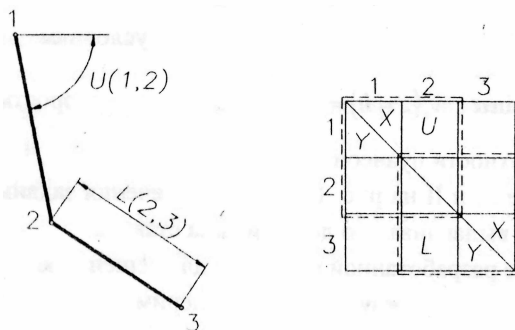


Рис. 3. Расчет смежных отрезков и точки сопряжения

чаемых в результате ХОШ механических характеристик разностенности при выдавливании глубоких полостей, возможных дефектов в виде трещин и утяжин в зависимости от примененной схемы выдавливания. Результаты исследований описаны математическими моделями, удобными для применения в САПР.

В третьей главе рассмотрена холодная штамповка деталей из железных порошков с изменением содержащейся в порошках технологической наследственности.

Порошковая деталь состоит из элементов - частиц порошка, скрепленных между собой. Для обеспечения требуемого комплекса механических свойств, которыми будет обладать порошковая деталь, важно, какой формы будут отдельные элементы, как эта форма влияет на величину площади контакта между элементами и возможность соединения их между собой неразрывными связями. Кроме того, поскольку соединение происходит путем диффузионных процессов, большое значение имеет состояние поверхности соединяемых частиц.

В случае, если деталь изготавливают из порошковой стали, конструкция состоит уже не из однородных элементов, а из различных по размерам, по физическим и химическим свойствам, по способности уплотняться, спекаться между собой и др.

Форма частиц железного порошка существенно меняется в зависимости от способа его получения. Таким образом, в процессе изготовления деталей из металлических порошков ярко проявляется технологическая наследственность, которая влияет на возможности формования деталей из порошков одинакового химического состава, но полученных разными способами. Среди таких способов в крупносерийном производстве порошков применяются - восстановление из оксидов и распыление расплава.

Уплотняемость металлического порошка - его способность уменьшать занимаемый объем под воздействием давления или вибрации. По ГОСТ 25280-82 эта характеристика оценивается по плотности образцов, изготовленных в цилиндрической пресс-форме при давлениях 400, 500, 600, 700 и 800 МПа. Отметим недостаток этого технологического свойства, поскольку рассматривается только способность уменьшать объем под действием давления осевого сжатия или вибрации, т.е. предполагается, что частицы порошка уплотняются без изменения первоначальной формы.

Специалисты по обработке металлов давлением имеют возможность создавать такие схемы деформирования засыпанной в пресс-форму порции порошка, при которых все частицы принимают лепешкообразную или ните-

образные формы для порошков с различными исходными формами частиц. Таким образом, технологическая наследственность, связанная с методом получения железного порошка, может быть исправлена. Однако в порошковой металлургии при формовании порошковых деталей это не учитывают, и, несмотря на большой регламентированный ГОСТами набор физических и технологических свойств порошка, способность к изменению формы частиц в процессе уплотнения не оценивают. Новизна нашего подхода состоит в описанных ниже исследованиях возможности компенсации технологической наследственности при уплотнении порошков.

В работе описаны исследования влияния механической схемы уплотнения порошковой заготовки на достигаемые плотность и прочность порошковой детали. Результаты исследований описаны математическими моделями. Анализ моделей показал, что независимо от марки порошка формование деталей по схемам, обеспечивающим значительные сдвиги частиц в заготовке, позволяет повысить плотность деталей на 10-12%, а их временное сопротивление разрыву - примерно в 2 раза, по сравнению с формованием по традиционным схемам.

Приведено исследование ХОШ цилиндрических полых деталей из спеченных порошковых заготовок. Установлено, что использование активных сил трения позволяет уменьшить удельную силу на пуансоне на 7-13%. При этом возможно холодное выдавливание спеченных заготовок из железного порошка, легированного порошком графита. При добавке 0,5% графита и выдавливании стаканов с наружным диаметром 30 мм и диаметром полости 22 мм удельная сила на пуансоне 2450 МПа.

Описаны исследования по изготовлению деталей из стальных порошков. Установлено, что проведение операции формования с интенсивными сдвигами частиц в заготовке позволяет повысить их плотность до 90% даже при применении наиболее трудно уплотняемого гомогенно легированного порошка. Это является существенным увеличением достигаемой плотности по сравнению с традиционно применяемыми схемами формования. На основании проведенных исследований разработан алгоритм автоматизированного проектирования штамповки порошковых деталей. Проводится последовательный расчет возможности достижения заданных механических характеристик детали при использовании наиболее дешевых порошковых композиций и изменении их технологической наследственности путем использования формования со сдвигами частиц в заготовке.

В четвертой главе представлены разработанные процедуры ввода не-

типовых форм и размеров изделий. Никакие классификаторы не могут охватить разнообразные формы изделий, поэтому без такого рода процедуры невозможно обеспечить широкую область применения САПР.

Учитывая невысокий уровень подготовки пользователей САПР, особенно технологов, в области компьютерной графики, разработанная процедура основывается на эскизировании образующей в виде произвольной последовательности отрезков прямых и (или) дуг окружностей. Пропорции эскиза также произвольны, после нанесения размеров они автоматически корректируются. Реализация процедуры потребовала высокой степени интеллектуализации алгоритмов компьютерной обработки графических данных.

