

1557970

На правах рукописи

Жарков Валерий Алексеевич

Разработка и совершенствование процессов
вытяжки деталей из листовых заготовок
на основе математического моделирования

05.03.05 - Процессы и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

В.А. Жарков

Москва - 1998

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт технологии автомобильной промышленности» (АО «НИИТавтопром»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук,

профессор Живов Л.И.;

доктор технических наук,

профессор Исаченков Е.И.;

доктор технических наук,

профессор Головащенко С.Ф.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1557970

Жарков В.А. Разработчик

Ведущее предприятие: Открытое акционерное общество «Горьковский автомобильный завод» (ОАО «ГАЗ»)

12 мая 1998 г. в 14.30 час. на заседа-

нии 15.05. при МГТУ им. Н.Э.Баумана по

адресу: ул., дом 5.

находиться в библиотеке МГТУ им.

и экземпляре, заверенный печатью,

т.т. Телефон для справок 267-09-63.

15 мая 1998 г.

О

дент

В.И.Семенов

1998г. Объем 2,0 п.л. Тираж 100 экз.

и. Н.Э.Баумана

1554940

Актуальность проблемы. Для ускорения научно-технического прогресса необходимо разрабатывать и внедрять новые малоотходные и малооперационные технологические процессы, а также развивать автоматизацию проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ с применением компьютеров. Данная работа направлена на выполнение этих задач и посвящена разработке и совершенствованию теории, методов проектирования и расчета параметров новых и существующих технологических процессов вытяжки листовых материалов, позволяющей пластическим формоизменением получать сложные детали при минимальной себестоимости и высокой производительности труда.

Вытяжка является одной из наиболее распространенных операций листовой штамповки. Она нашла широкое применение в автомобильном, тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, приборостроении и других отраслях промышленности. При разработке технологических процессов вытяжки используют в основном эмпирические зависимости из различных справочных материалов, которые не учитывают многие практически важные параметры. Это приводит во многих случаях к необходимости изготовления упрощенной оснастки и проведения на ней экспериментов для отработки основного процесса-вытяжки, что удлиняет сроки и удорожает подготовку производства данной детали. Если же эксперименты не проводятся, то для надежности процесса предусматривают завышенное число операций вытяжки и увеличенную норму расхода листового проката, что приводит к перерасходу проката, а также к увеличению количества штампов и трудоемкости изготовления детали.

На производстве большое значение придается уменьшению продолжительности времени перестановки и переналадки штампов на прессах при переходе от штамповки одной детали к штамповке следующей детали. Наладка процесса штамповки детали занимает много времени и до получения качественной детали несколько первых (отштампованных в режиме наладки) заготовок получают бракованными.

Применение математического моделирования позволит повысить точность и качество проектирования технологических процессов, снизить количество переходов (операций) вытяжки, штампов и норму расхода листового проката. Использование такого моделирования совместно с АСУ ТП сократит время наладки процесса вытяжки и даст возможность получать качественную первую же деталь после установки штампа на пресс.

Диссертация обобщает исследования, выполненные автором в АО «НИИТавтопром» в качестве руководителя темы № 14 научно-исследовательским и хозяйственным договором с предприятиями: Московским имени Лихачева (АМО «ЗИЛ»), Минским (АО «МАЗ»), Кременчугским (АО «КрАЗ»), АО «Москвич» автомобильными заводами, Харь-

046 АЗ-51

ковским заводом «Элеватормелеша», Фастовским заводом газомазутных горелочных устройств и газоиспользующей аппаратуры (Киевская область), Барнаульским механическим заводом, Ливенским автоагрегатным заводом (г. Ливны Орловской обл.), Троллейбусным заводом им. Урицкого (г. Энгельс Саратовской обл.) и другими.

Цель работы. Выполнение научно обоснованных технических и технологических решений по разработке новых и совершенствованию существующих процессов вытяжки основных групп деталей на основе математического моделирования формоизменения заготовки из листового материала, позволяющих достичь экономии металла, снизить трудоемкость штамповки, повысить точность листоштампованных деталей.

Задачи исследования.

1. Разработать инженерную теорию и методику математического моделирования, позволяющие исследовать и совершенствовать процессы однооперационной и многооперационной вытяжки осесимметричных, коробчатых и сложных деталей.

2. На базе этой методики предложить научно обоснованные методы расчета практически важных параметров технологии вытяжки основных групп деталей.

3. Исследовать формоизменение заготовки при вытяжке деталей различной геометрии, провести анализ опасности разрушения заготовки, выявить причины потери устойчивости стенки этих деталей и предложить рекомендации по устранению потери устойчивости.

4. Разработать инженерную методику расчета углов конусности и пружинения стенки цилиндрической детали после разгрузки и конкретные рекомендации по повышению точности осесимметричных, коробчатых и сложных листоштампованных деталей, изготавливаемых вытяжкой.

5. Создать методику автоматизированного проектирования технологических процессов вытяжки осесимметричных и коробчатых деталей.

6. Разработать классификации: процессов вытяжки; сложных (например, кузовных) деталей; перетяжных ребер, перетяжных порогов и их сочетаний в штампах для вытяжки.

7. Разработать научно обоснованные технические и технологические решения и внедрить в производство новые способы, штампы и заготовки для вытяжки различных деталей.

Научная новизна. 1. На основе новых теоретических и экспериментальных исследований закономерностей формоизменения и опасности разрушения заготовки разработаны методы проектирования технологических процессов вытяжки, включающие определение размеров и динамики изменения упругих зон на заготовке, контура плоской заготовки, количества последующих операций вытяжки и формы полуфабрикатов после каждой операции. 2. Изучено влияние упрочнения, анизотропии и формы

контура заготовки на ее формоизменение, создана инженерная теория вытяжки основных групп деталей. 3. Обобщены известные и разработаны новые способы повышения точности листоштампованных деталей, изготавливаемых вытяжкой. 4. Созданы алгоритмы автоматизированного проектирования технологии однооперационной и многооперационной вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей.

Практическая ценность. Разработаны и внедрены в промышленности новые малоотходные способы, штампы и заготовки для вытяжки осесимметричных, коробчатых и сложных кузовных деталей.

Апробация полученных результатов и практической ценности. Основное содержание диссертации опубликовано более чем в 80 статьях в России, странах СНГ, США, Германии, Англии, Италии и других странах, доложено на 10 конференциях и семинарах. Теоретические и экспериментальные исследования использованы при разработке и внедрении в промышленности малоотходных технологических процессов вытяжки деталей. Новые способы, штампы и заготовки защищены авторскими свидетельствами и патентами. Содержание диссертации опубликовано в книге, изданной в Англии на английском языке.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 8 глав, общих выводов, списка литературы из 215 наименований и приложения с актами о внедрении; общий объем - 511 страниц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертации и цель работы.

Глава 1. Состояние вопроса

Успешному внедрению процесса вытяжки способствовали работы отечественных и зарубежных ученых и инженеров: Ю.А.Аверкиева, А.Ю.Аверкиева, И.Ю.Ананченко, Ю.М.Арышенского, В.К.Белосевича, С.А.Валиева, С.И.Вдовина, Е.Ю.Верхова, С.Ф.Головащенко, В.Д.Головлева, В.А.Евстратова, А.В.Ерофеева, В.И.Ершова, Л.И.Живова, М.Е.Зубцова, Е.И.Исаченкова, В.И.Казаченка, В.В.Каржавина, С.Б.Климычева, В.Г.Ковалева, В.Г.Кондратенко, А.С.Кутырева, В.Д.Кухарь, А.Н.Малова, А.Д.Матвеева, В.Т.Мещерина, Е.И.Мошнина, А.Г.Овчинникова, Е.А.Попова, В.П.Романовского, Ф.И.Рузанова, В.В.Серепьева, Л.Г.Степанского, Л.Г.Сухомлинова, Г.П.Тетерина, О.В.Усольцева, Л.А.Шофмана, Д.Н.Цой, А.С.Чумадина, С.П.Яковлева, С.С.Яковлева, Р.Хилла, Г.Элера, Д.Ву, Н.М.Вэнга, Х.Исэки, К.Йохиды и многих других. Ими проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов вытяжки, изучено влияние параметров оборудования, оснастки и технологии, накоплен и систематизирован большой производственный опыт. Однако широкий круг вопросов, связанных с проектированием технологии вытяжки различных деталей и с отысканием условий рационального ведения этих процессов, не решен.

Так, например, недостаточно развиты методы проектирования технологии вытяжки цилиндрических деталей с учетом упрочнения и анизотропии листового проката, с учетом конфигурации некруглой заготовки. Еще менее изучен процесс однооперационной и многооперационной вытяжки коробчатых деталей различной формы, а также процесс вытяжки сложных деталей. Это создает пробел в теории вытяжки листовых материалов и затрудняет применение систем автоматизированного проектирования (САПР) технологии вытяжки.

Проблема повышения качества и точности деталей остро стоит перед всеми предприятиями мира, которые имеют листоштамповочные производства. Целесообразно активизировать работы по повышению точности листоштампованных деталей, удовлетворяющих условиям автоматической (например, роботизированной, сборки узлов из этих деталей.

Известные классификации способов вытяжки, сложных деталей и таких важных тормозных элементов штампов для вытяжки, как перетяжные ребра, перетяжные пороги и их сочетания не учитывают характер напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки при формоизменении и поэтому недостаточно полные, что не отвечает потребностям производства.

После штамповки более 30 % листового проката идет в отход. Поэтому исследования и внедрения в промышленности малоотходных технологических процессов листовой штамповки являются важными.

Глава 2. Теория и методы проектирования технологии вытяжки

Детали, штампуемые вытяжкой, по геометрической форме разделены на три основные группы: осесимметричные (тела вращения); коробчатые; сложной формы.

Проектирование процессов вытяжки включает следующие основные расчеты: исходных данных; плоской заготовки; возможности вытяжки заданной детали из этой заготовки; количества операций и размеров полуфабрикатов после каждой операции; силы и работы деформирования.

Определение формы и размеров плоской заготовки в данной работе осуществляется методом последовательных приближений с учетом изменения толщины и поверхности заготовки в процессе деформирования. Первое приближение для контура заготовки рассчитывается из условия равенства поверхностей заготовки и готовой детали с учетом припуска на обрезку и может быть определено различными способами (например, по справочной литературе).

Для теоретического исследования и математического моделирования вытяжки необходимо принять определенные допущения и выбрать расчетную модель деформирования заготовки, которая: с одной стороны должна в наибольшей мере соответствовать реальным условиям вытяжки в

штампе; а с другой стороны эта модель должна позволить рассчитать с достаточной точностью практически важные параметры процесса с минимальным временем работы компьютера.

Данная инженерная теория рассчитана на использование не мощных и дорогостоящих уникальных компьютеров и рабочих станций (которые имеются лишь на немногих крупных предприятиях), а обычных персональных компьютеров (которые имеются на всех предприятиях по выпуску листоштампованных деталей).

