

М 84219

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и
ордена Трудового Красного Знамени Государственный Технический
университет имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

Гречников Федор Васильевич

УДК 621.983.3:669.717.62

ОСНОВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ПУТЕМ
ФОРМИРОВАНИЯ В ЗАГОТОВКАХ РАЦИОНАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ
СВОЙСТВ

Специальность 05.03.05 - процессы и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 1993

Работа выполнена в Самарском ордена Трудового Красного Знамени
Государственном аэрокосмическом университете имени академика
С. П. Королева

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Матвеев А. Д.
доктор технических наук, профессор Ершов В. И.
доктор технических наук, профессор Прудниковский В. А.

Ведущее предприятие: Акционерное общество открытого типа "АВИ С"
(Самарский авиационный завод)

Защита диссертации состоится " 19 " мая 1993г.
в 14³⁰ час. на заседании специализированного совета Д053.15.05 при
Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена
Трудового Красного Знамени Государственном техническом университе-
те имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005 Москва, 2-я Бауманская, 5.

печать

Н. Э. Бауман

е, заверенный

еке МГТУ им.

1993г.

специ
К. Т. Н

М 872/9

В. И. Семенов



1087219

Гречников Ф.В. Основы инт

- 1 -

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Методами листовой штамповки изготавливаются в массовом количестве детали самых различных машин, приборов, энергетических установок, а также товары народного потребления. При этом себестоимость изделий, их качество, показатели технологичности и экономичности производства в значительной степени определяются качеством и стоимостью материалов, рациональное использование которых, в свою очередь, зависит от свойств заготовок и их анизотропии. Как следует из практики при формообразовании листов с неблагоприятной направленностью свойств происходит повышенный расход металла вследствие брака и вынужденного завышения размеров заготовок, ухудшение качества и увеличение веса конструкций, ограничение допустимого формоизменения, а в конечном итоге снижение эффективности производства и качества изделий. Вряд ли случаев, например, при попытках изготовления кузовных деталей легковых автомобилей из алюминиевых сплавов вообще не были достигнуты заданные параметры формообразования из-за неблагоприятного характера анизотропии. С другой стороны, если штампуются заготовки с требуемой для данных операций направленностью свойств, то наоборот повышаются параметры формообразования и качества изделий.

В связи с этим актуальным направлением комплексной интенсификации листостамповочных операций является создание заготовок, анизотропия свойств которых не препятствует, а способствует эффективному использованию деформационных возможностей металла и улучшению характеристик изделий. Для решения этой проблемы необходимы теоретические и экспериментальные исследования, определяющие наиболее рациональный набор показателей анизотропии для конкретных операций, а также модели и пути их получения в листах.

Составившие основу диссертационной работы исследования проводились в рамках целевой комплексной программы "Авиационная технология", программы Миннауки Российской Федерации "Конверсия" и научно - технической программы Комитета по высшей школе "Наукоемкие технологии".

Цель работы. Разработка научно обоснованных направлений комплексной интенсификации процессов листовой штамповки путем формирования в листах рациональной анизотропии свойств и ее эффективного использования при формообразовании.

Основные задачи диссертационной работы.

1. В рамках теории пластичности анизотропных сред разработать математические зависимости, вскрывающие влияние анизотропии на неравномерность деформации фланца при вытяжке и допустимое формоизменение в основных операциях листовой штамповки, а также позволяющие определить рациональные для формообразования значения показателей анизотропии.
2. На основе анализа влияния анизотропии на соотношение деформаций в очаге формоизменения и основные параметры процессов вытяжки, гибки, обтяжки, обжима, раздачи сформулировать требования к величине показателей анизотропии, отвечающие интенсификации этих процессов и являющие я базой для целенаправленного формирования в листах заданной анизотропии в процессе их производства.
3. Разработать физико-математическую модель взаимосвязи коэффициентов анизотропии с параметрами текстуры и упругими постоянными кристаллов, позволяющую определить наборы кристаллографических ориентировок, обеспечивающие требуемые значения показателей анизотропии листовых заготовок.
4. Провести экспериментальную проверку полученных аналитических соотношений и разработанных математических моделей.
5. Установить закономерности изменения показателей анизотропии и других механических характеристик на основных этапах производства листов из алюминиевых сплавов.
6. Разработать практические рекомендации по выбору схем горячей прокатки и режимов отжига, обеспечивающих получение в листах значений анизотропии, соответствующих требованиям последующих операций штамповки.
7. Разработать экономичные технологические режимы прокатки и отжига листов из алюминиевых сплавов с рациональным сочетанием показателей анизотропии.

Научная новизна полученных результатов.

1. Установлены математические соотношения, вскрывающие механизм влияния плоскостной анизотропии на возникновение неравномерной деформации фланца при вытяжке и позволяющие определять сочетания коэффициентов анизотропии, обеспечивающие устранение разнотолщинности и фестонообразования цилиндрических и снижение разнотолщинности коробчатых деталей.
2. Разработана методика расчета экстремальных размеров анизотропных заготовок для осесимметричной вытяжки, учитывающая неравномерное изменение толщины стенки детали по образующей и по периметру.

3. Получены аналитические зависимости и номограммы, позволяющие определять рациональные сочетания показателей анизотропии в плоскости листа, повышающие предельное формоизменение листовых заготовок в операциях вытяжки, гибки, обтяжки, обжима и раздачи.
4. Установлено влияние коэффициентов нормальной анизотропии на преимущественное развитие деформаций в очаге формоизменения; сформулированы требования к величине и сочетаниям показателей анизотропии и ориентации заготовок в зоне штамповки в зависимости от вида операции, формы детали и механической схемы деформации.
5. Разработана физически обоснованная математическая модель взаимосвязи показателей анизотропии с параметрами текстуры и упругими постоянными кристаллов, позволяющая определять наборы преимущественных кристаллографических ориентировок, обеспечивающих заданную величину этих показателей в листе, а также вычислять значения коэффициентов анизотропии по известным характеристикам текстуры.
6. Проведено экспериментальное исследование изменения кристаллографических ориентировок и показателей анизотропии при прокатке листов из АМЦ и А99, которое показало принципиальную возможность формирования в листах заданных значений анизотропии.
7. Установлены закономерности изменения величины показателей анизотропии, а также характеристик прочности и пластичности на всех этапах подготовки и нагрева слитков, их прокатки и термической обработки листов; проведена оценка стабильности характеристик анизотропии при прокатке алюминиевых сплавов в промышленных условиях.
8. Получена графическая взаимосвязь степени деформации при холодной прокатке и температуры отжига, позволяющая формировать в листах из технического алюминия как трансверсально изотропные свойства, так и различный характер плоскостной анизотропии.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Прикладное применение разработанных в диссертации направлений интенсификации процессов листовой штамповки состоит в следующем:

1. Научные результаты, полученные в данной работе, использованы для разработки и внедрения высокоэффективных ресурсо- и энергосберегающих технологий производства листов из алюминиевых сплавов с рациональной анизотропией и их последующей штамповки.
2. Определены основные технологические параметры глубокой вытяжки: экстремальные размеры и форма анизотропных заготовок: показатели разнотолщинности и фестонообразования; силовые и деформаци-

онные параметры: показатели предельного формоизменения. Кроме этого в работе определены показатели предельного формоизменения в операциях гибки, обтяжки, стесненного изгиба и штамповки труб в зависимости от сочетания коэффициентов анизотропии, в плоскости листа. Результаты расчетов использованы при разработке технологии штамповки деталей авиационной техники и товаров народного потребления из алюминиевых сплавов.

3. Разработаны требования к величине и сочетаниям показателей плоскостной анизотропии, а также ориентации осей анизотропной заготовки в зоне штамповки с учетом вида операции и формы штампуемой детали, что обеспечивает интенсификацию формообразования в каждом из рассмотренных процессов.
4. На основе математической модели взаимосвязи показателей анизотропии с параметрами текстуры и упругими постоянными кристаллов разработана методика формирования в листах требуемой величины показателей анизотропии путем создания при прокатке определенных типов кристаллографических ориентировок.
5. Определены количественные характеристики коэффициентов анизотропии на всех основных этапах производства широкой гаммы листов из алюминиевых сплавов в различных состояниях поставки.
6. Разработаны и представлены в виде таблиц практические рекомендации по выбору величины обжатий и схем прокатки слитков и подката, температуры отжига и времени выдержки, обеспечивающие получение в листах из алюминиевых сплавов рационального сочетания характеристик анизотропии и пластичности применительно к рассмотренным процессам штамповки.
7. Разработаны и внедрены новые экономичные технологические режимы прокатки и термообработки листов из сплавов АД0М, АД1М, АМЦ12, АМГ2М и АМГ6М с рациональной для интенсификации листоштамповочных операций анизотропией свойств. Экономический эффект от использования результатов исследований в листопркатном и листоштамповочном производстве составил свыше 1,1 млн. рублей.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Теоретические и экспериментальные результаты исследования и анализа, вскрывающие влияние анизотропии на основные параметры листоштамповочных операций и позволяющие определять наиболее рациональный комплекс показателей анизотропии, отвечающий требованиям интенсификации процессов гибки, вытяжки осе- и асимметричных деталей, стесненного изгиба, обтяжки, обжима и раздачи.
2. Требования к величине и сочетаниям показателей анизотропии в плоскости листа и согласованное с ними требование к ориентации

заготовок в зоне штамповки в зависимости от вида операции и формы штампуемой детали.