Созданию подобных САПР уделяют большое внимание за рубежом. В начале 90-х гг. фирмой Hewlett-Packard опубликованы некоторые результаты исследования правил машиностроительного черчения, которые, будучи недостаточно формализованными, именно по этой причине являются удобными и сообщают инженерной графике свойства живого, естественного языка общения. Различают явные (explicit) и неявные (implicit) ограничения (constraints), заданные в чертеже. К первым относятся размеры, ко вторым - признаки, рассчитанные на визуальное восприятие: сопряжения, симметрия и др.

Компьютерная обработка данных эскиза образующей потребовала проведения исследования вышеназванных ограничений в количественном и качественном аспекте. Установлено число степеней свободы полилинии, каковой в общем случае является образующая, $s = 2N + N_d - 2$ независимо от ее характера - замкнутого или разомкнутого. Здесь N - число вершин полилинии, N_d - число дуг в ее составе. Компьютер фиксирует неявные ограничения в ходе рисования эскиза и затем помогает пользователю наносить размеры, сообщая об их недостаточности или избыточности.

Внутримашинная модель полилинии представляет собой упорядоченные массивы данных различных типов. В качестве иллюстрации на рис. 2 показана ломаная 1-2-3 и табличный массив заданных на ней координат и размеров. Обработка последних приводит к стандартному набору данных, располагающихся вдоль главной диагонали таблицы. Это - координаты X, Y вершин, длины L и углы наклона U отрезков. Расчет размерных цепей выполняется по правилу треугольника, которое иллюстрируют линии со стрелками, соединяющие вершины треугольных фрагментов таблицы. Если в двух вершинах имеем известные X и ΔX , в третью вершину заносится вычисленное значение

$$X(i) = X(j) + \Delta X(i, j) \text{sign}[\bar{X}(i) - \bar{X}(j)]$$

Функция знака оперирует экранными координатами $\bar{X}$, обеспечивая сохранение топологии эскиза образующей. Аналогично обработаны цепи вертикальных и угловых размеров. Последние отличаются тем, что одно и то же ограничение типа ΔU может быть задано двумя различными значениями размера, например 60° или 120° , в зависимости от того, в каком секторе пересекающихся прямых расположена размерная линия. Значение угла $U(m)$ отсчитывают от некоторого базового угла $U(n)$ с учетом функции знака

$$\text{sign}\{[\bar{X}(k) - \bar{X}(l)][\bar{X}(m) - \bar{X}(l)][\bar{X}(k+1) - \bar{X}(l)][\bar{X}(n) - \bar{X}(l)]\},$$

при этом значение размера $\Delta U(m, n)$ остается без изменения либо заменяется дополнением до 180° . Здесь $k, k+1$ - крайние точки размерной линии, l - точка пересечения прямых, которым принадлежат базовые отрезки углового размера, которые не обязательно являются смежными.

После расчета очередной координаты X, Y или угла U использованный при этом размер $\Delta X, \Delta Y$ или ΔU исключаются из массива как выполнивший свою роль, что облегчает дальнейшую обработку данных. Однако те же размеры как графические примитивы сохраняются на эскизе, их значения и базы могут быть откорректированы, что находит отражение во внутримашинной модели.

Рис. 2 иллюстрирует также правило квадрата 2×2 клетки таблицы, выделенного пунктиром. Когда в окрестности главной диагонали квадрата имеется 4 известных параметра, соответствующий отрезок ломаной полностью определен, и могут быть подсчитаны избыточные данные, относящиеся к нему. На рис. 2 это - ордината точки 2 и длина отрезка, они расположатся в местах, отмеченных кружками, после чего правило квадрата срабатывает для следующего отрезка.

В общем случае изложенные правила недостаточны для обработки данных, поскольку размеры образующей могут быть заданы в различных сочетаниях, на них не накладывается искусственных ограничений. Рис. 3 иллюстрирует расчет общей точки смежных отрезков, которая не может быть определена по данным одного отрезка. Возможность одновременного расчета двух отрезков определена при помощи правила двух пересекающихся квадратов 2×2 , они должны содержать 6 известных параметров. Это означа-

ет, что определены прямые и (или) окружности, на пересечении которых находятся искомую точку.

Дуги в составе образующей моделируются парами смежных отрезков одинаковой длины. Данное решение позволило упростить внутримашинное представление полилинии и свести к минимуму число правил обработки данных. Сопряжение отрезка и дуги отражено в таблице значением ΔU , равным 90° , в случае сопряжения дуги с дугой имеем пару коллинеарных отрезков, т.е. $\Delta U = 180^\circ$. Расчет точки сопряжения возможен, если выполняется правило квадрата 3×3 , он должен содержать 6 уже подсчитанных параметров. При этом не допускаются значения ΔU , отличные от 90° или 180° .

1553031
Полный набор правил обработки данных содержит, кроме перечисленных четырех, еще два. Одно из них служит для расчета точек сопряжения отрезка, заданного касательно к двум окружностям, которые к этому моменту уже определены, что удостоверяется наличием 8 известных параметров в двух квадратных фрагментах таблицы 3×3 , имеющих область пересечения 2×2 клетки. В числе известных параметров два типа ΔU со значениями 90° . Последнее, шестое правило относится к расчету точек сопряжения дуги с двумя заданными окружностями. Это правило отличается от предыдущего тем, что квадраты 3×3 имеют лишь одну общую клетку таблицы и содержат 10 известных параметров, из которых два задают $\Delta U = 180^\circ$.

Перечисленные правила включены в базу знаний обработки данных образующей в виде так называемых предикатов типа ЕСЛИ... ТО... Обработка данных организована в форме итерационного цикла с возвратом вверх после результативного применения очередного правила. Какие-либо ограничения на систему размеров образующей отсутствуют, поэтому невозможно назначить оптимальную последовательность проверки правил, однако удалось минимизировать возвраты в работе итерационного цикла и тем улучшить его по сравнению с простым перебором.

Отсутствие ограничений на систему размеров образующей имеет силу в рамках требования ЕСКД, которое сформулировано как обязательная возможность построения по заданным размерам. Данное ограничение регламентирует число размеров, оно должно быть строго необходимым. Кроме того, не допускаются некорректные комбинации размеров, в соответствии с которыми нельзя выполнить построения традиционными средствами - с помощью линеек и циркуля, хотя возможно пересчитать размеры к удобному виду, составив и решив систему уравнений.

Разумеется, в условиях автоматизированного проектирования любые вычисления доступны пользователю САПР, однако не следует отходить от сложившихся традиций инженерной графики, тем более, что для этого нет оснований. Некорректные сочетания размеров являются следствием невнимательной работы, функциональная необходимость именно в таких размерах отсутствует.

На основании анализа некорректных комбинаций размеров выработаны рекомендации по их недопущению.

Исследования, выполняемые в данной главе, выходят за рамки проблематики САПР процессов штамповки, но имеют к ней прямое отношение, будучи основой технологии автоматизированного проектирования штамповочных переходов, излагаемой ниже.

Пятая глава отведена созданию новых технологий автоматизированного проектирования переходов штамповки и штампового инструмента на основе алгоритмов обработки графических данных, разработанных в предыдущей главе. Они предназначены для ввода изображений осесимметричных изделий, но могут быть с успехом использованы также для редактирования последних, к чему сводится предлагаемая технология проектирования технологических переходов. Обеспечивается максимальная производительность и простота проектной процедуры, поскольку никаких графических построений не требуется - только корректировка значений размеров. Допускается также заменять одни размеры другими, например линейные - угловыми и наоборот.

Автоматизированное проектирование переходов штамповки на основе редактирования изображения изделия предусматривает соблюдение условия постоянства объема заготовки в процессе формоизменения. Рис. 4 иллюстрирует алгоритм расчета объема тела вращения, образующая которого состоит в общем случае из отрезков прямых и дуг окружностей. Образующая может быть замкнутой, если тело имеет отверстие, в противном случае считаем, что она замыкается осью вращения. Прямые пересекают замкнутый контур четное число раз, на рис. 4 они проведены перпендикулярно оси через вершины контура. Точки пересечения пронумерованы в направлении к оси вращения. Прямые могут касаться замкнутого контура либо совпадать с его прямолинейными участками. В таком случае они имеют двойную нумерацию - верхнюю и нижнюю, им соответствуют смещенные положения прямой чуть выше и чуть ниже номинального. Верхняя и нижняя прямые могут

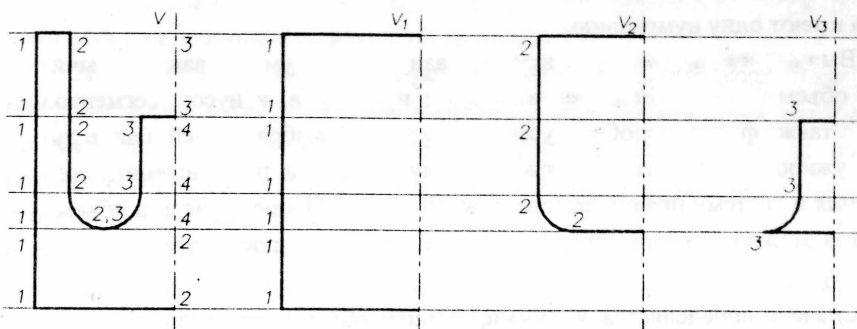


Рис. 4. Схема автоматического разбиения тела вращения на простые элементы

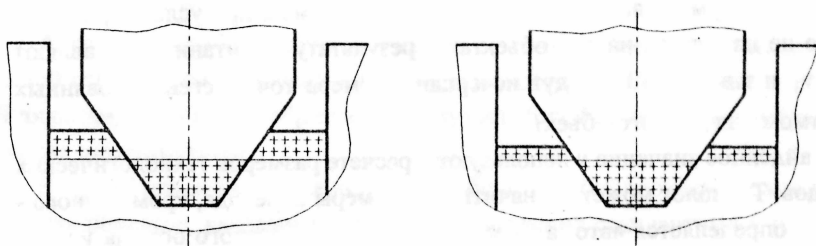


Рис. 5. Рецептная модель внедрения пуансона в заготовку:

слева - плоскодеформированное состояние;

справа - осесимметричное

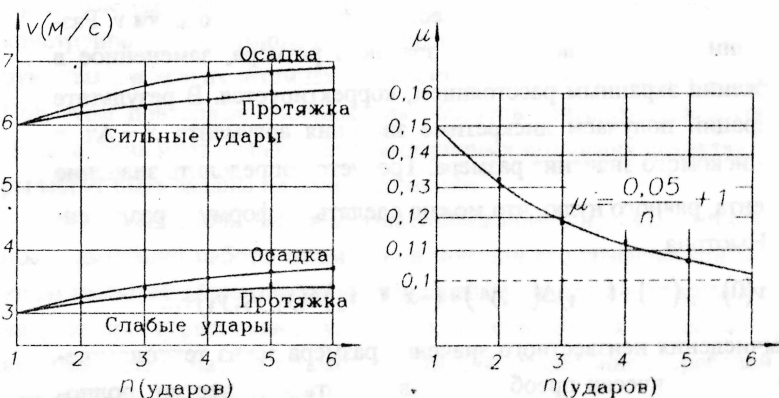


Рис. 6. Влияние порядкового номера удара на скорость рабочей массы (слева) и значение коэффициента трения (справа)

быть смещены в пределах контура лишь в одном направлении, поэтому они всегда имеют одну нумерацию.

Вычисление объема алгоритмизировано в виде суммирования и вычитания объемов простейших тел вращения: цилиндров, конусов, сегментов шара, а также фигур, подобных усеченному конусу с образующей в виде дуги окружности. Алгоритм содержит формулы объема перечисленных тел вращения и систему правил выбора нужной из них. Процесс расчета объема объектов можно в целом представить как конечную последовательность:

$$v = v_1 - v_2 + v_3 - \dots$$

Сначала определяется v_1 суммированием объемов тел вращения, чьи образующие проходят через точки пересечения с номерами 1. Из полученного значения v_1 вычитается суммарный объем v_2 тел вращения, вершины образующих которых совпадают с точками пересечения 2 при условии, что последние не находятся на оси объекта. К результату вычитания прибавляют объем v_3 и т.д., пока не будут исчерпаны номера точек, сгенерированных алгоритмом для данного объекта.

Найденное значение v используют в расчете размеров технологических переходов. Технолог может назначить все размеры перехода, кроме одного - того, что определяется автоматически, исходя из известного объема v заготовки. Этот размер вводят только лишь в виде выносных и размерной линий. Алгоритм обработки данных берет недостающее значение размера из базы экранных координат.

После обработки данных эскиза перехода соответствующая программа рассчитывает его объем и сравнивает с известным объемом заготовки v . Разность Δv_1 запоминается, а недостающее значение размера, замененное в первом приближении экранным расстоянием, корректируется. В результате нескольких итераций получаем дискретные значения аргумента $x = \Delta v$ и функции $y(x)$ - искомого значения размера. Требуется определить значение функции аргумента, равного нулю, что можно сделать по формуле разделенных разностей Ньютона

$$y(0) = y(x_1) + (-x_1)\Delta(y_1, y_2) + (-x_1)(-x_2)\Delta(y_1, y_2, y_3) + \dots$$

После вычисления неизвестного значения размера эскиз технологического перехода автоматически преобразуют в масштабный чертеж, полностью соответствующий заданному и вычисленному размерам. Переходы проектируют в обратной последовательности: из эскиза изделия получают

изображение последнего перехода, затем его трансформируют и так получают весь ряд переходов до исходной заготовки.

Нередко технологические переходы имеют топологические отличия, при этом форма образующей усложняется по мере прохождения заготовки по операциям технологического процесса. Проектирование переходов происходит в обратном порядке, поэтому необходимо изменять образующую в сторону упрощения. Разработанные в предыдущей главе алгоритмы обработки данных позволяют автоматизировать такого рода изменения. Предусмотрено правило, согласно которому значения размеров любого типа могут быть ненулевыми. Ввод размера с нулевым значением или изменение на нуль значения существующего размера оказывает практически такое же изменение в базе данных и на изображении, какое соответствует бесконечно малому значению размера.

Алгоритм обработки данных удаляет с эскиза размер, который задает нулевой отрезок или угол явным или неявным образом. Если точка, в которой ликвидируется излом образующей, служила базой линейного размера, то он также ликвидируется.

В САПР штампов всегда включают обширные библиотеки параметризованных объектов, каковыми являются изображения стандартных и нормализованных деталей. Наполнением библиотеки занимаются профессиональные программисты. Они не могут заранее предусмотреть типовые конструкции штампового инструмента и других деталей штампов, которые также заслуживают того, чтобы быть представленными в указанной библиотеке. Предлагаемая технология восполняет данный пробел: будучи применена для конструирования матрицы или пуансона, она позволяет применить эти инструменты и в других штампах с корректировкой рабочих или иных размеров. При этом повторные изображения объектов генерируются автоматически. Правда, речь идет пока об осесимметричных и плоских объектах, чьи размеры могут быть заданы на одной проекции.

Одно из преимуществ автоматизированного проектирования - возможность имитации работы штампа при помощи его графической модели. Для этого имеются общеизвестные стандартные средства - команды перемещения, поворота, растяжения указанных объектов. С их помощью проверяют взаимодействие частей штампа, имитируют извлечение из рабочей зоны отштампованной детали и др.

Одна из сложных задач имитационного моделирования заключается в отслеживании заполнения полости штампа. Например, при обратном выдавливании изделий типа стаканов металл заготовки вытекает в зазор между

матрицей и пуансоном, образуя цилиндрическую стенку изделия. Необходимо спроектировать штамповый инструмент таким образом, чтобы выход стенки за пределы матрицы и рабочего пояса пуансона происходил одновременно. В противном случае имеем недостаточную либо избыточную глубину матрицы, что приводит соответственно к снижению точности изделий, повышению усилия деформирования.

Сформулированная задача решена на основе рецепторной модели формоизменения заготовки. В качестве рецепторов используют пиксели растрового изображения, при этом сечение заготовки представлено множеством пикселей, цвет которых отличен от окружающего фона. Имитация формоизменения заготовки на пиксельном уровне происходит следующим образом. Имеются исходные, непересекающиеся изображения заготовки и пуансона, закрашенные отличным от фонового цветом. Во внутримашинной модели пикселям закрашенных областей и фона присвоены разные значения - соответственно 1 и 0. Пользователь САПР перемещает изображение пуансона относительно изображения заготовки так, что они частично пересекаются. Область пересечения соответствует объему металла, который перераспределяется в зазор между пуансоном и матрицей. Площадь данной области определяется логическим умножением значений пикселей, результат которого равен 1 лишь в том случае, когда значения сомножителей также равны 1.