В зависимости от того, где на заготовке при формоизменении располагается очаг пластических деформаций, выделены две основные расчетные схемы исследования первой операции вытяжки: когда очаг деформаций расположен лишь во фланце заготовки; когда во всей заготовке.

При вытяжке осесимметричных (цилиндрических, конических и подобных деталей с фланцем или без фланца) и коробчатых деталей с плоским и близким к плоскому дном, очаг деформаций расположен главным образом во фланце заготовки B,T' (рис. 1) между поверхностями матрицы и прижимного кольца штампа. В этом случае методика математического моделирования заключается в следующем:

- весь процесс формоизменения заготовки разбивается на большое число элементарных этапов и задается малое приращение хода пуансона (или матрицы);
- с учетом НДС и изменения толщины заготовки рассчитывается объем материала, который на данном этапе должен быть втянут из фланца;
- определяются приращения перемещения частиц заготовки на внутреннем контуре фланца;
- при помощи аналитических или численных методов, например, метода конечных элементов (МКЭ) вычисляются компоненты НДС заготовки и практически важные параметры процесса с учетом упрочнения, анизотропии, изменения толщины заготовки, сил трения и других факторов;
- определяется опасность складкообразования или разрушения заготовки;
- рассчитывается новая измененная форма заготовки после данного приращения хода пуансона;
- задается следующее приращение хода пуансона и все описанные стадии моделирования повторяются.

Рассмотрена первая операция вытяжки осесимметричных и коробчатых деталей. Вытяжка осесимметричной детали является частным случаем вытяжки коробчатой детали. В качестве конкретного примера рассмотрено формоизменение плоской (или предварительно деформированной прижимной плитой штампа) заготовки при вытяжке распространенной коробчатой детали с двумя осями симметрии на первом этапе $j = 1$, когда

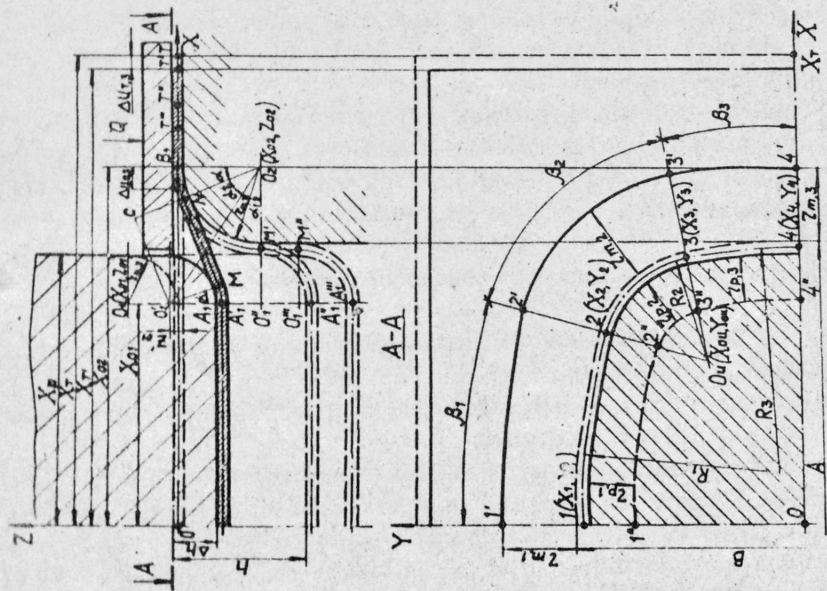


Рис. 1. Схема вытяжки детали из плоской заготовки

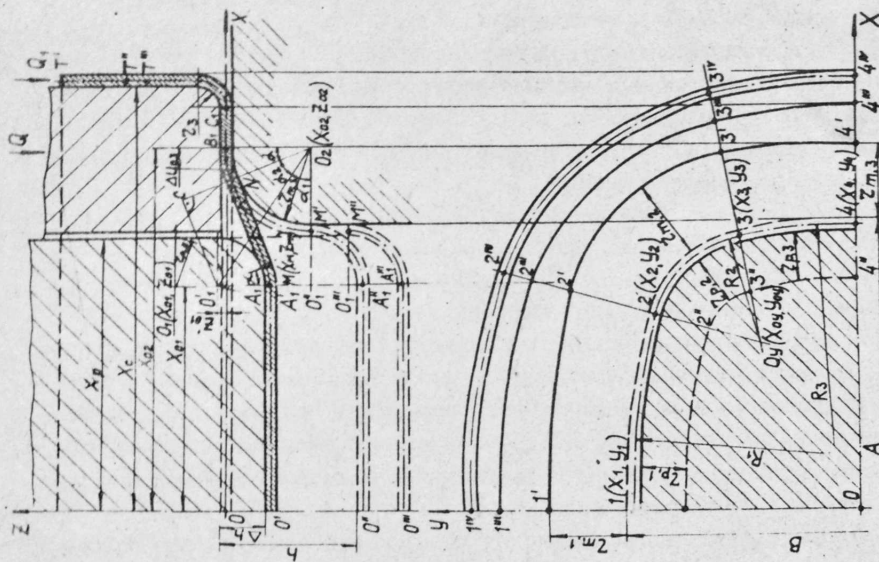


Рис. 2. Схема вытяжки детали из полуфабриката

приращение хода пуансона равно Δh (рис. 1). Принято обычное допущение, что донная часть заготовки под плоским торцом пуансона в процессе всего деформирования не изменяет своих размеров. В то же время кольцевая не зажата часть заготовки A_1B_1 , расположенная в зазоре между радиусными закруглениями пуансона и матрицы, в процессе вытяжки претерпевает значительные пластические деформации. После перемещения пуансона на величину Δh эта кольцевая часть заготовки $F_{A_1B_1}$ состоит из трех поверхностей $F_{A_1M}, F_{MN}, F_{NB_1}$, описываемых тремя плоскими кривыми (дугой окружности A_1M на радиусном закруглении пуансона, прямой MN и дугой окружности NB_1 на радиусном закруглении матрицы) при вращении их на угол β_3 и равных произведению длины кривых $L_{A_1M}, L_{MN}, L_{NB_1}$ (по средней линии заготовки) на длину участка окружности центров тяжести этих кривых с абсциссами $X_{A_1M}, X_{MN}, X_{NB_1}$. Получены формулы для определения этих трех поверхностей, а также суммарной поверхности участка заготовки $F_{A_1B_1} = F_{A_1M} + F_{MN} + F_{NB_1}$.

Если бы толщина заготовки в процессе деформирования не изменялась, то увеличение поверхности части заготовки A_1MNB_1 по мере вытяжки происходило только за счет перетекания материала из фланца заготовки B_1T' . Однако в действительности увеличение поверхности кольцевой части заготовки A_1B_1 с центральным углом β_3 в значительной мере происходит за счет утонения и перетекание материала из фланца уменьшается. Изгиб элемента заготовки A_1M на кромке пуансона происходит в условиях действия значительных растягивающих вдоль линии MN нормальных напряжений $\sigma_{1,p,M}^{\max}$, что приводит к существенному изменению радиуса нейтральной поверхности ρ_n по сравнению с радиусом срединной поверхности $\rho_m = r_{p,3} + s/2$; при этом исходная толщина заготовки s уменьшается до величины $s_1 = s_{kr}$, которую можно рассчитать, например, по формуле Е.А. Попова.

Из условия постоянства объема материала $F_{A_1M}^0 s = F_{A_1M} s_1$ можно приближенно определить величину увеличения поверхности заготовки A_1M за счет уменьшения толщины $\Delta F_{A_1M} = F_{A_1M} - F_{A_1M}^0 = F_{A_1M} (1 - s_1/s)$, на которую не будет втянут материал из фланца за период перемещения пуансона на величину Δh .

Изгиб элемента заготовки NB_1 на скругленной кромке матрицы также происходит при смещении нейтральной поверхности от срединной в условиях действия таких же растягивающих вдоль линии MN напряжений $\sigma_{n,p,M}^{\max}$; поэтому увеличение поверхности заготовки NB_1 за счет уменьшения толщины ΔF_{NB_1} рассчитывалось аналогично.

Таким образом, если из поверхности элементов заготовки $F_{A_1B_1}$ для j -го этапа деформирования вычесть поверхность $F_{A_1B_1}$ для $(j-1)$ -го этапа и дополнительно вычесть приращения поверхности ΔF_{A_1M} и ΔF_{NB_1} , полученные за счет утонения заготовки на участках A_1M и NB_1 , то получим поверхность $\Delta F = F_{A_1B_1} - F_{A_1B_1} - \Delta F_{A_1M} - \Delta F_{NB_1}$, которая на j -м этапе должна быть втянута из фланца заготовки B_1T' . Так как вектор приращения перемещения $\Delta u_{0,3}$ частиц материала на участке 3-4 внутреннего контура фланца направлен по касательной к радиусному закруглению кромки матрицы в точке B_1 (то есть этот вектор расположен в плоскости XOY фланца заготовки), то из уравнения

$$\Delta F = \pi \beta_3 / 360 [(R_3 + r_{m,3} + s/2)^2 - (R_3 + r_{m,3} + s/2 - \Delta u_{0,3})^2] \quad (2.1)$$

нетрудно определить величину вектора $\Delta u_{0,3}$.

Аналогично рассчитываются приращения перемещений $\Delta u_{0,2}$ и $\Delta u_{0,1}$ частиц материала вдоль двух других участков внутреннего контура фланца заготовки соответственно 2'-3' и 1'-2'.

Зная значения приращений перемещений частиц материала на внутреннем контуре фланца заготовки, можно приступить к решению задачи по расчету приращений и полных значений перемещений, деформаций и напряжений во всех точках фланца на j -м этапе деформирования. Так как эта задача для общего случая вытяжки не имеет аналитического решения, то необходимо применять численные методы математического анализа, среди которых наиболее точным и перспективным является МКЭ.