3. Методику расчета экспериментальных размеров анизотропных заготовок для вытяжки, учитывающую неравномерное утолщение стенки деталей по образующей и по периметру.
4. Физико - математическую модель взаимосвязи показателей анизотропии с параметрами текстуры и упругими постоянными кристаллов, а также методику определения наборов кристаллографических ориентировок, обеспечивающих формирование в листах требуемой величины показателей анизотропии.
5. Закономерности изменения величины показателей анизотропии в зависимости от режимов подготовки слитков, прокатки и термообработки листов, а также практические рекомендации по выбору схем и режимов обработки, обеспечивающих получение в листах из алюминиевых сплавов требуемых сочетаний характеристик анизотропии.
6. Экспериментальные результаты исследования и анализа изменения кристаллографических ориентировок и показателей анизотропии при прокатке листов из АМЦ и АДО и количественные значения коэффициентов анизотропии листов из сплавов АД3, АД1, АМЦ, АМГЗ, АМГ6, Д16, В95 и др. в различных состояниях поставки.
7. Технологические режимы и результаты внедрения разработанных положений в листопрокатное и штамповочное производство.

Апробация работы и публикации: Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 18 конференциях и семинарах международного, Всесоюзного, республиканского, межвузовского и отраслевого уровня. По теме диссертации опубликовано 4 монографии, 5 учебных пособий, 60 научных статей и 5 авторских свидетельств на изобретения. Основные научные труды опубликованы в журналах : Известия АН СССР "Металлы"; Известия вузов. Черная металлургия; Вестник машиностроения; Кузнечно-штамповочное производство; Цветные металлы; Вопросы авиационной науки и техники; а также в межвузовских и отраслевых сборниках научных трудов.

Структура и об"ём диссертации: Диссертационная работа состоит из введения и четырех разделов, включающих 11 глав, выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 416 страницах машинописного текста, содержит 107 рисунков, 45 таблиц и 160 наименований библиографического списка.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе проблемы, ее научная новизна и практическая значимость. В частности отмечено, что в отличие от однозначного поведения изотропной среды при штамповке анизотропных заготовок значительно повышается деформационные возможности металла и эксплуатационные характеристики изделий в определенных направлениях. Другими словами, благоприятная анизотропия свойств при эффективном ее использовании является серьезным резервом интенсификации процессов формообразования деталей и повышения их работоспособности, что обуславливает необходимость целенаправленного формирования в листах заданной степени анизотропии.

В первом разделе (обзорном), состоящем из трех глав, дан анализ состояния проблем пластического деформирования и регулирования анизотропии свойств листовых материалов, сформулированы задачи исследования.

В первой главе рассмотрены основные сведения об анизотропии механических свойств металлов и сплавов, ее природа, виды и причины возникновения. Отмечается, что в металлических полужаготовках анизотропия является следствием их кристаллического строения и последующего текстурообразования металла при деформировании. Проведен анализ существующих показателей анизотропии, их структура и методы определения. Показано, что наиболее информативным и удобным для использования в технологических расчетах являются деформационные показатели анизотропии... (коэффициенты поперечной деформации) .

Далее отмечено, что с практической точки зрения анизотропия свойств может быть, как полезной так и вредной. Полезное влияние текстуры и связанной с ней анизотропии проявляется в улучшении технологической пластичности заготовок, уменьшении сопротивления деформации при обработке давлением, повышении прочности изделий, их рабочих напряжений, температур и т. д. В целом анализ свидетельствует, что правильно используемый фактор анизотропии резко повышает свойства и эксплуатационные возможности деталей и конструкций.

Во второй главе на примере работ отечественных и зарубежных ученых проведен анализ проявлений анизотропии в основных процессах листовой штамповки - вытяжке, гибке, обтяжке, обжиме и раздаче. Отмечается, что многочисленные разновидности листостамповочных операций имеют свои особенности в схеме напряженно-деформированного состояния, характере течения металла, форме заготовок и т. д. Сле-

довательно и проявления анизотропии в них различны.

Так, при исследовании процессов глубокой вытяжки чаще всего рассматриваются две проблемы: одна из них связана с определением предельно-допустимой степени вытяжки, другая - с явлением фестонообразования.

Наибольший вклад в исследование влияния анизотропии на параметры вытяжки внесли Р. Хилл, С. П. Яковлев, В. Д. Головлёв, В. В. Шевелев, Ф. И. Рузанов, А. Г. Овчинников, А. Д. Матвеев, В. В. Уваров, Р. Вайтли, Г. Моор и другие.

При изучении процессов формоизменения анизотропных листов в операциях гибки моментом, обтяжки, обжима и раздачи решались задачи учета анизотропии при определении напряженно-деформированного состояния, предельного формоизменения, формы заготовок и точностных параметров. Значительный вклад в анализ этих операций внесли Ю. М. Арышенский, С. П. Яковлев, А. Д. Матвеев, Г. С. Казакевич, В. И. Ершов, В. Д. Кухарь, В. В. Рис, В. Бэкофф, П. Мэллор, Э. Томсен и другие. Однако, несмотря на достигнутые успехи, многие вопросы интенсификации листоштамповочных операций пока ещё не решены. Так, при исследовании процесса вытяжки, полученные в них результаты недостаточно полно отражают физическую картину деформированного состояния фланца, механизма возникновения разнотолщинности стенок деталей и обусловленного ею фестонообразования. Необходимо уточнить методику расчета экстремальных размеров анизотропных заготовок. При анализе предельно-допустимого формоизменения материала в рассматриваемых процессах штамповки не определены рациональные для конкретных операций сочетания показателей плоскостной анизотропии и их влияние на соотношение деформаций в очаге формоизменения, что не позволяет сформулировать принципиальные требования к анизотропии листов с учетом механической схемы деформации, вида операций, формы деталей и т. д.

Другими словами, имеющиеся в технической литературе данные отражают, как правило, только одну сторону проблемы: разработаны пути учета обнаруженной в листах анизотропии в технологических расчетах, но не определены её характеристики, способствующие интенсификации конкретных операций штамповки.

В третьей главе обзора рассмотрены исследования по регулированию анизотропии свойств в процессе производства листов. Анализируя труды С. И. Губкина, В. С. Тихонова, И. П. Кудрявцева, Г. Вассермана, И. Гревена, В. И. Добаткина, П. Г. Микляева, В. Д. Дурнева, Р. А. Адамеску, Я. Д. Вишнякова, А. А. Бабарэку, В. А. Короткова, П. И. Кондратьева, М. Хаймендала, Д. Вильсона и других, показано, что свойства катанных полуфабрикатов и их анизотропия формируются на

всех этапах производства. При этом отмечено, что текстура и обусловленная ей анизотропия листов всё же в наибольшей степени определяется химическим составом сплавов, режимами прокатки и термической обработки.

В целом, из рассмотренных в данной главе работ, следует, что, целенаправленно изменяя режимы прокатки и термической обработки, можно регулировать анизотропию свойств конкретных металлов и сплавов. Однако ценность большинства исследований снижается из-за большого разнообразия применяемых показателей анизотропии, не позволяющего оценить полученные данные с единых позиций; неполноты изучения совместного влияния на анизотропию многочисленных факторов производства; отсутствия систематического анализа изменения анизотропии многих партий листов в промышленных условиях. Из анализа литературных данных видно, что основное внимание учёных обращено на исследование анизотропии листов из различных марок сталей, меди, цинка, титана. Значительно меньше изучена анизотропия деформационных характеристик листов из алюминиевых сплавов, широко применяемых в производстве авиационной и космической техники, а также - широкого спектра товаров народного потребления.

Общим недостатком рассмотренных работ по изучению изменения анизотропии в процессах прокатки и термообработки листов является отсутствие функциональных связей показателей анизотропии с характеристиками текстуры, что резко ограничивает возможности получения в листах заданной степени анизотропии.

Комплексное решение поставленных в обзоре проблем позволит разработать научно-технические основы эффективного использования фактора анизотропии в процессах штамповки и создать научно обоснованные методы формирования в листах требуемой степени анизотропии.