На рис. 5 условно показаны пиксели, относящиеся к области пересечения изображений пуансона и заготовки, а также к объему металла, вытесненного из центра заготовки к периферии. В условиях плоской деформации число пикселей в названных областях одинаково, при осесимметричном формоизменении учитываются "веса" пикселей - расстояния до оси симметрии. Задача моделирования может быть сформулирована двояко: по заданной глубине внедрения пуансона в заготовку относительно исходного положения ее верхней границы определить перемещение последней, вызванное перераспределением металла; либо по заданному изменению высоты заготовки найти соответствующее текущее значение глубины полости.

Рецепторное моделирование в силу дискретного характера связано с некоторой погрешностью, но, учитывая высокую разрешающую способность растровых дисплеев и возможность изображения заготовки в увеличенном масштабе, погрешность может быть сведена к 0,1 мм и менее, что вполне допустимо при назначении осевых размеров штампового инструмента. Преимущество предлагаемой методики состоит в том, что она реализуется с по-

мощью простой универсальной программы, использующей данные дисплейного файла. Традиционная методика предполагает аналитическое задание границ полости штампа, расчетные формулы в каждом конкретном случае должны быть запрограммированы в виде выражений Автолиспа либо в качестве отдельной прикладной программы. Таким образом, разработанная методика имитации формоизменения заготовки на основе рецепторного моделирования повышает производительность проектирования штампового инструмента и не требует от пользователей САПР навыков программирования.

В шестой главе представлены разработанные алгоритмы и база знаний микропроцессорной системы управления приводным пневматическим молотом (ППМ).

Ковочные комплексы на основе приводного пневматического молота, содержащие манипулятор и микропроцессорную систему управления, представляют собой перспективный вид оборудования для производства небольших партий заготовок. Подобные комплексы, выпускаемые некоторыми зарубежными фирмами, имеют существенный недостаток: энергию и количество ударов, необходимых для формирования поковки, подбирают заранее опытным путем и результаты этого подбора заносят в память управляющего микропроцессора. Попытки сделать систему управления адаптивной не имели успеха из-за низкой точности регистрации высоты поковки, скорости подвижных частей и других параметров.

Машины ударного действия, к которым относятся ППМ, являются весьма сложными объектами программного управления, система подготовки управляющих программ должна базироваться на математической модели, увязывающей энергию ударов молота T_3 и работу формоизменения заготовки A_0 . Качеством управления следует считать величину ΔT , определяемую как $\Delta T = T_3 - A_0/\eta_0$, где η_0 - КПД хода деформирования.

В базу знаний управляющего микропроцессора внесены формулы работы осадки, прошивки, протяжки и т.п., а также зависимости напряжения текучести от температуры, степени и скорости деформации. Получены уравнения, связывающие изменение давления dp/dt в полостях рабочего и компрессорного цилиндров с x_K - положением поршня компрессорного цилиндра, которое является строго детерминированным во времени. Эти уравнения содержат расходы энергоносителя в каналах управления, которые, в свою очередь, являются функциями угла поворота кранов управления $G = f(\alpha)$.

Уравнения движения рабочей массы связывают ее ускорение d^2x/dt^2 с давлением в полостях рабочего цилиндра, они содержат также коэффициент трения μ в узлах уплотнения, а в процессе удара учитывается сопротивление деформированию и изменение высоты поковки.

Зависимость $G = f(\alpha)$ установлена путем экспериментального определения T_3 в функции α , полученной для конкретных молотов. Как показали эксперименты, коэффициент трения не является постоянной величиной. В серии ударов он снижается от первоначального значения и стабилизируется после 5 ударов. Очевидно, сказывается изменение состояния трущихся поверхностей. В течение непрерывных ударов они равномерно увлажняются, роль сухого трения уменьшается.

Алгоритм расчета цикла автоматизированнойковки обрабатывает исходные данные, содержащие классификационные коды и размеры заготовки и поковки, код операции и режимы деформирования. Рассчитывается работа деформирования, которая сравнивается с $T_3^{\max} \cdot \eta_0$. В зависимости от результата сравнения программируется одиночный удар либо серия ударов с максимальной энергией и дополнительный удар, энергия которого в общем случае меньше максимальной. Определяются углы поворота кранов управления и количества импульсов для шагового двигателя, реализующего программное управление.

Наряду с математическим обеспечением жесткого программного управления разработан алгоритм адаптивного управления. При адаптивном управлении априорные модели машины и технологического процесса предполагаются неадекватными реальности. Это отражает ошибки измерения, случайные неконтролируемые помехи, приближенный характер формул работы деформирования и неточности расчетной зависимости $T_3 = T_3(\alpha)$. Очевидно, что в этом случае достичь нулевого отклонения ΔT практически невозможно, поэтому целевым условием адаптивного управления ПИМ является минимизация математического ожидания квадрата отклонения ΔT реализованной эффективной энергии $T_{\text{эф}}$ от ее оптимального значения A_0/η_0 .

Одним из способов организации обратной связи по результатамковки является контролирование высоты поковки на протяжении ковочного цикла. По отклонению Δh величины реализованного хода деформирования h_p от его расчетного значения h и по величине реализованной эффективной энер-

гии $T_{\text{зр}}$ на каждом из ударов определяют реальную необходимую работу деформирования $A_{\text{др}}$ для получения требуемой высоты поковки. Для определения реализованной эффективной энергии необходимо контролировать скорость v_p рабочей массы в конце хода разгона. Подобный контроль используется для восстановления регрессии $T_{\text{зр}} = T_{\text{зр}}(\alpha)$ по зафиксированным значениям α и $T_p = m v_p^2 / 2$. Регрессии $A_{\text{зр}}$ и $T_{\text{зр}}$ являются более адекватными моделями ППМ и технологического процесса, чем априорные, и осуществляемое по ним управление более качественно. Однако его реализация в техническом отношении более сложна.

В седьмой главе содержатся результаты экспериментальных исследований работы ППМ, связанных с разработкой системы программного управления ковочными комплексами. Исследования проводились на молотах моделей М4136 и М4140 с массой рабочих частей соответственно 400 и 1000 кг. Технические средства реализации программного управления ППМ включают коммутационное оборудование, приводы, исполнительные механизмы, а также датчики контроля технологических параметров.

Разработана конструкция сервопривода ППМ, воспринимающая сигналы от микропроцессора и обеспечивающая оптимальные параметры управления: быстродействие, гибкость, нужную угловую скорость поворота кранов управления. Она включает шаговый электродвигатель, соединенный с кранами управления конической зубчатой передачей, и блок управления шаговым двигателем.

Устройство контроля высоты заготовки содержит телевизионную камеру, сигнал которой после преобразования поступает на микропроцессор. Точность измерения высоты в производственных условиях $\pm 0,2$ мм. Энергию удара и скорость рабочей массы определяли с помощью индукционного ходографа, соединенного с гальванометром светолучевого осциллографа. При перемещении постоянного магнита, установленного на нижней части рабочего штока, в катушках индукционного ходографа наводится электродвижущая сила, пропорциональная скорости перемещения магнита. Согласно расчету относительная погрешность измерения скорости с учетом возможных отклонений в работе приборов, установке датчиков и прочих дефектов, не превышает 2,5%.

Датчики давления сильфонного типа производства ЭНИКМАШ были установлены на крышках и стенках компрессорного и рабочего цилиндров.

Комплексные государственные исследования были проведены в центре Государственных испытаний кузнечно-прессового оборудования в г. Воронеже. Была осуществлена запись энергетических и кинематических параметров работы молота в режиме “автоматические удары” во время осадки цилиндрической стальной заготовки (сталь 3) диаметром 100 мм, высотой 100 мм и протяжки бруса квадратного сечения 100х100 мм из того же материала. Заготовки были нагреты до ковочных температур. Деформирование осуществлялось при фиксированных углах α положения кранов управления. Запись проводили по двум сериям экспериментов: со слабыми ($\alpha = 20^\circ$) и сильными ($\alpha = 35^\circ$) ударами.

Расшифровка осциллограмм показала нарастание амплитудных значений давления в рабочем цилиндре при нанесении серии ударов, что объясняется уменьшением высоты заготовки при осадке и соответствующим увеличением хода разгона рабочей массы. Энергетические параметры компрессорного цилиндра практически не зависят от увеличения хода разгона, на них не влияет и величина открытия каналов управления молотом. Скорость движения рабочей массы увеличивается от удара к удару, рис. 6. Этот эффект наблюдается и при постоянной величине хода разгона (протяжка). Рост скорости связан с изменением условий трения в механических узлах рабочего цилиндра. Для программирования работы молота были определены зависимости эффективной энергии удара от угла поворота кранов управления.

Восьмая глава содержит данные о практическом применении САПР для проектирования технологических процессов штамповки осесимметричных изделий. Описаны разработанные технологические процессы штамповки холодным выдавливанием деталей из низкоуглеродистых, коррозионно-стойких и легированных сталей, а также формования и спекания высокоплотных деталей из железных порошков, апробированные на практике и внедренные в производство на машиностроительных предприятиях.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В выполненной диссертационной работе изложен комплекс научно обоснованных технологических решений, относящихся к этапам автоматизированной подготовки кузнечно-штамповочного производства, на которых выбираются технологические операции и определяются требуемые деформирующие силы, проектируются переходы штамповки и деформирующий инструмент, разрабатываются программы, управляющие работой кузнечного

оборудования. Применение этих решений сокращает сроки, стоимость проектирования, энергозатраты на выполнение технологических процессов.

2. Разработана методика интеллектуальной поддержки САПР, основанная на установлении в зависимости от классификационного кода детали типовых схем очагов пластической деформации. Для этих типовых очагов создан банк подходящих функций, описывающих скорости течения для каждого из них и граничных условий. Применение метода баланса мощностей при определении деформирующих сил, необходимых для штамповки и использование соответствующего их перерасчета в тех случаях, когда в заготовке имеют место не один, а два или более очагов пластической деформации, позволяет автоматически определить усилие штамповки.

3. Прогнозирование качества деталей предложено проводить с помощью приведенных в диссертации удобных для САПР математических моделей, построенных по результатам экспериментальных исследований. В частности, построены модели для описания получаемых механических характеристик деталей, разностенности при выдавливании глубоких полостей, возможных дефектов в виде трещин и утяжин в зависимости от примененной схемы выдавливания.

4. Показано, что применение рациональных механических схем деформирования порошковых заготовок позволяет существенно изменить технологическую наследственность, связанную с методом производства железных и стальных порошков. В частности, на 10-12% повысить плотность сформованных порошковых заготовок, в 2 раза повысить временное сопротивление разрыву изготовленных деталей. Рациональный выбор схем с учетом технико-экономических соображений производится с применением разработанного алгоритма САПР.

5. С целью снижения требований к компьютерной подготовке пользователей САПР разработана методика автоматизированного изменения эскиза образующей по заданным значениям размеров. Для этого разработана методика моделирования полилинии при помощи ломаной, методика табличного представления массивов размерных параметров ломаной и их обработки, алгоритм расчета цепей линейных и угловых размеров ломаной.

6. На основании разработанного математического обеспечения процедур обработки графических данных создана новая технология ввода в компьютер изображений осесимметричных деталей. Технология содержит построение эскиза, нанесение размеров и автоматическое изменение пропорций эскиза в соответствии со значениями размеров.

7. Новая технология ввода графических данных получили применение и развитие для автоматизированного проектирования технологических переходов, изображения которых строятся автоматически по откорректированным изображениям эскиза готового изделия. Один из размеров перехода определяется компьютером из условия постоянства объема заготовки, изменение формы переходов задают с помощью нулевых значений размеров эскиза изделия.

8. Для ускоренного построения типовых конструкций и создания в базе данных САПР библиотеки типовых деталей штампов разработана рецепторная имитационная модель формоизменения заготовки в условиях плоской или осесимметричной деформации. Модель обеспечивает интеллектуальную поддержку проектирования штампового инструмента.

9. В разработанном алгоритме управления приводным пневматическим молотом (ППМ) оперативное управление основано на использовании детерминированных функций работы деформирования и эффективной энергии удара, в адаптивном управлении эти функции представлены регрессиями, подлежащими восстановлению по ходу технологического процесса.

10. Разработанная математическая модель работы приводного пневматического молота на основе термодинамической системы с тремя степенями свободы позволила провести вычислительные эксперименты и показать существенное увеличение эффективной энергии от удара к удару при осадке цилиндрической заготовки. Установлена зависимость максимальной скорости рабочих частей от высоты заготовки и угла открытия кранов управления.

11. Записанные осциллограммы изменения давления в компрессорном и рабочем цилиндрах подтвердили адекватность разработанной математической модели работы молота. На основании проведенных экспериментов по программному управлению молотом с сервоприводом в макетном исполнении разработан промышленный вариант системы управления ковальным молотом.

12. Разработанные, апробированные в производственных условиях и внедренные технологические процессы объемной штамповки и конструкции штампов для их осуществления подтвердили высокие показатели качества проектирования. В результате достигнутого сокращения трудо- и энергозатрат в производстве внесен значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПЕЧАТНЫХ РАБОТАХ

1. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Статистическая теория в обработке давлением: Учебное пособие. - М.: Издательство МГТУ, 1994. - 122 с.
2. Компьютерное конструирование штампов / В.А. Бороздин, С.И. Вдовин, В.А. Голенков, А.М. Дмитриев: Учебное пособие с грифом УМО ВУЗов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. - 64 с.
3. Бороздин В.А. Анализ операции прямого выдавливания пружков из упрочняющегося материала // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Сборник научных трудов. - Тула: Тульский ГТУ, 1994. - С. 144-148.
4. Бороздин В.А. Безотходное изготовление роликов приводных цепей холодным выдавливанием // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1995. - № 1-3. - С. 106 - 110.
5. Бороздин В.А. Использование рецепторных моделей при автоматизированном проектировании штампов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. - № 11. - С. 20 - 21.
6. Бороздин В.А. Определение удельного усилия выдавливания цилиндрических стаканов с коническими полостями // Сборник трудов Московской академии приборостроения. - М., 1995. - С. 3 - 8.
7. Бороздин В.А. Повышение качества трубных деталей с пятиугольным фланцем при изготовлении методом высокоскоростного горячего выдавливания // Металлург. - 1994.-№7. - С. 37-38.
8. Бороздин В.А. Холодное выдавливание деталей с коническими ступенчатыми полостями // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Труды Тульского государственного университета. - Тула, 1995. - С. 23 - 28.
9. Бороздин В.А., Бочаров Ю.А., Вдовин С.И. Комплексная автоматизация технологической подготовки кузнечно-штамповочного производства // Оборудование и процессы обработки давлением: Материалы Всероссийской научно-технической конференции "100-летие со дня рождения профессора А.И. Зими́на".-М., 1995. - С. 96 - 103.
10. Бороздин В.А., Вдовин С.И. Алгоритм обработки параметров плоских линий // Вестник машиностроения. -1994. -№ 8. - С. 29 - 31
11. Бороздин В.А., Вдовин С.И. Проблемы компьютеризации технологического проектирования // Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. - № 5. - С. 20 - 22.
12. Бороздин В.А., Вдовин С.И., Голенков В.А. Компьютерное конструирование. Начальный этап обучения // Конструкторско-техно-

логическая информатика - КТИ-96: 3-й международный конгресс. - М.: СТАНКИН., 1996.- С.34-35.

13. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Автоматизированное определение усилия выдавливания стаканов с фигурными полостями // Оборудование и процессы обработки давлением: Материалы Всероссийской юбилейной научно-технической конференции "100-летие со дня рождения профессора А.И. Зимины". - М., 1995. - С. 104 - 110.
14. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Автоматизированное проектирование штамповки поковок выдавливанием // Информационные технологии в машиностроении: Тезисы докладов научно-технической конференции. - Ростов-на-Дону, 1995.- С. 66 - 69.
15. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Исследование разностенности деталей типа стаканов при штамповке выдавливанием // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1993.-№7-9. - С. 148-151.
16. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Исправление технологической наследственности при производстве деталей из железных порошков // Кузнечно-штамповочное производство. - 1994. - № 11. - С. 14-17.
17. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Качество машиностроительных деталей, изготовленных холодным выдавливанием из сталей // Надежность машин и технологического оборудования: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. - Ростов-на-Дону, 1994. - С. 190-193.
18. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Управление технологической наследственностью при производстве деталей из порошковых сплавов // Обработка легких и специальных сплавов: Сб. научных трудов, посвященный 90-летию со дня рождения академика А.Ф. Белова. - М.: Всероссийский институт легких сплавов, 1996. - С. 433 - 444.
19. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Производство деталей из железных порошков с изменением технологической наследственности // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1996, N 3. - С. 120-126.
20. Бороздин В.А., Дмитриев А.М. Штамповка деталей из спеченных порошковых заготовок с изменением технологической наследственности // Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. - № 2. - С. 17 - 18. .
21. Бочаров Ю.А., Бороздин В.А. Математическое моделирование процесса работы приводного пневматического молота в режиме "Автоматические удары" // Известия вузов. Машиностроение. - 1986.

- №8. - С. 140-144.
22. Бочаров Ю.А., Бороздин В.А. Математическая модель рабочих процессов пневматического молота // Известия вузов. Машиностроение. - 1987. - №11. - С. 101-103.
 23. Бочаров Ю.А., Бороздин В.А., Маркушин М.Е. Математическое обеспечение автоматического управления пневматическим ковочным молотом // Известия ВУЗов. Машиностроение. - № 1. - С. 129 - 133.
 24. Вдовин С.И., Бороздин В.А., Берлет Ю.Н. Компьютерные технологии учебного проектирования штампов // Применение средств вычислительной техники в учебном процессе кафедр физики, высшей и прикладной математики: Тезисы докладов третьего всероссийского (с участием стран СНГ) совещания-семинара. - Ульяновск, 1995. - С. 35 - 36.
 25. Вдовин С.И., Бороздин В.А., Берлет Ю.Н. Применение компьютерного черчения в общеобразовательных и технических дисциплинах // Применение средств вычислительной техники в учебном процессе кафедр физики, высшей и прикладной математики: Тезисы докладов третьего всероссийского (с участием стран СНГ) совещания-семинара. - Ульяновск, 1995. - С. 34 - 35.
 26. Вытяжка деталей пулеобразной формы из листовых заготовок / Ф.С. Абдуллаев, У.А. Абдуяминова, В.А. Бороздин, А.М. Дмитриев // Кузнечно-штамповочное производство. - 1996. - № 1. - С. 21 - 23.
 27. Дмитриев В.А., Бороздин В.А. Автоматизированное проектирование операций выдавливания // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в Белорусской государственной политехнической академии: Материалы Международной 51-ой научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов БГПА, посвященной 75-летию Белорусской государственной политехнической академии: - В 8-ми частях. - Минск, 1995. - Часть 8. - С. 39 - 40.
 28. Дмитриев А.М., Бороздин В.А. Изготовление вставок матриц холодным выдавливанием // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Труды Тульского государственного университета. - Тула, 1995. - С. 62 - 67.
 29. Дмитриев А.М., Бороздин В.А. Исследование процессов холодного выдавливания // Прогрессивные технологические процессы, оборудование и оснастка для холодноштамповочного производства: Тезисы докладов 2 Всероссийской научно-технической конференции. - Пенза - Самара, 1994. - С. 15 - 17.

30. Дмитриев А.М., Бороздин В.А. Механические характеристики деталей из различных железных порошков // Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-Уральского региона, секция "Металлургия": Материалы Межгосударственной научно-технической конференции. - Магнитогорск, 1994. - С. 126 - 128.
31. Дмитриев А.М., Бороздин В.А. Холодное выдавливание втулок с фланцами из коррозионностойких сталей // Сборник трудов Московской академии приборостроения. - М., 1995. - С. 93 -99.
32. Дмитриев А.М., Бороздин В.А. Холодное выдавливание конических стаканов с цилиндрической полостью // Вопросы исследования прочности деталей машин : Сборник научных трудов / Московская государственная академия приборостроения и информатики. - М., 1996. - Вып. 4. - С. 71-76.
33. А.с. 1353561 СССР, МКИ⁴ в 21 J7/24. Система управления пневматическим молотом / Ю.А. Бочаров, В.А. Бороздин, Б.В. Меньков и др. (СССР). - №4046737/31-27; Оpubл. 17.12.87, Бюл. № 43 // Открытия. Изобретения. - 1987. - №43. - С. 22.
34. А.с. 1473912 СССР. МКИ В 23 D 23/00. Устройство для автоматизированной отрезки дозированных по объему заготовок / Ю.А. Бочаров, В.А. Бороздин, Б.М. Сапожников и др. (СССР). - N 4246167 / 31-27; Оpubл. 23.04.89, Бюл. N 15 // Открытия. Изобретения. - 1989. - №15. - С. 45 - 46.
35. А.с. 1486252 СССР. МКИ В 21 J7/20. Вертикальный приводной пневматический молот / Ю.А. Бочаров, В.А. Бороздин, М.Е. Маркушин и др. (СССР). - №4286387/31-27; Оpubл. 15.06.89, Бюл. №22 // Открытия. Изобретения. - 1989. - №22. - С. 44.