

М 389167

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

МОСКОВСКОЕ

ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

АРЫШЕНСКИЙ Юрий Михайлович

На правах рукописи

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ЗА СЧЕТ
НАПРАВЛЕННОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

05.03.05 - Процессы и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Москва-1981

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

МОСКОВСКОЕ

ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

АРЫШЕНСКИЙ Юрий Михайлович

На правах рукописи

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ЗА СЧЕТ
НАПРАВЛЕННОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

05.03.05 - Технология и машины обработки давлением

1389167

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

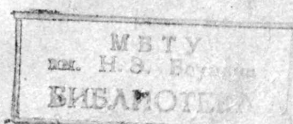
Москва-1981

НТБ МВТУ им. Н.Э. Баумана



1389167

Арышенский Ю. М. Интенсифик



Работа выполнена в Куйбышевском ордена Трудового Красного Знамени авиационном институте им. Академика С.П.Королева.

Официальные оппоненты

Доктор технических наук профессор Матвеев А.Д.
доктор технических наук профессор Яковлев С.П.
доктор технических наук профессор Головлев В.Д.

Ведущее предприятие указано в решении специализированного совета

Защита диссертации состоится " " _____ 198 г.
на заседании специализированного Совета Д053.15.05 при
Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени
Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская, 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим
выслать по указанному адресу.

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

Автореферат разослан " " _____ 1981 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Быков Быков Ю.А.

Л. 86493 — Подп. к печати 16.11.81г. Объем 2 п.л.

Тираж 100 экз. Зак. 1544 Ротапринт МВТУ им. Н.Э.Баумана

І. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

І.І. Актуальность темы

Полуфабрикаты из большинства металлов и сплавов обладают явно выраженной анизотропией механических свойств. Следует глубоко изучить эту специфическую особенность материала, чтобы рационально использовать ее положительные стороны.

Применение материалов с заранее заданной анизотропией, в совокупности с достаточным уровнем прочностных и пластических свойств, позволит получить большой народнохозяйственный эффект за счет дальнейшей интенсификации процессов обработки, повышения качества и эксплуатационной надежности деталей.

Учет же анизотропии в технологических расчетах позволит более реально оценивать поведение металла в процессах листовой штамповки.

І.2. Цель работы

На основе разработанного варианта технической теории пластичности ортотропных сред показать пути решения комплексной проблемы, связанной с анизотропией металла. Так, анализ основных операций листовой штамповки, с точки зрения предельных возможностей материала и, более глубокое изучение — гибки и обтяжки, позволит установить степень влияния анизотропии на процессы и тот ее вид, который следует иметь в применяемых полуфабрикатах. Кроме того, на примере алюминиевых сплавов показать, как можно регулировать анизотропию в листах.

І.3. Научная новизна

Впервые рассмотрена проблема анизотропии материала как комплексная. Предложен вариант теории пластичности ортотропных сред, уравнения которого отражают структуру функциональных связей напряженно-деформированного состояния с механическими свойствами материала. Получено простое представление материального дивизора, которое позволило выявить параметры, от которых зависит анизотропия и установить дополнительные связи между коэффициентами поперечной деформации. Изложены особенности применения основных инженерных методов в обработке давлением при ортотропных средах. Дана методика определения всех необходимых технологиче-

ских параметров гибки и обтяжки при учете анизотропии. Анализ операции простой обтяжки проведен на основе нового для теории ОМД метода возмущений, который позволил решить контактную задачу. При рассмотрении процессов большое внимание уделено вопросам предельного формоизменения, пружинения металла и их контроля, т.е. тем вопросам, которые изучены еще недостаточно полно. Исследование влияния анизотропии на предельные возможности основных операций листовой штамповки выявило характер анизотропии, позволяющей интенсифицировать процессы, повысить качество деталей и уменьшить расход материала. Разработанная структура материального девиатора позволила показать пути регулирования анизотропии.

1.4. Практическая ценность.

Все теоретические соотношения доведены до уровня, необходимого для решения инженерных задач. Разработанная методика определения технологических параметров операций гибки и обтяжки может быть использована при проектировании указанных процессов. Проведенные исследования по регулированию анизотропии позволили получить алюминиевые листы с необходимыми свойствами.

1.5. Реализация работы в промышленности.

Результаты работы внедрены на ряде предприятий авиационной промышленности. К диссертации приложены документы о внедрении, где указан экономический эффект на 1.333.400 рублей.

1.6. Публикации.

Основное содержание работы опубликовано в монографии, 5 учебных пособиях и 47 научных статьях. Сделаны доклады на 16 научно-технических конференциях и семинарах.

1.7 Объем работы.

Диссертация изложена на 352 страницах машинописного текста, включая 15 таблиц и 110 рисунков. Она содержит введение, 9 глав, список использованной литературы, 163 наименований и приложение.

2. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что одно из направлений развития листовой штамповки связано с более полным изучением и использованием особенностей обрабатываемого материала. Это позволяет интенсифицировать процессы обработки, повысить качество и эксплуатационную надежность деталей, уменьшить расход металла. Значение этого направления особенно возросло в последнее время, так как оно отвечает задачам партии и правительства, поставленным на II-ю пятилетку.

Одной из особенностей материала, позволяющая в широком диапазоне регулировать штампуемость, является анизотропия механических свойств, — фундаментальная характеристика вещества. Проблема направленного использования анизотропии с достаточным уровнем прочностных и пластических свойств является комплексной, так как требует решения ряда задач. Во-первых необходимо установить степень влияния анизотропии в различных операциях ОМД, в том числе и листовой штамповки. Во-вторых разработать теоретические положения, позволяющие учитывать ее при расчете технологических параметров процессов. В третьих, следует глубже понять, а какую же анизотропию необходимо иметь в штампуемом полуфабрикате. И, наконец, что является наиболее сложным и исключительно важным, показать пути получения в материалах установленной анизотропии. Решению этой комплексной проблемы и посвящена диссертация.

3. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ АНИЗОТРОПИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В начале главы рассмотрена природа и виды анизотропии металлов и сплавов. Отмечено, что металлические полуфабрикаты, полученные прокаткой и прессованием обладают ортогональной анизотропией или являются трансверсально изотропными телами. На примере работ советских и зарубежных ученых показано влияние анизотропии механических свойств на процессы обработки и эксплуатационные возможности деталей. Был сделан вывод о том, что анизотропия материала, при правильном ее использовании, является серьезным резервом интенсификации процессов изготовления деталей и повышения их эксплуатационной надежности. Далее проведен

анализ технических показателей анизотропии. Отмечено, что коэффициенты поперечной деформации довольно полно отвечает современным требованиям, поэтому они и приняты в диссертации. Изучено состояние теории пластичности анизотропных сред. Показано, что в их основе, как правило, лежит условие текучести Р. Мизеса. Наибольшее применение имеет теория Р. Хилла, которая широко используется в практике. Однако она носит частный характер и имеет свои ограничения. В связи с этим, были сделаны попытки отдельных улучшений теории Р. Хилла. Приводятся работы В.Д. Головлева, В.С. Смирнова и Г.С. Казакевича. Сделан вывод о необходимости дальнейшего углубления теории, чтобы на ее основе можно было бы решить комплексно проблему анизотропии металла.

Затем рассмотрены работы, проведенные в области листовой штамповки ортотропных сред. Отмечено, что вопросы, связанные со штамповкой анизотропных материалов нашли свое отражение в учебниках, учебных пособиях, монографиях и многочисленных статьях советских и зарубежных ученых. К ним относятся работы Р. Хилла, А.Д. Томленова, В.Д. Головлева, В.В. Шевелева, С.П. Яковлева, И.П. Ренне, Н.И. Малинина, Ф.И. Рузанова, Г.С. Казакевича, А.А. Ширшова, Н.М. Матченко, А.Т. Овчинникова, А.Д. Матвеева, В. Бэкофана, У. Джонсона, П. Меллора и др. В Советском Союзе вопросами пластического формоизменения анизотропных сред длительное время занимаются ученые Москвы, Тулы, Ленинграда, где созданы свои научные школы. С 1961 года такие исследования проводятся и в Куйбышевском авиационном институте. Однако, несмотря на большое число работ не все вопросы, посвященные листовой штамповке, нашли свое достаточное отражение. Показано, что основное внимание уделено исследованию цилиндрической и сложной вытяжки. Здесь изучены вопросы фестонообразования, рациональной формы заготовки, предельных возможностей процессов. В то же время, связанных с анализом операций гибки и обтяжки анизотропных листов значительно меньше и они, как правило, не связаны конкретно с определением технологических параметров. Кроме того, расчеты проводились на основе известных инженерных методов. Однако самим методам и особенностям их применения при анизотропных средах, практически, не уделено внимание.