Для математического моделирования с помощью МКЭ упругопластического НДС фланца заготовки принята расчетная модель плоского напряженного состояния анизотропного (ортотропного) упрочняемого тела с изменяющейся в процессе деформирования толщиной. Срединную поверхность плоского или пространственного (деформированного перед вытяжкой, например, прижимной плитой штампа) фланца разбиваем на плоские треугольные конечные элементы с тремя i -ми ($i=1,2,3$) узлами. Девять компонентов вектора приращений перемещений в узлах каждого конечного элемента имеют вид $\{d\delta\}^T = \{du_i, dv_i, dw_i, du_i, dv_i, dw_i, du_i, dv_i, dw_i\}$, где du_i, dv_i, dw_i - составляющие приращений перемещений в локальных прямоугольных координатах x, y, z , причем оси x, y выбраны в плоскости элемента. Компоненты приращений деформаций $\{d\varepsilon\}^T = \{d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z, d\varepsilon_{xy}, d\varepsilon_{yz}, d\varepsilon_{zx}\}$ записывают в виде

$$\{d\varepsilon\} = [B]\{d\delta\}, \text{ где } [B] - \text{математическая матрица дифференцирования приращений перемещений.}$$

В начальные этапы вытяжки фланец заготовки сначала деформируется упруго и только на последующих этапах отдельные участки заготовки начинают переходить в пластическое состояние. При решении упругой за-

дачи во фланце заготовки для связи между приращениями деформаций $\{d\epsilon_s\}$ и приращениями напряжений $\{d\sigma\}$ использован обобщенный закон Гука, отнесенный к осям симметрии анизотропного материала:

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\epsilon_s\} \text{ или } \begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{\nu_{yx}E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ \frac{\nu_{xy}E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E_{xy}^{(45)}}{2(1+\nu_{xy}^{(45)})} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_{e,x} \\ d\epsilon_{e,y} \\ d\gamma_{e,xy} \end{Bmatrix}, \quad (2.2)$$

где модули упругости $E_x, E_y, E_{xy}^{(45)}$ и коэффициенты Пуассона $\nu_{yx}, \nu_{xy}, \nu_{xy}^{(45)}$ определяются при испытании на одноосное растяжение образцов, вырезанные соответственно вдоль и поперек направления прокатки материала, а также под углом 45° к этим направлениям; $[D]$ - матрица упругости.

Для вывода основных уравнений в МКЭ использован принцип возможных перемещений, согласно которому сумма работ внешних $\{p\}$ и внутренних $\{\sigma\}$ сил на возможном перемещении равна нулю: $[B]^T \{\sigma\} F s_1 = \{p\}$ или $[B_1]^T \{\sigma\} s_1 = \{p\}$, (2.3)

где F, s_1 - площадь и толщина конечного элемента; $[B_1]^T = [B]^T F$.

Так как в данном исследовании задачи теории вытяжки решаются в приращениях перемещений для поэтапного деформирования заготовки, то необходимо продифференцировать выражение (2.3):

$$[B_1]^T \{d\sigma\} s_1 + [dB_1]^T \{\sigma\} s_1 + [B_1]^T \{\sigma\} ds_1 = \{dp\}.$$

Последнее уравнение записано по методике H. Iseki в виде $([k_1] + [k_2] + [k_3])\{d\delta\} = \{dp\}$ или $[k]\{d\delta\} = \{dp\}$, где $[k_1], [k_2], [k_3]$ - матрицы жесткости, связанные с изменением напряжений, а также с изменением формы и толщины конечных элементов.

Матрицы жесткости $[k_i]$ для всех конечных элементов собирают в одну глобальную матрицу жесткости $[K]$ для всего фланца заготовки с помощью специальной матрицы индексов; в результате получено

$$[K]\{d\Delta\} = \{dP\}. \quad (2.4)$$

Граничные условия для приращений перемещений $\{d\Delta\}$ задаются с учетом того, что во всех узлах сетки конечных элементов на внутреннем контуре фланца заготовки нормальные к контуру составляющие векторов приращений перемещений частиц заготовки равны рассчитанным выше величинам $\Delta u_{0,1}, \Delta u_{0,2}, \Delta u_{0,3}$. Касательные составляющие приращений перемещений в этих узлах равны нулю; кроме того, из условия симметрии механических свойств листового проката касательные составляющие приращений перемещений равны нулю и на осях OX, OY .

Граничные условия для приращений внешних сил $\{dP\}$ во всех узлах сетки конечных элементов задавались с учетом того, что напряжения σ_p , вызванные действием сил трения по нижним и верхним поверхностям фланца заготовки от усилия прижима Q , распределены равномерно по заготовке и направлены по нормали к внутреннему контуру фланца заготовки.

В результате решения методом Гаусса системы линейных алгебраических уравнений (2.4) с учетом граничных условий можно получить искомые компоненты векторов приращений перемещений $\{d\Delta\}$ материала заготовки во всех узлах сетки конечных элементов, а затем рассчитать другие параметры НДС.

Для определения упругопластических деформаций и напряжений в тех конечных элементах, которые при какой-то величине хода пуансона перешли в пластическое состояние, МКЭ применен в сочетании с теорией пластичности анизотропного тела Р.Хилла. В этом случае условие пластичности представлено функцией

$$f(\sigma_{ij}) = 0,5[(G+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H+F)\sigma_y^2 + 2N\tau^2] - 0,5 = 0, \quad (2.5)$$

где F, G, H, N - параметры анизотропии.

Приращения полных деформаций $\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon_e\} + \{d\varepsilon_p\}$ складываются из приращений упругих $\{d\varepsilon_e\} = [D]^{-1}\{d\sigma\}$ и пластических $\{d\varepsilon_p\} = d\lambda_p \{df/d\sigma\} = d\lambda_p \{a\}$ деформаций. Полный дифференциал функции пластичности (2.5) записан в виде $df = 2/3(F+G+H)H d\lambda_p = Ad\lambda_p$, где $H = d\sigma_1/d\varepsilon_{p,1}$ - тангенс угла наклона кривой зависимости интенсивности напряжений σ_1 от интенсивности пластических деформаций $\varepsilon_{p,1}$.

Далее по методике О.К.Зенкевича найдено выражение для расчета величины $d\lambda_p = \{a\}^T [D] \{d\varepsilon\} / (A + \{a\}^T [D] \{a\})$ и приращений напряжений

$$\{d\sigma\} = ([D] - [D] \{a\} \{a\}^T [D] / (A + \{a\}^T [D] \{a\})) \{d\varepsilon\} = [D_{ep}] \{d\varepsilon\}. \quad (2.6)$$

Полные значения напряжений $\{\sigma_j\} = \{\sigma_{j-1}\} + \{d\sigma_j\}$ на j -м этапе вытяжки уточняли при помощи итерационного метода Ньютона-Рафсона из условия, что весь фланец заготовки находится в равновесии.

Для изотропной заготовки необходимо во все записанные выше зависимости подставить выражения $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = \nu_{yz} = \nu_{zy} = \nu_{xy}^{(45)} = \nu$, $E_x = E_y = E_z = E^{(45)}$, $F = G = H = N/3 = 1/(2\sigma_T^2)$, где ν, E, σ_T - коэффициент Пуассона, модуль упругости и предел текучести изотропного материала.

Разработаны методики: учета влияния упрочнения и изменения толщины на НДС анизотропной заготовки; расчета контура заготовки после каждого этапа деформирования.

Для определения максимального растягивающего напряжения $\sigma_{n \max}$ в опасном сечении заготовки (с минимальной толщиной) на переходе от скругленной кромки пуансона к стенке на любой стадии вытяжки необходимо к величине нормального напряжения в каждом узле сетки конечных элементов на внутреннем контуре фланца прибавить поправки на изгиб и трение заготовки по скругленным кромкам пуансона и матрицы. Более подробно это описано в последующих главах при исследовании вытяжки осесимметричных и коробчатых деталей.

Условие вытяжки без разрушения заготовки сформулировано так: максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{n \max}$ на всех этапах вытяжки не должно превышать предельное напряжение $\sigma_{\lim}$: $\sigma_{n \max} \leq \sigma_{\lim}$. Так как НДС стенки вытягиваемой детали близко к НДС образца при испытании на одноосное растяжение, то предельное напряжение $\sigma_{\lim}$ можно определить через истинный предел прочности $\sigma_{b,ist}$: $\sigma_{\lim} = \sigma_{b,ist} / C$; $\sigma_{b,ist} = \sigma_b (1 + \delta_p)$, где предел прочности σ_b и относительное равномерное удлинение δ_p определяются при стандартном испытании образцов на одноосное растяжение или по справочной литературе. Коэффициент C учитывает принятые в теории вытяжки допущения; величину C можно задавать равной 1,2.

В общем случае вытяжки деталей различной конфигурации максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{n \max}$ распределено неравномерно по периметру стенки штампуемой детали и усилие вытяжки на каждом этапе должно определяться по формуле

$$P = \int_0^L \sigma_{n \max} s_{gr} \sin \alpha dl, \quad (2.7)$$

где s_{gr} - минимальная толщина стенки в опасном сечении; α - угол между направлением действия напряжения $\sigma_{n \max}$ и горизонталью. Интеграл берется по периметру L границы контакта заготовки со скругленной кромкой пуансона. Работа деформирования (работа вытяжки) рассчитывается методом численного интегрирования, например, по формуле прямоугольников как сумма элементарных работ $\Delta A = P \Delta h$ для каждого этапа вытяжки заготовки пуансоном на величину Δh .

Для выбора пресса рассчитанная по данной теории диаграмма $P-h$ накладывается на диаграмму допустимого усилия пресса, а работа деформирования A сравнивается с мощностью пресса.

Если на каком-то этапе вытяжки максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{n \max}$ станет больше предельного напряжения $\sigma_{\lim}$, то вытяжка заготовки возможна только до этого этапа, а дальше начнется разрушение заготовки. В этом случае компьютер автоматически (или при помощи технолога) вносит в исходные данные, например, следующие изменения: по геометрии детали - увеличиваются r_p и s ; по механическим свойствам

листового металла - выбирается новая марка металла с меньшими величинами σ_T , σ_b и увеличенным δ_p ; по параметрам технологического процесса - изменяется в определенных пределах (чтобы не было складкообразования) усилие прижима заготовки Q ; по параметрам штампа - увеличивается r_m ; за счет изменения материала рабочих частей штампа (например, вместо стали используется бронза) и изменения состава смазки (например, выбирается смазка с наполнителем) уменьшается коэффициент трения μ . Математическое моделирование выполняется для новых условий формоизменения заготовки до тех пор, когда напряжение $\sigma_{n \max}$ станет меньше $\sigma_{\lim}$ и вытяжка заданной детали станет возможной.

Если же и после изменения условий деформирования выявляется невозможность вытяжки заданной детали из плоской заготовки, то компьютер рассчитывает такие размеры рабочих частей штампа и полуфабриката после первой операции многооперационной вытяжки, чтобы уже на первой операции максимально использовать пластические свойства заготовки (для минимального количества операций вытяжки), то есть чтобы на первой операции напряжение $\sigma_{n \max}$ было по возможности равным (но не больше) $\sigma_{\lim}$.

Далее рассмотрен процесс деформирования пространственного полуфабриката на последующей операции вытяжки коробчатой детали: в матрице с рабочей поверхностью в виде плоскости с радиусным закруглением (рис. 2); в конической матрице.

Для таких наиболее распространенных на практике схем процесса очаг пластических деформаций располагается главным образом на участке между стенками вытягиваемой детали и полуфабриката. При этом задача по определению НДС материала в очаге деформаций сводится к рассмотренной ранее задаче для первой операции вытяжки детали из плоской (или пространственной) заготовки с некоторыми отличиями.

При разработке на производстве технологического процесса многооперационной вытяжки заданной осесимметричной или коробчатой детали основными являются расчеты минимального количества операций (переходов) и размеров полуфабрикатов после каждой операции. Эти расчеты базируются на выполнении четырех условий.