Во втором разделе, состоящем из 3-х глав, рассмотрено влияние анизотропии на взаимосвязь показателей напряженного и деформированного состояния и пределы изменения коэффициента Логэ. На основе полученных представлений проведен анализ влияния анизотропии на процессы вытяжки, гибки, обтяжки, стенового изгиба, обжима, раздачи, формовки; сформулированы требования к величине показателей анизотропии заготовок, способствующие интенсификации каждой из рассмотренных операций.

В четвертой главе приведены вначале краткие сведения из теории пластичности ортотропных сред, необходимые для четкого изложения материала по анализу влияния анизотропии на параметры процессов штамповки. В качестве показателей анизотропии приняты коэффициенты поперечной деформации M_2 , представляющие собой отно-

шение компонент материального тензора и определяемые при линейном растяжении образцов по следующему выражению:

$$-\frac{K_{ijij}}{K_{ijij}} = \mu_{ij} = -\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} \quad (4.1)$$

Здесь первый индекс показывает направление деформации поперечного сжатия, а второй - направление деформации вдоль растягивающей силы $i, j=1, 2, 3$.

Проанализировано влияние анизотропии на взаимосвязь показателей напряженного ν_σ и деформированного ν_ε состояния в процессе формоизменения листовой заготовки. В результате получены следующие соотношения:

$$\nu_\sigma = \frac{C_K \nu_\varepsilon + 3D_K}{D_K \nu_\sigma + 3}; \quad \nu_\varepsilon = \frac{3(D_K - \nu_\sigma)}{D_K \nu_\sigma - C_K}; \quad (4.2)$$

где $D_K = 2 \mu_{ij} - I$, $C_K = I - 4 \mu_{ij} + 4 \frac{\mu_{ij}}{\mu_{ji}}$ -

- коэффициенты, определяемые величиной показателей анизотропии и соотношением главных напряжений.

Из (4.2) следует:

а) при деформировании анизотропных полуфабрикатов знание напряженного состояния не позволяет судить о деформированном состоянии, если неизвестна анизотропия свойств;

б) для рационального построения конкретного процесса формообразования нужно согласовать механическую схему деформации с осями анизотропии заготовки;

в) целенаправленно изменяя величину показателей анизотропии можно создавать заготовки при неизменном напряженном состоянии различные, в том числе и благоприятные для формоизменения деформированные состояния.

Далее рассмотрены пределы изменения коэффициентов Лоде $\beta = 2/\sqrt{\nu_\sigma^2 + 3}$. Показано, что для анизотропных материалов коэффициент Лоде может иметь шесть вариантов записи в зависимости от соотношения главных напряжений и осей анизотропии заготовок. Обобщенная запись имеет следующий вид:

$$\beta_K = \frac{2}{\sqrt{\nu_\sigma^2 + 2\nu_\sigma D_K + C_K}} \quad (4.3)$$

Как следует из выражения (4.3) значения коэффициента β анизотропного материала могут изменяться в широких пределах: от $\beta_{\min} = 0.78$, до $\beta_{\max} = 1.67$.

В пятой главе изложен анализ влияния анизотропии на процессы глубокой вытяжки, получены расчетные формулы, позволяющие определить рациональные для вытяжки сочетания показателей плоскостной анизотропии. При определении напряженно-деформированного состояния фланца методом совместного решения уравнений равновесия и пластичности, помимо общеизвестных допущений, учтены следующие особенности проявления анизотропии при вытяжке:

- 1) Так как в общем случае тангенциальные и радиальные напряжения и деформации при вытяжке направлены под углом θ к главным осям анизотропии 1 и 2, то показатель μ_{ij}^{θ} и соответствующие деформации в (4.1) записаны с индексом θ

$$\mu_{ij}^{\theta} = -e_i^{\theta}/e_j^{\theta} \quad (5.1)$$

- 2) Под деформацией e_j в (4.1) в данном случае следует подразумевать тангенциальную деформацию e_{θ} , а под e_i - радиальную деформацию e_r .
- 3) Поскольку наиболее характерным проявлением анизотропии при вытяжке является неравномерное утолщение фланца по периметру, то при анализе деформированного состояния целесообразно воспользоваться показателем μ_{31}^{θ} характеризующем свойства по толщине.
- 4) Коэффициент Лоде, входящий в линеаризованное условие пластичности, определен как среднее арифметическое его значений для плоского напряженного состояния и плоской деформации. В рассматриваемом случае, когда $\sigma_3 = \sigma_z = \sigma_{cp}$ и $|\sigma_2| > |\sigma_1|$ он имеет следующее выражение:

$$\bar{\mu}_6^{\theta} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_{31}^{\theta}}{\mu_{13}^{\theta}}} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_{31}^{\theta}}{\mu_{13}^{\theta}} - 2\mu_{31}^{\theta} + 1}} + \frac{1}{\sqrt{1 - \mu_{13}\mu_{31}}} \right) \quad (5.2)$$

С учетом установленных положений определены составляющие суммарного сопротивления фланца деформированию $\bar{\sigma}_{ст}$.

Анализ деформированного состояния во фланце анизотропной заготовки проведен на основе уравнений связи напряжений и деформаций ортотропного тела, которые для рассматриваемого случая ($\sigma_{33}(\sigma_z)$ совпадает с главной осью анизотропии -3) представлены так:

$$\begin{aligned} e_{\theta}^0 &= \frac{\mu_{13}^0}{\mu_{31}^0} \frac{e_i}{\sigma_i} (\bar{\sigma}_{\theta} - \mu_{21}^0 \bar{\sigma}_p) \\ e_p^0 &= \frac{\mu_{13}^0}{\mu_{32}^0} \frac{e_i}{\sigma_i} (\bar{\sigma}_p - \mu_{12}^0 \bar{\sigma}_{\theta}) \\ e_z^0 &= \frac{e_i}{\sigma_i} [(\mu_{13}^0 - 1) \bar{\sigma}_p - \mu_{13}^0 \bar{\sigma}_{\theta}] \end{aligned} \quad (5.3)$$

Тогда взаимосвязь деформаций во фланце запишется следующим образом:

$$e_z^0 = \frac{\mu_{31}^0}{\mu_{13}^0} \cdot \frac{\alpha(\mu_{13}^0 - 1) - \mu_{13}^0}{1 - \alpha \mu_{21}^0} e_{\theta}^0, \quad (5.4)$$

где $\alpha = \bar{\sigma}_p / \bar{\sigma}_{\theta}$ - отношение радиальных $\bar{\sigma}_p$ и тангенциальных $\bar{\sigma}_{\theta}$ напряжений.

Если деформируется изотропный материал ($\mu_{ij} = 0,5$), то из (5.4) получается общеизвестная взаимосвязь:

$$e_z = - \frac{\alpha + 1}{2 - \alpha} e_{\theta}.$$

На основе выражения (5.4) рассмотрено деформированное состояние в наиболее характерных участках фланца. При этом установлено, что при вытяжке анизотропной заготовки чистого сдвига одновременно по напряжениям и деформациям не происходит, т.е. при $|\bar{\sigma}_p| = |\bar{\sigma}_{\theta}|$ $e_z \neq 0$ и наоборот. Для определения поверхности во фланце заготовки, где реализуются условия плоской деформации, соотношение (5.4) решено относительно α при $e_z = 0$. В результате получено выражение для определения радиуса контура, разграничивающего зоны утолщения и утонения фланца:

$$r_{rp}^0 = R_n / e^{\mu_{13}^0} \quad (5.5)$$

В случае изотропии из (5.5) имеем $r_{rp}^0 = R_n / \sqrt{e} \approx 0,607 R_n$. Построенные для различных μ_{13} контуры, где $e_z = 0$, представлены на рис. 5.1, из которых ясен механизм образования разнотолщинности впадин и фестонов.

На основе анализа деформированного состояния фланца получены выражения для определения толщины внешней кромки фланца

(верхнего края изделия) в направлениях образования фестонов и впадин:

$$S_g = S_0 (R_0 / r_n)^{\mu_{21}^g}, \quad S_{\varphi} = S_0 (R_0 / r_n)^{\mu_{21}^{\varphi}} \quad (5.6)$$

При $\mu_{ij} = 0,5$ получим: $S_g + S_{\varphi} = S_k = S_0 \sqrt{K}$,
где K - степень вытяжки.

В диссертации разработаны следующие методы устранения разнотолщинности и фестонообразования:

1) выравнивание показателей анизотропии в плоскости листа

$\mu_g = \mu_{\varphi}$ (представлено в разделах 3 и 4).

2) выравнивание радиальных деформаций e_r^g в различных направлениях фланца при вытяжке.