Глава заканчивается изучением состояния вопроса об регулировании анизотропии и постановкой задачи дальнейших исследований.

Обзор показал, что еще не создано теории, на основании которой можно было бы сознательно управлять процессом регулирования анизотропии. Кроме того, отсутствуют комплексные исследования по многим сплавам, в том числе и алюминиевым, которые позволили бы экспериментально выработать рекомендации по получению листов с заданной анизотропией.

Выбор направления исследования отражает комплексность проблемы анизотропии с более подробным изучением в качестве технологических процессов штамповки, процессов гибки и обтяжки.

3. ОТДЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ОРТОТРОПНЫХ СРЕД И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Для успешного решения поставленных задач, связанных с анизотропией металлов, необходимо было создать общую теоретическую основу. Другими словами разработать такой вариант теории пластичности, который сумел бы охватить все стороны проблемы. Это вызвано тем, что существующие технические теории пластичности ортотропных сред, в том числе и наиболее распространенная из них — теория Р. Хилла, не полностью удовлетворяют этому требованию. Предложенный вариант теории отвечает современным требованиям и отражает структуру функциональных связей напряженно-деформированного состояния с механическими свойствами материала.

В основе лежит условие текучести Р. Мизеса

$$\sigma_{ij}^2 = k_{ijkl} \sigma^{ij} \sigma^{kl} = k_{ijkl} \tau^{ij} \tau^{kl} = \text{const},$$

где

σ^{ij}, τ^{ij} — тензор и девиатор напряжений, а k_{ijkl} — симметричный самосопряженный девиатор 4-го ранга. Согласно ассоциированного закона течения

$$de_{ij} = \frac{k_{ijkl} \sigma^{kl}}{\sigma_u} dq,$$

где

$$q = \int \sqrt{a^{ijkl} de_{ij} de_{kl}}, \quad a^{ijkl} k_{rs} = T^{ijkl}, \quad a$$

$$T_{ijk}^{\ell} = \frac{1}{2} (\delta^{ik} \delta^{j\ell} + \delta^{i\ell} \delta^{jk}) - \frac{1}{3} \delta^{ij} \delta^{k\ell} -$$

девиаторная единица.

Анализ структуры материальных девиаторов показал, что при допущенных, в основном связанных с третьим инвариантом тензорной меры воздействия, может быть использовано представление

$$k_{ijk\ell} = t_0 (T_{ijk\ell} + k \lambda_{ij} \lambda_{k\ell}),$$

$$a_{ijk\ell} = t_0^{-1} (T_{ijk\ell} + a \lambda_{ij} \lambda_{k\ell}).$$

Здесь

$$\lambda_{ij} = \frac{e_{ij}}{e_0}, \quad e_0^2 = e_{23}^2 e_{13}^2, \quad (1+k)(1+a)=1,$$

где k, a — скалярные функционалы процесса,

t_0 — произвольный множитель.

Из выражений $k_{ijk\ell}$, записанных в главных осях анизотропии, получены следующие связи между показателями анизотропии

$$\frac{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) \frac{1+\mu_1}{1-\mu_1} + \frac{3 \left(\frac{1}{\mu_{12} \mu_{21}} - 1 \right) (1-\mu_1)}{\left(\frac{1}{\mu_{12}} + \frac{1}{\mu_{21}} - 2 \right) (1+\mu_1)}}{\frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 1} = 1$$

$$\left(\frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) \frac{1+\mu_1}{1-\mu_1} = \frac{1}{\mu_{21}} \frac{1+\mu_2}{1-\mu_2} = \frac{1}{\mu_{12}} \frac{1+\mu_3}{1-\mu_3}$$

Здесь $\mu_{ij} = - \frac{K_{ijij}}{K_{iiii}}$ — коэффициенты поперечной деформации, где первый индекс показывает направление сжатия при действии растягивающей силы по направлению второго индекса; μ_1 — коэффициент, когда сила направлена вдоль образца, вырезанного под углом 45° к осям 1 и 2; μ_2 — к осям 2 и 3. μ_3 — к осям 3 и 1. Отмечено, что как экспериментальная проверка автора, так и расчеты по данным, опубликованным в литературе, показав

ли, что полученные соотношения выполняются удовлетворительно и могут применяться в практике. Для использования результатов прямых механических испытаний было введено понятие интенсивности, отнесенной к главным осям анизотропии (1,2,3). Например,

$$\sigma_{i_1} = \sqrt{\mu_{21}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \left(\frac{1}{\mu_{12}} - 1\right)(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + \left(\frac{1}{\mu_{21}} - 1\right)(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + \frac{1}{\mu_{21}} \frac{1 + \mu_2}{1 - \mu_2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)} ,$$

$$e_{i_1} = \sqrt{\frac{\mu_{12}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}} \left(\frac{e_{11}^2}{\mu_{12}} + 2 e_{11} e_{22} + \frac{e_{22}^2}{\mu_{21}} \right) + \frac{4(1 - \mu_2)}{1 + \mu_2} (e_{12}^2 + e_{23}^2 + e_{31}^2)$$

Причем

$$\sigma_{i_2} = \sqrt{\frac{\mu_{12}}{\mu_{21}}} \sigma_{i_1} , \quad \sigma_{i_3} = \sqrt{\frac{\mu_{13}}{\mu_{31}}} \sigma_{i_1} , \quad \sigma_{i_5} = \sqrt{\frac{\mu_{23}}{\mu_{32}}} \sigma_{i_3}$$

$$e_{i_2} = \sqrt{\frac{\mu_{21}}{\mu_{12}}} e_{i_1} , \quad e_{i_5} = \sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}}} e_{i_1} , \quad e_{i_3} = \sqrt{\frac{\mu_{32}}{\mu_{23}}} e_{i_2}$$

Таким образом

$$\sigma_{i_1} e_{i_1} = \sigma_{i_2} e_{i_2} = \sigma_{i_3} e_{i_3}$$

Кроме того

$$\mu_{12} + \mu_{32} = 1 , \quad \mu_{13} + \mu_{23} = 1 , \quad \mu_{31} + \mu_{21} = 1$$

Отсюда

$$\mu_{12} \mu_{23} \mu_{31} = \mu_{32} \mu_{21} \mu_{13}$$

$$\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}} = 1 - 2\mu_{21} + \frac{\mu_{21}}{\mu_{12}} , \quad \frac{\mu_{32}}{\mu_{23}} = 1 - 2\mu_{12} + \frac{\mu_{12}}{\mu_{21}}$$

Полученные соотношения показывают, что экспериментально необходимо определить только два коэффициента поперечной деформации, а не пять как по теории Р. Хилла и построить кривую упрочения в одном из главных направлений. Так как в практике довольно часто используют показатели типа $\eta = d\varepsilon_2/d\varepsilon_3$,

то приведены формулы пересчета одних показателей в другие

$$\tau_{21} = \frac{\mu_{21}}{1 - \mu_{21}}, \quad \tau_{30} = \frac{\mu_{12}}{1 - \mu_{12}}, \quad \mu_{21} = \frac{\tau_{20}}{1 + \tau_{21}} \quad \text{и т.д.}$$

В заключении отмечено, что теория прошла экспериментальную проверку. Рассмотренный вариант теории отличается простой компактной формой записи основных соотношений. Полученная структура материальных девиаторов позволила уменьшить число определяемых констант и перевести все испытания для их определения в плоскость листа. Кроме того, из нее видно от чего зависит анизотропия и в каком направлении следует искать пути ее регулирования.

Затем рассмотрены особенности применения частных видов напряженно-деформированного состояния при ортотропных средах. Так, показано, что при допущении о осесимметричности, задача распадается на две — по деформациям и напряжениям, а условие $b_1 > b_2 > b_3$ позволяет свести рассмотрение плоских задач к одному варианту (в общем случае их три). При этом основные уравнения принимают вид:

— плоская деформация

$$b_{11} = \sqrt{(1 - \mu_{21} \mu_{12})(b_{11} + b_{33})^2 + \frac{1 + \mu_{12}}{1 - \mu_{12}} b_{31}^2},$$

$$e_{11} = \sqrt{\frac{1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} e_{11}^2 + 4 \frac{1 - \mu_{12}}{1 + \mu_{12}} e_{21}^2}$$

— плоское напряженное состояние

$$b_{11} = \sqrt{b_{11}^2 - 2 \mu_{21} b_{11} b_{22} + \frac{\mu_{21}}{\mu_{12}} b_{22}^2 + \frac{1 + \mu_{12}}{1 - \mu_{12}} b_{12}^2},$$

$$b_{11} = \frac{\mu_{12}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} \frac{b_{11}}{e_{11}} \left(\frac{e_{11}}{\mu_{12}} + e_{22} \right),$$

$$b_{22} = \frac{\mu_{12}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} \frac{b_{11}}{e_{11}} \left(\frac{e_{22}}{\mu_{12}} + e_{11} \right)$$

$$b_{12} = 2 \frac{1 - \mu_{12}}{1 + \mu_{12}} \frac{b_{11}}{e_{11}} e_{12}$$

Анализ инженерных методов, применяемых в ОМД, позволил предложить способы использования известных методик и при ортотропном материале. Например, для метода возмущений (малого параметра) основные уравнения представлены в виде

$$\tau_1^2 + \tau_3^2 = 1, \quad \tau_3 \bar{e}_1 = \tau_1 \bar{e}_3$$

здесь

$$\tau_3 = \bar{\sigma}_{13}, \quad \bar{\epsilon}_3 = \dot{\epsilon}_{13}, \quad \tau_1 = \frac{\bar{\sigma}_{11} - \bar{\sigma}_{33}}{K_0}, \quad \bar{\epsilon}_1 = K_0 \dot{\epsilon}_{11},$$

где $K_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1+\mu_2}{(1-\mu_2)(1-\mu_{12}\mu_{21})}}$ — коэффициент, учитывающий анизотропию. Такая запись позволяет использовать готовые разложения Ивлева-Ершова, предложенные для изотропной среды. Приближенная форма условия пластичности, представленная через разность двух главных напряжений, имеет традиционный вид

$$\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3 = \beta_1 \bar{\sigma}_{11} (\bar{\sigma}_{31})$$

Однако, здесь

$$\beta_1 = \frac{2\sqrt{\frac{\mu_{12}}{\mu_{21}}}}{\sqrt{U_0^2 + 2DU_0 + C}}, \quad (C = 1 - 4\mu_{12} + 4\frac{\mu_{12}}{\mu_{21}}),$$

$D = 2\mu_{12} - 1$) учитывает и анизотропию материала. В работе также показано, что применение метода СЦМ и вариационных методов не вызывает при ортотропной среде дополнительных принципиальных трудностей. Следует только в соответствующих уравнениях учесть анизотропию.

4. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УЧЕТА АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА В РАСЧЕТАХ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Для рационального ведения конкретного процесса ОМД следует согласовывать схему напряженно-деформированного состояния с направленностью свойств материала. При построении функциональных зависимостей и поверхностей текучести необходимо учитывать тот факт, что каждому направлению присущи свои показатели анизотропии. Так при использовании схемы плоского напряженного состояния ($\bar{\sigma}_{33} = 0$) материал характеризуется следующими показателями μ_{21} , μ_1 , μ_{12} , K_{3333} , K_{112}

$$\bar{\sigma}_{13} = \bar{\sigma}_{33} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2}} \sqrt{\frac{\bar{\sigma}_1^2}{\mu_{12}} - 2\bar{\sigma}_1\bar{\sigma}_2 + \frac{\bar{\sigma}_2^2}{\mu_{12}}},$$

$$\tau_{12} = \bar{\sigma}_{33} \sqrt{\frac{1-\mu_1}{1-\mu_2}}$$

В связи с этим, чтобы правильно согласовать схему напряженного состояния со свойствами среды необходимо рассматривать отношение σ_1/σ_{33} , а не σ_1/σ_{31} , как это обычно делают. Поверхность текучести также рациональнее строить относительно σ_{33} . В диссертации приведены графики $\frac{\sigma_1}{\sigma_{33}} = f(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \mu)$ и $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = f(\frac{\sigma_3}{\sigma_1}, \mu)$ по которым можно судить о влиянии анизотропии на утонение и напряженность листа. Для учета упрочнения металла при листовой штамповке был рассмотрен вариант, когда функция $\sigma_i = \varphi(e_i)$ выражается через наибольшие из главных напряжений и деформаций. При этом степенная функция представлена в виде

$$\sigma_i = K_n e_i^n,$$

где

$$K_n = \frac{K_1 \left[\frac{\mu_{12}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} \left(\frac{1}{\mu_2} + 2\alpha_1 + \frac{\alpha_1^2}{\mu_{21}} \right) \right]^{\frac{n}{2}}}{\mu_{21}^{0.5} \left[(1 - m_1)^2 + \left(\frac{1}{\mu_{12}} - 1 \right) (m_1 - m_2)^2 + \left(\frac{1}{\mu_{21}} - 1 \right) (m_2 - 1) \right]^{0.5}}$$

Здесь

$$m_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad m_2 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}, \quad \alpha_1 = e_2/e_1.$$

В работе приведены значения K_n для частных случаев напряженно-деформированного состояния. Из формулы и приведенного в диссертации графика видно, что анизотропия оказывает существенное влияние на величину K_n , что не позволяет в общем случае применять, как при изотропной среде, его осредненное значение. В качестве примера рассмотрено определение приведенного коэффициента при обтяжке с растяжением. Исследование проводилось на титановых заготовках, на поверхность которых фотоконтактным способом была нанесена сетка. Деформирование на пуансонах различной кривизны показало, что отношение напряжений m_1 , обычно при обтяжке с растяжением не превышает величины 0,15, а $\frac{K_n}{K_1} \leq 1,11$. Это говорит о том, что здесь осреднение K_n допустимо, особенно при расчете силовых параметров.

5. ГИБКА ШИРОКИХ ЛИСТОВ

В начале главы был проведен анализ характера распределения напряжений при гибке моментом широких листов и получены расчетные формулы

$$\sigma_p = \frac{K'_\theta}{n+1} \left(\ln \frac{p}{\sqrt{R_2}} \right)^{n+1} - \frac{K'_\theta}{n+1} \left(\ln \sqrt{\frac{R}{2}} \right)^{n+1}$$

$$\sigma_\theta = K'_\theta \left(\ln \frac{p}{\sqrt{R_2}} \right)^n \left(1 + \frac{1}{n+1} \ln \frac{p}{\sqrt{R_2}} \right) - \frac{K'_\theta}{n+1} \left(\ln \sqrt{\frac{R}{2}} \right)^{n+1}$$

Здесь $K'_\theta = K_\theta / (1 - \mu_{12} \mu_{21})^{0.5(n+1)}$, r — внутренний, а R — наружный радиусы, n — степень упрочнения, которая независимо от величины принята нечетным числом.

При выводе формул показано, что анизотропия не влияет на положение нейтрального слоя. Затем рассмотрено изменение эпюр напряжений и деформаций при приложении растягивающего усилия и показаны общность процессов, связанных с гибкой. Формулы для определения величины изгибающего момента выведены с учетом и без учета радиальных напряжений. Их сравнение показало, что при $\frac{r}{R} > 2$ влиянием радиальных напряжений можно пренебречь. Затем формула изгибающего момента (на единицу ширины)

$$M_{\text{из}} = \frac{K'_\theta S^2}{2^{n+1} (n+2) \left(\frac{r}{R} \right)^n}$$

была использована для расчета усилия при гибке заготовок эластичной средой и величины упругой отдачи материала. В частности, приращение углагиба может быть подсчитано по формуле

$$\Delta \alpha = \frac{3 K'_\theta (1 - \nu_{12} \nu_{21})}{E_1 (n+2)} \left(\frac{2r}{S} + 1 \right)^{1-n} \alpha,$$

где $\frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}$ — приведенный модуль упругости.

Большое внимание в диссертации уделено вопросам, связанным с предельными возможностями материала при гибке. Анализ структуры физических уравнений ортотропной среды на базе теории инвариантов позволил установить влияние анизотропии на диаграммы пластичности. Это дало возможность получить расчетную формулу для определения минимально-допустимого радиусагиба

$$\frac{r_{\text{min}}}{S} = \frac{1 - 0.5(1 - \psi_\omega)^2}{(1 - \psi_\omega)^2 - 1},$$

где

$$t = -2\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}} \exp \frac{-0.72(1-\mu_{12})}{+1-\mu_{12}\mu_{21}}$$

Сравнение расчетных данных по сдвигу и предельным возможностям при гибке с практическими данными, приведенными в литературе, подтвердило достоверность полученных формул. В качестве практического примера использования выведенных соотношений показан расчет варианта технологического процесса изготовления детали авиадвигателя из толстолистового ($S = 8\text{ мм}$) титанового сплава ОТЧ-2. Именно учет анизотропии позволил установить причины заводского брака и показать каким образом следует изменить технологию, чтобы его избежать.

6. ПРОСТАЯ (ПОПЕРЕЧНАЯ) ОБТЯЖКА ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

Теоретический анализ процесса обтяжки основан на контактной задаче теории оболочек, где нельзя пренебрегать даже малыми сдвиговыми напряжениями и деформациями без оценки их влияния на характер процесса. Для исследования таких величин предложен метод возмущений. В данном случае в качестве малого параметра использована относительная кривизна $\bar{b} = \frac{S}{R}$, по которому разложены основные уравнения и граничные условия. Отмечено, что задача простой обтяжки решалась исходя из соотношений теории течения. Однако метод возмущений показал, что с асимптотической погрешностью $\bar{b}^2$ для вычисления накопленной деформации можно использовать конечные деформации. Таким образом для нулевого и первого приближений справедлива деформационная теория пластичности. С указанной точностью получены выражения деформаций и единичных усилий. Характерно, что в ходе вывода, без построения специальных моделей, решился вопрос о предельно-допустимой деформации, которая ограничена равномерным удлинением $\bar{b}_p$. Таким образом, уравнения метода возмущений отражают процесс локальной потери устойчивости при предельном деформировании. Усилие обтяжки вычислялось простым интегрированием единичного усилия по крайнему поперечному сечению.

$$P = \frac{\bar{b}_{p0} F_0}{(1-\mu_{12}\mu_{21})^{0.5(1+n)}}$$

где F_0 — площадь поперечного сечения листа до растяжения.

Изменение кривизны оболочки в продольном направлении, как

функции угла, определялось из условия равенства нулю суммарного изгибающего момента в произвольном поперечном сечении. Величина отклонения от заданной формы находилась по значению приращения кривизны из дифференциального уравнения изгиба профилированной балки. Получена следующая расчетная формула

$$\frac{W}{R_1} = \frac{E_p^s}{E_s^s} [1 - e^{-\bar{\mu} \alpha} (\cos \alpha + \bar{\mu} \sin \alpha)]$$

Здесь W — величина отклонения обшивки от пуансона, α — переменный угол, отсчитываемый от середины пуансона, $\bar{\mu}$ — коэффициент трения, E_p^s — приведенный модуль пластичности, E_s^s — приведенный модуль упругости. Для облегчения расчета формула представлена в виде номограммы. Таким образом определены все необходимые параметры процесса простой обтяжки.

7. ОБТЯЖКА С РАСТЯЖЕНИЕМ (ПРОДОЛЬНАЯ ОБТЯЖКА) ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Обтяжка с растяжением решалась исходя из нулевого приближения метода возмущений. Отмечено, что она характерна неравномерным распределением деформаций в разных зонах обшивки. Это сказывается при изготовлении деталей на увеличении числа переходов, а при эксплуатации — на уменьшении их надежности.

В работе предложена форма заготовки, которая исключает отмеченный недостаток. Ширина такой заготовки в зоне контакта определяется уравнением

$$B = B_0 e^{\bar{\mu} (1 + m_{1cp} \frac{R_1}{R_2}) \theta}$$

где B_0 — ширина заготовки на вершине пуансона при $\theta = 0$. Так как эксперименты показали, что $m_{1cp} \frac{R_1}{R_2} \ll 1$, то можно пользоваться и формулой

$$B \approx B_0 e^{\bar{\mu} \theta}$$

Затем были изучены вопросы, связанные с предельным формоизменением материала при данном процессе. Отмечено, что предельные возможности при обтяжке лимитируются допустимым утонением обшивки. Причем за один переход

$$e_{1cp} = \frac{e_p}{1 + \frac{\mu_{21}(m_1 - \mu_{12})}{\mu_{12}(1 - m_1 \mu_{21})}}$$

или $|E_3|_{кр} = E_p$. здесь $E_p = E_n(1 + \delta_p)$

В практике в качестве расчетного показателя обычно используют коэффициент обтяжки $K_{обт} = 1 + E_{1n}$, где E_{1n} — потребная деформация вдоль действия растяжения. Из формулы и приведенного в диссертации графика $K_{обт} = f(E_3)$ видно заметное влияние анизотропии на коэффициент обтяжки. Однако за один переход не всегда можно принять деформацию E_3 , равную E_p , так как на процесс обтяжки оказывает влияние ряд факторов, которые трудно установить аналитическим путем. Поэтому было проведено исследование на титановых сплавах, которое позволило установить допустимую деформацию за один переход E_1 , деформацию, после которой термообработкой восстанавливаются свойства металла $E_{тер}$ и суммарно-допустимую деформацию за все переходы. Последняя связана с техническими условиями на утонение обшивки. Исследование дало возможность рассчитать число переходов n при обтяжке с растяжением.

$$2 + \frac{E_{1n} - E_1}{E_{тер}} > n \approx 1 + \frac{E_{1n} - E_1}{E_{тер}}$$

Сравнивая E_{1n} с суммарно-допустимой деформацией, можно сделать вывод о возможности изготовления данной детали обтяжкой. Затем, используя теорему о разгрузке А.А. Ильющина, был проведен вывод по определению величины пружинения металла при обтяжке с растяжением. Отмечено, что в строгой постановке эта задача приводит к громоздкой системе дифференциальных уравнений в частных производных. Поэтому для упрощения задачи изменения кривизн были вычислены из условия равенства нулю остаточных моментов. При этом их величина будет в определенной степени завышена, так как случай $M_{1ост}$ и $M_{2ост} = 0$ с необходимостью выполняется на краю обшивки в угловой точке, где разгрузка будет максимальной. Исходя из отмеченного условия получены следующие выражения

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_{1ост}} = \chi_1 = \frac{E_1'}{E_1(1 - \mu_{12}\mu_{21})} \left[\frac{1}{R_1}(1 - \mu_{12}\nu_{21}) + \frac{\mu_{12}}{R_2} \left(1 - \frac{\nu_{21}}{\mu_{21}}\right) \right]$$

$$\chi_2 = \frac{E_2'}{E_2(1 - \mu_{12}\mu_{21})} \left[\frac{1}{R_2}(1 - \mu_{21}\nu_{12}) + \frac{\mu_{21}}{R_1} \left(1 - \frac{\nu_{12}}{\mu_{12}}\right) \right],$$

где E_i' — модули пластичности, а E_i — упругости.

В эти уравнения входят как упругие, так и пластические показатели материала. В технической же литературе полного комплекса их обычно не приводится. Поэтому в работе была поставлена и решена задача об отыскании взаимосвязи показателей в упругой и пластической областях. Было показано, что при допущении об изотропности металлов к всестороннему сжатию (об этом говорят опытные данные различных авторов) такая связь имеет вид

$$\mu_{ij} = \frac{\nu_{ij} + \frac{1}{3}(1 - \nu_{ij} - \nu_{kj})}{1 - \frac{1}{3}(1 - \nu_{ij} - \nu_{kj})} \quad (i \neq j \neq k)$$

Из формулы видно, что для нахождения полного комплекса упругих и пластических коэффициентов достаточно определить экспериментальным путем два значения μ_{ij} (например, μ_{12} и μ_{21}) и одно ν_{ij} , а другие — можно получить расчетным путем. Продолжая вывод по определению величины пружинения при обтяжке, было сделано допущение о том, что в первом приближении можно пренебречь влиянием объемной остаточной деформации на формоизменение детали при снятии нагрузки. Тогда расчетные формулы упрощаются и принимают вид

$$\frac{1}{R_{1осг}} = \left(1 - \frac{E_1'}{E_1}\right) \frac{1}{R_1}, \quad \frac{1}{R_{2осг}} = \left(1 - \frac{E_2'}{E_2}\right)$$

Был проведен также вывод с использованием идеи, изложенной в главе 6. Он позволил получить следующие выражения

$$\chi_1 = \frac{E_{1p}^*}{E_1^*} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{\mu_{12}}{R_2} \right), \quad \chi_2 = \frac{E_{2p}^*}{E_2^*} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{\mu_{21}}{R_1} \right), \quad \text{где } E_{kp}^* = \frac{E_k'}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}$$

$$E_k^* = \frac{E_k}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

Эксперименты автора показывают, что ближе всего к опытным данным оказывался расчет по наиболее простым формулам. Был предложен также расчетный контроль процесса по усилению и деформации, который учитывает и пружинение детали

$$\varepsilon_n = (AB)^{\frac{1}{1-n}}, \quad \frac{p}{F_{Kn}} = (AB)^{\frac{1}{1-n}} [1 - (AB)^{\frac{1}{1-n}}]$$

Здесь ε_n — деформация по наружному волокну,

$A = K_n / E_1$ — учитывает свойства материала,

$B = 1 + \frac{R_1}{W_1} (1 - \cos \alpha)$ — характеризует геометрию детали и допусти-

мое отклонение W , F - площадь поперечного сечения. Для обеспечения технологических расчетов формулы представлены в виде номограммы и предложена программа на БЭСМ-4.

Глава заканчивается экспериментальными исследованиями рассматриваемого процесса. Они проводились в два этапа. Вначале, с целью экономии дорогостоящих титановых сплавов, опыты проводились на смоделированных пуансонах. Затем полученные результаты контролировались на обшивках летательных аппаратов. Экспериментальная проверка адекватности математической модели реальному поведению материала позволяет рекомендовать ее к использованию при проектировании технологического процесса обтяжки с растяжением.

8. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЕРАЦИЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НЕОБХОДИМОЙ АНИЗОТРОПИИ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ПОЛУФАБРИКАТА

Проведен анализ основных операций листовой штамповки (вытяжка, гибка, обтяжка, формовка, деформирование труб) с точки зрения предельных возможностей материала. Цель анализа заключается в установлении благоприятного характера анизотропии (при достаточном уровне механических свойств), который позволил бы интенсифицировать указанные процессы и повысить эксплуатационную надежность деталей. Так, при цилиндрической вытяжке расчет по формуле (она представлена и в виде номограммы) пока-

$$K_{\text{пред}} = \left(\frac{1}{\sqrt{1-\mu_{\text{ср}}}} - \frac{S_0}{2\tau_n + S_0} \right) \frac{1}{\varphi_1 d' \eta} + \varphi_1'$$

зал, что для повышения $K_{\text{пред}}$ необходимы листы с $\mu_{\text{ср}} > 0,5$ (об этом говорят расчеты и по формулам других авторов). В представленном выражении φ_1 и φ_1' - константы материала, α - учитывает анизотропию, а η - трение.

Отмечено, что полуфабрикаты, у которых μ_{11} и $\mu_{12} < 0,5$ более склонны к местному утонению. Это сказывается на эксплуатационной надежности изделий. Поэтому у ответственных деталей приходится удалять часть вытянутой зоны, что приводит к повышенному расходу металла.

Однако, если даже μ_{11} , μ_{12} и $\mu_{12} > 0,5$, то нельзя допускать большой разницы их значений. Иначе появляются фестоны и разнотолщинность по периметру детали. В частности, разнотолщинность сказывается как на дальнейшей обработке детали (при обжа-

тии горловины-овальность), так и на ее эксплуатационной способности (преждевременное старение сопел в местах наибольшего утонения). Все это говорит о том, что для вытяжки необходимы листы с $\mu_{12} \approx \mu_{21} \approx \mu_1 > 0,5$.

При изучении формовки показано, что здесь желательно иметь листы с μ_{11} и $\mu_{12} > 0,5$, так как эта операция осуществляется за счет утонения материала. Причем для общего случая необходимо, чтобы $\mu_{11} \approx \mu_{12} \approx \mu_{12}$. Когда это условие выполнить нельзя, в работе даны рекомендации по расположению рифтов, выдавок и т.д.

Гибка широких листов подробно рассмотрена ранее. Здесь формула для расчета минимально-допустимого радиусагиба представлена в виде номограммы (рис.8.1). Из нее видно, что $r_{\min}^{\frac{1}{S_0}}$

сильно зависит от анизотропии и пластических свойств материала. Чтобы получить минимальный радиусгиба, режимы производства листов должны обеспечить высокие характеристики пластичности и низкие показатели плоскостной анизотропии. Видимо, в общем случае, на производстве удобнее пользоваться листами, у которых μ_{12} примерно равны между собой. Если же по условиям получения листов $\mu_{21} \neq \mu_{12}$, то линиюгиба следует располагать так, чтобы тангенциальные напряжения действовали вдоль направления с меньшим μ_{ij} . Если конструктивно

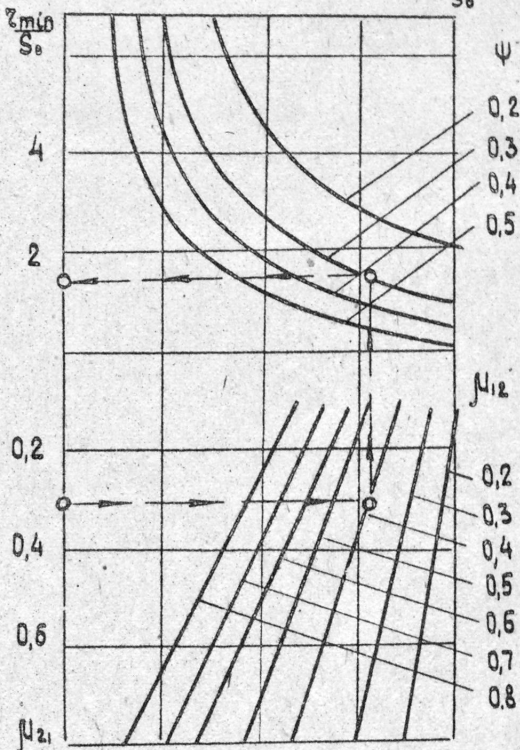


Рис.8.1. Номограмма для расчета минимально допустимого радиусагиба.

заданы различные радиусы, то наименьший из них следует совмещать с линиейгиба, где коэффициент поперечной деформации также наименьший. Гибка криволинейных бортов по характеру напряженно-деформированного состояния соответствует вытяжке или формовке, в зависимости от того, будет ли борт наружный или внутренний. Отсюда следуют и требования к производству листов. Предельные возможности обтяжки хорошо видны на номограмме (рис.8.2).

Из нее следует, что желательно иметь листы, у которых μ_{21} и $\mu_{12} > 0,5$. Подчеркнуто, что если коэффициент поперечной деформации у листа меньше, чем у изотропного тела, то не удастся получить высокое значение $K_{обт}$ несмотря на хорошую пластичность, так как деформация ϵ_3 быстро достигает своего предельного значения. Если $\mu_{21} \neq \mu_{12}$, то заготовку следует ориентировать так, чтобы растягивающее усилие было приложено вдоль направления с наибольшим коэффициентом анизотропии. При рассмотрении процесса деформирования труб отмечено, что их анизотропия по своему характеру близка к

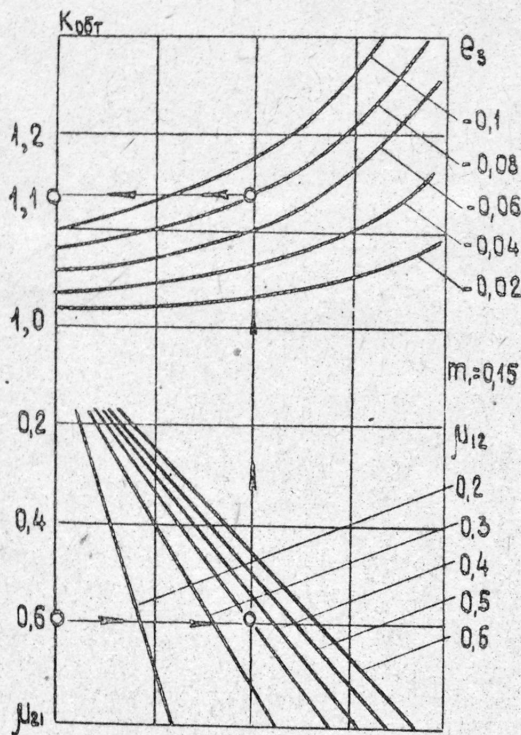


Рис.8.2. Номограмма для расчета предельных возможностей обтяжки

анизотропии листа. Поэтому полученные ранее выводы здесь сохраняют свое значение.

Предельные возможности осесимметричного деформирования труб можно подсчитать по формуле

$$\ln\left(\frac{r_{np}}{r_0}\right) = A(1 - m\mu_{12}) \frac{\mu_{21}}{\mu_{12}} e_p \frac{\exp\left(-B \frac{m+1}{R}\right)}{R}$$

Здесь индекс "1" соответствует оси трубы, а "2" — направлению по окружности; $m = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ — отношение напряжений в опасном сечении;

$$e_p = \ln \frac{1}{1-\psi}, \quad R = \pm \sqrt{m^2 - 2\mu_{21}m + \frac{\mu_{21}}{\mu_{12}}},$$

где положительный знак соответствует обжатию, а отрицательный — раздаче; A и B коэффициенты аппроксимации диаграммы пластичности

$$(e_i)_p = A e_p e^{-B\sigma_i}, \quad \text{где } \sigma_i = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

r_{np}, r_0 — соответственно предельный и начальный радиусы. Формула представлена в виде номограммы (рис. 8.3). Из нее видно, что для увеличения предельных возможностей обжатия, необходимо выполнить условие $\mu_{21} > \mu_{12}$. Для интенсификации процесса раздачи желательно иметь трубы, у которых $\mu_{21} < \mu_{12}$, а их значения должны быть больше 0,5.

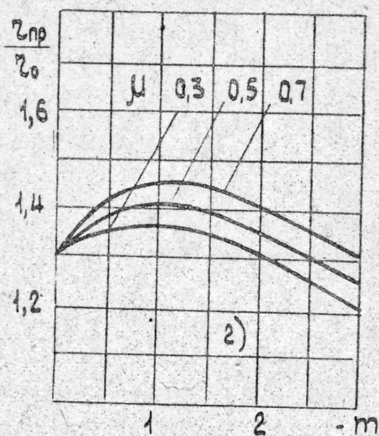
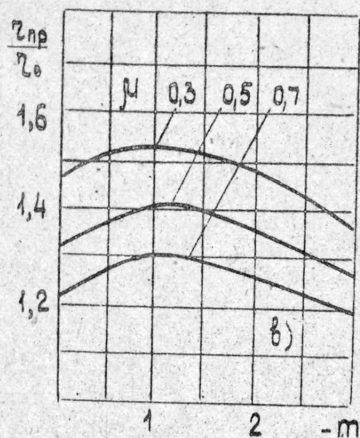
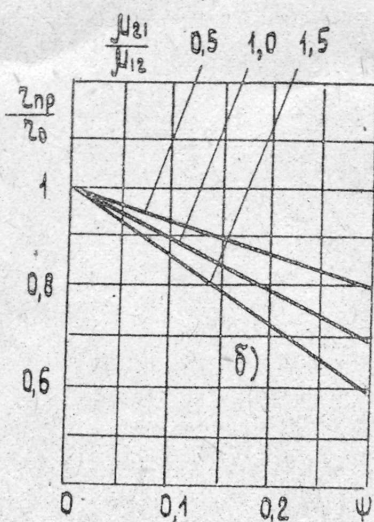
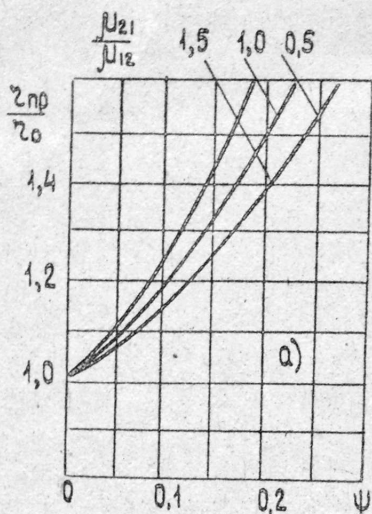
9. РЕГУЛИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ЛИСТАХ

Изучение структуры материальных девиаторов показало, что анизотропия зависит от скаляра k и девиатора λ_{ij} , которые и входят в коэффициенты поперечной деформации

$$\mu_{ij} = - \frac{K_{ijii}}{K_{iiii}} = \frac{1-3k}{2+3k} \frac{\lambda_i \lambda_j}{\lambda_i^2}$$

Если взять квазиизотропное тело, то начальная деформация сильно сказывается на их величине. Причем k , в зависимости от природы материала приобретает определенный знак — плюс или минус.

Проведенные опыты по холодной прокатке алюминиевых сплавов Д16 и АД0 с обжатиями от 38 до 89%, а также данные различных авторов (в том числе и ученых ТПИ) по сталям и латуням показали, что при развитых пластических деформациях значения k и λ_{ij} начинают стабилизироваться, а, следовательно, коэффициенты поперечной деформации становятся практически постоянными. Теперь, чтобы принципиально изменить анизотропию необходимо, чтобы



($\mu_{12} = \mu$; $\mu_{21} = 0.5$)

($\mu_{12} = \mu_{21} = \mu$)

рис. 8.3. Пределные возможности раздачи
(а- без подпора; в, г - с подпором)
и обжатия тонкостенной трубы.

скаляр k поменял свой знак, а это, как показывают приведенные ниже уравнения, происходит, когда μ_1 переходит через значение 0,5, т.е. значения изотропного тела.

$$k = 2 \left(\frac{1 - \mu_1}{1 + \mu_1} + \frac{1 - \mu_2}{1 + \mu_2} + \frac{1 - \mu_3}{1 + \mu_3} - 1 \right) = \frac{4 \left(\frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 1 \right) (1 - \mu_1)}{\left(\frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) (1 + \mu_1)} - 2$$

$$\lambda_1^2 = \frac{2}{k} \left(\frac{1 - \mu_2}{1 + \mu_2} - \frac{1}{3} \right), \quad \lambda_2^2 = \frac{2}{k} \left(\frac{1 - \mu_3}{1 + \mu_3} - \frac{1}{3} \right),$$

$$\lambda_3^2 = \frac{2}{k} \left(\frac{1 - \mu_1}{1 + \mu_1} - \frac{1}{3} \right)$$

И так как деформацией этого не удастся сделать, то наиболее простой способ заключается в подводе тепловой энергии. В частности, в проведении определенной термообработки. Как показали опыты, для алюминиевых сплавов наиболее рациональным является отжиг.

Исходя из этого принципа и предложена технология получения алюминиевых листов с определенной анизотропией и необходимыми свойствами, которая и описана в дальнейшем. В то же время замечено, что переходная зона изменения знака скаляра k зависит от марки сплава и толщины прокатываемого листа (степени обжатия). Следовательно, наибольший эффект при получении необходимой анизотропии может быть достигнут при правильном сочетании режимов прокатки и отжига. Об этом говорит и серия опытов, проведенных на сплавах Д16 и АД0 с обжатиями от 0,38 до 0,89 и температурами отжига от 200 до 500°C. Опытные данные представлены в виде графиков, один из которых (сплав АД0) приведен в автореферате (рис.9.1). На графике также показано изменение k .

Было установлено, что у сплава Д16 при обжатиях более 70% и последующем обжиге μ_1 не переходит через значение 0,5 и анизотропию стабилизировать не удастся. Поэтому заводу было рекомендовано изменить толщину заготовки перед холодной прокаткой. Рентгенографические исследования подтвердили полученные ранее результаты и показали, что при больших степенях обжатия анизотропия носит кристаллографический характер. Проведено также изучение колебания значений μ_{ij} в различных партиях выпускаемых листов. Наблюдения в течение года показали, что эти колебания невелики

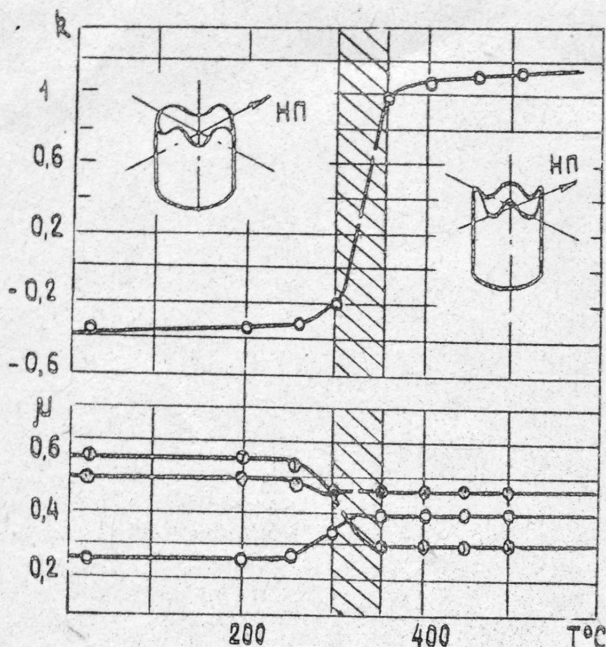


Рис.9.1. Изменение коэффициента k и показателей анизотропии H в зависимости от температуры отжига $\odot - 0^{\circ}$, $\odot - 45^{\circ}$, $\otimes - 90^{\circ}$ $\epsilon_n = 64\%$

и для расчетов могут быть использованы осредненные величины коэффициентов поперечной деформации. Они указаны в диссертации.

Проведенный анализ процессов листовой штамповки и характера изменения анизотропии позволил разработать рекомендации по производству алюминиевых листов. Как показано ранее, при изготовлении полуфабрикатов с заданными свойствами использован принцип назначения режимов окончательной термообработки в строгом соответствии с величиной деформации при холодной прокатке. Так, например, листы толщиной 5 мм (степень обжатия $\epsilon_n = 0,38 - 0,39$), предназначенные для гибки, следует отжигать в интервале температур 370–400 $^{\circ}\text{C}$ (Д16) и 390–430 $^{\circ}\text{C}$ (АД0). В этом случае они обладают наибольшей пластичностью и относительно низкой плоскостной анизотропией, а это позволяет уменьшить допустимый радиусгиба. Рекомендации по режимам отжига наиболее распро-

равенных толщин листов из Д16 и АДО представлены в диссертации в виде таблиц и графиков, один из которых приведен здесь (рис. 9.2). На них нанесены зоны температур, благоприятных для получения листов, используемых в конкретных операциях штамповки. Если листы не разделять по операциям, их следует выпускать трансверсально изотропными. Во первых, они предпочтительнее для

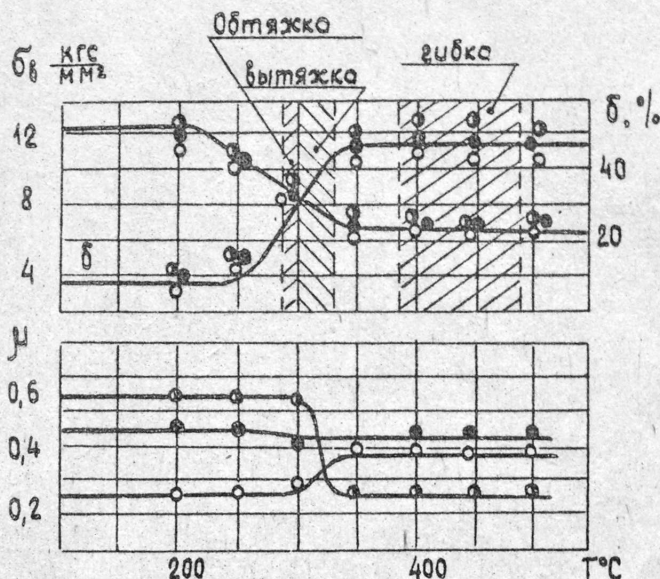


Рис. 9.2. Выбор температуры отжига листов АДО в зависимости от вида последующей операции штамповки ($\epsilon_h = 38\%$)
 $\circ - 0^{\circ}$, $\bullet - 45^{\circ}$, $\bullet - 90^{\circ}$

большинства штамповочных процессов, а во-вторых, из этого состояния повторной термообработкой легко получить требуемые свойства листа.

10. НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Необходимо продолжить исследования по влиянию и регулированию анизотропии в процессах объемной горячей штамповки. Здесь возникают крупные научные задачи как в теоретическом, так и

экспериментальном плане. Это прежде всего теория и практика образования текстур в поликристаллическом материале с учетом анизотропии монокристаллов и режимов их деформирования. Вторая задача – построение теории пластичности с учетом указанных факторов. Экспериментальные исследования должны вестись с использованием различных методов, в том числе и физических – акустических, рентгенографических и т.д. Нами пока сделан упор на получение желательной информации за счет механических испытаний и исследования формирования анизотропии в процессах обработки давлением. Это нашло свое воплощение при разработке и внедрении в производство технологического процесса изготовления роторных и статорных колец авиационных двигателей. Далее рассмотрены перспективы использования асимптотических методов при решении задач обработки металлов давлением. Наши исследования показывают, что для эффективного применения этих методов в ОМД нужно иметь достаточно широкий набор частных точных решений, из которого можно было бы выбрать подходящее нулевое приближение. Для получения точных частных решений, на наш взгляд, перспективными являются идеи симметрии и групповые методы.

II. ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

II.1. В диссертации изучена комплексная научно-техническая проблема, связанная с анизотропией листовых материалов. Она решалась на основе разработанного варианта технической теории пластичности ортотропных сред, который содержит меньшее число определяемых параметров, чем теория Р.Хилла.

II.2. Используя основные соотношения теории, учитывающих структуру материальных тензоров, проведен теоретический анализ технологических процессов листовой штамповки и предложены пути регулирования анизотропии механических свойств в получаемых полуфабрикатах.

II.3. Проведенный на базе теории пластичности ортотропных сред анализ основных инженерных методов расчета процессов ОМД, позволил разработать методику учета анизотропии в рамках этих методов. Впервые рассмотрен метод возмущений (малого параметра) применительно к технологическим задачам листовой штамповки.

II.4. Изучено влияние анизотропии на напряженно-деформированное состояние и основные параметры гибки широких листов. При определении минимально-допустимых радиусовгиба на базе те-

ории инвариантов показано изменение диаграммы пластичности в зависимости от направленности свойств материала. Исследование установило существенное влияние анизотропии на параметры гибки.

II.5. Для теоретического анализа простой обтяжки использован метод возмущений, позволивший получить формулы для определения усилия обтяжки, величины пружинения и предельных возможностей материала в данном процессе. Причем из самой структуры дифференциальных уравнений метода (особая точка) вытекает момент потери устойчивости детали за счет локального утонения. Это указывает на то, что метод возмущений не требует разработки специальных моделей для расчета предельного формоизменения оболочки. Задача решалась с использованием теории течения, однако оказалось (это строго показано), что в первом приближении может быть использована деформационная теория с асимптотической точностью

$$\sigma^2 \left(\sigma = \frac{S}{R_{\text{огт}}} \right)$$

II.6. На базе деформационной теории пластичности ортотропных сред исследован процесс обтяжки с растяжением. Здесь впервые решены вопросы расчета пружинения, предельных возможностей с учетом эксплуатационных требований, рациональной формы заготовки, исключаящей неравномерность деформации, и разработана методика контроля процесса.

II.7. Совместное исследование уравнений теорий упругости и пластичности позволило установить ряд связей между деформационными параметрами анизотропии, которые необходимы для расчета процессов ОМД.

II.8. Расчетные формулы теории и технологических процессов (гибки, обтяжки), прошли экспериментальную проверку по данным автора и других исследователей. Эксперименты показали на достаточную адекватность выбранных моделей. Это позволяет рекомендовать полученные соотношения в практику проектирования технологических операций листовой штамповки.

II.9. Найденная структура материальных тензоров позволила экспериментально выявить факторы, влияющие на анизотропию и показать принципиальную возможность ее регулирования.

II.10. Для определения необходимой анизотропии материала изучены, с точки зрения предельных возможностей, основные операции листовой штамповки. Для каждой из них установлен наиболее

благоприятный ее характер.

II.11. На примере алюминиевых сплавов показано, как за счет согласования режимов отжига с маркой материала и величиной обжатия полуфабриката можно получить оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств с характером анизотропии листа.

II.12. Намечены пути дальнейших исследований как в области теории, так и технологии обработки давлением анизотропных материалов.

II.13. Результаты диссертационной работы внедрены в производство. Они использованы при разработке технологических операций штамповки и процессов получения листов из алюминиевых сплавов. Получен экономический эффект от внедрения на сумму 1.333.400 рублей. Основные положения диссертации опубликованы в 53 работах, в том числе:

1. Арышенский Ю.М., Шильмейстер Б.Д., Федорова Т.М., Юреник Т.А. Некоторые вопросы обжатия титановых сплавов ВТ1-2 и ОТ4-1. Сб. Вопросы технологии производства летательных аппаратов. - Куйбышев; КуАИ, 1965, с.55-59.

2. Арышенский Ю.М., Калужский И.И. Расчет формы заготовки и усилия при обжатке с растяжением. Сб. Вопросы технологии производства летательных аппаратов. - Куйбышев; КуАИ, 1965, с.61-68.

3. Арышенский Ю.М., Калужский И.И. Расчет деформаций и напряжений при листовой штамповке трансверсально изотропных материалов. - Известия ВУЗов. Авиационная техника. 1965, № 3, с. 131... 135.

4. Арышенский Ю.М., Калужский И.И., Уваров В.В. Некоторые вопросы пластичности ортотропных сред. - Известия ВУЗов. Авиационная техника. 1969, № 2, с. 115-120.

5. Арышенский Ю.М., Уваров В.В., Юшков А.В. Анализ влияния анизотропии на напряжения при прокатке. - Известия ВУЗов. Цветная металлургия. 1970, № 3, с. 135-137.

6. Арышенский Ю.М., Уваров В.В., Калужский И.И. Особенности пластического формоизменения листовых анизотропных материалов. Сб. Вопросы технологии производства летательных аппаратов. - Куйбышев; КуАИ, 1970, с.48-53.

7. Уваров В.В., Арышенский Ю.М., Калужский И.И. Анализ влияния анизотропии листового металла на коэффициент вытяжки. Сб. Вопросы технологии производства летательных аппаратов. - Куй-

бышев; КуАИ, 1970, с. 54-60.

8. Арышенский Ю.М., Калужский И.И., Уваров В.В. К вопросу теории пластичности ортотропных сред. Сб. Вопросы технологии производства летательных аппаратов.- Куйбышев; КуАИ, 1970, с. 61-70.

9. Арышенский Ю.М., Уваров В.В., Ненашев В.Ю. Теоретические основы расчетов технологических процессов кузнечно-штамповочного производства.- Куйбышев; Волжская Коммуна, 1973, II4.

10. Уваров В.В., Арышенский Ю.М. Основы расчетов предельного формоизменения в процессах листовой штамповки. Учебное пособие.- Куйбышев; КуАИ, 1973, 48с.

11. Арышенский Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов. - Саратов: Сарат.ун-т, 1973, II2с.

12. Арышенский Ю.М., Калужский И.И., Уваров В.В. Вопросы теории пластичности анизотропных сред. Сб. Обработка металлов давлением. Фрунзе, ФПИ, 1973, с. 59-66.

13. Уваров В.В., Арышенский Ю.М., Мордасов В.И. К вопросу расчета напряжений и деформаций при осесимметричном формоизменении тонкостенных оболочек из анизотропных материалов. Межвуз. сб. Стали и сплавы цветных металлов. - Куйбышев; КуАИ, 1974, с. II-17.

14. Уваров В.В., Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Исследование анизотропии свойств алюминиевого сплава АД0. Межвуз. сб. Стали и сплавы цветных металлов. - Куйбышев; КуАИ, 1974, с. I3...22.

15. Арышенский Ю.М., Уваров В.В. О перспективах использования в листовой штамповке анизотропных материалов: Тр. Всесоюз. научн. техн. конф. (Запорожье, 9-11 сентября 1975 г.). -М: МИХМ, 1975, с. I94...I95.

16. Арышенский Ю.М., Уваров В.В., Калужский И.И. Расчет пружинения при обтяжке с растяжением. Сб. Вопросы технологии производства летательных аппаратов.- Куйбышев; КуАИ, 1975, с. 4...8.

17. Уваров В.В., Арышенский Ю.М., Мордасов В.И. о напряжениях и деформациях при пластическом формоизменении анизотропных тонкостенных труб в конических матрицах. Сб. Вопросы технологии производства летательных аппаратов.- Куйбышев; КуАИ, с. 8...I3.

18. Калужский И.И., Арышенский Ю.М. О структуре материального тензора ортотропной среды. Межвуз. сб. Теория технологии обработки металлов давлением.- Куйбышев, КуАИ, 1975, с.34-40.

19. Арышенский Ю.М., Уваров В.В., Гречников Ф.В. О влиянии режимов прокатки и отжига на анизотропию свойств листов алюминиевых сплавов. Сб. Теория и технология обработки металлов давлением: Труды/ МиСиС, 1975, № 93, с. 56...61.

20. Калужский И.И., Арышенский Ю.М. О возможностях совместного использования феноменологического и кристаллофизического подходов к теории пластичности анизотропных сред. Деп. 1231-75, Р.Ж. ВИНТИ. Механика, реф.8 В 412-75, 16с.

21. Арышенский Ю.М., Уваров В.В., Мордасов В.И., Гречников Ф.В. Влияние пластических свойств исходной заготовки на предельную степень раздачи анизотропных труб. Деп. Р.Ж.ВИНИТИ: Механика, реф 9В394-75, 12с.

22. Уваров В.В., Арышенский Ю.М., Мордасов В.И., Гречников Ф.В. Учет анизотропии листовых материалов при серийном производстве изделий методами глубокой вытяжки. ДЗП Р.Ж. ВИНТИ: Технология машиностроения, 8 В123-75, 12с.

23. Арышенский Ю.М., Калужский И.И. Некоторые особенности структуры материальных тензоров теории пластичности ортотропных сред. Межвуз. сб. Теория и технология обработки металлов давлением.- Куйбышев; КуАИ, 1977, с. 3...8.

24. Арышенский Ю.М., Уваров В.В., Гречников Ф.В. О возможностях регулирования анизотропии листовых материалов. Межвуз. сб. Теория и технология обработки металлов давлением.- Куйбышев; КуАИ, 1977, с. 17...21.

25. Калужский И.И., Арышенский Ю.М. Теория пластичности ортотропных сред с анизотропным упрочнением и склерономными свойствами. Сб. Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением.- Тула: ТПИ, 1977, с. 174...178.

26. Арышенский Ю.М., Уваров В.В., Мордасов В.И., Дудин А.А., Гречников Ф.В. Технология штамповки эластичной средой трубчатого переходника из анизотропного материала. - Кузнечно-штамповочное производство. 1978, № 6, с. 16...18.

27. Уваров В.В., Арышенский Ю.М., Мордасов В.И., Гречников Ф.В. Предельное формоизменение при штамповке деталей летательных аппаратов. Учебное пособие.- Куйбышев: КуАИ, 1978, 68с.

28. Арышенский В.Ю., Арышенский Ю.М., Калужский И.И. Формоизменение анизотропных материалов. Межвуз. сб. Технология производства и прочность деталей летательных аппаратов и двигателей.- Казань: КАИ, 1978, с. 3...6.

29. Арышенский Ю.М., Уваров В.В. О формах выражения условия пластичности анизотропных сред при инженерных расчетах процессов обработки давлением. Межвуз. сб. Технология производства и прочность деталей летательных аппаратов и двигателей.- Казань: КАИ, 1978, с. 7...13.

30. Арышенский Ю.М., Калужский И.И. Связь между коэффициентом поперечной деформации ортотропных тел в упругой и пластической областях. Сб. Исследования в области пластичности и обработка металлов давлением.- Тула: ТПИ, 1978, с. 146-149.

31. Арышенский Ю.М., Калужский И.И. Теоретико-групповой подход в симметричной теории упругости и пластичности. ДЭП. Р.Ж. ВИНТИ. Механика, 1979-78.

32. Калужский И.И., Арышенский Ю.М. К теории приобретенной анизотропии металлов. Межвуз. сб. Вопросы пластического формоизменения при производстве летательных аппаратов и двигателей.- Куйбышев: КуАИ, 1979, с. 96-103.

33. Якуничев Е.В., Калужский И.И., Арышенский Ю.М., Проскуряков Г.В. Неустойчивость деформирования в процессах раздачи. Межвуз. сб. Вопросы пластического формоизменения при производстве летательных аппаратов и двигателей.- Куйбышев: КуАИ, 1979, с. 24...29.

34. Калужский И.И., Арышенский Ю.М., Арышенский В.Ю. К теории пластичности ортотропных сред. - Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1980, № 1, с. 159.

35. Арышенский Ю.М. Метод возмущений в контактной задаче, пластического деформирования цилиндрической оболочки переменной толщины из анизотропного материала. ДЭП. Р.Ж. ВИНТИ. Механика, 3В459-81.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ДОЛОЖЕНЫ

1. На 6-м Всесоюзном научно-техническом совещании по металлургии, металловедению и применению титана. Москва, 1964 г.
2. На научно-техническом совещании "Производство деформированных полуфабрикатов из вторичных алюминиевых сплавов". Куйбышев, 1966 г.
3. На научно-технических конференциях К.АИ. Куйбышев, 1966, 1967, 1970, 1972, 1979 гг.
4. На первой республиканской конференции "Прогрессивные методы обработки металлов давлением". Уфа, 1969 г.
5. На 6 семинаре по обмену опытом и результатам работ в области обработки металлов давлением. Ленинград, 1972 г.
6. На объединенном семинаре сотрудников Академии наук Казахской ССР и ИИИ. Алма-Ата, 1973 г.
7. На XIV научно-технической конференции Украинского заочного политехнического института, Харьков, 1973 г.
8. На Всесоюзной научно-технической конференции. Запорожье, 1975 г.
9. На XIII научно-технической конференции. Тула, 1977 г.
10. На II отраслевой научно-технической конференции "Прогрессивные технологические процессы холодной листовой штамповки". Москва, 1979 г.
11. На научно-исследовательском семинаре кафедры упругости МГУ под руководством члена корр. АН СССР проф. Ильшина А.А.
12. На научно-исследовательском семинаре кафедры М-5 МВТУ им.Баумана под руководством проф. Малинина Н.Н.

Также сделаны доклады на заседаниях ряда институтов страны по специальности.