

М 492192
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

НА ДСМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи
УДК 621.735.34

МУРАДЯН Оганес Хачикович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВКИ
И ВЫГЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ИЗ ЛИСТОВЫХ
ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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 - 1988

Работа выполнена в Московском высшем техническом
училище им. Н.Э. Баумана

- Научный руководитель - д.т.н., профессор
ОВЧИННИКОВ А.Г.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ТЕТЕРИН Г.П.
- кандидат технических наук,
ст.н.с. ЦОЙ В.П.
- Ведущее предприятие - Воронежское ПО по выпуску
тяжелых механических прессов

Защита диссертации состоится "26" 12 1988г. в 14³⁰
час. на заседании специализированного совета К 053.П.ТЗ в
Московском высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана по ад-
ресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный
му адресу.

я в библиотеке МВТУ
7-05-14.

1988г.

ШУБИН И.Н.

11492192

1152 объем I п.л.
уamana.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года ставится задача сократить сроки разработки и освоения новой техники в 3-4 раза с помощью широкого внедрения гибких переналаживаемых производств и систем автоматизированного проектирования. Для этого необходимо "шире исследовать проблемы механики, вопросы автоматизации производства".

В системах автоматизированного проектирования технологических процессов /САПР ТП/ ключевое место занимает математическое моделирование физических процессов. Математическая модель должна обеспечивать не только нахождение усилия и энергии деформирования, но и возможность анализа технологического процесса и выбора оптимальных условий деформирования, обеспечивающих наилучшие служебные характеристики и заданную точность получаемых штамповкой деталей.

На технологические процессы формовки и вытяжки деталей сложной формы влияет огромное количество факторов: геометрия детали, форма прижимной поверхности, форма и расположение технологических вырезов, количество и расположение перетяжных порогов и ребер, свойства материала, условия трения и т.д. Аналитические методы не позволяют получать замкнутые решения о учете этих факторов. Поэтому математическая модель процессов вытяжки и формовки деталей сложной формы целесообразно строить на основе численных методов.

Таким образом, математическое моделирование процессов вытяжки и формовки деталей сложной формы методом конечных элементов является актуальной задачей.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка и реализация на ЭВМ математического моделирования технологических процессов вытяжки и формовки листовых деталей с учетом основных факторов, влияющих на физику процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. разработать конечно-элементную модель ортотропной оболочки сложной формы;
2. разработать алгоритм и программы для учета физической



нелинейности упруго-пластического деформирования листовых заготовок;

3. разработать алгоритмы и программы для учета реальных граничных условий и сил трения для конкретных операций листовой штамповки;

4. проверить достоверность математической модели на основе сравнения тестовых задач с известными решениями;

5. теоретически и экспериментально исследовать процесс вытяжки картера автомобиля ЗИЛ с целью выяснения условий снижения процента разрывов;

6. разработать методику проектирования технологических процессов вытяжки и формовки деталей сложной формы на основе приведенной математической модели.

Научная новизна. Разработана математическая модель формоизменения листовых деталей, что позволяет учесть основные факторы, влияющие на технологический процесс. На основе моделирования процессов вытяжки и формовки деталей сложной формы разработана методика расчета основных энерго-силовых параметров процесса в любой момент неустановившегося процесса деформирования.

Автор защищает:

- методику моделирования методом конечных элементов упруго-пластической деформации ортотропных заготовок со слоистой структурой;

- методику учета трения и реальных граничных условий при контакте с инструментом;

- математические модели формоизменения следующих технологических процессов листовой штамповки:

- а. вытяжка цилиндрических стаканов из анизотропных заготовок;

- б. гидроформовка прямоугольных и эллиптических заготовок;

- в. вытяжка жестким пуансоном деталей сложной формы.