Во втором методе из условия $e_r^g = e_r^{\varphi}$ получено следующее соотношение для определения минимального размера заготовки, исключающей фестонообразование:

$$\frac{d_m}{D_{\min}} = 1 + \frac{\mu_{21}^g}{\mu_{21}^{\varphi}} \left(\frac{d_m}{D_0} - 1 \right), \quad (5.7)$$

d_m - диаметр матрицы; $D_0, D_{\min}$ - экстремальные диаметры заготовки.

Далее показано, что при определении начальных (максимальных) размеров анизотропных заготовок следует исходить из условия постоянства объема, так как анизотропия приводит к значительным и неравномерным изменениям толщины заготовки S_0 (рис. 5.2.):

$$D_0^{1+\mu_{21}^g} = \frac{4 A_2 F_g}{\pi d_n^{1-\mu_{21}^g}} \quad (5.8)$$

где: F_g - площадь поверхности детали;

A_2 - параметр, зависящий от изменения толщины стенки детали S_g и показателей μ_{ij}

По известным $D_0, D_{\min}$ строится полный контур заготовки.

В работе получены также соотношения, позволяющие оценить влияние плоскостной анизотропии на складкообразование, усилие вытяжки и предельное формоизменение заготовок.

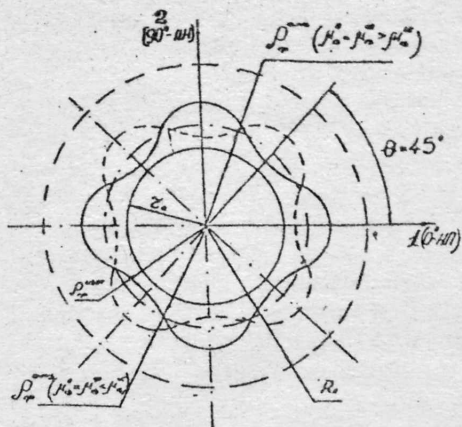


Рис. 5.1.

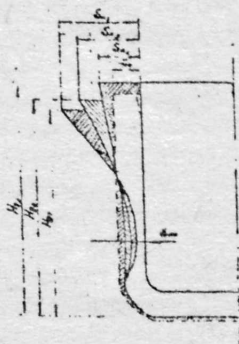


Рис. 5.2.

Предельная степень вытяжки $K_{пр}$ определена из условия равенства $\sigma_{ст}$ напряжению разрушения стенки изделия в опасном сечении:

$$K_{пр} = \frac{1 - \frac{S}{2R_M + S} e^{1.57f}}{1.25\beta^0 \sqrt{1 - \mu_{21}^0 \mu_{12}^0} \cdot \varphi_1 e^{1.57f}} + \varphi_1',$$

(5.9)

где: f - коэффициент трения;
 β^0 - приведенный коэффициент Лодэ анизотропного материала;
 φ_1, φ_1' - константы, определяемые равномерным сужением φ_p .

По аналогии с осесимметричной вытяжкой рассмотрены особенности влияния анизотропии на деформированное состояние фланца и предельное формоизменение при вытяжке коробчатых деталей эллипсной и овальной формы.

Показано, что неравномерная пластическая деформация фланца обусловленная наличием сдвиговых деформаций может быть снижена за счет рациональной анизотропии свойств.

В шестой главе установлены дифференцированные по операциям сочетания показателей плоскостной и нормальной анизотропии, способствующие интенсификации формообразования листов; разработаны требования к направленности свойств и согласованные с ними рекомендации по ориентации заготовок в зоне штамповки.

В начале главы рассмотрено влияние нормальной анизотропии (по толщине) на преимущественное развитие деформаций в очаге формоизменения с учетом схемы деформирования. Показано, что анизотропия свойств, определяя собой взаимосвязь показателей напряженного ν_σ и деформированного ν_ϵ состояний, существенно влияет на соотношение деформаций в очаге и развитие потери устойчивости.

В качестве критерия, характеризующего соотношение деформаций по ширине и толщине штампуемой заготовки, принят коэффициент нормальной анизотропии

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

При использовании $\bar{\mu}$ взаимосвязь между ν_σ и ν_ϵ имеет вид :

$$\nu_\epsilon = \frac{6\bar{\mu} - 3(\nu_\sigma + 1)}{(\nu_\sigma + 2)(2\bar{\mu} - 1) - 2} \quad (6.1)$$

Отсюда следует, что при конкретном напряженном состоянии ($\nu_\sigma = \text{const}$) преимущественное развитие деформаций при пластическом течении определяется величиной показателя анизотропии. Другими словами, лист с $\bar{\mu} > 0,5$ при прочих равных условиях склонен к преимущественной деформации по ширине, а деформация по толщине будет затруднена. Если же $\bar{\mu} < 0,5$, то наблюдается обратная картина. Основываясь на данных положениях проанализировано развитие деформаций в характерных для листовой штамповки условиях плоского напряженного состояния и плоской деформации.

В результате установлено, что при штамповке в условиях плоской схемы напряжений рациональными являются листы, анизотропия свойств которых затрудняет деформацию по толщине и способствует ее развитию по ширине, т.е. листы с $\bar{\mu} > 0,5$. В процессах, характеризующихся плоской деформацией, увеличению допустимого формоизменения отвечают листы с $\bar{\mu} < 0,5$.

Отмечено, что положительное влияние рациональных значений $\bar{\mu}$ на процесс штамповки может быть резко снижено из-за значительной плоскостной анизотропии, проявления которой изменяются в зависимости от вида операции, формы деталей, ориентации осей анизотропии заготовок относительно направлений главных деформаций.

В связи с этим далее с целью разработки обобщенных требований к анизотропии заготовок проведено исследование изменения

параметров процессов вытяжки, гибки моментом, стесненного изгиба, обтяжки листов, обжима и раздачи труб в зависимости от сочетаний показателей плоскостной анизотропии.

При анализе предельной степени вытяжки, заменив в выражении (5.9) произведение $\mu_{21}^0 \cdot \mu_{12}^0$ на равнозначный комплекс $[0,25(\mu_{21} + 2\mu_1 + \mu_{12})]^2$ получено соотношение, на основе которого построена номограмма (рис. 6.1), позволяющая определять рациональные сочетания μ_{ij} в плоскости листа.

Рассмотрев далее изменение толщины (z_z^0) и радиальных деформаций e_p^0 в характерных точках фланца по выражениям

$$e_z^0 = (\mu_{21}^0 - 1)e_\theta^0 \quad \text{и} \quad e_p^0 = -\mu_{21}^0 e_\theta^0,$$

установлено, что для устранения разнотолщинности стенок по периметру и фестонистости деталей необходимо обеспечить равенство показателей анизотропии в различных направлениях плоскости листа. В случае одновременного увеличения μ_{ij} уменьшается разнотолщинность стенок по образующей и диаметр заготовки.

Анализируя аналогично формоизменение фланца при вытяжке коробчатых деталей, показано, что в этом случае плоскостная анизотропия необходима. Так, для эллипсных и овальных коробок благоприятным является следующее соотношение показателей μ_{ij} в плоскости заготовки $\mu_{21} > \mu_{12} \geq \mu_1$. Заготовку при этом необходимо ориентировать так, чтобы $\mu_{ij \max}$ был направлен вдоль большой полуоси эллипса. Для квадратных и прямоугольных коробок также необходима плоскостная анизотропия, но со следующим сочетанием показателей:

$$\mu_{21} = \mu_{12} < \mu_1 \quad \text{и} \quad \mu_{21} = \mu_{12} > \mu_1.$$

При определении сочетаний показателей плоскостной анизотропии, обеспечивающих увеличение допустимого формоизменения заготовок при гибке моментом использовалось следующее выражение:

$$z_{\min} / S_0 = [1 - 0,5(1 - \psi_w)^T] / [(1 - \psi_w)^T - 1], \quad (6.2)$$

где

$$T = 2 \sqrt{1 - \mu_{21} \mu_{12}} e^{-0,72 \pi}; \quad \pi = (1 + \mu_{12}) / \sqrt{1 - \mu_{12} \mu_{21}}$$

Определение допустимого формоизменения материала при стесненном изгибе проведено на основе критерия разрушения В. Л. Колмогорова, который с учетом анизотропии записан так:

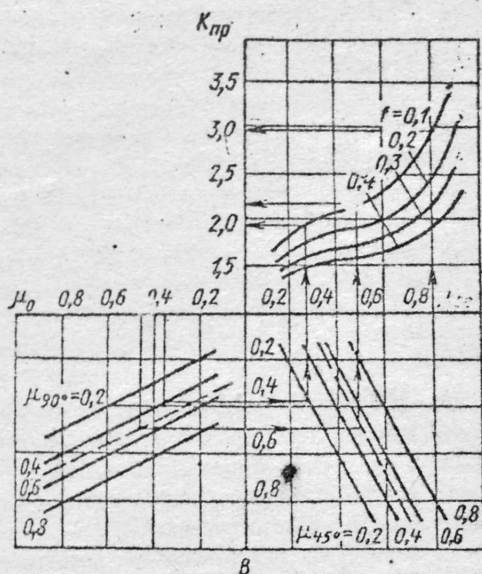


Рис. 7.1

$$\psi = \frac{K_a q_n}{\delta_{кр}} \left[\frac{\delta_{кр}}{m_a (E_t)_p} \right]^{\bar{\sigma}}, \quad (6.3)$$

где $\bar{\sigma}$ - приведенное гидростатическое напряжение;
 $\delta_{кр}$ - предельная степень деформации при кручении;
 m_a, K_a - переходные коэффициенты, учитывающие анизотропию;
 q_n - накопленная деформация за процесс.

