

М 85800

МОСКОВСКИЙ
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

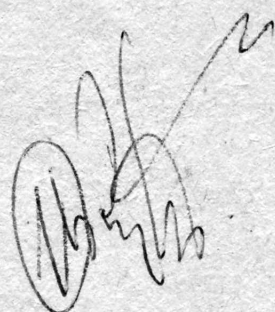
ЦЫГАНКОВ Сергей Владимирович

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ ЛИСТОВОЙ ПТАМПОВКИ

Специальность 05.03.05 -- Процессы и машины обработки
давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1992



Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового
Красного Знамени государственном университете имени
воссоединения Украины с Россией.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
С.И. Вдовин

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор
В.В. Павлов
к.т.н., доцент
И.С. Зиновьев

Ведущее предприятие: Киевский машиностроительный завод

Защита состоится "25 мая" 1992 г. в 10 часов на
заседании специализированного совета К 053.15.13 при Москов-
ском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени государственном техническом
университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5.

Библиотеке МГТУ имени

миллере, заверенный
директор.

" 1992 г.

И.Н. Шукин И.Н. Шукин

M85800



1085800

Цыганков С.В. Разработка

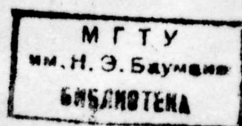
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Формообразование деталей посредством осесимметричной вытяжки, формовки и отбортовки листового материала, а также обжима и раздачи труб применяется в различных отраслях машиностроения. В некоторых отраслях, например в производстве космических летательных аппаратов, перечисленные процессы преобладают над прочими ввиду их высокой технологичности.

В качестве объекта автоматизированного проектирования осесимметричные операции листовой штамповки имеют существенное достоинство: они поддаются математическому моделированию с помощью относительно простых численных методов. Реализация данной возможности в условиях мелкосерийного производства с часто меняющейся номенклатурой изделий связана с ограничениями на расход вычислительных ресурсов, поэтому необходимо обеспечить высокое быстродействие проектных процедур и прежде всего - задания исходных данных об объекте производства и математического моделирования пластического течения материала.

Основными исходными данными являются форма и размеры детали, для их задания целесообразно воспользоваться компьютерной графикой как единственно универсальным средством подобного рода в отличие от различных систем кодирования названных исходных данных, применяющихся в САПР ТП. Существующие графические пакеты слишком громоздки, необходимо дать технологам возможность быстро и без предварительного обучения изображать на экране дисплея несложные технические объекты, к которым относятся осесимметричные листостампованные детали.

Математическое моделирование должно обеспечить адекватное отражение основных особенностей перечисленных выше процессов наряду с быстрой и безусловной сходимостью решения разрешающей системы уравнений. Выполнение этих требований обеспечит достоверное определение предельной степени формоизменения заготовок, а также утонения и упрочнения материала, что позволит технологам назначать наиболее рациональный состав операций, требующий минимального оснащения, и исключить брак.



1085800

Цель работы:

- повышение производительности проектирования осесимметричных операций листовой штамповки;
- уточненное определение технологических параметров формоизменения заготовок;
- назначение рациональной технологии изготовления деталей.

Задачи работы.

1. Разработать математическую модель осесимметричного деформирования листовых и трубных заготовок с учетом анизотропии и упрочнения материала, пассивных и активных сил контактного трения.

2. Выполнить исследования, направленные на повышение производительности и сходимости вычислительных алгоритмов математической модели.

3. Разработать процедуру эскизного компьютерного изображения осесимметричных деталей без ограничений по отношению к форме образующей и способу задания размеров.

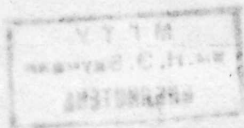
4. Разработать методику автоматизированного проектирования осесимметричных операций листовой штамповки на основе автоматической обработки эскизного изображения детали.

Научная новизна.

1. Создана математическая модель осесимметричного деформирования листовых и трубных заготовок, основанная на последовательном расчете элементов заготовки: разрешающими являются уравнения связи напряжений с конечными приращениями деформаций, при относительно малых приращениях тангенциальной деформации задают предельное соотношение между меридиональным напряжением и напряжением текучести, что исключает собой вычислительных алгоритмов.

2. Предложена форма разрешающего уравнения расчета элементов заготовки по схеме плоскодеформированного состояния, обеспечивающая быструю сходимость итерационного вычисления приращений деформаций.

3. Выработаны рекомендации в отношении дискретности математического моделирования пластического течения с учетом допустимых погрешностей вычисления выходных параметров.



4. Разработана методика автоматизированного проектирования осесимметричных операций листовой штамповки, основанная на автоматическом формировании массивов числовых исходных данных путем обработки эскизного изображения объекта производства.

Практическая ценность. Разработанные математическая модель и методика автоматизированного проектирования осесимметричных операций листовой штамповки составили основу подсистемы САПР ТП, обеспечив высокопроизводительное проектирование технологических процессов, уточненное определение предельной степени формоизменения заготовок, утонения и упрочнения материала; назначение технологом наиболее рациональных технологических маршрутов.

Реализация работы в промышленности. Создана и передана главному НИИТМ Министерства общего машиностроения подсистема САПР ТП листовой штамповки, предназначенная для внедрения на предприятиях отрасли. Ряд предприятий: Южный машиностроительный завод и др. приступили к опытной эксплуатации системы.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр технологии производства ДГУ, МТ-6 МГТУ, технологического проектирования СТАНКИН; на всесоюзной конференции "Интегрированные системы автоматизированного проектирования" (Вологда, 1989); на республиканской межвузовской конференции "Автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении и приборостроении" (Воронеж, 1989); на семинарах МДНТП (1990, 1991); на международной конференции "Молодые ученые за технический прогресс" (Киев, 1989).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 2 статьи и 3 доклада (в тезисах).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 129 страницах машинописного текста, включая 39 рисунков и 4 таблицы. Список использованной литературы содержит 120 наименований, приложение представлено на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности работы, формулировку цели, задач работы и научной новизны выносимых на защиту положений. Приведена общая характеристика работы.

Глава I. Методы автоматизированного проектирования технологических процессов листовой штамповки. Представлен аналитический обзор публикаций, сгруппированных по проблемам:

ввода исходных данных,
проектирования технологического маршрута,
численного расчета напряженно-деформированного состояния.

В САПР ТП листовой штамповки обычно не задействуют машинную графику как средство ввода исходных данных. Форму детали задают классификационным кодом, что можно считать приемлемым только при весьма небольшой и стабильной номенклатуре изделий.

Технологический маршрут изготовления детали назначается автоматически, если форму детали задают с помощью классификатора, в противном случае состав операций указывает пользователь САПР. Тот и другой подходы несовершенны: во многих случаях состав операций неочевиден, и нужно провести проверочные расчеты изготовления детали альтернативными способами. Необходимо иметь математическую модель формоизменения заготовки, которая охватывает различные схемы деформирования и позволяет выбрать наиболее рациональный маршрут на основе достоверных результатов расчета предельной степени вытяжки, утонения материала и т.п.

В математическом моделировании процессов листовой штамповки наиболее распространены методы конечных элементов, граничных элементов и последовательного расчета элементов заготовки. Последний более других отвечает требованиям производительности и универсальности, если исходить из безмоментной схемы внутренних сил, действующих в заготовке. Обоснования к применению данной схемы даны в трудах по теории листовой штамповки Исаченкова Б.И., Матвеева А.Д., Норичина И.А., Попова Е.А., Томленова А.Д., Шофмана Л.А., Яковлева С.П. и др. Там же проработаны другие важные аспекты математического моделирования пластичес-

кого течения листового материала: учет контактного трения, изгиба и сгибания материала и др.

Специфика численных расчетов процессов листовой штамповки порождает ряд проблемных вопросов по выбору системы разрешающих уравнений и формы их представления. Речь идет об уравнениях, которые не могут быть решены в квадратурах, поэтому корни вычисляют итерационными методами. Обеспечение сходимости итерационных вычислений приобретает решающее значение для быстрого действия процедур математического моделирования, достоверного расчета параметров процессов.

В результате анализа проблемы автоматизации проектирования осесимметричных операций листовой штамповки сформулированы цель и задачи работы.

Глава 2. Разработка математической модели осесимметричных процессов листовой штамповки. Моделируемые параметры: перемещения, деформации, напряжения дискретизируем в пространстве и времени, вводя понятия: элемент заготовки и этап процесса; число тех и других характеризует степень дискретности математической модели.

Постоянные приращения деформаций связаны соотношениями:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{\alpha}}{(k+1)\sigma_{\alpha} - k\sigma_{\theta}} = \frac{\Delta \varepsilon_{\theta}}{(k+1)\sigma_{\theta} - k\sigma_{\alpha}} = \frac{-\Delta \varepsilon_h}{\sigma_{\alpha} + \sigma_{\theta}} = \frac{\Delta \varepsilon_1}{(k+1)\sigma_1} \quad (1)$$

где k — показатель нормальной анизотропии.

В качестве независимой переменной задаем постоянное приращение тангенциальной деформации $\Delta \varepsilon_{\theta}$ на краю заготовки или на оси симметрии, а затем решаем систему уравнений:

$$\sigma_{\alpha} h(1 + \Delta \varepsilon_h) = N_{\alpha} \quad (2)$$

$$\Delta \varepsilon_h = \frac{-\Delta \varepsilon_{\theta}}{k+1} \left[1 + \frac{\text{sign}(\sigma_{\theta} - \sigma_{\alpha})}{k+1} \frac{\sigma_{\alpha}}{\sqrt{\sigma_1^2 - \frac{2k+1}{(k-1)^2} \sigma_{\alpha}^2}} \right] \quad (3)$$

Внутренняя меридиональная сила N_α определяется из условия равновесия элемента. Примеры графиков уравнений (2) и (3) приведены на рис. 1, первое из них - гипербола, второе получено из соотношений (1).

Функция знака $\text{sign}(\sigma_\theta - \sigma_\alpha)$ отрицательна в расчетах вытяжки и обжима, положительна в остальных случаях (раздача, отбортовка, формовка). Возможны также исключения, например при вытяжке $\Delta \varepsilon_\theta$, как правило, отрицательно, но на скругленной кромке пуансона имеется участок заготовки, который подвергается тангенциальному растяжению.

Система уравнений (2) и (3) решается итерационным методом, сходимость последовательных приближений обеспечивается при условии вычисления σ_α из уравнения (2), а $\Delta \varepsilon_\theta$ из уравнения (3). Решение, и притом единственное, всегда существует при $\sigma_\alpha < 0$, что характерно для обжима и раздачи. В случае $\sigma_\alpha > 0$ кривая уравнения (3) пересекает гиперболу дважды. Искомому решению соответствует левая точка пересечения кривых как ближайшая на пути естественной эволюции толщины материала. Принятая итерационная схема обеспечивает приближение именно к этой точке.

В расчетах предельной степени вытяжки или формовки на некотором этапе кривые уравнений (2) и (3) располагаются так, что общих точек у них уже нет, при этом итерационный цикл дает расходящиеся приближения корней системы. Во избежание сбоев такого рода заранее определяем несущую способность материала $N_{\max}$ при плоском деформированном состоянии ($\Delta \varepsilon_\theta = 0$) и проверяем вычисляемые значения N_α на соответствие $N_{\max}$.

Эпюра тангенциальных деформаций может быть знакопеременной, например, при вытяжке сферических деталей. Расчет элементов в окрестностях $\varepsilon_\theta = 0$ имеет особенности. При $\Delta \varepsilon_\theta \rightarrow 0$

$$\sigma_\alpha \rightarrow \sigma_1 \frac{k+1}{\sqrt{2k+1}},$$

подкоренное выражение (3) может оказаться отрицательным, так как значение σ_1 запаздывает на одну итерацию. Для исключения данной ситуации заменяем уравнение (3) предельным соотношением σ_α и напряжения текучести σ_g . Подставляя его в (2), получаем разрешающее уравнение расчета элементов заготовки по схеме

плоскодеформированного состояния ($\Delta \varepsilon_\theta \approx 0$):

$$\Delta \varepsilon_h = \frac{N_a}{h \sigma_B} \frac{\sqrt{2k+1}}{k+1} - 1. \quad (4)$$

Уравнение (4) относится к классу $\Delta \varepsilon_h = \varphi(\Delta \varepsilon_h)$, решаемому методом простых итераций при условии, что $|\varphi| < 1$. В данном случае это условие не выполняется, поэтому преобразуем правую часть уравнения (4) к виду $\varphi(\Delta \varepsilon_h) = \varphi(\Delta \varepsilon_h)$, так чтобы $\varphi \approx 0$. В общем виде

$$\Delta \varepsilon_h = \varphi(\Delta \varepsilon_h) = \frac{Q \Delta \varepsilon_h - \varphi(\Delta \varepsilon_h)}{Q - 1}, \quad (5)$$

где Q - любое число, отличное от 1.

Производная функции $\varphi(\Delta \varepsilon_h)$

$$\varphi' = \frac{1}{Q-1} - \frac{1}{Q-1} \varphi'$$

При $Q = \varphi' \varphi' = 0$, а значит сходимость итераций наилучшая. Но, во-первых, мы не можем вычислить с большой точностью φ , так как не знаем значения $\Delta \varepsilon_h$ в интересующей нас точке пересечения графика биссектрисы координатного угла. Во-вторых, область допустимых начальных приближений $\Delta \varepsilon_h$ при этом сравнительно мала.

На рис. (2) приведены графики функций $\varphi(\Delta \varepsilon_h)$ с различными значениями Q . Все они удовлетворяют требованию сходимости итераций при вычислении интересующего нас корня. Область, где $|\varphi| < 1$ при $Q = 2.5$ и $Q = 3$ практически одинакова.

Погрешность, вносимая допущением о предельном соотношении σ_a и σ_B , не превышает 2% значения σ_a в диапазоне:

$$-0.28 \leq \frac{\Delta \varepsilon_\theta}{\Delta \varepsilon_h} \leq 0.39.$$

После вычисления значений σ_a и $\Delta \varepsilon_h$ находим $\Delta \varepsilon_a$ и σ_θ , а также Δh и Δl - изменение размеров элемента по толщине и в меридиональном направлении. С учетом найденного значения Δl вычисляем радиальное перемещение следующего элемента и т.д. Соотношение между радиальным и меридиональным перемещениями элемента определяется формой и размерами инструмента, которые задают средствами компьютерной графики.

Численное решение задач пластического течения является приближенным в силу дискретного характера математической модели. По мере повышения степени дискретности решение должно приближаться к точному, каковым можно было бы считать аналитическое решение, полученное при тех же допущениях, что и численное. К сожалению, сравнить численные и точные решения в данном случае нельзя, так как последние удается получить лишь для установившейся стадии процесса деформирования (например, волочения бесконечной трубы), а последовательный расчет элементов моделирует процесс с начального момента нагружения заготовки и, строго говоря, не может быть распространен на установившуюся стадию, которой в реальных процессах фактически нет.

Погрешность, связанную с дискретным характером математической модели, можно оценить на основании экстраполяции результатов решения одной и той же задачи, полученных при различной степени дискретности. Наибольший практический интерес представляет сравнение влияния двух источников погрешности: разбивки заготовки на элементы и процесса на этапы. Указанная разбивка должна выполняться таким образом, чтобы не было явного преобладания одного из источников погрешности.

Проведены вычислительные эксперименты с использованием разработанной математической модели осесимметричных операций. Моделировали пластическое течение фланца вытягиваемой заготовки, варьируя значениями m — числа этапов, n — числа элементов. При фиксированном перемещении края фланца сравнивали расчетные значения радиуса r n -го элемента, толщины первого и n -го элементов, усилия P .

На рис. (3) показана в качестве примера объемная диаграмма расчетного усилия вытяжки. Рис. (4) содержит кривые, которые получены из условия равных погрешностей по n и m .

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что степень дискретности математической модели целесообразно ограничивать десятью этапами и числом элементов заготовки от 20 до 40. Дальнейшее увеличение степени дискретности мало сказывается на точности расчета листоштамповочных операций и приводит к нео-

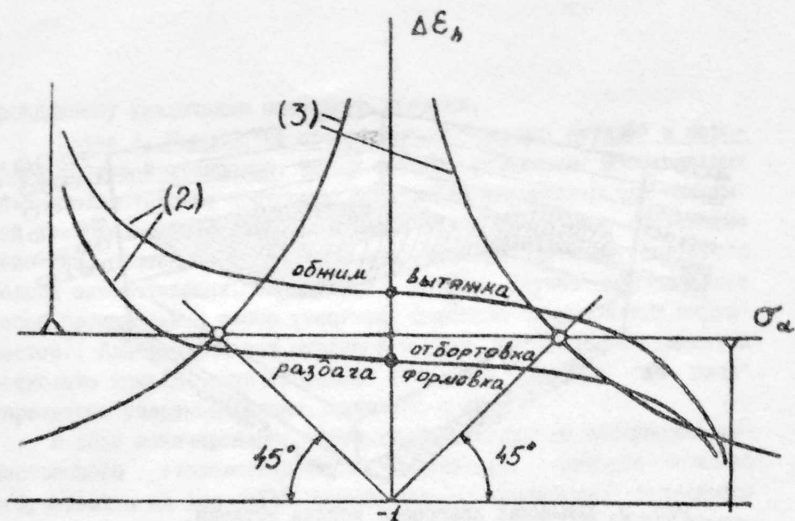


Рис. 1. Примеры графиков уравнений (2) и (3), характерные точки: 0 - $\sigma_\alpha = N_\alpha/h$, Δ - $\sigma_\alpha = \pm \sigma_1(k+1)/\sqrt{2k+1}$, $\bullet$ - $\Delta\epsilon_h = \Delta\epsilon_\theta/(k+1)$.

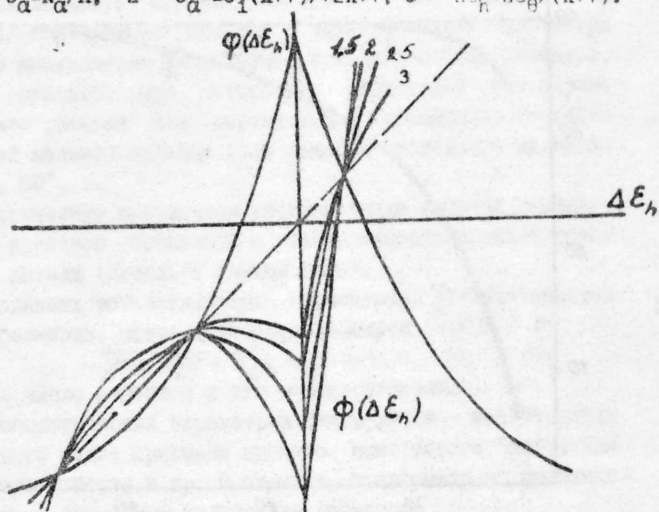


Рис. 2. Графики уравнения (5) при различных значениях Q.

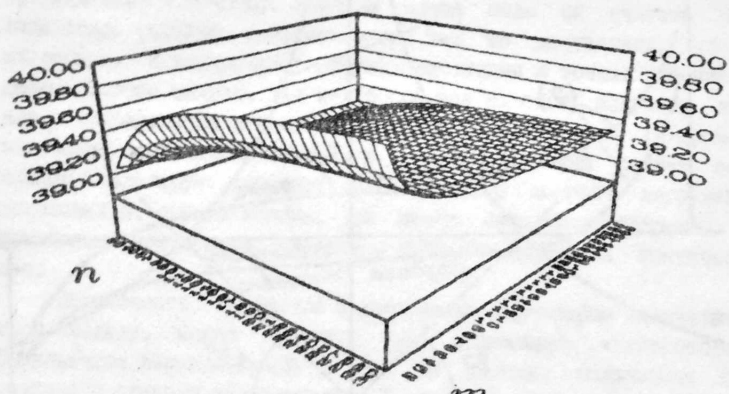


Рис. 3. Объемная диаграмма усилия вытяжки.