Практическая значимость. Разработанная математическая модель позволяет учитывать следующие факторы, влияющие на технологические процессы вытяжки и формовки деталей сложной формы: геометрию детали, физическую нелинейность, нестационарность, анизотропию исходной заготовки, слоистость материала, реальные граничные условия на контакте, трение. Это дает возможность глубоко анализировать технологические процессы с целью их оптимизации.

Универсальность математической модели позволяет применять ее в САПР ТП листовой штамповки, что позволит существенно сократить сроки проектирования и повысить качество проектных работ.

Внедрение результатов. Результаты разработок, содержащиеся в диссертационной работе, использованы во ВНИИМТМАШ при разработке технологии формоизменения оболочек. Использование разработанной математической модели позволило определять основные энерго-силовые параметры техпроцесса и выбирать оптимальный режим деформирования. Ожидаемый экономический эффект составит 105 тыс. руб. в год.

Достоверность научных результатов подтверждается удовлетворительным согласованием решений тестовых задач с известными результатами, а также сравнением получаемых результатов с экспериментальными данными. Максимальное расхождение экспериментальных и теоретических данных при малых деформациях не превышает 10-15%, а при больших - 20-22%.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены на научно-технической конференции "Совершенствование процессов и машин кузнечно-штамповочного производства" /г. Горький, 24-25 ноября 1987 г./, а также на научных семинарах кафедры МТ-6 МВТУ им. Н.Э. Баумана /1986-1988 гг./.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 105 страницах машинописного листа, 84 рисунков, 1 таблицы, список литературы из 144 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Приводится общая характеристика работы.

В первой главе приведен анализ существующих классификаций процессов листовой штамповки. Отмечается, что известные классификации не позволяют определять подходы к созданию универсальных математических моделей, которые без существенных изменений можно использовать для анализа достаточно широкого класса технологических процессов. Предложена классификация формоизменяющих операций листовой штамповки с точки зрения единого подхода к моделированию методом конечных элементов. Проведен анализ основных методов теоретического решения технологических

задач листовой штамповки.

Исследованию процессов вытяжки деталей сложной формы уделено в работах Томленова А.Д., Серепьева В.В., Головлева В.Д., Рубенковой Л.А., Попова Е.А., Шофмана Н.А., Исаченкова Е.И., Баркая В.Ф., Деля Г.Д., Бебриса А.А., Башьярова Р.Я., Рузанова Ф.И., Пиликина К.А., Плеханова В.М., Верхова Е.Э., Жаркова В.А., Киллера С.П., *Woo, Wang, Nakken*.

Для теоретического исследования процессов вытяжки деталей сложной формы используются, как правило, метод линий скольжений или полужапериментальные методы, позволяющие в первом приближении оценить технологические параметры.

Показано, что применение только численных методов /МКЭ, МКЭ/ позволит учитывать факторы, которые влияют на реальный технологический процесс. Моделирование деформирования оболочек сложной формы МКЭ развивается очень бурно. Эти вопросы рассматриваются в работах Шапошникова Н.Н., Сахарова А.С., Корнеева В.Г., Кислюцкого В.Н., Бабаяна В.Р., Галилеева М.М., Бенкевича О., Роминова К.И., Деля Г.Д., *Argyris J.N., Onate E., Owan D.R.J., Iron, Bate K*.

Как известно, анализ процессов обработки металлов давлением требует учета геометрической и физической нелинейностей. Учет геометрической нелинейности производится методом последовательных нагружений, когда нагрузка разбивается на несколько малых шагов, таких, что можно использовать соотношения Коши /связь деформаций и перемещений/. Проведен сравнительный анализ итерационных методов решений физически нелинейной задачи МКЭ.

Для конкретных операций листовой штамповки разработали и реализовали конечно-элементные модели многие исследователи:

Wang M.M., Iseki H., Kobayashi S., Kitagawa H., Wafi A.

Для оценки максимального формоизменения в листовой штамповке пользуются диаграммами предельных деформаций /ДПД/. Приводится обзор существующих методик экспериментального и теоретического построения ДПД. Подробно описывается методика Деля Г.Д., разработки которого были использованы в диссертационной работе.