В результате получена следующая формула, позволяющая анализировать влияние плоскостной анизотропии на допустимое утолщение заготовки в зонегиба :

$$\bar{\sigma}_{доп} = 0.45 \sqrt{1 - \mu_{12} \mu_{21}} \ln \frac{1}{1 - \psi_w} + 1. \quad (6.4)$$

Основываясь на выражениях (6.2), (6.4) и аналогичных

соотношениях для обтяжки листов, обжима и раздачи труб построены номограммы, позволяющие определять рациональные сочетания показателей μ_{ij} для этих операций. Так, для гибки необходимы листы, имеющие низкие и одинаковые в плоскости листа показатели анизотропии при высоких значениях ψ_w . Если нельзя получить в листе $\mu_{21} = \mu_{12}$, то линиюгиба необходимо располагать перпендикулярно направлению μ_{min} . Для интенсификации процессов обтяжки необходимы листы с высокими значениями μ_{ij} в плоскости, так как иначе обшивка быстро утоняется и появляются трещины. Если $\mu_{21} \geq \mu_{12}$, то усилие обтяжки необходимо прикладывать вдоль μ_{max} . Увеличение допустимого формоизменения при формовке листа, обжиме и раздаче труб обеспечивается созданием в заготовках низких по величине ($\mu_{ij} < 0,5$) и одинаковых в плоскости листа показателей анизотропии.

В третьем разделе, состоящем из двух глав, разработаны теоретические и экспериментальные основы формирования в листах заданной степени анизотропии свойств.

В седьмой главе проведено теоретическое и экспериментальное исследование взаимосвязи показателей анизотропии с параметрами текстуры и константами кристаллической решетки.

В начале главы приведены краткие сведения о текстурах, где отмечено что, несмотря на значительное количество исследований по текстурообразованию металлов, полученные данные в технологических расчетах практически не используются, так как они не выражены через технические коэффициенты анизотропии. Данную проблему предлагается решить на основе концепции объединения феноменологического и кристаллографического подходов к исследованию пластической деформации анизотропных материалов. В рамках принятой концепции, основываясь на изотропности монокристаллов большинства промышленных металлов к действию гидростатического давления, компоненты тензора податливости представлены в виде:

$$S_{ijke} = \alpha \theta_{ijke} + d_{ijke}, \text{ где} \quad (8.1)$$

α - скаляр; θ - "шаровая" единица;

d_{ijke} - упругий материальный девиатор.

С учетом (8.1) взаимосвязь упругого d_{ijke} и пластического k_{ijke} материальных девиаторов запишется следующим образом:

$$k_{ijke} = H d_{ijke}, \quad (8.2)$$

где H - константа пропорциональности.

Далее, определив девиатор d_{ijke} из (8.1) и записав на основании (8.2) показатели анизотропии μ_{ij} через отношение упругих материальных девиаторов, получено следующее выражение для определения μ_{ij} :

$$\mu_{ij} = - \frac{S_{11ij} - \frac{1}{3}(S_{1111} + S_{11jj} + S_{jjkk})}{S_{jjjj} - \frac{1}{3}(S_{11jj} + S_{jjjj} + S_{jjkk})} \quad (8.3)$$

Аналогично, при повороте системы координат на угол 45° получены формулы для μ_i ($i = 1, 2, 3$). Воспользовавшись взаимосвязями компонент S_{ijke} с ориентационными факторами текстуры Δ_i из (8.3) получим:

$$\mu_{ij} = \frac{S'_{11} - S'_{12} - 3S'_{14}(\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3)}{2(S'_{11} - S'_{12}) - 6S'_{14}\Delta_j} \quad (8.4)$$

Здесь: S'_{ij} - компоненты тензора податливости монокристалла в матричной форме;

$$S' = S'_{11} - S'_{12} - \frac{1}{2}S'_{44}$$

Параметры Δ_i определялись на основе обратных полюсных фигур.

Сопоставление, рассчитанных по (8.4), значений μ_{ij} с определенными экспериментально для сплавов АДО и АМЦ значениями показывает их удовлетворительное совпадение.

В восьмой главе проведено аналитическое исследование полученной модели $\mu_{ij} = f(S_{ijke}, \Delta_i)$, развиты представления о формировании в листах требуемой степени анизотропии и разработаны практические рекомендации.

Математические модели (8.4) позволяют решить как прямую задачу, - определение μ_{ij} по известным характеристикам кристаллов и текстуры, - так и обратную - определение комплекса преимущественных ориентировок $\{hkl\} \langle u, v, w \rangle$ и констант монокристаллов S_{ijke} , способного удовлетворить требования по заданной степени анизотропии. В связи с этим проведено исследование поведения моделей при различных значениях Δ_i и S_{ijke} .

Для удобства анализа модели (8.4) представлены в виде изотропной и анизотропной составляющих:

$$\mu_{ij} = 0,5 + 0,5 \frac{\Delta k - \Delta i}{Q - \Delta_j}; \quad (8.6)$$

$$\mu_i = 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_i + \Delta_j + \frac{\Delta k}{2} - \frac{1}{2}}{2Q + \Delta_i + \Delta_j - \frac{3}{2}\Delta k - \frac{1}{2}}$$

Здесь: $Q = \frac{s_{11}' - s_{12}'}{3(s_{11}' - s_{12}' - \frac{1}{2}s_{44})}$ - характеристический параметр монокристалла.

Как следует из (8.6) при фиксированных значениях Q величина μ_{ij} определяется комплексами, составленными из параметров $\Delta_{ij}(k)$. Исследование этих комплексов и последующие расчеты позволили установить значения параметров текстуры, обеспечивающих, соответственно, повышение или уменьшение показателей μ_{ij} .

Далее приведен анализ влияния на показатели анизотропии характеристического параметра монокристалла Q .

В результате проведения вычислений на множестве кристаллографических ориентировок, установлена область действительных значений Q и получены следующие соотношения:

$$\mu_{\max} = 0,5 + \frac{1}{8(Q - 0,25)}; \mu_{\min} = 0,5 - \frac{1}{8(Q - 0,25)} \quad (8.7)$$

Приведенный анализ позволил обосновать имеющиеся отличия в величине коэффициентов μ_{ij} различных металлов, имеющих одинаковую кристаллическую решетку и идентичную текстуру. Полученные соотношения и соответствующие графики позволяют прогнозировать экстремальные значения показателей анизотропии.

Для решения задачи определения параметров текстуры, наборов идеальных ориентировок $\{h, k, l\}$ $\{u, v, w\}$ и их весовых долей в текстуре проката, обеспечивающих создание в листах требуемой анизотропии свойств, модели (8.6) представлены в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} 3\Delta_1 + (1-2\mu_{12})\Delta_2 - \Delta_3 = (1-2\mu_{12})Q \\ (1-2\mu_{21})\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 = (1-2\mu_{21})Q \\ (1-\mu_1)\Delta_1 + (1-\mu_1)\Delta_2 + \frac{1}{2}(3\mu_1 - 1)\Delta_3 = \frac{1}{2}(1-\mu_1) + \\ + (2\mu_1 - 1)Q \end{cases} \quad (8.8)$$

Решение системы (8.8) при заданных величинах μ_{ij} и Q позволяет вычислить значения $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$, по которым затем определяются необходимые идеальные ориентировки. Наборы идеальных ориентировок и их весовые доли во многокомпонентной текстуре проката, обеспечивающей заданные значения μ_{ij} определяется из следующей системы:

$$\Delta_i = \sum_{q=1}^N P_{i\{hkl\}\langle u,v,w \rangle} \cdot \Delta_i^{\{h,k,l\}\langle u,v,w \rangle}$$

где $P_{i\{hkl\}\langle u,v,w \rangle}$ - весовая доля i -той компоненты текстуры;

$\Delta_i^{\{h,k,l\}\langle u,v,w \rangle}$ - ориентационный фактор i -той компоненты текстуры;

N - число идеальных ориентировок в текстуре.

Возможность практической реализации разработанного направления показана на примере исследования совместного изменения компонент текстуры и показателей анизотропии при прокатке листов из АДО и АМЦ в промышленных условиях. В результате определения компонент текстуры на различных этапах прокатки установлены типы идеальных ориентировок $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ и их весовые доли, обеспечивающие максимальные или минимальные значения коэффициентов μ_{ij} ; показано поэтапное изменение состава многокомпонентной текстуры в зависимости от режимов прокатки, что подтверждает принципиальную возможность формирования в листах заданных компонент текстуры, а следовательно и коэффициентов μ_{ij} .

Показано также, что перспективным направлением создания листовых полуфабрикатов с заданной анизотропией свойств является выбор марки материала по предварительно определенному параметру Q .

В целом, для создания в листах требуемых значений показателей анизотропии необходимо:

1. По заданной величине показателей μ_{ij} и выбранному параметру Q вычислить значения ориентационных факторов текстуры Δ_i .
2. По значениям Δ_i определить требуемые типы идеальных ориентировок $\{hkl\} \langle u,v,w \rangle$ и их весовые доли.
3. В процессе прокатки листов обеспечить весовые доли требуемых идеальных ориентировок.

В четвертом разделе, состоящем из трех глав, проведено исследование формирования анизотропии свойств на основных этапах производства листов из алюминиевых сплавов в промышленных условиях. Разработаны схемы и режимы прокатки и термообработки, обеспечивающие получение в листах рациональных сочетаний показателей ани-

ототропии, приведены основные результаты внедрения.

В девятой главе исследована исходная анизотропия промышленных слитков и ее изменение в процессе горячей и холодной прокатки. Исследования проводились на алюминиевых сплавах АД0, АД1, АМЦ, АМГ2, АМГ3, 5182 (ФРГ), АМГ6, АС-120 (ФРГ), Д16, В95.

Толщина слитков колебалась от 300 мм до 400 мм. Подготовка слябов к прокатке осуществлялась по типовой технологии. Горячая прокатка производилась на полунепрерывном семиклетьевом стане "2800". Холодная прокатка - на непрерывном пятиклетевом стане "1800" и реверсивном стане "2300" фирмы "Зимаг" (ФРГ).

Показатели анизотропии μ_{ij} определялись по общеизвестной методике с определением границ доверительного интервала.

Оценка анизотропии слитков показывает, что большинство сплавов, независимо от режимов их подготовки, можно считать квазиизотропными. В реверсивной группе стана горячей прокатки (стадия раската), где слябы подвергаются деформации на 70...80% формируется плоскостная анизотропия $\mu_1 > \mu_{21} \approx \mu_{12}$. Показатели μ_{ij} в поверхностных слоях плиты снижаются по сравнению со слитком, а в центральных - практически не изменяются. Дальнейшее формирование анизотропии происходит на этапе горячей прокатки в непрерывной группе, где раскат деформируется на 80...95%. Установлено, что характер анизотропии в плоскости проката, сформированный на стадии раската в непрерывной группе не изменяется, а лишь продолжает совершенствоваться, распространяясь и на центральные слои. Имеет место следующее распределение коэффициентов анизотропии в плоскости листа $\mu_1 > \mu_{12} \approx \mu_{21}$. Степени обжатия при холодной прокатке в зависимости от маршрута прокатки и марки сплава составляли: АД0, АД1 - 38...89%; АМЦ, АМГ2 - 60...90%; АМГ3 - 58...81%; АМГ6 - 50,5%, 5182 - 44...69%; АС - 120 - 69...81%; Д16 - 39...87%; В95 - 48,6 и 72%.

Исследование анизотропии холоднокатанных листов показало, что на этой стадии продолжают снижаться показатели μ_{21} , μ_{12} и $\mu_1 > \mu_{21} \approx \mu_{12}$.

Оценивая результаты экспериментов в целом следует отметить, что современная технология прокатки формирует в листах значительную анизотропию свойств. Однако характер распределения коэффициентов μ_{ij} в плоскости листа не изменяется. Следовательно, производственные режимы прокатки сами по себе не позволяют формировать в листах заданную степень анизотропии.

В десятой главе проведено исследование формирования анизотропии свойств при различных сочетаниях степени обжатия при холодной прокатке листов с видами и режимами термической обработки.

В начале главы отмечено, что существующие режимы термообработки не обеспечивают в листах стабильной и тем более рациональной анизотропии свойств. В связи с этим разработаны экспериментальные режимы с более широким диапазоном температур нагрева и времени выдержки.

На первом этапе исследовалось влияние на анизотропию свойств режимов отжига, закалки и старения листов. Построенные по опытным данным графические зависимости показывают: 1) термическая обработка приводит к резкому изменению показателей анизотропии холоднокатанных листов; 2) из рассмотренных видов термообработки изменить показатели анизотропии в значительном диапазоне позволяют только операции отжига.

В связи с этим далее проведено детальное исследование формирования анизотропии при различных комбинациях степеней деформации листов при холодной прокатке и температур отжига. Полученные при исследовании результаты показывают, что на формирование сочетаний показателей μ_z в плоскости листа при отжиге основное влияние оказывает степень деформации, полученная металлом при прокатке и марка сплава (рис. 10.1). Например, из графиков видно, что переход $\mu_z^{\max} \rightarrow \mu_z^{\min}$ у листов с обжатием $\epsilon_n = 38\%$ наблюдается при $T = 310 \dots 320^\circ\text{C}$, а у листов $\epsilon_n = 89\%$ - при $T = 500 \dots 520^\circ\text{C}$.

Увеличение степени деформации и введение легирующих добавок препятствуют такому переходу.

Результаты рентгеноструктурных исследований текстуры изучаемых материалов и данные по фестонообразованию и разнотолщинности при вытяжке опытных заготовок полностью подтверждают установленные закономерности формирования анизотропии.

В целом для получения в листах заданного сочетания показателей анизотропии необходимо для каждой группы сплавов температуру отжига и время выдержки назначать в зависимости от степени деформации металла при холодной прокатке. В ряде случаев необходимо также регламентировать и величину обжатий.

В одиннадцатой главе на основе синтеза, сформулированных в предыдущих исследованиях требований к анизотропии заготовок и установленных закономерностей изменения ее показателей на различных этапах производства, разработаны рекомендации по изготовлению листов с благоприятной для процессов штамповки анизотропией свойств. Проведена их опытно-промышленная проверка и рассмотрены примеры реализации рекомендаций в промышленном производстве.

При разработке рекомендаций по выбору режимов прокатки и отжига показано, что для создания в листах из легированных сплавов

сочетания показателей анизотропии, необходимого для гибки, осесимметричной вытяжки и формовки надо ограничить степень деформации $\epsilon_n < 60\%$ и подвергнуть листы отжигу при $350...360^\circ\text{C}$. Сопоставляя аналогичным образом требования к анизотропии и данные по ее формированию в листах из сплавов АД0, АД1 получена графическая взаимосвязь степеней деформации при прокатке ϵ_n и температур отжига (рис. 11.1), обеспечивающая создание в металле как трансверсально изотропных свойств (область 2), так и различной степени плоскостной анизотропии ($\mu_1 > \mu_{12} \geq \mu_{21}$ - обл. 1 и $\mu_1 < \mu_{21} \leq \mu_{12}$ - обл. 3). Рекомендации по выбору оптимальных маршрутов прокатки, величин обжатий, температуры и длительности отжига во взаимосвязи с марками сплавов и операциями штамповки, представлены в виде обобщенных таблиц. Если листы нельзя разделить по видам штамповочных операций, то следует изготовлять их с трансверсально-изотропными свойствами, так как они предпочтительнее для большинства процессов штамповки.

Для оценки возможности реализации разработанных рекомендаций проведен отжиг четырех партий листов из сплавов АД0, АД1, АМГ2 и АМГ3 в садочных печах и ленты из АД0 на линии непрерывной термообработки (ЛНТО) в промышленных условиях. Последующие испытания на анизотропию показали, что отжиг на ЛНТО полностью реализует предлагаемые рекомендации. При нагреве в садочных печах не выдерживается рекомендованный интервал температур отжига вследствие большого перепада температур (до 50°C) по высоте стопы.

Далее проведена оценка стабильности величины показателей анизотропии в условиях производства по установившейся технологии. Установлено, что в этом случае коэффициенты μ_{ij} практически не изменяются и для расчета можно принять их основные значения. Это обеспечивает стабильность процессов формообразования листов. В конце главы на примере сплавов АД0, АМЦ, АМГ6 рассмотрено внедрение разработанных режимов в листопрокатное и листоштамповочное производства. Отмечено, что с целью изменения технологии прокатки выпущены технологические инструкции, проанализированы технические и экономические эффекты как от прокатки листов с гарантированным сочетанием механических характеристик и анизотропии, так и от использования таких листов при штамповке.

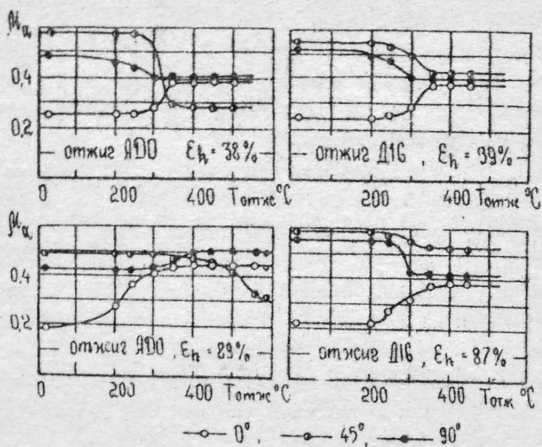


Рис. 10. 1.

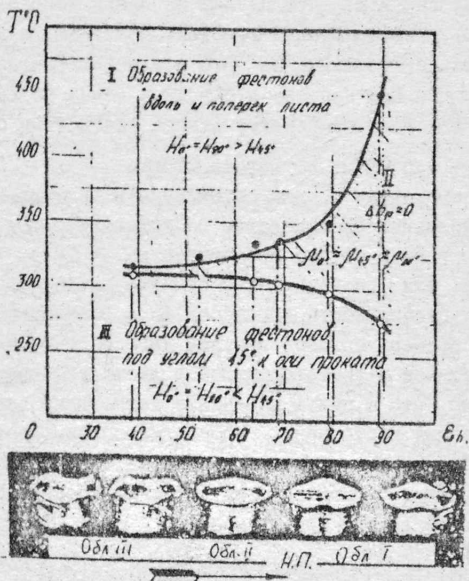


Рис. 11. 1.

Основные выводы и результаты работы.

1. В рамках совмещения феноменологического и кристаллографического подходов к изучению пластической деформации анизотропных материалов разработаны научно обоснованные комплексные решения интенсификации процессов листовой штамповки, состоящие в эффективном использовании анизотропии заготовок при формообразовании, разработке дифференцированных по операциям требований к величине показателей анизотропии и создании научно-технических основ формирования в листах рациональной анизотропии свойств.
2. Установлено, что анизотропия свойств, определяемая собой взаимосвязь показателей напряженного V_{σ} , деформированного V_{ϵ} состояний и величину коэффициентов Лодэ, изменяет механическую схему деформации. Это позволяет создавать при неизменном напряженном состоянии различные, в том числе и благоприятные для повышения допустимого формоизменения, деформированные состояния, что обуславливает целесообразность формирования в листах, требуемой для конкретных операций направленности свойств.
3. Анализ напряженно-деформированного состояния фланца показал, что при осесимметричной вытяжке анизотропной заготовки чистого сдвига одновременно по напряжениям и деформациям не происходит; форма контура, где $\epsilon_z = 0$, определяется радиусом $R_P^0 = R_n / e^{M_{12}}$. Вследствие этого происходит неравномерное утолщение фланца в радиальном и тангенциальном направлениях, что приводит к образованию на изделиях разнотолщинности, впадин и фестонов. На основе установленных закономерностей разработана методика расчета диаметров заготовок, учитывающая неравномерное изменение толщины стенки детали при вытяжке и позволяющая снизить на 24...46% разнотолщинность изделий по образующей и по периметру, сэкономить до 12% металла в следствие устранения фестонообразования.
4. Анализ особенностей влияния анизотропии на параметры процессов вытяжки коробчатых изделий позволил установить сочетания показателей, отвечающих требованиям интенсификации этих операций; $(M_{21} > M_1 > M_{12} \text{ и } M_{12} > M_1 > M_{21} \text{ для эллипсных деталей, } M_1 > M_{21} = M_{12} \text{ для квадратных в плане деталей})$ и рекомендации по рациональной ориентации заготовки на поверхности матриц.

5. Исследование влияния анизотропии на соотношение деформаций в очаге формоизменения и предельные возможности металла в процессе вытяжки, гибки моментом, стесненного изгиба, обтяжки листов, обжима и раздачи труб показывает, что при штамповке в условиях плоской схемы напряжений увеличению допустимого формоизменения способствуют заготовки с $\mu > 0.5$; в условиях плоской деформации аналогичный результат достигается при использовании листов с $\mu < 0.5$. Основываясь на полученных данных сформулированы требования к величине показателей анизотропии, их сочетаниям в плоскости листа и рациональной ориентации заготовки в зоне штамповки.
6. Разработаны и экспериментально подтверждены математические модели взаимосвязи коэффициентов анизотропии с параметрами текстуры и константами кристаллической решетки, позволяющие вычислять текущие значения показателей μ_{ij} по известным свойствам монокристалла и характеристикам текстуры; определять значения ориентационных факторов текстуры по заданным значениям коэффициентов; обосновывать существующие отличия в величине показателей анизотропии различных металлов, имеющих одинаковую кристаллическую решетку и идентичную текстуру.
7. На основе исследования полученной модели разработана методика формирования в листах заданной степени анизотропии. Для ее реализации необходимо:
- по заданным коэффициентам μ_{ij} и характеристическому параметру Q определить значения факторов ориентации текстуры Δ_i ;
 - по значениям Δ_i определить требуемые типы идеальных ориентировок $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ и их весовые доли;
 - выбрать схемы и режимы прокатки и термообработки, обеспечивающие требуемый набор идеальных ориентировок.
8. Экспериментальные исследования изменения компонент текстуры и показателей μ_{ij} на основных стадиях прокатки листов из АМЦ и А99 показали принципиальную возможность целенаправленного формирования в листах заданной анизотропии свойств. При этом установлено также, что в этих материалах присутствуют кристаллографические ориентировки, показатели анизотропии которых достигают значений ($0.14 \leq \mu_{ij} \leq 0.857$), существенно отличающихся от известных для алюминиевых сплавов величин. Это создает основу для производства листов с новым комплексом свойств.

9. При экспериментальном исследовании изменения анизотропии свойств на основных стадиях прокатного производства обоснована возможность формирования в листах из алюминиевых сплавов рациональной анизотропии в условиях существующей технологической схемы прокатки. Для получения требуемого сочетания коэффициентов μ_{ij} в плоскости листа необходимо для каждой группы сплавов температуру отжига и время выдержки назначить в зависимости от степени деформации, полученной металлом при холодной прокатке (см. рис. 10.1, 1.1).
10. На основе установленных закономерностей разработаны и представлены в виде обобщенных таблиц и графических зависимостей рекомендации по выбору маршрутов прокатки, степеней обжатия и режимов отжига, обеспечивающие в листах рациональную анизотропию, применительно к рассмотренным процессам листовой штамповки (см. напр. мер рис. 11.1).
11. Установленные рентгеноструктурными исследованиями видоизменения текстуры изучаемых образцов а также изменение характеристик фестонообразования и мест возникновения впадин при вытяжке экспериментальных заготовок однозначно подтверждают адекватность выявленных зависимостей $\mu_{ij} = f(T, \epsilon_h)$ реальному состоянию структуры листового полуфабриката. В частности, при вытяжке, полученных при опытной прокатке transversально изотропных заготовок высота деталей увеличилась на 10...12% при неизменном коэффициенте вытяжки; снизилась на 70...75% разнотолщинность стенки по периметру и практически устранено фестонообразование (см. рис. 11.1).
12. Анализ результатов отжига промышленных партий листов в садочных печах и на ЛНТО по предлагаемым рекомендациям, подтверждает возможность получения требуемой в полуфабрикатах анизотропии в условиях реального производства.
13. Длительные (в течение года) исследования колебаний анизотропии в различных партиях листов из АДЮ показывают, что при установившейся технологии производства значения показателей анизотропии остаются практически постоянными. Следовательно, осредненные значения μ_{ij} можно принять в технологических и проектировочных расчетах процессов листовой штамповки.