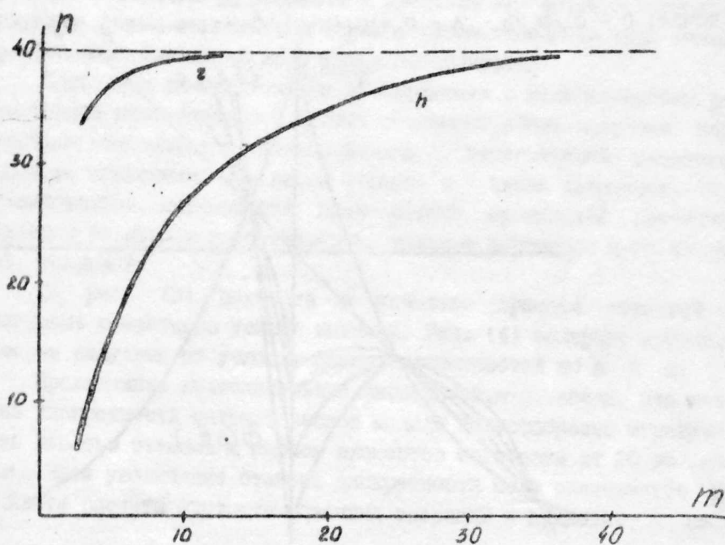


Рис. 4. Кривые равных погрешностей для g и h .

правданному увеличению машинного времени.

Глава 3. Разработка процедуры изображения деталей и переходов листовой штамповки. Ввиду осевой симметрии изображаемых объектов достаточно построить образующую внутренней или наружной поверхности и задать положение оси симметрии, остальные действия, связанные с построением сечения детали, поддаются полной автоматизации. Образующая в общем случае представляет собой произвольный набор участков: отрезков прямых и дуг окружностей. Для изображения отрезков и дуг в процедуре имеется несколько команд эскизирования, то есть подбора "на глаз" параметров участков: длины, кривизны и др.

В ходе эскизирования образующей фиксируется информация качественного (топологического) характера, которую можно подразделить на два вида. Первый вид - параметры, отличающие частный случай задания дуги или отрезка от общего: параллельность или перпендикулярность отрезка по отношению к оси детали, принадлежность центра окружности оси детали. В машиностроительном черчении принято задавать такие параметры исключительно визуальными средствами, т.е. без помощи размеров, линейных или угловых. При построении образующей на экране дисплея горизонтальная или вертикальная ориентация отрезка также означает неявное задание угла наклона последнего из числа значений: 0° , 90° , ...

К топологическим параметрам относим также наличие сопряжения на стыке участков образующей и принадлежность крайней точки элемента оси детали (деталь с глухим дном).

Число заданных топологических параметров $\sum T$ учитывается при задании размеров, общее количество которых

$$\sum P = 2\sum \Pi + 3\sum D - \sum T + 1,$$

где $\sum \Pi$ и $\sum D$ - число отрезков и дуг соответственно.

Кроме топологических параметров фиксируется качественная информация иного вида: признаки правого или левого положения дуги относительно хорды и др. В отличие от параметров признаки не отражаются на потребном количестве размеров.

Размеры переносят на экранное изображение сечения детали с указанием вида каждого из них:

- В - вертикальный,
- Г - горизонтальный,
- У - угловой,
- Д - диаметр,
- Р - радиус.

Также указывают тип объекта привязки размера: основная линия, центр окружности, точка пересечения продолжений 1-го и 1+2-го участков образующей, сопряженных между собой галтелью (1+1-м участком). Последний тип объекта базирования размеров весьма характерен для листоштампованных деталей, так как у них скруглены все переходы от одной поверхности к другой.

После задания размеров автоматически рассчитываются координаты крайних точек участков образующей, согласующиеся с заданными значениями размеров и топологическими параметрами. Алгоритм преобразования введенной информации в координаты названных точек нетривиален, поскольку размеры могут быть заданы в самых различных сочетаниях, ограничения на этот счет отсутствуют. Алгоритм работает по итерационному принципу: обработка размеров по видам В, Г, У чередуется с обработкой участков образующей поодиночке, по два и по три. Это вызвано тем, что расчет координат крайних точек не всегда можно выполнить на отдельно взятом участке. Рассчитываются также координаты центров окружностей, которым принадлежат дуги, и углы наклона образующей или касательной к образующей на стыках участков. В итоге получаем стандартный массив количественных параметров изображения, служащий для автоматического преобразования последнего из эскизного в масштабное, т.е. соответствующее заданным размерам. Благодаря раздельному заданию топологических и количественных данных исключаются трудоемкие размерные построения на экране дисплея, вся работа процедуры ввода исходных данных требует немного времени, меньше, чем требуется для вычерчивания детали вручную.

Полученный массив координат точек изображения детали используется в подпрограмме расчета площади срединной поверхности для расчета диаметра заготовки при вытяжке. Проектирование вытяжных переходов существенно облегчается

применением алгоритма, преобразующего эскизное изображение в масштабное. На экранном изображении детали изменяют размеры или часть размеров, один из которых (чаще всего высоту) задают как приближенный. Его значение автоматически уточняется с учетом ранее подсчитанной площади срединной поверхности детали, которая считается неизменной на вытяжных переходах.

Глава 4. Разработка и внедрение подсистемы САПР осесимметричных операций листовой штамповки. Основные функции подсистемы: расчет размеров заготовок и числа операций, потребных для получения детали; конструирование переходов.

Диаметры заготовки и отверстия в заготовке при проектировании соответственно вытяжки и отбортовки рассчитываются по обычным правилам, хорошо зарекомендовавшим себя на практике. Длину трубных заготовок находим с учетом изменения толщины трубы при обжиме и раздаче.

Число операций глубокой вытяжки определяем с помощью заранее введенных предельных коэффициентов, значения которых приведены в справочной литературе. Алгоритм проектирования операций вытяжки выравнивает пооперационные коэффициенты так, что они все в равной степени отличаются от предельных. Аналогично происходит проектирование многооперационных процессов обжима и раздачи. Предельные коэффициенты вытяжки и других процессов зависят от числа предшествующих операций данного вида, марки и относительной толщины материала, наличия межоперационной разупрочняющей термообработки заготовок, формы и размеров детали и инструмента.

Пользователь САПР может прибегнуть к математическому моделированию вытяжки или другой операции, если неизвестны предельные коэффициенты формоизменения заготовки, или необходимо получить информацию о напряженно-деформированном состоянии заготовки, изменении толщины материала. Кроме перечисленных выше факторов, влияющих на предельную степень формоизменения заготовок, математическая модель учитывает анизотропию материала, а также коэффициенты трения, что особенно важно при моделировании вытяжки крупногабаритных деталей.

Конструирование вытяжных переходов, как правило,

выполняется путем редактирования изображения детали. Наряду с корректировкой размеров можно изменять форму детали. Если переход сильно отличается по форме от введенного изображения детали, корректировка не имеет смысла. В этом случае переход конструируют с помощью процедуры эскизирования образующей детали, изложенной выше.

Благодаря высокой производительности процедур автоматизированного проектирования пользователь может быстро получить несколько альтернативных вариантов технологического маршрута, например:

вытяжка, отрезка дна;

вытяжка, вырезка отверстия, отбортовка.

Детали некоторых типов можно изготавливать из труб различного диаметра. Варианты технологического маршрута рассчитываются в этом случае на основе перебора сортамента трубных заготовок, заранее занесенных в соответствующий массив.

Выбор наиболее рационального варианта предоставлен пользователю, поскольку формализовать его не удастся. Обычно выбирают вариант, требующий минимального оснащения, вторым по значимости критерием является коэффициент использования материала.

Созданная подсистема САПР осесимметричных операций листовой штамповки функционирует на ПЭВМ IBM PC/AT и совместимых с ними.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В условиях мелкосерийного производства с часто меняющейся номенклатурой изделий имеют место противоречивые требования к САПР ТП листовой штамповки: наряду с достоверным определением технологических параметров требуется высокое быстродействие основных процедур САПР. Этим требованиям удовлетворяет метод поэлементного расчета осесимметричного напряженно-деформированного состояния заготовок, которое присуще большинству формоизменяющих операций листовой штамповки, применяемых в охарактеризованном выше производстве.

2. Разработана математическая модель формоизменения листовых и трубных заготовок при безмоментной схеме внутренних сил. Процессы вытяжки, формовки, отбортовки, обжима и раздачи описываются общими уравнениями равновесия элемента и пластического течения, в последнем фигурируют поэтапные приращения деформаций. Особенности конкретной операции отражают граничные условия, заданные на крайнем элементе, а также форма инструмента, значение и знак коэффициента трения.

3. Разрешающая система уравнений напряженно-деформированного состояния элемента заготовки имеет единственное решение при отрицательных меридиональных напряжениях, в противном случае решение двояко; оно может также вообще отсутствовать, если исчерпана несущая способность элемента или превышена поэтапная степень формоизменения заготовки.

4. Предложена форма разрешающих уравнений, обеспечивающая быструю и безусловную сходимость вычисления параметров напряженно-деформированного состояния методом итераций. Показано, что при относительно малых приращениях тангенциальной деформации следует, во избежание сбоев вычислительной процедуры, исходить из предельного соотношения между меридиональным напряжением и напряжением текучести. Погрешность, вызванная данным допущением, не превышает 2%, пока изменение толщины материала в три раза и более обгоняет рост тангенциальной деформации.

5. Для уменьшения погрешности дискретизации напряженно-деформированного состояния необходимо выдерживать соотношение между числом элементов заготовки и числом этапов деформирования в пределах 2...4.

6. Разработана методика автоматизированного проектирования осесимметричных операций листовой штамповки, основанная на автоматическом формировании массивов числовых исходных данных путем обработки эскизного изображения объекта производства. Достигается примерно десятикратное сокращение трудоемкости подготовки исходных данных и конструирования переходов.

7. Разработанные методика автоматизированного проектирования и математическая модель осесимметричных операций листовой штамповки реализованы в подсистеме САПР ТП на персональных ЭВМ

типа IBM PC/AT и совместимых с ними, которая проходит опытную эксплуатацию на нескольких предприятиях. Благодаря уточненному определению технологических параметров и потребного числа операций, выбору рациональных технологических маршрутов обеспечивается сокращение затрат на штамповую оснастку, исключается брак в виде разрыва заготовки, вызванный погрешностями расчета.

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Акастелова Н.А., Вдовин С.И., Цыганков С.В. Задание в САПР графических исходных данных // Кузнечно-штамповочное производство. - 1990. - № 1. - с. 30-31.
2. Вдовин С.И., Цыганков С.В. Процедура ввода и обработки информации о линиях, состоящих из отрезков и дуг // Интегрированные системы автоматизированного проектирования: Тез. докл. всесоюзной научно-технической конференции. - М., 1989. - с. 163 - 164.
3. Цыганков С.В. Процедура ввода переменной графической информации в САПР ТП // Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. - Киев, 1989. - с. 154 - 155.
4. Акастелова Н.А., Вдовин С.И., Цыганков С.В. Ввод в ЭВМ формы и размеров плоских инженерно-графических объектов // Автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении и приборостроении: Тез. докл. республиканской межвузовской конференции. - Ворошиловград, 1989. - с. 106.
5. Вдовин С.И., Цыганков С.В. Получение и редактирование чертежей в САПР ТП // Микропроцессорные средства и системы. - 1990. - № 3. - с. 61 - 62.