Ужесточение требований к математическим моделям, которые будут применяться в САПР ТП, заставляет искать новые подходы и совершенствовать известные, для наиболее полного учета всех существенных факторов. Т.о. выяснено, что в отечественной лите-

ратуре недостаточно отражены вопросы моделирования МКЭ процессов листовой штамповки, поэтому разработка математической модели этих процессов является актуальной задачей.

Сформулирована цель и постановка задач исследования.

Во второй главе описывается конечно-элементная модель оболочки произвольной формы из ортотропного материала. Как известно, существует множество подходов к конечно-элементной модели оболочек сложной формы. Их можно разделить на две группы: одни строятся на основе той или иной специальной теории оболочек, другие рассматривают оболочки как трехмерные тела. Первая группа наряду с достоинствами /относительно легкая реализация, хорошая сходимость и др./ имеет ограничения. Решения таких конечно-элементных моделей сходятся не к точному решению, а к решению той специальной теории, в рамках которой была построена модель.

Подход к оболочкам как к трехмерным телам открывает большие возможности при моделировании формоизменяющих операций листовой штамповки, однако и тут есть много трудностей: неэкономичность, медленная сходимость и др. Альтернативным подходом является использование варианта МКЭ, где распределение неизвестной функции /перемещения, скорости перемещения, напряжения и т.д./ по толщине постулируется /так называемый квазидвумерный подход/. В данной диссертационной работе за основу была принята методика изопараметрических элементов толстых оболочек О.Зенкевича, следуя которой, поле перемещений аппроксимируется квадратичными функциями формы по срединной поверхности и линейными - по толщине оболочки.

В основе подхода лежат следующие допущения:

1. нормаль к срединной поверхности остается прямой, но не обязательно нормальной к срединной поверхности после деформации. Такое ослабление гипотезы Кирхгофа-Лява дает возможность учитывать сдвиговые деформации, а также исключает расхождения или частичные перекрытия вдоль границ элементов;

2. энергию деформации от напряжений, перпендикулярных к срединной поверхности, считаем пренебрежительно малой.

Выбран 3-и узловой изопараметрический конечный элемент, приведенный на рис. 1. КЭ в каждом узле имеет пять степеней свободы: три перемещения u, v, w и два угла поворота вектора "толщины" - α, β . Перемещения любой точки КЭ аппроксимируются

узловыми перемещениями δ_i с помощью функций формы $N_i(x, y, z)$,
которые квадратичные по x, y, z и линейны по z .

$$U = N_i \delta_i \quad /1/$$

Поля деформаций определяются на основе соотношений Коши. Связь между напряжениями и деформациями определяется по закону Гука для ортотропного тела:

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= B \delta_i; \\ \sigma_i &= D_i \epsilon_i, \end{aligned} \quad /2/$$

где ϵ_i, σ_i — векторы компонентов деформаций и напряжений соответственно,

B — матрица связи узловых перемещений с деформациями,

D_i — матрица упругих постоянных ортотропного тела.

Для слоистых материалов матрицу D_i определяем для каждого слоя.

Решение упругой задачи деформирования оболочки сводится к нахождению решения системы линейных алгебраических уравнений. В результате решения находится поле перемещений /узловых/, далее по /2/ находятся поля напряжений и деформаций. Система линейных алгебраических уравнений имеет вид:

$$K \delta = F, \quad /3/$$

где $K = \int B^T D_i B dV$ — матрица жесткости всей оболочки,

F — вектор узловых сил,

δ — вектор узловых перемещений.

Этот подход дает хорошие результаты для толстых и средних оболочек. При рассмотрении тонких оболочек изгибная жесткость оболочки неоправданно возрастает и это приводит к большим расхождениям по сравнению с точными решениями. Наиболее простой и универсальный метод распространения этого подхода и на тонкие оболочки является сокращенное интегрирование, т.е. при определении матрицы жесткости K численное интегрирование производится не по девяти точкам Гауса, а лишь по четырем. Другой, не менее эффективный метод — это использование слоистой

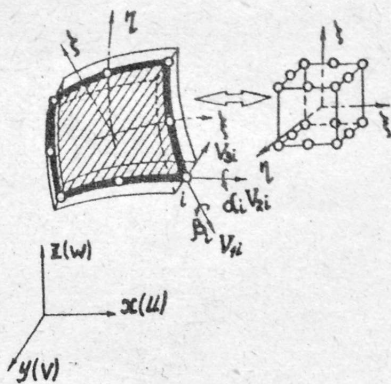


Рис. I

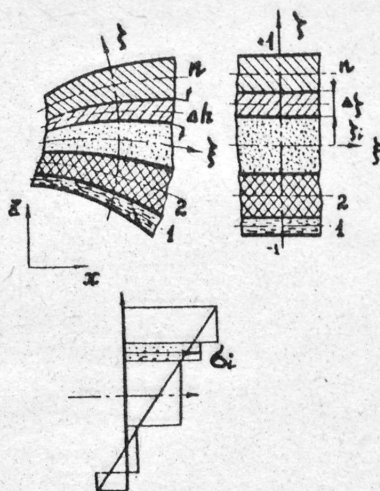


Рис. 2

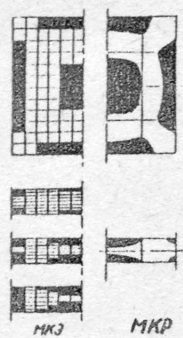


Рис. 3

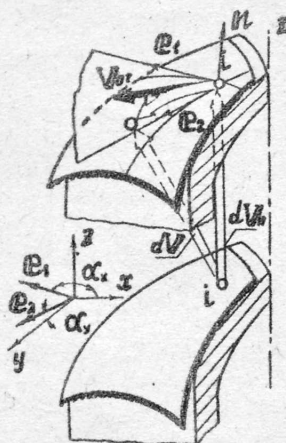


Рис. 4

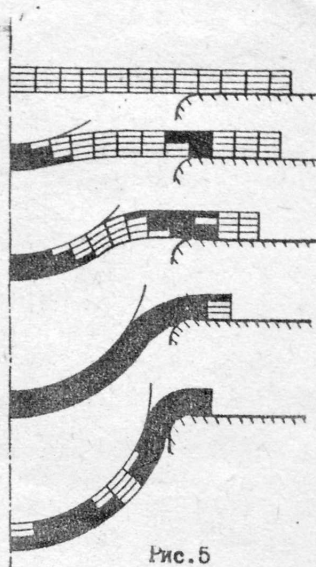


Рис. 5

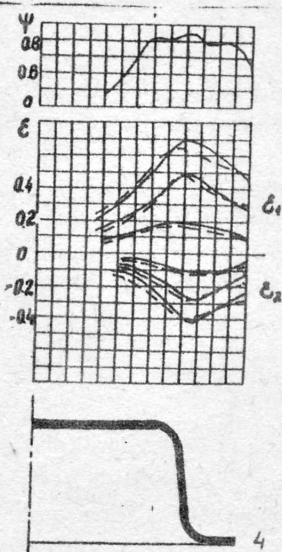


Рис. 6

модели /рис.2/. Оболочку необходимо представить из n слоев /в зависимости от относительной толщины оболочки/. Это равнозначно более точному интегрированию по толщине. В диссертационной работе использованы оба подхода, которые совместно дают хорошие результаты.

При формировании матрицы жесткости необходимо учитывать переход из криволинейной системы координат в декартовую.

Приводится алгоритм формирования матрицы жесткости и необходимые преобразования. Функции формы заданы в криволинейной системе координат, а соотношения Коши – в местной. При численном интегрировании учитывается переход из одной системы координат в другую.

В третьей главе рассматриваются вопросы решения физически нелинейной задачи и алгоритм расчета.

В качестве условия текучести использовано условие Губера-Мизеса для ортотропного тела, предложенное Хиллом, которое с учетом принятых допущений в местной системе координат имеет вид:

$$f(\sigma, \epsilon) = \{N(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + F\sigma_{xx}^2 + G\sigma_{yy}^2 + 2(N\epsilon_{xx}^2 + L\epsilon_{yy}^2 + M\epsilon_{xx}\epsilon_{yy})\}^{1/2} - 1 = 0. \quad /4/$$

Рассматривается упруго-пластическое деформирование оболочки. Использована теория течения. Приращение деформаций $d\epsilon$ складывается из упругой $d\epsilon^e$ и пластической $d\epsilon^p$ частей:

$$d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^p. \quad /5/$$

Определение упругой составляющей рассматривается во второй главе. Пластическая составляющая деформаций находится из ассоциированного закона течения:

$$d\epsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma}. \quad /6/$$

Окончательное выражение связи напряжений и деформаций в матричной форме получил Ямада:

$$d\sigma = D_{ep} d\epsilon, \quad /7/$$

$$D_{ep} = D_e - \frac{D_e \alpha \alpha' D_e}{A + \alpha' D_e \alpha},$$

где $\alpha = \partial f / \partial \delta$ — так называемый вектор течения,
 A — тангенс угла касательной в данной точке к диаграмме растяжения.

Матрица жесткости вычисляется с учетом D_{op} . Т.е. матрица жесткости зависит от δ , следовательно, от текущего значения узловых перемещений U . Т.е. система алгебраических уравнений /3/ становится нелинейной. Эта нелинейность учитывается с помощью итерационного решения.

Решение нелинейной задачи сводится к минимизации остаточных узловых сил:

$$\Psi_i = F - \int_V B^T \sigma_i dV = 0, \quad /8/$$

где σ_i — напряжения, полученные при i -ой итерации.

Напряжения при i -ой итерации находятся для достигнутого уровня перемещений:

$$U_i = U_{i-1} + \Delta U_i, \quad /9/$$

Приращение же перемещений при i -ой итерации находится

$$\Delta U_i = -[K]_{i-1}^{-1} \Psi_{i-1}, \quad /10/$$

где $[K]_{i-1}$ — матрица жесткости, определяемая по /3/ с учетом достигнутого уровня напряжений на $i-1$ -ой итерации.

По достижении остаточными силами определенного уровня итерационный процесс останавливается.

Приводится описание и блок-схема пакета прикладных программ, реализующих конечно-элементную модель формоизменения ортотропных оболочек.

В четвертой главе рассматриваются особенности реализации конечно-элементной модели для конкретных операций листовой штамповки. Отмечается, что для моделирования реальных технологических процессов листовой штамповки необходимо знать схему деформирования, характеристики материала, граничные условия и нагрузку. В процессе математического моделирования необходимо получать следующую информацию: кинематику процесса /поля перемещений/, поля напряжений и деформаций, усилие и энергию деформирования; прогнозировать потери устойчивости при пластическом де-

формировании, следить за развитием очага пластической деформации и т.д.

Рассматриваются следующие виды технологических процессов:

1. деформирование плоского фланца при вытяжке цилиндрических стаканов из анизотропных заготовок;
2. гидроформовка прямоугольных и эллиптических заготовок;
3. вытяжка деталей сложной формы жестким пуансоном.

При исследовании технологического процесса вытяжки цилиндрических стаканов формоизменение рассматривают в плоскости, поэтому вектор узловых перемещений имеет два компонента в каждом узле, отличное от нуля. Вектор узловых сил обусловлен силами трения и прижима. Определение сил трения аналогично подходу, приведенному для вытяжки деталей сложной формы жестким пуансоном.

Смоделирован процесс вытяжки цилиндрического стакана из анизотропного листа. Отмечается, что фестоны появляются и развиваются от точек, в которых значение предела текучести минимально и максимально. Из литературы известно, что для различных материалов в зависимости от соотношений параметров анизотропии фестоны могут появиться в различных местах. Рассмотрен процесс формоизменения фланца для двух материалов: АМЦАМ и сталь 08 кп. Полученные результаты совпадают с экспериментами Яковлева С.П. и Кухаря В.Д.

При гидроформовке заготовка находится под распределенной нагрузкой. Граничные условия задаются в перемещениях — края защемяны. Смоделирован процесс гидроформовки квадратной и эллиптической заготовки. На рис. 3 приведены результаты моделирования гидроформовки квадратной заготовки. Результаты хорошо согласуются с известными решениями. Результаты расчета деформированного состояния при гидроформовке эллиптических заготовок были сравнены с экспериментами Саенко. Максимальное растяжение не превышает 12%.

Граничные условия для первых двух случаев являются классическими. Они задаются в перемещениях либо в нагрузках. При деформировании жестким пуансоном граничные условия становятся сложнее. В общем случае, при наличии проскальзывания между заготовкой и инструментом ни один из компонентов вектора перемещений не известен, но эти компоненты связаны между собой функционально, т.к. узел должен двигаться по поверхности инст-

румента /рис.4/. На поверхности контакта появляются силы трения, которые вносят дополнительную нелинейность, т.к. зависят от полостей перемещений. Разработана методика учета таких граничных условий. Показано, что компоненты перемещений узла, находящегося на пуансоне, должны удовлетворять уравнению:

$$\frac{\partial Z(x,y)}{\partial x} \Delta U + \frac{\partial Z(x,y)}{\partial y} \Delta V = \Delta W_n - \Delta W, \quad /II/$$

где $Z(x,y)$ - уравнение, описывающее поверхность пуансона,

ΔW_n - перемещение пуансона,

$\Delta U, \Delta V, \Delta W$ - компоненты перемещений узла.

Силы трения определяются по закону Кулона-Амонтона:

$$F_{тр} = -\mu Q t, \quad /I2/$$

где

μ - коэффициент трения,

Q - нормальная сила реакции в узле,

t - единичный вектор, направленный вдоль относительной скорости узла и лежащий в касательной плоскости.

Если рассматриваются конечные значения приращений перемещений, то t определяется как:

$$t = \frac{T}{|T|} ; \quad T = U_{отн} - (U_{отн}^T \cdot n) n, \quad /I3/$$

где

$U_{отн}$ - относительное перемещение узла,

n - единичный нормальный вектор к поверхности в узле.

Для оценки математической модели приводятся результаты анализа вытяжки сферических деталей и сопоставляются с экспериментальными данными И.даны. Сходимость удовлетворительная - не более 15%. Приводится также распределение деформаций в зависимости от коэффициента трения. На рис.5 показано распространение пластических зон по ходу деформирования.

В пятой главе описываются методика проведения экспериментальных исследований, их результаты и сравнение с теоретическими результатами. Подтверждена достоверность разработанной математической модели.

Исследовалось формоизменение кртера автомобиля ЗИЛ. Матс-

риал заготовки - сталь 08Ю.

Для оценки максимальных возможностей вытяжки картера целесообразно не столько результирующие энергосиловые параметры исследовать /усилие вытяжки, энергию деформирования/, сколько распределение полей напряжений и деформаций и, как следствие, распределение использованного ресурса пластичности. Оценка ресурса пластичности была проведена по методике Огородникова В.А.

Изучение течения металла и определение деформированного состояния заготовки проводились методом делительных сеток при поэтапном деформировании. На заготовку была нанесена делительная сетка с шагом 1 мм. Обмер искаженной сетки производился с помощью гибкой линейки с точностью замера 0,2 мм.

Проведен также теоретический анализ этого процесса. Коэффициент трения на поверхности контакта с пуансоном и матрицей принимался постоянным на протяжении всего процесса вытяжки и равнялся 0,2.

Рассматривались два варианта: заготовка прямоугольной формы с ровными краями и заготовка с зигзагообразными краями, для которой форма краев задавалась прямоугольной и трапецидальной /отношение основ 1:2, 1:4/.

Сопоставление формоизменения показывает, что максимальная разность теоретических и экспериментальных данных не превышает 20-22%. Приводится распространение пластических зон при формоизменении.

Построены эпюры использованного ресурса пластичности по сечениям. Выделены опасные зоны. Отмечается, что производственная практика подтверждает наличие большей вероятности разрыва в указанных сечениях. Смоделированы варианты штамповки различных заготовок с зигзагообразными кромками. Анализ показал, что форма зазубрин оказывает определенное влияние на распределение и величину использованного ресурса пластичности. Наиболее эффективным является трапецидальная форма с соотношением основ 1:4.

Приводится методика проектирования процессов вытяжки деталей сложной формы на основе разработанной математической модели. Для рационального проектирования технологических процессов необходим многосторонний анализ процесса. Путем математического моделирования можно получить влияние тех или иных факторов на критерий оптимальности /снижение процента брака, снижение себестоимости, снижение материалоемкости, получение за-

данного распределения полей деформаций и т.д./ Это позволяет, изменив те или иные параметры технологического процесса, достичь поставленной цели. В частности, если необходимо снизить возможность разрушения при вытяжке, то исследуются поля деформаций и построенные на основе ДПД поля использованного ресурса пластичности. На рис. 6 показаны распределения деформаций и использованного ресурса пластичности в наиболее опасном сечении.

Приводятся практические рекомендации по эксплуатации математической модели.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Математические модели, используемые в САПР ТП, должны быть универсальны и включать широкий класс задач. Поэтому моделирование возможно только на основе трехмерного подхода к листовым заготовкам.

2. Проведенная классификация формоизменяющих операций листовой штамповки с точки зрения единого подхода к численному моделированию показала, что изменяя граничные условия и нагрузку, можно моделировать МКЭ технологические процессы широкого класса.

3. Для анализа неустановившегося формообразования при операциях листовой штамповки необходимо использовать пошаговый метод нагружения, а конечно-элементные соотношения построить на основе теории течения анизотропного тела.

4. Разработана математическая модель процессов вытяжки и формовки деталей сложной формы из листовых заготовок на основе МКЭ, реализованная в виде универсальных программ для ЕС ЭВМ. Математическая модель позволяет определить кинематику процесса, распределение напряжений и деформаций, усилие и энергию деформирования и степень использования ресурса пластичности, что необходимо для выбора числа переходов и служит критерием при оптимизации технологического процесса.

5. Анализ процессов вытяжки деталей сложной формы требует учета сложных граничных условий и сил трения на контакте с инструментом. Полученные сложные граничные условия на контакте с инструментом достаточно точно отражают физику процесса.

6. Удовлетворительная сходимость полученных теоретических результатов с данными, известными из литературы, а также проведенными экспериментальными исследованиями, позволяет ре-

комендовать разработанную математическую модель к использованию в САПР ТП. Математическая модель может также быть использована автономно для анализа и оптимизации технологических процессов листовой штамповки. Результаты проведенных разработок использованы в учебном процессе кафедры МТ-6 МВТУ им. Н.Э.Баумана.

7. Разработанная методика была опробована во ВНИИМЕТМАШ при проектировании техпроцессов формообразования оболочек. Ожидаемый экономический эффект составляет 105 тыс.руб. в год.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Мурадян О.Х. Определение напряженно-деформированного состояния при вытяжке деталей сложной формы//Известия высших учебных заведений. Машиностроение.-1988.- № 2.- С.129-132.

2. Мурадян О.Х. Решение некоторых задач листовой штамповки методом конечных элементов//Известия высших учебных заведений. Машиностроение.- 1988.- №5.- С.125-128.

М.Наше

