

М169903

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

С.П. ЯКОВЛЕВ,
доцент, кандидат технических наук

ОБ УЧЕТЕ НАЧАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ И НЕОДНОРОДНОСТИ
МАТЕРИАЛА В РАСЧЕТАХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.324 - Обработка металлов давлением

Диссертация написана на русском языке

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1972

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

С.П. ЯКОВЛЕВ,
доцент, кандидат технических наук

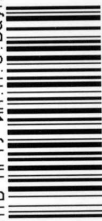
ОБ УЧЕТЕ НАЧАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ И НЕОДНОРОДНОСТИ
МАТЕРИАЛА В РАСЧЕТАХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.324 - Обработка металлов давлением

Диссертация написана на русском языке

М169903

НИБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1169903

яковлев С.П. 05 учете нач

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1972

Работа выполнена в Тульском политехническом институте.
Научный консультант - доктор физико-математических наук,
профессор Л.А.ТОЛОКОННИКОВ.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор А.Д.ТОМЛЕНОВ;
доктор физико-математических
наук, профессор Д.Д.ИВЛЕВ;
доктор технических наук,
профессор Н.Н.МАЛИНИН.

Ведущее предприятие - отраслевой научно-исследовательский
институт.

Автореферат разослан "___" _____ 1972 года.

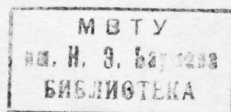
Защита диссертации состоится "___" _____ 1972 года
на заседании специализированного совета по динамике и прочности
машин МВТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5).

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные, просим на-
правлять по указанному адресу.

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

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Ученый секретарь совета
кандидат технических наук, доцент С.П.ДЕМИДОВ.



Перед промышленностью СССР стоят важные задачи по эффективной переработке листового материала во все возрастающих количествах. В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971 - 1975 годы указывается на необходимость значительного повышения удельного веса обработки металлов давлением. Широкое применение процессов пластического формоизменения в промышленности и их дальнейшее развитие опирается на достижения современной науки. В теории рабочих процессов обработки металлов давлением первостепенное значение имеют методы, позволяющие определять параметры технологических процессов пластического формоизменения расчетным путем.

Технология производства листового металла и различных профилей прокаткой вызывает анизотропию механических свойств. При использовании такого материала неучтенная в расчетах анизотропия свойств проявляется различно и вызывает в некоторых случаях осложнения в создании устойчивых технологических процессов, реализации расчетных параметров этих процессов. В других случаях анизотропия свойств материала оказывает положительное влияние на процессы обработки давлением.

Существенное влияние на выбор технологических параметров процессов обработки давлением играет неоднородность механических свойств материала заготовок, зависящая от

технологии их получения и условий осуществления процессов.

Механические свойства материалов и условия пластической обработки их обусловлены не только анизотропией и неоднородностью исходного материала, но и влиянием вида напряженного состояния.

Большинство известных методов расчетов процессов обработки давлением не учитывает указанные выше факторы. Некоторые аспекты теории анизотропных тел и её использования в расчетах технологических процессов обработки металлов давлением рассмотрены в работах А.Д.Томленова, Д.Д.Ивлева, И.И.Гольденבלата, В.Д.Головлева, Ф.И.Рузанова, Н.П.Колесникова, В.О.Геогджаева и др.

В диссертации разрабатываются методы расчета процессов обработки металлов давлением, в которых учитывается влияние начальной анизотропии и неоднородности материала, а также влияние вида напряженного состояния на расчетные параметры технологических процессов. Обсуждаются детали методики и приводятся результаты испытаний механических свойств листовых материалов. С учетом анизотропии. Выполнен анализ расчетных параметров процессов вытяжки, обжима, волочения и прессования анизотропных и неоднородных материалов. Сообщаются конкретные рекомендации по расчетам напряжений, деформаций, усилий, давлений на матрицу, геометрических характеристик заготовки и инструмента, предельных степеней процессов. Приводятся примеры практического использования полученных результатов исследований.

В В Е Д Е Н И Е

Анизотропия прокатанного листа является следствием образования текстуры - предпочтительной ориентировки зерен обрабатываемого материала, которая зависит от режимов прокатки и последующей термической обработки. Основными причинами направленности механических свойств металлов, кроме анизотропии отдельных кристаллов, из которых состоит металл, являются характер и ориентировка фаз дефектов металла и остаточные напряжения, возникающие вследствие особенностей пластической деформации при прокатке. При деформации зерна и включения приобретают вытянутую форму, которая после отжига переходит в так называемую "строчечную структуру". Вследствие этого свойства листового материала в разных направлениях относительно направления прокатки могут оказаться различными.

Анизотропию механических свойств листовых материалов принято оценивать коэффициентом анизотропии.

Выделяют трансверсальную анизотропию, когда механические свойства одинаковы для всех направлений в плоскости листа, но в поперечном направлении эти свойства оказываются иными. Плоскостная анизотропия проявляется при различии свойств образцов в разных направлениях плоскости листа. Отмечается, что величина коэффициента анизотропии для большинства листовых материалов, используемых при обработке давлением, изменяется в пределах $0,2 \div 2,7$.

Практически отсутствуют сведения об изменении характеристик анизотропии в зависимости от режимов обработки давлением и последующей термической обработки. Изучение влияния анизотропии на процессы обработки металлов давлением производится в основном экспериментально. Теоретические исследования отдельных процессов обработки давлением анизотропных материалов основываются на теории течения Мизеса - Хилла и имеют ограниченное применение. Они относятся, главным образом, к вопросам определения критических деформаций при двухосном растяжении.

Результаты анализа известных исследований показали, что анизотропия механических свойств существенно влияет на силовые режимы, распределение деформаций и напряжений в заготовке и другие технологические параметры процессов обработки металлов давлением, особенно листовой штамповки. Известные теории течения анизотропных тел не учитывают влияние третьего инварианта девиатора напряжений. Отсутствуют какие-либо сведения о том, как это обстоятельство влияет на выбор технологических параметров процессов. До настоящего времени не разработаны методы одновременного учета влияния начальной анизотропии и неоднородности материала на выбор технологических параметров процессов обработки металлов давлением. Поэтому в диссертационной работе решаются

следующие основные задачи:

1. Разработка теоретических методов учета влияния начальной анизотропии материала в расчетах технологических параметров процессов обработки металлов давлением. Получение основных соотношений для анализа процессов, протекающих в условиях плоского напряженного, плоского деформированного и осесимметричного состояний.

2. Разработка деталей методики экспериментального определения характеристик анизотропии листовых материалов.

3. Анализ процессов вытяжки, обжима, волочения и прессования анизотропных материалов. Установление влияния анизотропии, геометрии инструмента, условий трения, упрочнения материала на технологические параметры процессов.

4. Построение теории течения анизотропного тела, учитывающей влияние вида напряженного состояния. Получение основных соотношений для плоского напряженного и плоского деформированного состояния. Оценка влияния вида напряженного состояния на предельные степени деформации процессов обработки давлением.

5. Разработка теоретических методов учета одновременного влияния анизотропии и неоднородности исходного материала в расчетах технологических параметров процессов обработки металлов давлением. Получение основных соотношений для плоского напряженного и плоского деформированного состояний. Анализ процессов вытяжки, прессования и внедрения жесткого штампа в анизотропную неоднородную среду.

Глава I

УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ В РАСЧЕТАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ (плоское напряженное состояние)

Ряд технологических процессов листовой штамповки (вытяжка без утонения стенки, обжим, отбортовка, раздача, формовка) осуществляется в условиях, близких к плоскому напряженному состоянию.

В §. I и 2 изложены основные соотношения при плоском напряженном состоянии, позволяющие учесть эффект анизотропии при анализе указанных выше технологических процессов. Материал принимается жестко-пластическим, неупрочняющимся, ортотропным. Предполагается справедливость условия текучести Мизеса - Хилла

$$2f = K_{23}(\sigma_y - \sigma_z)^2 + K_{31}(\sigma_z - \sigma_x)^2 + K_{12}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \\ + K_{44}\tau_{yz}^2 + 2K_{55}\tau_{zx}^2 + 2K_{66}\tau_{xy}^2 = 1, \quad (1)$$

где σ_{ij} - компоненты напряжения; f - функция текучести; K_{ij} - параметры анизотропии.

Считается справедливым ассоциированный закон пластического течения

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda' \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (2)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - компоненты скоростей деформаций; λ' - коэффициент пропорциональности, связанный с приращением пластической работы на единицу объема, в качестве осей координат X, Y, Z выбраны главные оси анизотропии.

При плоском напряженном состоянии отличные от нуля компоненты напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ в главных осях анизотропии представляются в параметрическом виде

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{\cos \omega}{l} + \frac{\sin \omega}{m} \cos 2\varphi; \\ \sigma_y &= \frac{\cos \omega}{l} - \frac{\sin \omega}{m} \cos 2\varphi; \\ \tau_{xy} &= \frac{\sin \omega}{m} \sin 2\varphi,\end{aligned}\quad (3)$$

где ω - параметр, характеризующий положение точки на кривой текучести; φ - угол между направлением первого главного напряжения и осью X ;

$$l = \sqrt{2K_{23}}; \quad m = \sqrt{2K_{23} + 4[K_{12} + (2K_{66} - 2K_{23} - 4K_{12}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi]}.$$

При этом тождественно удовлетворяется условие текучести (I).

Подстановка соотношений (3) в уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

приводит к системе уравнений относительно ω и φ .

Устанавливаются условия гиперболичности, эллиптичности или параболичности этой системы.

В области гиперболичности получены уравнения характеристик

$$dy = \frac{4K_{66} \sin \omega \sin 2\varphi \pm \sqrt{A \sin^2 \omega - 4l^2 m^2 \cos^2 \omega}}{4(K_{23} + 2K_{12}) \sin \omega \cos 2\varphi - 2lm \cos \omega} dx \quad (5)$$

и соотношения для искомых функций ω и φ вдоль характеристик

$$\begin{aligned} & \left[(2K_{66} - 2K_{23} - 4K_{12}) \frac{\sin 4\varphi}{m} \cos \omega \mp \frac{1}{l} \sqrt{A \sin^2 \omega - 4l^2 m^2 \cos^2 \omega} \right] d\omega + \\ & + \frac{\sin \omega}{m^3} A d\varphi = 0; \quad A = 16K_{66}^2 \sin^2 2\varphi + 16(K_{23} + 2K_{12})^2 \cos^2 2\varphi. \quad (6) \end{aligned}$$

Линии характеристик, как видно из уравнений (5), не совпадают с линиями скольжения. Уравнения характеристик (5) и соотношения вдоль них для неизвестных функций (6) приводят в случае изотропного тела к формулам В.В.Соколовского.

В работе показано, что в области гиперболичности системы (4) уравнения для определения скоростей также гиперболические, причем их характеристики совпадают. Для определения компонентов скоростей V_x и V_y получены соотношения вдоль характеристик

$$-(K_{66} \sin \omega \sin 2\varphi \mp \frac{1}{4} \sqrt{A \sin^2 \omega - 4l^2 m^2 \cos^2 \omega}) dV_x +$$

$$+ \left[\frac{m}{L} K_{23} \cos \omega + (K_{23} + 2K_{12}) \sin \omega \cos 2\varphi \right] dV_y = 0. \quad (7)$$

В § 3 обсуждается методика экспериментального определения коэффициентов и параметров анизотропии листовых материалов. Рекомендуется с целью оценки анизотропии применение инструментального микроскопа для нанесения делительной сетки на образце и установления её искажений после растяжения образца. Для ряда материалов (стали 08КП, стали Х18Н9Т, стали ПП, алюминиевых сплавов АМЦАМ и АМГ6М, латуни Л62) получены численные значения коэффициентов анизотропии Γ_α и предела текучести σ_{02} в направлениях, составляющих углы $\alpha = 0; 22,5^\circ; 45^\circ; 67,5^\circ; 90^\circ$ с направлением прокатки. Показано, что для исследованных материалов справедливы формулы Хилла, позволяющие предсказать величины Γ_α и σ_{02} из опытов на растяжение образцов. Приводятся результаты экспериментального исследования влияния степени обжатия при холодной прокатке и режимов термической обработки на механические свойства и показатели анизотропии листовой стали и латуни. Изучается также деформационная анизотропия протяжки малоуглеродистой стали и кремнистой латуни в связи с изменением параметров процесса. Показывается, что с увеличением степени деформации при прокатке и протяжке коэффициент анизотропии стали убывает, а латуни - возрастает.

В § 4 приведен анализ деформации фланца заготовки при вытяжке анизотропного материала. Исследовано влияние коэффициента анизотропии на расположение и высоту фестонов, утолщение края заготовки, напряженное состояние и предельную степень вытяжки.

Установлено, что фестоны и впадины образуются в тех направлениях, в которых величина коэффициента анизотропии соответственно максимальна и минимальна. Показано, что толщина края заготовки после вытяжки в этих направлениях может быть оценена выражением

$$S = S_0 K^{-f}, \text{ где } f = \xi_1 : \eta_1; \quad \xi_1 = r_{90}(1 - \cos 2\beta_1) + r_0(1 + \cos 2\beta_1);$$

$$\eta_1 = r_{90}[(1 - \cos 2\beta_1)\sin^2\beta_1 + 2r_0\cos^2 2\beta_1 + n_1\sin^2 2\beta_1] +$$

$$+ r_0(1 + \cos 2\beta_1)\cos^2\beta_1; \quad n_1 = \frac{K_{66}}{K_{31}} = \left(r_{45} + \frac{1}{2}\right)\left(1 + \frac{r_a}{r_{90}}\right), \quad (8)$$

β_1 - угол, характеризующий направление образования фестона или впадины по отношению к направлению прокатки;

K - степень вытяжки.

Полученные теоретические данные согласуются с экспериментальными, полученными диссертантом для двух сортов листовых заготовок.

На основании анализа кинематики течения фланца заготовки показана возможность устранения фестонов при вытяжке за счет применения профильной заготовки и предложена методика её построения. Проведенные эксперименты по вытяжке профиль-

ных заготовок подтвердили предсказания теории.

В работе также приводятся соотношения, позволяющие определить высоту фестонов Δh и степень фестонообразования E . Полученные формулы хорошо согласуются с данными опытов по вытяжке стали, латуни и алюминиевых сплавов и могут быть использованы для назначения припусков под обрезку на фестонообразование при вытяжке цилиндрических изделий из материала с плоскостной анизотропией.

Рассматривается вопрос о вычислении радиальных σ_R и тангенциальных напряжений σ_θ во фланце заготовки в направлениях осевых фестонов и впадин, составляющих угол β , с направлением прокатки. Расчеты показали, что при вытяжке анизотропного материала предельное состояние, которое определяет максимальную возможную степень вытяжки, возникает в направлениях образования впадин раньше, чем в направлениях образования фестонов; в направлениях образования впадин коэффициент анизотропии имеет максимальное значение, и в этих направлениях, как показали эксперименты, происходит разрушение заготовки при вытяжке. Поэтому при наличии плоскостной анизотропии предельная степень вытяжки определяется минимальным значением коэффициента анизотропии r_{min} листа. Чем больше эта величина, тем больше предельная степень вытяжки. Опыты по вытяжке различных марок сталей, алюминиевых сплавов и латуней позволили уточнить расчеты и учесть влияние трения, изгиба и спрямления участков заготовки на вытяжной кромке матрицы, а также учесть влияние упроч-

нения и прижима заготовки введением экспериментально определяемого поправочного коэффициента.

Исследуется вопрос о распределении радиальных, тангенциальных и касательных напряжений по внутреннему контуру фланца заготовки в зависимости от степени вытяжки и плоскостной анизотропии материала. Задача решается методом характеристик. Приводятся графики распределения напряжений.

Находится форма заготовки, при вытяжке которой, по внутреннему контуру фланца действуют равномерно распределенные радиальные и тангенциальные напряжения и отсутствуют касательные напряжения, как это наблюдается при вытяжке цилиндрических изделий из круглой изотропной заготовки.

В § 5 изучен процесс обжима цилиндрических заготовок из трансверсально изотропного материала в конических матрицах, Меридиональное σ_1 и окружное σ_2 напряжения находятся путем совместного решения уравнения равновесия с учетом изменения толщины стенки заготовки, условия текучести и соотношений между напряжениями и скоростями деформаций

$$\sigma_1 = 2K_0 \cos(\omega - \omega_0); \quad \sigma_2 = 2K_0 \cos(\omega + \omega_0); \quad (9)$$

$$2K_0 = \sigma_{1s} \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}}; \quad \operatorname{tg} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{2r+1}}.$$

Параметр ω определяется из уравнения

$$4 \ln \frac{R}{b} = \frac{2(1+r)}{\sqrt{1+2r}} \psi_1 + 2 \frac{1 + \frac{r}{\sqrt{1+2r}} \operatorname{ctg}(\omega_0 + \omega_1)}{1 + \operatorname{ctg}^2(\omega_0 + \omega_1)} - 1; \quad (10)$$

$$\psi_1 = \omega - \frac{\pi}{2} - \omega_0.$$

Следуя работам Е.А.Попова и Ю.А.Аверкиева, вычислено усилие обжима с приближенным учетом упрочнения, трения и рассмотрен вопрос о предельных степенях процесса. Даются графики зависимости усилия и предельной степени деформации от анизотропии, упрочнения, коэффициента трения и угла матрицы.

В § 6 приведены примеры использования результатов исследований процесса вытяжки в промышленности при совершенствовании технологических процессов изготовления деталей массового производства. Усовершенствованный технологический процесс позволил получить качественные изделия при сокращении одной операции вытяжки и уменьшении расхода материала.

Г л а в а П

УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ В РАСЧЕТАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ (плоское деформированное состояние)

Прокатка листов, осадка призматических заготовок, пресование и волочение прямоугольных профилей с значительным отношением ширины к толщине, протяжка и выдавливание полых осесимметричных деталей и труб с большим отношением диаметра к толщине протекают в условиях близких к плоской деформации.

В § I получены основные соотношения для определения напряжений и скоростей течения анизотропного жестко пластического неупрочняющегося тела в условиях плоской деформации.

ции. Компоненты напряжений в главных осях анизотропии отыскиваются в виде

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma + T \left(\frac{1-c}{1-c \sin^2 2\varphi} \right)^{1/2} \cos 2\varphi; \quad \sigma_y = \sigma - T \left(\frac{1-c}{1-c \sin^2 2\varphi} \right)^{1/2} \cos 2\varphi; \\ \tau_{xy} &= T \left(\frac{1-c}{1-c \sin^2 2\varphi} \right)^{1/2} \sin 2\varphi; \quad \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2},\end{aligned}\quad (II)$$

которые тождественно удовлетворяют условию текучести

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4(1-c)\tau_{xy}^2 = 4T^2(1-c). \quad (I2)$$

Здесь приняты следующие обозначения

$$c = 1 - \frac{K_{66}(K_{23} + K_{31})}{2(K_{23}K_{31} + K_{31}K_{12} + K_{12}K_{23})}; \quad 2K_{66}T^2 = 1. \quad (I3)$$

Величина c принимается в качестве характеристики анизотропии тела в условиях плоской деформации.

Уравнения равновесия (4) с учетом соотношений (II) приводят к гиперболической системе уравнений, решение которой может быть сведено к интегрированию уравнений характеристик

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{1,2} = (1-c) \operatorname{tg} 2\varphi \pm \sqrt{1 + (1-c)^2 \operatorname{tg}^2 2\varphi}; \quad (I4)$$

$$\frac{\sigma}{2T} \pm g_1(\varphi) = \text{const}, \quad g_1(\varphi) = \frac{1}{2} E(\theta, \sqrt{c}), \quad (I5)$$

где E - эллиптический интеграл второго рода, а θ определяется из условия $\operatorname{tg} \theta = \sqrt{1-c} \operatorname{tg} 2\varphi$.

Если ввести угол φ между направлением первой главной оси скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_1$ и осью X , то, уста-

навливая связь между углами

$$\operatorname{tg} 2\psi = (1-c) \operatorname{tg} 2\varphi,$$

уравнение (14) можно привести к виду

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{1,2} = \operatorname{tg} \left(\psi \pm \frac{\pi}{4} \right). \quad (16)$$

Характеристики системы (4) ортогональны и совпадают с линиями максимальных скоростей деформаций сдвига. Они обычно не совпадают с линиями максимальных касательных напряжений.

Показано, что система уравнений для определения скоростей течения, так же как и система (4), гиперболического типа и их характеристики совпадают.

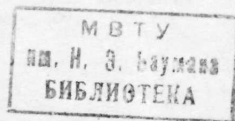
Если под α -характеристикой условиться понимать характеристику, составляющую с осью X угол $\bar{\alpha} = \psi - \frac{\pi}{4}$, а под β - характеристикой - характеристикой, составляющую с осью X угол $\bar{\beta} = \psi + \frac{\pi}{4}$, то уравнения характеристик и соотношения для искомых функций вдоль них будут иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \operatorname{tg} \bar{\alpha}; & \frac{p}{2T} + g(\bar{\alpha}) &= \operatorname{const}, \\ \frac{dy}{dx} &= -\operatorname{ctg} \bar{\alpha}; & \frac{p}{2T} - g(\bar{\alpha}) &= \operatorname{const}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$p = -\sigma; \quad g(\bar{\alpha}) = -\frac{1}{2} \frac{c \sin 2\bar{\alpha} \cos 2\bar{\alpha}}{(1 - c \sin^2 2\bar{\alpha})^{1/2}} + \frac{1}{2} E(2\bar{\alpha}, K), \quad (18)$$

$$K^2 = c.$$

Решение конкретных задач плоского деформированного со-



M169903

стояния анизотропного тела производится при известных значениях характеристики C . Величина её может быть и положительной и отрицательной. В работе приводятся таблицы функций E и g для мнимого модуля $\kappa = \sqrt{C}$ эллиптического интеграла J зависимости от угла $\bar{\alpha}$. Расчеты выполнены на электронно-вычислительной машине "Минск-22".

В § 2 разработана методика определения характеристики анизотропии C . Величина этой характеристики обычно находится из выражения (13), если известны отношения параметров анизотропии. Однако часто размеры заготовки в плоскости деформации не позволяют изготовить образцы для испытания на растяжение, как это имеет место при волочении и выдавливании полосы, трубы и стакана. Предлагается в этом случае величину C находить на основании выражения

$$C = 1 - \left(\frac{\sigma_{T0}}{\sigma_{T45}} \right)^2, \quad (19)$$

где σ_{T0} и σ_{T45} - пределы текучести материалов призматических образцов, вырезанных под углами 0° и 45° относительно направления деформации, при испытании на сжатие в условиях плоской деформации. Чтобы уменьшить влияние трения при осадке, поверхность образцов и осадочные плиты обрабатываются с чистотой $\nabla 9$. Кроме того, отношение высоты осаживаемого образца к ширине выбиралось таким образом, чтобы при степени осадки $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$, равной 20%, выполнялось условие $\frac{h}{b} \geq 0,95$. В этом

случае с достаточной степенью точности можно считать, что удельное усилие осадки совпадает с величиной истинного сопротивления пластическому деформированию. Условия плоской деформации обеспечивались за счет конструкции штампа и соотношения геометрических размеров образца. Отношение длины образца к ширине было не менее 15. Эксперименты с различными материалами показали, что величины пределов текучести и характеристики анизотропии принимают стабильные значения при степенях осадки $\varepsilon > 12\%$. При меньших степенях деформации наблюдается большой разброс этих величин. В диапазоне степеней деформаций порядка 12 - 20% величина σ практически постоянна. Осадка призматических образцов производилась в специальном штампе на 50-тонной испытательной машине УИМ-50 с записью усилия. Перемещение осадочной плиты фиксировалось с помощью двух индикаторов. В работе приводятся экспериментальные данные об изменении пределов текучести σ_{T0} , σ_{T45} от степени осадки, а также величины характеристики анизотропии σ при различных режимах протяжки и термической обработки стаканов из стали ЮГН и кремнистой латуни. Отмечается, что в противоположность стали латунь имеет отрицательную характеристику анизотропии.

В § 3 приведен анализ процесса волочения полосы из анизотропного материала. Рассматривается волочение через гладкую и шероховатую клиновую матрицу с углом 2β ($2\beta < \frac{\pi}{2}$). Предполагается, что направление волоче-

ния совпадает с осью X . Принимается, что между бо-
верхностями матрицы и полосы возникает постоянное по вели-
чине трение

$$\tau_n = \bar{m} \tau_{max} ; \quad 0 \leq \bar{m} \leq 1 ,$$

где τ_{max} - максимальное касательное напряжение у
контактной поверхности ;

$\bar{m}$ - безразмерная характеристика контактного
касательного напряжения.

Рассмотрены различные виды полей характеристик, реали-
зуемые в зависимости от редукции ε , характеристики
анизотропии C , угла матрицы β и условий трения.
В случае простейшего поля, состоящего из треугольника и
примыкающего к нему веера, получены аналитические выраже-
ния для определения напряжения волочения t и давления
на матрицу q . В остальных случаях определение этих
величин требует численного интегрирования уравнений харак-
теристик. Установлены границы применимости решения. Воло-
чение полосы становится невозможным, когда редукция на-
столько велика, что среднее растягивающее напряжение,
вычисленное в протянутой полосе, превышает $2T \sqrt{1-C}$.
В другом крайнем случае, когда редукция достаточно мала,
давление на матрицу может стать настолько большим, что
поверхность полосы перед матрицей становится пластической
раньше, чем достигнет матрицы. Предложена формула для
вычисления.

С целью установления влияния условий трения, величины характеристики анизотропии и угла матрицы на напряжение волочения были произведены расчеты в широком диапазоне изменения редукций при следующих исходных данных: $\beta = 5$; 12° ; 20° ; 30° ; 40° ; $C = -0,93$; $-0,50$; $0,00$; $0,50$; $0,93$; $\bar{m} = 0,0$; $0,2$; $0,4$; $0,6$; $1,0$. Результаты расчетов представлены в виде графиков. Показано, что волочение материала с отрицательной характеристикой анизотропии требует большей величины относительного напряжения. В работе установлено влияние анизотропии механических свойств, условий трения и угла матрицы на предельную редукцию процесса. Показано, что материал с отрицательной характеристикой C допускает большие степени деформации, чем материал с положительной величиной C . Угол матрицы оказывает существенное влияние на предельную редукцию процесса. Существует угол матрицы, который обеспечивает максимальную редукцию. Этот угол зависит от величины C . Изменение величины C от $-0,5$ до $0,5$ приводит при $\bar{m} = 0,2$ к изменению этого угла от 26° до 20° . Показывается возможность учета эффекта изотропного упрочнения при определении предельных редукций. Исследуется вопрос о влиянии угла матрицы и характеристики анизотропии на величину средней интенсивности и неравномерность деформаций по сечению изделия. Отмечается, что материал с отрицательной характеристикой анизотропии приобретает большую по величине среднюю интенсивность деформаций по сравнению с материалом с

положительной характеристикой анизотропии ; с изменением угла матрицы от 5° до 20° неравномерность деформаций по сечению растёт практически по линейному закону, оставаясь всегда больше для материала с отрицательной характеристикой анизотропии.

Проведены эксперименты по волочению полосы из материалов с положительной и отрицательной характеристикой анизотропии. Выявлено влияние характеристики анизотропии C , редукции ε и угла матрицы β на удельное усилие процесса. Рассмотрен также вопрос о нарастании и неравномерности деформаций при волочении этих материалов через клиновидную матрицу с углом $\beta = 20^\circ$ при $\varepsilon = 0,25$. Опыты подтвердили предсказания теории.

В § 4 получены основные соотношения для определения силовых параметров и кинематики течения при плоской деформации материалов со слабой пластической анизотропией. Так как ряд материалов обладает слабой пластической анизотропией, то целесообразно для анализа плоского пластического течения таких материалов применять метод малого параметра. Получены уравнения характеристик и соотношения вдоль них для определения напряжений в нулевом, первом и втором приближениях. Решение определяется в области существования решения изотропной задачи. Аналогично получены уравнения характеристик и соотношения вдоль них для скоростей течения, уравнения характеристик анизотропной задачи, сформулированы граничные условия. Применение полученных соотношений ил-

люстрируется на примере задачи о волочении полосы. Показывается, что уже первое приближение дает хорошее согласование с точным решением.

В работе отмечается, что полученные результаты исследования пластического течения полосы из анизотропного материала через клиновые матрицы могут быть использованы и в случае анализа процессов волочения и прессования осесимметричных труб на гладкой оправке, протяжки цилиндрических тонкостенных стаканов гладким пуансоном, если отношение диаметра оправки и пуансона к толщине стенки заготовки велико.

Результаты упомянутых теоретических исследований использовались для расчетов параметров технологических процессов изготовления деталей типа "стакан". Реализация предложений привела к сокращению числа переходов операций протяжек с пяти до трех, к существенному повышению производительности, высвобождению оборудования и значительному экономическому эффекту.

Г л а в а Ш

УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ В ПРОЦЕССАХ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Осесимметричное напряженное состояние пластически деформируемых тел часто реализуется при обработке металлов давлением. Анализ процессов осадки, прошивки, прессования, волочения цилиндрических заготовок основан на предположении осевой симметрии напряженного и деформированного состояния.

Изложены основные соотношения между параметрами механического состояния осесимметрично пластически деформируемых тел с учетом анизотропии их свойств. Предлагается инженерный метод решения частных задач.

В § 1 рассмотрены известные методы решения задач осесимметричной деформации изотропного тела.

В § 2 приведены основные соотношения, позволяющие анализировать процессы.

Рассмотрим в цилиндрических координатах уравнения равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0, \end{aligned} \quad (20)$$

условие текучести

$$K_{23}(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + K_{31}(\sigma_z - \sigma_r)^2 + K_{12}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 2K_{36}\tau_{rz}^2 = 1 \quad (21)$$

и соотношений между напряжениями и скоростями деформаций анизотропного (обладающего цилиндрической анизотропией) тела, соответствующие ассоциированному закону течения

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial u}{\partial r} = \lambda' [K_{12}(\sigma_r - \sigma_\theta) + K_{31}(\sigma_r - \sigma_z)]; \\ \dot{\epsilon}_\theta &= \frac{u}{r} = \lambda' [K_{23}(\sigma_\theta - \sigma_z) + K_{12}(\sigma_\theta - \sigma_r)]; \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{\partial w}{\partial z} = \lambda' [K_{31}(\sigma_z - \sigma_r) + K_{23}(\sigma_z - \sigma_\theta)]; \\ 2\dot{\gamma}_{rz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} = 2\lambda' K_{36}\tau_{rz}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\sigma_r, \tau_{\theta}, \sigma_z, \tau_{rz}, \dot{\epsilon}_r, \dot{\epsilon}_{\theta}, \dot{\epsilon}_z, \dot{\gamma}_{rz}$ - компоненты тензора напряжений и скоростей деформаций;

K_{ij} - параметры анизотропии;

u и w - скорости течения вдоль осей r и z .

Соответствующие меридиональной плоскости компоненты напряжений удобно представить через величину P среднего сжимающего напряжения, величину τ максимального касательного напряжения в меридиональной плоскости и угол φ между направлением первого главного напряжения в меридиональной плоскости и осью z :

$$\begin{aligned}\sigma_z &= -p + \tau \cos 2\varphi; & \sigma_r &= -p - \tau \cos 2\varphi; \\ \tau_{rz} &= \tau \sin 2\varphi.\end{aligned}\quad (23)$$

Кроме того, обозначим $\sigma_{\theta} = \sigma$.

Будем искать решение задачи с ограничением типа условия пластичности

$$\frac{\sigma + P}{\tau} = f_1(r, z), \quad (24)$$

где $f_1(r, z)$ - заранее подбираемая функция координат точки.

В частности, принимая $f_1(r, z) = \pm 1$, приходим к предположению Хаара и Кармена о полной пластичности. В дальнейшем указывается процесс последовательных приближений для определения этой функции.

Если принять для простоты $K_{23} = K_{31} = K_{12}$ и ввести параметр анизотропии

$$\alpha = 1 - \frac{K_{ss}}{3K_{23}}, \quad (25)$$

то из условия текучести получим

$$\begin{aligned} 6K_{23}\tau^2\left(\frac{1}{3}f_1 \cdot 1 - \alpha \sin^2 2\varphi\right) &= 1 \\ -\infty < \alpha < \frac{1}{3}f_{1min} + 1 \end{aligned} \quad (26)$$

Если исключить δ и τ с помощью соотношений (24) и (26) и подставить выражения (23) в уравнения равновесия (20), то для определения оставшихся неизвестных ρ и φ будем иметь гиперболическую систему уравнений, характеристики которой имеют вид

$$\frac{dr}{dz} = \operatorname{tg}\left(\gamma \mp \frac{\pi}{4}\right), \quad (27)$$

где γ определяется из выражения

$$\operatorname{tg} 2\gamma = (1 - \xi) \operatorname{tg} 2\varphi; \quad \xi = \frac{\alpha}{1 + \frac{1}{3}f_1^2} \quad (28)$$

Угол между направлением главной скорости деформации $\dot{\epsilon}_1$ в меридиональной плоскости и осью Z обозначим Ψ . На основании выражений (22) устанавливаем связь между Ψ и φ :

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}\right) : \left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r}\right) = (1 - \alpha) \operatorname{tg} 2\varphi. \quad (29)$$

Из уравнений (27), (28) и (29) следует, что только при $f_1(r, z) = 0$ характеристики системы уравнений (20) совпадают

с линиями максимальных скоростей сдвига.

Задачи установившегося течения типа прессования и волочения прутков относятся к классу задач со смешанными граничными условиями, когда граничные условия на одной части границы заданы в напряжениях, а на другой — в скоростях течения. Пусть построено решение в напряжениях для заданной функции $f_1(r, z)$, которое удовлетворяет граничным условиям в напряжениях. Для определения неизвестных компонентов скорости используем два из трех независимых уравнений (22), а именно, уравнение (29) и условие несжимаемости материала. Нетрудно показать, что эта система уравнений гиперболического типа, а её характеристики совпадают с линиями максимальных скоростей сдвига, т.е.

$$\frac{dr}{dz} = \operatorname{tg}\left(\psi \mp \frac{\pi}{4}\right). \quad (30)$$

Предположим, что построено решение системы уравнений относительно u и w , которое удовлетворяет всем граничным условиям в скоростях. Тогда оставшееся независимое уравнение из соотношений (22) следует привлечь для нахождения нового вида функции $f_1(r, z)$, которая будет учитывать не только напряженное состояние, но и вычисленную кинематику течения. Далее находится второе приближение задачи с новой функцией $f_1(r, z)$ и т.д.

Решение конкретной задачи установившегося течения следует начинать с задания вида функции $f_1(r, z)$, определения $\sigma, \rho, \tau, \varphi$ и построения сетки характеристик путем

совместного решения уравнений, записанных в конечных разностях. Далее следует определить компоненты скорости u_α и u_β . Зная кинематику течения, следует построить линии тока. Далее можно определить новый вид функции $f_i(r, z)$ и повторить решение задачи. Применение полученных соотношений и предложенного метода иллюстрируется на примере задачи о прессовании прутка через гладкую коническую матрицу с углом $\beta = 30^\circ$.

Г л а в а IV

УЧЕТ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Экспериментальными исследованиями установлено, что формулировка условия текучести для материалов, обладающих начальной анизотропией, должна содержать параметр вида напряженного состояния. Однако наиболее часто используемое условие текучести Мизеса - Хилла не учитывает этого факта. Поэтому предлагается формулировка условия текучести и соотношений между напряжениями и скоростями деформаций ортотропного тела, учитывающая влияние параметра вида напряженного состояния. Получены основные соотношения для анализа процессов обработки давлением анизотропных материалов, протекающих в условиях плоского напряженного и деформированного состояния.

В § I формулируется условие текучести анизотропного

тела и ассоциированный закон пластического течения. Вид напряженного состояния описывается параметром $\mu = \cos 3\varphi$, который связан с главными напряжениями формулами

$$\tau^3 \mu = \sqrt{2} (\sigma_1 - \sigma) (\sigma_2 - \sigma) (\sigma_3 - \sigma) ; \quad (31)$$

$$3\tau^2 = (\sigma_1 - \sigma)^2 + (\sigma_2 - \sigma)^2 + (\sigma_3 - \sigma)^2 ; \quad (32)$$

$$\sigma = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) , \quad (33)$$

где σ , τ и φ - соответственно среднее напряжение, октаэдрическое касательное напряжение и фаза напряжений, определяющая направление касательного напряжения на октаэдрической площадке.

Главные напряжения могут быть вычислены по формулам

$$\sigma_K = \sigma + \sqrt{2} \tau \cos \varphi_K ; \quad \varphi_1 = \varphi ; \quad \varphi_{2,3} = \varphi \pm \frac{2}{3} \pi . \quad (34)$$

Условие текучести записывается в виде

$$K_{23} (\sigma_y - \sigma_z)^2 + K_{31} (\sigma_z - \sigma_x)^2 + K_{12} (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2K_{44} \tau_{yz}^2 + \\ + 2K_{55} \tau_{zx}^2 + 2K_{66} \tau_{xy}^2 = \rho(\mu) , \quad (35)$$

где K_{ij} - константы анизотропии; функция $\rho(\mu)$ определится из выражения

$$\rho(\mu) = 1 + \sum_{k=1}^n \rho_k (\mu - 1)^k . \quad (36)$$

Константы ρ_K следует определять из опытов, в которых реализуются напряженные состояния, отличные от одноосного растяжения.

В § 2 проведено сопоставление предложенного условия текучести, которое в случае трансверсальной изотропии с осью симметрии Z и ограничением в (36) тремя членами имеет вид

$$\frac{\sigma_{\theta}^2}{\sigma_{\theta T+}^2} + \frac{\sigma_z^2}{\sigma_{z T+}^2} - \frac{\sigma_{\theta} \sigma_z}{\sigma_{z T+}^2} = 1 + \rho_1(u-1) + \rho_2(u-1)^2, \quad (37)$$

с экспериментальными данными Бастуна В.Н., Черняка Н.И., Жукова А.М. для стали 45, стали 40 и сплава Д16Т. Показано, что предложенное условие текучести лучше согласуется с экспериментом, чем условие текучести Мизеса - Хилла или Сен-Венана.

В § 3 и 4 проведен анализ уравнений плоского напряженного и плоского деформированного состояния, получены основные соотношения, позволяющие учесть влияние вида напряженного состояния на параметры процессов обработки металлов давлением.

В § 5 решена задача о вытяжке трансверсально изотропного материала, установлено значительное количественное влияние параметра вида напряженного состояния на предельную степень вытяжки цилиндрических изделий.

Г л а в а У

УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ В РАСЧЕТАХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материалы, поступающие для обработки давлением, обладают не только начальной анизотропией, но и начальной неоднородностью механических свойств, которые обусловлены всей предыдущей историей получения заготовок. Неоднородность механических свойств наблюдается также при наличии значительных градиентов температур в случае горячей обработки давлением.

В этой главе получены основные соотношения и разработана методика одновременного учета начальной анизотропии и неоднородности при анализе процессов обработки металлов давлением.

В § I приведены условие текучести и ассоциированный закон течения анизотропного жестко-пластического тела с монофункциональной неоднородностью вида

$$K_{ij} = K(x, y, z) k_{ij} \quad (38)$$

В § 2 и 3 исследуются уравнения плоского деформированного и плоского напряженного состояния такого материала. Показывается, что в случае плоского деформированного состояния система уравнений равновесия гиперболического типа и решение задачи сводится к интегрированию уравнений характеристик.

В случае плоского напряженного состояния система уравнений равновесия может быть гиперболического, эллиптического и параболического типов. Тип уравнений определяется константами анизотропии. В случае гиперболичности этих уравнений приведены уравнения характеристик и соотношения для искомых функций вдоль них.

В § 4 рассмотрено пластическое течение фланца заготовки из трансверсально изотропного неоднородного материала с неоднородностью в виде степенной функции. Получено уравнение для определения предельной степени вытяжки.

Диапазон изменения величины коэффициента анизотропии γ принят 0,5 - 2,5, а величина $P(b) = \frac{\sigma_T(b)}{\sigma_T(a)}$, характеризующая неоднородность во фланце, выбиралась в пределах 0,5 - 1,5. Приведены графики изменения предельной степени вытяжки в зависимости от коэффициентов анизотропии и характеристик неоднородности. Показано, что увеличение значения коэффициента анизотропии γ и уменьшение характеристики неоднородности $P(b)$ приводит к значительным величинам степени вытяжки, что позволяет интенсифицировать этот процесс. Роста величины коэффициента анизотропии материала заготовки можно достигнуть за счет применения рациональной технологии его получения, а уменьшение характеристики неоднородности можно получить путем подогрева края кружка в рабочей зоне штампа. Отмечается эффективность такого метода при вытяжке латуни, алюминиевых сплавов, малоуглеродистой стали и некоторых легированных сталей. Указано,

как приведенные расчеты распространить на случай вытяжки заготовки с плоскостной анизотропией.

В § 5 решена задача о внедрении жесткого гладкого штампа в полупространство с анизотропными неоднородными свойствами. Для выявления влияния функции неоднородности $T(x, y)$ и характеристики анизотропии C на силовые параметры процесса распределение давлений под штампом и протяженность пластической области в расчетах принимали

$$T(y) = T_0(1 \pm 0,014y); \quad C = \pm 0,3.$$

Неоднородность оказывает существенное влияние на вид поля характеристик и протяженность пластической области. Возрастающему пределу текучести соответствует меньшая протяженность пластической области, и β - характеристики обращены выпуклостью в сторону штампа; убывающему - большая протяженность пластической области, и β - характеристики обращены вогнутостью в сторону штампа. Изменение вида поля приводит к разному характеру распределения давлений под штампом: при убывании предела текучести давления возрастают от центра штампа к его краю, а при возрастании предела текучести давления убывают от центра к его краю. Путем сравнения результатов, полученных при расчете полей характеристик для полупространства с одинаковой неоднородностью и разными характеристиками анизотропии, установлено, что характер поля и характер распределения давлений под штампом качественно не меняются, а протяженность поля и величина

давлений увеличиваются с убыванием характеристики анизотропии.

В § 6. рассмотрена задача о прессовании полосы из анизотропного и неоднородного материала через гладкую клиновую матрицу с углом $\beta = 20^\circ$. Характеристика анизотропии изменялась в пределах $C = -0,5 \div 0,5$, а функция неоднородности принималась двух видов:

$$T(y) = 2T_0 \left(1 - \frac{y}{S_0}\right); \quad (39)$$

$$T(y) = T_0 \left(1 + \frac{2y}{S_0}\right). \quad (40)$$

Трудность решения задач установившегося течения в клиновой матрице заключается в том, что заранее неизвестно распределение неоднородности в очаге деформации. Поэтому задача решается в два этапа. На первом этапе решение находится в предположении, что материал однородный, анизотропный со средней величиной предела текучести при сдвиге. Строятся поля характеристик, годограф скоростей и линии тока. Далее каждой линии тока приписываются свои свойства (величина $T(x, y)$) в соответствии с (39), (40).

Считая закон распределения $T(x, y)$ известным, а линию раздела жесткой и пластической области на выходе металла из матрицы неизменной, получаем решение задачи на втором этапе.

Как показали расчеты и построения годографов скоростей, поля характеристик, соответствующие второму этапу решения задачи, удовлетворяя граничным условиям в напряжениях, не

удовлетворяют граничным условиям в скоростях, и поэтому дают нижнюю оценку усилию процесса. В работе получена и верхняя оценка удельного усилия. Исследуется также влияние неоднородности на неравномерность деформаций при прессовании порошковых. При прессовании материала, обладающего начальной неоднородностью типа (39), имеет место меньшая неравномерность деформаций, а при прессовании материала, обладающего неоднородностью типа (40), - большая по сравнению с однородным материалом. Поэтому для получения более равномерного распределения деформаций в изделии нужно стремиться иметь в исходной заготовке начальную неоднородность типа (39).

Такую исходную неоднородность при горячем прессовании можно получить за счет соответствующего распределения температур в заготовке, а при холодном прессовании - за счет подбора необходимых режимов технологических процессов получения заготовок.

Указанный выше подход к решению задачи может быть использован для приближенного учета изотропного упрочнения. Приводятся примеры решения таких задач.

ВЫВОДЫ

1. Получены основные соотношения теории идеальной пластичности анизотропных материалов не только для широко известного случая плоской деформации, но и для плоского напряженного состояния и случая осесимметричной деформации. Разработаны методы решения технологических задач, основан-

ные на различных вариантах метода последовательных приближений. Указана методика численного анализа процессов вытяжки, обжима, водочения и прессования.

2. Усовершенствована методика механических испытаний анизотропных листовых материалов. Получены количественные характеристики нескольких сплавов стали, алюминия, меди. Установлено влияние на анизотропию режимов прокатки, протяжки и термической обработки.

3. При анализе процесса вытяжки изучено фестонообразование, изменение толщины края заготовки, распределение напряжений, а также влияние коэффициентов анизотропии на предельные параметры процесса вытяжки. Показана возможность устранения фестонов за счет применения профильной заготовки и даны рекомендации построения формы заготовки. Изучено распределение радиальных, тангенциальных и касательных напряжений по внутреннему контуру фланца в зависимости от степени вытяжки и плоскостной анизотропии материала.

4. Исследован процесс обжима цилиндрических заготовок из анизотропного материала конической матрицей. Установлено влияние коэффициента анизотропии на распределение напряжений, усилие, утолщение края заготовки и предельную степень процесса.

5. В результате изучения процесса водочения анизотропной полосы через гладкую и шероховатую клиновую матрицу выявлено влияние анизотропии, угла матрицы и условий трения на силовые и деформационные параметры процесса.

6. Решена осесимметричная задача о прессовании круглого прутка из материала с цилиндрической анизотропией через коническую матрицу. Приводятся результаты расчета удельного усилия процесса и давления на матрицу.

7. Результаты теоретических исследований процессов вытяжки и волочения подтверждены экспериментально. Рекомендованная форма профильной заготовки и установленная зависимость предельной степени вытяжки от характеристик анизотропии привели к существенной экономии материала, совершенствованию технологического процесса и улучшению качества изделий. Результаты исследований использованы для совершенствования некоторых технологических процессов, в том числе массового производства деталей типа "стакан".

8. Для учета влияния вида напряженного состояния на расчетные параметры технологических процессов обработки металлов давлением обобщена теория течения анизотропного тела Мизеса - Хилла. Сформулированы условие текучести и соотношения между напряжениями и скоростями деформаций. Показано удовлетворительное согласование обобщенного условия текучести с известными экспериментальными данными. Получены основные зависимости, позволяющие анализировать процессы обработки давлением, осуществляемые в условиях плоского напряженного и плоского деформированного состояния. Приведенные зависимости использованы для анализа пластического течения фланца заготовки из трансверсально

изотропного материала при вытяжке цилиндрических изделий. Выявлено количественное влияние вида напряженного состояния на предельную степень вытяжки.

9. Для учета влияния анизотропии и неоднородности материала на процессы обработки металлов давлением построена теория пластического течения анизотропного тела с монофункциональной неоднородностью. Получены необходимые соотношения для определения напряжений и скоростей при пластическом течении в условиях плоского напряженного и плоского деформированного состояния. Предложены различные варианты метода последовательных приближений для решения технологических задач вытяжки, прессования и внедрения жесткого штампа в среду.

10. При анализе процесса вытяжки анизотропного и неоднородного материала установлено влияние коэффициента анизотропии и функции неоднородности на предельную степень вытяжки. Показаны пути использования анизотропии и неоднородности материала для интенсификации этого процесса.

11. Проведен анализ внедрения жесткого гладкого штампа в полупространство с анизотропными неоднородными свойствами. Установлено влияние функции неоднородности и характеристики анизотропии на силовые параметры процесса, распределение давлений под штампом и протяженность пластической области.

12. Изучен процесс прессования полосы из анизотропного неоднородного материала. Рассмотрена методика получения верхней и нижней оценки усилия процесса. Установлено влияние степени деформации, характеристики анизотропии и функции неоднородности на силовые и деформационные параметры процесса. Отмечена возможность учета изотропного упрочнения материала.

Даны рекомендации по использованию результатов исследований для получения изделий с более однородными свойствами по сечению.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Об учете исходной анизотропии листа при глубокой вытяжке. - "Кузнечно-штамповочное производство", 1968, № 1.
2. О фестонообразовании при комбинированной вытяжке. - "Кузнечно-штамповочное производство", 1968, № 7.
3. О возможности устранения фестонов при вытяжке анизотропного материала. - "Кузнечно-штамповочное производство", 1968, № 11.
4. Плоское напряженное состояние анизотропного неоднородного тела. - "Инженерный журнал. Механика твердого тела", 1969, № 4.
5. Плоское напряженное состояние анизотропного тела. - "Прикладная механика". Т. III. Вып. 2. 1967.
6. Экспериментальная проверка уравнений пластического течения для анизотропного тела. - "Прикладная механика". Вып. 2, 1968.
7. О течении фланца заготовки при вытяжке цилиндрического стакана из анизотропного материала. - "Прикладная механика". Т. IV. Вып. 4. 1969.

8. Плоская деформация со слабой пластической анизотропией. - "Прикладная механика". Т.У. Вып.8. 1969.
9. Плоское пластическое течение анизотропного материала. "Прикладная механика". Т.У. Вып.11. 1969.
10. К вопросу о плоской деформации анизотропного тела. - "Прикладная механика". Т.У1. Вып.4. 1970.
11. Пластическое течение ортотропных тел. - "Прикладная механика". Т.УП. Вып.6. 1971.
12. К вопросу о вытяжке материала с плоскостной анизотропией. - "Прикладная механика". Т.УП. Вып.9. 1971.
13. О влиянии анизотропии на предельную степень вытяжки. - "Известия вузов. Машиностроение", 1968, № 2.
14. Волочение анизотропной полосы. - "Известия вузов. Машиностроение", 1968, № 2.
15. О формулировке условия текучести и ассоциированного закона течения анизотропного тела. - "Известия вузов. Машиностроение", 1969, № 7.
16. Влияние анизотропии на процесс волочения полосы. - "Известия вузов. Машиностроение", 1969, № 4.
17. О течении анизотропного материала в коническом канале. - "Известия вузов. Машиностроение", 1969, № 9.
18. Влияние анизотропии на процесс обжима цилиндрических заготовок в конических матрицах. - "Известия вузов. Машиностроение", 1971, № 10.
19. Прессование круглого прутка из анизотропного материала. - "Известия вузов. Черная металлургия", 1971, № 11.
20. Глубокая вытяжка по комбинированной схеме. - "Кузнечно-штамповочное производство", 1966, № 2.

21. Комбинированная вытяжка тонколистового материала. - "Кузнечно-штамповочное производство", 1966, № 12.

22. О пластическом течении фланца заготовки при вытяжке цилиндрического стакана. - "Прикладная механика". Т.Ш. Вып.3. 1967.

23. Об оценке анизотропии механических свойств листовых материалов. - В сб.: Технология машиностроения. Вып. I. Тула, Приокское книжное издательство, 1967.

24. О начальном течении фланца заготовки при вытяжке анизотропного материала. - В сб.: Технология машиностроения. Вып. I. Тула, Приокское книжное издательство, 1967.

25. Изменение толщины края заготовки при вытяжке анизотропного материала. - В сб.: Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула, Приокское книжное издательство, 1968.

26. Вытяжка анизотропного материала. - В сб.: Технология машиностроения. Вып. 5. Тула, Приокское книжное издательство, 1968.

27. О влиянии толщины заготовки и геометрии инструмента на фестонообразование при вытяжке. - В сб.: Технология машиностроения. Вып. 5. Тула, Приокское книжное издательство, 1968.

28. Решение плоской задачи анизотропного тела методом малого параметра. - В сб.: Технология машиностроения. Вып. 5. Тула, Приокское книжное издательство, 1968.

29. Влияние анизотропии на усилие волочения полосы. - В сб.: Технология машиностроения. Вып. 5. Тула, Приокское книжное издательство, 1968.

30. Влияние режимов прокатки и термической обработки листового материала на анизотропию механических свойств. - В сб.: Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула, Приокское книжное издательство, 1968.

31. О формулировке условия пластичности и ассоциированного закона течения. - В сб.: Технология машиностроения. Вып.5. Тула, Приокское книжное издательство, 1968.

32. Об осесимметричной деформации изотропного тела. - В сб.: Труды преподавателей и слушателей университета научно-технических знаний. Вып.IV. Тула, Издательство Тульского политехнического института, 1970.

33. К вопросу о кривых упрочнения анизотропных материалов. - В сб.: Технология машиностроения. Вып.9. Тула, Издательство Тульского политехнического института, 1970.

34. Прессование анизотропной неоднородной полосы с упрочнением. - В сб.: Труды преподавателей и слушателей университета научно-технических знаний. Вып.VIII. Тула, Приокское книжное издательство, 1971.

35. Волочение анизотропного материала. - В сб.: Обработка металлов давлением. Тула, Издательство Тульского политехнического института, 1971.

36. Некоторые вопросы теории анизотропных неоднородных тел. - В сб.: Обработка металлов давлением. Тула, Издательство Тульского политехнического института, 1971.

37. О влиянии анизотропии и неоднородности на предельную степень вытяжки. - В сб.: Обработка металлов давлением. Тула, Издательство Тульского политехнического института, 1971.

38. Внедрение жесткого штампа в анизотропное неоднородное полупространство. - В сб. Обработка металлов давлением. Тула, Издательство Тульского политехнического института, 1971.

39. Плоское напряженное состояние анизотропного тела при условии текучести, зависящем от вида напряженного состояния. - В сб.: Технология машиностроения. Вып. 15. Тула, Издательство Тульского политехнического института, 1971.

40. О влиянии вида напряженного состояния на предельную степень вытяжки анизотропного материала. - В сб.: Технология машиностроения. Вып. 15. Тула, Издательство Тульского политехнического института, 1971.