Первое условие: для снижения возможности потери устойчивости стенки вытягиваемой детали на (n) -й операции максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{n \max}^{(n)}$ в опасном сечении на всех этапах вытяжки должно как можно более равномерно распределяться по периметру стенки: $\sigma_{n \max}^{(n)} \rightarrow$ равномерно. Второе условие: для обеспечения минимального количества операций вытяжки напряжение $\sigma_{n \max}^{(n)}$ должно быть по возможности близким к предельному напряжению $\sigma_{\lim}$: $\sigma_{n \max}^{(n)} \rightarrow \sigma_{\lim}$;

при этом пластические свойства заготовки используются в наибольшей мере. Третье условие: для исключения разрушения вытягиваемой детали (или вытягиваемого полуфабриката) напряжение $\sigma_{n \max}^{(n)}$ ни в одной точке периметра стенки не должно превышать предельное напряжение $\sigma_{\lim}$: $\sigma_{n \max}^{(n)} \leq \sigma_{\lim}$. Четвертое условие: для повышения надежности формоизменения детали и полуфабриката коэффициенты запаса прочности $K_s^{(n)} = \sigma_{\lim} / \sigma_{n \max}^{(n)}$ должны быть приблизительно одинаковыми для всех (n) -х операций вытяжки. Если какая-то операция вытяжки получается недостаточно нагруженной, то необходимо дополнительно нагрузить эту операцию за счет снижения напряжений и деформаций на остальных операциях и выровнять напряжения и деформации по операциям.

Контуры стенки полуфабрикатов в плане (иначе, контуры промежуточных переходов) и их размеры определяются теоретически методом последовательных приближений (первое приближение задается, например, по справочной литературе) до тех пор, пока не будут получены наиболее благоприятные условия деформирования.

Качество листоштампованной детали охарактеризовано пятью основными критериями: прочность, качество формы, качество поверхности, жесткость, точность. Из всех критериев в данной работе рассматривается наиболее важный критерий точности. Сформулированы факторы, влияющие на точность, классифицированы основные методы повышения точности деталей, изготавливаемых вытяжкой.

Глава 3. Исследование вытяжки осесимметричных деталей

Теория вытяжки постоянно развивается для расчета отдельных параметров, определяемых потребностями производства. В данной главе теория вытяжки рассмотрена для расчета главного параметра, по которому производится, например, управление формоизменением заготовки, а именно для расчета усилия вытяжки.

Для примера рассмотрен j -й этап вытяжки наиболее распространенной цилиндрической детали из круглой заготовки, когда приращение хода пуансона равно Δh , а $j=1$ (рис. 3). Усилие вытяжки P на каждом этапе деформирования рассчитывается по формуле Е.А.Попова

$$P = 2\pi r_{gr} s_{gr} \sigma_{\rho \max} \sin \alpha, \quad (3.1)$$

где $\sigma_{\rho \max}$ - максимальное растягивающее напряжение в опасном сечении, которое находится на границе контакта заготовки с закруглением пуансона и имеет минимальную толщину s_{gr} ; r_{gr} - радиус, координирующий опасное сечение; α - угол между направлением действия напряжения $\sigma_{\rho \max}$ и горизонталью (этот угол равен углу охвата заготовкой скругленных кромок пуансона и матрицы радиусов r_p и r_m).

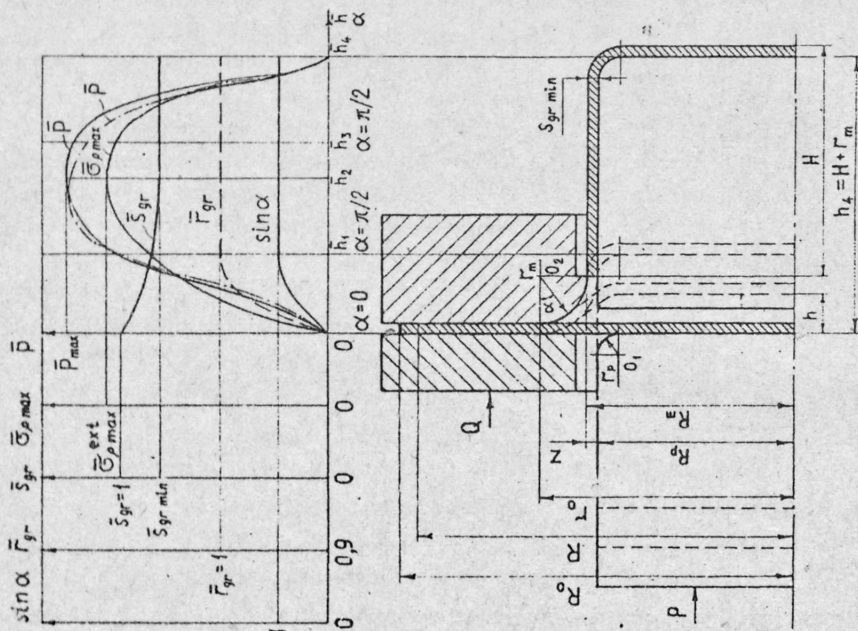


Рис. 3. Изменение параметров по ходу вытяжки

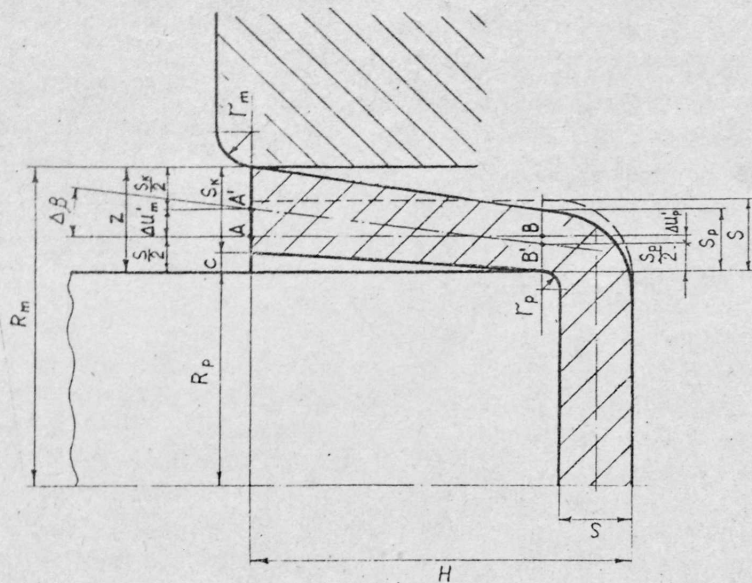


Рис. 4. Конусность стенки цилиндрической детали

Рассмотрены последовательно методы расчета величин $\sigma_{\rho \max}, r_{gr}, s_{gr}, \sin \alpha$, входящих в формулу (3.1).

По методике второй главы определено приращение перемещения частиц заготовки Δu_0 на внутреннем контуре фланца радиуса r_0 для последующего решения задач по расчету приращений перемещений, деформаций и напряжений во фланце заготовки на j -м этапе вытяжки.

В начальные этапы вытяжки фланец заготовки сначала деформируется упруго и только на последующих этапах отдельные участки заготовки начинают переходить в пластическое состояние. Получено аналитическое решение упругой задачи для фланца заготовки, которое в дальнейшем использовано для сравнения с численными решениями при помощи МКЭ.

На всех начальных этапах рассчитывается интенсивность напряжений и при помощи условия пластичности оценивается переход частиц заготовки из упругого в пластическое состояние. Для основных этапов, когда пластические деформации охватят весь фланец заготовки, получено следующее аналитическое решение задачи. Принята расчетная модель плоского напряженного состояния изотропного упрочняемого тела.

Условие пластичности Мизеса в полярной системе координат ρ, θ $\sigma_i = \sqrt{\sigma_\rho^2 - \sigma_\rho \sigma_\theta + \sigma_\theta^2} = \sigma_s$, можно удовлетворить, используя зависимости из теории пластичности В.В.Соколовского

$$\sigma_\rho = 2K_s \cos(\omega - \pi/6); \sigma_\theta = 2K_s \cos(\omega + \pi/6), \quad (3.2)$$

где $K_s = \sigma_s / \sqrt{3}; \omega = \omega(\rho)$ - искомая функция; σ_i - интенсивность напряжений; $\sigma_\rho, \sigma_\theta$ - радиальное растягивающее и тангенциальное сжимающее главные напряжения; σ_s - напряжение текучести заготовки.

Подставляя (3.2) в уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0 \quad (3.3)$$

и интегрируя с учетом граничного условия: при $\rho = R, \sigma_\rho = \sigma_k = 2K_s \cos(\omega_k - \pi/6)$, получено уравнение

$\rho^2 = R^2 \sin \omega_k / \sin \omega \exp[\sqrt{3}(\omega - \omega_k)]$, которое после логарифмирования решено методом итераций с любой точностью

$$\omega = \omega_k + 1/\sqrt{3} \ln(\rho^2 / R^2 \sin \omega / \sin \omega_k) = f(\omega), \quad (3.4)$$

так как на интервале $\pi/3 \leq \omega \leq 2/3\pi$, где находится корень уравнения и выбирается первое приближение $\omega^{(1)}$ (равное, например, $\omega^{(1)} = \pi/2$), величина $df/d\omega \leq 1$ и итерационный процесс сходится.

Напряжение σ_k на контуре заготовки радиуса R может определяться с учетом давления жидкости или резины в торец заготовки. Обычно на контуре заготовки $\sigma_k = 0$ и $\omega_k = 2/3\pi$.

Далее в уравнение связи напряжений и приращений деформаций

$$d\varepsilon_p / d\varepsilon_\theta = (2\sigma_p - \sigma_\theta) / (2\sigma_\theta - \sigma_p) \quad (3.5)$$

подставлены

$$d\varepsilon_p = d(\Delta u) / d\rho; d\varepsilon_\theta = \Delta u / \rho, \quad \text{выражения} \quad (3.6)$$

а также (3.2), в результате получено

$$\sin(\omega - \pi/6)d(\Delta u) / d\rho + \sin(\omega + \pi/6)\Delta u / \rho = 0. \quad (3.7)$$

Интегрирование этого дифференциального уравнения с использованием граничного условия: при $\rho = r_0, \Delta u = \Delta u_0, \omega = \omega_0$, дало

$$\Delta u = \Delta u_0 \sqrt{\sin \omega_0 / \sin \omega} \exp[-\sqrt{3}(\omega - \omega_0)]. \quad (3.8)$$

По формуле (3.8) рассчитывается также приращение перемещения контура заготовки $\Delta u_{R(j)}$ после каждого j -го этапа вытяжки и новый радиус заготовки

$$R_{(j)} = R_{(j-1)} - \Delta u_{R(j)}. \quad (3.9)$$

Приращения радиальных $d\varepsilon_p$ и тангенциальных $d\varepsilon_\theta$ деформаций рассчитываются по формулам (3.8) и (3.6), а величину приращения деформации $d\varepsilon_z$, связанную с изменением толщины заготовки, определяют из условия несжимаемости $d\varepsilon_p + d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_z = 0$.

Для оценки упрочнения заготовки в процессе вытяжки напряжение текучести σ , принималось одинаковым по ширине фланца, а его величина определялась зависимостью $\sigma_s = \sigma_T + A\phi^m$, где ϕ - деформация фланца, эквивалентная относительноному уменьшению площади поперечного сечения образца при стандартном испытании на одноосное растяжение; m - показатель деформационного упрочнения; A - постоянная.

Таким образом, задавая различные значения радиуса ρ , можно для j -го этапа вытяжки из уравнения (3.4) рассчитать величины ω и ω_0 , а затем определить аналитически приращения перемещений (3.8) и деформаций (3.6), а также напряжения (3.2), в том числе радиальное растягивающее напряжение на внутреннем контуре фланца заготовки радиуса r_0 в точке В $\sigma_{p,p.B}$.

После учета влияния изгиба на скругленных кромках матрицы и пуансона, и влияния трения на кромке матрицы по работам Л.А.Шофмана и Е.А.Попова растягивающее напряжение $\sigma_{p,p.N}$ в сечении N_1N_2 на переходе от скругленной кромки матрицы к стенке толщиной $s_{gr,m}$ и с радиусом $r_{gr,m}$ для первой стадии вытяжки (когда охват заготовкой скругленных кромок пуансона и матрицы еще не завершен и глубина вытяжки $h \leq r_p + r_m + s$) определяется так:

$$\sigma_{p,p.N} = [\sigma_{p,p.B} + \mu Q / (\pi_0 s) + \sigma_s s / (4r_m + 2s)] \exp(\mu \alpha) + \sigma_s s / (4r_p + 2s); r_0 = R_m + r_m.$$

Из условия равенства усилия вытяжки P , приложенного в сечении N_1N_2 : $P = \sigma_{p,p,N} 2\pi r_{gr,m} s_{gr,m}$ и в опасном сечении M_1M_2 с минимальной толщиной s_{gr} и радиусом r_{gr} : $P = \sigma_{p,max} 2\pi r_{gr} s_{gr}$, при одинаковых значениях $\sin \alpha$ и допущении $s_{gr,m} \approx s_{gr}$, следует

$$\sigma_{p,max} = \sigma_{p,p,N} r_{gr,m} / r_{gr}.$$

Окончательно, максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{p,max}$ в опасном сечении M_1M_2 (на границе контакта заготовки с пуансоном) для первой стадии вытяжки осесимметричных деталей рассчитывается по формуле

$$\sigma_{p,max} = [(\sigma_{p,p,B} + \mu Q / (\pi_0 s) + \sigma_s s / (4r_m + 2s)) \exp(\mu \alpha) + \sigma_s s / (4r_p + 2s)] r_{gr,m} / r_{gr}. \quad (3.10)$$

Первая стадия вытяжки заканчивается при ходе пуансона $h = r_p + r_m + s$.

На второй стадии вытяжки (до достижения усилием вытяжки P максимального значения $P = P_{max}$) и на третьей стадии вытяжки (до выхода края заготовки из-под прижимного кольца штампа) дополнительно возникает спрямление элементов заготовки при сходе их со скругленной кромки матрицы и переходе в стенку образующейся детали. Таким образом, на второй и третьей стадиях вытяжки осесимметричных деталей при $h > r_p + r_m + s$ формула (3.10) принимает вид

$$\sigma_{p,max} = [(\sigma_{p,p,B} + \mu Q / (\pi_0 s) + \sigma_s s / (4r_m + 2s)) \exp(\mu \alpha) + \sigma_s s / (4r_p + 2s) + \sigma_s s / (4r_m + 2s)] r_{gr,m} / r_{gr}. \quad (3.11)$$

На заключительной четвертой стадии вытяжки детали без фланца деформирование краевой части заготовки осуществляется без прижима, а максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{p,max}$ плавно уменьшается до значения, близкого к нулю.

Таким образом, для расчета усилия P на каждом этапе вытяжки по выражению (3.1) известны все величины, которые на рис. 3 показаны в безразмерных переменных (с черточкой). Диаграмма «сила вытяжки P - ход пуансона h », построенная по данной теории (на рис. 3 сплошная линия), хорошо согласуется с результатами наших экспериментов (штрихпунктирная линия); погрешность не превышает 20 %.

Описанное аналитическое решение задачи теории вытяжки не учитывало анизотропии листового металла, которая может как улучшить, так и ухудшить условия деформирования заготовки и качество вытягиваемых деталей. Задача расчета НДС и растягивающего напряжения $\sigma_{n,p,B}$ на внутреннем контуре фланца анизотропной заготовки в точке В теперь уже не имеет аналитического решения, поэтому был применен приведенный во второй главе МКЭ. Упрочнение заготовки учитывали при помощи степенной функции $\sigma_i = C \varepsilon_{p,i}^n$.

В качестве конкретного примера выполнены расчеты для заготовки из коррозионно-стойкой стали марки 08X18H10 по ГОСТ 5582-75, имеющей

первоначальный радиус $R_0=64$ мм и толщину $s=1$ мм; внутренний контур фланца заготовки имел форму окружности радиуса $r_0=37,5$ мм, внутренний радиус вытягиваемой детали (или радиус пуансона) $R_p=31,5$ мм; радиусы скругленных кромок пуансона и матрицы - $r_p=4$ мм, $r_m=5$ мм; односторонний зазор между пуансоном и матрицей $z=1,2$ мм, параметры вытяжки рассчитывали без принудительного утонения стенки детали. На основании статистической обработки результатов проведенных нами испытаний на одноосное растяжение образцов, вырезанных под углом $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ к направлению прокатки, были определены по ГОСТ 11701-84 механические характеристики этой стали.

В результате математического моделирования решены следующие задачи:

установлена закономерность, что плоскостная анизотропия по сравнению с вытяжкой изотропного материала дополнительно нагружает одни участки внутреннего контура фланца и разгружает другие, в целом ухудшая условия вытяжки; обоснована целесообразность использования разгружающего воздействия анизотропии при вытяжке осесимметричных деталей из некруглых заготовок, а также коробчатых и сложных деталей;

установлена другая закономерность: плоскостная анизотропия листовых материалов при вытяжке цилиндрической детали из круглой заготовки по сравнению с вытяжкой изотропного материала (при прочих равных условиях), кроме изменения напряженного состояния фланца заготовки, изменяет также и кинематику перемещения частиц фланца по сравнению с радиальным течением, что вызывает образование фестонов на стенке детали и уменьшение высоты стенки по наибольшей впадине;

определена динамика изменения контура заготовки и образования фестонов при вытяжке цилиндрической детали из круглой заготовки в зависимости от параметров анизотропии;

из условия, чтобы все точки контура заготовки одновременно подошли к внутреннему контуру фланца радиуса r_0 , методом последовательных приближений определен контур профильной заготовки с минимальным фестонобразованием, при вытяжке которой высота стенки одинакова по периметру детали; далее можно рассчитать рациональный раскрой таковой заготовки из ленты (рулона, полосы или листа) с минимальной нормой расхода материала для вытяжки заданной детали.

На основании анализа наиболее распространенных схем раскроя листовых материалов предложено два новых малоотходных способа вырубki без перемишек из ленты некруглых плоских заготовок для вытяжки различных деталей. Проведены вычислительные эксперименты по расчету НДС заготовки на каждом этапе формоизменения и по анализу возможно-

сти применения малоотходного процесса вытяжки осесимметричных деталей из некруглых заготовок; этот процесс внедрен в промышленности.

Выявлена закономерность: увеличение ширины фланца и растягивающего напряжения напротив какого-то участка внутреннего контура фланца заготовки приводит к уменьшению и разгрузке растягивающего напряжения на соседних участках внутреннего контура, напротив которых ширина фланца осталась неизменной. Эту закономерность можно использовать на практике для исключения разрушения заготовок при вытяжке.

Экспериментальные исследования процессов вытяжки цилиндрических деталей с широким фланцем, когда полное протягивание заготовки через матрицу невозможно, подтвердили принципиальную справедливость разработанной теории вытяжки. При математическом моделировании этого процесса рассчитывается высота втянутой части заготовки до момента, когда максимальное растягивающее напряжение в опасном сечении стенки вытягиваемой детали станет равным предельному напряжению, и сравнивается с высотой по чертежу детали.

Экспериментальные исследования процессов вытяжки цилиндрических деталей из особо тонкого листового материала толщиной 0,1-0,2 мм позволили выявить особенности вытяжки деталей из таких материалов, определить практически важные параметры и разработать рекомендации по проектированию технологических процессов и штампов.

Рассчитаны углы конусности и пружинения стенки детали после разгрузки. Математическое моделирование вытяжки предусматривает также следующий расчет угла конусности $\Delta\beta$ (рис. 4) стенки цилиндрической детали, который образуется в конечный момент вытяжки из-за того, что зазор z между цилиндрическими пуансоном радиуса R_p и матрицей радиуса R_m больше толщины плоской заготовки s и равен $z = R_m - R_p$; в частных случаях $z = s_k$ и $z = s$.

Вследствие утолщения края заготовки от величины s до величины s_k (а также вследствие наличия просвета c между поверхностью пуансона и внутренней поверхностью детали) точка A , которая находится на средней линии стенки детали без учета изменения толщины и отстоит от поверхности пуансона на расстоянии $s/2$, переместится от оси симметрии детали в положение A' на величину $\Delta u_m = z - s/2 - s_k/2$; при $c=0$, $z = s_k$ и $\Delta u_m = (s_k - s)/2$. Величина s_k рассчитывается по описанной выше теории при помощи МКЭ. Просвет c равен $c = R_m - R_p - s_k$.

Вследствие утонения точка B , которая лежит на пересечении вертикальной средней линии стенки AB с горизонталью (проходящей через центр углового закругления пуансона или детали у дна радиуса r_r) и отстоит от поверхности пуансона на расстоянии $s/2$, переместится к оси

симметрии детали в положение B' на величину $\Delta u_p = (s - s_p)/2$, где s_p - минимальная толщина стенки детали у дна, которая рассчитывается по описанной выше теории.

Для упрощения расчетов s_p в первом приближении можно принять, что утолщение края стенки детали $\Delta s_k = s_k - s$ равно утонению стенки детали у дна $\Delta s_p = s - s_p$, и найти s_p . Следовательно, угол конусности равен

$$\Delta\beta = \arctg[(\Delta u_m + \Delta u_p)/(H - s - r_p)]. \quad (3.16)$$

Определено увеличение угла конусности и размеров детали после ее выхода из матрицы штампа вследствие упругих деформаций (пружинения). В конечный момент вытяжки в штампе при $z=s$ деталь является цилиндрической с вертикальной стенкой диаметром d (по средней линии), а после съема со штампа деталь разгружается; вследствие пружинения на угол $\Delta\alpha$ стенка детали становится конической. Угол пружинения $\Delta\alpha$ можно рассчитать без учета изменения толщины заготовки. Сначала рассмотрена разгрузка дна детали по закону Гука для плоского напряженного состояния (без учета остаточных напряжений). Вследствие осевой симметрии напряженно-деформированного состояния дна в полярных координатах $\rho\theta$ основные уравнения теории упругости имеют вид: $d\sigma_p/d\rho + (\sigma_p - \sigma_\theta)/\rho = 0$; $\sigma_p = E/(1 - \nu^2)(\varepsilon_p + \nu\varepsilon_\theta)$, $\sigma_\theta = E/(1 - \nu^2)(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_p)$; $\varepsilon_p = du/d\rho$, $\varepsilon_\theta = u/\rho$, где u - радиальное перемещение частиц дна детали при разгрузке; здесь d - дифференциал. Далее получено дифференциальное уравнение $\rho^2 d^2 u/d\rho^2 + \rho du/d\rho - u = 0$, общее решение которого имеет вид $u = C\rho + C_1/\rho$. Для случая сплошного дна детали (на практике как правило вытягивают детали без отверстия в дне), чтобы получить $u=0$ в центре дна O , необходимо положить $C_1 = 0$. Подставляя $u = C\rho$, получено $\sigma_p = \sigma_\theta = E/(1 - \nu)C = \text{const}$. Следовательно, при разгрузке дно детали находится в условиях однородного сжатия. Постоянная C определяется из граничного условия, что на внешнем контуре дна детали радиуса $\rho = d/2$ (радиус детали у дна r_p не учитывается) радиальное напряжение σ_p равно экстремальному напряжению $\sigma_{\rho \max}^{\text{ext}}$: $(\sigma_p)_{\rho=d/2} = \sigma_{\rho \max}^{\text{ext}}$; отсюда $C = (1 - \nu)/E\sigma_{\rho \max}^{\text{ext}}$ и $u = (1 - \nu)/E\sigma_{\rho \max}^{\text{ext}}\rho$.

Окончательно, внешний контур дна детали радиуса $\rho = d/2$ или диаметром d после разгрузки (с учетом допущения $\sigma_{\rho \max}^{\text{ext}} \approx \sigma_T$) переместится к центру на величину

$$(u)_{\rho=d/2} = u_p = (1 - \nu)/(2E)d\sigma_T \quad \text{или} \quad 2u_p = (1 - \nu)/E\sigma_T d. \quad (3.17)$$

Разгрузка верхнего края стенки детали происходит в условиях, близких к одноосному растяжению в тангенциальном направлении. В этом случае согласно закону Гука (остаточными напряжениями после разгрузки пренебрегаем) $\varepsilon_\theta = c_\theta/E = \Delta d/d$, где Δd - увеличение диаметра стенки де-

тали (по средней линии) после разгрузки. В конечный момент вытяжки тангенциальное сжимающее напряжение σ_θ рассчитывается с учетом упрочнения по описанной выше теории; при разгрузке напряжение σ_θ становится растягивающим. В первом приближении можно принять $\sigma_\theta \approx \sigma$, или без учета упрочнения $\sigma_\theta \approx \sigma_T$. Окончательно, край стенки детали радиуса $\rho = d/2$ после разгрузки переместится от центра на величину

$$u_m = \sigma_T / (2E)d \text{ или } 2u_m = \sigma_T / Ed. \quad (3.18)$$

Таким образом, если в конечный момент вытяжки в штампе цилиндрическая деталь имеет вертикальную стенку с внутренним радиусом, равным радиусу пуансона R_p , и высотой H , то после съема детали со штампа (после разгрузки) вследствие действия упругих деформаций (пружинения) стенка становится конической на угол пружинения $\Delta\alpha$

$$\Delta\alpha = \arctg[(u_p + u_m)/(H - s/2)]. \quad (3.19)$$

Окончательно, суммарный угол конусности $\Delta\gamma$ цилиндрической детали после вытяжки равен $\Delta\gamma = \Delta\beta + \Delta\alpha$. Аналогично угол конусности $\Delta\gamma$ можно рассчитать после вытяжки других деталей.

Проведенные теоретические исследования и анализ выведенных формул позволяют разработать мероприятия по уменьшению угла конусности и повышению точности деталей после вытяжки. Описаны конкретные методы повышения точности осесимметричных деталей и показана новая конструкция штампа для правки стенки детали после вытяжки. Предложен новый способ вытяжки осесимметричных, коробчатых и сложных деталей, внедрение которого позволит сократить количество операций вытяжки различных деталей и за счет этого не только снизить себестоимость изготовления, но и повысить точность этих деталей.

Приведены примеры расчета на производстве технологических параметров однооперационной и многооперационной вытяжки цилиндрических деталей с использованием разработанной теории. В любом листоштамповочном производстве несложно написать программу для компьютера и применить описанное выше аналитическое решение.

Глава 4. Исследование вытяжки коробчатых деталей

Проанализирована динамика перехода конечных элементов из упругого в пластическое состояние на всех этапах вытяжки коробчатой детали и установлена неравномерность НДС фланца заготовки вдоль стенки вытягиваемой детали, что является основной причиной потери устойчивости плоских участков стенки детали с образованием вогнутости и складок.

На всех этапах вытяжки наиболее распространенных прямоугольных (квадратных) деталей величина растягивающего напряжения $\sigma_n = \sigma_n / \sigma_T$ (рис. 5), действующего по нормали к внутреннему контуру фланца заготов-

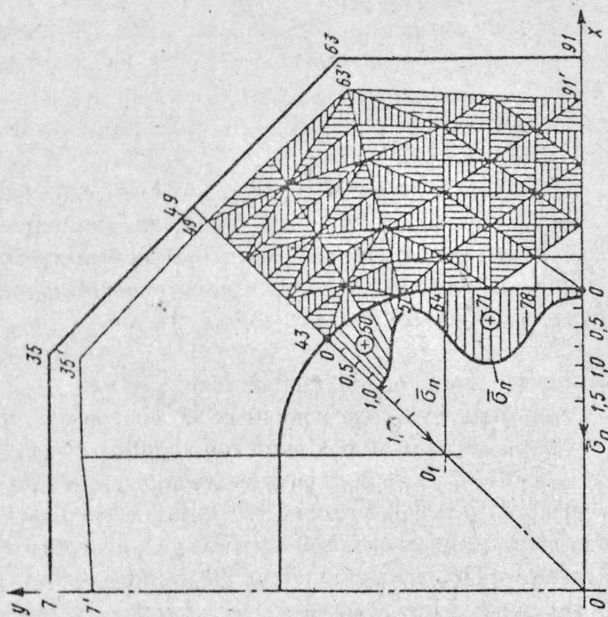


Рис. 5. Изменение напряжения вдоль внутреннего контура фланца заготовки

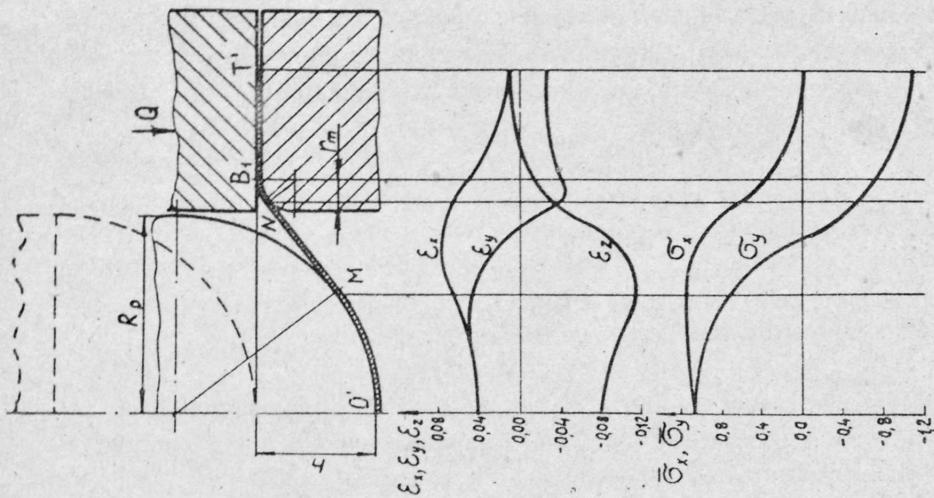


Рис. 6. Распределение деформаций и напряжений

ки, принимает максимальное значение не только вблизи середин угловых закруглений, но и в точках прямолинейных отрезков внутреннего контура фланца, в которых соприкасаются участки фланца, перешедшие в пластическое состояние, с участками фланца, оставшимися в упругом состоянии.

Установлена закономерность, что увеличение в определенных пределах (чтобы не было разрушения заготовки) растягивающего напряжения на плоских (и близких к ним) участках стенки вытягиваемой коробчатой детали за счет применения перетяжных ребер и порогов или увеличения на против этих участков ширины фланца заготовки (или удельного усилия прижима) приводит одновременно к уменьшению этого напряжения на угловых закруглениях стенки и к уменьшению возможности разрушения стенки в опасных сечениях этих угловых закруглений.

Экспериментальные исследования методом муара деформированного состояния фланца заготовки на различных этапах вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей, а также выявление физических линий скольжения во фланце заготовки позволили подтвердить справедливость разработанной теории вытяжки листовых материалов.

На основании экспериментальных исследований установлено, что из алюминевых заготовок толщиной 0,1...0,2 мм можно вытягивать прямоугольные детали размеров $A \times B \times R = 100 \times 70 \times 22$ мм высотой $H = 21...52$ мм. Разработаны рекомендации по проектированию технологических процессов и штампов для вытяжки коробчатых деталей из таких заготовок.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса вытяжки цельноштампованных кухонных моек со сливной доской из коррозионно-стойких и низкоуглеродистых сталей (с последующим порошковым покрытием). На основании этих исследований разработаны технологические процессы и рабочие чертежи комплектов штампов для изготовления моек различной конфигурации. Внедрение цельноштампованных моек взамен штампосварных позволяет уменьшить норму расхода листового проката на одну мойку на 10-20 % и снизить трудоемкость изготовления на 20-30 %.

Классифицированы существующие и разработаны новые практические рекомендации по устранению потери устойчивости стенки и повышению точности, жесткости и качества поверхности коробчатых деталей; рекомендации касались изменений: конструкции деталей, параметров технологического процесса и конструкции штампов.

Даны примеры расчета на производстве параметров вытяжки.

Глава 5. Исследование вытяжки сложных деталей

Методика математического моделирования вытяжки деталей сложной формы аналогична методике второй главы, но с отличием, что теперь вся заготовка разбивается на конечные элементы.

Разработанная теория рассмотрена на примере вытяжки наиболее распространенной детали сложной формы - сферической детали (рис. 6). Вся поверхность заготовки условно разделена на четыре основных участка: 1) участок заготовки OM , контактирующий с рабочей поверхностью пуансона; 2) участок MN в зазоре между пуансоном и матрицей, деформирующийся без контакта с рабочими частями штампа; 3) участок NB_1 , контактирующий со скругленной кромкой матрицы; 4) фланец заготовки 1_1T между прижимными поверхностями матрицы и прижимной плиты штампа. Размеры этих четырех участков заготовки в процессе вытяжки изменяются. Все участки заготовки разбивают на конечные элементы.

Рассмотрено деформирование первого участка заготовки OM , контактирующего с торцом пуансона. Принято, что движение пуансона совпадает с отрицательным направлением оси OZ . Перед вытяжкой поверхность пуансона описывается уравнением $Z = Z(X, Y)$ и лишь касается заготовки. На j -м этапе вытяжки поверхность пуансона описывается уравнением

$$Z = Z(X, Y) - j\Delta h, \quad (5.1)$$

где Δh - приращение перемещения пуансона на j -м и предыдущих этапах вытяжки.

Вектор приращения перемещения $d\bar{\Delta}$ частицы заготовки, контактирующей с поверхностью пуансона, складывается из вектора относительно приращения перемещения $d\bar{\Delta}_r$ (направленного по касательной к поверхности пуансона) и вектора переносного приращения перемещения $\Delta\bar{h}$, равного по модулю приращению перемещения пуансона Δh

$$d\bar{\Delta} = d\bar{\Delta}_r + \Delta\bar{h}. \quad (5.2)$$

После проектирования уравнения (5.2) на нормаль $\bar{n}$ к поверхности пуансона по методике Н.-М. Wang получена зависимость

$$dU \frac{\partial Z}{\partial X} + dV \frac{\partial Z}{\partial Y} + dW = \Delta h, \quad \frac{\partial Z}{\partial X} = \operatorname{tg} \alpha_x, \quad \frac{\partial Z}{\partial Y} = \operatorname{tg} \alpha_y, \quad (5.3)$$

где α_x и α_y - углы между положительными направлениями осей OX и OY и касательными к двум сечениям поверхности пуансона в данной точке, параллельным плоскостям XOZ и YOZ соответственно.

При вытяжке осесимметричных деталей сложной формы контактные σ_t , меридиональные σ_m и окружные σ_r напряжения связаны уравнением Лапласа.

Равнодействующая контактных напряжений σ_t равна $\bar{T}_n$ и направлена по нормали $\bar{n}$. Силы трения $\bar{F}_r$ находятся в касательной к поверхности пуансона плоскости и связаны с величиной T_n законом Кулона

$$F_r = -\mu \cdot T_n \cdot d\Delta_r / \|d\Delta_r\|, \quad (5.4)$$

где $\|d\Delta_r\|$ - норма вектора $d\bar{\Delta}_r$.

Проектируя силы на оси координат OX, OY, OZ , получены зависимости между величинами T_x, T_y, T_z и величинами T_n и F_{fr} в узлах конечных элементов.

В узлах конечных элементов, расположенных на втором участке заготовки MN в зазоре между пуансоном и матрицей, силы задавались равными нулю.

В узлах конечных элементов, расположенных на третьем участке заготовки NB_1 и контактирующих со скругленной кромкой матрицы, граничные условия учитывались так же, как для первого участка OM , но с учетом того, что матрица неподвижна. Учет граничных условий для четвертого участка (для фланца заготовки) описан ранее во второй главе.

Для каждого приращения хода пуансона задача решалась методом последовательных приближений. Первое приближение рассчитывалось без учета сил трения на поверхности пуансона. Последующие приближения рассчитывались с учетом сил трения.

Расчеты выполнены для вытяжки детали сферическим пуансоном радиуса $R_p = 49$ мм из заготовки (низкоуглеродистая сталь), имеющей первоначальный радиус $R_0 = 100$ мм и толщину $s = 1$ мм. Радиус закругления кромки матрицы равен $r_m = 8s$; односторонний зазор между пуансоном и матрицей равен $z_{pm} = 1,2s$.

В качестве примера на рис. 6 показаны графики распределения по поверхности заготовки накопленных за все предыдущие этапы вытяжки значения меридиональных ϵ_x , окружных ϵ_y и в направлении оси oz ϵ_z деформаций и напряжений в безразмерных переменных $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_T, \bar{\sigma}_y = \sigma_y / \sigma_T$ в момент вытяжки, когда ход пуансона достиг величины $h = 30$ мм. Установлено, что наиболее опасным с точки зрения разрушения является сечение заготовки, проходящее через точку M : в этой точке толщина заготовки минимальна, а меридиональное растягивающее напряжение $\bar{\sigma}_x$ имеет максимальное значение.

Методика, по которой исследована вытяжка сферической детали, может быть использована также для исследования и расчета технологических параметров вытяжки других более сложных деталей.

Разрушение листовой заготовки вызывается растягивающим напряжением σ_1 и деформацией удлинения ϵ_1 . Поэтому после расчета полей напряжений и деформаций, накопленных в заготовке за все предыдущие этапы вытяжки детали сложной формы, возможность разрушения заготовки на каждом этапе вытяжки можно оценивать при помощи следующих двух критериев: максимальное растягивающее напряжение σ_1 ни в одной точке заготовки не должно превышать предельного напряжения σ_{lim} : $\sigma_1 \leq \sigma_{lim}$; максимальная деформация удлинения ϵ_1 ни в одной точке заго-

товки не должна превышать предельной величины $\varepsilon_{1,\text{lim}}$:

$$\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1,\text{lim}}.$$

Предельные величины σ_{lim} и $\varepsilon_{1,\text{lim}}$ должны определяться по результатам испытаний на разрушение листового проката, из которого будет вытягиваться (или уже вытягивается на производстве) данная деталь. Прямых методов измерения напряжений не существует. Поэтому в настоящее время опасность разрушения заготовки в процессе вытяжки детали сложной формы оценивают, как правило, при помощи диаграммы предельных деформаций (ДПД): $\varepsilon_{1,\text{lim}} = f(\varepsilon_2)$.

Одним из важных направлений повышения точности вытягиваемых деталей является использование листового металла с меньшими параметрами пружинения. Поэтому разработаны два новых способа технологических испытаний листового металла, в большей мере (чем известные способы) соответствующих схеме деформирования в производственных условиях на операциях вытяжки и гибки сложных деталей с прижимом фланца заготовки и позволяющих в определенной мере определить пригодность металла для штамповки деталей повышенной точности на данных операциях. Предложен новый способ вытяжки сложных деталей (например, кузовных деталей автомобилей и другой техники) повышенной точности.

Глава 6. Разработка методики автоматизированного проектирования процессов вытяжки

Разработана методика кодирования геометрии осесимметричных и коробчатых деталей, учитывающая требования простоты и однозначности кодирования.

Алгоритмы автоматизированного проектирования технологических процессов многооперационной вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей основаны на том, что сначала для первого приближения рассчитываются параметры технологии по справочной литературе, а затем по разработанной во второй главе теории (аналитически или численно при помощи МКЭ в зависимости от требований на деталь) проводят математическое моделирование операций вытяжки и на последующих приближениях уточняют размеры плоской заготовки и полуфабрикатов после каждой операции, а также другие параметры технологии.

Автоматизированное проектирование однооперационной и многооперационной вытяжки в штампах цилиндрических и коробчатых деталей различной конфигурации с фланцем и без фланца из листовых материалов без принудительного утонения стенки детали разработано из следующих основных этапов: ввод исходных данных; математическое моделирование и расчет параметров технологического процесса; выбор прессов из имеющихся на данном предприятии или из нового каталога; определение тех-

нологических схем штампов; расчет технико-экономических параметров; формирование технологических документов.

Предложена методика расчета экономического эффекта от внедрения САПР технологии листовой штамповки.

Методика автоматизированного проектирования многооперационной вытяжки цилиндрических деталей использована при обучении студентов высших учебных заведений.

Разработанная система автоматизированного проектирования технологических процессов вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей сдана в отраслевой фонд алгоритмов и программ и внедрена на Волгоградском и Владимирском тракторных заводах, в НИИТМ (г. Ростов-на-Дону) и на других предприятиях.

Глава 7. Классификации способов вытяжки, сложных деталей и перетяжных ребер и порогов в штампах

Все основные способы вытяжки листовых материалов классифицированы по следующим главным объективным критериям (признакам) общности и различия: форма исходной заготовки (полуфабриката) и характер ее деформирования; схема приложения деформирующих усилий к заготовке, то есть схема штамповки; особенности НДС и устойчивости заготовки в процессе формоизменения; методы интенсификации процесса вытяжки; возможность совмещения с другими операциями; типы штампов и прессового оборудования.

Представлена классификация сложных деталей (например, кузовных деталей автомобилей и другой техники) по основным признакам.

Разработаны классификации перетяжных ребер, перетяжных порогов и их сочетаний, в которых рассмотрены следующие основные признаки: по форме поперечного сечения ребра или порога; в зависимости от того, на какой рабочей части штампа они размещены; в зависимости от формы прижимной поверхности матрицы и прижимной плиты; по числу рядов перетяжных ребер; по форме поперечных сечений канавок, в которые входят с заготовкой перетяжные ребра и пороги; по конструкции штампа; в зависимости от места расположения линии обрезки припуска и от места расположения перетяжного ребра по отношению к перетяжному порогу.

Выведены формулы для расчета усилия формовки перетяжного ребра или порога на заготовке перед вытяжкой и максимального растягивающего напряжения в опасном сечении вытягиваемой детали.

Глава 8. Разработка и внедрение новых способов, штампов и заготовок для вытяжки

Все способы малоотходной вытяжки, направленные на экономию листового проката и связанные с уменьшением размеров и массы заготов-

ки, разделены на 3 основные группы: за счет уменьшения массы и размеров технологического припуска по краям заготовки; за счет дополнительного растяжения центральной части заготовки; комбинированные, сочетающие меры первой и второй групп.

Показано, что вытяжка качественных деталей без складок и разрывов, а также применение новых малоотходных способов вытяжки возможны только в определенном диапазоне изменения максимальных растягивающих напряжений, действующих в заготовке по ходу деформирования.

Приводятся краткие описания новых (защищенных авторскими свидетельствами и патентами) технических решений по способам, штампам и заготовкам для вытяжки, разработанных автором на базе описанных в предыдущих главах теоретических и экспериментальных исследований, а также классификаций процессов вытяжки, сложных деталей, перетяжных ребер и перетяжных порогов. Большинство патентов внедрено и продолжает внедряться в промышленности.

Основные выводы

1. Разработанные методы проектирования технологических процессов однооперационной и многооперационной вытяжки осесимметричных, коробчатых и сложных деталей позволяют учесть влияние упрочнения, анизотропии, трения, изменения формы и толщины заготовки после каждого этапа деформирования, а также рассчитать контур плоской заготовки, определить количество последующих операций вытяжки и формы полуфабрикатов после каждой операции, рассчитать силу и работу деформирования и выявить опасность разрушения заготовки.

2. Методы проектирования основаны на инженерной теории и математическом моделировании формоизменения заготовки, которые дают возможность определять рациональные режимы и диапазоны изменения практических параметров операций вытяжки для получения качественной детали без складок и разрывов при минимальных расходе листового проката и себестоимости изготовления. Проведение вычислительных экспериментов методом последовательных приближений позволяет исключить или уменьшить экспериментальные исследования с изготовлением экспериментальной оснастки при организации производства новых деталей или при совершенствовании существующих технологий вытяжки.

3. Математическое моделирование процессов вытяжки осесимметричных, коробчатых и сложных деталей позволило разработать методику построения диаграммы «сила вытяжки - ход пуансона». Для выбора пресса диаграмма «сила - ход» накладывается на диаграмму допустимой силы из паспорта пресса, а работа деформирования сравнивается с мощностью пресса. Знание диаграммы «сила - ход» дает также возможность управлять

процессом вытяжки как при проведении вычислительного эксперимента, так и на практике.

4. Анализ процессов вытяжки коробчатых деталей различной геометрии позволил определить размеры и динамику изменения упругих зон на заготовке, выявить причины потери устойчивости стенки коробчатых деталей и разработать мероприятия по устранению этой потери устойчивости. Исследования дали возможность привести примеры расчета на производстве технологических параметров однооперационного и многооперационного процессов вытяжки наиболее распространенных цилиндрических и коробчатых деталей с применением разработанной инженерной теории вытяжки.

5. Внедрение на Минском автомобильном заводе технологии и штампов для изготовления цельноштампованной мойки со сливной доской из коррозионно-стойкой стали для автомобильных прицепов уменьшило норму расхода листового проката и трудоемкость изготовления, а также позволило отказаться от закупок моек в Германии, что дает экономию 100 немецких марок на каждой мойке. При годовой программе выпуска автомобильных прицепов 3000 штук (на один прицеп устанавливается одна мойка) годовая экономия валюты составляет 300 тысяч немецких марок.

6. Исследование формоизменения заготовки при вытяжке сложных деталей, когда пластические деформации охватывают всю заготовку, позволило провести анализ опасности разрушения заготовки и выполнить расчет практически важных параметров технологии.*

7. Приведены критерии качества деталей, сформулированы факторы, влияющие на это качество, классифицированы основные методы повышения качества и точности деталей, при помощи математического моделирования формоизменения заготовки рассчитаны углы пружинения и конусности стенки цилиндрической детали после разгрузки, предложены два новых способа испытания листового проката на пружинение, описаны конкретные методы повышения точности осесимметричных (цилиндрических, конических и полусферических), коробчатых и сложных деталей и показаны конструкции новых штампов для правки и калибровки деталей после вытяжки. Эти методы после внедрения позволяют: повысить точность, жесткость и качество поверхности различных деталей после вытяжки и герметичность узлов, собранных из этих деталей повышенной точности; снизить процент брака и улучшить собираемость этих деталей на автоматических (например, роботизированных) линиях сборки-сварки.

8. Классификация основных способов вытяжки листовых материалов дает возможность уточнить технологические возможности и место, занимаемого используемыми способами, а также из потребностей производства выявить новые способы вытяжки с целью внедрения их на производстве и защиты патентами.

9. Классификация сложных листоштампованных деталей, изготавливаемых вытяжкой (например, кузовных деталей автомобилей и другой техники) после соответствующего кодирования позволяет искать на компьютере аналоги кузовных деталей, типовые технологические процессы их штамповки и конструкции штамповой оснастки.

10. Классификации перетяжных ребер, перетяжных порогов и их сочетаний в штампах для вытяжки дают возможность из условия минимальности растягивающего напряжения и отсутствия разрушения заготовки в опасном сечении стенки вытягиваемой детали определять наиболее рациональные конструкции перетяжных ребер и перетяжных порогов, а также наиболее рациональные параметры технологического процесса вытяжки заданной детали в таких штампах.

11. Теоретические и экспериментальные исследования, а также классификации процессов вытяжки, сложных деталей, перетяжных ребер и перетяжных порогов дали возможность разработать следующие научно обоснованные технологические решения: способ вытяжки деталей из заготовки с фигурным технологическим припуском; штампы для вытяжки с усовершенствованными перетяжными ребрами, порогами и другими тормозными элементами; штампы для вытяжки с дифференцированным и управляемым прижимом заготовки; способы и штампы для вытяжки с дополнительным растяжением центральной части заготовки; штампы для вытяжки деталей на многопозиционных автоматах; новые конструкции листовых заготовок для вытяжки.

12. Новые способы, штампы и заготовки для вытяжки различных деталей защищены публикациями, авторскими свидетельствами и патентами. Большинство патентов внедрено и продолжает внедряться в промышленности. Например, внедрение на Волжском автомобильном заводе АО «АВТОВАЗ» наших совместных технических решений с 1987 года позволило получить экономию листового проката более 11 тысяч тонн (акты и справки о внедрении даны в приложении диссертации).

Содержание диссертации опубликовано более чем в 80 статьях в России, странах СНГ, США, Германии, Англии, Италии и других странах; основные из них:

1. Жарков В.А. Предельная степень деформации при вытяжке с широким фланцем // Машинны и технология обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1973. - С.281-287.

2. Жарков В.А. Методика автоматизированного проектирования заготовки при вытяжке листового металла // Вестник машиностроения. - 1979. - № 5. - С.62-64.

3.Жарков В.А., Тетерин Г.П. Алгоритмы автоматизированного проектирования вытяжки коробчатых деталей из листового металла // Кузнечно-штамповочное производство. - 1979. - № 7. - С.30-33.

4.Жарков В.А., Тетерин Г.П. Внедрение автоматизированного проектирования технологии вытяжки листового металла // Автомобильная промышленность. - 1979. - № 7. - С.32-33.

5.Овчинников А.Г., Жарков В.А. Исследование влияния анизотропии на вытяжку листового металла // Известия вузов. Машиностроение. - 1979. - № 7. - С.94-99.

6.Тетерин Г.П., Жарков В.А. Автоматизация технологической подготовки холодноштамповочного производства // Кузнечно-штамповочное производство. - 1979. - № 12. - С.27-29.

7.Жарков В.А., Тетерин Г.П. Анализ процессов вытяжки деталей сложной формы из листовых материалов // Известия вузов. Машиностроение. - 1982. - № 9. - С.139-142.

8.Овчинников А.Г., Жарков В.А. Исследование процессов вытяжки листовых материалов методом конечных элементов // Известия вузов. Машиностроение. - 1983. - № 10. - С.64-65.

9.Овчинников А.Г., Жарков В.А. Исследование методом конечных элементов процесса вытяжки кузовных деталей // Известия вузов. Машиностроение. - 1984. - № 10. - С.109-115.

10.Жарков В.А. Методика расчета первого перехода вытяжки цилиндрических деталей // Вестник машиностроения. - 1988. - № 8. - С.57-58.

11.Жарков В.А. Математическое моделирование процессов вытяжки листовых материалов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1990. - № 4. - С.13-17.

12.Жарков В.А. Повышение точности коробчатых деталей, изготавливаемых вытяжкой листовых материалов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1991. - № 7. - С.7-12.

13.Жарков В.А. Методика разработки технологических процессов вытяжки с учетом анизотропии листовых материалов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1991. - № 9. - С.12-15.

14.Жарков В.А. Разработка технологических процессов изготовления цельноштампованных кухонных моек // Кузнечно-штамповочное производство. - 1991. - № 10. - С.27-30.

15.Жарков В.А. Перспективы экономии металла в листоштамповочном производстве // Кузнечно-штамповочное производство. - 1991. - № 12. - С.7-11.

16.Жарков В.А. Исследование вытяжки деталей в штампе с перетяжными ребрами // Кузнечно-штамповочное производство. - 1994. - № 10. - С.5-9.

17.Zharkov V.A. Mathematisches Modellieren des Tiefziehens // Werkstatt und Betrieb. - 1991. - Bd. 124, No. 11. - S.906-909.

18.Zharkov V.A. Mathematical Modelling of Sheet Metal Drawing Processes // Metal Forming. - 1992. - No. 1. - P.57-59.

19.Zharkov V.A. Weniger Abfälle bei der Knuppelherstellung // Werkstatt und Betrieb. - 1992. - Bd. 125, No. 6. - S.495-498.

20.Zharkov V.A. Tiefziehen der Dachpartien von Lkw-Fahrer // Bänder Bleche Rohre. - 1992. - No. 8. - S.20-22.

21.Zharkov V.A. Theory of the drawing of cylindrical parts from sheet materials // Journal of Materials Processing Technology. - 1992. - No. 31. - P.379-392.

22.Zharkov V.A. Differenzierter Blechdruck beim Tiefziehen // Bänder Bleche Rohre. - 1992. - No. 9. - S.30-32.

23.Zharkov V.A. Werkzeuge mit verbesserten Wulsten zum Tiefziehen von Blechen // Bänder Bleche Rohre. - 1992. - No. 10. - S.106-109.

24.Zharkov V.A. Tiefziehen von Karosserieteilen mit Fließunterstützung // Bänder Bleche Rohre. - 1992. - No. 11. - S.34-36.

25.Zharkov V.A. Berechnen des Tiefziehprozesses breitflanschiger Zylindernäpfe // Bänder Bleche Rohre. - 1993. - No. 1. - S.21-24.

26.Zharkov V.A. Erfahrungen und Empfehlungen zum Stanzen von Spulbecken // Bänder Bleche Rohre. - 1993. - No. 2. - S.38-42.

27.Zharkov V.A. Fertigen von Spulbecken aus Stahlblechen // Bänder Bleche Rohre. - 1993. - No. 3. - S.65-68.

28.Zharkov V.A. Größere Umformverhältnisse durch langgestaffeltes Tiefziehen // Werkstatt und Betrieb. - 1993. - Bd. 126, No. 3. - S.173-175.

29.Zharkov V.A. Werkzeuge zum Tiefziehen auf Mehrstufenpressen // Bänder Bleche Rohre. - 1993. - No. 8. - S.90-92.

30.Zharkov V.A. Werkzeuge zum Umstulpziehen von Karosserieteilen // Bänder Bleche Rohre. - 1994. - No. 1. - S.28-30.

31.Zharkov V.A. Kleinere Ausgangsbleche zum Tiefziehen // Werkstatt und Betrieb. - 1996. - Bd. 129, No. 10. - S.866-868, 870.

32.Zharkov V. A. Stiro-imbuitura di elementi di carrozzeria // Lamiera. - 1997. - Febbraio. - P.64-70.

Новые способы, конструкции штампов и заготовок для вытяжки защищены следующими авторскими свидетельствами и патентами: 1090473, 1169778, 1196076, 1442292, 1447482, 1484407, 1507494, 1530301, 1580647, 1580648, 2047407, 2049579, 2060076.

Практически полное содержание диссертации опубликовано в Англии в книге: Zharkov V.A. Theory and Practice of Deep Drawing. - London: Mechanical Engineering Publications Limited, 1995. - 601 p.