14. На основе полученных в диссертации результатов разработаны экономичные режимы прокатки и отжига, гарантирующие получение листов и лент из АДО, АД1, АМЦ, АМГБ с регламентированными свойствами и анизотропией. Экономический эффект от внедрения разработок в листопрокатное и листштамповочное производства составил свыше 1.1 млн. рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в 92 работах, в том числе:

1. Уваров В. В., Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В. Исследование анизотропии свойств алюминиевого сплава АДО // Стали и сплавы цветных металлов : Межвуз. сб. - Куйбышев, 1974. - С. 18-22.
2. Гречников Ф. В. Влияние режимов отжига на показатели анизотропии листовых алюминиевых сплавов // Стали и сплавы цветных металлов: Межвуз. сб. - Куйбышев, 1974. - С. 22-26.
3. Уваров В. В., Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В. Влияние анизотропии на диаграммы видов напряженного состояния // Теория и технология обработки металлов давлением: Межвуз. сб. Куйбышев, 1975. - С. 20-26.
4. Уваров В. В., Гречников Ф. В. Характер изменения анизотропии сплавов АДО при прокатке и последующем отжиге // Теория и технология обработки металлов давлением: Межвуз. сб. - Куйбышев, 1975. - С. 20-26.
5. Уваров В. В., Гречников Ф. В. Изменение анизотропии свойств листовых алюминиевых сплавов в зависимости от толщины // Алюминиевые сплавы и специальные материалы: Сб. тр. ВИАМ. - 1975. - Вып. 9. - С. 92-96.
6. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В., Уваров В. В. Влияние режимов прокатки и отжига на анизотропию свойств листов алюминиевых сплавов // Темат. сб. науч. тр. МЧМ СССР (МИСиС). - 1976. - N 94. - С. 38-43.
7. Влияние пластических свойств исходной заготовки на предельную степень раздачи анизотропных труб / Ю. М. Арышенский, В. В. Уваров, В. И. Мордасов, Ф. В. Гречников. // Деп. рук. ВИНТИ. - 1975- реф. 9В394-75. - 12 с.
8. Уваров В. В., Гречников Ф. В. О формировании и использовании анизотропии свойств листовых алюминиевых сплавов // Алюминиевые сплавы и специальные материалы: Сб. тр. - М. - 1976. - Вып. 10. - С. 68-74.

9. Уваров В. В., Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В. О возможностях регулирования анизотропии листовых материалов // Тр. КуАМ. - Куйбышев, 1977. - С. 17-21.
10. Технология штамповки эластичной средой трубчатого переходника из анизотропного материала / Ю. М. Арышенский, В. В. Уваров, В. И. Мордасов, Ф. В. Гречников. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1978. - № 6. - С. 16-18.
11. Предельное формоизменение при штамповке деталей летательных аппаратов: Учеб. пособие / В. В. Уваров, Ю. М. Арышенский, В. И. Мордасов, Ф. В. Гречников. - Куйбышев, Куйбышев. авиац. ин-т, 1978. 68 с.
12. Уваров В. В., Гречников Ф. В. Анализ влияния пластических свойств материала на предельную степень вытяжки // Тр. КуАМ. - Куйбышев, 1979. - С. 116-119.
13. Уваров В. В., Гречников Ф. В. Влияние анизотропии заготовок на равномерность стенки изделия при вытяжке // Вопросы пластического формоизменения при производстве летательных аппаратов и двигателей: Межвуз. сб. - Куйбышев, 1979. - С. 110-115.
14. Арышенский Ю. М., Уваров В. В., Гречников Ф. В. Влияние термомеханического воздействия на формирование анизотропии при прокатке листов // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. по теплофизике технологических процессов. - Ташкент, 1984. - С. 127.
15. Арышенский Ю. М., Уваров В. В., Гречников Ф. В. Повышение КИМ и параметров формообразования листов из алюминиевых сплавов // Тез. докл. Всесоюз. конф. по оптимизации технологических процессов формоизменения. Казань, 1984. - С. 68.
16. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф. В. Гречников, А. М. Дмитриев, В. Д. Кухарь и др.; Под ред. А. Г. Овчинникова. - М.: Машиностроение, 1985. - 184 с.
17. Арышенский Ю. М., Уваров В. В., Гречников Ф. В. О предельных возможностях материала в процессах листовой штамповки // Тез. докл. Всесоюз. конф. - М., 1985. - С. 27.
18. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В., Арышенский В. Ю. Получение рациональной анизотропии в листах. - М.: Металлургия, 1987. - 141 с.
19. Гречников Ф. В., Быков ... П., Осинковская И. В. Статистический анализ влияния химического состава АМЦ на механические свойства проката // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Т Л С. - 1987. - № 9. - С. 29-33.
20. Черепок Г. В., Гречников Ф. В. Современные проектные решения реконструкции цехов прокатки алюминиевых сплавов: Учеб. пособие. - Куйбышев, Куйбышев. авиац. ин-т. 1987. - 44 с.

21. Теория и технология листовой штамповки анизотропных и композиционных материалов в авиастроении: Учеб. пособие /Ю. М. Арышевский, Ф. В. Гречников, В. В. Уваров, М. Г. Лосев. - Куйбышев, Куйбышев. авиац. ин-т. 1988. - 88 с.
22. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В., Уваров В. В. Формирование свойств анизотропных материалов из алюминиевых сплавов для автомобилестроения //Тез. докл. VII Всесоюз. конф. по теплофизике технологических процессов. - Тольятти, 1988. - С. 43.
23. Гречников Ф. В. Анализ влияния анизотропии на деформированное состояние фланца при осесимметричной вытяжке // Кузнечноштамповочное производство. - 1989. - N 12. - С. 12-14.
24. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В., Зайцев В. М. Управление формированием анизотропии при прокатке листов с помощью текстурных данных //Тез. докл. Всесоюз. конф. по физике прочности и пластичности. - Куйбышев, 1989. - С. 410-411.
25. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В., Арышенский В. Ю. Определение требований к анизотропии листов в зависимости от вида их последующей штамповки. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1990. - N 3. - С. 16-19.
26. Гречников Ф. В. Расчет диаметров анизотропных заготовок для вытяжки //Вестник машиностроения. - 1990. - N 7. - С. 56-58.
27. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В., Зайцев В. М. Определение девиатора анизотропной среды по её текстурным параметрам //Изв. АН СССР Металлы. - 1990. - N 4 - С. 137-140.
28. Уваров В. В. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В. Основы расчетов предельного формоизменения в процессах листовой штамповки авиационных деталей: Учеб. пособие - Куйбышев, Куйбышев. авиац. ин-т. 1990. - 40 с.
29. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов. - М.: Металлургия, 1990. - 304 с.
30. Тяжка изделий из технического алюминия в полунагартованном состоянии /Ф. В. Гречников, И. В. Осинковская, А. Б. Быхов, В. И. Дровяников // Технология легких сплавов. - 1990. - N 5. - С. 52-54.
31. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В., Лосев М. Г. Определение величины давления гидроэластичной матрицы в процессе вытяжки эллипсных деталей из анизотропных заготовок. //Вестник машиностроения. - 1992. - N 12. - С. 46-48.
32. Гречников Ф. В., Клепачевская С. Ю., Зайцев В. М. Исследование взаимосвязи показателей анизотропии с характеристиками текстуры и константами монокристалла при прокатке сплава АМЦ //Цветные металлы. - 1991. - N 3. - С. 59-62.

33. Гречников Ф. В., Зайцев В. М. Расчет анизотропии свойств плакированных листов по характеристикам составляющих пакет материалов //Изв. вузов. Черная металлургия. - 1991. - N 5. - - С. 35-38.
34. Гречников Ф. В. Осиновская И. В. Влияние химического состава и режимов горячей прокатки на анизотропию свойств листов из сплава АМЦ //Цветные металлы. - 1991. - N 4. - С. 46-48.
35. Оводенко М. Б., Копнов В. И., Гречников Ф. В. Прокатка алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия, 1992. - 270 с.
36. А. с. 1266607 СССР, МКИ В21Д22/20. Устройство для глубокой вытяжки /И. П. Попов, В. Д. Маслов, Ф. В. Гречников //Б. И. -1986. - - N 40.
37. А. с. 1344456 СССР, МКИ В21Д5/00. Способ изготовления профилей из листа / Ю. М. Арышенский, В. Ю. Ненашев, Ф. В. Гречников //Открытия, изобретения... - 1987. - N 38.
38. А. с. 1368063 СССР, МКИ В21Д5/00. Штамп для одноугловой гибки листов /К. М. Арышенский, В. Ю. Ненашев, Ф. В. Гречников, А. Ю. Матвеев //Открытия, изобретения... - 1987. - N 3.
39. А. с. 1608939 СССР. Способ горячей прокатки слитков из алюминиевых сплавов / Ф. В. Гречников, Г. В. Черепок, В. И. Копнов, В. И. Самонин //Открытия, изобретения... - 1991. - N 15.
40. А. с. 1651578 СССР. Способ изготовления проката из алюминиевого сплава /Ф. В. Гречников, В. Ю. Арышенский, А. П. Быков //Открытия, изобретения... - 1991. - N 27.

Подписано к печати 31.03.93г.

Зак. 217 объем 2,0 п.л. тир. 100

Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана