1515527

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА, ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
и ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

Цой Дмитрий Николаевич

ТЕОРИЯ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.03.05.-
Процессы и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Цой

Москва - 1994 г.

Работа выполнена в Казахском национальном техническом университете

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Овчинников А.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Дмитриев А.М.
доктор технических наук, профессор
Калпин Ю.Г.
доктор технических наук, профессор
Субич В.Н.

Ведущая организация : Государственный концерн "Павлодартрактор

Защита состоится "14" сентября 1994 г. в 14[30] час. на заседании специализированного Совета Д053.15.05. при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим прислать по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5.

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

Автореферат разослан "7" 07 1994 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
специализированного Совета
к.т.н., доцент В. И. Семенов

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1545527
Цой Д.Н. Теория штамповки

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Эффективность реконструкции народного хозяйства, темпы экономического роста в решающей мере зависят от машиностроения. Именно в нем материализуются основополагающие научно-технические идеи, создаются новые орудия труда, системы машин, определяющие прогресс в других отраслях народного хозяйства. Здесь закладываются основы широкого выхода на принципиально новые, ресурсосберегающие технологии, повышения производительности труда и качества продукции.

Совершенствование технологии обработки металлов давлением во многом определяется состоянием развития теории обработки металлов давлением. Развитие теории обработки металлов давлением идет по пути исследования новых процессов, применения новых математических аппаратов, учета все большего количества факторов, уточнения ранее полученных результатов. Одним из бурно развиваемых направлений в теории обработки металлов давлением является исследование процессов штамповки с учетом анизотропии м ханических свойств материалов.

Фундаментальные исследования по теории листовой штамповки из анизотропных металлов проведены в докторских диссертациях С.П.Яковлева и Ю.М.Арышенского.

Существующие в настоящее время основы теории листовой штамповки из анизотропных металлов, в том числе и докторские диссертации С.П.Яковлева и Ю.М.Арышенского, не учитывают, что при пластическом деформировании анизотропных металлов главные оси напряжений и скоростей деформаций не коаксиальны, а также накладывают ограничения на свойства материалов. Так в работах С.П. Яковлева при исследовании плоского напряженного состояния свойства вдоль двух осей анизотропии принимаются одинаковыми, а в работах Ю.М.Арышенского между параметрами анизотропии свойств материала должна существовать определенная зависимость, которая не всегда соблюдается. Кроме того, в ряде случаев отсутствуют зависимости для исследования обработки давлением анизотропных металлов методами, разработанными для изотропных металлов, в частности, энергетическими и экспериментально-аналитическим методами.

Цель работы. Целью работы являются разработка основ теории исследования процессов штамповки анизотропных металлов, учиты-

МАТУ

вящей некоаксиальность главных осей напряжений и скоростей деформаций, без жестких ограничений в виде определенных соотношений между параметрами анизотропии, получение расчетных зависимостей для исследования процессов холодной штамповки анизотропных металлов методами теории обработки металлов давлением, исследование формоизменяющих операций листовой штамповки с применением полученных зависимостей, использование результатов которых позволяет проектировать устойчивые процессы штамповки, интенсифицировать операции листовой штамповки, рационально выбрать заготовки и экономить металл.

Поставленная цель определила основные задачи исследования:

вывод формул для определения угла между главными осями напряжений и скоростей деформаций, оценка величины этого угла при пластическом деформировании листовых металлов;

линеаризация условия пластичности анизотропных металлов с введением коэффициента пропорциональности для напряжений, определение пределов изменения этого коэффициента для листовых металлов;

получение расчетных зависимостей для исследования энергетическим методом процессов холодной штамповки анизотропных металлов;

исследование параметров эллипса пластичности и получение условия пластичности в параметрической форме, уравнений для напряжений и скоростей перемещений материала при плоском напряженном состоянии;

разработка методики экспериментально-аналитического исследования процессов штамповки, учитывающей некоаксиальность главных осей напряжений и скоростей деформаций;

исследование вытяжки и отбортовки листовых заготовок с применением полученных зависимостей, использование результатов которых позволяет повысить качество штампуемых изделий и экономить металл;

исследования деформирований тонкостенных труб коническими инструментами, результаты которых могут быть использованы для проектирования устойчивых процессов деформирования труб, рационального выбора заготовок и экономии металла.

Научная новизна. На основе теоретических исследований методами теории пластичности осуществлены научно обоснованные технические и технологические решения без жестких ограничений в

виде определенных соотношений между параметрами анизотропии, учитывающие некоаксиальность главных осей напряжений и скоростей деформаций, позволяющие использовать методы теории обработки металлов давлением для исследования процессов холодной штамповки анизотропных металлов, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в кузнечно-штамповочном производстве: разработаны теоретические основы исследования процессов холодной штамповки деталей из анизотропных металлов, проведено исследование вытяжки и отбортовки из анизотропных листовых металлов и деформирования тонкостенных труб коническими инструментами, имеющие важное народнохозяйственное значение, выражающееся в проектировании устойчивых технологических процессов листовой штамповки, что особенно важно в условиях автоматизированного производства, в повышении качества штампуемых изделий, в экономии металла.

Решение этой проблемы содержит:

разработку методики учета некоаксиальности главных осей напряжений и скоростей деформаций;

получение расчетных зависимостей для определения силовых и кинематических параметров процессов штамповки анизотропных металлов энергетическими методами исследования;

получение расчетных зависимостей для напряжений и скоростей перемещений материала при пластическом деформировании анизотропных металлов в условиях плоского напряженного состояния;

получение расчетных зависимостей для исследования напряженно-деформированного состояния в анизотропной заготовке экспериментально-аналитическим методом с учетом некоаксиальности главных осей напряжений и скоростей деформаций;

исследование и анализ с использованием полученных зависимостей операций вытяжки и отбортовки и деформирования тонкостенных труб коническими инструментами с целью создания предпосылок для разработки устойчивых процессов штамповки, повышения качества изделий и экономии металла.

Методы исследований. Работа базируется на основных уравнениях теории пластичности (уравнениях преобразования компонентов тензоров напряжений и скоростей деформаций при переходе от одной прямолинейной ортогональной системы координат к другой, теорий напряжений и деформаций, соотношениях О.Коши между скоростями деформаций и скоростями перемещений), теории пластической

деформации Мизеса-Хилла для ортотропных материалов, методах исследования процессов обработки металлов давлением, теории устойчивости пластических деформаций анизотропных листовых заготовок, современных методах исследования формоизменяющих операций листовой штамповки.

Выводы теоретических исследований процессов вытяжки подтверждены результатами экспериментальных исследований, опубликованными в научно-технической литературе.

Практическая ценность результатов работы.

I. Линеаризованное условие пластичности может быть использовано при теоретическом исследовании процессов обработки давлением анизотропных металлов с целью проектирования рациональных процессов штамповки.

2. Получены зависимости для исследований процессов штамповки энергетическим методом с целью установления силовых и кинематических параметров процессов и их оптимизации.

3. Исследовано условие пластичности и получены уравнения характеристик и дифференциальные соотношения для напряжений и скоростей перемещений при плоском напряженном состоянии, которые могут быть использованы при исследовании формоизменяющих операций листовой штамповки.

4. Разработанный экспериментально-аналитический метод исследования напряженно-деформированного состояния в анизотропной заготовке может быть использован при исследовании вытяжки деталей сложной формы из листового металла с целью разработки устойчивых процессов вытяжки этих деталей и повышения их качества.

5. Результаты анализа операций вытяжки, отбортовки и деформирования тонкостенных труб коническими инструментами могут быть использованы для разработки устойчивых процессов штамповки, повышения качества штампуемых изделий, для рационального выбора заготовок и экономии металла.

Реализация работы. Основные результаты работы опубликованы с расчетными зависимостями для исследования процессов штамповки с целью разработки рациональных технологических процессов обработки металлов давлением. Опубликованные в технической литературе результаты исследований процессов листовой штамповки можно использовать для проектирования устойчивых технологических процессов вытяжки осесимметричных изделий и изделий сложной формы, отбортовки, пластического деформирования тонкостенных труб ко-

ническими инструментами, рационального выбора заготовок. Результаты диссертационной работы используются в Казахском национальном техническом университете при выполнении научно-исследовательских работ и совершенствовании учебного процесса по специальности 1204.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях в Казахском национальном техническом университете, на кафедре МТ6 МГТУ им.Н.Э.Баумана.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 20 печатных работ, в том числе 19 статей и учебное пособие.

Диссертация изложена на 214 стр. машинописного текста, содержит 70 иллюстраций, 11 таблиц. Список литературы содержит 176 наименований.

Диссертационная работа состоит из введения, 9 разделов, заключения и списка литературы.

Во введении отмечаются недостатки существующих теорий листовой штамповки анизотропных металлов, ставятся цель и задачи диссертационной работы.

В разделе 1 проведен обзор существующих теорий пластических деформаций анизотропных материалов и выбор теории Мизеса - Хилла для исследований процессов штамповки.

В разделе 2 приведены основные положения и выводы теории пластической деформации Мизеса-Хилла, результаты экспериментальных проверок этой теории, в том числе автора данной работы.

В разделе 3 получены формулы для определения угла между главными осями напряжений и скоростей деформаций для случая, когда одна из главных осей напряжений совпадает с осью анизотропии механических свойств материала, проведен анализ величины этого угла для листовых металлов.

В разделе 4 проведена линеаризация условия пластичности анизотропного металла с введением коэффициента пропорциональности для напряжений, определены предельные значения этого коэффициента.

В разделе 5 получены зависимости для исследования энергетическим методом процессов штамповки анизотропных металлов, формулы диссипации мощности на поверхностях разрыва скоростей в анизотропном упрочняющемся материале.

В разделе 6 даны описания эллипса пластичности анизотропно-

го металла при плоском напряженном состоянии, условие пластичности в параметрической форме, уравнения характеристик и дифференциальные соотношения для напряжений и скоростей перемещений для плоского напряженного состояния.

В разделе 7 разработан экспериментально-аналитический метод исследования напряженно-деформированного состояния в заготовке, учитывающий некоаксиальность главных осей напряжений и скоростей деформаций.

В разделе 8 с использованием полученных зависимостей проведено исследование процессов первого и последующего переходов вытяжки листового металла и отбортовки.

В разделе 9 проведено исследование процессов волочения, протяжки, раздачи и обжима тонкостенных труб коническими инструментами.

В заключении изложены основные результаты работы.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1. Состояние проблемы

Развитию теории обработки металлов давлением и широкому их использованию в исследованиях процессов штамповки способствовали работы С.И.Губкина, О.А.Ганаго, Г.Я.Гуна, Г.Д.Дель, В.Л.Колмогорова, А.Д.Матвеева, И.А.Норицына, А.Г.Овчинникова, А.А.Поздеева, Е.А.Попова, И.П.Ренне, Г.А.Смирнова-Аляева, Л.Г.Степанского, М.В.Сторожева, И.Я.Тарновского, А.Д.Томленова, Е.П.Унксова, А.И.Целикова, К.Н.Шевченко, Л.А.Шофмана и др.

Большой вклад в развитие теории штамповки анизотропных металлов внесли Ю.М.Арышенский, В.Д.Головлев, В.Ф.Кузин, В.Д.Кухарь, Ф.И.Рузанов, В.В.Шевелев, С.П.Яковлев и др.

Реальные металлы обладают в той или иной мере анизотропией механических свойств. Многочисленными экспериментальными исследованиями установлена необходимость учета анизотропии механических свойств в исследованиях штамповки, особенно листовой штамповки.

В существующих теориях листовой штамповки анизотропных металлов не учитывают, что главные оси напряжений и скоростей деформаций не коаксиальны, для плоского напряженного состояния принимают свойства вдоль двух осей анизотропии одинаковыми или принимают жесткие ограничения по свойствам материала в виде оп-

ределенного соотношения между параметрами анизотропии, отсутствуют расчетные зависимости для исследования энергетическим методом процессов холодной штамповки анизотропных металлов.

В диссертационной работе разработаны основы теории исследования процессов холодной штамповки анизотропных металлов учитывающие особенности пластических деформаций анизотропных металлов, получены зависимости для исследования процессов штамповки анизотропных металлов методами теории обработки металлов давлением, разработанными применительно к изотропным материалам.

В настоящее время существуют несколько теорий пластических деформаций анизотропных материалов. Р.Мизес предложил в качестве условия пластичности анизотропного материала, уравнение, содержащее в осях симметрии механических свойств материала 15 коэффициентов, определяемых из экспериментов.

Для ортотропного тела, имеющего три взаимно ортогональные плоскости симметрии механических свойств, Р.Хиллом преобразовано условие пластичности Мизеса в виде уравнения, содержащего 6 параметров анизотропии, определяемых из экспериментов.

Норис и Мак-Кинен предложили условие текучести для ортотропных тел, плохо сопротивляющихся скалыванию.

Л.Ху и К.Мэрин распространили условие пластичности Р.Мизеса для изотропного тела при плоском напряженном состоянии на анизотропные тела путем замены предела текучести при растяжении и сжатии на пределы текучести в соответствующих направлениях.

Существуют теории П.П.Петрищева, И.И.Гольденблата, В.О.Геогджаева, В.А.Ломакина, которые являются деформационными теориями типа теорий малых упругопластических деформаций в случае изотропных сред.

В подавляющем большинстве случаев условие пластичности представляет собой полином второй степени. Иногда предельное состояние тела описывается в форме полинома четвертой степени, что неудобно для практического применения.

Обобщая условие текучести Треска-Сен-Венана на анизотропные среды, Д.Д.Ивлев предложил теорию пластичности анизотропных тел. Одним из достоинств этой теории является учет различий пределов текучести при растяжении и сжатии, однако она неудобна для исследования кинематических параметров процессов штамповки.

В работах Л.А.Толоконникова и др. приводятся условие текучести и ассоциированный закон пластического течения ортотропно-

го тела с учетом вида напряженного состояния. В правой части уравнения пластичности Мизеса–Хилла вместо единицы ставится функция напряженного состояния, которая берется в виде трехчлена с введением дополнительно двух констант материала, определяемых из опытов, в которых реализуются напряженные состояния, отличные от растяжения.

Теория пластических деформаций анизотропных материалов, разрабатываемая Ю.М.Арышенским и его сотрудниками, полагает наличие материального тензора четвертого ранга и коаксиальность главных осей напряжений и скоростей деформаций.

Н.Н.Малинин и О.А.Батанова предложили теорию изотропного упрочнения для материалов, различно сопротивляющихся растяжению и сжатию. Предполагается, что условие пластичности зависит от второго инварианта девиатора напряжений и первого инварианта тензора напряжений. Используется гипотеза о подобии диаграмм растяжения и сжатия. Модули упругости при растяжении и сжатии одинаковы.

В настоящее время наибольшее распространение получила теория текучести Мизеса–Хилла в силу ряда ее достоинств перед другими. При определенных соотношениях между упругими характеристиками анизотропного тела условие текучести Мизеса–Хилла может трактоваться как энергетическое условие текучести. Эта теория является теорией течения, можно применять ее к развитым пластическим деформациям. Теория Мизеса–Хилла относительно проста и нашла многочисленные экспериментальные подтверждения.

В диссертационной работе исследования проведены на основе теории Мизеса–Хилла.

2.2. Теория течения Мизеса–Хилла

Условие пластичности, интенсивности напряжений и приращений деформаций имеют вид

$$F(\sigma_y-\sigma_z)^2+G(\sigma_z-\sigma_x)^2+H(\sigma_x-\sigma_y)^2+$$
$$+2L\tau_{yz}^2+2M\tau_{zx}^2+2N\tau_{xy}^2=1, \qquad (1)$$

$$\sigma_i=\sqrt{(3/2)/(F+G+H)}\left[F(\sigma_y-\sigma_z)^2+G(\sigma_z-\sigma_x)^2+\right.$$
$$\left.+H(\sigma_x-\sigma_y)^2+2L\tau_{yz}^2+2M\tau_{zx}^2+2N\tau_{xy}^2\right]^{1/2}, \qquad (2)$$

$$d\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2(F+G+H)}{3}} \left[F\left(\frac{G d\varepsilon_y - H d\varepsilon_z}{FG+GH+HF}\right)^2 + G\left(\frac{H d\varepsilon_z - F d\varepsilon_x}{FG+GH+HF}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + H\left(\frac{F d\varepsilon_x - G d\varepsilon_y}{FG+GH+HF}\right)^2 + \frac{d\gamma_{yz}^2}{2L} + \frac{d\gamma_{zx}^2}{2M} + \frac{d\gamma_{xy}^2}{2N} \right]^{1/2}, \qquad (3)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – нормальные и касательные напряжения в осях анизотропии x, y, z; $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z, d\gamma_{xy}, d\gamma_{yz}, d\gamma_{zx}$ – компоненты приращений деформаций в осях анизотропии; F, G, H, L, M, N – параметры анизотропии материала, определяемые из его механических испытаний.

Соотношения между приращениями деформаций и напряжениями имеют вид

$$\left.\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda\left[H(\sigma_x-\sigma_y)+G(\sigma_x-\sigma_z)\right], \\ d\varepsilon_y &= d\lambda\left[F(\sigma_y-\sigma_z)+H(\sigma_y-\sigma_x)\right], \\ d\varepsilon_z &= d\lambda\left[G(\sigma_z-\sigma_x)+F(\sigma_z-\sigma_y)\right], \\ d\gamma_{yz} &= 2\,d\lambda\,L\tau_{yz}, \quad d\gamma_{zx} = 2\,d\lambda\,M\tau_{zx}, \\ d\gamma_{xy} &= 2\,d\lambda\,N\tau_{xy}, \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где $d\lambda$ – коэффициент пропорциональности, связанный с приращением удельной пластической работы.

В научно-технической литературе приведены многочисленные экспериментальные исследования, подтверждающие применимость теории Мизеса-Хилла для листовых металлов.

Для проверки выводов теории Мизеса Хилла были проведены испытания на растяжение ряда листовых материалов. Образцы с рабочей длиной 200 мм и шириной 20 мм вырезались из следующих листовых материалов: латуни Л68, сплава АМг2, сталей Х18Н10Т, 08Ю и 08кп толщиной соответственно 0,83 мм, 0,8 мм, 1,0 мм, 0,9 мм и 0,8 мм. Углы направлений вырезки образцов по отношению к направлению прокатки листа составляли 0°, $22^\circ30'$, 45°, $67^\circ30'$ и 90°.

По результатам испытаний на растяжение образцов, вырезанных

в пяти направлениях относительно направления прокатки листового металла, строились кривые упрочнения материала. Разброс экспериментальных точек от усредненной кривой упрочнения для каждого из четырех исследованных материалов составляет менее 10% и только для стали Х18Н10Т отклонение двух экспериментальных точек доходит до 20%. Таким образом, положения изотропного упрочнения теории Мизеса-Хилла с достаточной точностью применимы для листовых металлов.

2.3. Взаимное положение главных осей напряжений и скоростей деформаций

Определим угол между главными осями напряжений и скоростей (приращений) деформаций для случая, когда одна из главных осей напряжений совпадает с осью анизотропии Z.

Рассматривая совместно уравнения преобразования компонентов тензоров напряжений и скоростей (приращений) деформаций и уравнения связи между скоростями (приращениями) деформаций и напряжениями (4), получаем формулу угла между главной осью напряжений и главной осью скорости (приращения) деформации, куда входят параметры анизотропии материала, величины главных нормальных напряжений, тригонометрические функции угла между главной осью напряжений и осью анизотропии X.

Получены формулы угла между главной осью напряжений и главной осью скоростей (приращений) деформаций для плоского деформированного и плоского напряженного состояний. Подсчитаны величины этих углов для листовых металлов: стали 08кп, алюминиево-марганцевого сплава АМцАМ, алюминиево-магниевого сплава АМг6М, стали Х18Н9Т толщиной соответственно 1,0 мм, 1,7 мм, 3,0 мм, 1,0 мм, латуни Л62 толщиной 1,8 мм четырех состояний, стали П-11 толщиной 1,4 мм семи состояний. Для этих листовых металлов угол между главными осями напряжений и скоростей (приращений) деформаций достигает 6 градусов и более, поэтому в общем случае главные оси напряжений и скоростей деформаций нельзя принимать коаксиальными. Для направления под углом 45 градусов к направлению прокатки листа угол между главными осями напряжений и скоростей деформаций составляет менее 1-3 градусов и с достаточной точностью главные оси напряжений и скоростей деформаций можно принимать коаксиальными.

2.4. Линеаризация условия пластичности

Рассматриваем случай, когда главная ось напряжений совпадает с осью анизотропии Z. Условие пластичности в краткой форме

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_S , \tag{5}$$

где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное напряжения с учетом знака из трех главных нормальных напряжений σ_m, σ_n и σ_z; σ_S – обобщенное напряжение текучести материала; β – коэффициент пропорциональности для напряжений.

Главные оси напряжений m и n лежат на одной плоскости с осями анизотропии X и Y.

Подставим в формулу (2) компоненты напряжений в осях анизотропии, выраженные через главные нормальные напряжения по формулам преобразования компонентов тензора напряжений при переходе от одной прямолинейной ортогональной системы координат к другой, приравняем интенсивность напряжений обобщенному напряжению текучести материала, рассмотрим полученное уравнение совместно с уравнением (5), откуда получаем выражение коэффициента β.

Для случая, когда напряжение σ_z является промежуточным главным нормальным напряжением, максимальное значение коэффициента β составляет

$$\beta_1 = \sqrt{(2/3)(F+G+H)(F+G)} \Big/ \Big[(FG+GH+HF)\cos^2 2\varphi + 0{,}5N(F+G)\sin^2 2\varphi\Big]^{1/2} , \tag{6}$$

где φ – угол между главной осью напряжений m и осью анизотропии X. Этот максимум имеет место при плоском деформированном состоянии.

Приравняв последовательно $\sigma_z = \sigma_m$ и $\sigma_z = \sigma_n$, находим соответственно два нижних предела изменения коэффициента β:

$$\beta_2 = \sqrt{(2/3)(F+G+H)} \Big/ \Big[F\cos^4\varphi + G\sin^4\varphi + H\cos^2 2\varphi + 0{,}5N\sin^2 2\varphi\Big]^{1/2} , \tag{7}$$

$$\beta_3 = \sqrt{(2/3)(F+G+H)} \Big/ \left[F\sin^4\varphi + G\cos^4\varphi + H\cos^2 2\varphi + 0{,}5N\sin^2 2\varphi\right]^{1/2}. \qquad (8)$$

Для случая, когда $\sigma_2 = \sigma_1$ или $\sigma_2 = \sigma_3$ максимальное значение и два нижних предела изменения коэффициента β имеют вид

$$\beta_4 = \sqrt{(2/3)(F+G+H)}\left[F\cos^4\varphi + G\sin^4\varphi + H\cos^2 2\varphi + 0{,}5N\sin^2 2\varphi\right] \Big/ \left[F\left(-G\sin^2\varphi\cos 2\varphi + H\cos^2 2\varphi + 0{,}5N\sin^2 2\varphi\right)^2 + G\left(F\cos^2\varphi\cos 2\varphi + H\cos^2 2\varphi + 0{,}5N\sin^2 2\varphi\right)^2 + \left(H\cos^2 2\varphi + 0{,}5N\sin^2 2\varphi\right)\left(F\cos^2\varphi + G\sin^2\varphi\right)^2\right]^{1/2}, \qquad (9)$$

$$\beta_5 = \sqrt{(2/3)(F+G+H)} \Big/ \left[F\sin^4\varphi + G\cos^4\varphi + H\cos^2 2\varphi + 0{,}5N\sin^2 2\varphi\right]^{1/2}, \qquad (10)$$

$$\beta_6 = \sqrt{(2/3)(F+G+H)/(F+G)}. \qquad (11)$$

Для указанных выше листовых металлов расчитаны максимальные и минимальные значения коэффициента β. Максимальное и минимальное значения коэффициента β отличаются от их среднеарифметической величины для большинства рассматриваемых материалов менее 10 процентов. Наибольшее отличие получается у сплава АМцАМ и оно менее 15–17%. Таким образом, для большинства рассмотренных материалов в условии пластичности (5) коэффициент β в первом приближении можно принять постоянным и равным среднему значению между максимальной и минимальной величинами β.

2.5. Об энергетическом методе решения задач пластического деформирования анизотропных металлов

2.5.1. Уравнения для анизотропных металлов

Из выражений (2) – (4) получаем формулы для компонентов девиатора напряжений в осях анизотропии

$$
\left.
\begin{aligned}
\sigma_x' &= -A_1(\sigma_i/d\varepsilon_i)\left[(2F+G)\,d\varepsilon_y + (2F+H)\,d\varepsilon_z\right],\\
\sigma_y' &= -A_1(\sigma_i/d\varepsilon_i)\left[(F+2G)\,d\varepsilon_x + (2G+H)\,d\varepsilon_z\right],\\
\sigma_z' &= -A_1(\sigma_i/d\varepsilon_i)\left[(F+2H)\,d\varepsilon_x + (G+2H)\,d\varepsilon_y\right],\\
\tau_{yz} &= \left[(F+G+H)/(3L)\right](\sigma_i/d\varepsilon_i)\,d\gamma_{yz},\\
\tau_{zx} &= \left[(F+G+H)/(3M)\right](\sigma_i/d\varepsilon_i)\,d\gamma_{zx},\\
\tau_{xy} &= \left[(F+G+H)/(3N)\right](\sigma_i/d\varepsilon_i)\,d\gamma_{xy},
\end{aligned}
\right\} \qquad (12)
$$

где $A_1 = (2/9)(F+G+H)/(FG+GH+HF)$.

Формулы (12) могут быть использованы при исследовании процессов штамповки энергетическим или экспериментально-аналитическим методами.

По формулам преобразования компонентов тензора напряжений при переходе от одной прямолинейной ортогональной системы координат к другой выразим компоненты напряжений в осях анизотропии через касательное напряжение при чистом сдвиге в произвольных плоскостях, подставим их в формулу интенсивности напряжений (2), откуда после преобразований находим напряжение текучести при сдвиге

$$
T = \sqrt{(F+G+H)/(3B)}\;\;\sigma_S\,, \qquad (13)
$$

где

$$
\begin{aligned}
B = {} & 2F\left[\cos(y,y')\cos(y,x') - \cos(z,x')\cos(z,y')\right]^2 +\\
& + 2G\left[\cos(z,x')\cos(z,y') - \cos(x,x')\cos(x,y')\right]^2 +\\
& + 2H\left[\cos(x,x')\cos(x,y') - \cos(y,x')\cos(y,y')\right]^2 +\\
& + 2L\left[\cos(z,x')\cos(y,y') - \cos(z,y')\cos(y,x')\right]^2 +
\end{aligned}
$$

$$+2M\left[\cos(x,x')\cos(z,y')+\cos(x,y')\cos(z,x')\right]^2+$$

$$+2N\left[\cos(x,x')\cos(y,y')+\cos(x,y')\cos(y,x')\right]^2. \qquad (I4)$$

Это выражение может быть использовано при определении мощности сдвига на поверхностях разрыва скоростей и мощности трения на контактной поверхности.

2.5.2. Диссипация мощности на поверхностях разрыва скоростей перемещений

Определим диссипацию мощности на поверхностях разрыва скоростей в анизотропном материале с учетом упрочнения материала и поворота осей анизотропии при переходе через поверхность разрыва скоростей. Считаем, что упрочнение изотропное, на поверхностях разрыва скоростей происходит чистый сдвиг, одна из главных осей напряжений совпадает с осью анизотропии Z. Поверхность разрыва представляем как тонкий пограничный слой, при переходе материала через этот слой происходит упрочнение материала и поворот осей анизотропии пропорционально градиенту скорости скольжения одного слоя относительно другого.

Используя формулу (I4) и принцип равенства приращений удельной мощности деформации и удельной мощности сдвига, находим дифференциал интенсивности деформации, далее изменение интенсивности деформации при переходе материала через поверхность разрыва скоростей

$$\varepsilon_{ip}=\sqrt{(F+G+H)/(3N)}\;E_1\left[V_{12}/(V_n-V_0)\right], \qquad (I5)$$

где

$$E_1=\left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}E\,d\varphi\right)/(\varphi_2-\varphi_1),\quad E=\sqrt{1/(1+D\sin^2 2\varphi)}, \qquad (I6)$$

$$D=\left[(F+G)/2+2H\right]/N-1, \qquad (I7)$$

V_{12} – разрыв скоростей между двумя частями деформируемого тела; V_n и V_0 – скорости перемещений материала и поверхности разрыва скоростей в направлении нормали к поверхности разрыва скоростей; φ – угол между осями X и X' (ось X' направлена по нормали к поверхности разрыва скоростей); φ_1 и φ_2 – значения угла φ до и после перехода через поверхность разрыва

скоростей.

У реальных листовых металлов $-0,5 < D < 1$, поэтому с погрешностью менее 2–3% формула (15) может быть упрощена в виде

$$\varepsilon_{ip} = \sqrt{(F+G+H)/(3N)}\; E_2 \left[V_{12}/(V_n - V_o)\right], \qquad (18)$$

где E_2 – средняя арифметическая величина между крайними значениями E в рассматриваемом интервале изменения угла φ.

Для степенного закона упрочнения $\sigma_i = A\varepsilon_i^n$ (19)

диссипация мощности на единицу поверхности разрыва

$$N_{yg} = \left[A/(n+1)\right]\left[(\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{ip})^{n+1} - \varepsilon_{i1}^{n+1}\right](V_n - V_o), \qquad (20)$$

где A и n – константы материала; ε_{i1} – интенсивность деформаций до перехода через поверхность разрыва скоростей.

Полученные зависимости (12) – (20) могут быть использованы при исследовании процессов штамповки энергетическим методом.

2.6. Плоское напряженное состояние

2.6.1. Условие пластичности

Плоскость Z свободна от напряжений, главные оси напряжений m и n лежат в плоскости осей анизотропии X и Y. Выразим компоненты напряжений в осях анизотропии X, Y и Z через главные нормальные напряжения σ_m и σ_n и подставим их в условия пластичности (1), после преобразований получим

$$a_{11}\sigma_m^2 + 2a_{12}\sigma_m\sigma_n + a_{22}\sigma_n^2 = 1, \qquad (21)$$

где

$$a_{11} = F\sin^2\varphi + G\cos^2\varphi + H + (2N - F - G - 4H)\sin^2\varphi\cos^2\varphi,$$

$$a_{22} = F\cos^2\varphi + G\sin^2\varphi + H + (2N - F - G - 4H)\sin^2\varphi\cos^2\varphi,$$

$$a_{12} = -\left[H + (2N - F - G - 4H)\sin^2\varphi\cos^2\varphi\right].$$

Уравнение (21) в плоскости главных напряжений описывает эллипс, главные полуоси которого

$$\left.\begin{matrix} a \\ b \end{matrix}\right\} = 1/\sqrt{(a_{11} + a_{22})/2 \pm \lambda_2 a_{12}}, \qquad (22)$$

где

$$\lambda_2 = \sqrt{1 + \lambda_1^2} \qquad (23) \qquad \lambda_1 = \left[(G-F)\cos 2\varphi/2\right]/$$

$$/\left[H+(2N-F-G-4H)\sin^2\varphi\cos^2\varphi\right]. \qquad (24)$$

Ориентацию главных осей эллипса находим по формулам

$$\sin\theta_4=\sqrt{(1-\lambda_1/\lambda_2)/2}\ ,\quad \cos\theta_4=\sqrt{(1+\lambda_1/\lambda_2)/2}\ , \qquad (25)$$

где θ_4 – угол между осью σ_m и большой осью эллипса.

Величина λ_2 для перечисленных выше листовых металлов больше единицы на I–3%, у стали П–II состояния 7 отличается от единицы на 7,4%, поэтому в большинстве случаев с достаточной точностью можно принять $\lambda_2 = I$.

Уравнения эллипса в канонической и параметрической формах

$$\xi^2/a^2+\eta^2/b^2=1, \qquad (26) \qquad \xi=a\cos\omega\ ,\ \eta=b\sin\omega\ , \qquad (27)$$

где ξ и η – координатные оси, направленные вдоль главных осей эллипса; ω – параметр, определяющий напряженное состояние.

По формулам преобразования декартовых координат при повороте осей с учетом зависимостей (25) и (27) получаем

$$\left.\begin{matrix}\sigma_m\\ \sigma_n\end{matrix}\right\}=a\sqrt{(1\pm\lambda_1)/2}\ \cos\omega\pm b\sqrt{(1\mp\lambda_1)/2}\ \sin\omega. \qquad (28)$$

По аналогии с теорией плоского напряженного состояния для изотропного металла дано математическое описание вписанного в эллипс пластичности шестиугольника.

Если выразить главные нормальные напряжения параметрически в виде

$$\left.\begin{matrix}\sigma_m\\ \sigma_n\end{matrix}\right\}=\sqrt{1/(F+G)}\left[(a_2\pm b_2)\sin\omega+\cos\omega\right], \qquad (29)$$

то тождественно удовлетворяется уравнение (2I).

Здесь $a_2=(F-G)/\sqrt{l}\ ,\ b_2=(F+G)/(\sqrt{l}\cos 2\varphi)$,

$$l=4(FG+GH+HF)+2N(F+G)tg^2 2\varphi\ .$$

С учетом выражений (I) и (2) формулы (29) примут вид

$$\left.\begin{matrix}\sigma_m\\ \sigma_n\end{matrix}\right\}=A_2\sigma_i\left[(a_2\pm b_2)\sin\omega+\cos\omega\right], \qquad (30)$$

где $A_2 = \sqrt{(2/3)(F+G+H)/(F+G)}$.

По формулам преобразования компонентов тензора напряжений получаем

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= A_2\sigma_i\left[(2F/\sqrt{l})\sin\omega + \cos\omega\right], \\ \sigma_y &= A_2\sigma_i\left[-(2G/\sqrt{l})\sin\omega + \cos\omega\right], \\ \tau_{xy} &= A_2\sigma_i\left[(F+G)/\sqrt{l}\right] tg\,2\varphi\,\sin\omega. \end{aligned}\right\} \qquad (31)$$

2.6.2. Уравнения для напряжений и скоростей перемещений

Подставляя выражения (31) в дифференциальные уравнения равновесия для плоского напряженного состояния в декартовой системе координат, получаем систему двух квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных, для которых находим уравнения характеристик и дифференциальные соотношения для напряжений вдоль характеристик

$$\left.\begin{aligned} dy &= \chi_1 dx, \quad (E_3 + A_3\chi_1)d\omega + D_3 d\varphi = 0, \\ dy &= \chi_2 dx, \quad (E_3 + A_3\chi_2)d\omega + D_3 d\varphi = 0, \end{aligned}\right\} \qquad (32)$$

где $\chi_{1,2} = (b_3 \pm \sqrt{b_3^2 + a_3 c_3})/a_3$,

$a_3 = 2(FG+GH+HF)\sin\omega - F\sqrt{l}\cos\omega$, $b_3 = N(F+G)\times$

$\times \sin\omega\, tg\,2\varphi$, $C_3 = 2(FG+GH+HF)\sin\omega + G\sqrt{l}\cos\omega$,

$E_3 = l\sin 2\varphi\cos 2\varphi\{[(F+G)(FG+GH+$

$+HF) - 2FGN]\cos\omega + GN\sqrt{l}\sin\omega\}$,

$A_3 = l\cos^2 2\varphi[0{,}5Fl\cos\omega - (FG+GH+HF)\sqrt{l}\sin\omega]$,

$D_3 = 8(F+G)\sin\omega[(FG+GH+HF)^2 + FGN^2 tg^2 2\varphi]$.

Подставляя соотношения О.Коши между скоростями деформаций и перемещений и выражения (3I) в уравнения связи между скоростями деформаций и напряжениями, подобные выражениям (4), получаем систему квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных, характеристики которых совпадают с характеристиками для напряжений. Дифференциальные соотношения для скоростей перемещений вдоль характеристик

$$(E_4 + A_4 \chi_1)\, dV_x + D_4\, dV_y = 0,$$

$$(E_4 + A_4 \chi_2)\, dV_x + D_4\, dV_y = 0, \qquad (33)$$

где $E_4 = -2N(F+G)\sin\omega\, tg\, 2\psi$, $A_4 = 2(FG+GH+HF)\sin\omega -$

$-F\sqrt{l}\cos\omega$, $D_4 = 2(FG+GH+HF)\sin\omega + G\sqrt{l}\cos\omega$,

V_x и V_y – скорости перемещений вдоль осей анизотропии X и Y.

Решение гиперболических уравнений обычно сводится к решению трех краевых задач: Римана, Коши и смешанной. По зависимостям (32) и (33) методом численного интегрирования можно определить поля напряжений и скоростей перемещений в заготовке при вытяжке.

2.7. Экспериментально-аналитический метод исследования напряженно-деформированного состояния

2.7.I. Показатели напряженного и деформированного состояний

Ставится задача определить показатель напряженного состояния и ориентацию главных осей напряжений относительно осей анизотропии при известном значении показателя деформированного состояния и известной ориентации главных осей скоростей деформаций относительно осей анизотропии. Принимаем, что одна из главных осей напряжений совпадает с осью анизотропии Z. Рассматривая совместно уравнения преобразования компонентов тензоров напряжений и приращений деформаций при переходе от одной декартовой системы координат к другой и уравнения связи между приращениями деформаций и напряжениями (4), получены формулы тангенса двойного угла между главной осью напряжений и осью анизотропии X и показателя напряженного состояния, которые могут быть

использованы при исследовании процессов штамповки экспериментально-аналитическим методом.

2.7.2. Соотношения главных напряжений при плоском напряженном состоянии

Величина критической деформации в заготовке при формоизменяющих операциях листовой штамповки в условиях плоского напряженного состояния зависит от отношения главных нормальных напряжений m_σ, поэтому ставится задача определить отношения главных нормальных напряжений и ориентацию главных осей напряжений относительно осей анизотропии при известном отношении приращений главных деформаций m_ε и известной ориентации главных осей приращений деформаций относительно осей анизотропии. Принимаем, что одна из главных осей напряжений совпадает с осью анизотропии Z. Рассматривая совместно уравнения преобразования компонентов тензоров напряжений и приращений деформаций при переходе от одной декартовой системы координат к другой и уравнения связи между приращениями деформаций и напряжениями (4), получаем

$$tg\,2\varphi = \frac{[G(F+2H)+F(G+2H)](1-m_\varepsilon)}{2N(Fb_4-Gb_5)}\sin 2\varphi' \qquad (34)$$

$$m_\sigma = \frac{[(F+2H)b_4+(G+2H)b_5]\cos 2\varphi-(Fb_4-Gb_5)}{[(F+2H)b_4+(G+2H)b_5]\cos 2\varphi+(Fb_4-Gb_5)}, \qquad (35)$$

где $b_4=\cos^2\varphi'+m_\varepsilon\sin^2\varphi'$, $b_5=\sin^2\varphi'+m_\varepsilon\cos^2\varphi'$,

φ' – угол между направлением приращения главной деформации $d\varepsilon_1$ и осью анизотропии X.

Полученные формулы могут быть использованы при исследовании формоизменяющих операций листовой штамповки экспериментально-аналитическим методом.

2.8. Анализ операций вытяжки и отбортовки

На основе полученных зависимостей проведены исследования операций вытяжки и отбортовки. Рассматривались направления радиального (меридионального) течения материала, т.е. направления образования фестонов (выпуклостей) и впадин. Одна из главных осей напряжений совпадает с осью анизотропии Z, напряженное состояние плоское.

2.8.I. Предельная степень вытяжки

Считаем фланец однородным, материал жесткопластическим и неупрочняющимся, напряженное состояние во фланце плоским, не учитываем трение между заготовкой и инструментом и изгиб заготовки у закруглений кромок матрицы и пуансона. Совместным решением дифференциального уравнения равновесия однородной тонкостенной осесимметричной оболочки без внешнего трения с выражениями главных нормальных напряжений в параметрической форме (30), приняв $\sigma_m = \sigma_\varphi$ и $\sigma_n = \sigma_\theta$, где σ_φ и σ_θ – радиальное и окружное нормальные напряжения, получаем

$$\frac{a_2 + b_2}{2b_2} \ln \frac{\sin\omega}{\sin\omega_0} - \frac{1}{b_2}(\omega - \omega_0) = \ln \frac{R}{\rho}, \qquad (36)$$

где ω_0 и R – значение параметра ω и радиус кривизны на краю фланца; ρ – радиус произвольного слоя.

На краю фланца радиальное нормальное напряжение принято равным нулю. Для определения теоретической предельной степени вытяжки в формуду (36) ставим значение ω в критическом сечении, которое определяется из условия равенства нулю окружного нормального напряжения. Коэффициент, представляющий отношение теоретической предельной степени вытяжки к экспериментальному значению предельной степени вытяжки, учитывает влияние трения между заготовкой и инструментом, упрочнения материала, геометрии инструмента и других факторов на предельную степень вытяжки. Величина этого коэффициента для сплава АМцАМ, сталей 08кп, П-II и Х18Н9Т и латуни Л62 при вытяжке в радиальной матрице колеблется от I,20 до I,25, при вытяжке в конической матрице – от I,I3 до I,I9.

Выведем формулы предельной степени вытяжки, учитывающие анизотропию механических свойств и упрочняемость материала, трение между заготовкой и инструментом, геометрию инструмента. Фланец считаем однородным, принимаем степенной закон упрочнения материала (I9), напряженное состояние во фланце принимаем плоским. Трение между фланцем заготовки и прижимом и матрицей не учитываем. Влияние изгиба и выпрямления заготовки и трения у закругления кромки матрицы на величину меридионального растягивающего напряжения на выходе из очага деформации учитываем по общепринятой в теории листовой штамповки методике.

Совместным решением дифференциального уравнения равновесия однородной тонкостенной оболочки без трения с инструментом с условием пластичности (5) при $\sigma_\rho = \sigma_1$ и $\sigma_\theta = \sigma_3$ получаем распределение радиального нормального напряжения во фланце. Приравняв произведение радиального нормального напряжения в заготовке внутри проема матрицы на толщину материала максимальному усилию на единицу ширины заготовки, которое может выдержать опасное сечение, решив полученное уравнение, получаем формулу для предельной степени вытяжки. Деформированное состояние в опасном с точки зрения разрушения материала сечении, которое находится внутри проема матрицы, принято плоским (деформация в окружном направлении равна нулю). Если принять во фланце $\beta = \beta_1$, то получаем нижний предел $K_{пр1}$ предельной степени вытяжки, если принять во фланце $\beta = \beta_3$, то получаем верхний предел $K_{пр2}$ предельной степени вытяжки. Выражения для нижнего и верхнего пределов предельной степени вытяжки имеют вид

$$\ln K_{пр1} = P_3 \left[P_2 - S/(2 r_м + S) \right], \qquad (37)$$

$$\ln K_{пр2} = t_3 \left[P_2 - S/(2 r_м + S) \right], \qquad (38)$$

где

$$P_2 = t_2 q_1, \quad q_1 = \left[a_п/(a_п + 0{,}5) \right]^{1/(1+n)}, \quad a_п = r_п/S,$$

$$t_2 = (1+n) \exp\left[-(n + \mu\pi/2)/(1+n) \right],$$

$$P_3 = \sqrt{r_\varphi (1 + r_{90+\varphi})/(r_\varphi + r_{90+\varphi})},$$

$$t_3 = (1 + r_{90+\varphi}) \sqrt{r_\varphi} / \sqrt{r_{90+\varphi} (1 + r_\varphi + r_{90+\varphi})},$$

$r_м$ и $r_п$ – радиусы закруглений кромок матрицы и пуансона; S – толщина заготовки; μ – коэффициент трения между заготовкой и инструментом; r_φ и $r_{90+\varphi}$ – коэффициенты анизотропии в радиальном и окружном направлениях.

По формулам (37) и (38) рассчитывали нижний и верхний пределы предельной степени вытяжки для сплава АМцАМ, сталей 08кп, П-II, Х18Н9Т, латуни Л62 и сравнивались с экспериментальными значениями предельной степени вытяжки. Величина $K_{пр1}$ меньше $K_{пр2}$ на 10–13 процентов. Для стали П-II и латуни Л62 величина $K_{пр1}$ ме-

ньше экспериментального значения предельной степени вытяжки на 2%, для остальных трех металлов величина $K_{пр1}$ больше экспери - ментального значения предельной степени вытяжки: для сплава АМцАМ - на 9%, для стали 08кп - на 4%, для стали Х18Н9Т - на 5%. Эти расхождения объясняются тем, что в расчетах не учтено закругление кромки пуансона и прижим фланца заготовки. По-видимому, приня..ные в расчетах коэффициенты трения несколько отличаются от ,ействительных их значений. В общем для исследованных материа - лов расчетные значения предельной степени вытяжки удовлетвори - тельно согласуются с экспериментальными данными.

2.8.2. Течение материала во фланце при вытяжке

Фланец считаем однородным, напряженное состояние во фланце плоским. Влияние прижима фланца и закругления кромки матрицы на течение материала не учитываем.

Из совместного решения уравнений связи между скоростями де- формаций и напряжениями, аналогичных уравнениям (4), выражений для напряжений в параметрической форме (3I), соотношений О.Коши для плоского и осесимметричного напряженного состояния с учетом уравнения (36) получаем

$$V/V_0 = (\sin\omega_0/\sin\omega)(R/\rho), \qquad (39)$$

где V и V_0 - радиальные скорости произвольного слоя и края фланца.

Выражения (36) и (39) определяют распределение скорости те- чения материала. Однако совместное рассмотрение этих выражений неудобно для расчетов высоты вытягиваемого стакана. Желательно получить зависимость скорости непосредственно через радиус. Для этого представим в первом приближении отношение $\sin\omega_0/\sin\omega$ в виде степенного трехчлена

$$\sin\omega_0/\sin\omega = Q_0 + Q_1(R/\rho) + Q_2(R/\rho)^2, \qquad (40)$$

где Q_0, Q_1 и Q_2 - коэффициенты, зависящие от параметров или коэффициентов анизотропии, которые можно определить по двум ва- риантам.

По первому варианту коэффициенты Q_0, Q_1 и Q_2 находим из следующих условий: величины отношения $\sin\omega_0/\sin\omega$, подсчи анные по выражениям (36) и (40), совпадают в двух точках

(при $\omega=\omega_0$ и $\omega=\pi/2$), а также при $\omega=\pi/2$ это отношение минимально. По второму варианту эти коэффициенты находим из условий, что величины отношения $\sin\omega_0/\sin\omega$, подсчитанные по выражениям (36) и (40), совпадают в трех точках (при $\omega=\omega_0$, $\omega=\pi/2$ и $\omega=\omega_2$, где ω_2 – значение параметра ω, при котором окружное нормальное напряжение равно нулю).

Подставляя выражение (40) в формулу (39), решая ее по всей ширине фланца, получаем

$$\frac{h}{r}=\frac{Q_0}{2}\left(K_в^2-1\right)+\frac{Q_1}{3}\left(K_в^3-1\right)+\frac{Q_2}{4}\left(K_в^4-1\right), \qquad (41)$$

где h и r – высота и радиус вытянутого стакана; $K_в$ – степень вытяжки.

Расчетные значения степени фестонообразования, представляющей отношение разности высот по фестону и впадине к средней высоте стакана, удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями степени фестонообразования для стали 08кп, латуни Л62 четырех состояний.

2.8.3. Последующая вытяжка в конической матрице

Принимаем степенной закон упрочнения материала (19), напряженное состояние в очаге деформации плоским, материал в очаге деформации считаем однородным, трение между заготовкой и инструментом учитываем по закону Амонтона–Кулона. Рассматриваем направления с меридиональным течением материала, направления образования фестонов и впадин.

Совместным решением дифференциального уравнения равновесия однородной безмоментной конической оболочки с условием пластичности (5), находим распределение меридионального и окружного нормальных напряжений в очаге деформации. Изгиб и выпрямление заготовки на входе и выходе из очага деформации учитываем по общепринятой в теории листовой штамповки методике.

Приравняв произведение меридионального напряжения на выходе из очага деформации на толщину заготовки максимальному усилию, которое может воспринимать опасное сечение заготовки, решая полученное уравнение, выведена формула для предельной степени вытяжки. Деформированное состояние в опасном сечении, которое располагается внутри цилиндрического калибрующего пояска матрицы, принято плоским.

Полученные зависимости могут быть использованы при проекти-

рования процессов последующей вытяжки в конической матрице.

2.8.4. Отбортовка

Рассмотрим отбортовку в заготовке с круглым отверстием цилиндрическим пуансоном с плоским торцем. Материал в очаге деформации считаем однородным, напряженное состояние – плоским, влияние закругления кромки пуансона на течение материала не учитываем.

Для очага деформации применимы уравнения (36) и (39), которые определяют распределение скорости радиального течения. Здесь V_0 и ω_0 – скорость перемещения и значение параметра ω на краю отверстия, которое определяется из условия равенства нулю радиального нормального напряжения. При отбортовке в формулах (30) принимаем $\sigma_m = \sigma_\varphi$ и $\sigma_n = \sigma_\theta$, причем радиальное σ_φ и окружное σ_θ нормальные напряжения растягивающие.

Для коэффициента анизотропии $r_{90+\varphi} = 0{,}25–4{,}0$ и отношения коэффициентов анизотропии $r_{90+\varphi}/r_\varphi = 0{,}5–2{,}0$ (эти значения охватывают практически все величины коэффициентов анизотропии реальных листовых металлов) и коэффициенте отбортовки $K_0 = 1{,}0–2{,}0$ система уравнений (36) и (39) с максимальной погрешностью менее 8 процентов может быть аппроксимирована в виде

$$V/V_0 = (1 - C_1)R/\rho + C_1 , \qquad (42)$$

где

$$C_1 = C_2 C_3 , \quad C_2 = 0{,}65 - 0{,}29 \ln r_{90+\varphi} ,$$

$$C_3 = 1 + 0{,}3 (r_{90+\varphi}/r_\varphi - 1) .$$

Из уравнения (42) получаем

$$L/(R_б - R_0) = (1 - C_1)(K_0 + 1)/(2K_0) + C_1 , \qquad (43)$$

где L – длина образующей цилиндрического борта; R_0 – исходный радиус края отверстия; $R_б$ – радиус борта.

Процесс отбортовки ограничивается потерей устойчивости деформации в окружном направлении с образованием местного утонения. Потеря устойчивости деформации происходит в окружном направлении у края отверстия, где напряженное состояние линейное. По теории устойчивости деформации анизотропных металлов находим, критическую деформацию в окружном направлении у края отверстия заготовки

$$\varepsilon_{\theta кр} = \sqrt{(3/2)(r_\varphi + r_{90+\varphi})/(r_\varphi + r_\varphi r_{90+\varphi} + r_{90+\varphi})}\, n . \qquad (44)$$

С увеличением коэффициентов анизотропии отношение длины развертки борта к ширине отбортовываемой части заготовки уменьшается. В процессе отбортовки при больших величинах коэффициентов анизотропии происходит уменьшение длины заготовки в меридиональном направлении, при коэффициентах анизотропии менее 0,5 происходит увеличение этой длины. При изменении коэффициентов анизотропии в указанных выше пределах для коэффициента отбортовки, равного I,5, отношение длины развертки борта к ширине отбортовываемой части заготовки изменяется в пределах от 0,868 до I,057. Для изотропного металла это отношение составляет 0,942. Для коэффициента отбортовки, равного I,5, длина развертки борта L в анизотропной заготовке может отличаться от длины развертки борта в изотропной заготовке до I3 процентов.

С увеличением коэффициентов анизотропии предельный коэффициент отбортовки уменьшается. Однако анизотропия механических свойств оказывает влияние на предельный коэффициент отбортовки менее существенно, чем упрочнение материала.

2.9. Пластическая деформация труб

Проведено исследование напряженно-деформированных состояний при стационарных процессах деформации тонкостенных труб коническими инструментами.

Рассмотрим установившееся деформирование тонкостенных труб из анизотропных упрочняющихся материалов при степенном законе упрочнения (I9). Используем безмоментную теорию оболочек, закон трения Амонтона–Кулона, внеконтактную деформацию не учитываем, напряженное состояние принимаем плоским.

Совместным решением дифференциального уравнения равновесия осесимметричной тонкостенной конической оболочки переменной толщины с зависимостями (3), (4) и (3I) при $\varphi = 0$ получаем

$$d\omega/d\varepsilon_\theta = -\left\{\left[\psi_{22} n/(\varepsilon_{i0} + \int d\varepsilon_i)\right]\sigma_{m1} + \psi_{33}\right\}/\psi_{44}, \qquad (45)$$

где $\psi_{11} = (F+G)\cos\omega/\left(-\sqrt{FG+GH+HF}\,\sin\omega + F\cos\omega\right)$,

$$\psi_{22} = A_2(F+G)/\left(-\sqrt{FG+GH+HF}\,\sin\omega + F\cos\omega\right),$$

$$\Psi_{33} = (1-\Psi_{11})\sigma_{m1} - (1+\mu ctg\alpha)\sigma_{\theta 1},$$

$$\Psi_{44} = A_2\left[\left(F/\sqrt{FG+GH+HF}\right)\cos\omega - \sin\omega\right],$$

$$d\varepsilon_i = \Psi_{22}\, d\varepsilon_\theta,$$

$$\sigma_{m1} = \sigma_m/\sigma_i = A_2\left[\left(F/\sqrt{FG+GH+HF}\right)\sin\omega + \cos\omega\right],$$

$$\sigma_{\theta 1} = \sigma_\theta/\sigma_i = A_2\left[-\left(G/\sqrt{FG+GH+HF}\right)\sin\omega + \cos\omega\right],$$

$d\varepsilon_\theta$ – приращение окружной деформации; ε_{i1} – интенсивность деформаций в начале очага деформации; σ_m и σ_θ – меридиональное и окружное нормальные напряжения; μ – коэффициент трения между заготовкой и инструментом; α – угол конусности инструмента; n – показатель упрочнения материала.

Уравнение (45) решается численным методом, для этого очаг деформации разбиваем на малые участки, в пределах каждого из которых напряженно-деформированное состояние можно было бы принимать однородным. Для любого элементарного участка имеем

$$\rho/R = exp\left(\sum_{k=1}^{k}\Delta\varepsilon_{\theta k}\right), \quad (46) \qquad \varepsilon_i = \sum_{k=1}^{k}\Psi_{22}\Delta\varepsilon_{\theta k} +$$

$$+\varepsilon_{i0}, \quad (47) \qquad S/S_0 = exp\left(\sum_{k=1}^{k}-\Psi_{11}\Delta\varepsilon_{\theta k}\right), \quad (48)$$

где R и ρ – начальный и текущий радиусы участка; k – номер участка от начала очага деформации; S_0 и S – начальная и текущая толщины участка; $\Delta\varepsilon_{\theta k}$ – приращение окружной деформации k -го участка.

В процессах протяжки и раздачи часто происходит потеря устойчивости деформации в окружном направлении, местное утонение и разрыв заготовки. Линия разрыва обычно проходит в меридиональном направлении. По теории устойчивости пластической деформации анизотропных материалов получаем критическую интенсивность деформаций

$$\varepsilon_{i\,кр} = n\sqrt{F/H+G/H}\left[(1+F/H) - 2m_\sigma + (1+\right.$$

$$+G/H)m_\sigma^2\Big]^{3/2}/\Big[(1+G/H)^2 m_\sigma^3-(2G/H+$$

$$+1)m_\sigma^2-(1+2F/H)m_\sigma+(1+F/H)^2\Big], \qquad (49)$$

где $m_\sigma = \sigma_{m1}/\sigma_{\theta 1}$.

Численным методом на ЭЦВМ ЕС 1022 решались задачи волочения, протяжки, обжима и раздачи труб при следующих значениях параметров процессов: $\mu ctg\alpha = 0$ и 0,5; $n = 0$, 0,2 и 0,4; $G/F =$ 0,5, 1, 1,5 и 2; $H/F = 0{,}3$, 0,6, 1,2 и 3. В начале очага деформации принималось $\varepsilon_{i0} = 0{,}002$. Определялись распределение меридионального и окружного нормальных напряжений, изменение толщины трубы, критическая и предельная деформации.

При волочении через коническую матрицу в заготовке действуют растягивающее меридиональное и сжимающее окружное нормальные напряжения, меридиональное напряжение в начале очага деформации принималось равным нулю, критическое значение диаметра определялось из условия, что на выходе из очага деформации окружное нормальное напряжение равно нулю. На изменение толщины в процессе волочения наиболее сильное влияние оказывает анизотропия механических свойств материала и менее существенно – показатель упрочнения материала и трение между заготовкой и инструментом. На величину критического относительного радиуса существенное влияние оказывают все три фактора: наиболее существенно анизотропия механических свойств, далее – показатель упрочнения материала и трение между заготовкой и инструментом.

При протяжке трубы коническим пуансоном в заготовке действуют растягивающие меридиональное и окружное нормальные напряжения, меридиональное напряжение в начале очага деформации принималось равным нулю, критическое значение диаметра определялось из условия потери устойчивости деформации в окружном направлении. При протяжке на утонение заготовки и распределение интенсивности деформации наиболее сильное влияние оказывает анизотропия механических свойств, на величину относительного меридионального напряжения (отношения меридионального напряжения к интенсивности напряжений) – показатель упрочнения материала и трение между заготовкой и инструментом, на величину критического относительного радиуса (отношения критического радиуса к пе-

рвоначальному радиусу трубы) – показатель упрочнения материала и анизотропия механических свойств материала.

При раздаче коническим пуансоном в заготовке действуют сжимающее меридиональное и растягивающее окружное нормальные напряжения, меридиональное напряжение на выходе из очага деформации принималось равным нулю, критическое значение диаметра определялось из условия потери устойчивости деформации в окружном направлении, предельное значение диаметра – из условия, что в начале очага деформации окружное нормальное напряжение равно нулю. На величины относительного меридионального напряжения и критического и предельного относительных радиусов наиболее существенно влияет показатель упрочнения материала. На величины относительной толщины (отношения толщины после деформации к первоначальной толщине) наиболее существенно влияет анизотропия механических свойств.

При обжиме в конической матрице в заготовке действуют сжимающие меридиональное и окружное нормальные напряжения, меридиональное нормальное напряжение на выходе из очага деформации принималось равным нулю, предельное значение диаметра определялось из условия достижения меридионального напряжения своего предельного значения. На величины интенсивности деформации и изменения толщины заготовки существенно влияет анизотропия механических свойств, на величину предельного относительного радиуса наиболее сильное влияние оказывает показатель упрочнения, далее анизотропия механических свойств материала.

2.10. Основные результаты работы

Получены зависимости для определения угла между главными осями напряжений и скоростей деформаций, при разработке теоретических основ исследования процессов штамповки необходимо учитывать некоаксиальность главных осей напряжений и скоростей деформаций.

Проведена линеаризация условия пластичности анизотропных металлов, линеаризованное условие пластичности может быть использовано при теоретическом исследовании процессов штамповки.

Получены зависимости между компонентами девиатора напряжений и тензора скоростей деформаций для ортотропного металла, формулы напряжения текучести при сдвиге, диссипации мощности на поверхностях разрыва скоростей, которые могут быть использова-

ны при исследовании процессов штамповки анизотропных металлов энергетическим методом.

Для плоского напряженного состояния условие пластичности в плоскости главных нормальных напряжений представляет эллипс. Получены формулы для описания эллипса пластичности и условие пластичности в параметрической форме, которые могут быть использованы при исследовании процессов листовой штамповки.

Получены уравнения характеристик и дифференциальные соотношения для напряжений и скоростей перемещений при плоском напряженном состоянии, которые могут быть использованы при исследовании процессов листовой штамповки конечно-разностным методом, в частности вытяжки деталей сложной формы из листового металла.

Предложена методика экспериментально-аналитического исследования напряженно-деформированного состояния в анизотропной заготовке, учитывающей некоаксиальность главных осей напряжений и скоростей деформаций, которая имеет важное прикладное значение при исследовании вытяжки листовых заготовок в автокузовном производстве с целью разработки устойчивых процессов штамповки и повышения качества штампуемых изделий.

С использованием полученных зависимостей проведены исследования силовых и кинематических параметров, а также предельного формоизменения листовых заготовок при вытяжке цилиндрических изделий, отбортовке цилиндрических бортов, использование результатов которых позволяет разработать устойчивые процессы вытяжки и отбортовки, полнее использовать ресурс устойчивости деформации заготовок, повысить качество изделий, рационально подобрать форму и размеры заготовок, произвести рациональный раскрой листового металла, экономить металл.

Исследованы процессы волочения, протяжки, раздачи, обжима тонкостенных труб коническими инструментами, результаты исследований позволяют проектировать устойчивые процессы деформирования труб, рационально выбрать заготовку и экономить металл.

Содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Норицын И.А., Цой Д.Г. Штамповка анизотропной листовой заготовки // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1975. – № 5. – С. 147-149.

2. Цой Д. О предельной степени вытяжки анизотропной листовой заготовки // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1975. – № 10. – С. 187-189.

3. Цой Д. Плоское напряженное состояние ортотропного тела // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1975. – № 11. – С. 14–16.

4. Цой Д.Н. Об энергетическом методе решения задач пластического деформирования анизотропной заготовки // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1979. – № 8. – С. 117–120.

5. Цой Д.Н. Экспериментальная проверка основных положений теории пластического течения анизотропных листовых материалов // Технология машиностроения: Межвузовский сб. науч. трудов. – Алма-Ата, 1980. – С. 44–48.

6. Цой Д.Н., Серикбаев Б.А. Течение в анизотропной листовой заготовке при вытяжке стакана // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1984. – № 3. – С. 136–139.

7. Цой Д.Н. Линеаризация условия пластичности анизотропного металла // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1985. – № 3. – С. 3–5.

8. Цой Д.Н. Предельная степень вытяжки анизотропной листовой заготовки // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1985. – № 4. – С. 121–124.

9. Цой Д.Н. Пластическое плоское напряженное состояние анизотропного металла // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1985. – № 6. – С. 136–138.

10. Цой Д.Н. Диссипация мощности на поверхности разрыва скоростей анизотропного металла // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1986. – № 2. – С. 126–129.

11. Цой Д.Н. Предельная степень последующей вытяжки в конической матрице // Технология и оборудование обработки металлов: Межвузовский сб. науч. работ. – Алма-Ата, 1986. – С. 6–10.

12. Цой Д.Н. Главные оси напряжений и скоростей деформации анизотропного металла // Машины и технология обработки металлов давлением: Межвузовский сб. науч. трудов. – М., 1986. – С. 40–45.

13. Цой Д.Н. Протяжка и раздача тонкостенной трубы коническим инструментом // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1987. – № 1. – С. 99–102.

14. Цой Д.Н. Волочение тонкостенной трубы через коническую матрицу // Изв. АН СССР. Сер. Механика твердого тела. – 1987. – № 4. – С. 182–184.

15. Цой Д.Н. Обжим тонкостенной трубы конической матрицей // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1987. – № 11. – С. 89–

-9I.

I6. Цой Д.Н. Отбортовка отверстия в анизотропной листовой заготовке // Изв. вузов СССР. Сер. Машиностроение. - I988. - № 3. - С. II8-I2I.

I7. Цой Д.Н. О показателях напряженного и деформированного состояний анизотропного металла // Теория и технология прокатки: Межвузовский сб. науч. трудов. - Алма-Ата, I988. - С. 25-28.

I8. Цой Д.Н. Раздача тонкостенной трубы коническим инструментом // Расчет и проектирование процессов и оборудования металлообработки: Межвузовский сб. науч. трудов. - Алма-Ата, I989. - С. 8-I3.

I9. Цой Д.Н. Основы теории пластических деформаций анизотропных металлов: Учебное пособие. - Алма-Ата: КазПТИ, I989. - 63 с.

20. Цой Д.Н. Протяжка тонкостенной трубы коническим инструментом // Вопросы исследования и эксплуатации металлургического оборудования: Межвузовский сб. науч. трудов. - Алма-Ата, I990. - С. 8I-86.

Цой

Подписано к печати 10.06.94 Объем 2 п.л. Заказ 344
Тираж I00 экз. Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана