ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

Ф. В. ГРЕЧНИКОВ, В. М. ЗАЙЦЕВ

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕКСТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 669:539.4
ББК 30.121
Г81

Инновационная образовательная программа «Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий»

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. А. Костышев,
канд. техн. наук, доц. Ю. А. Вашуков

Гречников Ф.В.

Г81 **Физико-механические основы интенсификации деформирования высокотекстурированных материалов** : учеб. пособие / Ф. В. Гречников, В. М. Зайцев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 130 с. : ил.

ISBN 5-7883-0517-9

В пособии собраны воедино и изложены доступным языком для студентов металлургических специальностей основные понятия, принципы и методы проведения мероприятий по интенсификации процессов деформирования высокотекстурированных материалов, к каковым относятся большинство промышленных металлов и сплавов. Знания и навыки в этой области необходимы студентам для выполнения лабораторных, курсовых и дипломных работ, проведения студенческой научной работы.

Пособие будет полезно широкому кругу студентов технических специальностей и инженерных работников, связанных с интенсификацией процессов деформирования высокотекстурированных материалов, планированием, постановкой и проведением научных и экспериментальных исследований в этой области.

УДК 669:539.4
ББК 30.121

ISBN 5-7883-0517-9

© Гречников Ф. В., Зайцев В. М., 2006
© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Принятые обозначения 5

Введение 7

Глава 1. Анизотропия свойств и ее влияние на поведение материалов при деформировании и эксплуатации 9

1.1. Основные сведения о строении материалов и анизотропии их свойств 9

1.2. Характеристика и выбор технических показателей анизотропии 17

1.3. Проявления анизотропии при деформировании заготовок и эксплуатации изделий 24

1.4. Вопросы для самоконтроля 37

Глава 2. Общие положения анализа влияния анизотропии на деформирование листовых заготовок 38

2.1. Основные положения теории пластичности анизотропных сред 38

2.2. Влияние анизотропии на взаимосвязь показателей напряженного и деформированного состояний 45

2.3. Понятие об интенсификации деформирования листовых материалов за счет создания эффективной анизотропии их свойств 54

2.4. Вопросы для самоконтроля 60

Глава 3. Анализ влияния анизотропии на формообразование листов при вытяжке 61

3.1. Краткая характеристика параметров и напряженно-деформированного состояния при вытяжке 61

3.2. Влияние анизотропии на геометрические параметры вытяжки 73

3.3. Влияние анизотропии на предельную степень вытяжки 82

3.4. Влияние анизотропии на усилие 88

3.5. Вопросы для самоконтроля 89

Глава 4. Анализ влияния анизотропии на формообразование листов изгибом 90

4.1. Краткая характеристика параметров и напряженно-деформированного состояния при гибке моментом 90

4.2. Влияние анизотропии на минимально допустимый радиус гиба 94

4.3. Влияние анизотропии на процесс обтяжки 97

4.4. Вопросы для самоконтроля 103

Глава 5. Определение требований к показателям анизотропии..... 104
5.1. Механизм потери устойчивости при деформировании анизотропных заготовок..... 104
5.2. Требования к анизотропии заготовок для вытяжки 111
5.3. Требования к анизотропии заготовок, деформируемых изгибом..... 117
5.4. Обобщение требований и рекомендации 123
5.5. Вопросы для самоконтроля 125
Глоссарий..... 126
Список литературы 129

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

K_{ijkl} – симметричный самосопряжённый пластический девиатор четвёртого ранга в главных осях анизотропии (материальный тензор);

μ_{ij} – показатели пластической анизотропии (коэффициенты поперечной деформации);

μ_i – показатели пластической анизотропии под углом 45° к осям i и j;

$\overline{\mu}$ – осреднённый в плоскости листа показатель анизотропии;

R – показатель нормальной пластической анизотропии;

ν_{ij} – коэффициенты Пуассона;

σ_{ij} – тензор напряжений;

ε_{ij} – тензор деформаций;

ν_σ – показатель схемы напряженного состояния;

ν_ε – показатель схемы деформированного состояния;

НП – направление прокатки;

ПН – поперечное направление в плоскости листа (направление прокатки);

НН – направление нормали к плоскости прокатки;

S – толщина листа;

T – температура термообработки;

E – степень фестонообразования;

$K_{\text{пр}}$ – предельная степень вытяжки;

r_1, r_2, r_0 – радиусы кривизны внутренней, наружной и граничной поверхностей;

$\sigma_\text{т}$ – предел текучести изотропного материала;

τ_s – предел текучести на сдвиг;

q – обобщенная деформация (параметр Удквиста);

T_{ijkl} – девиаторная единица;

λ_{ij} – нормированный девиатор, отражающий деформационное воздействие на металл;

k – скаляр, характеризующий природу материала;

β – коэффициент Лоде;

$\mu_\text{з}$ – размеры зерен и неметаллических включений;

$m_{\text{пр}}$ – предельная степень вытяжки;

P – усилие вытяжки;

Q – усилие прижима;

f – коэффициент трения;

$P_{изг}$ – усилие изгиба;

$\sigma_{ст}$ – суммарное напряжение, возникающее в зоне передачи усилия;

e_{θ} – тангенциальная деформация;

e_{ρ} – радиальная деформация;

σ_{θ} – тангенциальное напряжение;

σ_{ρ} – радиальное напряжение;

V_0, F_0, s_0 – объем, площадь и толщина заготовки;

$V_д$, $F_д$, $s_д$ – объем, площадь и толщина стенки изделия (детали);

r_{min} – минимально допустимый радиус гиба;

$\psi_ш$ – сужение металла при разрыве образца;

$K_{обт}$ – коэффициент обтяжки.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции мирового развития металлообработки, в том числе и процессов пластического деформирования, характеризуются, прежде всего, резким повышением требований к качеству и эксплуатационным свойствам изделий при снижении себестоимости их производства. Это, в свою очередь, стимулирует разработку высокоэффективных технологий, отвечающих указанным требованиям и реализующих всемерную экономию материальных, трудовых и энергетических ресурсов.

Касаясь проблем интенсификации процессов листовой штамповки, необходимо отметить, что себестоимость изделий, их качество, характеристики технологичности и экономичности производства в значительной степени определяются качеством и стоимостью материалов, рациональное использование которых, в свою очередь, определяется их физико-механическими свойствами и показателями анизотропии. Например, неблагоприятное сочетание показателей анизотропии в заготовках для осесимметричной вытяжки приводит к образованию впадин по верхнему краю и разнотолщинности стенок изделия по образующей и по периметру. Помимо снижения качества и увеличения брака это явление вызывает необходимость повышения на 12–18% размеров заготовок по диаметру и толщине, введения дополнительной операции обрезки фестонов и т. д.

Длительный опыт производства деталей из листов показывает, что наилучшие результаты достигаются в том случае, если потребители листа (штамповщики) и его производители (прокатчики) совместно работают над вопросами интенсификации процессов деформирования, определяя наиболее рациональный для конкретных операций комплекс свойств и создавая его в листах и ленте.

Настоятельная необходимость и перспективность проведения широких исследований и разработки технологий получения материалов с заранее заданной направленностью свойств обусловливается в первую очередь следующими основными причинами:

– ограниченностью сырьевых ресурсов для производства высококачественных сплавов специального назначения;

– повышением технических и эксплуатационных параметров машин и изделий без изменения применяемой марки материала;

– перспективой управления формированием характеристик материала, т. е. приближения их свойств к композиционным материалам, сохраняя при этом преимущества мономатериалов, в том числе высокую технологичность и экономичность.

Однако для разработки системы целенаправленного управления формированием анизотропии свойств в процессе прокатки листов необходимо, прежде всего, выяснить – какие сочетания ее показателей отвечают требованиям совершенствования конкретных листоштамповочных операций. В этой связи весьма актуальным является получение при анализе процессов формообразования таких расчетных формул, которые не только отражали бы влияние анизотропии на процесс, но и позволили бы определять её эффективные виды.

ГЛАВА 1
АНИЗОТРОПИЯ СВОЙСТВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

1.1. Основные сведения о строении материалов и анизотропии их свойств

Практически все металлы и сплавы, применяемые в современной промышленности, имеют кристаллическое строение, являющееся следствием трехмерного периодического расположения атомов, образующих пространственную атомную решетку.

Согласно классификации Браве, существует 14 типов элементарных пространственных решеток (табл. 1.1).

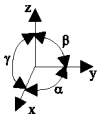
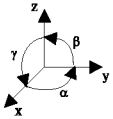
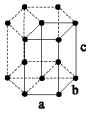
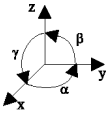
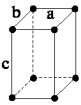
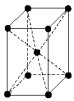
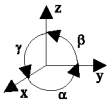
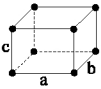
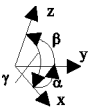
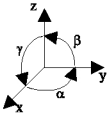
Как видно из табл. 1.1, параметры пространственной решетки или расстояния между атомами, определяющие собой силы межатомных связей, неодинаковы как для различных типов решеток, так и в пределах одной элементарной ячейки. Это различие в плотности упаковки атомами кристаллографических плоскостей и направлений монокристаллов в совокупности с количеством электронных орбит вокруг ядра атома и обусловливают практически все физико-механические свойства вещества. Наиболее общими из этих свойств являются однородность, симметрия и анизотропия кристаллического материала.

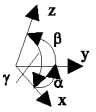
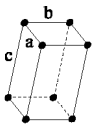
Как известно, неодинаковость свойств среды относительно поворота называют анизотропией, а относительно переносов - неоднородностью.

Поликристаллические тела принято считать квазиизотропными, если составляющие их кристаллы расположены хаотично.

Однако при обработке металлов давлением, в частности при прокатке, прессовании, волочении, направленное действие внешних деформирующих сил вызывает в поликристаллическом теле поворот всех зерен и их кристаллографических осей вдоль направления максимальной деформации. В результате в металле возникает преимущественная ориентация кристаллографических плоско-

Таблица 1.1. **Виды решеток Браве**

Кристаллическая система	Направление осей координат	Элементарная ячейка, ее ребра и углы	Решетки Браве			
			Простые	Сложные		
				базоцентрированные	объемноцентрированные	гранецентрированные
1. Кубическая		Куб $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$		---		
2. Гексагональная		Прямая призма $a = b \neq c$ α=120°, $\beta = \gamma = 90°$		---	---	---
3. Тетрагональная		Квадратная призма $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$		---		---
4. Моноклинная		Прямая призма, в ее основании параллелограмм $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq 90°$, $\beta = \gamma = 90°$		---		---
5. Триклинная		Косоугольный параллелепипед $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$		---	---	---
6. Ромбическая		Прямоугольный параллелепипед $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90°$				

7. Ромбоэдрическая		Ромбоэдр $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$		---	---	---

стей и направлений или текстура, которая приближает свойства полуфабрикатов, в частности их анизотропию, к монокристаллу. Таким образом, возникает вторичная по отношению к монокристаллам, или деформационная анизотропия. В связи с этим еще Мортон К. Смит отметил, что для деформированных материалов анизотропия свойств является скорее правилом, чем исключением.

Для качественного описания возникающей в металле текстуры разработана специальная индексация кристаллографических плоскостей и направлений в монокристалле (рис. 1.1).

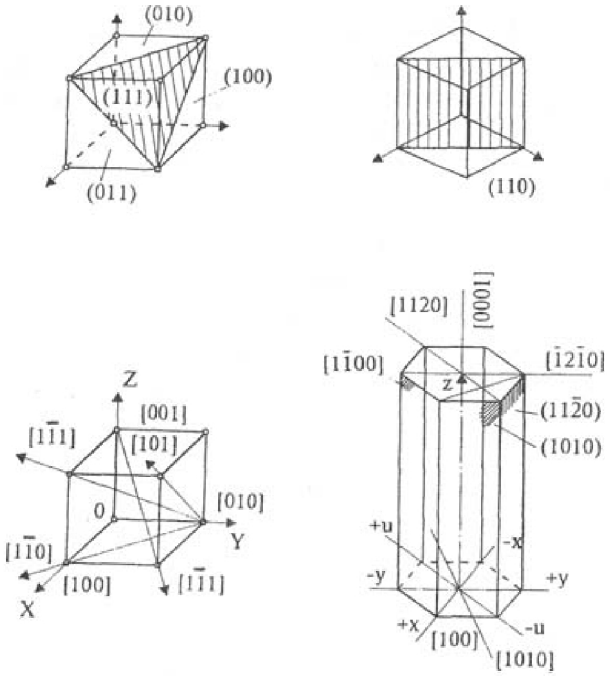


Рис. 1.1. Индексация кристаллографических плоскостей и направлений

Система индексов характеризует следующее: круглые скобки обозначают отдельную плоскость или систему параллельных плоскостей ($h\ k\ l$). Эквивалентные плоскости в кристалле имеют одинаковые свойства. Поэтому их иногда целесообразно объединить в единую систему. Индексы этих плоскостей состоят из набора цифр, одинаковых по модулю, поэтому систему эквивалентных плоскостей записывают индексами Миллера-Браве, заключенными в фигурные скобки $\{h\ k\ l\}$. Например, в кубической решетке в совокупность {111} входят плоскости (111), $(1\,\bar{1}\,1)$, $(11\,\bar{1})$, $(\bar{1}\,\bar{1}\,1)$, $(1\,\bar{1}\,\bar{1})$, $(\bar{1}\,\bar{1}\,\bar{1})$. Отметим, что если плоскость отсекает отрезок на отрицательной части оси, то число, выражающее длину этого отрезка, имеет знак «минус», что в конечном счете проявляется в отрицательном значении индекса Миллера.

Для удобства записи знак «минус» пишут не перед числом, а над ним. Индексы одного или параллельных направлений записывают в квадратных скобках $[u\ v\ w]$, а семейство эквивалентных индексов – в ломаных скобках $\langle u\ v\ w\rangle$. В гексагональной системе количество координатных осей равно четырем.

Таблица 1.2. **Упругие свойства монокристаллов некоторых металлов**

Металл	E_{max}		E_{min}		G_{max}		G_{min}		$\frac{E_{max}}{E_{min}}$	$\frac{G_{max}}{G_{min}}$
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б		
Кубическая решетка										
Al	[111]	77	[100]	64	[100]	29	[111]	25	1,2	1,16
Cu	[111]	194	[100]	68	[100]	77	[111]	31	2,86	2,48
Fe_α	[111]	290	[100]	135	[100]	118	[111]	61	2,15	1,93
Ag	[111]	117	[100]	44	[100]	44,5	[111]	197	2,66	2,26
Au	[111]	114	[100]	42	[100]	41	[111]	18	1,71	2,28
Гексагональная решетка										
Mg	0°	51,4	53,3°	43	44,5°	18,4	90°	17,1	1,18	1,0
Zn	70,2°	12,63	0°	3,56	30°	49,7	41,8°	27,8	3,55	1,7
Cd	90°	8,3	0°	2,88	90°	25,1	30°	18,4	2,88	1,36
Тетрагональная решетка										
Sn	[001]	8,64	[110]	2,68	45,7°	18,2	[100]	10,6	3,22	1,72

Примечание:

1. А – кристаллографическое направление; Б – значения E и G в МПа $\times 10^3$.

2. 0; 70,2°; 90° и др. – углы относительно гексагональной оси.

3. E – модуль упругости первого рода; G – модуль сдвига.

В «чистом» виде анизотропия проявляется при исследовании свойств монокристаллов – упругих и пластических, твердости, тепло- и электропроводности, магнитной проницаемости, скорости разрушения в коррозионной атмосфере и т. д. Резко анизотропна и скорость роста кристаллов, в результате чего они вырастают в форме многогранников. Другими словами, все кристаллы анизотропны в отношении каких-либо их свойств.

В качестве примера в табл. 1.2 приведены некоторые свойства монокристаллов, из которых ясна степень их анизотропности. Пространственные изменения модулей упругости некоторых металлов в зависимости от направления представлены на рис. 1.2.

При испытании монокристаллов обнаружена также большая анизотропия свойств прочности и пластичности. В качестве примера в табл. 1.3 приведены свойства монокристалла кремнистого железа.

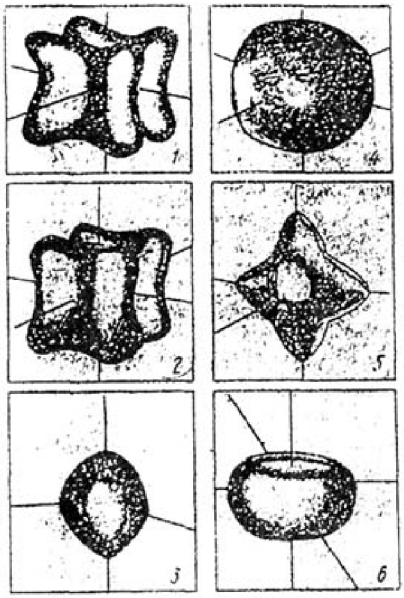


Рис. 1.2. Изменение модулей упругости в зависимости от направления в монокристалле (по Е. Шмидту): *1* – золото, *2* – алюминий, *3* – железо, *4* – железо (модуль сдвига), *5* – магний, *6* – цинк

Таблица 1.3. **Свойства монокристалла кремнистого железа, МПа**

Направления	Модуль упругости E	Предел упругости $\sigma_у$	Предел текучести $\sigma_т$	Временное сопротивление $\sigma_в$
100	120000–134000	288	373	415
110	201000–210000	296	380	450
111	266000–288000	380	435	478

Пространственные модели временного сопротивления и относительного удлинения монокристаллов меди и алюминия представлены на рис. 1.3.

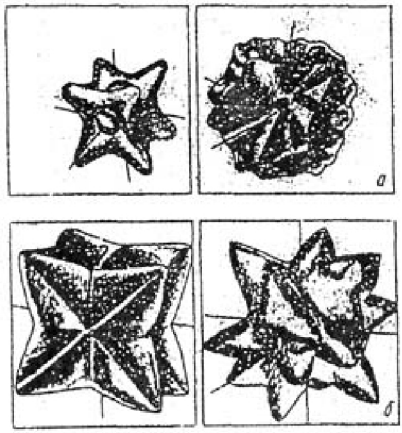


Рис. 1.3. Пространственные модели временного сопротивления и удлинения монокристаллов меди (*а*) и алюминия (*б*)

Как показано еще академиком С. И. Губкиным, резкую анизотропность проявляют гексагональные кристаллы. Так, из рис. 1.4 видно, что предел текучести монокристалла магния изменяется в 6 раз в зависимости от угла ориентировки плоскости базиса относительно направления растяжения.

Переходя к анизотропии свойств поликристаллических тел, следует отметить, что резкую зависимость механических свойств от направления имеет, например, поликристаллическое кремнистое железо с текстурой (0 0 1) [0 0 1]. Причем в текстурованном кремнистом железе особенно выражена анизотропия пластических свойств. Так, относительное удлинение при растяжении вдоль направления [1 1 0] в 3–4 раза выше, чем в направлении [1 0 0] (70–80% вместо 20–25%).

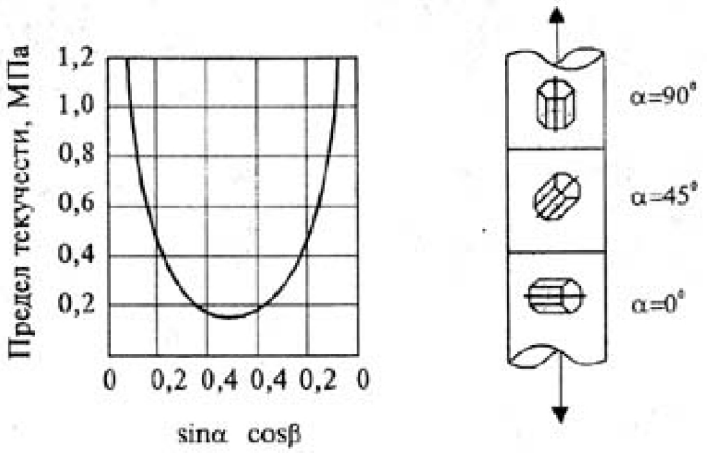


Рис. 1.4. Изменение предела текучести монокристалла магния в зависимости от направления: α – угол между плоскостью скольжения и направлением растяжения; β – угол, определяющий направление скольжения

В деформированных поликристаллических материалах величина анизотропии зависит от степени совершенства текстуры, т. е. степени ее приближения к монокристаллу, которая, в свою очередь, определяется величиной пластической деформации. Изучение кинематики развития текстуры при пластической деформации показывает, что степень ее совершенства, а следовательно, и анизотропия возрастают с увеличением деформации лишь до определенного предела, после которого уже практически не меняются. Другими словами, даже в сильно деформированных материалах остается разориентировка текстуры порядка 5–10°, обусловливая этим различия в анизотропии моно- и поликристаллов. При описании текстуры характеризуются определенными ориентировками плоскостей и направлений. Различают два основных вида текстуры: аксиальную и текстуру прокатки. Первый вид наблюдается при деформации с осевой симметрией – растяжении, сжатии, волочении, прессовании и прокатке прутков круглого сечения. В этом случае зерна обращены в направлении деформации в одном и том же кристаллографическом направлении.

Теоретический анализ и экспериментальная проверка с помощью рентгенографии и ультразвука показывают, что текстура проката имеет совокупность элементов симметрии, присущую параллелепипеду, а именно: три оси симметрии второго порядка, одна из которых совпадает с направлением проката, а две других – с перпендикулярными ему направлениями; три плоскости симметрии, одна из которых совпадает с плоскостью прокатки, а другие перпендикулярны к ней. У полуфабрикатов, полученных прессованием и волочением, возникает еще более простой вид симметрии из-за наличия кристаллографических направлений, расположенных вдоль оси сжатия или растяжения. Все это говорит о том, что в металлических полуфабрикатах не следует ожидать появления криволинейной анизотропии.

Наиболее важными для практики являются следующие виды симметрии свойств.

Плоскость симметрии. В данном случае в каждой точке тела имеется такая плоскость, что любые два направления, симметричные относительно этой плоскости, будут иметь одинаковые физико-механические свойства.

Три плоскости симметрии. Это тот случай, когда через каждую точку тела можно провести три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии физико-механических свойств. Тело, обладающее такой симметрией, называется *ортогонально-анизотропным*, или *ортотропным.*

Плоскость изотропии. В этом случае через каждую точку тела проходит плоскость, в которой свойства эквивалентны во всех направлениях. Тело, обладающее такой симметрией свойств, называется *трансверсально-изотропным*, или *транстропным*.

В случае ортогональной анизотропии листовой полуфабрикат характеризуется тремя главными осями анизотропии. Ось 1 совпадает с направлением проката; ось 2 – поперек проката; ось 3 направлена по толщине. Для характеристики трансверсально-изотропного листа достаточно рассмотреть две оси: одну из бесчис-

ленного множества равноценных в плоскости листа, а вторую – по толщине.

Если рассмотреть поверхность листа, то в ортотропном теле симметрия механических свойств, например $\sigma_{0,2}$, отложенных в определенном масштабе, имеет характер, указанный на рис. 1.5, *а*. Вид фигуры распределения, в зависимости от природы сплава и условий изготовления полуфабриката, может быть различным. При трансверсальной изотропии в плоскости листа фигура распределения механических свойств представляет круг (рис. 1.5, *б*). В отличие от изотропной среды свойства в плоскости листа и по его толщине здесь будут различны.

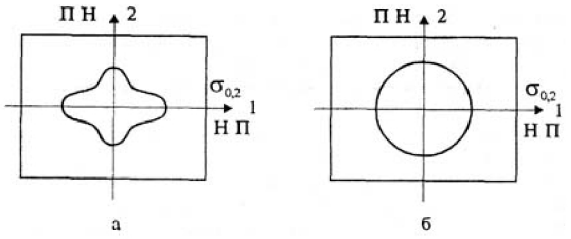


Рис. 1.5. Фигуры распределения механических свойств в плоскости листа: *а* – ортотропный лист; *б* – трансверсально-изотропный лист

1.2. Характеристика и выбор технических показателей анизотропии

Как уже отмечалось, анизотропия проявляется в направленности физико-механических, электрических, оптических и других подобных свойств материалов. Во многих случаях ее можно описать материальными тензорами соответствующих рангов. Однако для практического использования компоненты тензоров необходимо выражать через технические показатели.

Рассмотрим применяемые в настоящее время показатели анизотропии в области пластического деформирования с точки зрения их физической обоснованности, информативности, простоты определения и использования.

Условно их можно разделить на две группы:

1. Характеристики анизотропии, включающие в себя стандартные механические свойства или их отношения, определенные для различных направлений материала.

2. Показатели (коэффициенты) анизотропии, определяемые расчетным путем по результатам замера деформаций при линейном растяжении образцов, вырезанных в различных направлениях материала.

Сразу отметим, что показатели первой группы по своей структуре могут быть как простыми, так и комбинированными. Если говорить об анизотропии механических свойств, характеризуемой показателями первой группы, то она проявляется в различии пределов текучести, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения, величины статической и ударной вязкости и т. п. в различных направлениях материала. Б. С. Тихонов использовал комбинированные показатели:

$$\left.\begin{aligned} A_{\sigma_в} &= \frac{\sigma'_B - \sigma''}{0{,}5\left(\sigma'_B + \sigma''_B\right)} 100\%, \\ A_{\delta} &= \frac{\delta'' - \delta'}{0{,}5\left(\delta'' + \delta'\right)} 100\%, \end{aligned}\right\} \qquad (1.1)$$

где A_{δ} – показатель анизотропии относительного удлинения;

$A_{\sigma_в}$ – показатель анизотропии временного сопротивления разрыву;

$\sigma''_в$, δ'', $\sigma'_в$, δ' – свойства материала вдоль и поперек прокатки соответственно.

Трудно судить полностью о такой структуре коэффициентов, но ясно, что показателей только вдоль и поперек проката недостаточно. Нужны показатели материала в направлении 45°. Кроме того, если принять их за основу, видимо, нужны коэффициенты и других свойств, например $A_{\sigma_{0,2}}$, A_{a_k} и т. п.

Наибольшее распространение из комбинированных показателей получили параметры анизотропии, предложенные Р. Хиллом. Он показал, что состояние текстурированного полуфабриката может быть охарактеризовано следующими шестью величинами.

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}; \quad 2L = \frac{1}{R^2};$$
$$2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2}; \quad 2M = \frac{1}{S^2}; \qquad (1.2)$$
$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}; \quad 2N = \frac{1}{T^2}.$$

Здесь X, Y, Z – пределы текучести при линейном растяжении вдоль главных осей анизотропии; R, S, T – пределы текучести на сдвиг.

Необходимо отметить, что оценка различий в свойствах среды с помощью таких параметров анизотропии не всегда является точной. Еще Р. Хилл, говоря об определении анизотропии тонких листов, предлагал показатели F, G, H и др. вычислять не по величине пределов текучести, а по деформациям, так как при испытаниях тонколистовых материалов трудно определить точную величину σ_s.

Для характеристики направления преимущественного развития деформаций при пластическом течении (анизотропии деформаций) широко применяются коэффициенты второй группы, называемые часто деформационными показателями анизотропии. Общая структура их записи следующая:

$$\textit{Показатель} = F\ \frac{\textit{Деформация одного направления}}{\textit{Деформация в перпендикулярном направлении}}.$$

Для определения этих показателей обычно проводят механические испытания при линейной схеме напряжений образцов, вырезанных в различных направлениях листа. По полученным данным вычисляют деформации (их приращения) вдоль действия силы

и в перпендикулярных к ней направлениях. В зависимости от того, какие деформации относятся друг к другу, различают два типа коэффициентов.

В первом из них рассматривают отношение деформаций по ширине и толщине образца (сила действует вдоль образца).

Приведем несколько таких коэффициентов:

а) коэффициент А. Крупковского и С. Кавинского

$$k_a = A_h / A_b \ , \tag{1.3}$$

где $A_h = 0{,}5\left[\left(h_0/h_H\right)^2 - 1\right]$ – показатель изменения толщины;

$A_b = 0{,}5\left[\left(b_0/b_H\right)^2 - 1\right]$ – показатель изменения ширины образца;

б) коэффициент Лэнкфорда

$$R = \lg\frac{W_0}{W_f} \Big/ \lg\frac{t_0}{t_f} \ , \tag{1.4}$$

где W_0, t_0, W_f, t_f – соответственно начальные и конечные значения ширины и толщины плоских образцов;

в) аналогично коэффициенту Лэнкфорда введен еще ряд обозначений:

$$R = d\varepsilon_2 / d\varepsilon_3 \ \ и \ \ P = d\varepsilon_1 / d\varepsilon_3 \ ,$$

$$\left.\begin{array}{lll} R_0, & R_{45}, & R_{90} \\ r_0, & r_{45}, & r_{90} \\ R_x, & R_{xy}, & R_y \end{array}\right\} , \tag{1.5}$$

где $d\varepsilon_1, d\varepsilon_2$ – приращения деформаций по длине и ширине образца (в зависимости от направления вырезки в листе); $d\varepsilon_3$ – приращение деформации по толщине образца при действии силы в направлении отсутствующего индекса $\left[r_0\,(R_0,\ R_x)\right]$ – соответствуют испытаниям образцов, вырезанных вдоль проката и т. д.

Второй тип показателей анизотропии по аналогии с упругой областью представляет собой отношение приращений деформаций по ширине образца к деформации вдоль действия силы.

Наиболее распространенное их название – коэффициенты поперечной деформации.

$$\mu_{ij} = -\frac{de_i}{de_j}, \tag{1.6}$$

где индекс i соответствует направлению поперечной деформации при линейном растяжении образца вдоль направления j; e – натуральная деформация, $i, j = 1, 2, 3$ $(i \neq j)$; 1 – направление проката; 2 – поперечное направление; 3 – направление по толщине листа.

По условию несжимаемости коэффициенты анизотропии обоих типов пересчитываются друг в друга и в этом смысле являются равноценными. В действительности:

$$r_0 = \mu_{21}/(1-\mu_{21});\ \ \mu_{21} = r_0/(1+r_0);$$
$$r_{90} = \mu_{12}/(1-\mu_{12}) \ \text{ и т. д.}$$

Однако в их определении и удобстве использования наблюдаются определенные различия.

1. Механика сплошных сред развивается в сторону отыскания общих закономерностей процессов. Поэтому, исходя из современных представлений, коэффициенты, используемые в теории упругости и пластичности, должны иметь одинаковую структуру. В теории упругости анизотропных сред при записи уравнений обобщенного закона Гука применяют коэффициенты Пуассона ν_{ij}. Аналогичными являются и коэффициенты μ_{ij} в пластической области, что обеспечивает преемственность соотношений теории при переходе материала из упругой области в пластическую. При использовании показателей типа R, r не ясно – при каких деформациях лежит граница в использовании коэффициентов Пуассона и ко-

эффициентов R, r. Такая определенность необходима, например, при решении упругопластических задач.

2. В настоящее время к записи уравнений, отражающих физические явления, предъявляют целый ряд требований. Помимо основного требования, чтобы правильно сформулированные уравнения были представлены в инвариантном или общековариантном виде, немаловажное значение придают и следующему принципу: все входящие в уравнение компоненты (члены) должны находиться в гармоническом сочетании друг с другом, т. е. должны иметь структурную и функциональную ценность. Этому требованию в полной мере отвечают тензорные и матричные обозначения. Поэтому обозначения типа r, R, P, R_x, R_a и т. д. являются недостаточными. Видимо, этим можно объяснить их разнообразие. Следовало бы ввести обозначения типа r_{ij}. Коэффициенты ν_{ij} и μ_{ij} отмеченного недостатка не имеют.

3. С уменьшением толщины материала увеличивается погрешность при прямом определении величины R. В связи с этим при испытании тонколистовых материалов часто сначала рассчитывают деформации по длине и ширине, а затем, используя постоянство объема, вычисляют деформацию по толщине. По существу, сначала определяют коэффициенты μ_{ij}, а по ним находят R. Вряд ли это целесообразно.

4. Можно также отметить, что коэффициент R плохо снормирован, так как его значение меняется от 0 до ∞, а показатели μ_{ij} изменяются от 0 до 1.

При оценке влияния анизотропии на штампуемость листовых заготовок часто пользуются осредненными в плоскости листа деформационными показателями анизотропии $r_{ср}$, $\overline{\mu}$ и др., т. е. лист представляется как бы трансверсально-изотропным, а текстура – аксиальной. Такие осредненные коэффициенты называют показателями нормальной анизотропии (характеризующими степень ани-

зотропии листа относительно толщины) и определяют по следующим выражениям:

$$r_{ср} = \frac{r_0 + r_{45} + r_{90}}{3}; \quad r_{ср} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4};$$

$$r_{ср} = \frac{r_0 + r_{22,5} + r_{45} + r_{67,5} + r_{90}}{5} \qquad (1.7)$$

или, аналогично,

$$\overline{\mu} = \frac{\mu_{21} + 2\mu_1 + \mu_{12}}{4}. \qquad (1.8)$$

Здесь r_0; r_{90}; $r_{22,5}$; r_{45}; $r_{67,5}$; μ_{21}; μ_1, μ_{12} – показатели анизотропии соответственно вдоль и поперек направления прокатки, а также под углами 22°30', 45°, 67°30' к направлению прокатки.

Не вдаваясь в подробный анализ этих показателей, отметим, что выражения (1.7) неоднозначно оценивают анизотропию одного и того же листа, как может показаться на первый взгляд. Наиболее объективным здесь является показатель $\overline{\mu}$, определяемый по выражению (1.8).

В целом же деформационные коэффициенты анизотропии обладают рядом преимуществ по сравнению с показателями анизотропии первой группы:

1. Соотношения теории пластичности анизотропных сред приобретают более простой вид.

2. Дают подробную, достоверную информацию об анизотропии свойств металлов. Причем даже незначительные изменения в кристаллографической ориентировке листа с помощью R-фактора «схватываются» так же быстро, как и рентгеновским методом.

3. Позволяют анализировать соотношение деформаций в очаге и изменение величины параметров процессов пластического деформирования.

В заключение следует отметить, что обе группы показателей анизотропии, определяемые при механических испытаниях, характеризуются следующими основными недостатками:

1. Определяются достаточно точно только для пластичных материалов.

2. Не характеризуют анизотропию свойств листовой заготовки в исходном состоянии.

3. Все рассмотренные показатели (A_σ, F, G, H, R, μ_{ij}) являются феноменологическими интегральными характеристиками анизотропии листов. Они не показывают сущности явления, т. е. какими типами текстур данная анизотропия обусловлена.

Если на стадии учета анизотропии в расчетах процессов штамповки такой интегральной оценки достаточно, то для формирования в листах заданных значений анизотропии необходимо установить явную взаимосвязь ее коэффициентов с характеристиками текстуры и константами кристаллической решетки.

Заканчивая анализ существующих показателей, отметим, что помимо технических коэффициентов анизотропии используются и технологические характеристики. Например, часто об анизотропии листов судят по величине фестонов, образующихся при вытяжке цилиндрических стаканчиков.

Основываясь на проведенном анализе, в данном пособии в качестве технических показателей анизотропии будут использоваться коэффициенты поперечной деформации μ_{ij} и степень фестонообразования E.

1.3. Проявления анизотропии при деформировании заготовок и эксплуатации изделий

Анизотропия свойств с практической точки зрения может быть как полезной, так и вредной. Классическим примером неблагоприятного влияния анизотропии является образование фестонов при глубокой вытяжке листовых металлов (рис. 1.6). Полезное влияние текстуры и связанной с ней анизотропии может проявляться в улучшении технологической пластичности материала, уменьшении сопротивления деформации при обработке давлением,

повышении эксплуатационных характеристик и механических свойств. В частности, проблемой, связанной с анизотропией свойств, является и обработка давлением текстурованного материала. В зависимости от текстуры для одного и того же материала контактные напряжения с рабочими инструментами, распределение деформаций по возможным направлениям, упрочнение и пластичность могут сильно различаться. В некоторых случаях эти различия настолько существенны, что с технологической точки зрения материалы с одним химическим составом, но с различной текстурой не могут быть сопоставлены между собой.

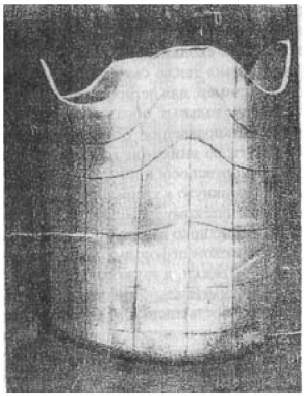


Рис. 1.6. Полуфабрикат из АДОМ, полученный вытяжкой

Для каждого из них требуется индивидуальная технология обработки, учитывающая их анизотропию. При этом кристаллографическая анизотропия оказывает значительное влияние на начальный участок кривой напряжение–деформация или на так называемые пластические свойства материала. Влияние же механической анизотропии из-за вытянутости зерен и наличия включений проявляется на конечном участке указанной кривой, что отражается на сопротивлении материала разрушению.

Помимо этого, кристаллографическая анизотропия особенно заметна при хрупком разрушении, так как скол образуется на наиболее выгодных кристаллографических плоскостях. Роль текстуры

наиболее очевидна в металлах с плотноупакованной гексагональной кристаллической решеткой. Эти материалы обладают хрупкими свойствами и ограниченными возможностями для скольжения.

Вязкость разрушения также связана с анизотропией свойств полуфабриката. Например, для легированной стали (18% Ni) вязкость разрушения продольных образцов вдвое превышает вязкость в поперечном направлении. Естественно, все эти факторы должны быть приняты во внимание при пластическом деформировании и оценке работоспособности деталей.

Вообще, способность текстурированного тела к пластическому деформированию является резко анизотропной. Особенно ярко влияние фактора анизотропии проявляется при пластическом деформировании листовых заготовок методами глубокой вытяжки, а также гибки, обтяжки, формовки и т. д. Так, при экспериментальном изучении влияния анизотропии свойств на способность листового металла к вытяжке, установлено наличие устойчивой связи величины предельной степени вытяжки с показателями анизотропии $R_{ср}$ – материалам с большими значениями $R_{ср}$ соответствует и лучшая штампуемость (рис. 1.7).

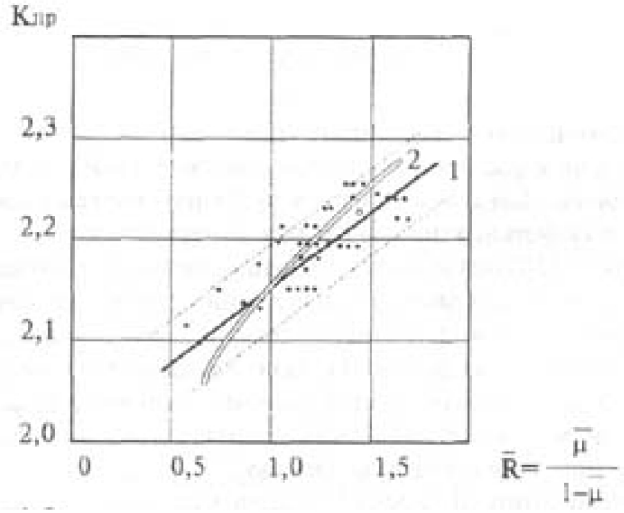


Рис. 1.7. Зависимость предельной степени вытяжки от показателя анизотропии

Характерными в этом отношении являются также эксперименты Р. Л. Вайтли, в которых он показал, что даже небольшое снижение показателей анизотропии листа приводит к резкому увеличению брака (рис. 1.8). Там же отмечается, что увеличение штампуемости путем использования «специфических» типов анизотропии более эффективно, чем повышение пластичности материала.

При изучении явления фестонообразования установлено, что фестоны при вытяжке образуются в направлении наибольших коэффициентов анизотропии. Однако систематического сопоставления изменения показателей анизотропии и характеристик фестонообразования в условиях серийного производства для многих партий листов не проводилось.

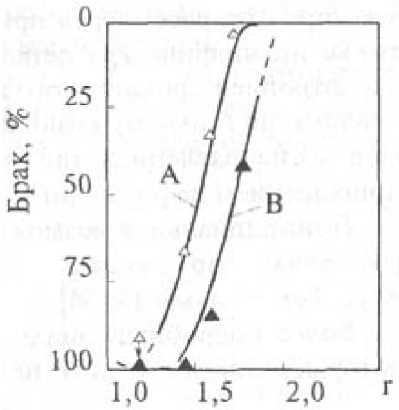


Рис. 1.8. Влияние анизотропии на процент брака при штамповке стальных листов: А – вытяжка кожуха пылесоса квадратной формы; В – вытяжка автомобильной панели

Также является установленным фактом, что расположение фестонов на изделиях зависит от степени обжатия при прокатке. Так, у стальных листов, прокатанных со степенью деформации до 30%, фестоны образуются под углом 45° к оси проката, а при больших – вдоль и поперек листа. Объяснение причины изменения направления фестонообразования авторами не приводилось. Однако этот факт заслуживает более тщательного и углубленного рас-

смотрения, так как он указывает на принципиальную возможность изменения характера анизотропии в процессе производства листов.

Наряду с установленными экспериментально фактами влияния анизотропии на пластическое формоизменение листов проводилось и теоретическое обобщение полученных данных. При этом рассматривались в основном две проблемы: одна из них связана с определением предельно допустимой степени деформации в том или ином процессе листовой штамповки, а другая – с изменением геометрии изделий и заготовок.

Одними из первых здесь являются исследования Р. Хилла, в которых он рассмотрел причины фестонообразования при вытяжке цилиндрических деталей и показал, что оно обусловлено анизотропией прокатанного листа. Причем выступы (фестоны) и впадины по верхнему краю колпачков (см. рис. 1.6) формируются в тех направлениях, где главные оси напряжений совпадают с приращением деформаций. Принципиальная возможность учета фактора анизотропии в расчетах процессов глубокой вытяжки показана А. Д. Томленовым.

Для проведения более подробного анализа используется запись условия пластичности в виде

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = Y(R_{ср})G_0(1 - n\varepsilon), \qquad (1.9)$$

где $Y(R_{ср})$ – функция коэффициента анизотропии, установили повышение степени вытяжки с увеличением среднего показателя анизотропии в плоскости листа. Однако полученная зависимость $K_{пр} = w(R_{ср})$, хотя и отражает тенденцию увеличения $K_{пр}$ с ростом $R_{ср}$, но имеет ощутимые расхождения с экспериментами.

В. Д. Головлев показал влияние анизотропии как на напряженное состояние фланца заготовки, так и на величину допустимых напряжений в опасном сечении. В итоге им предложена следующая формула для определения степени вытяжки:

$$K_{\text{пр}} = \exp\left[\frac{(1+R_{\text{ср}})(2+R_{\text{ср}})}{2(1+R_{\text{ср}})}\ln \overline{K}_{\text{пр}}\right], \qquad (1.10)$$

где $\overline{K}_{\text{пр}}$ – предельная степень вытяжки изотропного материала.

Однако влияние реальных факторов процесса (трения, упрочнения, прижима) данная формула в явном виде не учитывает.

В работах С. П. Яковлева и его учеников указывается, что предельный коэффициент вытяжки $m_{\text{пр}}$ определяется минимальным значением показателя анизотропии $R_{\min}$ в плоскости листа:

$$m_{\text{пр}}^{\text{т}} = \exp\tfrac{1}{4}\left[\tfrac{\pi}{2}(1+\varphi)tg\omega_0 + (\varphi tg^2\omega_0 - 1)/(1+tg^2\omega_0)\right]. \qquad (1.11)$$

С другой стороны, штампуемость коррелирует более близко со средним показателем анизотропии $R_{\text{ср}}$, чем с его минимальным значением.

Анализируя влияние анизотропии на $K_{\text{пр}}$ уже в комплексе с трением и упрочнением материала, профессор В. В. Уваров получил следующую формулу для установления предельной степени вытяжки:

$$K_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{\sqrt{1+\mu_{\text{ср}}^2}} - \frac{1}{2a_{\text{м}}+1}\right]\frac{1}{\alpha\eta\varphi_1} + \varphi_1 . \qquad (1.12)$$

Выражение (1.12) уже лучше согласуется с экспериментами по вытяжке листов с различной степенью исходной анизотропии, хотя не учитывается разница показателей в плоскости листа.

Серьезное внимание исследователей уделяется вопросам устойчивости фланца заготовки при вытяжке и гидростатическом выпучивании. В частности, отмечается, что «расчеты в предположении о трансверсальной изотропности металла показывают, что увеличение коэффициента анизотропии сопровождается увеличением критического давления, уменьшением деформации по толщине в полюсе лунки и уменьшением неравномерности распределения деформации вдоль радиуса».

Напряженно-деформированное состояние заготовок при штамповке ванн, сложных автокузовных деталей, изготовляемых из анизотропных сплавов, рассмотрено в работах многих исследователей. Имеющиеся расхождения расчетных и экспериментальных данных в их работах объясняются тем, что при теоретическом анализе процесса авторы принимали лист как бы трансверсально-изотропным, хотя в действительности между значениями коэффициентов анизотропии в направлениях 0, 45 и 90° наблюдаются существенные различия.

Исследование процессов формоизменения анизотропных листов при различных схемах деформации изгибом показывает, что в зависимости от величины характеристик анизотропии изменяется напряженно-деформированное состояние, предельное формоизменение, форма заготовок, пружинение и другие параметры.

Так, Г. С. Казакевич, исходя из теории Р. Хилла, одним из первых рассмотрел характер распределения напряжений при пластическом изгибе и получил следующие формулы для расчета напряжения в зоне растяжения:

$$\sigma_\rho = -\left(\sqrt{\frac{H+F}{FG+GH+HF}}+\lambda\right)\ln\frac{R_\text{Н}}{\rho}+\lambda\rho_\text{н}\frac{R_\text{Н}-\rho}{R_\text{Н}\rho},$$

$$\sigma_\theta = \left(\sqrt{\frac{H+F}{FG+GH+HF}}+\lambda\right)\left(1-\ln\frac{R_\text{Н}}{\rho}\right)-\lambda\ln\frac{\rho_\text{н}}{R_\text{Н}}. \qquad (1.13)$$

Здесь соответственно $R_\text{Н}$, $r_\text{вн}$, $\rho_\text{н}$ – наружный, внутренний и нейтральный радиусы, а λ – модуль упрочнения, определяемый из приближенной прямой упрочнения второго рода. Для проведения анализа изгиба листа из анизотропного материала некоторые авторы используют условие пластичности Мизеса-Хилла в цилиндрической системе координат. Принимая случай плоской деформации, А. А. Ширшов записывает условие пластичности в следующем виде: $\overline{\sigma} = \pm K(\sigma_t - \sigma_r)$,

где $$K = \sqrt{\frac{2}{3}\frac{F_0G_0 + G_0H_0 + H_0F_0}{(F_0 + G_0 + H_0)(F_0 + G_0)}}\,. \qquad (1.14)$$

Решая это уравнение совместно с условием равновесия, он получает при $r_0 \le r_1 \le r_2$

$$\sigma_r = -\frac{1}{K}\int_{r_0}^{r_2}\frac{\overline{\sigma}dr}{r}, \quad \sigma_t = \frac{\overline{\sigma}}{K} + \sigma_r\,. \qquad (1.15)$$

Здесь r_1, r_2, r_0 – радиусы кривизны внутренней, наружной и граничной поверхностей.

Сделанный А. А. Ширшовым вывод о незначительном влиянии анизотропии на процесс изгиба недостаточно обоснован и справедлив лишь для материалов со слабой анизотропией. Это видно хотя бы из того, что величина К в выражении (1.15) может меняться в довольно широком диапазоне в зависимости от соотношения параметров анизотропии.

Наиболее полно влияние анизотропии на гибку листов рассмотрено профессором Ю. М. Арышенским. На основе разработанного им варианта теории пластичности анизотропных сред проанализирован ряд параметров гибки широкого листа моментом и гибки с растяжением. В частности, получены выражения для определения напряженного состояния, изгибающих моментов, усилий, минимального относительного радиуса гиба, точностных параметров. Как показано в его работах, анизотропия свойств оказывает существенное влияние и на процессы обтяжки и формовки.

При производстве трубчатых деталей широко используют заготовки, сваренные из листов. При этом часть таких заготовок сразу направляется на штамповку, а часть подвергается холодной прокатке на станах ХПТ. В обоих случаях приобретенный характер анизотропии практически не меняется и оказывает определенное влияние на параметры формоизменения труб. Поэтому ряд исследователей в своих работах, рассматривали влияние анизотропии на напряженное состояние, характер течения металла, предельное

формоизменение и другие параметры обжима и раздачи трубных заготовок.

Так, воспользовавшись теорией деформируемости В. Л. Колмогорова, получено следующее выражение для оценки предельного формоизменения в операциях обжима и раздачи, справедливое в условиях линейного напряженного состояния:

$$\ln r_{\text{пр}}/r_0 = A(\varepsilon_i)_{\text{р}}\sqrt{\mu_{21}/\mu_{12}}\,\exp\left(\pm B\sqrt{\mu_{12}/\mu_{21}}\right). \qquad (1.16)$$

Здесь знак «минус» берется при расчете операции раздачи, «плюс» – обжима; $(\varepsilon_i)_{\text{р}} = \ln 1/\left(1-\psi_{\text{р}}\right)$; A, B - коэффициенты аппроксимации диаграммы пластичности. В. Д. Кухарь подробно проанализировал влияние анизотропии на напряженное состояние и получил ряд расчетных формул для определения технологических параметров при обратном выдавливании, магнитно-импульс-ной штамповке, отбортовке и продольной рифтовке труб. Все соотношения доведены до уровня инженерного применения.

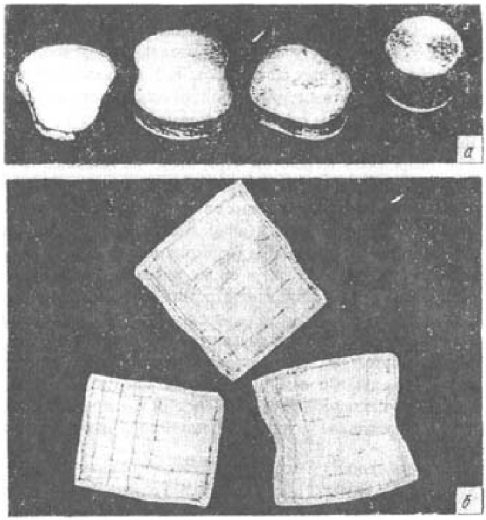


Рис. 1.9. Изменение формы цилиндрических (*а*) и призматических (*б*) образцов при осадке без трения в зависимости от направления их вырезки из горячекатаной плиты

Анизотропия свойств проявляется не только в процессах листовой штамповки металлов и сплавов. Анизотропия свойств весьма значительно изменяет конечную форму вырезанных из горячекатаных плит цилиндрических и призматических образцов, подвергнутых осадке без трения между параллельными плитами (рис. 1.9).

В этой же работе приведена оценка влияния анизотропии на величину давления металла на валки при листовой прокатке. Известно, что в расчетные формулы по определению величины давления металла $P_{из}$ на валки входит приведенный предел упругости материала K, учитывающий схему плоской деформации. Для изотропной среды K определяется следующим образом:

$$K_{из} = \frac{2\sigma_т}{\sqrt{3}},$$

где $\sigma_т$ – предел текучести изотропного материала.

При анализе процесса прокатки анизотропной полосы (рис. 1.10) используется условие пластичности ортотропных сред, которое имеет следующий вид:

$$\sigma_{i_1} = \sqrt{\mu_{21}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2 + \left(\frac{1}{\mu_{12}}-1\right)(\sigma_2-\sigma_3)^2 + \left(\frac{1}{\mu_{21}}-1\right)(\sigma_3-\sigma_1)^2} = \sigma_{т_1} \quad (1.17)$$

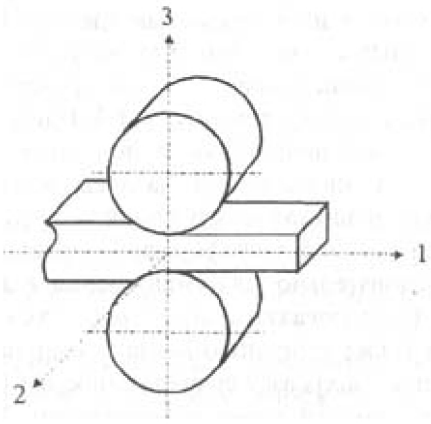


Рис. 1.10. Направления симметрии свойств при прокатке

Учитывая, что листовая прокатка осуществляется практически в условиях плоской деформации, связь между главными напряжениями запишется следующим образом:

$$\sigma_2 = \mu_{12}\sigma_1 + (1-\mu_{12})\sigma_3 .$$

Подставляя в условие пластичности вместо σ_2 его выражение через σ_1 и σ_3, получим

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{T_1} \Big/ \sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}} ,$$

где $\sigma_{T_1} \Big/ \sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}} = K_{орт}$ – приведенный предел упругости материала с учетом анизотропии; $\sigma_{т_1}$ – предел текучести анизотропного материала в направлении прокатки.

Отсюда очевидно, что при прочих равных условиях величина давления изотропного $P_{из}$ и ортотропного $P_{орт}$ материалов зависит от соответствующей величины K, т. е. $P_{орт}/P_{из} = K_{орт}/K_{из}$. Подставляя соответствующие значения K, получим, что

$$P_{орт}/P_{из} = \sqrt{3} \Big/ 2\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}} . \qquad (1.18)$$

Это выражение при изотропном материале равно единице. Из выражения (1.18) видно, что при малых μ_{12} и μ_{21} усилие прокатки по сравнению с изотропным материалом уменьшается. Так, для алюминиевых сплавов оно близко к 0,9. В том же случае, когда $\mu_{ij} > 0{,}5$, усилие возрастает. При прокатке титановых сплавов отношение $P_{орт}/P_{из}$ доходит до 1,3. Наглядно характер зависимости контактных напряжений от показателя анизотропии трансверсально-изотропного материала представлен на рис. 1.11. В то же время, сравнивая между собой коэффициенты μ_{12} и μ_{21} отметим: если $\mu_{ij} < 0{,}5$, то деформация предпочтительно идет по толщине. Следовательно, для уменьшения Р желательно у сляба или полосы иметь показатель $\mu_{21} < \mu_{12}$. Такой вид анизотропии препятствует также уширению листа при прокатке.

Анизотропия оказывает существенное влияние на напряженное состояние деталей и при эксплуатации. Если поле рабочих напряжений благоприятно сочетается с анизотропией свойств, то достигается более эффективное использование изделий. Так, исследования сплава ХН60 показали, что если пружина работает на изгиб и кручение, то полуфабрикаты для нее следует изготавливать волочением, а если только на кручение, то прокаткой. В этих случаях наилучшим образом сочетаются текстура (анизотропия) и характер деформации пружины в процессе ее эксплуатации.

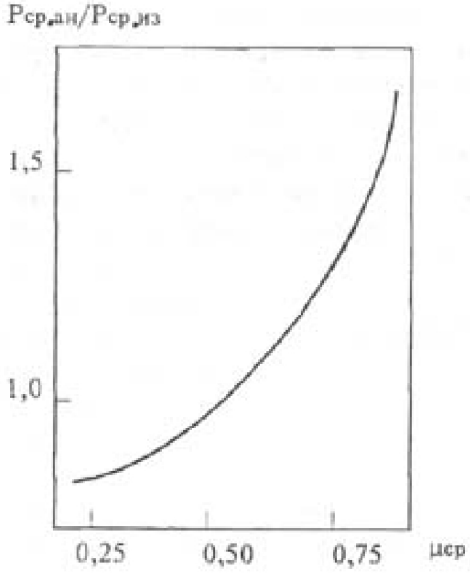


Рис. 1.11. Влияние анизотропии на контактное давление при прокатке

При изучении титанового сплава Ti-6A14V было замечено, что упрочнение текстурой совместно с термообработкой повышает его прочность на 41% по сравнению с изотропным сплавом того же состава. Использование текстурованного титана для сосудов, работающих под внутренним давлением, позволило повысить напряжение на 33%. Разработан специальный способ отливки турбинных лопаток, обеспечивающий получение структуры, когда зерна вытя-

нуты вдоль действия силы. В результате этого рабочая температура лопаток повышена на 70–90 °С, а скорость ползучести уменьшается на 50%.

При применении бериллия в конструкциях следует учитывать анизотропию его свойств. Дело в том, что у бериллиевых полуфабрикатов пластичность в перпендикулярном направлении к плоскости проката очень низка, и их следует использовать для деталей, которые не сильно напряжены в этом направлении (панели солнечных элементов, приборные стойки, секции верхних ступеней космических аппаратов и т. п.). Там же отмечается, что применение бериллия в зеркалах оптических приборов является перспективным. Однако наряду с высокими качествами отмечается отрицательное воздействие на зеркало термического расширения и анизотропии бериллия.

Большое народнохозяйственное значение имеет факт использования резкой анизотропии ферромагнетиков, в частности, трансформаторной стали. Помимо благоприятной текстуры необходимо иметь такую форму зерна, которая обеспечивает минимальный размагничивающий эффект. Велика роль рационально сформированной текстуры и анизотропии свойств при производстве конденсаторной фольги, емкость которой при благоприятной ориентировке кристаллов увеличивается в 2–3 раза.

Можно было бы привести еще целый ряд примеров, но и из изложенного уже ясно, что анизотропия свойств существенно влияет на параметры формообразования заготовок и эксплуатации изделий. При правильном использовании она является серьезным резервом интенсификации процессов изготовления деталей, повышения их качества и надежности. Следовательно, во многих случаях необходимо стремиться к получению не изотропных материалов, а листов, труб и профилей с заданным характером анизотропии.

1.4. Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные виды анизотропии материалов.

2. Как влияет анизотропия на характер напряженно-деформированного состояния тела?

3. Какие особенности накладывает анизотропия на структуру уравнений теории пластичности?

4. Как обозначаются кристаллографические направления и плоскости?

5. Что включает в себя понятие семейство плоскостей?

6. Как по пространственной эпюре какого-либо свойства отличить изотропное тело от анизотропного?

7. Что обладает большей анизотропией, монокристаллы или поликристаллы одних и тех же металлов?

8. Какими свойствами обладает трансверсальноизотропный материал? Приведете примеры таких материалов.

9. Какими показателями учитывается анизотропия пластических свойств?

10. Что показывает показатель μ_1?

11. К чему приводит неучет анизотропии в процессах обработки металлов давлением?

ГЛАВА 2

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

2.1. Основные положения теории пластичности анизотропных сред

При анализе влияния анизотропии на параметры процессов деформирования листовых материалов здесь используется вариант теории пластичности ортотропных сред, в основе которого лежит мгновенное условие текучести Р. Мизеса:

$$F = \sigma_u^2 = k_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} = \text{const}\,, \tag{2.1}$$

где σ_u – обобщенное напряжение, представляющее собой совместный инвариант тензора напряжений σ_{ij} и материального тензора κ_{ijk}. Материальный тензор обладает определенной симметрией, что позволяет уменьшить число независимых компонент. Так

$$k_{ijkl} = k_{klij};\;\; k_{ijkl} = k_{ijlk};\;\; k_{ijkl} = k_{jikl};\; k_{ijkl}\delta_{kl} = 0\,, \tag{2.2}$$

δ_{kl} – единичный тензор. Из (2.2) следует

$$\begin{aligned} &k_{1111} + k_{1122} + k_{1133} = 0;\\ &k_{2211} + k_{2222} + k_{2233} = 0;\\ &k_{3311} + k_{3322} + k_{3333} = 0. \end{aligned} \tag{2.3}$$

Из ассоциированного закона течения находим уравнения связи между приращениями деформаций и напряжениями

$$d\varepsilon_{ij} \frac{dq}{\sigma_u} k_{ijkl}\sigma_{kl}\,, \tag{2.4}$$

где

$$(dq)^2 = a_{ijkl}de_{ij}de_{kl};\;\; q = \int\sqrt{a_{ijkl}de_{ij}de_{kl}}\,. \tag{2.5}$$

Здесь интегрирование ведется вдоль пути деформирования: dq – имеет смысл интенсивности накопленных деформаций; q – обобщенная деформация (параметр Удквиста); a_{ijkl} – обратный по отношению к k_{ijkl} материальный тензор.

$$a_{ijkl}k_{ijk} = T_{ijkl}\,, \tag{2.6}$$

где $T_{ijkl} = \frac{1}{2}\left(\delta_{il}\delta_{jm} + \delta_{im}\delta_{jl}\right) - \frac{1}{3}\delta_{ij}\delta_{kl}$ – девиаторная единица.

Как и у всех существующих теорий пластичности принято, что имеется инвариантная к виду напряженного состояния и пути деформирования функциональная связь

$$\sigma_u = \sigma_u(q)\,. \tag{2.7}$$

Распишем выражение (2.4) по компонентам:

$$de_{ij} = \frac{dq}{\sigma_u}\left(k_{ij1l}\sigma_{1l} + k_{ij2l}\sigma_{2l} + k_{ij3l}\sigma_{3l}\right) =$$

$$= \frac{dq}{\sigma_u}(k_{ij11}\sigma_{11} + k_{ij12}\sigma_{12} + k_{ij13}\sigma_{13} + k_{ij21}\sigma_{21} + k_{ij22}\sigma_{22} + k_{ij23}\sigma_{23} +$$

$$+ k_{ij31}\sigma_{31} + k_{ij32}\sigma_{32} + k_{ij33}\sigma_{33}) = \frac{dq}{\sigma_u}(k_{ij11}\sigma_{11} + k_{ij22}\sigma_{22} + k_{ij33}\sigma_{33} +$$

$$+ 2k_{ij12}\sigma_{12} + 2k_{ij23}\sigma_{23} + 2k_{ij31}\sigma_{31})\,. \tag{2.8}$$

Рассмотрим из (2.8) два уравнения:

$$de_{11} = \frac{dq}{\sigma_u}(k_{1111}\sigma_{11} + k_{1122}\sigma_{22} + k_{1133}\sigma_{33} +$$

$$+ 2k_{1112}\sigma_{12} + 2k_{1123}\sigma_{23} + 2k_{1131}\sigma_{31});$$

$$de_{12} = \frac{dq}{\sigma_u}(k_{1211}\sigma_{11} + k_{1222}\sigma_{22} + k_{1233}\sigma_{33} +$$

$$+ 2k_{1212}\sigma_{12} + 2k_{1223}\sigma_{23} + 2k_{1231}\sigma_{31})\,. \tag{2.9}$$

В случае ортотропного тела, а таковыми и являются листовые материалы, в уравнениях исчезают члены материального тензора, у которых индексы либо неодинаковы, либо попарно не равны.

Тогда уравнения (2.9) запишутся в виде

$$de_{11} = \frac{dq}{\sigma_u}(k_{1111}\sigma_{11} + k_{1122}\sigma_{22} + k_{1133}\sigma_{33}),$$

$$de_{12} = \frac{dq}{\sigma_u} k_{1212}\sigma_{12}\,. \qquad (2.10)$$

Компоненты k_{ijkl} можно связать с главными осями анизотропии листов, обозначив их через K_{ijkl}.

Здесь ось 1 – направлена вдоль проката; 2 – поперек, а 3 – по толщине проката.

Взаимосвязь K_{ijkl} и k_{ijkl} при повороте их вокруг оси 3 запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
k_{1111} &= K'_{1111} = K_{1111}\cos^{2\cdot}\alpha + K_{2222}\sin^2\alpha - \\
&\quad -(K_{1111} + K_{2222} - 2K_{1122} - 4K_{1212})\sin^2\alpha\cos^2\alpha; \\
k_{2222} &= K'_{2222} = K_{1111}\sin^{2\cdot}\alpha + K_{2222}\cos^2\alpha - \\
&\quad -(K_{1111} + K_{2222} - 2K_{1122} - 4K_{1212})\sin^2\alpha\cos^2\alpha; \\
k_{3333} &= K'_{3333} = K_{3333}; \qquad (2.11) \\
k_{1122} &= K'_{1122} = K_{1122} + (K_{1111} + K_{2222} - \\
&\quad -2K_{1122} - 4K_{1212})\sin^2\alpha\cos^2\alpha; \\
k_{3311} &= K'_{3311} = K_{1133}\cos^{2\cdot}\alpha + K_{2233}\sin^2\alpha.
\end{aligned}$$

Наибольшее применение с практической точки зрения получила теория пластичности, записанная в главных осях анизотропии. В случае ортотропной среды условие пластичности в главных осях анизотропии можно записать в виде:

$$\sigma_u^2 = K_{1111}\sigma_{11}^2 + K_{2222}\sigma_{22}^2 + K_{3333}\sigma_{33}^2 + \\ + 2(K_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + K_{2233}\sigma_{22}\sigma_{33} + K_{3311}\sigma_{33}\sigma_{11}) + \\ + 4(K_{1212}\sigma_{12}^2 + K_{2323}\sigma_{23}^2 + K_{3131}\sigma_{31}^2). \qquad (2.12)$$

Эта запись может быть упрощена, если воспользоваться следующими дополнительными связями между компонентами материального тензора:

$$K_{1212} = K_{2323} = K_{3131};$$

$$\left(\frac{K_{iiii}}{2K_{iijj}} - \frac{2}{3}\right)\left(\frac{K_{jjjj}}{2K_{iijj}} - \frac{2}{3}\right) = \frac{K_{iijj}}{2K_{ijij}} + \frac{1}{3}$$

и соотношениями (2.3). Тогда

$$\sigma_u^2 = -K_{1122}(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 - K_{2233}(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 - \\ - K_{3311}(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 4K_{1212}\left(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2\right). \qquad (2.13)$$

По аналогии

$$(dq)^2 = -A_{1122}(de_{11} - de_{22})^2 - A_{2233}(de_{22} - de_{33})^2 - \\ - A_{3311}(de_{33} - de_{11})^2 + 4A_{1212}\left(de_{12}^2 + de_{23}^2 + de_{31}^2\right). \qquad (2.14)$$

В случае изотропной среды материальные тензоры становятся шаровыми, а их компоненты приобретают постоянное значение. Тогда получим известные уравнения:

$$\sigma_u^2 = \sigma_i^2 = \frac{1}{2}\left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \ldots + 6\left(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2\right)\right] \\ (dq)^2 = \frac{2}{9}\left[(de_{11} - de_{22})^2 + \ldots + 6\left(de_{12}^2 + de_{23}^2 + de_{31}^2\right)\right]. \qquad (2.15)$$

В случае использования представления компонент материального тензора в форме

$$K_{iiij} = t_0\left(\frac{2}{3} + k\lambda_i^2\right);$$
$$K_{iijj} = t_0\left(-\frac{1}{3} + k\lambda_i\lambda_j\right), \quad (i \neq j); \tag{2.16}$$
$$K_{ijij} = t_0; \quad (i \neq j),$$

обобщенное напряжение ортотропного тела примет следующий вид:

$$\sigma_u^2 = \frac{t_0}{3}\left[(\sigma_{11} - 3\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6\left(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2\right)\right] -$$
$$- t_0 k\left[\lambda_1\lambda_2(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \lambda_3\lambda_1(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2\right] \tag{2.17}$$

Здесь λ_{ij} – нормированный девиатор, отражающий деформационное воздействие на металл; k – скаляр, характеризующий природу материала.

Придавая то или иное значение t_0, получим различные интенсивности напряжений. Например, при $t_0 = 3/2$ имеем интенсивность нормальных напряжений σ_i. Первая часть (2.17) отражает как бы изотропную часть, а вторая показывает, за счет чего возникает анизотропия. Хотя это чисто математическая запись.

В общем случае ортотропной среды существует деформационная мера анизотропии. Если ввести в рассмотрение девиатор начальной деформации λ_{ij}^0, приведенной к деформационной мере, то получим:

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^0 + e_{ij}.$$

Отсюда ясно, почему в определенных случаях показатели анизотропии практически остаются постоянными. Так, при прокатке в листе возникает значительная анизотропия от больших значений λ_{ij}^0. Поэтому при последующем деформировании незначительные величины деформации e_{ij}, характерные обычно для холодной листовой штамповки, уже не вызывают существенных изменений ани-

зотропии, и компоненты K_{ijkl} можно принять постоянными. Учитывая также пропорциональность нагружения, физические уравнения можно для подобных случаев записать уже через полные деформации:

$$\begin{aligned} e_{11} &= \lambda\left(K_{1111}\sigma_{11} + K_{1122}\sigma_{22} + K_{1133}\sigma_{33}\right), \\ e_{22} &= \lambda\left(K_{2211}\sigma_{11} + K_{2222}\sigma_{22} + K_{1133}\sigma_{33}\right), \\ e_{33} &= \lambda\left(K_{3311}\sigma_{11} + K_{3322}\sigma_{22} + K_{3333}\sigma_{33}\right). \end{aligned} \tag{2.18}$$

Рассматривая линейное растяжение вдоль главных осей анизотропии, компоненты материального тензора в (2.18) можно выразить через коэффициенты поперечной деформации μ_{ij} (показатели анизотропии):

$$-\frac{e_i}{e_j} = \mu_{ij} = -\frac{K_{iijj}}{K_{jjjj}}. \tag{2.19}$$

Всего вдоль главных осей анизотропии можно определить шесть показателей μ_{ij} из которых независимыми являются только два. При выполнении условия несжимаемости между коэффициентами анизотропии реализуются следующие взаимосвязи:

$$\begin{gathered} \mu_{21} + \mu_{31} = 1; \quad \mu_{13} + \mu_{23} = 1; \quad \mu_{12} + \mu_{32} = 1; \\ \mu_{12}\mu_{23}\mu_{31} = \mu_{21}\mu_{32}\mu_{13}; \\ \frac{\mu_{31}}{\mu_{13}} = 1 - 2\mu_{21} + \frac{\mu_{21}}{\mu_{12}} \quad \textit{и т.д.} \end{gathered} \tag{2.20}$$

Кроме этого при анализе процессов листовой штамповки часто используется показатель анизотропии, определенный в плоскости листа под углом 45° к направлению прокатки μ_1.

С учетом полученных соотношений уравнение для интенсивности напряжений запишется следующим образом:

$$\sigma_{i1} = \sqrt{\mu_{21}}\sqrt{(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + \left(\frac{1}{\mu_{12}}-1\right)(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + \left(\frac{1}{\mu_{21}}-1\right)(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + \\ + \left(\frac{1}{\mu_{12}}-\frac{1}{\mu_{21}}-2\right)\frac{1+\mu_1}{1-\mu_1}\left(\sigma_{12}^2+\sigma_{23}^2+\sigma_{31}^2\right)}. \quad (2.21)$$

Интенсивность деформации определится так:

$$e_{i1} = \sqrt{\frac{\mu_{12}}{1-\mu_{12}\mu_{21}}\left(\frac{e_{11}^2}{\mu_{12}} + 2e_{11}e_{22} + \frac{e_{22}^2}{\mu_{21}}\right) + \\ + \frac{4(1-\mu_1)\mu_{21}}{(1+\mu_1)\left(\frac{1}{\mu_{21}}+\frac{1}{\mu_{12}}-2\right)}\left(e_{12}^2+e_{23}^2+e_{31}^2\right)}. \quad (2.22)$$

Напряженное состояние заготовок в листоштамповочных операциях характеризуется тем, что напряжение по толщине материала σ_{33} всегда, практически, перпендикулярно плоскости листа, т. е. совпадает с главной осью анизотропии 3. Следовательно, $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$ и условие пластичности в главных осях анизотропии будет иметь вид:

$$F = \tfrac{1}{2}[K_{1111}\sigma_{11}^2 + K_{2222}\sigma_{22}^2 + K_{3333}\sigma_{33}^2 + 2(K_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + \\ + K_{2233}\sigma_{22}\sigma_{33} + K_{3311}\sigma_{33}\sigma_{11}) + 4K_{1212}\sigma_{12}^2]. \quad (2.23)$$

Отсюда путем преобразования компонент материального тензора при повороте вокруг оси 3 получены следующие, приемлемые для листовой штамповки уравнения связи между напряжениями и деформациями:

$$e_{11} = \frac{\mu_{13}e_i}{\mu_{31}\sigma_i}\left[(\sigma_{11}-\sigma_{33}) - \mu_{21}(\sigma_{22}-\sigma_{33})\right], \\ e_{22} = \frac{\mu_{23}e_i}{\mu_{32}\sigma_i}\left[(\sigma_{22}-\sigma_{33}) - \mu_{12}(\sigma_{11}-\sigma_{33})\right], \quad (2.24) \\ e_{33} = \frac{e_i}{\sigma_i}\left[(\sigma_{33}-\sigma_{22}) - \mu_{13}(\sigma_{11}-\sigma_{22})\right].$$

Иногда при решении задач удобнее пользоваться уравнениями связи, записанными через разность нормальных напряжений:

$$\sigma_{11}-\sigma_{22}=\frac{\mu_{12}}{1-\mu_{12}\mu_{21}}\frac{\sigma_{i1}}{e_{i1}}\left[\left(\frac{1}{\mu_{12}}-1\right)e_{11}-\left(\frac{1}{\mu_{21}}-1\right)e_{22}\right],$$
$$\sigma_{22}-\sigma_{33}=\frac{\mu_{12}}{1-\mu_{12}\mu_{21}}\frac{\sigma_{i1}}{e_{i1}}\left[\left(\frac{1}{\mu_{21}}-1\right)e_{22}-e_{33}\right], \qquad (2.25)$$
$$\sigma_{33}-\sigma_{11}=\frac{\mu_{12}}{1-\mu_{12}\mu_{21}}\frac{\sigma_{i1}}{e_{i1}}\left[e_{33}-\left(\frac{1}{\mu_{21}}-1\right)e_{11}\right].$$

В случае плоской деформации $e_{22} = e_{21} = e_{23} = 0$ условие пластичности (2.21) можно представить следующим образом:

$$\left(\frac{\sigma_{11}-\sigma_{33}}{2K_a}\right)^2+\sigma_{13}^2=\tau_s^2, \qquad (2.26)$$

где $K_a=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1+\mu_2}{(1-\mu_2)(1-\mu_{21}\mu_{12})}}$ – переходный коэффициент;

$\tau_s=\sigma_{s1}\sqrt{(1-\mu_2)/(1+\mu_2)}$ – предел текучести на сдвиг; μ_2 – показатель анизотропии под углом 45° к осям 2 и 3.

2.2. Влияние анизотропии на взаимосвязь показателей напряженного и деформированного состояний

Рассматриваемые операции листовой штамповки выполняются в холодном состоянии и при скоростях, соответствующих статическому нагружению. Следовательно, при анализе предельно допустимой деформации и других параметров в них целесообразно принять за основу схему напряженно-деформированного состояния, а затем, базируясь на ней, установить влияние различных факторов, в данном случае величины и характера анизотропии свойств материала. Напряженное и соответствующее ему деформированное состояние в точке тела характеризуется тензорами напряжений и деформаций. При решении задач в теории пластичности тензор на-

пряжений обычно раскладывают на два – шаровой (обуславливающий объемную упругую деформацию) и девиатор (характеризующий пластическое течение материала):

$$T_\sigma = T_{\sigma 0} + D_\sigma \tag{2.27}$$

Для удобства анализа различных схем напряженных состояний С. И. Губкин представил связь (2.27) в безразмерных величинах. Для этого он разделил все компоненты тензоров на инвариантную величину – октаэдрическое касательное напряжение τ_i. Введя следующие обозначения:

$$\sigma_k^0 = \frac{\sigma_k}{\tau_i}, \quad \sigma^0 = \frac{\sigma_{ср}}{\tau_i} \quad и \quad d_k = \frac{\sigma_k}{\tau_i}, \tag{2.28}$$

он записал:

$$\sigma_k = \sigma^0 + d_k. \tag{2.29}$$

Здесь $\sigma_{ср} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – среднее напряжение. В монографии А. А. Ильюшина указывается, что компоненты d_k можно представить следующим образом:

$$\overline{d} = \pm\frac{3-\nu_\sigma}{\sqrt{2\left(3+\nu_\sigma^2\right)}}; \quad \overline{d} = \pm\frac{2\nu_\sigma}{\sqrt{2\left(3+\nu_\sigma^2\right)}}; \quad \overline{d} = \pm\frac{3+\nu_\sigma}{\sqrt{2\left(3+\nu_\sigma^2\right)}}. \tag{2.30}$$

Тогда, с учетом (2.30), компоненты тензора напряжений (2.29) можно записать:

$$\begin{aligned}
\sigma_1^0 &= \sigma_0 + \frac{3-\nu_\sigma}{\sqrt{2\left(3+\nu_\sigma^2\right)}}, \\
\sigma_1^0 &= \sigma_0 + \frac{2\nu_\sigma}{\sqrt{2\left(3+\nu_\sigma^2\right)}}, \\
\sigma_1^0 &= \sigma_0 + \frac{-3-\nu_\sigma}{\sqrt{2\left(3+\nu_\sigma^2\right)}},
\end{aligned} \tag{2.31}$$

где $\nu_\sigma = \dfrac{\sigma_2 - \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}{\dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}$ – показатель напряженного состояния Лоде-Надаи.

Таким образом, уравнения (2.31) показывают, что любое напряженное состояние тела может быть полностью охарактеризовано относительным средним давлением σ_0 и показателем ν_σ.

Переходя к процессам листовой штамповки, для которых характерна схема плоского напряженного состояния, т. е. одно из $\sigma_k^0 = 0$, следует отметить, что напряженное состояние здесь может характеризоваться любым из этих показателей: как σ_0, так и ν_σ, который, в свою очередь, может быть определен через деформации.

Различные показатели напряженных состояний математически выражаются через инварианты полевых тензоров. Это можно сказать и о показателях деформированного состояния. Когда же анализируются конкретный процесс и конкретный штампуемый материал, то рассматривается уже механическая схема деформации, т. е. напряженное и деформированное состояния связываются между собой. Если при этом рассматривается изотропный материал, для которого характерно равенство показателей напряженного и деформированного состояния, то задача решается просто, так как $\nu_\sigma = \nu_\varepsilon$, а компоненты материального тензора в анализе не участвуют. Другими словами, при определенном напряжении будут известны и деформации независимо от свойств штампуемого металла. На этой основе построена С. И. Губкиным диаграмма видов деформированных состояний.

При определении напряженно-деформированного состояния анизотропного материала используются уравнения, включающие показатели материального тензора. Следовательно, взаимосвязь между ν_σ и ν_ε будет иной. Чтобы оценить влияние на эту взаимосвязь анизотропии, запишем показатель ν_σ в следующем виде:

$$\nu_\sigma = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_3 - \sigma_1}, \quad (\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3), \tag{2.32}$$

Заменив разности главных напряжений в (2.32) через деформации и коэффициенты μ_{ij} из (2.25), получим:

$$\nu_\sigma = \frac{2\left(\frac{1}{\mu_{21}} - 1\right)e_2 - 2\left(\frac{1}{\mu_{12}} - 1\right)e_1 - e_3}{2\left(\frac{1}{\mu_{12}} - 1\right)e_1 - e_3}. \tag{2.33}$$

Исходя из условия несжимаемости, заменим в выражении (2.33) e_3 деформациями e_1 и e_2, отношение которых, в свою очередь, обозначим через $\alpha = e_2 / e_1$.

В результате преобразований найдем:

$$\nu_\sigma = \frac{\alpha\left(\frac{1}{\mu_{21}} - 1\right) - \left(\frac{1}{\mu_{12}} - 2\right)}{\alpha + \frac{1}{\mu_{12}}}. \tag{2.34}$$

Показатель направляющего тензора деформаций также запишем через отношение α: $\nu_\varepsilon = 3\alpha/(2+\alpha)$.

Разрешив это выражение относительно α и подставив в (2.34), получим

$$\nu_\sigma = \frac{\left(1 - 4\mu_{12} + 4\frac{\mu_{12}}{\mu_{21}}\right)\nu_\varepsilon + (2\mu_{12} - 1)}{(2\mu_{12} - 1)\nu_\varepsilon + 3}. \tag{2.35}$$

или $\nu_\sigma = \dfrac{C_2\nu_\varepsilon + 3D_2}{D_2\nu_\varepsilon + 3}$. (2.36)

Аналогично: $\nu_\varepsilon = \dfrac{3(D_2 - \nu_\sigma)}{D_2\nu_\sigma - C_2}$, (2.37)

где $C_2 = 1 - 4\mu_{12} + 4\dfrac{\mu_{12}}{\mu_{21}}$, $D_2 = 2\mu_{12} - 1$.

Значения коэффициентов C_2 и D_2 для случая $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ для некоторых материалов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. **Значения параметров анизотропия сплавов**

Марка сплава	μ_{12}	μ_{12}	C_2	D_2
Д16АМ	0,34	0,36	3,44	0,32
ВТ 1-2	0,72	0,65	2,55	0,44
0,8Х18Н10Т	0,47	0,47	3,12	0,06
ОТ 1-4	0,8	0,72	2,24	0,6
МА-4	0,66	0,58	2,92	0,32
Л62	0,45	0,46	3,12	0,1
СтО8 кп	0,68	0,57	3,06	0,36

Здесь рассмотрен один вариант связи между ν_σ и ν_ε, а именно для случая $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. В то же время у ортотропного материала возможны шесть вариантов аналогичной связи. Их возникновение вызвано тем, что индексация главных напряжений связана с осями анизотропии полуфабриката. Поэтому в общем случае связь между ν_σ и ν_ε при i = 1, 2, 3 удобнее представить таким образом:

$$\nu_\sigma = \frac{C_i\nu_\varepsilon + 3Di}{D_i\nu_\varepsilon + 3},\ \nu_\varepsilon = \frac{3(D_i - \nu_\sigma)}{D_i\nu_\sigma - C_i}. \quad (2.38)$$

Выражения для определения коэффициентов C_i и D_i представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. **Формулы для определения коэффициентов C_i и D_i**

$\sigma_{ср}$	σ_k	D_i	C_i
σ_1	$\sigma_2 > \sigma_3$ $\sigma_2 < \sigma_3$	$D_1 = 2\mu_{21} - 1$ $D_1 = 2\mu_{31} - 1$	$C_1 = 1 - 4\mu_{21} + 4\dfrac{\mu_{21}}{\mu_{12}}$
σ_2	$\sigma_1 > \sigma_3$ $\sigma_1 < \sigma_3$	$D_2 = 2\mu_{12} - 1$ $D_2 = 2\mu_{32} - 1$	$C_2 = 1 - 4\mu_{21} + 4\dfrac{\mu_{12}}{\mu_{21}}$
σ_3	$\sigma_1 > \sigma_2$ $\sigma_1 < \sigma_2$	$D_3 = 2\mu_{13} - 1$ $D_3 = 2\mu_{23} - 1$	$C_3 = 1 - 4\mu_{13} + 4\dfrac{\mu_{13}}{\mu_{31}} =$ $= \dfrac{\mu_{12} + 2\mu_{12}\mu_{21} + \mu_{21}}{\mu_{12} - 2\mu_{12}\mu_{21} + \mu_{21}}$

Как видно из табл. 2.2, выражение C_i – зависит от индекса $\sigma_{ср}$, а D_i – как от $\sigma_{ср}$, так и от отношения двух других напряжений.

Таким образом, при формоизменении анизотропных полуфабрикатов знание деформированного состояния не позволяет судить об их напряженном состоянии, если не учтена степень анизотропии. Поэтому для рационального построения конкретного процесса штамповки нужно согласовывать механическую схему деформации с осями анизотропии заготовок. Из выражений (2.35–2.38) следует также, что целенаправленным изменением коэффициентов анизотропии материала μ_{ij} можно изменять среднее главное напряжение, а значит создавать в заготовке при постоянном силовом воздействии различные деформированные состояния, в том числе и наиболее благоприятные для реализации процесса формообразования.

Так, обеспечение условий плоского деформированного состояния $\nu_\varepsilon = 0, (\sigma_{2ср},\ \sigma_1 > \sigma_3)$ при штамповке листов с различной степенью анизотропии возможно при следующих значениях $\nu_\sigma = 2\mu_{21} - 1$: если $\mu_{12} = 0{,}2$, то $\nu_\sigma = -0{,}6$; при $\mu_{12} = 0{,}5$ значение $\nu_\sigma = 0$, а при $\mu_{12} = 0{,}8$ значение $\nu_\sigma = +0{,}6$.

На практике для сокращения расчетов взаимосвязи напряженного и деформированного состояний удобно пользоваться графи-

ками (рис. 2.1). В случае трансверсальной изотропии это наглядно представлено на рис. 2.2.

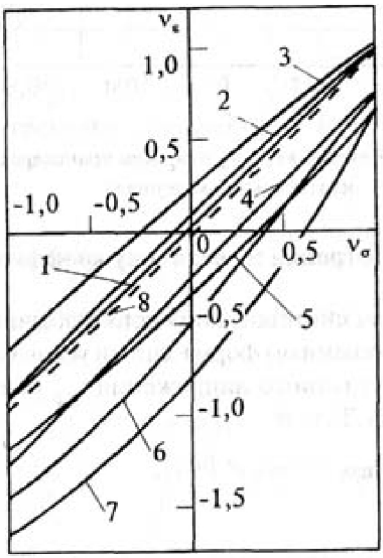


Рис. 2.1. Влияние анизотропии на взаимосвязь показателей ν_σ и ν_ε:
1 – $\mu_{21} = \mu_{12} = 0{,}47$; *2* – $\mu_{21} = 0{,}46$ ($\mu_{12} = 0{,}45$); *3* – $\mu_{21} = 0{,}36$ ($\mu_{12} = 0{,}34$);
4 – $\mu_{21} = 0{,}57$ ($\mu_{12} = 0{,}66$); *5* – $\mu_{21} = 0{,}56$ ($\mu_{12} = 0{,}68$); *6* – $\mu_{21} = 0{,}65$ ($\mu_{12} = 0{,}72$)

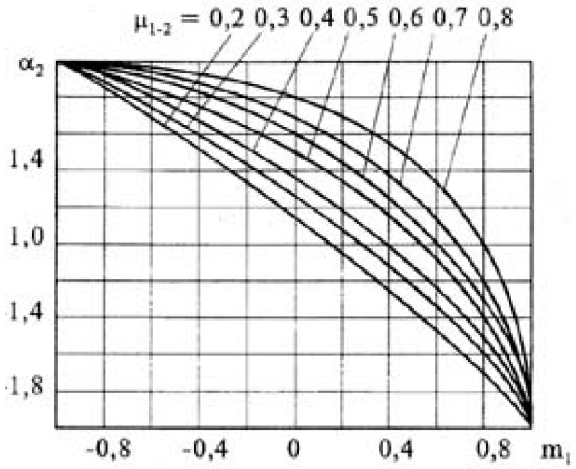


Рис. 2.2. Взаимосвязь ν_σ и ν_ε для трансверсально-изотропного материала

При решении задач листовой штамповки обычно применяется линеаризованная (упрощенная) форма записи условия пластичности, где влияние среднего главного напряжения $\sigma_{ср}$ учитывается с помощью коэффициента Лоде β:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \beta\sigma_{si}, \tag{2.39}$$

где $\beta = 2\Big/\sqrt{\nu_\sigma^2 + 3}$.

Так как величина ν_σ зависит от показателей μ_{ij} (см. 2.34), а также взаимной ориентации осей анизотропии заготовок и направлений главных напряжений, то необходимо проанализировать влияние этих факторов и на величину коэффициента β. Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, всего возможны шесть вариантов взаимного расположения главных напряжений относительно фиксированных осей анизотропии.

Рассмотрим для примера случай, когда $\sigma_{ср} = \sigma_1$ и $\sigma_2 > \sigma_3$.

В этом случае показатель ν_σ запишется следующим образом:

$$\nu_\sigma = \frac{\sigma_{ср} - \dfrac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}}{\dfrac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}} = \frac{\sigma_1 - \dfrac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}}{\dfrac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}}. \tag{2.40}$$

Отсюда $\sigma_1 = \nu_\sigma \dfrac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} - \dfrac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$.

Подставляя это выражение в условие пластичности (2.21), получим

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \frac{2\sigma_{s1}}{\sqrt{\nu_\sigma^2 - 2(2\mu_{21} - 1)\nu_\sigma + 1 - 4\mu_{21} + 4\dfrac{\mu_{21}}{\mu_{12}}}} \tag{2.41}$$

или $\sigma_2 - \sigma_3 = \beta_1\sigma_{s1}$, где $\beta_1 = \dfrac{2}{\sqrt{\nu_\sigma^2 - 2D_1\nu_\sigma + C_1}}$.

Рассмотрим экстремальные значения β_1. Коэффициент β_1 принимает максимальное значение при $\nu_\sigma = D_1$. В этом случае имеем

$$\beta_{1\max} = \frac{2}{\sqrt{C_1 - 2D_1^2}} = \frac{\sqrt{\mu_{12}/\mu_{21}}}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}. \qquad (2.42)$$

Минимальное значение β_1 имеет место при $\nu_\sigma = +1 (D < 0)$ и $\nu_\sigma = -1 (D \geq 0)$:

$$\beta_{1\min} = \sqrt{\mu_{12}/\mu_{21}} \text{ при } \mu_{21} \geq 0{,}5 \qquad (2.43)$$

$$\beta_{1\min} = \sqrt{\mu_{13}/\mu_{31}} = \frac{1}{\sqrt{1-2\mu_{21}+\mu_{21}}} \text{ при } \mu_{21} < 0{,}5.$$

Расчеты по формулам (2.43) показывают, что даже для трансверсально-изотропного тела величина β_1 изменяется в значительных пределах:

при $\overline{\mu} = 0{,}2$ – $\beta_{1\max} = 1{,}02$, а $\beta_{1\min} = 0{,}78$;

при $\overline{\mu} = 0{,}8$ – $\beta_{1\max} = 1{,}65$, а $\beta_{1\min} = 1$.

Отсюда видно, что, в отличие от изотропного тела, при расчетах анизотропных материалов неучет анизотропии при определении величины β может привести к значительным (свыше 50%) ошибкам.

Рассматривая аналогично все шесть вариантов ориентации главных напряжений относительно осей анизотропии, получим выражения для расчета других коэффициентов β_k (k = 1, ... , 6).

С учетом этого условие пластичности (2.39) в общем виде можно записать следующим образом:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \beta_k \sigma_{si}. \qquad (2.44)$$

Значения коэффициентов Лоде β_k для различных схем напряженного состояния представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. **Значения коэффициентов Лоде в зависимости от схемы напряжений**

Схема напряжений		β_k
$\sigma_{ср} = \sigma_1$	$\sigma_2 > \sigma_3$	$\beta_1 = 2\Big/\sqrt{\nu_\sigma^2 - 2D_1\nu_\sigma + C_1}$
	$\sigma_2 < \sigma_3$	$\beta_2 = 2\Big/\sqrt{\nu_\sigma^2 + 2D_1\nu_\sigma + C_1}$
$\sigma_{ср} = \sigma_2$	$\sigma_1 > \sigma_3$	$\beta_3 = 2\Big/\sqrt{\nu_\sigma^2 - 2D_2\nu_\sigma + C_2}$
	$\sigma_1 < \sigma_3$	$\beta_4 = 2\Big/\sqrt{\nu_\sigma^2 + 2D_2\nu_\sigma + C_2}$
$\sigma_{ср} = \sigma_3$	$\sigma_1 > \sigma_2$	$\beta_5 = 2\Big/\sqrt{\nu_\sigma^2 - 2D_3\nu_\sigma + C_3}$
	$\sigma_1 < \sigma_2$	$\beta_6 = 2\Big/\sqrt{\nu_\sigma^2 + 2D_3\nu_\sigma + C_3}$

2.3. Понятие об интенсификации деформирования листовых материалов за счет создания эффективной анизотропии их свойств

Под интенсификацией процессов листовой штамповки подразумевается в первую очередь повышение их производительности и сокращение числа переходов вследствие увеличения допустимого формоизменения, экономия металла и улучшение качества изделий вследствие повышения точности размеров деталей и расчета заготовок, высвобождение штампов, оборудования и числа работающих, снижение брака и обеспечение стабильности технологического цикла и т. п. Несмотря на значительное количество показателей интенсификации, анализ показывает, что характеристики большинства из них улучшаются, как правило, от тех же факторов, которые способствуют увеличению предельно допустимой деформации заготовки. Поэтому, приняв этот параметр за основу, рассмотрим различные пути его повышения.

Как показано еще С. И. Губкиным, допустимая деформация материала в любом процессе определяется прежде всего схемой напряженно-деформированного состояния, в условиях которой он

находится. Известно также, что в операциях листовой штамповки напряженное состояние может быть полностью охарактеризовано показателем напряженного состояния ν_σ или связанным с ним показателем деформированного состояния ν_ε.

Если рассматривается изотропный материал, то между показателями ν_ε и ν_σ существует следующая линейная зависимость:

$$\nu_\sigma = \nu_\varepsilon . \tag{2.45}$$

Для анизотропных заготовок эта взаимосвязь является более сложной и определяется выражениями (2.38):

$$\nu_\varepsilon = \frac{3(D_i - \nu_\sigma)}{D_i \nu_\sigma - C_i} . \tag{2.46}$$

Из приведенных выражений (2.45), (2.46) следует, что благоприятные для повышения допустимого формоизменения деформированные состояния в различных процессах штамповки могут быть созданы в общем случае двумя путями:

– создание благоприятной механической схемы деформации за счет регулирования σ_0;

– создание в заготовках необходимых сочетаний показателей анизотропии, определяющих собой значения D_i и C_i.

Как показывает анализ, основные усилия ученых и специалистов были сосредоточены на развитии первого направления. В результате к настоящему времени разработано достаточно большое количество самых разнообразных, часто весьма сложных способов интенсификации процессов формообразования листовых материалов, предусматривающих изменение схемы напряжений. Для примера на схеме (рис. 2.3) представлены некоторые наиболее распространенные из этих способов. Не вдаваясь в подробный анализ существующих схем, следует отметить, что все они, как правило, ориентированы на совершенствование методов воздействия инструмента на заготовку. При этом из поля зрения выпадает сам деформируемый материал, т. е. его свойства и возможности, хотя

именно они определяют собой в конечном итоге возможность осуществления процесса, продолжительность технологического цикла и качество продукции в целом. Такой односторонний подход к интенсификации процессов листовой штамповки вполне понятен, если к анализу процессов формоизменения подходить с позиций теории пластичности изотропных сред, в уравнения которой не входят компоненты материального тензора, отражающего свойства заготовок (см. 2.45). Следовательно, здесь нет и оснований для анализа деформационных возможностей металла в конкретной операции, определения условий наиболее эффективного использования направленности свойств заготовок с учетом схемы главных деформаций.

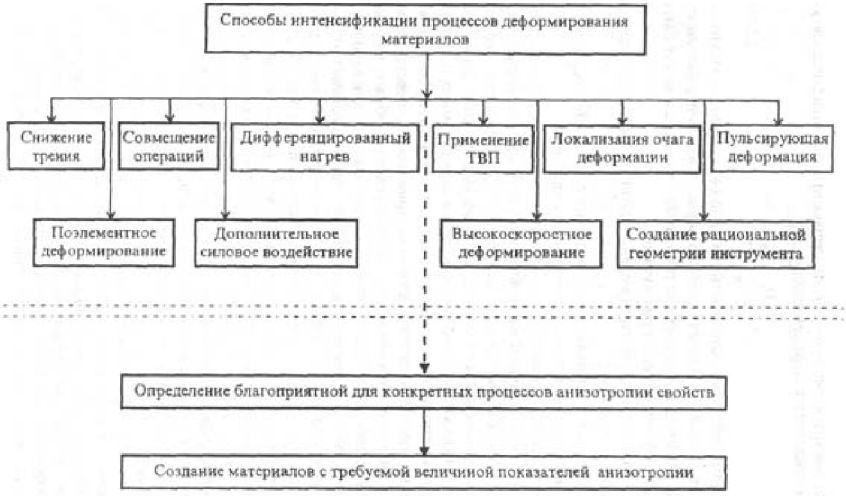


Рис. 2.3. Способы интенсификации деформирования листовых материалов

Такие возможности для анализа процессов появляются лишь при использовании аппарата теории пластичности анизотропных сред, в которой критерии пластичности являются совместным инвариантом тензора напряжений и материального тензора. В этом случае, как видно из выражения (2.46), анизотропия свойств деформируемого объекта может активно использоваться для увели-

чения, например, предельной деформации как в базовом процессе, так и в различных его модификациях.

При исследовании изменения предельной степени вытяжки заготовок в зависимости от величины показателя нормальной (осредненной в плоскости листа) анизотропии $\overline{R}$ и удлинения при разрыве установлено, что независимо от колебаний величины удлинения предельная степень вытяжки постоянно увеличивается именно с повышением показателя анизотропии $\overline{R}$ (рис. 2.4). Отсюда видно, что процесс глубокой вытяжки может быть интенсифицирован за счет фактора анизотропии в несколько раз и без применения каких-либо дополнительных сложных устройств.

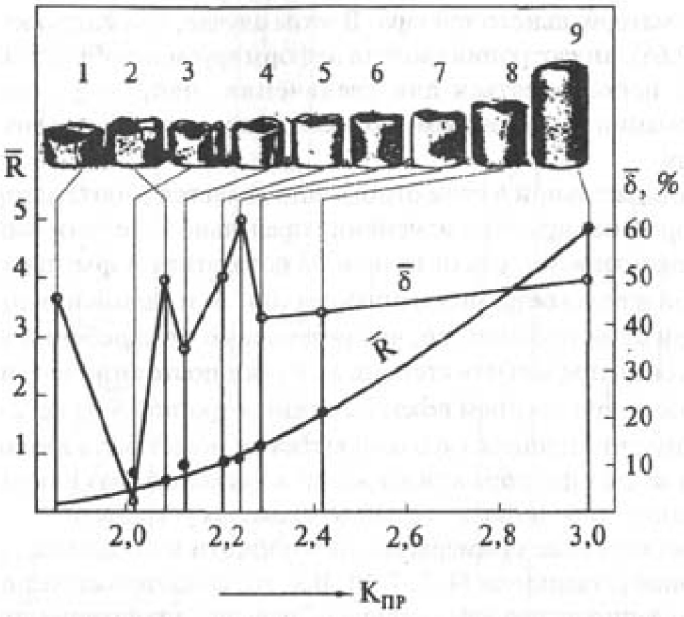


Рис. 2.4. Изменение предельной степени вытяжки различных материалов в зависимости от показателя анизотропии и удлинения при разрыве: *1* – цинк (ε_h = 85%, $T_{отж}$ = 200 °С); *2* – медь с кубической текстурой; *3* – алюминий наторгованный; *4* – алюминий отожженный при 300 °С; *5* – медь с уравновешенной текстурой; *6* – латунь 70/30; *7* – кипящая сталь; *8* – спокойная сталь; *9* – титан отожженный марки 115

Аналогичные примеры можно привести и по другим процессам листовой штамповки. Все это свидетельствует о том, что направленность свойств материала, наряду с его физическим состоянием, оказывает существенное влияние на величину предельной деформации, штампуемость и интенсификацию процессов в целом. В связи с этим в последнее время уделяется все большее внимание параметрам листа, характеризующим его штампуемость в конкретной операции.

Разработан ряд специальных критериев штампуемости. Наиболее приемлемыми из них являются следующие:

$$F = \delta_{\text{р}} \frac{Rn}{2^{\mu_{\text{з}}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{т}}} 100\%$$

или

$$F = \frac{\delta_{\text{р}}}{2^{\mu_{\text{з}}}} \cdot \frac{\overline{\mu} n}{1 - \overline{\mu}} \cdot \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{т}}} 100\%; \qquad (2.47)$$

здесь $\mu_{\text{з}}$ – размеры зерен и неметаллических включений.

$$\text{Б} = 6{,}89 + 0{,}036\,\sigma_{\text{т}} + 1{,}62R - 0{,}075A + 12{,}62n,$$

или $$\text{Б} = 6{,}89 + 0{,}036\,\sigma_{\text{т}} + 1{,}62\frac{\overline{\mu}}{1 - \overline{\mu}} - 0{,}075A + 12{,}62n, \qquad (2.48)$$

где $A = \left| \varepsilon^{*} \left(b_{\max} - b_{\min} \right) \right| / b_0$ – степень неравномерности пластической деформации по ширине образца; $b_{\max}$, $b_{\min}$ и b_0 – соответственно максимальная, минимальная и начальная ширина образца; ε* – коэффициент, определяемый по ТУ 14-105-322-76. Критерий А. Ю. Аверкиева

$$П = 0{,}5 \left[\sigma_{\text{в}} / \sigma_{\text{т}} \left(1 + \delta_{\text{р}} \right) + 1 \right] \sigma_{\text{т}} \delta_{\text{р}}. \qquad (2.49)$$

Рассмотрим подробнее структуру критерия F. В основу его определения положено условие штампуемости листа без разрушения. Полагая, что в опасном сечении материал при достижении наибольшей деформации растяжения $\varepsilon_1^{\max}$ должен иметь некото-

рый запас пластичности $\Delta\varepsilon_1^{min} > 0$, где $\Delta\varepsilon_1^{min} = \delta_p - \varepsilon_1^{max}$, и установив взаимосвязь ε_1^{max} с механическими и структурными характеристиками листа, получим критерий F в виде (2.47) или

$$\Delta\varepsilon_1^{min} = \delta_p\left(1 - \frac{1}{F}\right).$$

Из последнего следует, что чем больше F, тем выше ресурс пластичности материала в наиболее опасном сечении, тем выше и допустимое формоизменение. Из формулы (2.47) видно, что F увеличивается прежде всего с повышением показателя нормальной анизотропии, а также отношения $\sigma_в/\sigma_т$, а уменьшается с увеличением характеристики структуры металла -2^{μ_3}.

Основываясь на подобных критериях, можно определить пригодность металла к той или иной формоизменяющей операции.

Однако для всесторонней интенсификации процессов деформирования за счет создания и эффективного использования анизотропии свойств заготовок необходимо:

во-первых, на основе теории пластичности анизотропных сред получить модели влияния анизотропии на параметры процессов листовой штамповки;

во-вторых, на основе анализа этих моделей установить нормативные требования к величине показателей анизотропии, обеспечивающие повышение штампуемости листов;

в-третьих, установить взаимосвязь показателей анизотропии с параметрами текстуры и константами кристаллической решетки, на основе которой создать методику формирования в листах заданной анизотропии свойств при прокатке.

В целом, решение проблемы эффективного использования анизотропии материалов при их формообразовании возможно на основе совмещения феноменологического и кристаллографического подходов.

Феноменологический аспект проблемы заключается в анализе операций листовой штамповки и определении сочетаний показателей анизотропии, повышающих предельно допустимую деформацию в заданном технологией направлении.

Кристаллографический подход призван обеспечить методы расчета состава текстуры, гарантирующего требуемое сочетание показателей анизотропии в листовых материалах.

2.4. Вопросы для самоконтроля

1. Что описывают компоненты материального тензора k_{ijkl}? В каких важных соотношениях они используются?

2. Чем отличаются зависимости между показателями напряженного и деформированного состояний для изотропных и анизотропных материалов?

3. Что характеризует коэффициент Лоде?

4. Перечислите основные способы интенсификации процессов деформирования материалов.

5. Назовите основные подходы решения проблемы интенсификации деформирования за счет создания заданной анизотропии свойств.

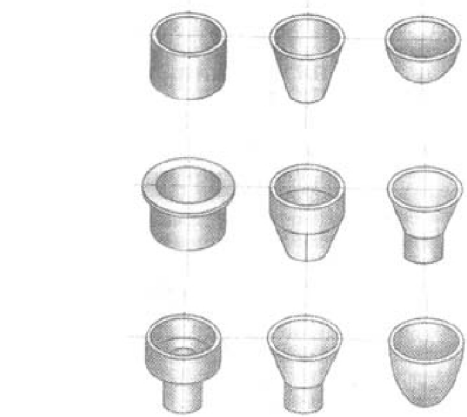
6. С чем связаны основные трудности формирования заданной анизотропии материалов?

ГЛАВА 3

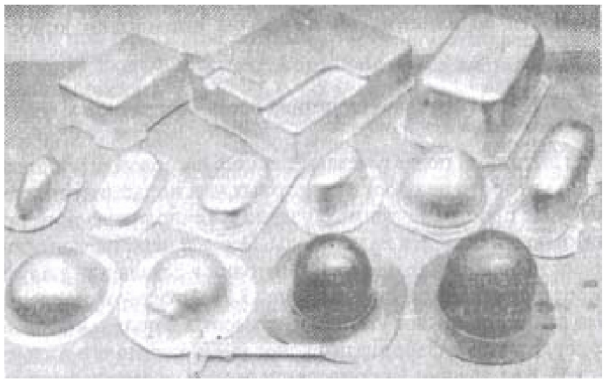
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ НА ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЛИСТОВ ПРИ ВЫТЯЖКЕ

3.1. Краткая характеристика параметров и напряженно-деформированного состояния при вытяжке

Как показывает анализ номенклатуры полых изделий, изготовляемых методами глубокой вытяжки (рис. 3.1), основная их масса имеет осесимметричную, эллипсную, овальную, квадратную



а)



б)

Рис. 3.1. Номенклатура полых изделий: *а* – осесимметричные детали, *б* – коробчатые детали

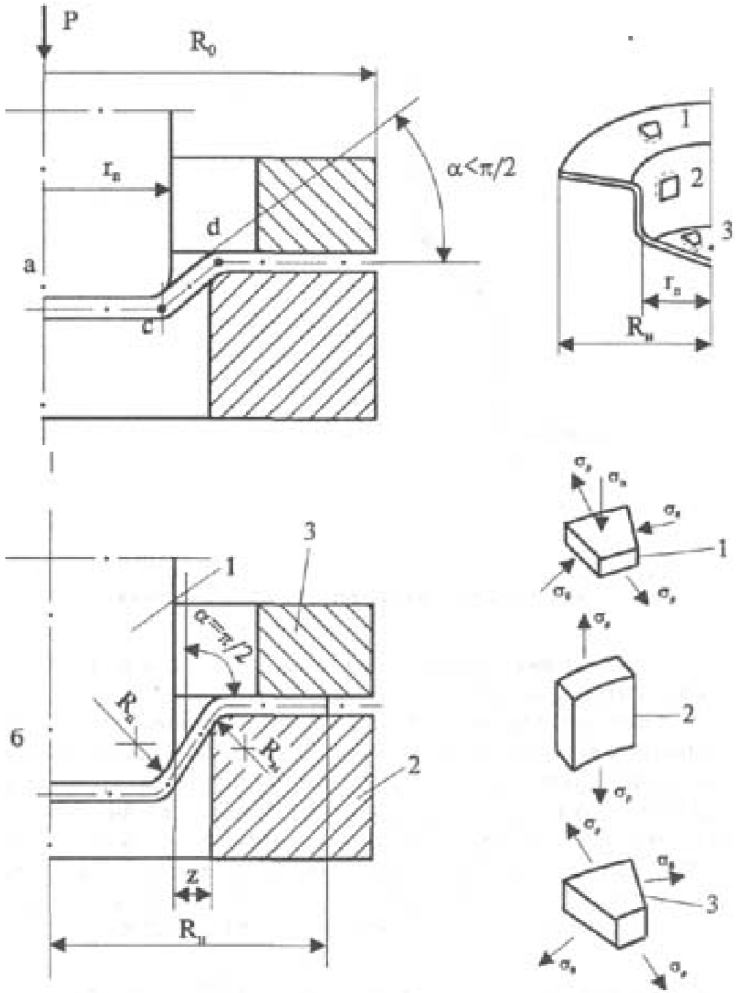


Рис. 3.2. Схема вытяжки в начальной (*а*) и установившейся (*б*) стадиях

и прямоугольную форму. В зависимости от формы исходной заготовки или детали изменяется напряженно-деформированное состояние, характер течения металла во фланце и т. д. Следовательно, и влияние анизотропии свойств в каждом конкретном случае будет своеобразным. Характерной особенностью процессов вытяжки является несовпадение действия главных напряжений и осей анизо-

тропии заготовок, вследствие чего возникает неравномерная пластическая деформация фланца, которая и вызывает значительное изменение различных параметров изделий. Известно также, что наиболее характерные проявления анизотропии свойств заготовок наблюдаются при вытяжке осесимметричных деталей. Поэтому в первую очередь подробно рассмотрим влияние анизотропии на различные параметры осесимметричной вытяжки.

Под вытяжкой подразумевают процесс листовой штамповки, при помощи которого из плоских листовых или полых заготовок получают полые пространственные изделия. Технологический процесс вытяжки подразделяется на переходы. Первый переход вытяжки обеспечивает превращение плоской заготовки в деталь или полуфабрикат пространственной формы (рис. 3.2). Второй и последующие переходы обеспечивают увеличение высоты h полученного на первой операции полуфабриката за счет уменьшения его диаметра d_1 (рис. 3.3). Как следует из приведенных схем, вытяжка осуществляется в основном при помощи штампов (инструментальная вытяжка), рабочими органами которых являются: пуансон *1*, матрица *2* и прижим *3*. Между матрицей и пуансоном имеется зазор z, размер которого для вытяжки без утонения исходной заготовки принимается больше ее толщины s_0.

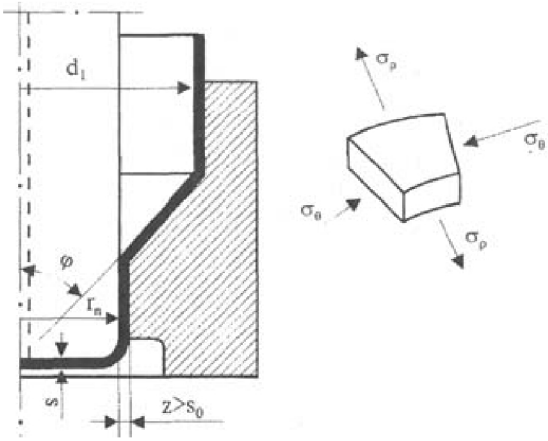


Рис. 3.3. Схема последующих переходов вытяжки

Как технологическая операция осесимметричная вытяжка характеризуется следующими группами параметров.

1. Геометрические параметры: коэффициент вытяжки $m = d_1/D_0$ и степень вытяжки $K = 1/m = D_0/d_1$, характеризующие степень изменения размеров исходной заготовки за один или несколько переходов; форма и размеры заготовки D_0, s_0 и ее относительная толщина (s_0/D_0) 100%; диаметры d_1, ..., d_n и высоты h_1 ..., h_n изделий по переходам; размеры пуансонов $d_п$ и матриц $d_м$, зазор z, радиусы скруглений рабочих (вытяжных) кромок матриц $R_м$ и пуансонов $R_п$ угол охвата материалом вытяжной кромки матрицы α и т. д.

2. Силовые параметры: усилие вытяжки P; усилие прижима Q; условия трения f, T; усилие изгиба $P_{изг}$.

3. Предельные возможности: они характеризуются предельным коэффициентом или предельной степенью вытяжки $m_{пр} = 1/K_{пр}$, при которых еще может быть осуществлена вытяжка без разрушения стенки или без потери устойчивости фланца вследствие складкообразования. На основе этих характеристик определяется число переходов n.

Наличие анизотропии свойств исходных заготовок существенно влияет на большинство перечисленных параметров. Кроме того, она обусловливает такое явление, как разнотолщинность стенок изделий по периметру, которая, в свою очередь, вызывает фестонообразование, необходимость завышения размеров заготовок и т. д.

Схема напряженно-деформированного состояния фланца плоской заготовки при вытяжке представлена на рис. 3.4. Как видно из схемы, в процессе формоизменения заготовки под действием усилия P во фланце возникают радиальные растягивающие напряжения σ_ρ, тангенциальные сжимающие напряжения σ_θ, напряжения трения заготовки о зеркало матрицы и прижим $\sigma_{тр}$, напряжения $\sigma'_{тр}$, вызванные скольжением фланца по вытяжной кромке матрицы, а также напряжения изгиба $\sigma_{изг}$, возникающие при переме-

щении фланца по вытяжной кромке матрицы. В целом суммарное сопротивление фланца деформированию можно представить следующим уравнением:

$$\sigma_{ст} = \sigma_{\rho} + \sigma_{тр} + \sigma_{изг} + \sigma'_{тр}, \qquad (3.1)$$

где $\sigma_{ст}$ – суммарное напряжение, возникающее в зоне передачи усилия (в месте перехода стенки в дно).

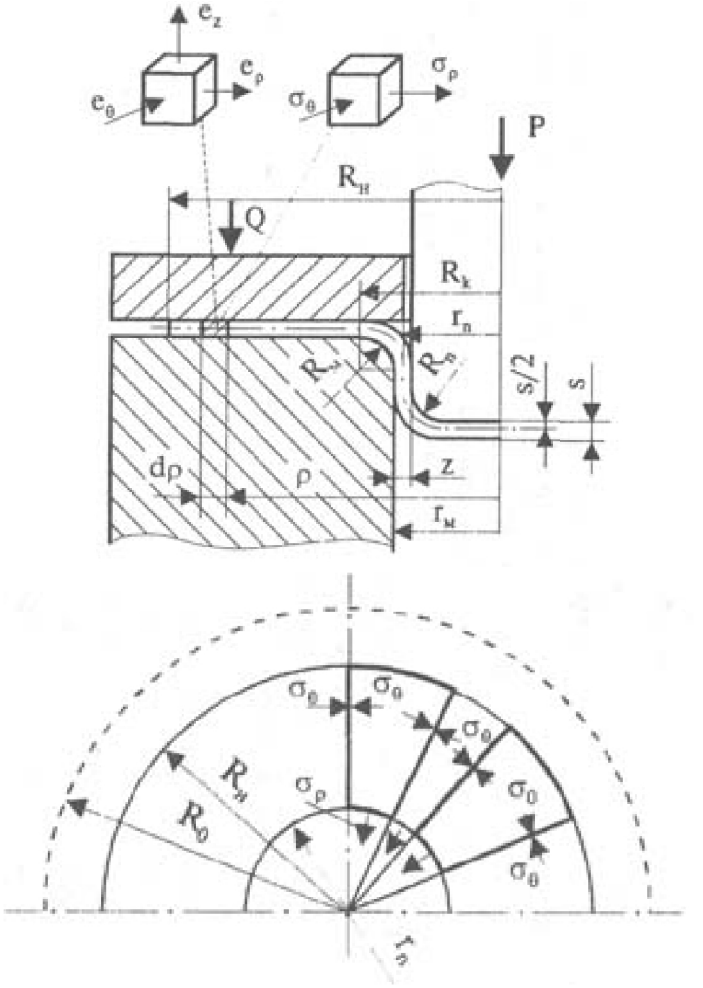


Рис. 3.4. Схема напряженно-деформированного состояния во фланце заготовки

Отметим, что напряженно-деформированное состояние анизотропной заготовки даже при вытяжке цилиндрических изделий является достаточно сложным, так как оно изменяется и в радиальном, и в тангенциальном направлениях. Это обстоятельство и приводит в конечном итоге к разнотолщинности стенки изделия по образующей и по периметру, что обусловливает в свою очередь фестонообразование и другие явления.

Для определения составляющих уравнения (3.1) примем следующие допущения: напряженное состояние во фланце заготовки – плоское и осесимметричное, трение фланца заготовки по инструменту подчиняется закону Кулона, упрочнение материала принимается степенным, главные напряжения в процессе деформирования не меняют своего направления.

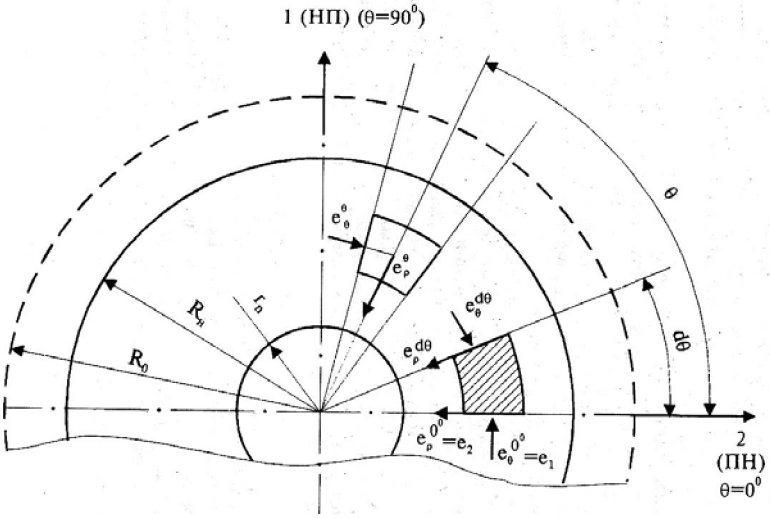


Рис. 3.5. Схема обозначения главных деформаций и осей анизотропии во фланце заготовки

Поскольку тангенциальные e_θ и радиальные e_ρ деформации совпадают с главными осями анизотропии 1 и 2 (рис. 3.5) только в частном случае (при $\theta = 0$), а в других зонах фланца они направлены к этим осям под углом θ (рис. 3.5), то для удобства анализа по-

казатели μ_{ij} и соответствующие деформации в выражении для их определения необходимо записывать с индексом θ:

$$\mu_{ij}^{\theta} = -\frac{e_i^{\theta}}{e_j^{\theta}}, \quad (i, j = 1,2,3;\ i \neq j),$$

где θ – угол произвольного радиуса с осью 2.

Под стоящей в знаменателе выражения (1.6) деформацией e_j, совпадающей с «направлением растягивающей силы», в данном случае следует подразумевать тангенциальную деформацию сжатия e_θ, а под e_i – радиальную деформацию e_ρ. Тогда для рассматриваемого процесса показатели μ_{ij}^{θ} в плоскости (1, 2) запишутся так:

$$\mu_{21}^{\theta} = -\frac{e_\rho^{\theta}}{e_\theta^{\theta}}, \quad \mu_{31}^{\theta} = -\frac{e_z^{\theta}}{e_\theta^{\theta}}, \quad \mu_{12}^{\theta} = \mu_{21}^{\theta+\pi/2}.$$

При $\theta = 0^{\circ}$, $\mu_{21}^{0} = -\frac{e_\rho^{0}}{e_\theta^{0}}$; при $\theta = 90°$, $\mu_{21}^{90} = \mu_{12} = -\frac{e_\rho^{90}}{e_\theta^{90}}$,

e_z – деформация по толщине.

Поскольку наиболее характерным проявлением анизотропии при вытяжке является неравномерное утолщение фланца по периметру, то при анализе деформированного состояния целесообразно воспользоваться показателями анизотропии по толщине μ_{31}^{θ} и μ_{13}^{θ}, причем

$$\mu_{13}^{\theta} = \frac{\mu_{31}^{\theta}}{1 - \mu_{21}^{\theta} + \mu_{21}^{\theta} / \mu_{12}^{\theta}}.$$

При принятых допущениях и рассмотренных особенностях учета анизотропии, для определения поля напряжений можно воспользоваться общепринятым уравнением равновесия:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0. \qquad (3.2)$$

Линеаризованное условие пластичности для рассматриваемой задачи, когда $\sigma_{ср} = \sigma_3$ и $\sigma_2 > \sigma_1$, выбираем в виде:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta_6^\theta \sigma_{i3}, \tag{3.3}$$

где σ_{i3} – интенсивность напряжений в направлении толщины фланца заготовки; β_6^θ – коэффициент Лоде, учитывающий влияние среднего главного напряжения σ_z и изменение анизотропии при повороте оси ρ на угол θ в плоскости листа (см. табл. 2.3):

$$\beta_6^\theta = \frac{2}{\sqrt{\nu_\sigma^2 + 2\nu_\sigma D_3^\theta + C_3^\theta}}. \tag{3.4}$$

В рассматриваемом случае β_6^θ принимаем равным среднеарифметическому между его значениями для плоского напряженного состояния (плоская часть фланца) и плоской деформации на участке перемещения по вытяжной кромке матрицы и обозначим $\overline{\beta}_{пр}^\theta$.

С учетом этого условие пластичности (3.3) для фланца приобретет следующий вид:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \overline{\beta}_{пр}^\theta \sigma_{ic}, \tag{3.5}$$

где σ_{ic} – средняя интенсивность напряжений во фланце.

Более подробно вывод уравнения (3.5) представлен в монографии [5].

Подставив выражение (3.5) в (3.2), разделив переменные и проинтегрировав, получим формулу для определения радиальных напряжений σ_ρ для любого направления плоскости фланца:

$$\sigma_\rho = \overline{\beta}_{пр}^\theta \sigma_{ic} \ln \rho + C. \tag{3.6}$$

Произвольную постоянную интегрирования C найдем из граничных условий при $\rho = R_н$; $\sigma_\rho = 0$. В результате получим

$$\sigma_\rho = \overline{\beta}^{\theta}_{\text{пр}} \sigma_{ic} \ln \frac{R_\text{н}}{\rho}. \qquad (3.7)$$

Тангенциальное напряжение σ_θ определится из условия пластичности (3.9) при подстановке в него σ_ρ из (3.7):

$$\sigma_\theta = -\overline{\beta}^{\theta}_{\text{пр}} \sigma_{ic} \left(1 - \ln \frac{R_\text{н}}{\rho} \right). \qquad (3.8)$$

Полученные формулы позволяют проанализировать влияние анизотропии на напряженное состояние во фланце заготовки. Характер распределения поля напряжений по ширине фланца представлен на рис. 3.6.

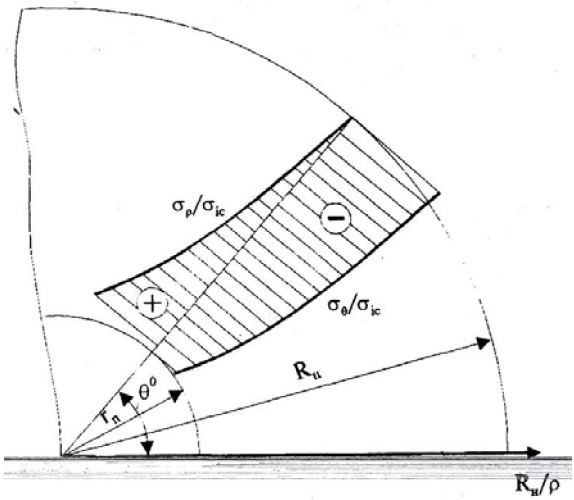


Рис. 3.6. Эпюра напряжений σ_ρ и σ_θ по ширине фланца ($\mu_1 > \mu_{21} = \mu_{12}$)

Из эпюр напряжений видно, что радиальное напряжение, характеризующее сопротивление металла деформации, принимает максимальное значение на внутреннем контуре фланца при $\rho = r_\text{п}$:

$$\sigma_{\rho\max} = \overline{\beta}^{\theta}_{\text{пр}} \sigma_{ic} \ln \frac{R_\text{н}}{r_\text{п}}. \qquad (3.9)$$

Как следует из выражения (3.9), $\sigma_{\rho max}$ возрастает также с увеличением $R_н$ и достигает наибольшего значения в начальный момент вытяжки при $R_н = R_0$.

В этом случае

$$\sigma_{\rho max} = \overline{\beta}^{\theta}_{пр}\sigma_{ic}\ln\frac{R_0}{r_п} = \overline{\beta}^{\theta}_{пр}\sigma_{ic}\ln\frac{1}{m}, \qquad (3.10)$$

где m – коэффициент вытяжки.

Полученное из выражения (3.10) значение $\sigma_{\rho max}$ используется при определении суммарного сопротивления фланца деформированию $\sigma_{ст}$ (3.1), а также при расчете предельного формоизменения и силовых параметров.

С учетом представленных в монографии [5] выражений для $\sigma_{тр}$, $\sigma_{изг}$ и $\sigma'_{тр}$, суммарное выражение для $\sigma_{ст}$ в формуле (3.1) примет вид:

$$\sigma_{ст} = \left[\overline{\beta}^{\theta}_{пр}\sigma_{ic}\left(\ln\frac{R_0}{r_п} + \frac{s}{2R_м + s}\right) + \frac{fQ}{\pi R_н s}\right]e^{f\alpha}, \qquad (3.11)$$

где f – коэффициент трения; Q – усилие прижима.

Для количественного анализа деформированного состояния во фланце анизотропной заготовки воспользуемся уравнениями связи напряжений и деформаций (2.24), записанными в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} e^{\theta}_{\theta} &= \frac{\mu^{\theta}_{13}}{\mu^{\theta}_{31}}\frac{e_i}{\sigma_i}\left(\sigma_\theta - \mu^{\theta}_{21}\sigma_\rho\right), \\ e^{\theta}_{\rho} &= \frac{\mu^{\theta}_{23}}{\mu^{\theta}_{32}}\frac{e_i}{\sigma_i}\left(\sigma_\rho - \mu^{\theta}_{12}\sigma_\theta\right), \\ e^{\theta}_{z} &= \frac{e_i}{\sigma_i}\left[\left(\mu^{\theta}_{13} - 1\right)\sigma_\rho - \mu^{\theta}_{13}\sigma_\theta\right] \end{aligned} \qquad (3.12)$$

Основываясь на уравнениях (3.12), проанализируем взаимосвязь деформаций e_θ и e_z в процессе вытяжки. Для этого выразим их отношение следующим образом:

$$\frac{e_z^\theta}{e_\theta^\theta} = \frac{\mu_{31}^\theta}{\mu_{13}^\theta} \frac{a\left(\mu_{13}^\theta - 1\right) - \mu_{13}^\theta}{1 - a\mu_{21}^\theta}, \tag{3.13}$$

где $a = \sigma_\rho / \sigma_\theta$ – отношение главных напряжений.

Из (3.13) видно, что характер взаимосвязи деформаций по толщине с тангенциальными деформациями определяется соотношением напряжений a и показателем анизотропии μ_{ij}.

Если вытяжке подвергается изотропный материал ($\mu_{ij} = 0{,}5$), то из уравнения (3.13) легко получить общеизвестную взаимосвязь Е.А. Попова [6]:

$$e_z = -\frac{a+1}{2-a} e_\theta . \tag{3.14}$$

На основе выражения (3.13) проанализируем деформированное состояние фланца в наиболее характерных участках. Так как на внешней кромке фланца $\sigma_\rho = 0$ и $a = 0$, то из отношения (3.13) получим

$$e_z^\theta = -\mu_{31}^\theta e_\theta^\theta . \tag{3.15}$$

Так как коэффициенты анизотропии μ_{ij} всегда больше нуля, то из формулы (3.15) ясно, что деформация e_z^θ на кромке будет всегда положительной. Следовательно, кромка фланца при вытяжке всегда будет утолщаться. Интенсивность же утолщения регламентируется величиной показателей анизотропии μ_{31}^θ. Так, для изотропной заготовки ($\mu_{31}^\theta = 0{,}5$) деформация $e_z^\theta = -0{,}5 e_\theta^\theta$.

Если $\mu_{31}^\theta = 0{,}2$, что характерно для титановых сплавов, то $e_z^\theta = -0{,}2\, e_\theta^\theta$. Для алюминиевых сплавов, у которых $\mu_{31}^\theta = 0{,}7$, де-

формация $e_z^\theta = -0{,}7\, e_\theta^\theta$, что полностью подтверждается экспериментами.

Из приведенных примеров видно, что у различных материалов изменение толщины фланца происходит неодинаково.

В процессе вытяжки соотношение радиальных и тангенциальных напряжений по ширине фланца изменяется (см. рис. 3.6) таким образом, что на внешней кромке $|\sigma_\rho| << |\sigma_\theta|$, а вблизи отверстия матрицы $|\sigma_\rho| > |\sigma_\theta|$. В связи с этим, во фланце есть также участок, где они равны, т. е. отношение напряжений $a = -1$. Тогда из (3.13) получим

$$e_z^\theta = \frac{\dfrac{\mu_{31}^\theta}{\mu_{13}^\theta} - 2\mu_{31}^\theta}{2 - \mu_{31}^\theta} e_\theta^\theta. \qquad (3.16)$$

Как следует из формулы (3.16), в случае вытяжки анизотропной заготовки чистого сдвига одновременно по напряжениям и деформациям во фланце заготовки не существует. Другими словами, при $|\sigma_\rho| = |\sigma_\theta|$ деформация $e_z^\theta \neq 0$, a определяется характером анизотропии μ_{ij}^θ. При $\mu_{ij} = 0{,}5$ (изотропный лист) $e_z^\theta = 0$.

Для определения условий, при которых во фланце заготовки реализуется схема плоской деформации, решим уравнение (3.13) относительно a при $e_z = 0$. Данное условие выполнится в том случае, если числитель (3.13) обратится в нуль:

$$\frac{\mu_{31}^\theta}{\mu_{13}^\theta}\left[a\left(\mu_{13}^\theta - 1\right) - \mu_{13}^\theta\right] = 0, \qquad (3.17)$$

отсюда

$$a = \mu_{13}^\theta / \left(\mu_{13}^\theta - 1\right). \qquad (3.18)$$

Подставив в полученное выражение (3.18) вместо a значения напряжения σ_ρ и σ_θ, определяемые формулами (3.7) и (3.8), и решив относительно $\rho = \rho_{гр}^{\theta}$, получим радиус контура, разграничивающего зоны утолщения и утонения фланца в точке, определяемой координатами ($\rho_{гр}, \theta$):

$$\rho_{гр}^{\theta} = R_н \Big/ e^{\mu_{13}^{\theta}} . \qquad (3.19)$$

Выражение (3.19) позволяет построить внутри фланца контур, на котором $e_z = 0$.

При $\mu_{13}^{\theta} = 0{,}5$ выражение (3.19) преобразуется к виду, характерному для изотропного материала:

$$\rho_{гр} = R_н \Big/ \sqrt{e} \approx 0{,}607 R_н . \qquad (3.19а)$$

В тех направлениях плоскости фланца, в которых условия $e_z = 0$ реализуются позднее, формируется в итоге впадина, обусловливающая неравномерную толщину стенки изделия по периметру и фестонообразование.

3.2. Влияние анизотропии на геометрические параметры вытяжки

А. Влияние на фестонообразование

Как известно, при вытяжке цилиндрических деталей из круглых анизотропных заготовок по их верхнему краю образуются впадины и выступы (фестоны), которые в итоге уменьшают полезную высоту детали на 10–20% (рис. 3.7). Впадины образуются в тех направлениях заготовки, в которых показатели анизотропии в плоскости листа μ_{21} имеют минимальное значение, а по толщине μ_{31} – максимальное. Фестоны же, наоборот, в направлениях максимальных значений μ_{ij} в плоскости листа и минимальных – по толщине.

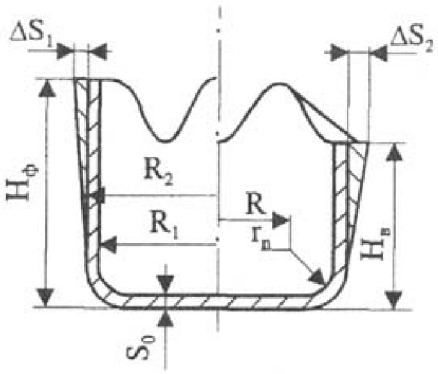


Рис. 3.7. Схема изменения толщины стенки по фестону и впадине

Типичный характер изменения характеристик фестонообразования в плоскости листа $H_в/H_ф = f(\theta)$ в сопоставлении с изменением показателей анизотропии $\mu_{ij} = f(\theta)$ представлен на рис. 3.8. Как правило, при вытяжке образуются 4 впадины и 4 фестона, расположенных вдоль и поперек направления прокатки или под углом 45° к нему.

Из проведенного выше анализа деформированного состояния ясно, что в процессе течения фланца к отверстию матрицы его толщина меняется неравномерно. В направлении максимальных значений показателей анизотропии μ_{31}^{θ} утолщение края заготовки происходит более интенсивно. Вследствие этого значительная часть металла фланца перемещается в толщину, приводя к образованию впадин. В местах же с минимальными значениями μ_{31}^{θ} утолщение фланца значительно меньше. Следовательно, металл идет на увеличение радиальной деформации e_{ρ}^{θ} или высоты стенки изделия, образуя так называемый фестон.

Рассмотренный характер течения металла заготовки в очаге деформаций приводит к формированию при вытяжке неодинаковой толщины стенки изделия по периметру и по образующей (см. рис.

3.7). Неравномерность толщины по образующей достигает 25–38%, а по периметру – 55–65%.

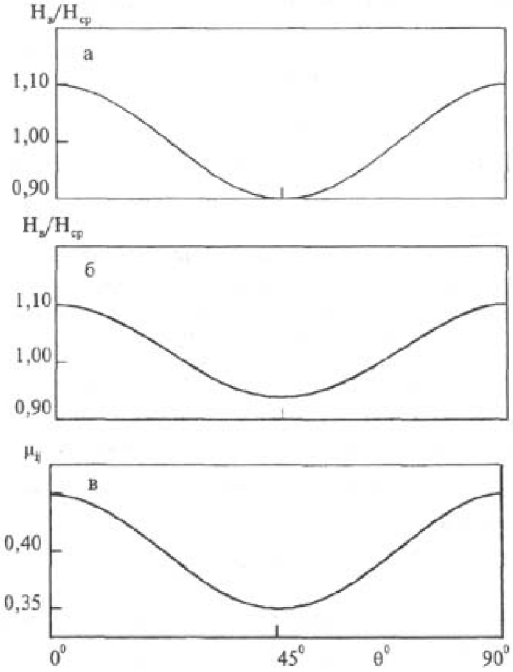


Рис. 3.8. Сопоставление кривых изменения относительной высоты фестонов и показателей анизотропии в плоскости заготовок: *а*, *б* – высота деталей после первого и второго переходов вытяжки соответственно; *в* – кривые изменения показателей μ_{ij}

Влияние анизотропии на изменение толщины внешней кромки фланца s, а в пределе и верхнего края изделия s_k, можно оценить, выразив деформации e_z и e_θ через геометрические размеры заготовки:

$$e_z = \ln\frac{s}{s_0},\ e_\theta = \ln\frac{R_н}{R_0}. \qquad (3.20)$$

Подставив значения деформаций из (3.20) в (3.15), получим:

$$s = s_0\left(R_0/R_н\right)^{\mu_{31}^{\theta}}. \qquad (3.21)$$

Как следует из полученного выражения (3.21), чем больше μ_{31}^{θ}, тем больше металла под действием напряжения σ_θ будет перемещаться в толщину, а не в радиальном направлении. Для определения толщины верхнего края детали по впадине $s_в$ и по фестону $s_ф$ необходимо в соотношении (3.21) принять $s = s_к$ и $R_н = r_п$.

Для удобства анализа условимся рассматривать толщину стенки на краю фланца $s_к$ только в местах образования впадин и фестонов.

Показатель анизотропии μ_{31}^{θ} в месте образования впадин обозначим $\mu_{31}^{в}$, а для фестонов – $\mu_{31}^{ф}$. С учетом изложенного выражение (3.21) запишем в виде:

$$s_в = s_0 \left(R_0 / r_п\right)^{\mu_{31}^{в}}, \quad s_ф = s_0 \left(R_0 / r_п\right)^{\mu_{31}^{ф}}. \qquad (3.22)$$

Соотношения (3.22) показывают, что чем больше показатель анизотропии μ_{31}^{θ} и выше степень вытяжки, тем значительнее будет утолщение края детали; неравномерность толщины стенки детали по периметру (фестону и впадине) обусловливается различием показателей анизотропии в плоскости листа, т. е. $\mu_{31}^{в} \neq \mu_{31}^{ф}$.

При вытяжке изотропного материала, подставив в (3.22) $\mu_{31}^{в} = \mu_{31}^{ф} = 0{,}5$; получим общеизвестную формулу:

$$s_в = s_ф = s_к = s_0 \sqrt{K},$$

где K – степень вытяжки.

Устранить разнотолщинность стенки изделий по фестону и впадине, а следовательно, и фестонообразование, как видно из (3.22), можно в основном двумя путями:

1) обеспечить выравнивание показателей анизотропии (μ_{ij}^{θ}) во всех направлениях плоскости листа. Этот путь интенсификацми связан с управлением текстурообразованием при прокатке;

2) обеспечить выравнивание величины радиальной деформации e_ρ^θ в различных направлениях фланца за счет изменения первоначального размера заготовки $D_0^\theta = f(\mu_{ij}^\theta)$. Этот подход вытекает из условия постоянства объема. Действительно, интенсивное утолщение фланца, т. е. увеличение деформации по толщине e_θ в направлениях высоких значений μ_{31}^θ приводит, соответственно, к уменьшению в этих направлениях радиальной деформации e_ρ^θ, а в итоге – к образованию здесь впадин. Тогда как в направлениях минимального утолщения фланца будет формироваться фестон.

Радиальную деформацию e_ρ^θ внешней кромки фланца за весь процесс вытяжки определим, подставив в условие постоянства объема соотношение:

$$e_\rho^\theta = \left(\mu_{31}^\theta - 1\right) e_\theta^\theta. \tag{3.23}$$

Или, с учетом $\mu_{31}^\theta + \mu_{21}^\theta = 1$, получим

$$e_\rho^\theta = -\mu_{21}^\theta e_\theta^\theta,$$

где $e_\theta = \left(R_0 - r_м\right)/R_0 = 1 - m.$ (3.23а)

Построенные по выражению (3.23а) фигуры распределения радиальных деформаций внешней кромки фланца (рис. 3.9) наглядно показывают механизм фестонообразования. В тех направлениях фланца, в которых показатели μ_{31}^θ максимальны, а μ_{21}^θ будут иметь, соответственно, минимальные значения, радиальные растягивающие деформации e_ρ^θ тоже минимальны. В результате этого здесь начинает формироваться впадина. Там же, где μ_{21}^θ имеют высокие значения, наблюдаются максимумы e_ρ^θ и в итоге образуются выступы. Из рис. 3.9 также видно, что для устранения

фестонов необходимо обеспечить одновременный подход всех точек кромки фланца к отверстию матрицы. Это условие выполняется в том случае, если радиальные деформации внешнего края фланца в местах образования фестонов и впадин в момент подхода к отверстию матрицы будут одинаковы:

$$e_{\rho}^{\text{ф}} = e_{\rho}^{\text{в}}. \qquad (3.24)$$

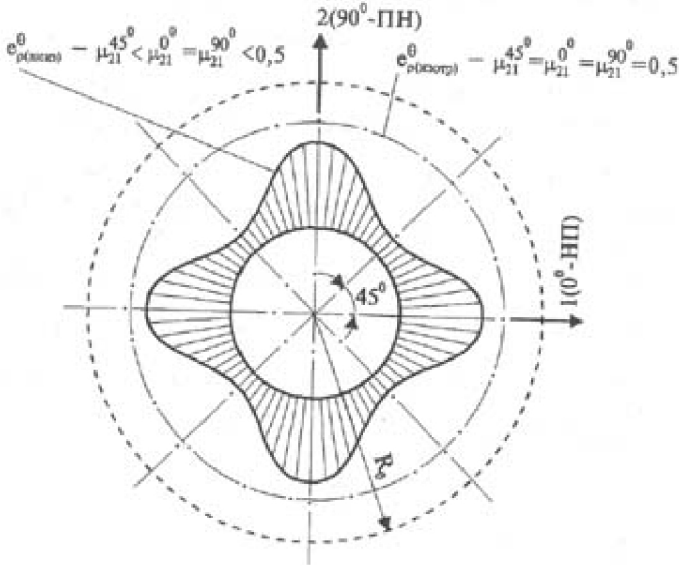


Рис. 3.9. Изменение радиальной деформации по периметру наружной кромки фланца в зависимости от анизотропии

Выразим с помощью соотношения (3.23а) радиальную деформацию e_{ρ} в направлениях $\mu_{21}^{\text{ф}}$ и $\mu_{21}^{\text{в}}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} e_{\rho}^{\text{ф}} &= -\mu_{21}^{\text{ф}}(1-m), \\ e_{\rho}^{\text{в}} &= -\mu_{21}^{\text{в}}(1-m). \end{aligned} \qquad (3.25)$$

Как видно из (3.25), обеспечить равенство радиальных деформаций $e_{\rho}^{\text{ф}} = e_{\rho}^{\text{в}}$ при заданных значениях показателей анизотропии

можно только изменением коэффициента вытяжки или первоначального размера заготовки D_0, а точнее – его уменьшением до $D_{\min}$ в тех направлениях фланца, в которых имеют место наибольшие радиальные деформации $e_\rho^{\text{ф}}$. Соответственно коэффициент вытяжки $m_{\text{ф}}$ определится как $m_{\text{ф}} = d_{\text{м}} / D_{\min}$.

Подставив правые части уравнений (3.25) в условие (3.24), с учетом принятых обозначений получим

$$\mu_{21}^{\text{в}}(m-1) = \mu_{21}^{\text{ф}}(m_{\text{ф}}-1). \tag{3.26}$$

Отсюда

$$\frac{d_{\text{м}}}{D_{\min}} = 1 + \frac{\mu_{21}^{\text{в}}}{\mu_{21}^{\text{ф}}}\left(\frac{d_{\text{м}}}{D_0} - 1\right). \tag{3.27}$$

Для построения полного контура профильной заготовки по значениям D_0 и $D_{\min}$ необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$R_\theta = \frac{R_0 + R_{\min}}{2} + \frac{R_0 - R_{\min}}{2}\cos 4\theta. \tag{3.28}$$

Применение профильной заготовки хотя и не решает проблемы в целом, но позволяет существенно снизить фестонообразование и разнотолщинность изделий, а также повысить устойчивость заготовки к отрыву дна вследствие снижения $\sigma_{\rho\max}$, а значит, и $\sigma_{\text{ст}}$ в опасном сечении.

Б. Влияние на условие равенства площадей детали и заготовки

При определении размеров исходных заготовок по известным размерам изделий исходят, как правило, из условия постоянства объема:

$$V_0 = V_{\text{д}} \text{ или } F_0 s_0 = F_{\text{д}} s_{\text{д}}, \tag{3.29}$$

где V_0 , F_0, s_0 – объем, площадь и толщина заготовки; $V_д$, $F_д$, $s_д$ – объем, площадь и толщина стенки изделия (детали). Вместе с этим в операциях листовой штамповки, в том числе и при вытяжке, часто принимается допущение о том, что во время формоизменения исходная толщина заготовки изменяется незначительно и можно принять $s_0 = s_д$. В этом случае расчет ее размеров производится из условия равенства площадей заготовки и поверхности изделия:

$$F_0 = F_д . \tag{3.30}$$

Однако во многих экспериментальных исследованиях по вытяжке отмечается, что условие (3.30) не всегда выполняется и для изотропных материалов. Так, с уменьшением коэффициента вытяжки m_1, отношения $R_м/s_0$ и увеличением трения исходная площадь заготовки после вытяжки ее в изделие увеличивается, т. е. $F_д > F_0$. Увеличение же m_1, $R_м/s_0$ и снижение трения, наоборот, приводит к уменьшению исходной площади заготовки при деформировании ($F_д < F_0$). Для оценки изменения площади заготовки при вытяжке в зависимости от указанных факторов существует следующая эмпирическая формула:

$$F_д = F_0\left(0{,}95 + \frac{0{,}8\, fs_0}{m_1^2 R_м}\right). \tag{3.31}$$

Еще более существенное изменение толщины стенки изделий, а значит, и площади исходной заготовки наблюдается в экспериментах по вытяжке анизотропных материалов. Как следует из анализа напряженно-деформированного состояния, в зависимости от значений показателей анизотропии фланец деформируется либо преимущественно по толщине ($e_z^\theta > e_\rho^\theta$), либо преимущественно в радиальном направлении ($e_z^\theta < e_\rho^\theta$). В зависимости от анизотропии меняется и протяженность участка или $\rho_{гр}^\theta$, на котором происходит утолщение фланца. В свою очередь, изменение соотношения де-

формаций e_ρ^θ и e_z^θ оказывает влияние на соотношение толщин s_0 и $s_д$, а значит, и площадей F_0 и $F_д$.

Так, построенные и представленные на рис. 3.10 контуры окружностей с радиусом $\rho_{гр}^\theta$, разграничивающие зоны утолщения и утонения фланца при вытяжке трансверсально-изотропных листов с различной анизотропией, наглядно показывают, что при $\overline{\mu}_{2-1} = 0{,}2$ в процессе формоизменения будет преобладать утолщение заготовки $(e_z^\theta > e_\rho^\theta)$ на всей плоскости матрицы, так как $\rho_{гр} = 0{,}44R_н < r_п$. Естественно, в этом случае произойдет значительное увеличение толщины стенки изделия, что обусловит уменьшение площади его поверхности $F_д$ по сравнению с исходной $(F_д < F_0)$.

При $\overline{\mu}_{2-1} = 0{,}5$ (изотропный лист) $e_z^\theta = e_\rho^\theta$.

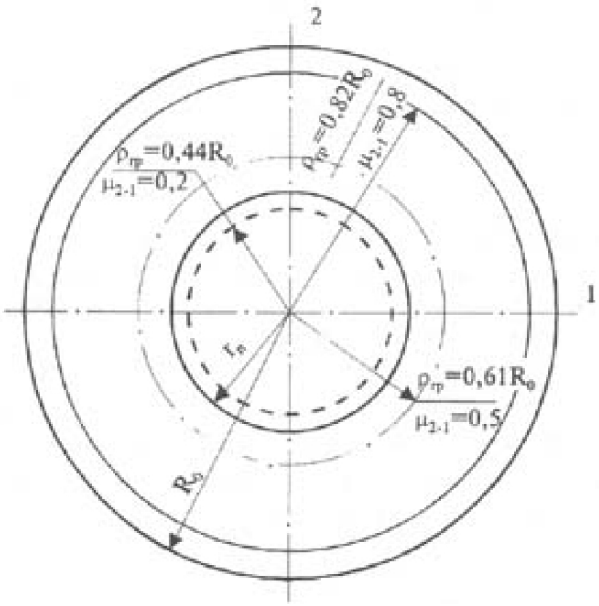


Рис. 3.10. Контуры, разграничивающие зоны утолщения и утонения фланца при вытяжке трансверсально-изотропных заготовок

Следовательно, здесь преимущественного развития деформаций в каком-то определенном направлении фланца нет. Процессы утолщения и утонения идут достаточно равномерно, поэтому можно приближенно считать, что $s_д = (s_k + s_{on})/2 \approx s_0$. Отсюда можно допустить и приближенное равенство площадей $F_д \approx F_0$. И наконец, при $\overline{\mu}_{2-1} = 0{,}8$ деформация фланца будет идти преимущественно в радиальном направлении $e_z^\theta < e_\rho^\theta$. Как видно из рис. 3.10, незначительное утолщение фланца будет лишь в небольшой краевой зоне фланца при $\rho > \rho_{гр} = 0{,}82\ R_н$, а преобладающей будет радиальная деформация e_ρ^θ, способствующая увеличению высоты детали, а значит, и площади исходной заготовки. Следовательно, соотношение площадей будет обратным, т. е. $F_д > F_0$.

В связи с этим, при вытяжке анизотропных листов размеры исходной заготовки необходимо определять только из условия постоянства объема (3.29), которое для удобства анализа запишем так:

$$F_0 = F_д(s_д / s_0). \qquad (3.32)$$

Схематично характер изменения высоты и толщины стенки изделия по образующей при вытяжке трансверсально-изотропных листов с различной степенью анизотропии представлен на рис. 3.11, из которого видно, что высота изделия с уменьшением показателя анизотропии становится меньше. Толщина стенки вдоль образующей изменяется нелинейно, увеличиваясь с уменьшением μ_{ij}.

3.3. Влияние анизотропии на предельную степень вытяжки

При проектировочном расчете и отладке технологического процесса вытяжки весьма важно правильно установить допустимую степень вытяжки $K_{пр} = D_0/d_п$ за переход. Деформирование заготовок со степенями вытяжки, превышающими предельные значения, приводит к отрыву дна детали. Штамповка с заниженной

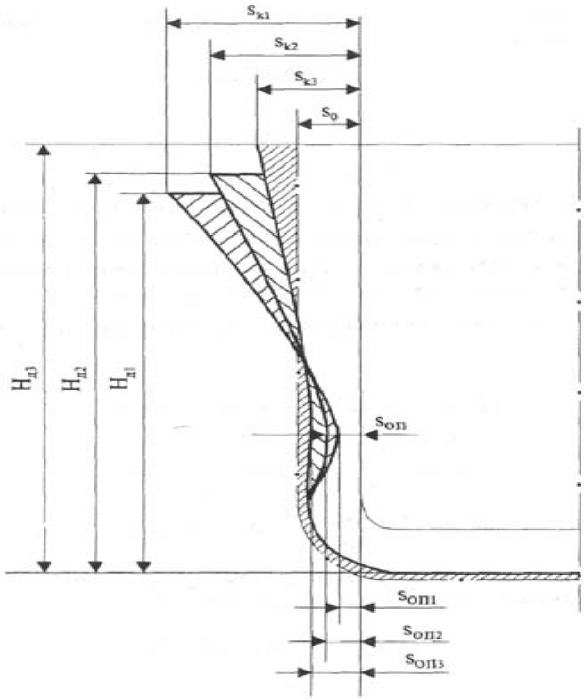


Рис. 3.11. Схема изменения высоты H и толщины s стенки изделия при вытяжке трансверсально-изотропных заготовок с показателями: $\bar{\mu} < 0{,}5$ ($H = H_1$, $s_k = s_{k1}$, $s_{on} = s_{on1}$); $\bar{\mu} = 0{,}5$ ($H = H_2$, $s_k = s_{k2}$, $s_{on} = s_{on2}$); $\bar{\mu} > 0{,}5$ ($H = H_3$, $s_k = s_{k3}$, $s_{on} = s_{on3}$)

степенью вытяжки вызывает увеличение числа переходов, необходимость загрузки дополнительного оборудования, новой штамповой оснастки и дополнительных трудовых ресурсов, а в итоге приводит к росту себестоимости изделий. В связи с этим, аналитическому и экспериментальному определению допустимого формоизменения материала при вытяжке (особенно на первой операции) постоянно уделяется пристальное внимание. В большинстве этих и других работ в основном рассматривается определение предельного формоизменения изотропных материалов.

С другой стороны, одним из наиболее существенных факторов, определяющих предельную степень вытяжки, является анизотропия свойств листовых полуфабрикатов.

При теоретическом анализе предельных возможностей вытяжки исходят из того, что в полость матрицы не может быть втянута листовая заготовка неограниченно большого диаметра, так как сформированная в начальный момент стенка детали (зона передачи усилия) имеет вполне определенную несущую способность или прочность. Действительно, если диаметр заготовки окажется во много раз больше диаметра детали, то, как следует из схемы операции вытяжки (рис. 3.4), для приведения фланца в пластическое состояние понадобятся напряжения $\sigma_{\rho max}$, значительно превышающие предел прочности вертикальной стенки, и она разрушится по опасному сечению. Таким образом, вытяжка может быть осуществлена лишь в том случае, если суммарное сопротивление фланца деформированию $\sigma_{ст}$ будет меньше напряжения разрушения стенки изделия в опасном сечении, т. е. $\sigma_{ст} < \sigma_{рш}$.

Из изложенного следует также, что операция вытяжки реализуется успешно только при вполне определенных соотношениях диаметров заготовки D_0 и детали $d_п$. Критическое соотношение этих размеров или предельная степень вытяжки могут быть найдены из условия равенства суммарного сопротивления фланца деформированию $\sigma_{ст}$ напряжению разрушения стенки изделия в опасном сечении:

$$\sigma_{ст} = \sigma_{рш} \qquad (3.33)$$

Для определения $\sigma_{рш}$ рассмотрим напряженно-деформированное состояние в опасном сечении стенки изделия. Здесь действуют меридиональные напряжения σ_ρ и тангенциальные σ_θ, а $\sigma_z = 0$. Деформированное состояние тоже плоское, так как отсутствует деформация стенки в тангенциальном направлении (e_θ =0). Тогда для рассматриваемого случая напряжения σ_ρ могут быть определены как

$$\sigma_\rho = \sigma_{i_1} \Big/ \sqrt{1 - \mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta}}\,. \qquad (3.34)$$

Так как в момент наступления разрушения можно принять $\sigma_{i_1} = \sigma_в$ а $\sigma_\rho = \sigma_{рш}$, то из (3.34) получим выражение для напряжения разрушения стенки в опасном сечении:

$$\sigma_{рш} = \sigma_в \Big/ \sqrt{1 - \mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta}}\,. \qquad (3.35)$$

Если заготовка изотропная ($\mu_{21}^{\theta} = \mu_{12}^{\theta} = 0{,}5$), то из выражения (3.35) получим общеизвестное соотношение для плоской деформации: $\sigma_{рш} = 1{,}15\sigma_в$ [6].

Подставляя значения $\sigma_{ст}$ из (3.11) и $\sigma_{рш}$ из (3.35) в условие разрушения (3.33), получим уравнение, включающее предельную степень вытяжки и показатели анизотропии листа:

$$\left[\overline{\beta}_{пр}^{\theta}\sigma_{i_c}\ln K_{пр} + \frac{fQ}{\pi s r_п K_{пр}} + \frac{\sigma_{i_c} s}{(2R+s)}\right] e^{1{,}57f} = \frac{\sigma_в}{\sqrt{1 - \mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta}}}. \qquad (3.36)$$

Полученное выражение позволяет определить $K_{пр}$, с учетом анизотропии свойств и других основных параметров вытяжки. Однако вычисления достаточно громоздки и могут быть быстро реализованы лишь на ЭВМ.

Поэтому целесообразно рассмотреть другой, более практичный, хотя и менее точный подход. Он заключается в определении радиальных растягивающих напряжений $\sigma_{\rho_{max}}$ на основании упрощенного метода, предложенного Л. А. Шофманом [7], согласно которому максимальные значения радиальных растягивающих напряжений в уравнении для σ_{cm} (3.1) могут быть приближенно определены из выражения:

$$\sigma_{\rho_{max}} = \sigma_в \varphi_1 (K - \varphi_1'), \qquad (3.37)$$

где φ_1 и φ_1' – константы листового металла, связанные с равномерным сужением $\psi_р$.

С учетом анизотропии свойств выражение (3.37) можно представить так:

$$\sigma_{\rho max} = \sigma_в \overline{\beta}^{\theta} \varphi_1 (K - \varphi_1'), \qquad (3.38)$$

где $\widetilde{\beta}^{\theta} = \overline{\beta}^{\theta}_{ан} / \overline{\beta}_{из}$ – коэффициент, учитывающий влияние анизотропии; $\overline{\beta}^{\theta}_{ан}$ – среднее значение коэффициента Лоде для анизотропного материала; $\overline{\beta}_{из}$ – среднее значение коэффициента Лоде для изотропного материала.

Приняв также положение И. А. Норицына о том, что на практике, как правило, усилие прижима составляет 1/4 усилия вытяжки, получим приближенную формулу для получения второй составляющей уравнения (3.1):

$$\sigma_{тр} = 0{,}25\sigma_{\rho max}. \qquad ...(3.39)$$

Выражение для определения напряжения изгиба также можно записать в более простой форме, заменив σ_{i_c} на $\sigma_в$:

$$\sigma_{изг} = \frac{\sigma_в s}{\sqrt{1 - \mu^{\theta}_{21}\mu^{\theta}_{12}}\,(2R_м + s)}. \qquad (3.40)$$

Влияние трения на вытяжной кромке матрицы $\sigma'_{тр}$, учтем множителем $e^{f\alpha} = e^{1{,}57f}$, т. к. $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Подставив выражения (3.38), (3.39) и (3.40) в уравнение (3.1), получим приближенную формулу для определения суммарного максимального сопротивления фланца деформированию:

$$\overline{\sigma}_{ст} = \sigma_в \left[1{,}25\overline{\beta}^{\theta}\varphi_1 (K - \varphi_1') + \frac{s}{\sqrt{1 - \mu^{\theta}_{21}\mu^{\theta}_{12}}\,(2R + s)} \right] e^{1{,}57f}. \qquad (3.41)$$

Подставив значение $\overline{\sigma}_{ст}$ из (3.41) и $\sigma_{рш}$ из (3.35) в условие разрушения (3.33) и заменив при этом K на $K_{пр}$, получим уравнение:

$$\sigma_в\left[0{,}25\overline{\beta}^{\theta}\varphi_1\left(K-\varphi_1'\right)+\frac{s}{\sqrt{1-\mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta}}\left(2R+s\right)}\right]e^{1{,}57f}= \\ =\frac{\sigma_в}{\sqrt{1-\mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta}}}. \tag{3.42}$$

Решив полученное уравнение, найдем приближенную формулу для определения предельной степени вытяжки $K_{пр}$ с учетом всех основных факторов процесса (анизотропии, упрочнения, трения, параметров штамповой оснастки и т. д.):

$$K_{пр}=\frac{1-\dfrac{s}{2R_м+s}e^{1{,}57f}}{1{,}25\overline{\beta}^{\theta}\sqrt{1-\mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta}}\varphi_1 e^{1{,}57f}}+\varphi'. \tag{3.43}$$

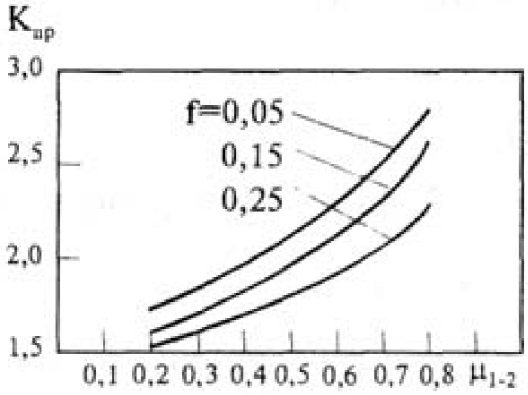


Рис. 3.12. Изменение предельной степени вытяжки от величины показателя анизотропии и коэффициента трения f: *1* – f = 0,05; *2* – f = 0,15; *3* – f = 0,2

Характер изменения предельной степени вытяжки в зависимости от осредненного в плоскости листа показателя анизотропии и коэффициента трения наглядно представлен на рис. 3.12. Ниже

приведена зависимость констант φ_1 и φ_1' от равномерного сужения $\psi_р$ [7].

$\psi_р$	0,15–0,20	0,25–0,30	0,35–0,40
φ_1	0,75	0,80	0,85
φ_1'	1,0	1,1	1,15–1,20

3.4. Влияние анизотропии на усилие

Вытяжка характеризуется непрерывным сокращением размеров очага деформации (фланца). Из-за этого постоянно изменяется и усилие вытяжки P. Оно возрастает от нуля до максимума, который, как правило, наступает в момент полного охвата заготовкой вытяжных кромок пуансона и матрицы, т. е. при $\alpha = \pi / 2$ (см. рис. 3.3). Этому моменту соответствует ход пуансона $h = R_м + R_п + s$. Необходимо отметить также, что при вытяжке интенсивно упрочняющихся материалов максимум усилия вытяжки несколько смещается в сторону больших значений хода пуансона.

При расчете силовых параметров или оценке предельных возможностей практический интерес представляет лишь максимальное усилие вытяжки P_{max}. Основываясь на анализе напряженного состояния, для определения максимального усилия вытяжки с учетом анизотропии можно рекомендовать формулу:

$$P_{max} = \left[\beta_{пр}^{\theta} \sigma_{i_c} \left(\ln \frac{R_0}{r_п} + \frac{s}{2R_м + s} \right) + \frac{fQ}{\pi R_0 s} \right] e^{1{,}57f} \pi d_п s. \qquad (3.44)$$

Расчеты по выражению (3.44) показывают, что при прочих равных условиях усилие вытяжки достигает максимального значения быстрее в тех направлениях плоскости заготовки, в которых показатели анизотропии минимальны.

Для приближенной оценки усилия вытяжки по аналогии с вытяжкой изотропных материалов можно воспользоваться формулой:

$$P_{max} = \sigma_{в_{max}} \pi d_п s_0 . \quad (3.45)$$

где $\sigma_{в_{max}}$ – предел прочности материала заготовки в направлении минимального в плоскости листа показателя анизотропии.

3.5. Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите параметры, характеризующие процесс вытяжки.

2. Охарактеризуйте основные разновидности процессов вытяжки цилиндрических деталей.

3. Какова схемы напряженно-деформированного состояния при вытяжке?

4. В чем заключается учет анизотропии при вытяжке?

5. В каких случаях во фланце реализуется схема чистого сдвига?

6. Каким образом взаимосвязаны механизмы фестонообразования и разнотолщинность стенки деталей?

7. Как определить оптимальные размеры анизотропной заготовки?

8. Как влияет анизотропия на допустимое формоизменение при вытяжке?

9. Что происходит с коэффициентом предельной степени вытяжки при увеличении коэффициента трения?

ГЛАВА 4

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ НА ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЛИСТОВ ИЗГИБОМ

Под гибкой понимается процесс листовой штамповки, при помощи которого изменяется кривизна серединной поверхности заготовки в плоскости изгиба, в результате чего получается деталь пространственной формы.

В процессе изгиба увеличивается кривизна очага деформации, вследствие чего происходит растяжение слоев металла, примыкающих к выпуклой, и сжатие слоев металла, примыкающих к вогнутой поверхностям заготовки. По способу приложения внешних нагрузок изгиб подразделяется следующим образом (рис. 4.1): гибка моментом (рис. 4.1, *а*), изгиб поперечной силой (рис. 4.1, *б*), гибка с приложением торцевого усилия растяжения (обтяжка) или сжатия (рис. 4.1 *в*, *г*), гибка с радиальным сжатием (рис. 4.1, *д*), гибка с аксиальным сжатием (растяжением) (рис. 4.1, *е*). Гибка осуществляется как в инструментальных штампах, так и в различных специальных приспособлениях.

4.1. Краткая характеристика параметров и напряженно-деформированного состояния при гибке моментом

Как технологическая операция изгиб листа характеризуется следующими группами параметров.

1. Геометрические параметры. К ним относятся ширина B и толщина s заготовки, угол гиба α, а также радиусы гиба. Различают внутренний и наружный $r_{вн}$ и $R_н$ радиусы гиба, характеризующие соответственно кривизну внутренней (вогнутой) и внешней (выпуклой) поверхности заготовки в зоне изгиба.

В практике часто используется также радиус серединной поверхности заготовки $r_{ср} = (r_{вн} + R_н)/2$. Кроме этого, введено понятие радиуса нейтрального слоя напряжений $\rho_н$, характеризующего кривизну поверхности внутри заготовки, которая разделяет растянутые и сжатые слои металла по толщине. Участок заготовки, находя-

щийся между радиусами $R_н$ и $\rho_н$, называют зоной растяжения, а между $\rho_н$ и $r_{вн}$ – зоной сжатия.

Существует также нейтральная поверхность деформаций. Она связана со следующим явлением. В зоне немонотонной деформации каждый материальный слой получает деформацию тангенциального сжатия с последующим растяжением. Следовательно, должен быть слой, в котором абсолютные деформации сжатия и растяжения за последующие этапы деформирования равны. Длина этого слоя равна длине исходной заготовки, поэтому поверхность, совпадающую с этим слоем в данный момент деформирования, называют нейтральной поверхностью деформаций.

2. Силовые параметры – это изгибающий момент, усилие гибки, усилие прижима, условия трения.

3. Предельные возможности гибки. Они характеризуются минимально допустимым радиусом гиба r_{min}, при котором еще может быть осуществлено формоизменение без разрушения.

4. Точностные параметры. К ним относится угол пружинения $\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha_{ост}$, разнотолщинность и поводки детали.

В зависимости от ширины заготовок различают гибку широких ($B > 3s$) и узких ($B < 3s$) полос. При гибке широких полос возникает объемное напряженное состояние и плоское деформированное состояние. При гибке узких полос, наоборот, имеет место плоское напряженное состояние и объемное деформированное.

По характеру напряженно-деформированного состояния различают также гибку на большие радиусы ($r_{вн}/s > 2$) и гибку на малые радиусы ($r_{вн}/s < 2$). От этого зависит величина немонотонной деформации и возможность использования при теоретическом анализе гипотезы плоских сечений.

При гибке моментом (рис. 4.2) в очаге деформации под действием внешней нагрузки возникают тангенциальные напряжения σ_θ, которые изменяют свой знак на нейтральной поверхности. При этом изменяется и знак приращения тангенциальной деформации de_θ.

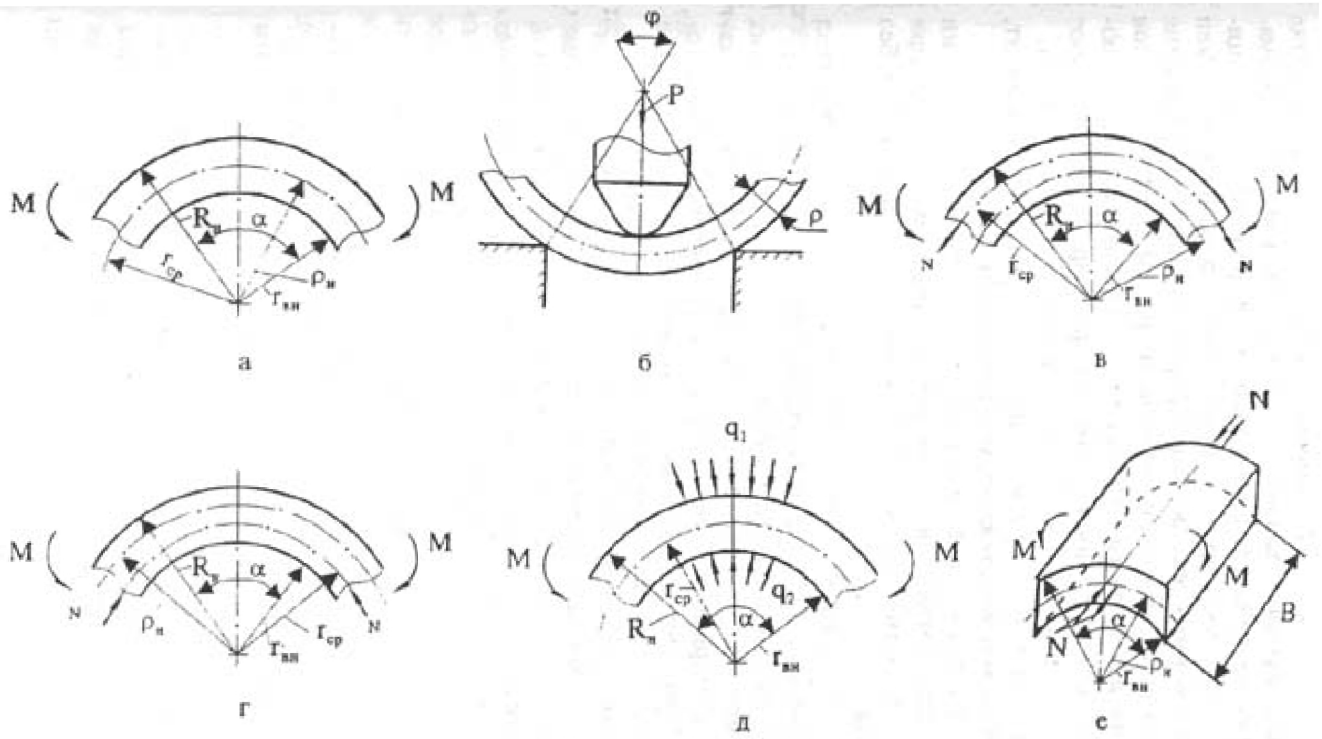


Рис 4.1. Способы гибки листовых заготовок

Одновременно отдельные слои заготовки, деформируясь по толщине, оказывают давление один на другой, что приводит к появлению радиальных напряжений сжатия σ_ρ. Их величина зависит от кривизны детали. С увеличением кривизны абсолютное значение напряжения σ_ρ возрастает.

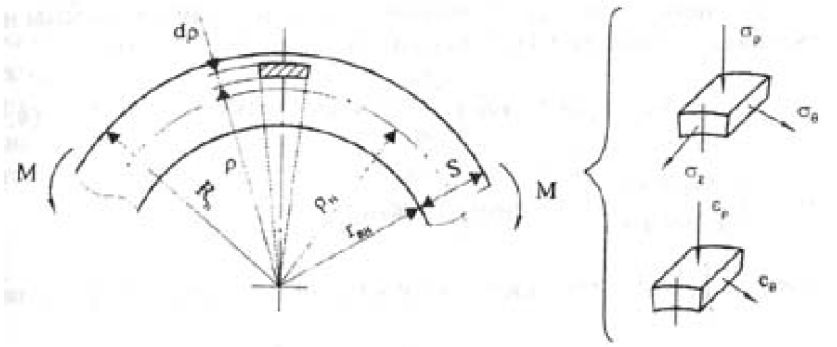


Рис. 4.2. Расчетная схема гибки моментом

Окончательная схема напряженно-деформированного состояния зависит от формы и размеров изгибаемого полуфабриката.

Гибка широких заготовок, в частности листов, характеризуется тем, что поперечная деформация e_z у них затруднена, из-за чего возникают аксиальные напряжения σ_z.

Обычно при теоретическом анализе такого процесса изменением поперечных размеров пренебрегают и в качестве расчетной принимают схему плоской деформации $e_z = 0$.

Также используют следующие допущения: считают, что главные оси напряжений и деформаций совпадают соответственно с радиальным (ось 3), тангенциальным (ось 1) и аксиальным (ось 2) направлениями, что соответствует основным осям анизотропии; при гибке на большие радиусы принимают гипотезу плоских сечений; материал ортогонально-анизотропный.

Подробный вывод формул для определения σ_ρ и σ_θ приведен в работе [1].

4.2. Влияние анизотропии на минимально допустимый радиус гиба

Предельные возможности материала в процессе изгиба характеризуются минимально допустимым радиусом гиба, в основу определения которого положен критерий начала разрушения металла.

Наиболее опасным местом возможного нарушения целостности металла является наружная выпуклая поверхность изгибаемого листа. Здесь наблюдается двухосное растяжение, в то время как остальные слои материала по толщине испытывают более «мягкие» схемы из-за наличия сжимающих напряжений. В связи с этим, значение минимального радиуса гиба определяется допустимой деформацией внешнего растягиваемого волокна.

При гибке на наружной поверхности соотношение между двумя напряжениями определяется плоской деформацией, то есть $\sigma_z = \mu_{12}\sigma_\theta$. Тогда показатель схемы напряженного состояния Г. А. Смирнова-Аляева [1] будет иметь вид:

$$П = \frac{(1+\mu_{12})}{\sqrt{1+\mu_{12}^2-\mu_{12}}}. \qquad (4.1)$$

Далее по аналогии с теорией Г. А. Смирнова-Аляева, который сравнивает критические деформации разрушения металла при данной схеме напряжений $(e_i)_{кр}$ и линейном растяжении $(e_i)_р$, рассмотрим их применительно к изгибу анизотропного листа

$$(e_i)_{кр} / (e_i)_р = K. \qquad (4.2)$$

При этом $(e_i)_р = \ln\frac{1}{1-\psi_ш}$, где $\psi_ш$ – сужение металла при разрыве образца.

При свободном гибе листа, считая, что нейтральный слой проходит по середине толщины материала, главные компоненты деформаций на выпуклой поверхности равны

$$e_\theta = \ln\frac{r+s_0}{r+0{,}5s_0},\quad e_\rho = -e_\theta,\quad e_z = 0. \tag{4.3}$$

Принимая материал листа изотропным, по Смирнову-Аляеву получим [1]:

$$\varepsilon_i = e_{i\theta} = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{r+s_0}{r+0{,}5s_0}. \tag{4.4}$$

Для избежания появления трещин должно быть удовлетворено неравенство:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{r+s_0}{r+0{,}5s_0} < (e_i)_{\text{кр}} = 0{,}55\ln\frac{1}{1-\psi_{\text{ш}}}. \tag{4.5}$$

После простейших преобразований автор получает формулу:

$$\frac{r_{\min}}{s_0} = \frac{1-0{,}5(1-\psi_{\text{ш}})^{-0{,}47}}{(1-\psi_{\text{ш}})^{-0{,}47}-1}. \tag{4.6}$$

В выражении (4.5) коэффициент 0,55 перед $\ln\frac{1}{1-\psi_{\text{ш}}}$ взят из экспериментальных данных. В то же время без большой погрешности, если провести линейную аппроксимацию диаграмм пластичности В. Л. Колмогорова в диапазоне *П* от 1 до 3, то коэффициент перед $\ln\frac{1}{1-\psi_{\text{ш}}}$ будет равным $\frac{1}{\sqrt{3}}$. Это допустимо, потому что коэффициент 0,55 является осредненным. Тогда

$$\frac{r_{\min}}{s_0} = \frac{1-0{,}5(1-\psi_{\text{ш}})^t}{(1-\psi_{\text{ш}})^t-1},\quad t \approx 0{,}5. \tag{4.7}$$

Для ортотропного материала $e_{i\theta} = \frac{1}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}e_\theta$.

При линейной аппроксимации диаграмм пластичности имеем:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}\ln\frac{r+s_0}{r+0{,}5s_0} < (e_i)_{\text{кр}} = \frac{1}{m_a}\ln\frac{1}{1-\psi_{\text{ш}}}, \tag{4.8}$$

где $m_a = \sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}}\frac{1+\mu_1}{1-\mu_1}} = \sqrt{\left(1-2\mu_{21}+\frac{\mu_{21}}{\mu_{12}}\right)\frac{1+\mu_1}{1-\mu_1}}$. (4.9)

В этом случае в формуле (4.7)

$$\frac{r_{\min}}{s_0} = \frac{1-0{,}5\left(1-\psi_{ш}\right)^t}{\left(1-\psi_{ш}\right)^t-1}, \quad t = -\sqrt{\frac{1-\mu_{12}\mu_{21}}{\left(1-2\mu_{21}+\frac{\mu_{21}}{\mu_{12}}\right)\frac{1+\mu_1}{1-\mu_1}}}. \quad (4.10)$$

Таким образом, если имеются экспериментальные данные для конкретного материала, то $K = \left(e_i\right)_{кр} / \left(e_i\right)_{р} = \Gamma_{раз} / \gamma_{кр}$, а $t = -\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}K$. При их отсутствии с достаточной для технологических расчетов точностью можно взять значения t из выражения (4.10). В отдельных случаях, когда $\mu_{ij} > 0{,}5$; можно воспользоваться и аппроксимацией Лабутина $K = \left(e_i\right)_{кр} / \left(e_i\right)_{р} = \exp(-0{,}72П)$.

Тогда

$$t = -2\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}\exp\left(-\frac{0{,}72(1+\mu_{12})}{\sqrt{1+\mu_{12}^2-\mu_{12}}}\right). \quad (4.11)$$

Для некоторых известных сплавов в табл. 4.1 показаны расчетные значения относительных минимальных радиусов с учетом анизотропии $\left(\frac{r_{\min}}{s} ортотр.\right)$ и без нее $\left(\frac{r_{\min}}{s} изотр.\right)$.

Действительные минимальные радиусы гиба должны быть больше расчетных, так как следует исключить появление на поверхности листа разрушающих трещин.

Отметим, что на точность расчета $r_{\min}/s$ значительно влияет $\psi_{ш}$. Причем у ортотропного материала $\psi_{ш}$ зависит от направления проката, а в справочниках приводятся лишь осредненные их значения. Ниже представлены значения $\psi_{ш}$ для титана:

Таблица 4.1. **Минимальные относительные радиусы гиба для некоторых материалов**

Марка материала	r_{min}/s		Марка материала	r_{min}/s	
	ортотропный	изотропный		ортотропный	изотропный
Ст3	0,5	0,4	Л63	0,22	0,22
Ст08кп	0,23	0,11	Д16М	0,70	0,71
12Х18Н9Т	0,6	0,7	АМгб	1,30	1,22
1F (США)	1,5	0,7	ВТ 1-0	2,0	0,7
М1	0,01	0	ОТ4	3,8	1,6
Л62	0,26	0,22	МА8	3,5	2,3

Таблица 4.2. **Значения $\psi_ш$ для титана**

	Вдоль	Поперек	Под углом 45°
ОТ4 (1,5 мм)	37	46	43
ОТ4 (2 мм)	33	37	44
ОТ4-1 (1 мм)	39	50	47
ОТ4-1 (2 мм)	49	54	52

Это следует учитывать при гибке вдоль и поперек проката. Неучет анизотропии при расчетах процессов гибки материалов с высокими значениями μ_{ij} в плоскости листа и низкими значениями $\psi_ш$ приводит к явно заниженным расчетным значениям r_{min}/s.

4.3. Влияние анизотропии на процесс обтяжки

Обтяжка относится к формоизменяющим операциям, связанным также с гибкой металла. Как правило, ее применяют при изготовлении крупногабаритных пространственных деталей двойной кривизны. Очень часто обтяжку используют в производстве летательных аппаратов (при изготовлении обшивок фюзеляжа, обтекателей, днищ и других деталей), а также в судо- и автомобилестрое-

нии при изготовлении различных панелей. Цель обтяжки, которая совмещает в себе гибку и дополнительное растяжение, – повысить точность контура изделий с большими радиусами кривизны. В отличие от операций гибки здесь все слои металла по толщине испытывают деформацию растяжения. Процесс обтяжки осуществляют по пуансонам, имеющим форму и размеры заданной детали. В зависимости от формы детали используют кольцевую, продольную (обтяжка с растяжением) и поперечную (простую) обтяжки (рис. 4.3).

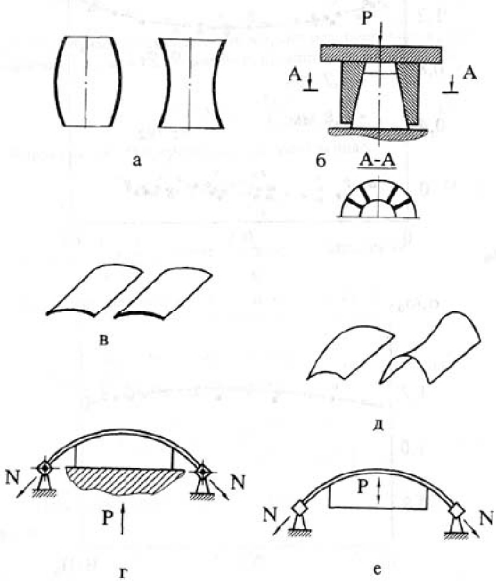


Рис. 4.3. Схемы обтяжки и форма деталей, полученных кольцевой (*а*, *б*), продольной (*в*, *г*) и поперечной (*д*, *е*) обтяжкой

Сущность кольцевой обтяжки в том, что свернутая в кольцевую форму и сваренная по стыку заготовка нагружается изнутри с помощью разжимных пуансонов или жидкости.

Формообразование при продольной обтяжке осуществляется путем изгиба заготовки в результате вертикального перемещения пуансона и одновременного растяжения ее в продольном направлении с помощью подвижных захватов, расположенных поперек листа. Гидроцилиндры, на которых находятся захваты, закреплены

шарнирно на опорах, что позволяет ориентировать усилие натяжения по касательной к поверхности пуансона в каждый момент обтяжки.

При поперечной обтяжке изгиб также осуществляется при помощи подвижного пуансона, а растяжение в поперечном направлении заготовки – с помощью неподвижных зажимов, расположенных вдоль листа. Поэтому продольной обтяжкой изготавливают пологие длинные обшивки, а поперечной – более короткие и крутые. Причем оболочки могут быть и знакопеременной кривизны.

Напряженно-деформированное состояние при продольной обтяжке характеризуется плоской схемой по напряжениям ($\sigma_3 = 0$). При этом отношение двух других напряжений $\sigma_2/\sigma_1 = m$, как показали эксперименты (рис. 4.4), при обтяжке достаточно гладких деталей обычно не превышает 0,2. Значение $m > 0{,}2$ наблюдается довольно редко.

Предельные возможности процесса обтяжки определяются вторым видом потери устойчивости, т. е. резким утонением оболочки (деформацией по толщине – e_3).

При обтяжке с растяжением критическая деформация в плоскости листа превышает равномерное удлинение, а это свидетельствует о том, что лимитирующей деформацией будет утонение e_3.

В качестве расчетного показателя обычно используют геометрический коэффициент обтяжки, который при использовании предложенной заготовки равен

$$K_{\text{обт}} = e_{1\text{п}} + 1, \tag{4.12}$$

где $e_{1\text{п}}$ – потребная деформация для получения заданной формы. Так как лимитирующей деформацией является e_3, то

$$K_{\text{обт}} = 1 - \frac{e_3}{\dfrac{\mu_{21}(m-\mu_{12})}{\mu_{12}(1-\mu_{21}m)} + 1}. \tag{4.13}$$

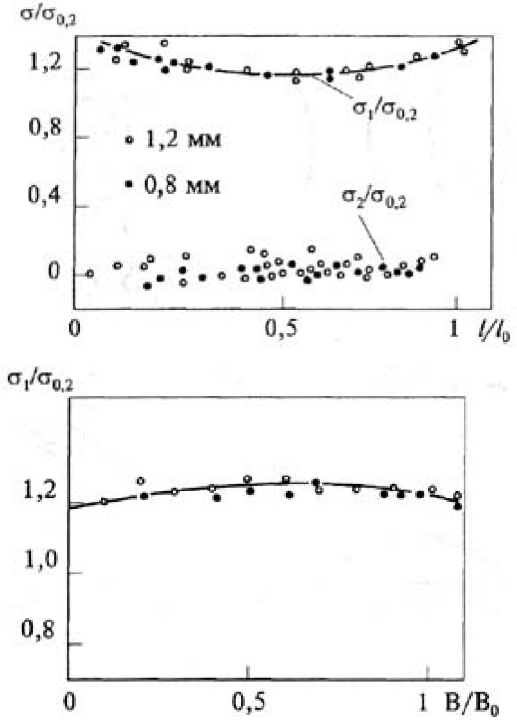


Рис. 4.4. Распределение напряжений σ_1 и σ_2 в листах из ВТ1-2 вдоль (*а*) и поперек (*б*) заготовки

Здесь e_3 задается техническими условиями на допуск по толщине, а в некоторых случаях принимается за допустимое утонение.

В качестве примера на рис. 4.5 приведены значения $K_{\text{обт}}$ и e_3 при $m = 0{,}15$ для трех значений коэффициентов поперечной деформации (тело принято трансверсально-изотропным): $\overline{\mu} = 0{,}35$ (алюминиевые сплавы), $\overline{\mu} = 0{,}5$ (изотропный материал) и $\overline{\mu} = 0{,}7$ (титановые сплавы). Из графика видно, что при одинаковом коэффициенте обтяжки утонение металла тем меньше, чем больше $\overline{\mu}$. Другими словами, при одинаковом утонении листа для материалов с большими значениями $\overline{\mu}$ можно допустить более высокий коэффициент обтяжки. Установленное значение $e_{\text{кр}}$ на переходе не все-

гда соответствует допустимым значениям, так как на процесс обтяжки и его предельные возможности влияет целый ряд факторов: соотношения равномерного и сосредоточенного удлинений, а также пределов текучести и прочности; характер эксплуатации изделия (связанный с этим необходимый запас прочности и пластичности); изменение свойств материала в процессе промежуточной и окончательной термической обработки.

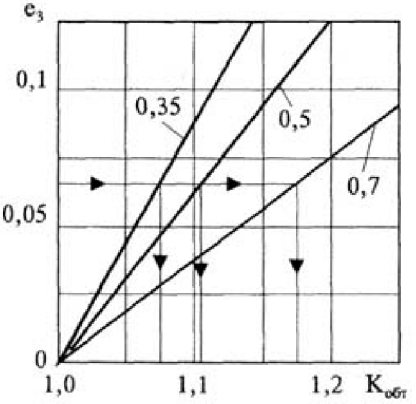


Рис. 4.5. Взаимосвязь между деформацией утонения e_3, $K_{обт}$ и величиной анизотропии заготовок $\overline{\mu}$: $\mu_{21} = \mu_{12} = 0{,}35$; 0,5 и 0,7

Перечисленные факторы взаимосвязаны, и в общем случае их нужно учитывать комплексно.

Процесс обтяжки листового металла по схеме напряжений близок к линейному растяжению. Поэтому особенности деформации материала, выявленные при механических испытаниях, должны достаточно полно характеризовать поведение листов в этом процессе.

Если проанализировать представленные на рис. 4.6 условные диаграммы растяжения сплавов Д16АМ, АМГ6, ОТ4, ВТ1-2, то можно отметить следующее:

1. У сплавов группы АМГ6, Д16АМ при достижении P_{max} почти сразу наступает разрушение. Другими словами, здесь деформа-

ция после P_{max} настолько мала, что небольшое дополнительное растяжение приводит к нарушению целостности металла.

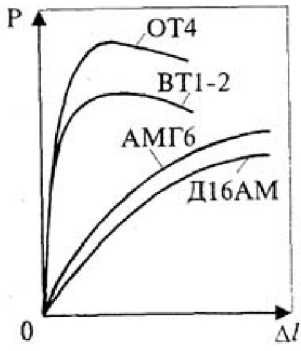


Рис. 4.6. Условные диаграммы растяжения материалов

2. У титановых сплавов после достижения максимальной нагрузки наблюдается большая сосредоточенная деформация, в процессе которой нагрузка остается критически постоянной, создавая картину «размытого» максимума.

Кроме того, титановые сплавы имеют следующую особенность: у них наблюдается несовпадение равномерного удлинения в момент достижения максимальной нагрузки со значением, подсчитанным по стандартной методике после разрыва образца (табл. 4.3).

Таблица 4.3. **Пластические свойства материалов**

Марка материала	Толщина, мм	δ_{10}, %	δ_5, %	δ_p, % (в точке)	δ_p, % (в момент разрыва)
ВТ1-2	1	22	33	7	11
ОТ4	1	19	31	4	7
ОТ4-1	1	27	44	8	10
ВТ-14	3	14	18	5	10
Д16АМ	1	20	23	17	17
АМГ6	1	26	28	24	24
Сталь 20	1	39	51	27	27

Таким образом, в отличие от алюминиевых, титановые сплавы обладают явно выраженным запасом пластичности после начала локальной деформации.

4.4. Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите способы гибки листовых заготовок.

2. Перечислите параметры, характеризующие процесс изгиба?

3. Каковы схемы напряженно-деформированного состояния при обтяжке?

4. Какими коэффициентами учитывается влияние анизотропии на допустимое формоизменение при изгибе?

5. Назовите разновидности процесса обтяжки.

6. Чем характеризуется напряженно-деформированное состояние при продольной обтяжке?

7. В чем заключается учет анизотропии при изгибе?

8. Чем характеризуются предельные возможности процесса изгиба?

9. Как влияет на деформацию утонения увеличение среднего значения показателя анизотропии?

10. Чем характеризуются предельные возможности процесса обтяжки?

ГЛАВА 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПОКАЗАТЕЛЯМ АНИЗОТРОПИИ

Наиболее высокие показатели штампуемости и интенсификация процессов деформирования в целом достигаются при формообразовании таких листов, анизотропия свойств в которых обеспечивает увеличение пластической деформации заготовок в заданном технологической схемой направлении и повышение качества изделий. Чтобы сформировать в металле отвечающее этим требованиям сочетание механических свойств и анизотропии, необходимо вначале установить P_{max}, какие значения ее показателей повышают штампуемость заготовок в конкретной операции. С этой целью проанализируем полученные в предыдущих главах расчетные соотношения.

5.1. Механизм потери устойчивости при деформировании анизотропных заготовок

Как известно, ограничивающая процесс пластического деформирования потеря устойчивости при листовой штамповке наступает чаще всего в результате чрезмерного утонения и образования трещин под действием растягивающих напряжений или вследствие складкообразования под действием напряжений сжатия.

В большинстве операций в зависимости от конкретных условий деформирования могут иметь место и тот и другой виды потери устойчивости (табл. 5.1). При этом, как видно из табл. 5.1, она может возникать как в очаге деформации, так и вне его, т. е. в зоне передачи усилия.

По направлению расположения трещины и складки могут быть продольными, если они совпадают с направлением действия деформирующих усилий, и поперечными – если они перпендикулярны к действующему усилию. Так, в операциях гибки, обтяжки, вытяжки возникают поперечные трещины, вызванные растягиваю-

щими напряжениями, возникшими от непосредственного силового воздействия инструмента.

Характерной особенностью листовых заготовок является их сравнительно малый размер по толщине. Вследствие этого в процессе формообразования трещина, как правило, развивается по толщине, так как в силу масштабного фактора деформация в направлении ширины листа затруднена. Складкообразование же происходит чаще всего в тех зонах очага деформации, где затруднено перемещение сжимаемого металла в заданном технологической схемой направлении.

Для удобства анализа приведенные в табл. 5.1 процессы разделены на две группы:

1. Процессы, где потеря устойчивости происходит в очаге деформации (образование трещин при гибке и обтяжке или гофров при вытяжке).

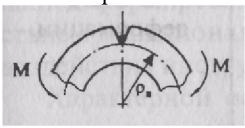
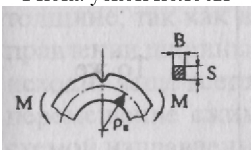
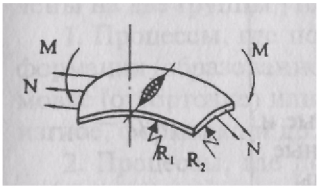
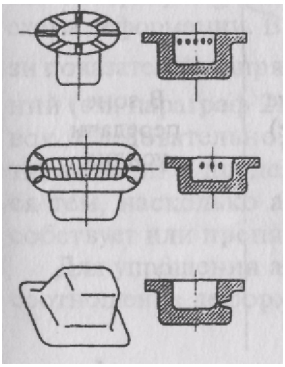
2. Процессы, где потеря устойчивости происходит не в очаге деформации, а в зоне передачи усилия (отрыв дна при вытяжке).

Основным фактором, определяющим возникновение и развитие потери устойчивости, является, как известно, механическая схема деформации. В свою очередь, она, как следует из взаимосвязи показателей напряженного ν_σ и деформированного ν_ε состояний, зависит от анизотропии свойств заготовок. Следовательно, момент наступления потери устойчивости, а значит, и предельное формоизменение будут определяться тем, насколько анизотропия свойств полуфабрикатов способствует или препятствует образованию потери устойчивости.

Для упрощения анализа в качестве критерия, определяющего соотношение деформаций по ширине и толщине листа, примем коэффициент «нормальной» анизотропии

$$\overline{\mu} = 0{,}25(\mu_{21} + 2\mu_1 + \mu_{12}).$$

Таблица 5.1. **Классификация операций по видам и месту возникновения потери устойчивости**

Наименование операций и схема потери устойчивости	Вид потери устойчивости	Место потери устойчивости
Гибка широкой полосы 	Поперечная трещина	Очаг деформации
Гибка узкой полосы 	То же	То же
Обтяжка 	Поперечная трещина	— // —
Вытяжка цилиндрических и коробчатых деталей	Продольные гофры	В очаге деформации
	Поперечная трещина	В зоне передачи усилия

При использовании $\overline{\mu}$ взаимосвязь между показателями ν_σ и ν_ε имеет следующий вид:

$$\nu_\varepsilon = \frac{6\overline{\mu} - 3(\nu_\sigma + 1)}{(2\overline{\mu} - 1)(\nu_\sigma + 2) - 2}. \qquad (5.1)$$

Из (5.1) видно, что при фиксированном напряженном состоянии (ν_σ = const) соотношение деформаций в очаге формоизменения прямо определяется величиной коэффициента нормальной анизотропии. Следовательно, по его значениям можно судить о способности материала к преимущественному развитию деформаций металла в определенном направлении. Это же следует из определения μ_{ij}, а значит, и $\overline{\mu}$. Действительно, можно записать:

$$\mu_{21} = -\frac{e_2}{e_1} = \frac{e_2}{e_2 + e_3}.$$

Отсюда если $\mu_{21} > 0{,}5$, то и $\frac{e_2}{e_2 + e_3} > 0{,}5$ или $e_2 - \frac{1}{2}e_2 > \frac{1}{2}e_3$.

Тогда $e_2 > e_3$. Аналогично при $\mu_{21} < 0{,}5$ и e_2 будет меньше e_3.

Следовательно, лист $\overline{\mu} > 0{,}5$ при прочих равных условиях склонен к преимущественной деформации по ширине, а деформация по толщине будет затруднена. Если же $\overline{\mu} < 0{,}5$, то, наоборот, деформация развивается преимущественно по толщине и затруднена по ширине листа.

С учетом изложенного рассмотрим, в какой группе процессов какой характер анизотропии будет препятствовать образованию потери устойчивости.

Так как в первой группе процессов часть операций осуществляется в условиях плоской деформации, а часть – в условиях плоского напряженного состояния, то целесообразно их рассмотреть отдельно.

Плоское деформированное состояние

Так как одна из деформаций в этом случае равна нулю, потеря устойчивости вследствие утонения и образования трещин может наблюдаться здесь, например, при следующем соотношении деформаций в очаге: $e_2 = 0$, $e_1 = -e_3$.

Отсюда ясно, что ограничивающая предельное формоизменение растягивающая деформация e_1 будет тем больше, чем выше деформация сжатия e_3. Следовательно, для этих операций благоприятной будет такая анизотропия свойств листов, которая способствует преимущественному развитию деформации по толщине, т. е. $\overline{\mu} < 0{,}5$.

Гофрообразование возникает там, где преобладающими являются сжимающие деформации в очаге. В этом случае для предотвращения потери устойчивости также необходим комплекс свойств, обеспечивающий преимущественное перемещение вытесняемого деформацией сжатия (e_1) металла в направлении толщины (e_3) (т. к. $e_2 = 0$ по условию). Поэтому, например, при гибке широких листов ($e_z = 0$) ограничивающая допустимое формоизменение тенгенциальная деформация e_θ внешнего волокна увеличивается с ростом деформаций утонения в зоне растяжения и утолщения в зоне сжатия.

В целом отсюда ясно, что при плоской деформации требования к направленности свойств металла для обоих видов потери устойчивости совпадают: необходимы листы, показатель «нормальной» анизотропии которых $\overline{\mu} < 0{,}5$.

Плоское напряженное состояние

Оно характеризуется, чаще всего, следующим соотношением деформаций в очаге: $e_1 = -e_2 - e_3$. В общем случае потеря устойчивости и образование трещины наступают здесь в тот момент, когда деформация в одном из направлений достигает предельной для

данного материала величины. Как известно, в листовой штамповке ширина заготовки, как правило, значительно превышает толщину. Поэтому деформация по ширине e_2 у них затруднена и суммарная растягивающая деформация e_1 увеличивается в основном за счет деформации сжатия по толщине (утонения) e_3. Последняя, из-за малости размера по толщине, быстро достигает предельного значения, ограничивая этим допустимое формоизменение в целом. Следовательно, в рассматриваемом случае рациональными будут такие листы, направленность свойств которых затрудняет деформацию по толщине и способствует преимущественному развитию деформации по ширине. Как показано выше, этим требованиям отвечают листы с $\overline{\mu} > 0{,}5$. Подтверждением этому является увеличение деформации e_1 при обтяжке в случае использования заготовок с $\overline{\mu} > 0{,}5$.

Потеря устойчивости в виде складкообразования в объемных схемах деформирования возникает в тех случаях, когда преобладающими в очаге являются деформации сжатия. Так как в листоштамповочных операциях изменение толщины заготовки специально технологической схемой, как правило, не предусматривается, т. е. $e_3 \to 0$, то для предотвращения выпучивания необходимо обеспечить свободное смещение металла в направлении длины и ширины. Следовательно, здесь тоже необходимы такие листы, анизотропия свойств которых затрудняет деформацию по толщине и благоприятствует деформации по длине и ширине, т. е. листы с $\overline{\mu} > 0{,}5$.

Таким образом, в данной подгруппе операций требования к анизотропии свойств металла тоже совпадают для обоих видов потери устойчивости, т. е. необходимы листы $\overline{\mu} > 0{,}5$.

Переходя к анализу второй группы процессов, где потеря устойчивости возникает вне очага деформации, отметим, что они осуществляются, как правило, в условиях объемной схемы деформаций.

Состояние устойчивого равновесия здесь сохраняется, если сопротивление деформации в очаге не превышает прочности металла в зоне передачи усилия. В противном случае в этой зоне развиваются локальные пластические деформации и в зависимости от знака нагрузки (растягивающая или сжимающая) наступает потеря устойчивости в виде трещин или выпучивания.

Так как трещина образуется в результате чрезмерного утонения заготовок под действием растягивающих нагрузок, то для устранения этого нужны листы с затрудненной деформацией по толщине ($\overline{\mu}>0{,}5$). Помимо этого в таких листах при штамповке будет развиваться преимущественная деформация по ширине, что снизит, естественно, сопротивление металла в очаге деформации, а в итоге повысит допустимое формоизменение. Характерным примером здесь являются процессы глубокой вытяжки.

Таким образом, для процессов второй группы требования к величине $\overline{\mu}$ для обоих видов потери устойчивости также совпадают. Наиболее оптимальным для этих операций будет такой комплекс свойств в листе, который обеспечивает преимущественное развитие деформации по ширине и затрудняет деформацию по толщине, т. е. $\overline{\mu}>0{,}5$.

В целом проведенный анализ показывает: для предотвращения потери устойчивости и интенсификации процессов штамповки необходима такая анизотропия свойств, которая способствует развитию деформации в том направлении листа, пластическое течение в котором предусмотрено технологической схемой данной операции и затрудняет течение металла в других направлениях. При формообразовании в условиях плоской деформации в листах должна быть создана анизотропия с $\overline{\mu}<0{,}5$. Для процессов, характеризующихся плоским напряженным состоянием, необходимы листы с $\overline{\mu}>0{,}5$.

Вместе с этим следует отметить, что положительное влияние рациональных значений «нормальной» анизотропии $\overline{\mu}$ на процес-

сы штамповки может быть снижено из-за плоскостной анизотропии, проявления которой изменяются в зависимости от вида операции, формы деталей, ориентации осей анизотропии заготовок относительно направлений главных напряжений и т. д. В связи с этим рассмотрим далее влияние этого вида анизотропии на параметры рассматриваемых процессов штамповки.

5.2. Требования к анизотропии заготовок для вытяжки

Определение требуемых для интенсификации процессов вытяжки коэффициентов анизотропии проводится на основе полученных в гл. 3 моделей влияния анизотропии на основные технологические параметры формообразования и характеристики изделий.

Для количественной оценки зависимости предельной степени вытяжки $K_{\text{пр}}$ от сочетания показателей плоскостной анизотропии воспользуемся соотношением (3.43):

$$K_{\text{пр}} = \frac{1 - \dfrac{s}{2R_M + s} e^{1{,}57f}}{1{,}25\tilde{\beta}^{\theta}\sqrt{1 - \mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta}}\varphi_1 e^{1{,}57f}} + \varphi_1'. \qquad (5.2)$$

Выражение (5.2) не учитывает различия свойств в плоскости листа, так как в него не входит показатель анизотропии в направлении 45° к оси прокатки μ_1.

Чтобы учесть его, заменим в выражении (5.2) произведение $(\mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta})$ на $\overline{\mu}^2$, которое включает все три коэффициента анизотропии, и построим номограмму (рис. 5.1). Анализируя полученные зависимости, отметим, что во всех случаях, когда показатели анизотропии больше 0,5 и примерно равны между собой, $K_{\text{пр}}$ выше, чем у материалов с меньшими или резко различными в плоскости показателями. Так, при $\mu_{21} = \mu_{12} = \mu_1 = 0{,}8$ и $f = 0{,}1$ $K = 3{,}0$. Если же, например, $\mu_{21} = \mu_{12} = 0{,}6$, а $\mu_1 = 0{,}25$, то $K_{\text{пр}} = 2{,}0$. Если же все

значения μ_{ij} невысоки, но одинаковы в плоскости листа, например $\mu_{21} = \mu_{12} = \mu_1 = 0{,}52$, то $K_{\text{пр}} = 2{,}3$.

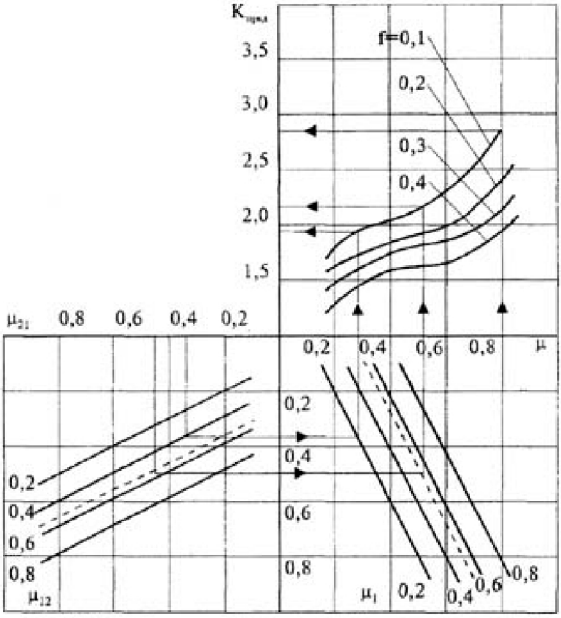


Рис. 5.1. Изменение предельной степени вытяжки в зависимости от сочетания μ_{ij} в плоскости листа

Из графиков видно также, что различающиеся по направлениям показатели анизотропии не могут обеспечить высокие вытяжные свойства и в том случае, когда один или даже два из трех показателей будут иметь максимальные значения. Поэтому интенсификация деформирования таких материалов связана прежде всего с выравниванием показателей μ_{ij} в плоскости листа ($\mu_{21} = \mu_{12} = \mu_1$) при одновременном повышении их значений. Так, в целом из рис. 5.1 следует, что увеличение показателей анизотропии на 15% повышает предельную степень вытяжки на 12–15%.

Выражение (5.2) позволяет также оценить влияние на $K_{\text{пр}}$ и характеристик пластичности металла при помощи коэффициентов

φ_1 и φ_1' связанных с относительным сужением образцов при разрыве $\psi_р$. Основываясь на соотношении (5.2), проанализируем влияние пластических свойств металла на предельную степень вытяжки.

Если принять, что условия вытяжки, анизотропия материала, трение, упрочнение и другие факторы постоянны, а изменяются только пластические свойства, то выражение (5.2) может быть представлено в следующем виде:

$$K = N/(\varphi_1 + \varphi_1'),$$

где

$$N = \frac{2R_м + s\left(1 - e^{1,57f}\right)}{1,25\tilde{\beta}^{\theta}\sqrt{1 - \mu_{21}^{\theta}\mu_{12}^{\theta}}e^{1,57f}\left(2R_м + s\right)}. \qquad (5.3)$$

Чтобы оценить пределы изменения $K_{пр}$ при вытяжке материалов с различными значениями характеристик пластичности, обозначим для одного из них – начального – $\psi_р = \psi_0$, а для других – $\psi_р = \psi_i$. Соответственно обозначим и константы: φ для $\psi_0 - \varphi_0$ и φ_0' для $\psi_i - \varphi_i$ и φ_i'.

С учетом принятых обозначений соотношение (5.3) можно представить (для разнородных материалов) следующим образом:

$$\begin{aligned} N &= \varphi_0 K_{пр}^0 - \varphi_0\varphi_0', \\ N &= \varphi_i K_{пр}^i - \varphi_i\varphi_i'. \end{aligned} \qquad (5.4)$$

Так как величина N в обоих уравнениях одинакова, то, приняв их правые части и решив относительно $K_{пр}^i / K_{пр}^0$, получим

$$K_{пр}^i / K_{пр}^0 = \varphi_0\varphi_i + \left(\varphi_i\varphi_i' - \varphi_0\varphi_0'\right)/\varphi_i K_{пр}^0 . \qquad (5.5)$$

Выражение (5.5) позволяет оценить изменение предельной степени вытяжки в зависимости от пластичности материалов $\psi_р$.

Например, приняв, что при $\psi_p = \psi_0 = 0{,}15$, $K^0_{\text{пр}} = 2{,}0$, и используя табличную зависимость φ_i и φ'_i от $(\psi_\text{р})_i$ (i = 0, 1, 2, 3), проведены по формуле (5.5) расчеты, результаты которых представлены в табл. 5.2. Из табл. 5.2 следует, что при увеличении относительного сужения $\psi_\text{р}$ в 3 раза предельная степень вытяжки возросла лишь на 3,2%. Косвенным подтверждением этому служат результаты экспериментальных исследований по вытяжке листов и сплавов Д16 и АДО с $\psi_\text{р} \approx 8...10\%$, показавшие их стабильную штампуемость при К = 1,92...1,94.

Таблица 5. 2. **Изменение степени вытяжки от пластических свойств**

Значения характеристик пластичности $\psi_\text{р}$ и коэффициентов φ_i и φ'_i	$K^i_{\text{пр}} / K^0_{\text{пр}}$
$\psi_\text{р} = \psi_0 = \psi_1 = 0{,}15 - 0{,}20$ $\psi_0 = \varphi_1 = 0{,}75$ $\varphi'_0 = \varphi'_1 = 1{,}0$	1
$\psi_\text{р} = \psi_2 = 0{,}25 - 0{,}30$ $\psi_0 = 0{,}75;\ \ \varphi_3 = 0{,}8$ $\varphi'_0 = 1{,}0;\ \ \varphi'_3 = 1{,}1$	1,018
$\psi_h = \psi_3 = 0{,}35 - 0{,}40$ $\psi_0 = 0{,}75;\ \ \varphi_3 = 0{,}85$ $\varphi'_0 = 1{,}5;\ \ \varphi'_3 = 1{,}18$	1,032

Отсюда ясно, что, добиваясь эффективных показателей анизотропии в плоскости листа ($\mu_{21} = \mu_{12} = \mu_1$), пластичностью материала можно варьировать в достаточно широких пределах. Это создает основу для производства листов с рациональным сочетанием характеристик прочности, пластичности и анизотропии.

Для определения рациональных значений анизотропии, способствующих устранению разнотолщинности стенок деталей и фестонообразования, рассмотрим влияние анизотропии на изменение толщины фланца при вытяжке.

Деформация по толщине e_z в любой точке внешней кромки фланца может быть определена по выражению (3.15):

$$e_z^{\theta} = \left(\mu_{21}^{\theta} - 1\right) e_{\theta}^{\theta}.$$

Если рассмотреть на контуре фланца (рис. 5.2) точку l, находящуюся на оси проката 1, точку m, расположенную на линии, составляющей угол θ = 45° с осью прокатки, и точку n, находящуюся на оси 2, перпендикулярной направлению прокатки (θ = 90°), то величина e_z^{θ} для этих точек составит:

$$\begin{aligned} e_{z(l)}^{0} &= \left(\mu_{21} - 1\right) e_{\theta}^{0}, \\ e_{z(m)}^{45} &= \left(\mu_{1} - 1\right) e_{\theta}^{45}, \\ e_{z(n)}^{90} &= \left(\mu_{12} - 1\right) e_{\theta}^{90}. \end{aligned} \qquad (5.6)$$

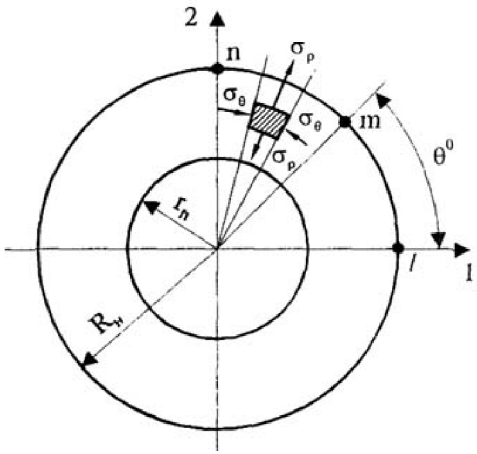


Рис. 5.2. Схема к определению соотношения деформаций во фланце круглой заготовки

Из выражений (5.6) без особых преобразований ясно, что изменение толщины фланца по периметру будет одинаковым во всех направлениях, если показатели плоскостной анизотропии μ_{ij}^{θ} будут одинаковы во всех направлениях плоскости заготовки, т. е. $\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$. В результате будет устранена и разнотолщинность стенок изделий по периметру $D_{\text{п}}$, т. к. $s_{\Ф} = s_{\text{В}}$. Из выражений (3.22) также видно, что с увеличением показателей μ_{ij}^{θ} их выравниванием по направлениям одновременно уменьшается и разнотолщинность стенок по образующей $D_{\text{о}}$. Это наглядно иллюстрируется результатами экспериментов по вытяжке заготовок из алюминиевых сплавов, представленных в табл. 5.3.

Разнотолщинность стенок изделий по образующей $D_{\text{о}}$ и по периметру $D_{\text{п}}$ определялась по следующим выражениям:

$$D_{\text{о}} = \frac{s_{\max}^{\text{в}} - s_{\min}^{\text{в}}}{s_{\text{о}}};$$
$$D_{\text{п}} = \frac{s_{\max}^{\text{в}} - s_{\min}^{\text{ф}}}{s_{\text{о}}}. \qquad (5.7)$$

Здесь $s_{\max}^{\text{в}}, s_{\min}^{\text{в}}$ – максимальная (у верхнего края изделия) и минимальная (в опасном сечении) толщина стенки изделия по впадине вдоль образующей; $s_{\max}^{\text{ф}}$ – максимальная толщина стенки по фестону, измеряемая на той же высоте, что и $s_{\max}^{\text{в}}$.

При равенстве показателей анизотропии в плоскости листа, как следует из выражения (3.23а), будут одинаковы по периметру фланца и радиальные деформации e_{ρ}^{θ}. Следовательно, все точки окружности фланца одновременно достигнут отверстия матрицы и получится ровный край изделия, т. е. без фестонов и впадин.

Результаты экспериментов, приведенные в табл. 5.3, показывают, что в результате выравнивания анизотропии в плоскости листа (устранения впадин) за счет увеличения $\mu_{\min}$ возрастает полез-

ная высота детали $H_д$ при одинаковых размерах заготовки и уменьшается утонение стенки в опасном сечении. Последнее обстоятельство позволяет в ряде случаев снизить толщину исходной заготовки, что в совокупности с устранением фестонов дает значительную экономию металла.

Таблица 5.3. **Изменение параметров изделий в зависимости от анизотропии свойств изделий**

Толщина листа, мм	Темпер. отжига, °С	μ_{ij}^{θ}			Высота детали $H_д$ вдоль μ_{ij}^{θ}, мм		Толщина стенки по фестону, мм		Толщина стенки по впадине, мм		Разнотолщинность		Степень фестонообразования E, %
		0°	45°	90°	μ_{21max}^{θ}	μ_{21min}^{θ}	$s_к^ф$	$s_{оп}^ф$	$s_к^в$	$s_{оп}^в$	$D_О$	$D_П$	
U2	20	0,2	0,49	0,44	52,5	46,3	1,3	1,08	1,5	1,06	0,38	0,22	12,8
	300	0,46	0,48	0,47	48,1	47,4	1,22	1,06	1,27	1,08	0,32	0,04	12,7
	450	0,46	0,36	0,49	52,6	46,4	1,25	1,01	1,5	0,97	0,45	0,24	12,6
2,86	20	0,23	0,55	0,46	52,8	45,2	3,4	2,84	3,98	2,61	0,46	0,3	17,0
	250	0,25	0,53	0,48	51,6	45,5	3,14	2,63	3,64	2,32	0,47	0,24	14,0
	325	0,41	0,44	0,45	49,0	48,2	3,48	2,61	3,61	2,62	0,35	0,05	1,6
	400	0,41	0,31	0,46	51,4	46,5	3,1	2,45	3,73	2,28	0,51	0,32	10,8
4,78	20	0,25	0,56	0,48	58,1	50,0	5,0	4,08	6,12	3,9	0,47	0,34	16,1
	300	0,28	0,52	0,42	57,5	50,6	5,1	4,3	6,28	4,0	0,48	0,28	13,9
	320	0,4	0,43	0,39	54,1	53,2	5,5	4,36	5,7	4,1	0,33	0,04	1,9
	450	0,39	0,28	0,41	55,6	52,0	5,18	3,98	6,34	3,88	0,51	0,28	6,8

5.3. Требования к анизотропии заготовок, деформируемых изгибом

Особенностью всего многообразия технологических схем деформирования листовых заготовок изгибом, в отличие от рассмотренных операций вытяжки, является, как следует из предыдущего анализа, совпадение направлений главных напряжений и деформаций с основными осями анизотропии. Вследствие этого плоскостная анизотропия оказывает существенное влияние и может быть

эффективно использована только для увеличения допустимого формоизменения заготовок, с которым и связывается в первую очередь их интенсификация.

Для определения требований к величине показателей плоскостной анизотропии при гибке моментом воспользуемся соотношениями (4.10):

$$\frac{r_{\min}}{s_0} = \frac{1 - 0{,}5\left(1 - \psi_{ш}\right)^t}{\left(1 - \psi_{ш}\right)^t - 1}, \tag{5.8}$$

где $t = -2\sqrt{1 - \mu_{21}\mu_{12}}\exp - \dfrac{0{,}72\left(1 + \mu_{12}\right)}{\sqrt{1 + \mu_{12}^2 - \mu_{12}}}$

или $t = -\sqrt{\dfrac{1 - \mu_{21}\mu_{12}}{\left(1 - \mu_{21} + \dfrac{\mu_{21}}{\mu_{12}}\right)\dfrac{1 + \mu_1}{1 - \mu_1}}}.$

Построенные на основе выражения (5.8) графики (рис. 5.3) показывают, что минимальный радиус гиба в зависимости от сочетания показателей анизотропии может измениться в 2–4 раза при постоянных значениях $\psi_{ш}$. При этом меньшим значениям характеристик анизотропии соответствует большее предельное формоизменение. Так, для листов с относительным сужением $\psi_{ш} = 0{,}3$ и $\mu_{21} = \mu_{12} = \mu_1 = 0{,}8$ значение $r_{\min} \approx 4{,}1s_0$, а при $\mu_{21} = \mu_{12} = \mu_1 = 0{,}2$ $r_{\min} \approx 1{,}2s_0$.

Если же коэффициенты анизотропии неодинаковы в различных направлениях плоскости листа, то линию гиба необходимо располагать так, чтобы тангенциальные напряжения σ_θ действовали вдоль направления минимального коэффициента μ_{ij}. В этом случае допустимое формоизменение также увеличивается. Например, при расположении линии гиба в листе вдоль направления минимального коэффициента анизотропии ($\mu_{21} = 0{,}2$) напряжения σ_θ действуют, соответственно, вдоль максимального значения μ_{ij}

(μ_{12} = 0,8) и $r_{min} = 2{,}4s_0$. При повороте линии гиба на 90° напряжения σ_θ будут действовать уже вдоль минимального значения μ_{12} = 0,2 (μ_{21} = 0,8). В этом случае, как следует из рис. 5.3, значение $r_{min} = 1{,}19\, s_0$.

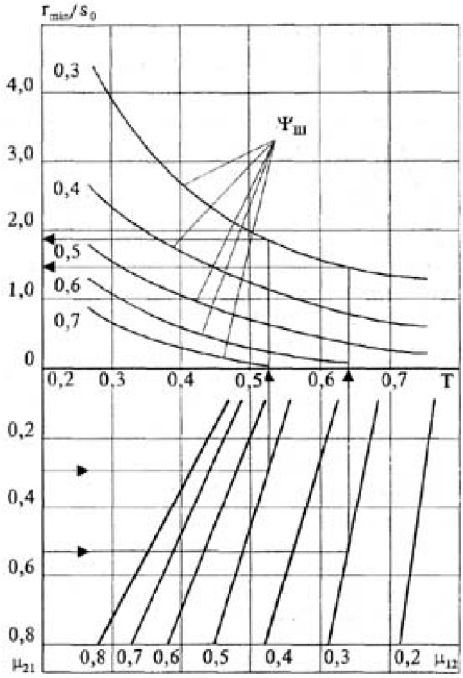


Рис. 5.3. Изменение $\frac{r_{min}}{s_0}$ в зависимости от сочетаний μ_{ij} и $\psi_ш$

Проведенный с помощью графиков анализ подтверждается экспериментальными данными, представленными в табл. 5.4. Рациональный выбор линии гиба в плоскости листа особенно важен для полуфабрикатов, штампуемых в полунагартованном состоянии. Это позволяет увеличить предельное формоизменение при гибке малопластичных листов в 1,5–2 раза. Из табл. 5.4 также видно, что

Таблица 5.4. **Влияние анизотропии на минимально допустимый относительный радиус гиба**

Марка сплава	Температура отжига, °С	Показатели анизотропии			Экспериментальные значения r_{min} при расположении линии гиба		
		μ_{12}^{0}	μ_{12}^{45}	μ_{12}^{90}	вдоль прокатки	поперек прокатки	под углом 45° к оси прокатки
		Толщина листа 0,8 мм					
АДО	250	0,33	0,49	0,43	6,4	2,8	3,7
	300	0,44	0,48	0,45	1,2	1,3	1,2
	400	0,43	0,47	0,46	1,0	1,0	1,1
Д16	250	0,27	0,57	0,56	13,6	9,2	14,3
	300	0,34	0,56	0,42	4,0	3,3	4,8
	400	0,38	0,52	0,41	2,0	1,7	2,3
		Толщина листа 5 мм					
АДО	250	0,27	0,53	0,43	1,7	1,3	2,4
	300	0,28	0,52	0,4	1,6	1,4	1,95
	400	0,38	0,27	0,4	1,2	1,2	0,82
Д16	250	0,27	0,54	0,46	7,3	4,2	7,7
	300	0,32	0,5	0,42	4,0	3,2	4,6
	400	0,38	0,42	1,5	1,5	1,4	1,4

иногда линию гиба целесообразно располагать под углом 45° к оси прокатки. Факт увеличения допустимого формоизменения с уменьшением показателей анизотропии объясняется изменением соотношения между тангенциальными σ_θ и осевыми σ_z напряжениями на внешней поверхности заготовки, в месте возникновения потери устойчивости. Для случая плоской деформации ($e_z = 0$) и плоского напряженного состояния ($\sigma_\rho = 0$) это соотношение записывается как $\sigma_z = \mu_{12}\sigma_\theta$. Отсюда следует, что при высоких значениях показателей анизотропии напряженное состояние наружного волокна близко к равномерному двухосному растяжению, а при низких μ_{ij} это волокно будет испытывать более «мягкую» схему, близкую к линейному растяжению. Следовательно, потеря устойчивости наступит при большем формоизменении. Аналогичные выводы можно получить, анализируя зависимость $П = f(\mu_{ij})$, из

которой видно, что с уменьшением μ_{ij} снижается и показатель напряженного состояния $П$. В результате этого при одних и тех же характеристиках удлинения материала $(e_i)_p$ критическая интенсивность деформации изгиба в месте потери устойчивости $(e_i)_{кр} = e_{0i}$ возрастает.

Таким образом, для интенсификации операций гибки моментом режимы производства листов должны обеспечивать высокие значения характеристик пластичности и низкие, но одинаковые в плоскости листа показатели анизотропии. Если же $\mu_{21} \neq \mu_{12}$, то линию изгиба необходимо располагать перпендикулярно направлению μ_{min}, что даст максимальную предельную деформацию.

Как уже отмечалось, при гибке листов на большие радиусы для снижения упругой отдачи применяют гибку с растяжением и обтяжку. Так как по схеме деформирования процессы гибки с растяжением и различные виды обтяжки близки между собой, то рассмотрим подробно лишь продольную обтяжку.

Для определения рациональных значений показателей плоскостной анизотропии для продольной обтяжки воспользуемся формулой (4.2):

$$K_{обт} = 1 - e_3 / 1 + \frac{\mu_{21}(m - \mu_{12})}{\mu_{12}(1 - \mu_{21} m)}. \qquad (5.9)$$

Для удобства анализа зависимости $K_{обт}$ от сочетания показателей анизотропии свойств, заданных пределов утонения e_3 и схемы напряжений m представим соотношение (5.9) в виде графиков (рис. 5.4). Анализируя графики, можно отметить, что увеличение допустимого формоизменения будет наблюдаться при деформировании листов, показатели анизотропии которых $\mu_{ij} > 0{,}5$ и равны между собой. При низких значениях этих показателей $K_{обт}$ будет небольшой, несмотря на высокую пластичность заготовки. Это связано с тем, что при таком сочетании коэффициентов дефор-

мация по толщине e_3 быстро достигнет своего предельного значения. Так, при обтяжке трансверсально-изотропных листов с $\mu_{21} = \mu_{12} = 0{,}75$ $K_{обт} \approx 1{,}46$. Если же $\mu_{21} = \mu_{12} = 0{,}3$, то $K_{обт} \approx 1{,}1$.

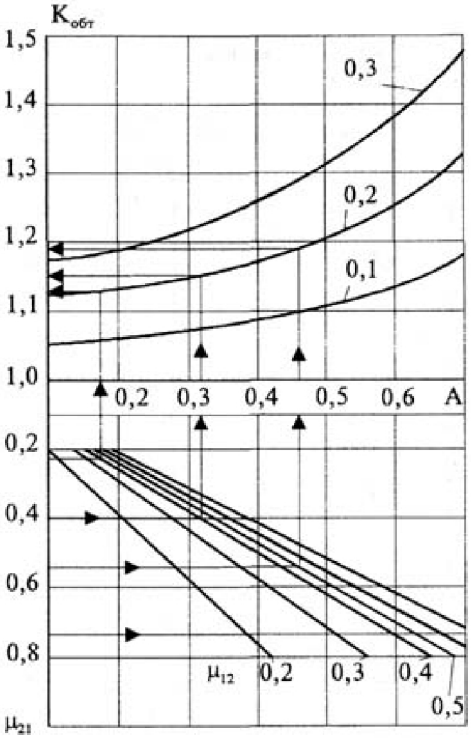


Рис. 5.4. Изменение коэффициента обтяжки в зависимости от сочетания μ_{ij} и деформации e_3, равной 0,1; 0,2 и 0,3

При обтяжке ортотропного материала наибольшие коэффициенты обтяжки будут в том случае, если деформирующее усилие приложено вдоль направления максимального показателя анизотропии.

В целом из изложенного ясно, что для интенсификации этих операций условия изготовления листовых полуфабрикатов должны обеспечивать высокие и примерно равные показатели μ_{ij} в плоскости проката или повышать хотя бы один из этих коэффициентов.

В последнем случае листовую заготовку необходимо так ориентировать относительно зажимов обтяжного пресса, чтобы растягивающее усилие было приложено вдоль направления максимального показателя анизотропии.

Аналогичным требованиям должен отвечать комплекс свойств листовой заготовки для поперечной обтяжки и гибки с растяжением. Очевидно также, что выравнивание свойств в плоскости листа позволит избежать разнотолщинности обшивок по образующим и уменьшит их поводку и коробление.

5.4. Обобщение требований и рекомендации

В целом проведенный в данной главе анализ показывает, что интенсификация процессов формообразования листов достигается в основном тем, что анизотропия свойств может изменить соотношение между деформациями в пользу той, увеличение которой приводит к повышению предельных возможностей процесса.

Для того чтобы упростить выбор рациональных сочетаний показателей анизотропии заготовок в зависимости от вида операции, схемы деформирования и формы изделий, все установленные при анализе требования обобщены в табл. 5.5.

Приведенные в табл. 5.5 данные позволяют, во-первых, выбрать листовой металл с рациональной для проектируемой операции анизотропией свойств, определить оптимальную ориентацию заготовки в зоне деформирования, обосновать технические условия на поставку листов с требуемой направленностью свойств и т. д.; во-вторых, эти данные являются нормативной базой для расчета компонент текстуры, целенаправленное формирование которой в листовом металле обеспечит заданные значения показателей анизотропии.

Таблица 5.5. **Обобщенные требования к величине и сочетаниям показателей анизотропии в плоскости листа**

Операция	Вид деформирования	Форма детали	Рациональная величина показателей μ_{ij}		Ориентация заготовки в зоне штамповки
			Нормальная анизотропия	Плоскостная анизотропия	
Вытяжка	Осесимметричный	Цилиндрич. Коническ. Параболич.	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{max}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
	Асимметричный	Эллипсная	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{max}$	$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Большая полуось заготовки направлена вдоль μ_{21} (НП)
				$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	Большая полуось заготовки направлена вдоль μ_{12} (ПН)
		Овальная		$\mu_1 > \mu_{21} > \mu_{12}$ $\mu_1 > \mu_{12} > \mu_{21}$	Большая полуось заготовки направлена вдоль μ_1 (под углом 45° к НП)
		Квадратная	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{max}$	$\mu_{12} = \mu_{21} > \mu_1$	Направление $\mu_{ij\max}$ совпадает с диагональю матрицы
		Прямоугольная	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{max}$	$\mu_{12} = \mu_{21} > \mu_1$	
Гибка	Изгиб моментом	Не учитывается	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{min}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$ $\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	Линия гиба вдоль $\mu_{ij\max}$
				$\mu_{12} > \mu_{21} > \mu_1$	Линия гиба перпендикулярно μ_1
	Стестн. изгиб	--	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{min}$	--	--
Поперечн. обтяжка	Изгиб с растяжением	--	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{max}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$ $\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	Линия гиба вдоль $\mu_{ij\max}$
				$\mu_1 > \mu_{21} \geq \mu_{12}$	Линия гиба под углом 45° к НП
Обтяжка с растяжением	Изгиб с растяжением	--	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{max}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$ $\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	Растягивать вдоль $\mu_{ij\max}$
				$\mu_1 > \mu_{21} \geq \mu_{12}$	Растягивать вдоль 45° к НП
Раздача	Осесимметричн.	циллиндрич.	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{min}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
Обжим	--	--	$\overline{\mu} \to \overline{\mu}_{max}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная

5.5. Вопросы для самоконтроля

1. Каковы пути интенсификации листоштамповочных операций?

2. Как определить благоприятный характер анизотропии для рассмотренных процессов?

3. Для чего необходимо определить рациональное сочетание свойств листа?

4. В чем заключается положительное влияние анизотропии на соотношение деформаций в очаге?

5. От каких параметров зависит минимальный радиус гиба?

6. Как влияют коэффициенты анизотропии на значения коэффициента обтяжки?

7. Каковы перспективы совершенствования листоштамповочных операций?

ГЛОССАРИЙ

Анизотропия – зависимость каких-либо свойств материала от рассматриваемого в нем направления. В данном пособии под анизотропией понимается анизотропия физико-механических свойств, в том числе упругих и пластических.

Вытяжка – процесс листовой штамповки при котором из плоских листовых или полых заготовок получаются полые пространственные изделия.

Гибка – процесс листовой штамповки при котором изменяется кривизна серединной поверхности заготовки в плоскости изгиба, в результате чего получается деталь пространственной формы.

Гидростатическое давление – схема объемного напряженного состояния с одинаковыми по всем осям значениями напряжений.

Девиатор – часть полевого или материального тенора, определяющая изменение формы тела при неменяющемся объеме.

Девиаторная часть – см. девиатор.

Изотропия – в противоположность анизотропии обозначает независимость каких-либо свойств от рассматриваемого направления.

Инвариант – характеристика, не меняющая своего значения при изменении системы координат.

Интенсивность деформаций – характеристика деформированного состояния, представляющая собой величину, пропорциональную корню квадратному из абсолютного значения второго инварианта тензора деформаций.

Интенсивность напряжений – характеристика напряженного состояния, представляющая собой величину пропорциональную корню квадратному из абсолютного значения второго инварианта тензора напряжений.

Интенсификация деформирования – повышение производительности процессов деформирования за счет повышения допустимого формоизменения, экономии сырьевых, трудовых и энергоресурсов, улучшения качества изделий и обеспечения стабильности технологического цикла.

Коэффициенты Пуассона – являются показателями пластической анизотропии и представляют собой взятое со знаком минус отношение поперечной упругой деформации к продольной при одноосном растяжении образца.

Кристаллографическая текстура – преимущественная ориентация кристаллитов в поликристаллическом материале в определенных направлениях.

Материальный тензор – тензор, характеризующий какие-либо свойства материала. Например, тензора упругости и пластичности.

Обобщенное напряжение – совместный инвариант тензора напряжений и материального тензора.

Обтяжка – формоизменяющая операция, связанная с гибкой металла и применяемая для изготовления крупногабаритных пространственных деталей двойной кривизны.

Ортотропность – свойство симметрии, предполагающее наличие трех взаимно перпендикулярных плоскостей симметрии.

Показатели пластической анизотропии – представляют собой взятое со знаком минус отношение поперечной пластической деформации к продольной при одноосном растяжении образца.

Полевой тензор – тензор, характеризующий некоторое физическое поле, например тензор напряжений или деформаций.

Пропорциональность девиаторов – принцип пропорциональности упругого и пластического материальных девиаторов, установленный для материалов изотропных относительно гидростатического давления и при условии простого нагружения.

Простое нагружение – нагружение, при котором компоненты тензора напряжения изменяются пропорционально какому-либо параметру.

Разнотолщинность – различная толщина изделия в рассматриваемом направлении или сечении.

Тензор – физический или математический объект, определяемый набором компонент, которые при смене системы координат преобразуются по определенному закону.

Тензор Кронекера – тензор второго ранга, компоненты которого составляют единичную матрицу.

Трансверсальная изотропность – свойство симметрии, предполагающее наличие плоскости изотропии.

Транстропность – то же, что и трансверсальная изотропность.

Фестонистость – образование выступов и впадин на боковых стенках изделий при осесимметричной вытяжке.

Характеристический параметр монокристалла – выражается через отношение как упругих, так и пластических констант монокристалла и характеризует свойства монокристалла в различных математических моделях.

Шаровая часть – часть тензора, определяющая изменение объема тела при неменяющейся форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников ; под. ред. Ф.В. Гречникова. – М. : Металлургия, 1990. – 304 с.

2. Арышенский, Ю.М. Получение рациональной анизотропии в листах / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников, В.Ю. Арышенский ; под ред. Ф.В. Гречникова. – М. : Металлургия, 1987. – 141 с.

3. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.Н. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др. ; под ред. А.Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1985. – 184 с.

4. Бэкофен, В. Процессы деформации : пер. с нем. / В. Бэкофен. – М. : Металлургия, 1977. – 288 с.

5. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов / Ф.В. Гречников. – М. : Машиностроение, 1998. – 448 с.

6. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.

7. Шофман, Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л.А. Шофман. – М. : Машиностроение, 1964. – 369 с.

Учебное издание

Гречников Федор Васильевич, **Зайцев** Вадим Михайлович

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕКСТУРИРОВАНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Технический редактор *И. П. Попов*
Редакторская обработка *О. Ю. Дьяченко*
Корректорская обработка *И. И. Проломова*
Доверстка *О. Ю. Дьяченко*

Подписано в печать 15.12.06. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 7,67. Усл. кр.-отт. 7,79. Печ.л. 8,25
Тираж 50 экз. Заказ ИП-37/2006

Самарский государственный аэрокосмический университет
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета
443086, Самара, Московское шоссе, 34