

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.А. МИХЕЕВ, А.Ф. ГРЕЧНИКОВА

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ
ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ
ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ УСЛОВИЙ
СИММЕТРИЧНОЙ ОБТЯЖКИ

2-е издание, дополненное

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 22.04.02 Металлургия

САМАРА
Издательство Самарского университета
2019

УДК 621.9(075)
ББК 34.623я7
М695

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.К. Моисеев;
канд. техн. наук О.В. Соколов

В.А. Михеев, Владимир Александрович

М695 Управление процессами формообразования анизотропной листовой заготовки за счет создания условий симметричной обтяжки: учеб. пособие / *В.А. Михеев, А.Ф. Гречникова.* – 2-е изд., доп. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 116 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1374-0

Настоящее учебное пособие является вторым изданием того же названия. Оно переработано, включая собственные результаты авторов, в соответствии с новыми представлениями о предельном коэффициенте обтяжки в условиях симметричного развития очага деформации и преимущественного образования зоны пластической деформации центральной части листовой заготовки, что реализуется отдельно в двух последовательных операциях: предварительная обтяжка и повторная обтяжка. Дополнен новый раздел «Применение автоматизированного лабораторного обтяжного пресса при выполнении технологических проб на формуемость анизотропных материалов».

Условия симметричной обтяжки предусматривают соответствие текстурных осей симметрии свойств листовой заготовки и направлений линий кривизны оболочки двойной кривизны, пересекающихся в геометрическом полюсе поверхности обтяжного пуансона, а также местоположение вертикальной плоскости симметрии металлоформовочного пресса. Данная плоскость пройдет через геометрический полюс поверхности обтяжного пуансона и середину центрального зажима листовой заготовки. В результате будут учитываться не только механические и деформационные свойства листового материала, но и их направленность, что повысит эффективность формообразования обтяжкой анизотропных листовых материалов. Направленность определяет величину и характер анизотропии свойств листового проката, что обеспечит устойчивое управление процессами формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны при равномерном изменении толщины в различных областях листовой заготовки без складок и разрыва.

Учебное пособие предназначено для подготовки магистров по направлению подготовки 22.04.02 Металлургия, магистерская программа «Инновационные методы получения и обработки материалов с заданными свойствами» по дисциплинам «Анизотропные материалы» и «Технологии и оборудование инновационных процессов деформирования материалов». Будет полезна аспирантам по специальности 05.02.09 Технологии и машины обработки давлением.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

УДК 621.9(075)
ББК 34.623я7

ISBN 978-5-7883-1374-0

©Самарский университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	8
1. Основные сведения об эксплуатационных характеристиках изделия, формирование текстуры и анизотропии свойств листовых материалов	12
2. Создание условий симметричной обтяжки с учетом перехода от внешних поверхностей аэродинамических обводов к поверхности оболочки двойной кривизны	25
3. Принципы выполнения условий симметричной обтяжки	43
4. Влияние компонент текстуры на устойчивость и предельный коэффициент обтяжки	54
5. Кинематический метод реализации принципов симметричной обтяжки на обтяжных прессах с программным управлением ...	70
5.1. Описание и расчет способа обтяжки оболочки двояковыпуклой формы на прессе FEKD	70
5.2. Особенности реализации симметричной обтяжки на прессе типа FEKD с ЧПУ	81
6. Модернизация и перевод на программное управление лабораторного обтяжного пресса	90
6.1. Новый подход к проектированию и отладке технологического процесса формообразования обтяжкой на современном этапе	90
6.2. Кинематический метод обеспечения подготовки управляющих программ.....	94
6.3. Внедрение автоматизированной системы управления в лабораторный обтяжной пресс.....	99
6.4. Применение автоматизированного лабораторного обтяжного пресса при выполнении технологических проб на формуемость анизотропных материалов.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	112

*«Важны не вещи, а принципы
симметрии»*

С. Вайнберг

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первое издание учебного пособия «Управление процессами формообразования анизотропной листовой заготовки за счет создания условий симметричной обтяжки» было предназначено для подготовки магистров по направлению 22.04.02 Металлургия, магистерская программа «Инновационные методы получения и обработки материалов с заданными свойствами». Однако выдвигание симметрии на первый план в управлении процессами формообразования обтяжкой анизотропной листовой заготовки позволяет решить важную производственную задачу, связанную с объединением макроскопического и микроскопического подходов в данной технологии. Это новый научный уровень, поднимающий планку подготовки аспирантов по специальности 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением.

В ряде случаев симметрия является достаточно очевидным фактом. Например, для определенных геометрических фигур, в том числе и для оболочек двойной кривизны, нетрудно увидеть эту симметрию и показать ее путем соответствующих преобразований при выборе соответствующей системы координат, в результате которых фигура не изменит своего вида. Однако в общем смысле понятие симметрии гораздо шире и ее можно понимать как неизменность (инвариантность) каких-либо свойств объекта по отношению к преобразованиям, операциям, выполняемым над этим объектом. Причем это может быть необязательно материальный объект, но и закон, математическая формула или уравнения, в том числе нелинейные и дифференциальные.

При этом надо различать геометрическую и динамическую форму симметрии. К *геометрической форме* симметрии (внешние симметрии) относятся свойства поверхности листа или оболочки двойной кривизны, такие как однородность, изотропность и эквивалентность систем отсчета.

К *динамической форме* относятся симметрии, выражающие свойства физических взаимодействий элементов структуры самого материала (внутренние симметрии). Основными структурными элементами листовых материалов, определяющими их технологические и эксплуатационные свойства, являются кристаллиты или зерна и кристаллографическая текстура, формирование которой при прокатке приводит к анизотропии как механических свойств, так и деформационных характеристик листовых заготовок. Зерна должны быть ориентированы со своими кристаллографическими плоскостями и направлениями относительно внешней системы координат листа, а также детали обшивки. При этом текстура прокатки листа имеет совокупность элементов симметрии, присущую параллелепипеду, а именно: три оси симметрии второго порядка, одна из которых совпадает с направлением прокатки, а две другие – с перпендикулярными ему направлениями, и три плоскости симметрии, одна из которых совпадает с плоскостью прокатки, а другие перпендикулярны к ней. Такой подход, однако, раскрывает возможность сведения всех симметрий к геометрическим формам.

Формы симметрии являются одновременно и формами асимметрии. Так геометрические асимметрии выражают нелинейность поверхности оболочки двойной кривизны и анизотропность свойств листового проката. При строгом описании геометрического характера деформации оболочки дифференциальные зависимости между перемещениями и параметрами деформации оказываются нелинейными.

Геометрическая нелинейность может распространиться на уравнения совместности деформаций и на дифференциальные уравнения равновесия, которые составляются для элемента оболочки, испытывающего формообразующую деформацию. Анизотропия свойств

отражается на физических уравнениях, которые могли бы соответствовать линейной упругости и изотропности листового материала. Однако уровень физико-механических свойств и характер анизотропии определяются наличием в листовом материале тех или иных преимущественных кристаллографических ориентировок.

Поэтому для получения в листе требуемого набора показателей анизотропии, например для процесса формообразования обтяжкой, необходимо установить физически обоснованную связь с параметрами текстуры и константами кристаллов. Однако при описании текстуры применяют определенные ориентировки кристаллографических плоскостей и направлений относительно главных осей анизотропии листового материала.

В случае ортогональной анизотропии листового материала характеризуется тремя главными осями анизотропии, совпадающими с направлением прокатки, поперек прокатки и по толщине листа. Все это говорит о том, что в листовом материале не следует ожидать появления криволинейной анизотропии. Поэтому для практики наиболее важным для симметрии свойств является плоскость симметрии, при которой два любых направления, симметричных относительно этой плоскости, будут иметь одинаковые физико-механические свойства. Вторым элементом симметрии являются оси симметрии, например, пара главных осей анизотропии в плоскости листового материала и два ортогональных направления тензора кривых нормальных сечений поверхности оболочки двойной кривизны, проходящих через особую точку, называемую полюсом поверхности рассматриваемой геометрической фигуры. Полюс поверхности геометрической фигуры является третьим элементом симметрии.

Приведенные элементы симметрии являются в нашем случае участниками преобразований: отражение в плоскости, поворот вокруг оси и инверсия как центр симметрии. Они задают условия симметричной обтяжки, которые предусматривают, прежде всего, соответствие текстурных осей симметрии свойств листового заготовочного материала и направлений линий кривизн оболочки двойной кривизны, пересекающихся в полюсе поверхности обтяжного пуансона. Определено ме-

стоположение вертикальной плоскости симметрии металлоформовочного пресса, которая пройдет через геометрический полюс поверхности обтяжного пуансона и середину центрального зажима листовой заготовки.

Теперь от такого механического совмещения главных осей анизотропии листовой заготовки при ее обтяжке с ортогональными направлениями главных кривизн, проходящих через точку касания плоского листа в геометрическом полюсе поверхности обтяжного пуансона, можно перейти к научному пониманию существующих проблем управления процессами формообразования обтяжкой оболочки минимальной разнотолщинности из анизотропной листовой заготовки.

Учитывая все это, авторы сочли целесообразным переиздать учебное пособие с сохранением в переработанном виде тех разделов, которые не потеряли своего значения и внесли новые принципиальные данные о предельном коэффициенте обтяжки в условиях симметричного развития очага деформации и преимущественного образования зоны пластической деформации центральной части листовой заготовки. Ввели новый раздел «Применение автоматизированного лабораторного обтяжного пресса при выполнении технологических проб на формуемость анизотропных материалов»

Авторы сохранили практическую направленность учебного пособия, прежде всего, понимание, что эффективность использования анизотропных листовых материалов из алюминиевых сплавов по ряду нерешенных проблем была и остается весьма низкой.

ВВЕДЕНИЕ

Авиационная техника базируется на использовании новейших достижений во всех современных областях знаний о материалах как в области фундаментальных наук (физика твердого тела, металлофизика, кристаллография), так и в области прикладных исследований (материаловедение, пластичность металлов). Необходимость разработки новых подходов и развития комплексных исследований физики твердого тела, металлофизики, кристаллографии, материаловедения и пластичности металлов, а также закономерностей текстурообразования при прокатке листового материала возникла в связи с применением в авиации анизотропных листовых материалов из термически упрочняемых алюминиевых сплавов. Однако эффективность использования анизотропных листовых материалов по ряду нерешенных проблем была и остается весьма низкой.

Заданы эксплуатационные свойства тонкостенных деталей обшивок летательного аппарата ЛА из алюминиевого листового материала, прежде всего ее обводообразующая поверхность, чаще всего двойной кривизны, равнотолщинность стенки которой формируется в производственно-технологических циклах прокатки и обтяжки в результате определенной совокупности технологических решений. Принимаемые технологические решения не всегда в полной мере учитывают условия производства, что является причиной непостоянства формируемых свойств и, как следствие, сказывается на качестве изделия авиационной техники.

Практика показала, что требуется учитывать не только механические и технологические свойства листового материала, но и их направленность. Направленность определяет величину и характер анизотропии, деформационных характеристик листового проката и эксплуатационных свойств деталей обшивок. Однако возможность создавать определенные текстуры с помощью оптимизации кристал-

логографической ориентации структуры в листовом материале так велика, что это сравнимо со схемой армирования композиционных материалов. Кроме этого, направленность свойств листового материала может обеспечить устойчивое управление процессами формообразования обтяжкой при равномерном изменении толщины в различных областях листовой заготовки без складок и разрыва в оболочку минимальной разнотолщинности и благоприятную передачу свойств готовому изделию, аналогично изделиям из композиционного материала.

Для идентификации направленности свойств листового материала необходимо создать условия сохранения информации о формировании оптимальной текстуры, однородности распределения элементов внутренней структуры и гетерогенизирующей фазы. Носителями такой информации являются сам листовый материал, его кристаллическая и зерненная структура, вторичные интерметаллидные фазы. Как известно, основными структурными характеристиками листовых материалов, определяющими их технологические и эксплуатационные свойства, являются размер зерна и кристаллографическая текстура, формирование которой при прокатке приводит к анизотропии как механических свойств, так и деформационных характеристик листовых заготовок.

Зерна должны быть ориентированы со своими кристаллографическими плоскостями и направлениями относительно внешней системы координат листа. Носители информации могут активно участвовать в технологических процессах, проходя через различные операции, испытывая воздействия ограничивающих факторов. Но часто неизвестными оказываются как раз текстура и другие параметры структурного состояния, определяемые физико-механическими свойствами листового материала и законом развития деформации во времени. Этот закон зависит от вида оборудования, размеров и формы заготовки, деформационных и скоростных условий, технологической последовательности и др.

В свою очередь уровень свойств листового материала, как известно, определяется химическим составом сформированного в про-

цессе производства структурного состояния, обнаруживающего упругие, пластические и вязкие свойства в различных сочетаниях и неодинаковое их проявление в различных направлениях. Характерной особенностью такого реологического поведения алюминия и его сплавов при деформации является то, что при стандартной технологии прокатки в листах формируется текстура, кристаллографическая ориентация, следовательно, анизотропия, которая приводит в процессе формообразования к преимущественному развитию деформаций по толщине, быстрому утонению заготовок и разрыву. Наглядным примером отрицательного влияния неблагоприятной текстуры и обусловленной ею анизотропии свойств является образование фестонов и разнотолщинности стенки детали при вытяжке. Аналогичные явления могут наблюдаться и при формообразовании деталей обшивок из анизотропного листового материала, имеющие неблагоприятную текстуру: снижается предельный коэффициент обтяжки, возникают недопустимая разнотолщинность стенки детали обшивки, ее чрезмерное утонение и локализованные разрывы, что считается недопустимым при изготовлении изделий авиационной техники.

При этом технологии производства авиационной техники и сложные условия ее эксплуатации при высоких скоростях полета, резких перепадах температур и постоянных изменениях внешних силовых воздействий выдвигают новые, более жесткие требования к свойствам конструкционных материалов, а также к форме и точности выполнения аэродинамических обводов современных самолетов. Прежде всего, усложнились обводообразующие поверхности, связанные с пространственной формой оболочек двойной кривизны и соприкасающихся с ними деталей каркаса самолетов, повысились требования их совместимости при сборке из-за разнотолщинности стенки деталей обшивок. Требуется минимизировать разнотолщинность до рекомендуемых пределов, но для этого нужна новая технология увеличения степени формоизменения при обтяжке, достигаемой практически за один переход без локализации деформации утонения, и выравнивающая их значения в различных областях листовой заготовки.

Процесс формообразования обтяжкой листового материала остается пока основным при получении деталей обшивок. Поэтому проблемам автоматизации этого процесса было уделено большое внимание. Созданное металлоформовочное оборудование (обтяжные прессы) является уникальным, специализированным и с программным управлением. Кроме того, значительные габаритные размеры деталей обшивок, а также сравнительно небольшое их число на самолетах определили особые требования к автоматизированным средствам их производства. Для создания новых конструкций авиационной техники необходимо иметь новые материалы и технологические решения, которые должны обеспечить единство и согласованность организационно-производственной среды предприятия на базе CALS-технологий. Комплекс задач, которые должны решаться с использованием CALS-технологий, а именно обмен информацией по идентификации направленности свойств листового материала, соответствующей параметризации поверхности оболочек двойной кривизны, конструирования объемной обводообразующей оснастки и подготовки управляющих программ для обтяжных прессов, необходимо отнести к числу первоочередных.

Учебное пособие предназначено для подготовки магистров по направлению 22.04.02 Металлургия, магистерская программа «Инновационные методы получения материалов и изделий из них» по дисциплинам «Анизотропные материалы» и «Технологии и оборудование инновационных процессов деформирования материалов». Будет полезна аспирантам по специальности 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ИЗДЕЛИЯ, ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ И АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Заготовками для деталей обшивки самолетов являются листы из алюминиевых сплавов систем Al-Cu-Mg и Al-Zn-Mg-Cu, от которых требуется высокая технологическая деформируемость листовых заготовок при формообразовании обтяжкой оболочек двойной кривизны, а также требуемый уровень эксплуатационных характеристик деталей обшивок. Алюминиевые сплавы приведенных систем являются сплавами типа дуралюмин и высокопрочный алюминиевый сплав и остаются основными конструкционными материалами современной авиационной техники.

Однако анализ существующих схем формообразования обтяжкой позволил установить наличие ограничивающих факторов, влияющих на формуемость листовых заготовок. К ним можно отнести неравномерное растяжение из-за влияния сил трения и сдвиговые деформации из-за сложной формы оболочек двойной кривизны, а также недопустимой локализации деформации, приводящей к преимущественному развитию утонения алюминиевой заготовки. Кроме того, из-за предельного перепада толщин в отдельных зонах оболочки, а также в области выхода листовой заготовки из зажимов прессы эти зоны являются зонами повышенной опасности, где наиболее высока вероятность локализации деформации и разрыва листовой заготовки. Ограничивающие факторы, влияющие на технологическую формируемость алюминиевой заготовки, не позволяют получить достижимую точность геометрической формы и обводообразующей поверхности оболочек двойной кривизны. Поэтому для снижения

или полного устранения ограничивающих факторов необходимо создать условия симметричной обтяжки, реализуемой только на металлоформовочных прессах с программным управлением [1].

В условиях симметричной обтяжки предусматривается наличие двух подходов. Первый реализует макроскопический подход к симметричному развитию границ пластической деформации при обтяжке за счет симметрии свойств анизотропной листовой заготовки и совмещение в процессе обтяжки главных осей анизотропии листовой заготовки с направлениями кривизн поверхности обтяжного пуансона. Второй реализует микроскопический подход к уменьшению склонности преимущественного развития деформации по толщине при обтяжке листового материала, особенно из алюминиевых сплавов, за счет разработки новых режимов прокатки, изменяющих ориентации кристаллографических плоскостей и направлений в поликристаллическом материале. Естественным выходом из этой ситуации является, по-видимому, совмещение обоих подходов. Это позволит, с одной стороны, установить для конкретных условий формообразования обтяжкой требуемую направленность свойств листового материала, а с другой стороны, рациональные значения показателей анизотропии.

Как известно, величина и характер анизотропии свойств определяются как кристаллическими свойствами самого материала, так и наличием в поликристалле преимущественных кристаллографических ориентировок кристаллов или составом текстуры. Преимущественная кристаллографическая ориентировка кристаллов, названная текстурой, возникает на определенных этапах обработки материалов, в том числе и листовых материалов, вдоль какого-либо определенного направления. При прокатке листов кристаллическая решетка зерен ориентируется закономерным образом вдоль направления прокатки. Возникает текстура и при рекристаллизации холоднокатаных металлов, причем текстура рекристаллизации часто отлична от текстуры деформации [2].

Практический интерес к текстурам связан с тем, что они вызывают анизотропию свойств. При этом анизотропия и симметрия

свойств являются характерной чертой кристаллов, обусловленной закономерностью и симметрией их внутреннего строения. Частицы, из которых сложены кристаллы, т.е. атомы, ионы и молекулы, образуют правильные симметричные ряды, сетки и решетки. Каждому кристаллическому веществу присущи определенный порядок и симметрия в расположении частиц и четко установившееся расстояние между ними. Вследствие этого в структуре кристалла в разных направлениях различны расстояния и силы связи между частицами, поэтому большинство свойств самого кристалла анизотропные, т.е. различны в разных направлениях, но одинаковы в направлениях, симметричных друг другу.

Закономерность расположения частиц, их природа, энергетический спектр и силы связи между ними определяют физические свойства кристалла. Внешние воздействия, такие как механическое, действие электрических и магнитных полей, в том числе и легирование кристаллического тела чужеродными атомами, могут нарушать динамическое равновесие и менять свойства кристалла. Отсюда закономерность и симметрия структуры кристалла являются следствием многих сил и процессов. Таким образом, симметрия, периодичность и закономерность структуры являются основными характеристиками кристаллического состояния вещества. При этом основными структурными данными поликристаллического материала, определяющими его технологические и эксплуатационные свойства, являются размер зерна и кристаллографическая текстура, формирование которой, например, при прокатке приводит к анизотропии механических свойств, деформационных и эксплуатационных характеристик листовых заготовок.

В деформированных поликристаллических материалах величина анизотропии зависит от степени совершенствования текстуры, т.е. степени приближения ориентировок зерен к блочному монокристаллу. При этом степень совершенствования текстуры определяется величиной пластической деформации. Изучение кинематики развития текстуры при пластической деформации показывает, что степень совершенствования текстуры, следовательно и анизотропии, возрастает

до определенного предела, после которого уже практически не меняется. При описании текстуры характеризуются определенными кристаллографическими ориентировками плоскостей и направлений. При этом различие в плотности упаковки атомами кристаллографических плоскостей и направлений в кристалле обуславливает исходную, а точнее природную анизотропию. В то же время физической основой анизотропии поликристаллических материалов является текстура, возникающая при обработке давлением[3].

Если анизотропия свойств листа касается различий их значений в зависимости от направления внешних координат (направление прокатки НП, поперечное направление ПН и направление нормали НН), то текстура листа характеризуется определенной симметрией, названной ортогонально-анизотропной или ортотропной. Гипотеза об *ортогональной анизотропии* основана на допущении существования листового полуфабриката в трех плоскостях симметрии, присущих по форме «тонкому» параллелепипеду, которым является лист. Ортотропными являются многие материалы, например, армированные волокнами. Ортогональная анизотропия характерна и для прокатываемых листовых материалов. Такая симметрия является следствием кристаллического строения листового материала и последующего его текстурирования при прокатке. В этом случае через каждую точку листа можно провести три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии физико-механических свойств, которые присущи внешним плоскостям листового материала. В случае ортогональной анизотропии листовой материал характеризуется тремя главными осями анизотропии. Ось 1 совпадает с направлением прокатки НП; ось 2 – поперек прокатки ПН; ось 3 направлена по нормали к толщине НН.

В случае если имеется плоскость листового материала, например плоскость прокатки, в которой свойства эквивалентны во всех направлениях, но отличаются в направлении толщины листа, то текстура листа характеризуется определенной симметрией, названной трансверсально-изотропной или транстропной. Для характеристики трансверсально-изотропного листа достаточно рассмотреть две оси:

одну из множества равноценных в плоскости, например направление прокатки НП, а вторую – по толщине, направление нормали НН.

Интенсивное пластическое течение вызывает значительное повышение плотности дислокаций, скопление их в решетке кристалла. Затем происходят перемещения этого ансамбля дислокаций в границы разориентированных фрагментов с образованием малоугловых границ. Образованию большеугловых границ соответствуют ротационные моды деформации, т.е. концентрации пластической деформации в относительно узких деформационных полосах. Возникающие в результате этого внутренние напряжения приводят к развороту большинства кристаллов, составляющих металл, в направлении внешнего деформирующего усилия. Тип текстур и их характер определяются поворотом решетки, происходящим за счет движения дислокаций в зернах. Эти повороты не являются однородными, есть различия внутри каждого зерна и тем более у различно ориентированных зерен. При этом из-за воздействия соседних зерен каждое зерно может быть разбито на разориентированные пачки скольжения, так что рассеивание текстуры в пределах каждого зерна может быть значительным.

Кроме того, текстуры, которые реально возникают в листах, отличаются от идеальных текстур тем, что отнюдь не во всех участках листа существует одинаковая текстура. Текстуры листов, по видимому, должны характеризоваться симметрией кристаллических ориентировок относительно обеих плоскостей листа. Эти плоскости являются плоскостями зеркального отражения разнообразных ориентировок. Однако наивысшая симметрия, которой может характеризоваться текстура, обусловлена симметрией образующих ее кристаллов. Такой высокосимметричной текстуре, как, например, кубическая в рекристаллизованных листах, свойственна совершенно одинаковая ориентировка всех кристаллов.

Кубическая текстура, особенно текстура отжига, заслуживает внимания. Она образуется при первичной рекристаллизации, усиливается и заостряется. Кубическая текстура $(001)[100]$ – наиболее симметричная из всех известных текстур. Все кристаллы ориентиро-

ваны идентично: три кубических оси параллельны основным направлениям листа (НП, ПН и НН). Кроме того, рассеяние очень незначительное, что не наблюдается ни у одной другой текстуры. Это особенно важно, что такая простая и высокосимметричная ориентировка образуется из сложной текстуры прокатки.

Для качественного описания возникающей в металле текстуры разработана специальная индексация кристаллографических плоскостей и направлений [4]. Ориентация конкретного зерна для металлов с кубической решеткой может быть представлена набором индексов Миллера $(hkl)[uvw]$. Здесь (hkl) – кристаллографическая плоскость, параллельная поверхности определяемого зерна, а $[uvw]$ представляет собой кристаллографическое направление, параллельное оси X в системе координат, связанной с зерном (Ks). На рис. 1.1 кристаллографической плоскостью, параллельной поверхности зерна, является плоскость (110) , а кристаллографическим направлением, параллельным оси X , является $[001]$. Таким образом, ориентация выделенного зерна – $(110)[001]$. Систему эквивалентных плоскостей (с одинаковыми свойствами) записывают в фигурных скобках – $\{hkl\}$, а семейство эквивалентных направлений – в ломаных скобках $\langle uvw \rangle$.

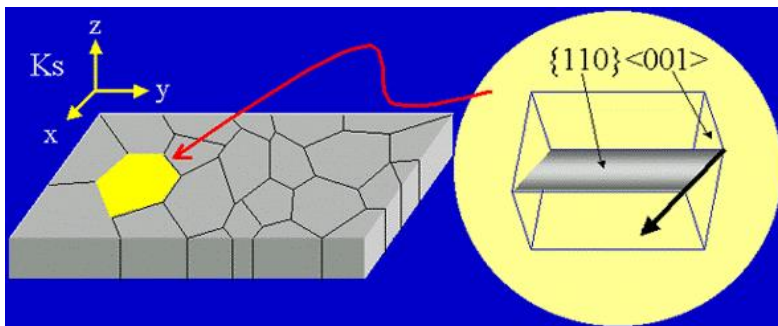


Рис. 1.1. Пример индексации кристаллографических плоскостей и направлений листового проката

Текстура прокатки (ограниченная текстура), как показали теоретический анализ и дальнейшая экспериментальная проверка метода-

ми рентгенографии, имеет совокупность элементов симметрии, присущую параллелепипеду, а именно: три оси симметрии второго порядка, одна из которых совпадает с направлением прокатки НП, а две других – с перпендикулярными ему направлениями – нормали НН и поперечным ПП; три плоскости симметрии, одна из которых совпадает с плоскостью прокатки, а другие перпендикулярны к ней [5]. В этом случае текстура определяется плоскостью, задаваемой индексами $\{hkl\}$, и направлением в этой плоскости $\langle uvw \rangle$ (рис. 1.1).

Для листовых полуфабрикатов характерны ограниченные текстуры, определяемые кристаллографической осью, расположенной в плоскости прокатки. При этом в материале может формироваться как однокомпонентная, так и многокомпонентная текстуры прокатки (рис. 1.2). Обычно текстуру деформации для металлов с высокой энергией упаковки называют «текстурой чистого металла» или «текстурой меди», а для металлов с низкой энергией упаковки – «текстурой сплава» или «текстурой латуни». Это связано с тем, что с появлением деформационных полос пути эволюции наследственности расходятся: металлы с высокой энергией упаковки деформируются скольжением, что ведет к «текстуре меди», а металлы с низкой энергией упаковки деформируются двойникованием, что ведет к «текстуре латуни». При этом текстуры деформации ГЦК – металлов (Al, Cu, Ni, Ag, Au, Pt) во многом определяются энергией дефектов упаковки кристаллической решетки.

Таким образом, совокупность преимущественных или значительных ориентировок кристаллов в поликристаллическом теле и называется текстурой. Это название еще не указывает на то, существует ли упорядоченная или хаотическая ориентировка. Однако название «текстура» употребляется в более узком смысле, когда кристаллы ориентированы не хаотически, а более или менее упорядоченно. В этом случае говорят о предпочтительной кристаллической ориентировке, преимущественной ориентировке и т.д.

Кроме того, алюминий и его сплавы являются весьма подходящим объектом для изучения закономерностей преобразования текстуры в ГЦК-металлах. Давно известно, что текстура деформации и

рекристаллизации в ГЦК-металлах сильно зависит от их энергии упаковки, но сведения о составе текстуры, характерной для малой или большой величины энергии упаковки, неоднозначны и порой противоречивы [2]. Легирование алюминия, которое изменяет энергию дефектов упаковки, позволяет установить количественные закономерности в преобразовании текстуры от одного типа к другому.

В свою очередь тот или иной уровень параметров структуры и анизотропии свойств определяется технологическими маршрутами и режимами прокатки и термообработки. Поэтому при обосновании подхода направленного формирования свойств листового материала в процессе прокатки необходимо выяснить сочетание показателей

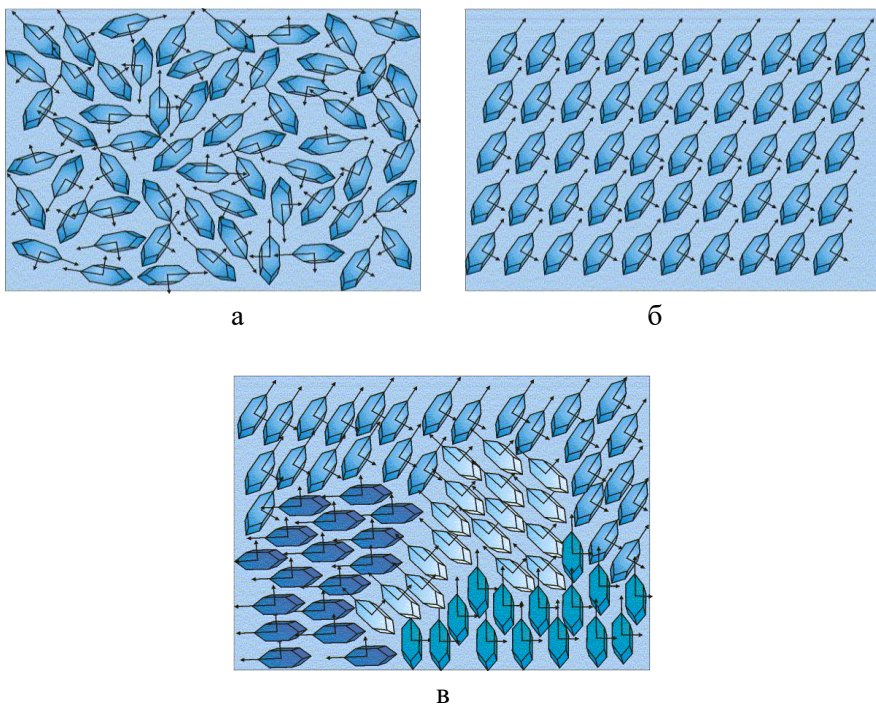


Рис. 1.2. Текстуры прокатки:

а – случайная ориентировка, б – однокомпонентная;
в – многокомпонентная

анизотропии, которые отвечают требованиям интенсификации процесса формообразования обтяжкой. Однако на интенсификацию процесса, кроме физико-механических характеристик листового материала (состав, тип кристаллической решетки, размер зерна, вид термообработки, анизотропия свойств и др.) существенное влияние оказывают технологические факторы, проявляющиеся в конкретных условиях выполнения операций (схема напряженно-деформированного состояния, сила контактного трения, скорость деформации, неравномерность деформации и др.).

Нужна традиционная информация о физико-механических характеристиках листового материала для определения допустимых степеней формообразования и размеров исходной заготовки. Кроме этого, нужна нетрадиционная информация направленности свойств листового материала. Она необходима для понимания реологических свойств листового материала, в том числе и сопротивления деформации, достаточной для осуществления пластического формообразования и совершенствования технологии производства деталей обшивок при резко изменяющемся или периодическом деформировании. В любой технологической цепочке существуют своего рода «барьеры». До сих пор в качестве основных «барьеров» рассматриваются термические операции, что ограничивает управление технологическими процессами и их совершенствование.

Характер текстуры определяется условиями деформирования, взаимным влиянием деформации и нагрева, состоянием структуры и т.д. Состояние структуры деформированного металла считается термодинамическим нестабильным при всех температурах. Поэтому нельзя забывать о взаимном влиянии деформации и нагрева на ориентацию зерен и даже на их размер. Еще Сорби обнаружил, что радикальное разупрочнение связано с появлением в микроструктуре зародышей новых зерен. Это дало повод назвать процесс рекристаллизацией. Способность зародыша рекристаллизации к росту во многом определяется областями деформированного поликристалла, имеющего различные ориентировки, особенно в деформационных полосах. Следовательно, текстура рекристаллизации развивается из

текстуры деформации. Возникающую при этом текстуру значительно сложнее описывать с помощью идеальных ориентировок [6].

Кроме того, освоение новых процессов формообразования обтяжкой в определенной степени сдерживается слабой изученностью реологии поведения алюминиевого сплава в отожженном, особенно в свежезакаленном состоянии. Так же отсутствуют сведения о влиянии того или иного реологического состояния на напряженно-деформированное состояние очага деформации в этих процессах, определяющего характер его развития с учетом направленности свойств листовой заготовки и формирование качества готового изделия. Большое разнообразие структур, которые могут быть получены в алюминиевых сплавах после различной термической обработки, есть результат различной степени отклонения сплавов от термодинамического равновесного состояния при комнатной температуре. Равновесное (отожженное) состояние термически упрочняемых алюминиевых сплавов представляет собой твердый раствор с низким содержанием легирующих элементов (десятые доли процента) с включениями вторичных интерметаллидных фаз. При таком фазовом составе сплав обладает низкой прочностью и высокой пластичностью.

Самой неустойчивой при комнатной температуре структурой в термически упрочняемых алюминиевых сплавах является пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в алюминии, концентрация которого может превышать в десятки раз равновесное состояние. В таком состоянии алюминиевый лист также очень пластичный, точнее очень вязкий, поэтому более неустойчив к формообразованию, чем в равновесном состоянии. Пластическая деформация вызывает стимулирующий распад пересыщенного твердого раствора, увеличивающий количество частиц второй гетерогенизирующей фазы. Неустойчивость свежезакаленного состояния сплава при комнатной температуре и склонность в начальной стадии к преждевременному распаду пересыщенного твердого раствора технологически ограничивают возможности формообразования обтяжкой листового материала. Однако данная промежуточная структура,

которая соответствует начальным стадиям распада пересыщенного твердого раствора, привлекает внимание. Имеются результаты стабилизации свежезакаленного состояния алюминиевого сплава при регламентированных нагревах под закалку и выдержкой свежезакаленной листовой заготовки в холоде перед формообразующей операцией [7].

Любой деформируемый металл по реологической «сущности» может быть представлен в виде набора элементарных моделей: упругости, вязкости и пластичности [8]. На наш взгляд, наиболее точно поведение деформируемого тела во всем его многообразии отражает среда, где «пружина», описывающая деформационное упрочнение, включена последовательно с вязким элементом, моделирующим диффузионно-релаксационные процессы. Если деформация листовой заготовки при формообразовании протекает при таких условиях, когда диффузионно-релаксационные процессы заторможены, то работой вязкого элемента можно пренебречь и рассматривать модель упругопластического тела с деформационным упрочнением.

Деформационное упрочнение – это возрастание неравновесности системы, т.е. процесс вынужденный, который происходит за счет внешних сил. В свою очередь самопроизвольный диффузионно-релаксационный процесс является обратным, снимающим деформационное упрочнение. Реологическое состояние идеально-пластической среды моделируется в виде «скользящей» пары, например, «условной температурой», при которой сопротивление сдвигу по границам и телу зерен практически одинаковое. Эта «условная температура» должна быть заведомо ниже температурного порога рекристаллизации материала. Такое условие накладывает ограничения на скорость деформации, которая не должна приводить к заметному деформационному разогреву материала, в том числе и в зоне ее локализации. Большое значение при этом имеет не просто накопленная деформация, но и соотношение между ее внутризеренной, зернограничной и поворотной (ротационной) составляющими. Для структурообразования существенна также роль немонотонного характера деформации и масштабного фактора.

Только в связи с таким пониманием внутренних процессов можно управлять процессом формообразования обтяжкой с учетом направленности свойств анизотропной листовой заготовки. Понимание процессов, происходящих в металле при той или иной обработке, даёт возможность не только улучшить требуемые свойства, но и создать листовые материалы с заранее заданной направленностью свойств. Видоизменяясь в зависимости от обработки, текстура обуславливает особый уровень физико-механических свойств и характер анизотропии материала. Отсюда следует, что, создавая в металле различную текстуру, можно, в принципе, управлять свойствами и величиной показателей анизотропии, добываясь их заданных значений. Примером может служить прогнозирование текстур рекристаллизации, исследование изменений стабильных и нестабильных ориентировок при прокатке алюминиевых сплавов, регулирование текстуры алюминиевого сплава при прокатке и термообработке. Это позволит устранить имеющиеся в технологических расчетах недостатки и создаст основу для управления процессами формообразования обтяжкой, повысив эффективность использования анизотропных листовых материалов за счет создания условий симметричной обтяжки.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой метод в кристаллографии применяют, когда хотят представить ориентировку отдельного кристалла?
2. Какие индексы используют для количественного описания кристаллографических плоскостей и направлений?
3. Какие кристаллографические параметры характеризуют текстуру прокатки?
4. Какому виду высокосимметричной текстуры свойственна совершенно одинаковая ориентировка всех кристаллов?
5. Предложите обозначение многокомпонентной текстуры.
6. Перечислите главные направления симметрии листовых материалов, получаемых при прокатке.

7. Какова взаимосвязь текстуры деформации и текстуры рекристаллизации?
8. Что понимается под названием «идеальная» ориентировка?
9. Что является первичным: кристаллографическая текстура или анизотропия физических свойств?
10. Назовите основные виды анизотропии листового материала.
11. Перечислите главные направления симметрии листовых материалов, получаемых при прокатке.
12. Как по пространственной эпюре какого-либо свойства отличить изотропный материал от анизотропного материала?
13. Какими свойствами обладают ортогонально-анизотропный материал и трансверсально-изотропный материал?
14. Расшифруйте реологическую сущность деформируемого материала.
15. Назовите самую неустойчивую при комнатной температуре структуру в термически упрочняемых алюминиевых сплавах.

2. СОЗДАНИЕ УСЛОВИЙ СИММЕТРИЧНОЙ ОБТЯЖКИ С УЧЕТОМ ПЕРЕХОДА ОТ ВНЕШНИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ОБВОДОВ К ПОВЕРХНОСТИ ОБОЛОЧКИ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ

Обшивкой называется наружный листовый элемент оболочки летательного аппарата, служащий для придания определенной, например обтекаемой формы, и участвующий в восприятии действующей аэродинамической нагрузки ЛА. Обшивки, применяемые в летательных аппаратах, относятся к категории тонких оболочек, но изготавливаются из достаточно жесткого и прочного листового материала; они могут сопротивляться нормальным и касательным силам и работать на все виды нагрузки. В настоящее время при проектировании и расчете тонких оболочек детали обшивок учитывают как несущий силовой элемент конструкции. Как правило, в этой конструкции тонкостенная часть подкреплена ребрами в одном или двух направлениях (стрингера и шпангоуты силового набора ЛА) и имеют разнообразные люки, утолщения, подкрепления краев. Тонкостенная часть имеет порой весьма сложную форму, например двойную кривизну, представляя иногда комбинацию так или иначе сочлененных тонкостенных элементов.

К ним предъявляются высокие требования, особенно по качеству поверхности, по точности и форме их внешних обводов, получающихся после формообразующих операций. Иногда высокие требования предъявляются и к прочности обшивок при действии нагрузок в определенных направлениях аналогично изделиям из композиционного материала. Направленность определяет величину и характер анизотропии свойств листового проката.

Наиболее характерным свойством данного типа деталей является то, что обшивка является незамкнутой оболочкой. Таким образом, срединная поверхность, толщина стенки и граничный контур в совокупности определяют геометрию элемента оболочки. Однако тенденция увеличения габаритов и снижения массы летательного аппарата требует применения крупногабаритных обшивок. В результате незамкнутая оболочка теряет геометрическую форму уже под действием собственного веса, что характерно для тонких оболочек. При этом их несущая способность и прочность после агрегатной сборки определены только толщиной листовой заготовки. При проектировании деталей обшивок необходимо учитывать не только их способность удовлетворять эксплуатационные требования в изделии, но и их заготовки должны иметь высокие технологические свойства. Во-первых, листовые материалы должны обладать высокой технологической штампуемостью, то есть иметь высокую степень формоизменения, а во-вторых, должны обеспечить достаточную прочность самого изделия. В связи со склонностью преимущественного развития деформации по толщине при формообразовании обтяжкой алюминиевого листового материала изменение толщины листа по ТУ-2194-82 ограничивается 20 процентами от номинального размера h_0 и определяется прочностью обшивочной детали. Данное ограничение может сойти на нет, если разработать метод увеличения степени формоизменения при обтяжке, достигнутой практически за один переход без локализации деформации утонения и выравнивающей их значения в различных областях листовой заготовки.

Материалами для обшивок летательных аппаратов могут служить алюминий-магниево-магниево-титановые сплавы, композиционные и другие материалы (например, сплавы бериллия). Марка материала назначается конструктором исходя из суммы конструктивных, технологических и экономических требований. В настоящее время для обшивок корпусов наиболее употребительными материалами являются деформируемые алюминиевые сплавы термически не упрочняемые (АМг5М, АМг6М), термически упрочняемые (Д1Т, Д16т, В95Т) и деформируемые титановые сплавы (ОТ4, ВТ20, ВТ14,

ВТ16). Заготовки из этих материалов поставляются в виде листов толщиной от 1 до 5 мм. Класс применяемых материалов влияет на технологию изготовления обшивок, поэтому он может служить основанием для их классификации.

Наибольшее влияние на технологию изготовления обшивок оказывают форма и габариты обводов, в зависимости от этого рассмотрим две группы оболочек двойной кривизны двояковыпуклой формы: с постоянными радиусами по главным сечениям и с переменными радиусами по главным сечениям (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Классификация оболочек двойной кривизны:
а – оболочки с постоянными радиусами по главным сечениям;
б – оболочки с переменными радиусами по главным сечениям

Внешние поверхности аэродинамических обводов ЛА составлены из обшивок фюзеляжа, обтекателей, зализов, крыльев и воздухозаборника мотогондолы двигателей. Они представляют собой крупногабаритные и тонколистовые детали в основном из высокопрочных алюминиевых сплавов. Переход к большим скоростям и высотам полета вызывает необходимость применения титановых сплавов. Однако для ближнего и среднемагистрального самолета высокопрочные алюминиевые сплавы имеют до сих пор основное применение, например «Суперджет 100», который стал первым российским самолетом, получившим европейский сертификат EASA, и новейший российский самолет МС-21, разработанный корпорацией «Иркут».

Технологичность этих самолетов в значительной степени определяется рациональным выбором аэродинамических обводов и обеспечением высокой преемственности геометрических форм отдельных агрегатов и его обшивок для новых модификаций. Это должно

сократить количество и трудоемкость изготовления плазов и обводообразующей оснастки за счет повторного использования ранее изготовленной оснастки при выполнении процедуры пространственной увязки на электронных макетах (ЭМ), что лежит в основе бесплазовой увязки [9]. На первый взгляд такой современный метод, несмотря на многолетний опыт освоения CAD/CAM-систем, до сих пор не находит промышленного применения.

Во-первых, ЭМ содержат много ошибок, т.к. их разработка выполняется не конструкторами, а программистами, не участвующими в реальной процедуре пространственной увязки. Во-вторых, ЭМ практически не участвуют в процессах подготовки производства даже при изготовлении объемной обводообразующей оснастки, в том числе и обтяжных пуансонов, а также при разработке программного обеспечения для современных обтяжных прессов. Обводообразующая поверхность обтяжных пуансонов до сих пор выверяется на основе плазовой информации. В-третьих, несмотря на наличие ЭМ контур обшивки вычленяется конструктором в координатных плоскостях самолета. Поэтому изменения, вносимые технологом при проектировании обтяжных пуансонов и при отработке технологичности процесса формообразования обтяжкой, например в условиях ее симметрии относительно плоскостей симметрии обтяжного пресса, не могут быть внесены в ЭМ.

В настоящее время уже сформулированы основные принципы бесплазовой подготовки производства, где ЭМ будет играть ключевую роль как эталон хранения геометрической информации об изделии и являться средством пространственной увязки сопрягаемых элементов конструкции. Однако содержащаяся в ЭМ часть геометрической информации, так, например, геометрия обшивок не используется для решения конкретной технологической задачи формообразования ее обтяжкой, т.к. геометрия оболочки после ее изготовления отличается от геометрии обшивки для выполнения сборки агрегата. Кроме того, применение современных обтяжных прессов с программным управлением на этом этапе производства не решает указанную проблему, а требует переоснащение всех этапов, включая изготовление обтяжных

пуансонов и другой объемной обводообразующей оснастки, а также сборку агрегатов программно-управляемым оборудованием.

Прежде всего, к обшивкам предъявляются повышенные требования по качеству аэродинамических обводов. Это зависит от форм агрегатов самого планера и точности пространственной увязки их конструкций. Объемная обводообразующая оснастка, в том числе и обтяжные пуансоны, напрямую связаны с аэродинамическими обводами агрегатов планера. Особое место занимают процессы разметки, взаимоувязки, точного позиционирования, контроля геометрической формы и взаимного положения в пространстве элементов, конструкций и агрегатов, образующих аэродинамические обводы изделия в целом и которые сами, например обшивки, являются сложными крупногабаритными пространственными объектами малой жесткости. Контроль объемной обводообразующей оснастки, включающей эталоны поверхности, контрэталоны, базовые эталоны, обтяжные пуансоны, контрольные плазы и т.д., заключается, в общем случае, в определении отдельных точек поверхности или контура и последующего сравнения полученных значений с заданными величинами.

Так как аэродинамические обводы задаются аналитически, применение независимого метода позволяет изготовить объемную обводообразующую оснастку на станках с ЧПУ, управляющая информация для которых должна рассчитываться с помощью ЭВМ на основе математической модели поверхности, полученной с помощью аналитически заданных теоретических контуров аэродинамических обводов агрегатов самолета. При этом процедура увязки по отдельным сечениям на плазах уже заменяется процедурами пространственной увязки на ЭМ.

Однако уже существуют современные методы, позволяющие описывать на ЭВМ любые контуры и строить любые изопараметрические линии, например, строить сетки сопряженных, ортогональных, асимптотических, геодезических, в том числе новую сетку кривизн поверхности. Все эти сетки связаны с определенными свойствами поверхности. Только последняя сетка поверхности связана с возможностью определения ее локальной формы в полюсе

поверхности обтяжного пуансона, причем в главных осях, и использования ее при создании программ-интерполяторов для многокоординатных станков с программным управлением. Полученные геометрические параметры и уравнения траекторий перемещения фрезы легли в основу для разработки программ обработки поверхностей обтяжных металлических пуансонов из вторичного алюминия. При этом поверхность определяется пространственным уравнением положения точек линии второго порядка, а условия обработки – по шести координатам с дуговой межстрочной аппроксимацией [10].

Применение средств ЧПУ и ЭВМ для автоматизированного независимого изготовления отдельных элементов объемной обводообразующей оснастки привело к необходимости перехода от классического плазово-шаблонного метода к бесплазовому методу производства, который по своей структуре и техническим средствам будет представлять более высокую ступень в области технологической подготовки. Обмен электронными данными должен осуществляться в едином информационном пространстве. Создание такого пространства декларирует принцип стандартизации геометрических данных объекта проектирования в рамках концепции CALS-технологии в авиационной промышленности [11].

Однако традиционная технология разработки геометрии объекта проектирования основана на построении семейства продольных и поперечных линий, принадлежащих поверхности этого объекта. Линии могут быть как плоскими, так и пространственными и задаваться множеством точек. По этим точкам проводится кривая, вычисленная одним из методов одномерной интерполяции. Набор продольных и поперечных линий представляет собой дискретный каркас поверхности. Промежутки между линиями каркаса заполняются методами двумерной интерполяции. Эти линии обязаны соответствовать теоретическим контурам аэродинамических обводов агрегатов планера, построенных в пространственной системе координатных плоскостей самолета. Относительно координатных плоскостей самолета производят и пространственную увязку поверхности аэродинамических обводов летательного аппарата.

Качественное выполнение геометрии и точности внешних поверхностей в значительной мере определяют возможность получения для самолета проектных летно-технических характеристик. При этом уровень взаимозаменяемости все равно будет определяться качеством принимаемых технологических решений при изготовлении деталей оболочек двойной кривизны, поверхность которых может быть привязана как к новой сетке кривизн, так и к системе координатных плоскостей самолета. При реализации пятикоординатной обработки поверхностей обтяжных металлических пуансонов из вторичного алюминия применяют сетку кривизн.

Программа предусматривает расчет локальных параметров обрабатываемой поверхности: опорных точек траектории обработки, координат нормали к образующей, пересчет величин в систему координат станка с ЧПУ, расчет траектории движения фрезы. Другими словами, определяется положение исполнительных органов станка, которые соответствуют каждой опорной точке траектории обработки: координаты x , y , z и две угловые координаты. Определенность траектории движения фрезы обеспечивается кинематической схемой обработки, которая определяет закономерность относительного движения заготовки и инструмента. Оптимальные значения параметров кинематической схемы обработки учитывают форму и параметры обрабатываемой поверхности, а сама кинематическая схема становится логическим следствием функции поверхности, привязанной к новой сетке кривизн. Исследованием этих поверхностей занимается аналитическая геометрия трехмерного пространства [12].

Геометрия поверхности обработки и технологическая информация задаются в виде операторов исходных данных для системы автоматизированного проектирования. Во-первых, для получения графического изображения кривой и поверхности последовательно вычисляются координаты их точек, отвечающих определенным значениям параметра. Во-вторых, применение параметрических методов значительно упрощает вычисление кривых, связанных со смещением торцевой фрезы и других подобных кривых в задачах числового управления металлорежущего станка. Для вычисления смещения

торцевой фрезы в трехмерном пространстве необходимо знать положение нормали к любой точке участка поверхности двойной кривизны, который подлежит построчной обработке. Метод определения положения нормали в любой точке для обработки строки поверхности обтяжного пуансона с помощью двух ортогональных плоскостей F_1 и F_2 , представлен на рис. 2.2.

Для исключения подрезов поверхности обработку каждой строки ведут в направлении линии наибольшей кривизны. Благодаря вращению инструмента в сочетании с его программным перемещением в плоскости F_2 , появляется возможность обеспечения гладкости на границах строк путем полного сопряжения радиусов.

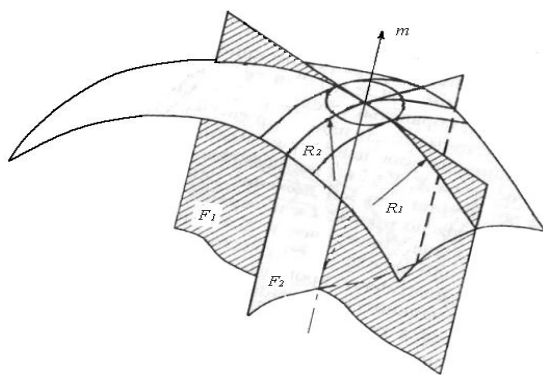


Рис. 2.2. Метод определения положения нормали для обработки строки поверхности обтяжного пуансона с помощью ортогональных плоскостей F_1 и F_2

Хотя в последнее время в машинный язык, предназначенный для программирования механообрабатывающих станков с ЧПУ, были введены средства параметрического определения поверхностей через гауссовы координаты α и β , но установка полученных обтяжных пуансонов на стол обтяжного пресса остается традиционной, т.е. положение формообразующего контура не совмещено с вертикальной плоскостью симметрии F_1 .

Для симметричного представления поверхности оболочки двойной кривизны будем применять гауссовы координаты в виде

угловых параметров α и β , а ортогональные плоскости F_1 и F_2 , устанавливающие на рис. 2.2 положение нормали для обработки строки поверхности обтяжного пуансона, перенесем для его размещения на столе прессы. При этом обтяжной пуансон разместим на столе прессы так, чтобы положение формообразующего контура поверхности было совмещено с вертикальной плоскостью F_1 , а сама плоскость F_1 пройдет через середину центральной зажимной губки обтяжного прессы. Вторая вертикальная плоскость F_2 , ортогональная первой, содержит положение контура центрального поперечного сечения, пересекающего формообразующий контур в «полюсе» поверхности оболочки двойной кривизны. В результате такой привязки ортогональные плоскости F_1 и F_2 переходят в вертикальные плоскости симметрии обтяжного прессы, определяющие положение нормали в «полюсе» поверхности оболочки двойной кривизны, обозначенной на рис. 2.3–2.4 точкой O , которая в системе координат x, y, z обтяжного прессы будет расположена на вертикальной оси z .

Это позволит определять дифференциальные и геометрические параметры в точке пересечения двух плоских линий, задающих поверхность оболочки в координатах обтяжного прессы x, y, z (рис. 2.3). Увязка данных систем координат обеспечивается через радиус точки пересечения двух плоских линий: $r(x, y, z)$. Координаты узлов в новой сетке вычисляются при известных значениях параметров α и β , а производные в форме касательных:

$$\dot{r}_\alpha = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) \text{ и } \dot{r}_\beta = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}). \quad (2.1)$$

Вектор нормали m представляет собой единичный вектор к узлу новой сетки поверхности и вычисляется по известным из (2.1) значениям касательных в виде

$$m = \frac{\dot{r}_\alpha \times \dot{r}_\beta}{\|\dot{r}_\alpha \times \dot{r}_\beta\|}, \quad (2.2)$$

где обозначение вида $\|\dots\|$ представляет собой норму вектора.

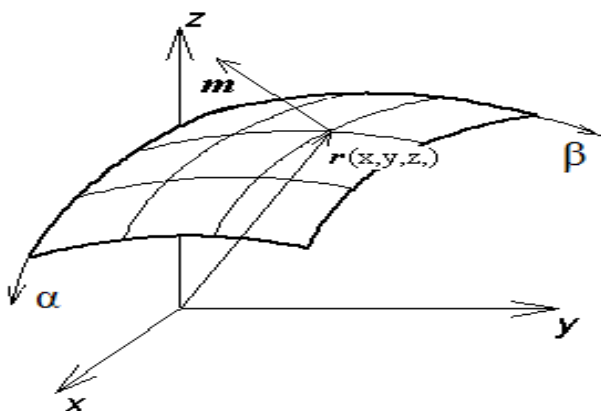


Рис. 2.3. Параметрическое представление поверхности с помощью гауссовых параметров α и β

Имея узловые параметры (2.1) и (2.2), уже можно построить эффективные алгоритмы для приведения поверхности к линиям кривизн. На практике при построении дискретного каркаса стремятся к определению одного из семейств плоских линий поверхности. Как правило, это набор поперечных сечений. Второе семейство определяется кинематическим способом как семейство равнодолевых линий. Кинематический способ формирования поверхности двойной кривизны состоит в определении однопараметрического семейства кривых, образующих требуемую поверхность.

Если имеем дело с семейством прямых, образующих, например, однолинейчатые поверхности, то одна из кривизн, в нашем случае k_2 , равна нулю, гауссова кривизна K во всех точках тоже равна нулю и поверхность является развешивающей, т.е. она может быть развернута в плоскость. Для поверхности оболочки двояковыпуклой формы ($K > 0$), согласно условию $K = |k_1 \cdot k_2| = \max$, можно установить положение образующей, проходящей через «полюс» незамкнутой оболочки, обозначенной на рис. 2.3–2.4 точкой O , которая в системе координат x, y, z обтяжного пресса будет расположена на вертикальной оси z . Тогда радиусы кривизн пересекающихся линий в этой

точке R_1 и R_2 будут соответствовать главным направлениям поверхности x_0 и y_0 , лежащим в касательной плоскости к поверхности обтяжного пуансона параллельной горизонтальной плоскости стола.

Образующая поверхности перемещается вдоль некоторой направляющей, а поверхность задается уравнением

$$r(\alpha, \beta) = r(\alpha) \cdot [T(\beta)], \quad (2.3)$$

где $r(\alpha)$ – параметрическое уравнение образующей; $T(\beta)$ – означает преобразование образующей $r(\alpha)$ и определяет закономерность изменения величины прогиба в процессе перемещения образующей вдоль направляющей.

В нашем случае прогиб образующей в процессе перемещения может изменяться, а величина прогиба в плоскости F_2 , определяет контур центрального поперечного сечения поверхности оболочки двойной кривизны. Наибольший прогиб должен находиться в центральном поперечном сечении, контур которого проходит через точку O . В этом случае угол дуги линии отсчитывается от точки O , тогда будем иметь:

$$|\dot{r}(\alpha)| = 1; |\ddot{r}(\alpha)| = k_1; |\dot{r}(\beta)| = 1; |\ddot{r}(\beta)| = k_2, \quad (2.4)$$

где k_1 и k_2 – главные кривизны линий по главным направлениям поверхности x_0 и y_0 , лежащим в касательной плоскости.

Такое рассмотрение поверхности оболочки двойной кривизны не противоречит, а облегчает поиск главных направлений x_0 и y_0 и кривизн k_1 и k_2 в точке O рассматриваемой поверхности оболочки двойной кривизны. На рис. 2.3,а и 2.4,а показаны поверхности оболочек двойной кривизны пологой и двояковыпуклой форм. Положения вертикальных плоскостей F_1 и F_2 определяют точку O центрального поперечного сечения (рис. 2.4,а и 2.5,а) и они в этом положении являются вертикальными плоскостями симметрии поверхности обтяжного пуансона. При пересечении с поверхностью оболочки они дают формообразующий продольный контур в

направлении обтяжки (рис. 2.4,б и 2.5,б) и центральный поперечный контур (рис. 2.4,в и 2.5,в). Формообразующий продольный контур и центральный поперечный контур ортогональны друг к другу в точке O , которую можно считать «полюсом» приведенных поверхностей, в окрестности которой будет близка некоторая осесимметричная поверхность второго порядка, позволяющая ввести цилиндрическую систему координат.

Для определения геометрических параметров оболочек двойной кривизны направление при обтяжке совместим с одной из вертикальных плоскостей симметрии F_1 , которая определяет положение формообразующего контура поверхности оболочки, проходящего через точку O . Вторая вертикальная плоскость симметрии F_2 , ортогональная первой, определяет положение контура центрального поперечного сечения, пересекающего формообразующий контур в точке O .

Для центрального поперечного сечения установили цилиндрическую систему координат: r , β и «мнимую» ось вращения $c-c$ данного контура. Тогда к числу основных геометрических параметров оболочки двойной кривизны отнесем:

- радиусы кривизны контуров сечений поверхности вертикальными плоскостями симметрии F_1 и F_2 в точке O : R_1 (продольный) и R_2 (поперечный);
- длина контура продольного сечения поверхности $2L$ вертикальной плоскостью симметрии F_1 ;
- длина контура краевого сечения поверхности $2l_k$ плоскостью, параллельной F_1 ;
- прогиб контура центрального поперечного сечения f_o в вертикальной плоскости симметрии поверхности F_2 ;
- продольный $2\alpha_k$ и поперечный $2\beta_k$ углы формообразующих контуров сечений поверхности вертикальными плоскостями симметрии F_1 и F_2 обтяжного пуансона;
- величина a , равная $(R_1 - R_2)$ на рис. 2.4 и $(R_2 - R_1)$ на рис. 2.5;
- ширина оболочки $2B$.

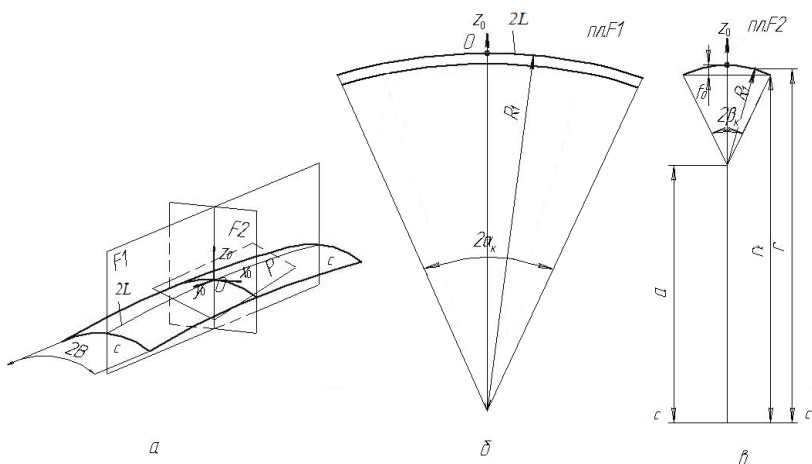


Рис. 2.4. «Пологая» оболочка двояковыпуклой формы, характеризующаяся следующими значениями $L/B \geq 10$ и $2\alpha_{\kappa} \leq 60^\circ$:
 а – поверхность оболочки двойной кривизны; б – формообразующий продольный контур; в – центральный поперечный контур

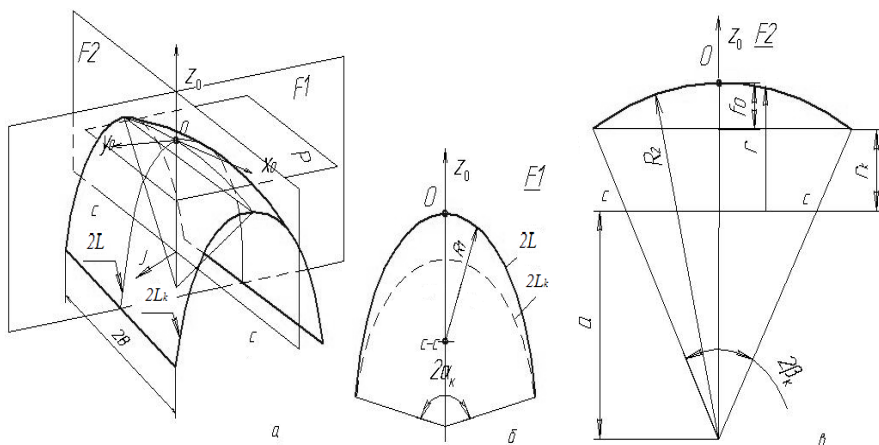


Рис. 2.5. «Крутая» оболочка двояковыпуклой формы, характеризующаяся следующими значениями $L/B \leq 1,0$ и $2\alpha_{\kappa} > 120^\circ$:
 а – поверхность оболочки двойной кривизны; б – формообразующий продольный контур; в – центральный поперечный контур

Контуры сечений поверхности оболочки вертикальными плоскостями симметрии F_1 и F_2 представляют собой плоские кривые, пересекающиеся в точке O с радиусами R_1 и R_2 . Величины, обратные радиусам:

$$k_1 = \frac{1}{R_1}; k_2 = \frac{1}{R_2}, \quad (2.5)$$

являются кривизнами этих линий на поверхности в точке O , обладающими свойствами экстремальности: одна из них максимальная, а другая – минимальная. При этом произведение значений кривизн определяет гауссову кривизну K в точке O . Направления касательных к этим линиям поверхности оболочки в точке O определяют главные направления x_o и y_o , лежащие одновременно в касательной плоскости и в плоскостях симметрии F_1 и F_2 .

Тогда геометрическая форма оболочки двойной кривизны будет локально характеризоваться в точке O величиной гауссовой кривизны: пологая форма с малой гауссовой кривизной и двояковыпуклая форма с большей гауссовой кривизной. Если гауссова кривизна во всех точках поверхности, в том числе и в точке O , принимает постоянное значение, то оболочка является геометрически однородной, например, оболочки полой формы.

Остальные оболочки являются геометрически неоднородными, а гауссова кривизна в большинстве имеет максимальное значение в одной из точек контура центрального поперечного сечения поверхности плоскостью F_2 (рис. 2.5). В системе координат главных направлений x_o и y_o , лежащих в касательной плоскости, поверхность оболочки в окрестности точки O можно представить в виде функции:

$$z_o = \frac{1}{2} \cdot (k_1 \cdot x_o^2 + k_2 \cdot y_o^2). \quad (2.6)$$

Явная форма задания поверхности в виде (2.6) используется для нахождения характерных свойств поверхности оболочки. Подобно тому, как в бесконечной близости к точке кривой близка некоторая окружность, так и к поверхности оболочки в окрестности точки O

будет близка некоторая квадратичная поверхность второго порядка (2.6). К ней можно отнести тороидоидальную или эллипсоидную поверхности.

Обтяжка относится к формообразующим операциям, связанным с увеличением площади листовой заготовки за счет приложения растягивающих нагрузок к листу в двух направлениях со стороны зажимных устройств обтяжного пресса. Ограничивающими факторами являются неравномерное растяжение из-за влияния сил трения и сдвиговые деформации из-за сложной формы оболочки двойной кривизны. Если неравномерное растяжение является причиной недопустимой локализации деформации листовой заготовки, то сложная форма оболочки двойной кривизны приводит к сдвиговым деформациям, приводящим к образованию складок и неконтролируемому процессу формообразования обтяжкой.

Рассмотренный метод параметрического представления поверхности через гауссовы координаты α и β , позволит обеспечить напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе обтяжки в главных напряжениях и деформациях только при условии, что направление обтяжки будет совмещено с вертикальной плоскостью симметрии F_1 поверхности обтяжного пуансона. Для этого достаточно обеспечить перпендикулярность плоскости, в которой лежит центральная зажимная губка обтяжного пресса, к касательной в точке схода формообразующего контура обтяжного пуансона и постоянное положение этого контура в вертикальной плоскости симметрии F_1 (рис.2.6).

Однако существующие обтяжные пуансоны невозможно установить на стол обтяжного пресса так, чтобы совместить направление растяжения листовой заготовки с вертикальной плоскостью симметрии F_1 поверхности обтяжного пуансона. На рис. 2.6 показано положение прямоугольного контура основания обтяжного пуансона относительно поверхности обводообразующей обшивки. Установка основания обтяжного пуансона на стол пресса должна обеспечить постоянное положение формообразующего контура в вертикальной плоскости симметрии F_1 .

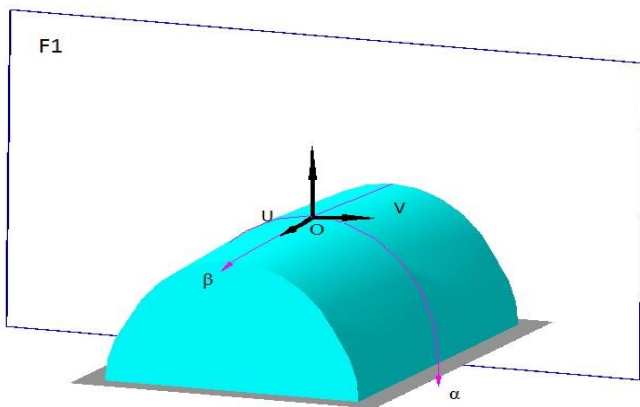


Рис. 2.6. Положение прямоугольного контура основания обтяжного пуансона относительно поверхности обшивки, обеспечивающее постоянное положение формообразующего контура в вертикальной плоскости симметрии F_1

Независимо от выбранного метода проектирования обтяжного пуансона необходимо иметь в памяти ЭВМ численные данные, описывающие обводообразующую поверхность в выбранной системе координат. На современном этапе при таком подходе электронный макет поверхности остается средством, дублирующим хранение численных данных об изделии. Другими словами, применение информационных технологий позволит в результате расчетов не только подбирать аналитические контуры поверхности оболочки, но и сравнивать их с исходным набором данных. Среди бесконечного множества различных линий поверхности оболочки имеются характеристические линии кривизн, обладающие особо важными свойствами [13]. Выбор новой сетки линий упрощает переход к безмоментной теории оболочек, где влияние изгибающих моментов, а также поперечных сил на напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе формообразования обтяжкой пренебрежительно мало.

Точность формы оболочки двойной кривизны обеспечивается точностью поверхности обтяжного пуансона и ее геометрических параметров, подлежащих контролю, а допустимое растяжение при формообразовании обтяжкой во многом определяется характером процесса формоизменения листового материала и кинематической схемой процесса, обеспечивая условия симметричной обтяжки в главных напряжениях и деформациях. Кроме того, параметрическое описание поверхности определяет внутреннюю метрику поверхности оболочки в точке O как меру близости к заданной поверхности соответствующей соприкасающейся квадратичной поверхности второго порядка.

Гауссова кривизна поверхности считается инвариантом тензора кривизн плоских линий, проходящих через точку O , и сохраняет свое значение при изгибании. Такая деформация называется изометрическим изгибанием, при которой длины нанесенных на поверхности оболочки линий и углы между ними сохраняются. Изменяется только геометрическая форма оболочки двойной кривизны, но ее поверхность остается изометрически подобной поверхности до изгибания. Поэтому гауссову кривизну можно называть просто кривизной поверхности, а приведение поверхности оболочки к двум плоским линиям кривизн, проходящих через точку O , было предложено в качестве идентификации формы оболочек двойной кривизны согласно функции (2.6)

Автоматизация расчетов и преобразование геометрических параметров в цифровую информацию позволяют применить обработку обтяжных пуансонов на станках с ЧПУ. Однако это не решает проблему целиком, необходимо обеспечить регламентируемый допуск на уровень неравномерного растяжения листовой заготовки при формообразовании обтяжкой, определяемый недопустимой величиной локализации деформации. Все это предъявляет новые требования к листовым материалам и технологии производства оболочек двойной кривизны и приводит к необходимости разработки новых способов, обеспечивающих устойчивое управление процессами формообразования обтяжкой при равномерном изменении толщины в

различных областях листовой заготовки без складок и разрыва в оболочку минимальной разнотолщинности.

Вопросы для самоконтроля

1. Что общего между обшивкой ЛА и оболочкой двойной кривизны?
2. Какое влияние на технологию изготовления обшивок оказывают форма и габариты обводов ЛА?
3. Какую роль выполняют электронные макеты при выполнении процедуры пространственной увязки геометрических форм отдельных агрегатов и обшивок ЛА?
4. Как привязать поверхность обтяжного пуансона при его установке на стол пресса?
5. Какие координаты применяются для симметричного представления поверхности оболочки двойной кривизны?
6. Поясните процедуру кинематического способа формирования поверхности двойной кривизны.
7. Назовите параметр, который локально характеризует геометрическую форму оболочки двойной кривизны.
8. Какая деформация называется изометрическим изгибанием поверхности?
9. Какие условия симметричной обтяжки выполняет метод параметрического представления поверхности двойной кривизны через гауссовы координаты?
10. Какие возможности имеют информационные технологии при автоматизации расчетов и преобразовании геометрических параметров?

3. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ УСЛОВИЙ СИММЕТРИЧНОЙ ОБТЯЖКИ

Сущность процесса обтяжки заключается в том, что плоская листовая заготовка превращается в пространственную деталь под воздействием растягивающих усилий, расположенных с двух её противоположных концов. Деталь деформируется, плотно прилегая к поверхности обтяжного пуансона и принимая форму этой поверхности. Основным условием получения детали требуемых размеров является растяжение всех сечений заготовки до состояния пластичности.

Обтяжка относится к формообразующим операциям, связанным с увеличением площади листовой заготовки с последующей локализацией растяжения в опасном сечении детали, в результате листовая заготовка быстро утоняется и разрушается, что и является причиной высокого брака и больших технологических отходов. Причиной локализации растяжения листовой заготовки является, прежде всего, неравномерность деформации из-за влияния сил трения и сложной формы оболочки. Чаще всего локализация растяжения при обтяжке происходит на участке схода листовой заготовки с пуансона перед зажимными устройствами обтяжного пресса. При этом утонение листовой заготовки, возникающее при обтяжке, не зависит от самой схемы обтяжки, а зависит от условий трения, толщины, характера анизотропии, деформационных характеристик листового проката и ее термообработки.

Для обеспечения монотонности деформации формообразование листовой заготовки необходимо проводить в условиях симметричной обтяжки без ее локализации в части листовой заготовки, расположенной между краем обтяжного пуансона и зажимными губками пресса. Растяжение листовой заготовки при формообразовании об-

тяжкой различается не только величиной усилий, но и областью их приложения по краю заготовки. При этом зона пластической деформации на листовой заготовке очерчивается только с одной стороны в направлении растяжения, а второй, неявной границей, является переход между зонами пластической и упругой деформации, которую устанавливают расчетным или опытным путем на основе анализа физической сущности процесса.

Направления перемещения границы зоны пластической деформации можно изменить, например, при формообразовании обтяжкой оболочки двояковыпуклой формы. Сначала с центральной части заготовки от точки O на боковые кромки, а затем, наоборот, с боковых кромок заготовки к точке O , обеспечивая одинаковое растяжение при наложении двух деформационных полей. Это реализуется отдельно в двух последовательных операциях: предварительная обтяжка и повторная обтяжка. Для этого предлагается разгрузить оболочку после предварительной обтяжки и, не освобождая ее из зажимов пресса, осуществить ее разгибание с разверткой поверхности оболочки на определенный угол α_p , приводящий к получению изометрической формы ее поверхности по отношению к поверхности обтяжного пуансона. Гауссова кривизна при разгибании поверхности тонколистовой оболочки в свободном состоянии сохраняет свое значение, а главные кривизны плоских линий в точке O будут закономерно меняться.

Повторная обтяжка оболочки в новом положении относительно обтяжного пуансона с угла α_p обеспечивает растяжение боковых практически недеформируемых участков листовой заготовки, которые только касаются поверхности обтяжного пуансона. В результате растяжения боковые участки листовой заготовки начинают прилегать к поверхности обтяжного пуансона.

Характер развития зоны пластической (стадии 1-4) деформации показан на рисунках с видом на центральное поперечное сечение оболочки двойной кривизны: рис. 3.1 – предварительная обтяжка оболочки двояковыпуклой формы после полного оборачивания обтяжного пуансона листовой заготовкой на угол α_k ; рис. 3.2 – повторная обтяжка оболочки двояковыпуклой формы после ее разгиба на угол α_p .

Приведенные схемы формообразования обтяжкой связаны с тем, что усилие растяжения, приложенное к прямолинейным зажимам, воспринимается заготовкой по всей ширине. Данная особенность оказывает влияние на характер зоны пластической деформации. Усилие концентрируется в зоне центрального поперечного сечения обтяжного пуансона в точках касания его с заготовкой элемента шириной $2\Delta b$. Учитывая, что $2\Delta b < 2B$, можно утверждать, что, несмотря на влияние внешнего трения, пластическая деформация на заготовке зародится и начнет опережающее развитие в зоне центрального поперечного сечения обтяжного пуансона, а не на сходе заготовки с него. Это начало этапа формообразующей деформации средней части листовой заготовки в районе максимального поперечного сечения.

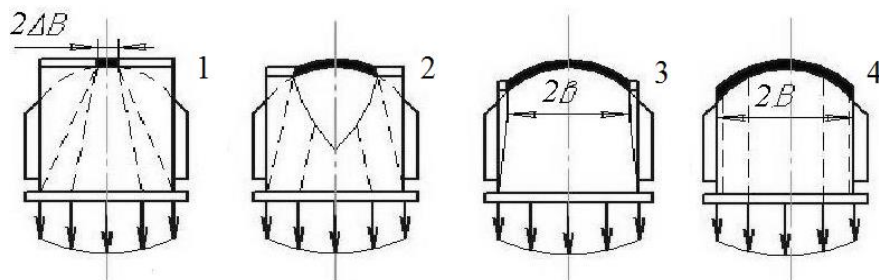


Рис. 3.1. Предварительная обтяжка оболочки двояковыпуклой формы после полного оборачивания обтяжного пуансона листовой заготовкой на угол α_k

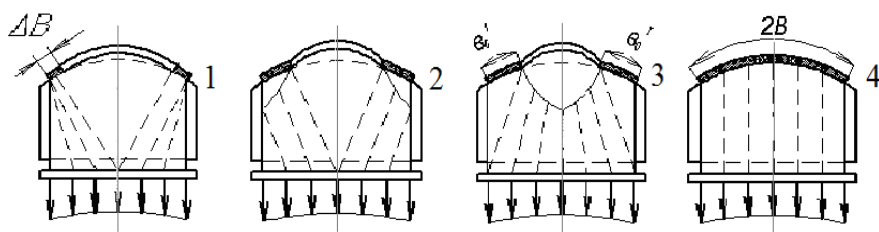


Рис. 3.2. Повторная обтяжка оболочки двояковыпуклой формы после ее разгиба на угол α_p

Формообразование заготовки будет развиваться в соответствии со схемами, приведенными на рис. 3.1-3.2. По мере увеличения ширины очага деформации от $2\Delta b$ до $2b'_0$ наступит момент, когда усилие в сечении на сходе с обтяжного пуансона вызовет пластическую деформацию. Дальнейшее формообразование будет сопровождаться избыточными деформациями в сечении на сходе с обтяжного пуансона. Приведенные схемы показывают на то, что при обтяжке формообразование в различных поперечных сечениях заканчивается неодновременно. При этом процесс формообразования в одних сечениях ближе к центральному поперечному сечению сопровождается избыточным деформированием других уже отформованных поперечных сечений.

Для сохранения безмоментного состояния оболочки необходимо предотвратить появления изгибов срединной поверхности за счет приложения внешних усилий в тангенциальном направлении на участке схода листовой заготовки с поверхности обтяжного пуансона. Срединная поверхность, приведенная к вертикальным плоскостям симметрии и определяемая соответствующей параметризацией, обеспечит постоянное положение формообразующего контура в вертикальной плоскости симметрии F_1 и перпендикулярность плоскости, в которой лежит центральная зажимная губка обтяжного пресса, к касательной в точке схода формообразующего контура обтяжного пуансона.

Срединная поверхность обводообразующей оболочки как истинная плазовая поверхность должна быть гладкой, скачкообразных изменений радиусов и толщин не допускается. Чтобы поверхность не имела острых выступов или складок, частные производные до третьего порядка должны быть непрерывными. Даже при таком подходе сложность аналитической методики остается. Однако известно, что при осесимметричной деформации оболочек вращения дифференциальные уравнения равновесия упрощаются [14]. Во-первых, в одном уравнении исчезают члены, содержащие производные по α , а в другом – по β , а во-вторых, обращается в нуль сдвигающее напряжение τ .

Предлагается провести решение в условиях осевой симметрии для центрального поперечного сечения оболочки двойной кривизны, где

указанное сечение является образующей поверхности вращения. На рис. 3.3 показано положение оси вращения для тороидоидальной и эллипсоидной поверхности.

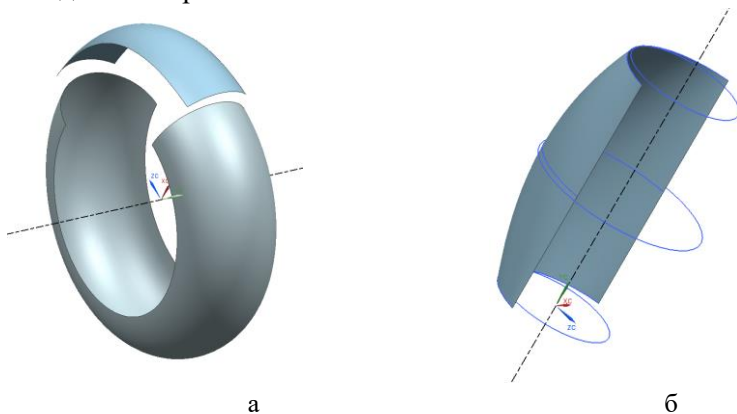


Рис. 3.3. Положение оси вращения для поверхности:
а – тороидоидальной ; б – эллипсоидной

Тогда дифференциальные уравнения равновесия элемента, расположенного в любом районе поверхности оболочки, в том числе и в районе центрального поперечного сечения, проходящего через точку O , безмоментной оболочки постоянной толщины примут вид:

в направлении линии α

$$\frac{d}{d\alpha} \cdot (A_2 \sigma_1) - \frac{dA_2}{d\alpha} \cdot \sigma_2 + \mu \cdot q \cdot A_1 A_2 = 0; \quad (3.1)$$

в направлении линии β

$$\frac{d}{d\beta} \cdot (A_1 \sigma_2) - \frac{dA_1}{d\beta} \cdot \sigma_1 + \mu \cdot q \cdot A_1 A_2 = 0; \quad (3.2)$$

в направлении нормали

$$\frac{\sigma_1}{A_1} + \frac{\sigma_2}{A_2} - q = 0. \quad (3.3)$$

Здесь коэффициенты Ламе A_1 и A_2 соответственно равны:

$$A_1 = \frac{r}{\cos \beta} \text{ и } A_2 = R_2, \quad (3.4)$$

где для выпуклой образующей:

$$r = \pm R_2 \cdot (\cos \beta - 1) + R_1, \quad (3.5)$$

(знак (+) относится к случаю, когда $R_1 < R_2$ (рис. 2.3), а знак (-) к случаю, когда $R_1 > R_2$ (рис. 2.4)).

Введем уравнение (3.3) в (3.1) и (3.2). Однако учитывая равенство числа уравнений равновесия (3.1) и (3.2) и числа неизвестных σ_1 и σ_2 , входящих в них, можно говорить о статической определенности напряжений в малом безмоментной оболочке постоянной толщины.

Так как в случае безмоментного состояния напряжения распределяются равномерно по толщине оболочки, можно принять допущение, что уменьшение толщины листовой заготовки при формообразовании обтяжкой происходит в рамках малого параметра. Тогда можно считать, что решение с постоянной толщиной соответствует нулевому решению. Нулевому решению соответствует и соотношение напряжений без учета изменения толщины листовой заготовки. Последующие решения, устанавливающие величину толщины с использованием нулевых решений для соотношения напряжений, соответствуют первому приближению. Опыт применения такого подхода в процессах симметричного деформирования показывает, что точность расчета толщины ограничивается, как правило, первым приближением.

При этом нельзя забывать, что точность расчета толщины зависит от принятых допущений в рамках технической теории оболочек. Кроме этого, точность зависит от вида функций, аппроксимирующих анизотропию, упрочнение и трение. Анизотропию листового материала характеризуют коэффициентами поперечной деформации (показателями анизотропии) μ_{ij} . Всего вдоль главных осей анизотропии можно определить шесть показателей μ_{ij} , из которых независимыми в нашем случае являются только два: μ_{12} и μ_{21} . Принимается ортотропный листовый материал, который характеризуется тремя осями ани-

зотропии. Ось 1 совпадает с направлением проката, ось 2 – поперек проката, ось 3 направлена по толщине. Кроме того, ось 1 совмещаем с направлением растяжения при обтяжке.

Для аппроксимации функции упрочнения материала при растяжении листовой заготовки используется степенная зависимость:

$$\sigma_1 = K_n e_1^n, \quad (3.6)$$

где e_1 – накапливаемая деформация растяжения;

K_n – приведенный коэффициент, учитывающий влияние напряженно-деформированного состояния и свойства анизотропного материала [43]:

$$K_n = \frac{K_1}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})^{0.5(n+1)}}, \quad (3.7)$$

где K_1 , n – показатели кривой упрочнения при линейном растяжении образца в направлении прокатки;

μ_{21} и μ_{12} – показатели анизотропии листовой заготовки.

Поэтому при определении механических свойств достаточно использовать образцы, вырезанные в одном направлении. Условие пластичности, представленное в линеаризованном виде, позволяет также учесть анизотропию:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_{0,2}, \quad (3.8)$$

где σ_3 – напряжение по толщине;

β – коэффициент Лоде, учитывающий среднее напряжение и анизотропию свойств;

$\sigma_{0,2}$ – напряжение текучести материала заготовки.

Так коэффициент Лоде в зависимости от схемы напряженного состояния и анизотропии материала определяется [15]:

$$\beta = \frac{2}{\sqrt{(v_\sigma^2 - 2v_\sigma D + C)}}, \quad (3.9)$$

где $\left[v_\sigma = 2 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1 \right]$ – показатель вида напряженного состояния;

$$D = 2\mu_{12} - 1;$$

$$C = \frac{\mu_{12} + 2\mu_{12}\mu_{21} + \mu_{21}}{\mu_{12} - 2\mu_{12}\mu_{21} + \mu_{21}}.$$

На разных стадиях растяжения элементы заготовки имеют различную скорость деформации. Можно в первом приближении считать, что скорости деформации по толщине e_3 не меняют своего знака и зависимость деформации e_3 от времени является линейной. Тогда скорость деформации можно заменить приращением деформации.

Необходимо ввести условие перехода упругого состояния материала в пластическое, т.е. введем условие пластичности (3.8), где σ_3 – напряжение в направлении толщины заготовки (из-за малости принимаем равной нулю).

В условиях осевой симметрии решение с уравнениями равновесия для оболочек разбивается на две независимые схемы: первая с уравнениями (3.2) и (3.8) – для центрального поперечного сечения, а вторая с уравнениями (3.1) и (3.8) – для формообразующего контура в направлении действия внешнего трения. Решение можно провести для оболочек двояковыпуклой формы (эллиптическая система уравнений) и получить выражение для соотношения напряжений $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = m$ в центральном поперечном сечении оболочки и координированных углами от $\beta = 0$ до $\beta = \beta_0$ в пределах границы пластической зоны деформации предварительной обтяжки (рис.3.1). Постоянная интегрирования C находится из условия: $\beta = \beta_0, \sigma_2 = 0$:

$$m_{(\alpha_1)} = \frac{R_2}{r} \left[e^{\mu(\beta-\beta_0)} (\cos \beta_0 + 2\mu \sin \beta_0) - (\cos \beta + 2\mu \sin \beta) \right]. \quad (3.10)$$

При повторной обтяжке оболочки после ее разгиба на угол α_p (рис. 3.2) и при угловом значении границы свободного края центрального поперечного сечения β_K постоянная интегрирования C находится из условия: $\beta = \beta_0, \sigma_2 = 0$:

$$m_{(\alpha_p)} = \frac{R_2}{r} \left[e^{\mu(\beta - \beta_K)} (\cos \beta_K + 2\mu \sin \beta_K) - (\cos \beta + 2\mu \sin \beta) \right]. \quad (3.11)$$

Предусматривается пошаговое формообразование при обтяжке листовой заготовки, определяемое при выбираемой малой стадии деформирования $(j-1, j)$. Тогда связь между приращениями деформаций e_1 и e_3 при пошаговом формообразовании для анизотропной заготовки запишется в виде

$$\Delta e_3^j = \Delta e_1^j \cdot \frac{1 + \mu_{21} \cdot m^j \cdot (1/\mu_{12} - 1) - \mu_{21}}{1 - \mu_{21} \cdot m^j}, \quad (3.12)$$

где $m^j = \frac{\sigma_2^j}{\sigma_1^j}$ – соотношение напряжения в точках, которые находятся в пределах границы пластической зоны деформации поперечного сечения на j -стадии шагового деформирования.

Приращение деформации Δe_1^j запишем в виде

$$\Delta e_1^j = \ln \left(\frac{r^j + \Delta r^j}{r^j} \right), \quad (3.13)$$

где Δr^j – перемещение элемента в направлении вектора r .

Тогда связь (3.12) может быть представлена в виде

$$\ln \frac{h^j}{h^{j-1}} = \ln \left(\frac{r^j + \Delta r^j}{r^j} \right) \frac{1 + \mu_{21} m^j (1/\mu_{12} - 1) - \mu_{21}}{1 - \mu_{21} m^j}, \quad (3.14)$$

где h^j, h^{j-1} – значения толщин на j и $j-1$ стадиях.

В первом приближении расчет по (3.14) ведется по значениям m^j , определяемым без учета изменения толщины заготовки. Тогда можно определить толщину из выражения:

$$h^j = h^{j-1} \left(\frac{r^j + \Delta r^j}{r^j} \right)^{\eta^j}, \quad (3.15)$$

$$\eta^j = \frac{1 + \mu_{21} \cdot m^j \cdot (1/\mu_{12} - 1) - \mu_{21}}{1 - \mu_{21} \cdot m^j}. \quad (3.16)$$

Предлагаемая схема формообразования обтяжкой оболочки двояковыпуклой формы была разделена на предварительную и повторную обтяжку. В процессах обтяжки, предусмотренных в этой последовательности, формообразование стараемся завершить до момента, когда размеры очага деформации сравняются с шириной заготовки. В любом поперечном сечении при расчете избыточных напряжений и деформаций принимается значение соотношения напряжений m_i^j в момент, когда пластическая зона деформации сравняются с шириной заготовки. Такое условие задается через напряжение $\sigma_{1i}^j = \beta_1 \cdot \sigma_{0,2}$ для всех i -х элементов.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему обтяжка относится к формообразующим операциям?
2. Какое условие необходимо для обеспечения монотонности деформации листовой заготовки при ее формообразовании обтяжкой?
3. Сформулируйте основной принцип при формообразовании обтяжкой.
4. Каким образом принцип осесимметричной деформации оболочек вращения был применен для открытой оболочки двойной кривизны?

5. Укажите местоположение оси вращения в условиях осевой симметрии для центрального поперечного сечения оболочки двойной кривизны.
6. Как выполняется в условиях осевой симметрии принцип безмоментного состояния оболочки двойной кривизны?
7. От каких факторов зависит точность расчета толщины оболочки двойной кривизны?
8. Каким образом в условиях осевой симметрии решение с уравнениями равновесия для оболочек разбивается на две независимые схемы?
9. По какой причине схема формообразования обтяжкой оболочки двояковыпуклой формы была разделена на предварительную и повторную обтяжку?

4. ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТ ТЕКСТУРЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И ПРЕДЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ОБТЯЖКИ

В работе [16] отмечено, что в листовом материале может быть спроектирована практически любая анизотропия свойств путем расчета и подбора соответствующих ориентировок $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ в составе компонент текстуры листового материала с реальными параметрами кристаллической решетки. Был введен обобщенный показатель текстурированного состояния η_{ij} , который записан следующим образом:

$$\eta_{12} = \frac{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2}{Q - \frac{1}{5}}, \quad \eta_{23} = 2 \frac{Q + \Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3}{Q - \frac{1}{5}}, \quad (4.1)$$

$$\eta_{31} = \frac{Q + \Delta_2 - \Delta_1 - \Delta_3}{Q - \frac{1}{5}},$$

где Q – характеристический параметр кристаллической решетки:

$$Q = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{3S'_{1111} - 3S'_{1122} - \frac{3}{2}S'_{2323}};$$

Δ_i – ориентационные факторы (параметры) текстуры:

$$\Delta_i = \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{(h_i^2 + k_i^2 + l_i^2)^2} \text{ или}$$

$$\Delta_i = \left\langle \alpha_{i1}^2 \alpha_{i2}^2 + \alpha_{i2}^2 \alpha_{i3}^2 + \alpha_{i3}^2 \alpha_{i1}^2 \right\rangle; \quad (4.2)$$

h_i, k_i, l_i – индексы Миллера, определяющие i -е направление в кристалле относительно системы координат, связанной с образцом;

α_{ij} – направляющие косинусы;

S'_{ijkl} – упругие константы монокристалла.

При анализе влияния параметров текстуры обшивочных листов из алюминиевых сплавов на возможность формообразования при обтяжке воспользуемся вариантом теории пластичности ортотропных сред, разработанным авторами [16], в основе которого лежит условие текучести Р. Мизеса:

$$f = \sigma_i^2 = \frac{1}{2} \{\sigma\}^T [K] \{\sigma\}, \quad (4.3)$$

где f – функция текучести; σ_i – обобщенное напряжение, представляющее собой совместный инвариант тензора напряжений и материального тензора (интенсивность напряжений); $\{\sigma\}$ – тензор (вектор-столбец) напряжений второго ранга с симметрией $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$; $\{\sigma\}^T$ – вектор-строка напряжений; $[K]$ – материальный тензор четвертого ранга, записанный в главных осях анизотропии ортотропного тела.

Для простоты и удобства анализа с учетом симметрии текстур уравнение пластичности (4.3) представлено в главных осях анизотропии в следующей форме:

$$f = \sigma_i^2 = \frac{1}{2} \{\sigma\}^T [K]^\Delta \{\sigma\}, \quad (4.4)$$

где $[K]^\Delta$ – материальный тензор, выраженный через константы кристаллической решетки и ориентационные факторы текстуры. Тогда компоненты материального тензора примут вид:

$$\begin{aligned} K_{1111} &= \eta_{12} + \eta_{31}, & K_{1122} &= -\eta_{12}, & K_{1212} &= \frac{5}{2} - \eta_{12}, \\ K_{2222} &= \eta_{12} + \eta_{23}, & K_{2233} &= -\eta_{23}, & K_{2323} &= \frac{5}{2} - \eta_{23}, \\ K_{3333} &= \eta_{23} + \eta_{31}, & K_{3311} &= -\eta_{31}, & K_{3131} &= \frac{5}{2} - \eta_{31}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

В развернутом виде выражение для интенсивности напряжений σ_i имеет вид:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31})\sigma_{11}^2 + (\eta_{12} + \eta_{23})\sigma_{22}^2 + (\eta_{23} + \eta_{31})\sigma_{33}^2 - 2(\eta_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + \eta_{23}\sigma_{22}\sigma_{33} + \eta_{31}\sigma_{33}\sigma_{11})} + 4 \left[\left(\frac{5}{2} - \eta_{12} \right) \sigma_{12}^2 + \left(\frac{5}{2} - \eta_{23} \right) \sigma_{23}^2 + \left(\frac{5}{2} - \eta_{31} \right) \sigma_{31}^2 \right] \quad (4.6)$$

или через разности нормальных напряжений:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\eta_{12}(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \eta_{23}(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + \eta_{31}(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2} + 4 \left[\left(\frac{5}{2} - \eta_{12} \right) \sigma_{12}^2 + \left(\frac{5}{2} - \eta_{23} \right) \sigma_{23}^2 + \left(\frac{5}{2} - \eta_{31} \right) \sigma_{31}^2 \right] \quad (4.7)$$

Для изотропной среды при $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1/5$ или $\eta_{12} = \eta_{23} = \eta_{31} = 1$ условие (4.7) преобразуется в критерий пластичности Губера-Мизеса [32]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)} \quad (4.8)$$

Таким образом, полученные на основе кристаллографического подхода в основные уравнения впервые введены параметры строения материалов, что позволяет провести анализ влияния как конкретной кристаллографической ориентировки $\{hkl\} \langle uvw \rangle$, так и их совокупности на пластическое течение металла и его преимущественное направление, а значит, оценить предельную степень деформации и другие параметры формообразования анизотропных материалов.

Одним из наиболее важных вопросов является вопрос об определении предельного формоизменения листовой заготовки при ее формообразовании обтяжкой. Допустимая степень деформирования при обтяжке зависит от структуры и химического состава сплава, характера напряженного состояния, но прежде всего от показателей анизотропии, которые должны иметь рациональные значения. В процессах формообразования обтяжкой анизотропных материалов могут возник-

кату неустойчивые состояния, которые приводят к появлению областей локализации (шеек), приводящих к локализации деформаций, недопустимых в деталях обшивок. Необходимо уметь определить те критические и допустимые деформации, при которых формоизменение обтяжкой анизотропного материала происходит устойчиво. Равновесие будет устойчивым, если изменение деформирующей силы вызывает малое изменение деформации. Потеря устойчивости определяется условием максимума деформирующих усилий [17].

Рассмотрим влияние ориентационных факторов текстуры на потерю устойчивости при характерном для обтяжки случае плоского напряженного состояния, двухосном растяжении ($\sigma_{33} = \sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$) на элемент анизотропного материала, приведенного к параметрам, обозначенным миллеровскими индексами $\langle uvw \rangle$ конкретной кристаллографической ориентировки (рис. 4.1). Поверхность этого элемента можем привязать к гауссовым угловым параметрам α и β и в условиях симметричной обтяжки направления параметрических координат элемента оболочки α и β (рис. 2.4) идентичны направлениям параметрических координат u и v элемента анизотропного материала (рис. 4.1).

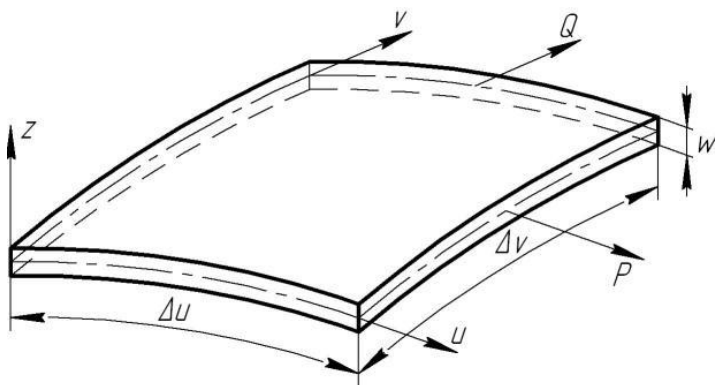


Рис. 4.1. Элемент анизотропной заготовки, находящейся в двухосном напряженном состоянии

Обозначив через P усилие, приложенное к элементу анизотропного материала и направленное по оси u , а через Q – усилие, действующее вдоль оси v , получим:

$$\begin{aligned} P &= \sigma_1 \Delta v w, \\ Q &= \sigma_2 \Delta u w. \end{aligned} \quad (4.9)$$

В процессе обтяжки эти усилия будут возрастать в результате упрочнения металла и уменьшаться вследствие уменьшения размеров элемента. Двухосное растяжение становится неустойчивым, когда одна из сил P или Q достигнет максимума. Условие устойчивости имеет вид

$$dP > 0, dQ > 0 \quad (4.10)$$

или после подстановки уравнений (4.9) в (4.10):

$$\begin{aligned} dP &= d\sigma_1 \Delta v w + \sigma_1 d(\Delta v) w + \sigma_1 \Delta v dw > 0, \\ dQ &= d\sigma_2 \Delta u w + \sigma_2 d(\Delta u) w + \sigma_2 \Delta u dw > 0. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Разделив каждое уравнение системы (4.11) на $\sigma_1 \Delta v w$ и $\sigma_2 \Delta u w$ соответственно, имеем:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\sigma_1}{\sigma_1} + \frac{d(\Delta v)}{\Delta v} + \frac{dw}{w} > 0 \\ \frac{d\sigma_2}{\sigma_2} + \frac{d(\Delta u)}{\Delta u} + \frac{dw}{w} > 0 \end{aligned} \right. \quad \text{или} \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{d\sigma_1}{\sigma_1} + d\varepsilon_2^p + d\varepsilon_3^p > 0, \\ \frac{d\sigma_2}{\sigma_2} + d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_3^p > 0, \end{aligned} \right. \quad (4.12)$$

где $d\varepsilon_1^p, d\varepsilon_2^p, d\varepsilon_3^p$ – приращения пластических деформаций элемента оболочки не в логарифмическом, а в относительном виде для элемента.

В момент потери устойчивости ширина элемента, через который передается усилие, является постоянной, т.е. образование шейки происходит в основном за счет деформации утонения $d\varepsilon_3^p$. Полагая на этом основании в первом и во втором неравенствах системы (4.12) $d(\Delta v) = 0$ и $d(\Delta u) = 0$, получим условие устойчивости:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_1}{\sigma_1} > -d\varepsilon_3^p, \\ \frac{d\sigma_2}{\sigma_2} > -d\varepsilon_3^p. \end{cases} \quad (4.13)$$

При анализе предельного формоизменения для случая плоского напряженного состояния за основу удобно взять показатель напряженного состояния, представляющий собой отношение главных напряжений σ_2 и σ_1 , обозначенное выше через m .

При простом нагружении отношение компонент напряжений в процессе деформирования не изменяется, т.е. $\frac{dm}{d\varepsilon_i} = 0$, т.к. между приращениями деформаций наблюдается линейная зависимость типа $d\varepsilon_1 = \text{const } d\varepsilon_2$. Она будет иметь место и при конечных деформациях, если ориентационные факторы текстуры Δ_i сохраняют свое значение, т.е. при $\frac{d\eta_{ij}}{d\varepsilon_i} = 0$. В результате можно получить единственное неравенство:

$$\frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{\eta_{23}m + \eta_{31}}{\sqrt{2}\sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31}) - 2\eta_{12}m + (\eta_{12} + \eta_{23})m^2}}. \quad (4.14)$$

Из выражения (4.14) определим зависимость критической деформации от параметров текстуры Δ_i и показателя напряженного состояния m . Известно, что зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций может быть аппроксимирована степенной функцией. Дифференцируя уравнение (3.6), найдем:

$$\frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = Cn\varepsilon_i^{n-1} = \frac{n}{\varepsilon_i}\sigma_i. \quad (4.15)$$

Подставляя зависимость (4.15) в систему (4.14), получим максимальное допустимое значение интенсивности деформаций, которая

может быть реализована в процессах формообразования обтяжкой анизотропного материала:

$$\varepsilon_i^{kp} = \sqrt{2} \frac{\sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31}) - 2\eta_{12}m + (\eta_{12} + \eta_{23})m^2}}{\eta_{23}m + \eta_{31}} n. \quad (4.16)$$

Условия симметричной обтяжки обеспечивают простое нагружение листовой заготовки за счет совмещения в процессе обтяжки главных осей анизотропии листовой заготовки с направлениями главных деформаций. Тогда выражения критических деформаций в главных направлениях примут вид:

$$\begin{aligned} (\varepsilon_1^p)^{kp} &= \frac{(\eta_{12} + \eta_{31}) - \eta_{12}m}{\eta_{23}m + \eta_{31}} n, \\ -(\varepsilon_2^p)^{kp} &= \frac{\eta_{12} - (\eta_{12} + \eta_{23})m}{\eta_{23}m + \eta_{31}} n, \\ -(\varepsilon_3^p)^{kp} &= n. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Из формул (4.16) и (4.17) видно, что способность анизотропного материала к пластическому формоизменению зависит не только от вида напряженного состояния m и модуля упрочнения n , но в значительной мере – от параметров кристаллической решетки Q и ориентационных факторов текстуры Δ_i , определяющих природу металла и степень его текстурирования. Другими словами, в отличие от формообразования изотропного листа при пластическом формоизменении анизотропных материалов можно добиться более высокой степени деформации по ширине за счет создания эффективного состава компонент текстуры и анизотропии свойств.

Кроме того, если значение $m = -\eta_{31}/\eta_{23}$, т.е. при определенной комбинации состава текстуры в (4.16) знаменатель будет равен нулю, процесс формообразования может продолжаться без локализации по толщине до полного исчерпания пластичности. С ростом «жесткости» схемы напряжений при увеличении m происходит уменьшение устойчивости процесса, следовательно, и величины допустимой

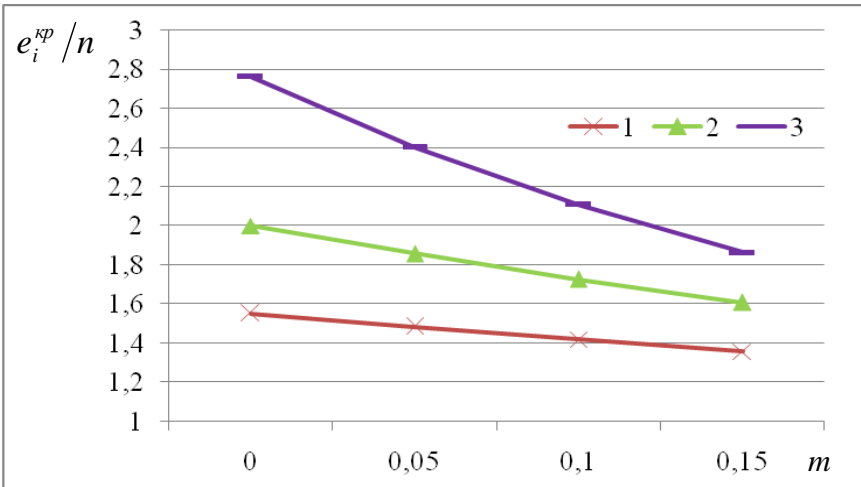
(критической) деформации. В табл. 4.1 приведены формулы для определения критических деформаций в зависимости от схем напряжений, характерных для процесса обтяжки. На рис. 4.2 показаны зависимости критических деформаций ε_i^{kp} от характера напряженного состояния m для различных идеальных кристаллографических ориентировок.

Например, для ориентировки $\{124\}\langle 211\rangle$ при $m=0,1$ величина критической деформации, показанная на кривой 3, составляет $\varepsilon_i^{kp} = 2,11n$, в то время как для изотропного металла (кривая 2) при тех же условиях эта величина равна $1,73n$. При других параметрах текстуры критическая деформация может оказаться меньшей, чем для изотропного металла (кривая 1).

Таблица 4.1. Формулы для определения критических деформаций в зависимости от схемы напряжений при обтяжке

m	ε_i^{kp}	$(\varepsilon_1^p)^{kp}$	$(\varepsilon_2^p)^{kp}$	$(\varepsilon_3^p)^{kp}$
0	$\frac{\sqrt{2} \sqrt{\eta_{12} + \eta_{31}}}{\eta_{31}} n$	$\frac{\eta_{12} + \eta_{31}}{\eta_{31}} n$	$-\frac{\eta_{12}}{\eta_{31}} n$	$-n$
0,05	$\sqrt{2} \frac{\sqrt{361\eta_{12} + \eta_{23} + 400\eta_{31}}}{\eta_{23} + 20\eta_{31}} n$	$\frac{19\eta_{12} + 20\eta_{31}}{\eta_{23} + 20\eta_{31}} n$	$-\frac{19\eta_{12} - \eta_{23}}{\eta_{23} + 20\eta_{31}} n$	$-n$
0,1	$\sqrt{2} \frac{\sqrt{81\eta_{12} + \eta_{23} + 100\eta_{31}}}{\eta_{23} + 10\eta_{31}} n$	$\frac{9\eta_{12} + 10\eta_{31}}{\eta_{23} + 10\eta_{31}} n$	$-\frac{9\eta_{12} - \eta_{23}}{\eta_{23} + 10\eta_{31}} n$	$-n$

Значения критических деформаций, вычисленные по формулам, приведенным в табл. 4.1, представляют собой их пределы, определяемые только устойчивостью процесса. Эти значения могут быть реализованы, если пластичность деформируемого материала будет достаточная.



1 – $\Delta_1 = 0,248, \Delta_2 = 0,333, \Delta_3 = 0,250$ ($\{011\} < 211 >$); 2 – $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0,2$ (изотропная среда); 3 – $\Delta_1 = 0,240, \Delta_2 = 0,103, \Delta_3 = 0,186$ ($\{124\} < 211 >$)

Рис 4.2. Зависимость критической деформации анизотропного листового металла от напряженного состояния и различных идеальных кристаллографических ориентировок параметров текстуры

Напряженно-деформированное состояние при формообразовании обтяжкой характеризуется плоской схемой по напряжениям ($\sigma_3 = 0$). При этом отношение двух других напряжений $m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, как показали эксперименты, обычно не превышает 0,15, т.е. схема напряженного состояния близка к линейной. Деформированное состояние – объемное. Деформация растяжения ε_1^p идет в основном за счет деформации утонения $-\varepsilon_3^p$, а в случае благоприятной анизотропии и за счет деформации сжатия $-\varepsilon_2^p$. Тогда из условия несжимаемости суммарная деформация растяжения увеличится:

$$\varepsilon_1^p = -\left(\varepsilon_2^p + \varepsilon_3^p\right). \quad (4.18)$$

Соотношение между деформациями ε_2^P и ε_3^P определяется как отношением напряжений σ_1 и σ_2 , так и параметрами η_{ij} , характеризующими константы кристаллической решетки Q и компоненты текстуры A_i деформируемой заготовки:

$$\frac{\varepsilon_2^P}{\varepsilon_3^P} = \frac{\eta_{12} - (\eta_{12} + \eta_{23})m}{\eta_{23}m + \eta_{31}}. \quad (4.19)$$

Отсюда следует, что для увеличения потребной деформации ε_1^P и снижения утонения ε_3^P необходимо увеличивать деформацию сужения ε_2^P , формируя в заготовке необходимый состав компонент текстуры.

Очевидно, что предельные возможности процесса обтяжки характеризуются таким видом потери устойчивости, т.е. чрезмерным утонением (деформацией по толщине листа ε_3^P), которое задается техническими условиями на поставку изделия (обычно не более 15-20%).

В качестве расчетного показателя используем геометрический коэффициент обтяжки $K_{обт}$, который связан с потребной деформацией в точке O для получения заданной формы оболочки $\varepsilon_{1_0}^P$ следующим соотношением:

$$K_{обт} = 1 + \varepsilon_{1_0}^P, \quad (4.20)$$

где $\varepsilon_{1_0}^P$ является потребной деформацией в точке O для получения заданной формы оболочки, которая в условиях осевой симметрии для центрального поперечного сечения (рис. 2.4,в и 2.5,в) запишется:

$$\varepsilon_{1_0}^P = \frac{f_0}{R_{10} - f_0}, \quad (4.21)$$

где f_o , R_{10} – прогиб и один из радиусов кривизн точки O в центральном поперечном сечении оболочки.

Однако с другой стороны из (4.18) и (4.19) при условии равномерного изменения толщины в различных областях листовой заготовки аналогично точке O получим

$$\varepsilon_1^p = -\frac{(\eta_{12} + \eta_{31}) - \eta_{12}m}{\eta_{23}m + \eta_{31}} \varepsilon_3^p. \quad (4.22)$$

Тогда, подставляя выражение (4.22) в (4.21), окончательно найдем:

$$K_{обм} = 1 - \frac{(\eta_{12} + \eta_{31}) - \eta_{12}m}{\eta_{23}m + \eta_{31}} \varepsilon_3^p. \quad (4.23)$$

Полученное соотношение (4.23) при фиксированных значениях механических свойств устанавливает взаимосвязь геометрических характеристик оболочки, утонения листового материала, параметров кристаллической решетки Q и текстуры Δ_i с напряженным состоянием m . Коэффициент обтяжки, рассчитанный по зависимости (4.23), ограничивается технологическими параметрами процесса обтяжки, а именно допустимой деформацией по толщине листа, определяемой исходя из эксплуатационных требований. Из анализа формулы (4.23) следует, что при одинаковом коэффициенте обтяжки у конкретной марки металла ($Q = const$) утонение определяется текстурными параметрами Δ_i и схемой напряжений m . Другими словами, при одинаковом утонении без локализации в различных областях листовой заготовки для увеличения коэффициента обтяжки необходимо обеспечить в обшивочных листах из алюминиевых сплавов определенный состав текстуры с расчетными значениями Δ_i .

С другой стороны, если характер анизотропии свойств листового проката обеспечит устойчивое управление процессами формообразования обтяжкой при равномерном изменении толщины в различных областях листовой заготовки, то для определения предельно допустимой деформации можно заменить значение ε_3^p в выражении (4.23) на n :

$$K_{обм}^{np} = 1 + \frac{(\eta_{12} + \eta_{31}) - \eta_{12}m}{\eta_{23}m + \eta_{31}} n. \quad (4.24)$$

Необходимо отметить, что при изготовлении ответственных листовых элементов обшивок ЛА $K_{обм}^{np}$ не совсем подходит в качестве предельной характеристики металла при его штамповке. Это связано с тем, что деталь обшивки должна обладать вполне определенным комплексом свойств, который и накладывает свои ограничения при назначении допустимого формоизменения листового материала, связанного с деформацией утонения. Однако приведенное ограничение имеет место при неравномерном растяжении листовой заготовки, наблюдаемое при формообразовании по традиционной кинематической схеме обтяжки. Нужна новая кинематическая схема увеличения степени формоизменения при обтяжке, достигаемой практически за один переход без локализации деформации утонения, и выравнивающая их значения в различных областях листовой заготовки.

На рис. 4.3 показана зависимость геометрического коэффициента обтяжки $K_{обм}$ от заданной деформации утонения ε_3^p при $m = 0,05$ и $m = 0,1$ для некоторых кристаллографических ориентировок, характерных для текстуры рекристаллизации алюминиевых сплавов ($Q = 0,538$). Так для текстуры $\{011\}\langle 122 \rangle$ при заданной деформации утонения $\varepsilon_3^p = 0,06$ величина коэффициента обтяжки, показанная на кривой 3, составляет $K_{обм}^{np} = 1,18$, в то время как для изотропного металла (кривая 2) при тех же условиях эта величина равна 1,10. При других параметрах текстуры коэффициент обтяжки может оказаться даже меньше, чем для изотропного металла, например для $\{013\}\langle 231 \rangle$ $K_{обм}^{np} = 1,07$ (кривая 1).

Из графика видно, что при одинаковом утонении листовой заготовки для увеличения коэффициента обтяжки, т.е. деформации ε_1^p , необходимо обеспечить в обшивочных листах эффективный состав компонент текстуры, способствующий увеличению ε_1^p за счет суже-

ния оболочки ε_2^p . Отсюда ясно, что анизотропия, наряду с другими факторами, оказывает заметное влияние на предельное формоизменение при данной операции. Как следует из выражения (4.24), значения $K_{обт}^{np}$ повышаются также с увеличением константы кривой упрочнения n .

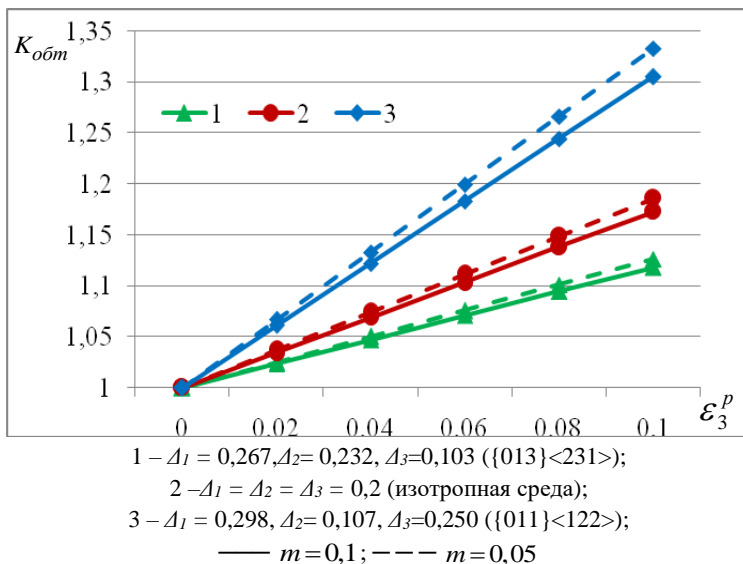


Рис. 4.3. Взаимосвязь между напряженным состоянием m , деформацией утонения ε_3^p , геометрическим коэффициентом обтяжки $K_{обт}$ и текстурными параметрами Δ_i

Рассмотрим влияние каждой компоненты текстуры обшивочных листов из сплава Д16чМ ($n = 0,265$) на предельный коэффициент обтяжки. В табл. 4.2 в качестве примера приведены для прочих равных условий расчеты по формуле (4.24) $K_{обт}^{np}$ в зависимости от типичных для Д16чМ кристаллографических ориентировок в предположении, что текстура обшивочного листа полностью состоит из данной идеальной ориентировки, т.е. является однокомпонентной.

Таблица 4.2. Значения Δ_i , μ_{ij} и $K_{обт}^{np}$ для идеальных кристаллографических ориентировок, присутствующих в обшивочных листах Д16чМ ($m_1=0,1$ и $m_2=0,05$; $Q=0,538$)

Идеальные ориентировки		Ориентационные факторы			Показатели анизотропии			Коэффициент обтяжки	
		Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_{21}	μ_1	μ_2	$\bar{\mu}$	$K_{обт}^{np1}$
1		2	3	4	5	6	7	8	9
Ориентировки деформации									
Текстура лагуни	{011}<211>	0,25	0,333	0,25	0,352	0,635	0,500	0,531	1,085
Текстура меди	{112}<111>	0,333	0,25	0,25	0,500	0,635	0,352	0,531	1,096
Текстура типа S	{146}<211>	0,25	0,297	0,224	0,370	0,603	0,444	0,505	1,085
	{186}<211>	0,25	0,314	0,236	0,361	0,618	0,468	0,516	1,085
	{681}<112>	0,25	0,314	0,236	0,361	0,618	0,468	0,516	1,085
	{123}<634>	0,25	0,333	0,25	0,352	0,635	0,500	0,531	1,085
Текстура типа Ex	{011}<111>	0,333	0,25	0,25	0,500	0,635	0,352	0,531	1,096
	{123}<111>	0,333	0,25	0,25	0,500	0,635	0,352	0,531	1,096
Ориентировки рекристаллизации									
Текстура сдвига	{112}<110>	0,19	0,25	0,25	0,500	0,552	0,607	0,553	1,107
	{557}<110>	0,25	0,311	0,314	0,505	0,668	0,646	0,622	1,109
	{111}<011>	0,25	0,25	0,333	0,648	0,649	0,648	0,648	1,145
Текстура куба	{001}<100>	0	0	0	0,500	0,054	0,500	0,277	1,104
	{023}<100>	0	0,213	0,213	0,500	0,301	0,836	0,484	1,112
Текстура Госсса	{011}<100>	0	0,25	0,25	0,500	0,356	0,946	0,540	1,113
Текстура лагуни Bs	{113}<581>	0,209	0,267	0,157	0,329	0,34	0,401	0,449	1,081
	{113}<211>	0,25	0,195	0,157	0,432	0,515	0,361	0,456	1,089
Текстура типа R	{124}<211>	0,25	0,25	0,19	0,393	0,561	0,393	0,477	1,086
Текстура типа P	{011}<122>	0,296	0,102	0,25	0,816	0,520	0,446	0,575	1,193
Прочие ориентировки									
{012}<584>		0,274	0,19	0,16	0,441	0,528	0,32	0,457	1,089
{013}<213>		0,25	0,211	0,09	0,284	0,503	0,249	0,385	1,073
{031}<013>		0,09	0	0,09	0,602	0,146	0,500	0,348	1,123
{249}<094>		0,138	0,038	0,165	0,662	0,253	0,527	0,424	1,141
{011}<011>		0,25	0	0,25	0,946	0,356	0,500	0,540	1,367
Изотропный		0,2	0,2	0,2	0,500	0,500	0,500	0,500	1,104

Анализ выявленных идеальных кристаллографических ориентировок $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ при прочих равных условиях позволяет дать характеристику каждой из них по ее вкладу в общую анизотропию материала и по ее влиянию на предельные возможности процесса обтяжки. Как следует из табл. 4.2, в составе текстуры проката алюминиевых сплавов Д16чМ наряду с неблагоприятными ориентировками присутствуют идеальные ориентировки, обеспечивающие весьма высокие значения коэффициента обтяжки $K_{обт}^{np} > 1,35$, например $\{011\}\langle 011 \rangle$ и т.д. Достаточно хорошие показатели предельного формоизменения, а именно ($K_{обт}^{np} > 1,10$), обеспечивают ориентировки текстуры Госса $\{011\}\langle 100 \rangle$, широко распространенные в отожженных алюминиевых сплавах.

Таким образом, формула (4.24) позволяет при прочих равных условиях оценить влияние на предельный коэффициент обтяжки как каждой кристаллографической ориентировки в отдельности, так и их наборов с учетом их доли в составе текстуры, обеспечивающих повышение $K_{обт}^{np}$ листовых заготовок. Например, для обеспечения $K_{обт}^{np} = 1,15 - 1,2$ необходимо сформировать в обшивочных листах требуемый состав компонент текстуры, т.е. такой набор идеальных ориентировок $\{hkl\}\langle uvw \rangle$, а значит и Δ_i , который дает заданное значение $K_{обт}^{np}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Каким образом в листовом материале может быть спроектирована практически любая анизотропия свойств?
2. Проанализируйте запись обобщенного показателя текстурированного состояния.
3. Приведите названия параметров строения материала, которые вошли в основные уравнения механики пластической деформации.

4. При какой комбинации состава текстуры процесс формообразования обтяжкой может продолжаться без локализации до полного исчерпания пластичности листового материала?
5. К какому выводу пришли при определении критических деформаций листового материала в зависимости от схемы напряжений при обтяжке?
6. Каким видом потери устойчивости характеризуются предельные возможности процесса обтяжки?
7. Что такое геометрический коэффициент обтяжки?
8. Определите взаимосвязь между геометрическим коэффициентом обтяжки и величиной деформации растяжения.
9. Оцените по вкладу влияние каждой компоненты текстуры листового материала в общую анизотропию свойств и ее влияние на предельные возможности процесса обтяжки.

5. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ СИММЕТРИЧНОЙ ОБТЯЖКИ НА ОБТЯЖНЫХ ПРЕССАХ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

5.1. Описание и расчет способа обтяжки оболочки двояковыпуклой формы на прессе FEKD

Современное развитие авиационной техники и технологии на отечественных предприятиях характеризуется переоснащением заготовительно-штамповочного производства за счет установки чаще всего импортного оборудования, в том числе обтяжных прессов с программным управлением. Много лет эксплуатируются обтяжные прессы трех типов FEKD французской фирмы ACB-ALSTHOM. Это обтяжные прессы FEKD-300/600-2850, FEKD-550/1100-4500 и FEKD-550/1100-6500, которые предназначены для поперечной обтяжки по программе листовых обшивочных оболочек двойной и знакопеременной кривизны. Считается, что это первые в мировой практике обтяжные прессы, оснащенные ЧПУ. Центр по разработке систем управления CERSA, входящий в состав фирмы ACB, сумел создать для гидравлических прессов специализированную систему управления SIMER. Она была установлена как на прессах типа FEKD, так и на более современных обтяжных прессах, выпускаемых фирмой ACB-ALSTHOM в настоящее время. Это обтяжные прессы для поперечной обтяжки типа FET, для продольной обтяжки типа FEL и для комбинированной обтяжки типа FETL. В России на некоторые авиапредприятия, входящие в ОАК, были закуплены и в настоящее время активно применяются обтяжные прессы новой серии. Данные прессы

приобретались для освоения обводообразующих деталей обшивок новых типов самолетов гражданского и военного назначения, разработанных в России.

При этом некоторые обтяжные прессы, например FEKD и FET, дополнительно оснащаются так называемым «клювом», который представляет собой приспособление цилиндрической формы, жёстко соединённое с зажимным устройством. «Клюв» ограничивает максимальные углы изгиба листовой заготовки в области выхода его из зажимов, а также за счёт трения снижает деформации в этой области. Система управления CIMER поддерживает все обтяжные прессы фирмы АСВ и обеспечивает возможность сервоуправления при перемещении зажимных балок, которые кинематически связаны с управляемыми гидроцилиндрами, например, два вертикальных для стола и две пары наклонных гидравлических цилиндров для поворота балансиров с зажимами для прессов типа FEKD.

Для того чтобы успешно реализовать новые способы формообразования анизотропной листовой заготовки на принципах симметричной обтяжки необходимо, прежде всего, решить задачу технологической проработки обтяжного пуансона. Новые способы обеспечивают расширение формообразующей стадии средней части листовой заготовки в районе центрального поперечного сечения. После достижения деформации потребной для той или иной геометрической формы оболочки необходимо обеспечить растяжение остальных частей листовой заготовки при сохранении положения наибольшей деформации в средней части, но без локализации ее в области вдоль границы контакта с поверхностью пуансона до зажимов прессы. Такая схема формообразования обтяжкой была названа последовательной схемой, включающей предварительную и повторную обтяжки, разделенные разгрузкой листовой заготовки и ее разгибанием в новое положение для повторной обтяжки.

Одним из требований, предъявляемых к отдельным стадиям последовательной схемы формообразования обтяжкой, является раздельное их осуществление в условиях симметричной обтяжки при

соответствующей параметризации поверхности обтяжного пуансона. Конструкторская проработка обтяжного пуансона определяет его правильное позиционирование на рабочем столе пресса, обеспечиваемое постоянное положение формообразующего контура в одной из вертикальных плоскостей обтяжного пресса и осесимметричное деформирование центрального поперечного сечения оболочки. Система координат пресса привязана к плоскости стола и вертикальной осевой линии, проходящей через вершину поверхности обтяжного пуансона в точке O (см. рис. 2.6).

В результате соответствующая параметризация поверхности обтяжного пуансона характеризуется двумя ортогональными линиями кривизн, взаимно пересекающимися в точке O поверхности, где радиусы линий принимают максимальное и минимальное значения, а их произведение характеризует значение гауссовой кривизны. Значение гауссовой кривизны затем используется для оценки потребной деформации в районе полюса поверхности, которая характеризует получение заданной геометрической формы оболочки двойной кривизны и нахождение ее метрических свойств.

Это позволяет разделить процесс формообразования обтяжкой на отдельные формообразующие операции и определить при разгибании новое положение оболочки двойной кривизны, которая будет изометрически расположена по отношению к поверхности обтяжного пуансона.

На рис. 5.1 представлена первая операция или этап формообразования – схема предварительной обтяжки после обвертки плоской листовой заготовки обтяжного пуансона по формообразующему контуру на полный угол охвата α_k , равный 90° . На первом этапе листовая заготовка 1 закрепляется в неподвижных прямолинейных зажимных устройствах 4 и изгибается на полный угол охвата α_k обтяжного пуансона 2 за счет синхронизации движений балансиров и стола пресса типа FEKD. Затем выполняется обтяжка при растяжении листовой заготовки для получения геометрической формы участка оболочки в центральном поперечном сечении, проходящем через точку O , но

желательно без избыточного деформирования плоского участка схода листовой заготовки с обтяжного пуансона.

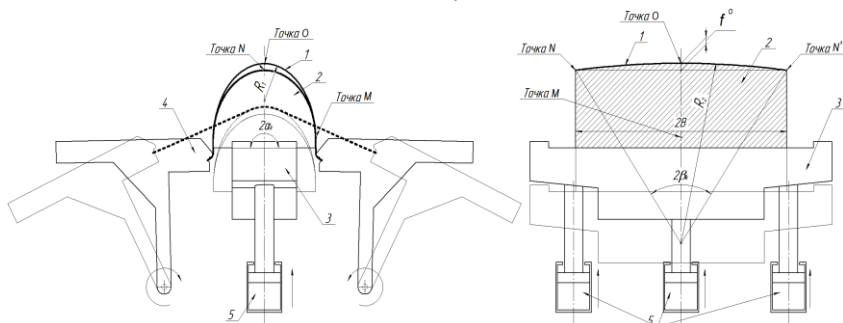


Рис. 5.1.Схема стадии предварительной обтяжки на прессе FEKD 550-1100:
 1 – листовая заготовка; 2 – обтяжной пуансон; 3 – рабочий стол пресса;
 4 – балансиры; 5 – силовые гидроцилиндры стола пресса

Предварительная обтяжка листовой заготовки после ее обертки по формообразующему контуру обтяжного пуансона на полный угол охвата, равный 90^0 , сопровождается избыточным деформированием плоского участка листовой заготовки в районе ее схода с обтяжного пуансона по формообразующему контуру в точке M (деформации приведены в логарифмическом виде для определенной точки листовой заготовки):

$$e_{1M} = (e_{1O} + e_1^K - e'_{1O}) \exp\left(\frac{f \cdot \alpha_k}{n}\right), \quad (5.1)$$

где e_{1M} – деформация в точке M плоского участка схода листовой заготовки с обтяжного пуансона по формообразующему контуру под углом α_k ;

e_{1O} – деформация в точке O после получения второй кривизны, соответствующей прогибу максимального поперечного сечения (потребная деформация в точке O для получения заданной формы оболочки);

e_1^K – деформация калибровки, необходимая для вывода всех участков заготовки за предел текучести материала для фиксации двояковыпуклой формы;

e_{1O} – деформация в точке O на стадии формообразования, соответствующей неполному прогибу максимального поперечного сечения, до момента избыточного деформирования плоского участка листовой заготовки в районе схода с обтяжного пуансона.

Избыточное деформирование связано с тем, что формообразование в различных поперечных сечениях заканчивается неодновременно. Однако для оболочки двояковыпуклой формы при наличии плоского участка листовой заготовки в районе схода с обтяжного пуансона и пресса, имеющего прямолинейный ряд зажимных устройств, на данном этапе формообразования вероятнее всего будет следующее. Можно получить избыточную деформацию e_{1M} плоского участка листовой заготовки несколько меньше или несколько больше деформации формообразования e_{1O} оболочки двояковыпуклой формы или без деформации калибровки e_1^K , или за счет незначительной деформации калибровки e_1^K . Это вполне достижимо на стадии формообразования, несмотря на влияние внешнего трения при обтяжке оболочки двояковыпуклой формы.

Двояковыпуклая форма оболочки соответствует продольному и поперечному радиусам R_1 и R_2 линий кривизн, проходящих через точку O и связанных следующим соотношением через гауссову кривизну K :

$$R_2 = \frac{K}{R_1}. \quad (5.2)$$

В способе предлагается разгрузить оболочку после предварительной обтяжки и, не освобождая ее из зажимов пресса, осуществить раз-

гибание на угол α_p за счет синхронизации движений балансиров и стола пресса FEKD по расчетной траектории. Гауссова кривизна при разгибании поверхности в свободном состоянии сохраняет свое значение, хотя главные кривизны линий точки O будут меняться. Это понятие играет важную роль в предлагаемом способе. Для этого и осуществлялся переход к новой сетке кривизн.

На рис. 5.2 представлено свободное разгибание с разверткой поверхности оболочки после ее разгрузки за счёт синхронизации движений балансиров и стола пресса по соответствующей программе с угла α_k , равного 90^0 , на угол α_p , равный 15^0 . В результате получим так называемую изометрическую форму поверхности оболочки по отношению к поверхности обтяжного пуансона с радиусами кривизны в точке O соответственно R_{1P} и R_{2P} , которые определяются при неизменном значении гауссовой кривизны K :

$$R_{2P} = \frac{1}{KR_{1P}}, \quad (5.3)$$

где, если R_1 при разгибании на угол α_p увеличивается до R_{1P} , то R_{2P} уменьшается до R_2 , а поверхность оболочки отступает от поверхности пуансона в районе центрального сечения на величину f_p , прилегая к поверхности обтяжного пуансона только боковыми, свободными от зажимов участками в окрестности точки N .

Повторная обтяжка оболочки относительно обтяжного пуансона с угла α_p обеспечивает растяжение боковых, практически недеформируемых участков листовой заготовки, которые только касаются поверхности обтяжного пуансона. В результате растяжения боковые, свободные от зажимов участки заготовки начинают прилегать к поверхности обтяжного пуансона. Данное растяжение сопровождается утонением этих участков, и создаются условия выравнивания тол-

щины оболочки в максимальном поперечном сечении до момента прилегания участка оболочки в окрестности точки O .

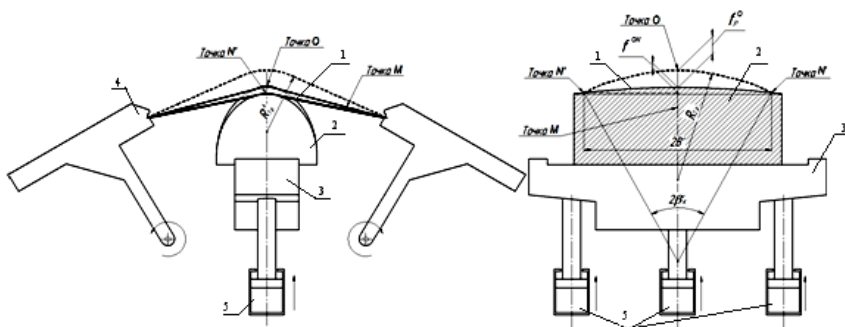


Рис. 5.2. Схема стадии повторной обтяжки на прессе FEKD 550-1100:
 1 – листовая заготовка; 2 – обтяжной пуансон; 3 – рабочий стол пресса;
 4 – балансир; 5 – силовые гидроцилиндры стола пресса

Повторная обвертка поверхности оболочки по формообразующему контуру на полный угол охвата, равный 90^0 , после ее разгрузки в положении, определяемом углом α_p , обеспечивает фиксацию двояковыпуклой формы при обратном изменении значений радиусов R_{1P} и R_{2P} на значения радиусов R_1 и R_2 линий кривизн, проходящих через точку O . При этом избыточное деформирование других участков оболочки, уже прилегаемых к поверхности обтяжного пуансона, будет отсутствовать. В результате поверхность оболочки будет соответствовать форме обтяжного пуансона без избыточного деформирования плоского участка листовой заготовки.

Деформация, которая обеспечивает получение двояковыпуклой формы при предварительной обтяжке, равна:

$$e_{10} = \ln \left(\frac{R_1}{R_1 - f_0} \right), \quad (5.4)$$

где R_1 – продольный радиус линии кривизны, проходящей через точку O ;

f_o – прогиб поверхности оболочки в центральном поперечном сечении, равный $f = R_2(1 - \cos \beta_k)$;

β_k – поперечный угол охвата пуансона при формообразовании второй кривизны в центральном поперечном сечении.

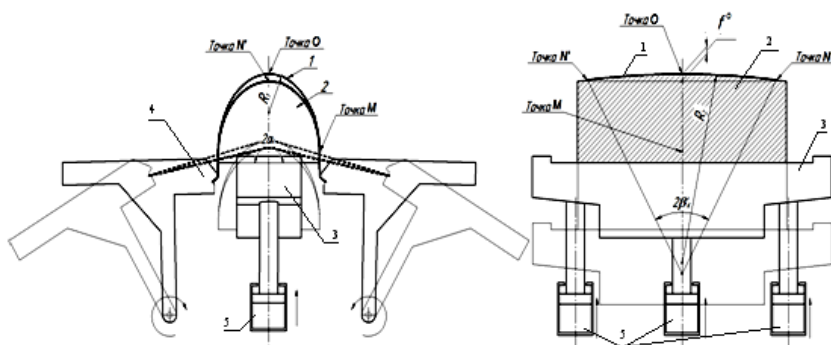


Рис. 5.3. Схема разгрузки и изгибания на прессе FEKD 550-1100 оболочки с полным охватом обтяжного пуансона:

- 1 – листовая заготовка; 2 – обтяжной пуансон; 3 – рабочий стол прессы;
4 – балансир; 5 – силовые гидроцилиндры стола прессы

Первоначально плоской заготовке после ее обертки по формообразующему контуру на угол α_1 необходимо дать деформацию растяжения e'_{10} в точке O , соответствующей формообразующей стадии:

$$e'_{10} = \ln \left(\frac{R_1}{R_1 - f'_o} \right), \quad (5.5)$$

где $f'_o = R_2(1 - \cos \beta_o)$ – величина прогиба в точке O отформованной части заготовки в максимальном поперечном сечении;

$\beta'_O - \left(\frac{B}{2R_2 \exp \mu \alpha} \right)$ – угловая координата границы зоны пластической деформации в центральном поперечном сечении.

Последующий расчет по формуле (5.1) без деформации калибровки позволит выполнить оценку величины избыточной деформации e_{1M} с целью корректировки кинематической схемы формообразования обтяжкой.

Далее осуществляется разгибание с разверткой поверхности оболочки двойной кривизны. В результате радиус R_1 увеличивается до значения R_{1P} , а радиус R_2 , наоборот, уменьшается до значения R_{2P} при сохранении величины гауссовой кривизны.

Средняя часть оболочки в окрестности точки O приподнимается над поверхностью обтяжного пуансона на величину f_p , определяемую в центральном поперечном сечении. Эта величина определяется из условия равенства толщины оболочки в точках O и N , причем новое изометрическое положение поверхности оболочки относительно поверхности обтяжного пуансона обеспечивает деформирование свободных боковых участков заготовки с угла разгиба α_p до величины

$$e_1^N = \frac{e_{1O} \left(1 + \mu_{21} m_O \left(\frac{1}{\mu_{12}} - 1 \right) - \mu_{21} \right)}{(1 - \mu_{21} m_O)(1 - \mu_{21})}, \quad (5.6)$$

где μ_{21} и μ_{12} – показатели анизотропии листовой заготовки;

$m_O = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ – отношение напряжений в точке O .

Оно определяется по формуле (5.7):

$$m_O = \frac{R_2}{r_k} \left(e^{-\mu\beta_k} (\cos \beta_k + 2\mu \sin \beta_k) - 1 \right), \quad (5.7)$$

где $r_k = R_1 - f_O$.

В результате величина подъема центральной части оболочки в окрестности точки O определяется по формуле

$$f_p = R_1 (\exp e_1^N - 1) + f_O^{N'}. \quad (5.8)$$

В формуле неизвестны величины f_p и $f_O^{N'}$. Величина $f_O^{N'}$ отмечается положением точки N' , связанной с ее поперечным смещением на свободном участке оболочки в новом изометрическом положении. Их разность вполне определяется из формулы (5.8). Для этого была организована процедура необходимых вычислений в Microsoft Excel.

При повторной обтяжке выполняется растяжение боковых, свободных от зажимов участков оболочки, имеющих в данный момент контакт с обтяжным пуансоном, полученный в результате уменьшения поперечного радиуса до значения R_{2P} при разгибании с разверткой на угол α_p .

Необходимая величина угла разгибания с разверткой поверхности оболочки задается не по формообразующему контуру, а по крайевому продольному сечению, которое соответствует половинке эллипса. Перед определением α_p необходимо установить выражения для радиусов R_{1P} и R_{2P} после разгибания с разверткой:

$$R_{2P} = \frac{(f_p^A + f^A) + B^2}{2(f_p^O + f^O)} \text{ и } R_{1P} = \frac{R_1 R_2}{R_{2P}}. \quad (5.9)$$

Для определения величин полуосей эллипса a и b , измененных после разгибания с разверткой линии l_k на угол α_p , воспользуемся его

параметрическим уравнением в системе координат, начало которой совмещено с центром эллипса:

$$X = a \cdot \cos \varphi, Y = b \cdot \cos \varphi + c. \quad (5.10)$$

В вершине эллипса, где $\varphi = \frac{\pi}{2}$, имеем радиус ρ_α и его центр кривизны:

$$\rho_\alpha = \frac{a^2}{b}, X_M = 0, Y_M = -\frac{a^2 - b^2}{b}, \quad (5.11)$$

откуда $\alpha = \sqrt{\rho_\alpha \cdot b}$.

Учитывая, что длина оболочки после разгибания не изменилась, определим угол разгиба по линии l_k торцевого сечения:

$$\alpha_p = 2\pi \frac{l_k}{L_{эл}}, \quad (5.12)$$

где $L_{эл}$ – длина эллипса, выраженная через эллиптический интеграл, если известны размеры полуосей. По таблицам интегралов находим выражение для длины эллипса через полный эллиптический интеграл второго рода:

$$L_{эл} = \pi \left[1,5 \cdot (a + b) - \sqrt{a \cdot b} \right]. \quad (5.13)$$

Далее определим координаты точки L по касательной к линии l_k и под углом α_p :

$$X_L = a \cdot \sin \alpha_p, Y_L = b \cdot \cos \alpha_p + c. \quad (5.14)$$

Проведем касательную к контуру l_k торцевого сечения через точку L и решим совместно уравнения эллипса и прямой для определения координат точки M касания:

$$Y_L = \frac{M - \sqrt{M^2 - 4T \cdot N}}{2T}; X_L = a \cdot \sqrt{1 - \frac{Y_M^2}{b^2}}, \quad (5.15)$$

где $T = (Y_L + c)^2 + \frac{X_L^2 \cdot b^2}{a^2}$;

$$M = 2b^2(Y_L + c) + 4c(Y_L + c)^2 - 2 \frac{c \cdot X_L^2 \cdot b^2}{a^2}; \quad (5.16)$$

$$N = [b^2 + c(Y_L + c)]^2 - \frac{X_L^2 \cdot b^4}{a^2} + \frac{c \cdot X_L^2 \cdot b^2}{a^2}.$$

Окончательно получим угол α'_p схода по касательной в торцевом сечении оболочки:

$$\alpha'_p = \arctg \frac{X_L}{Y_L}. \quad (5.17)$$

Данный набор аналитических формул определяет параметры деформаций в характерных точках O , N и M поверхности оболочки после предварительной и повторной обтяжки, а также угол разгибания поверхности оболочки перед повторной обтяжкой.

5.2. Особенности реализации симметричной обтяжки на прессе типа FEKD с ЧПУ

Использование обтяжного оборудования с программным управлением требует нового подхода к проектированию и отладке технологического процесса формообразования обтяжкой, применению при этом ЭВМ для управляющей программы. Управление процессом обтяжки осуществляется в режимах «Ручное управление»; «Шаговое перемещение» (полуавтоматический режим); «Числовое программ-

ное управление» (автоматический режим). Система управления «CIMER» осуществляет позиционное управление рабочими органами прессы по перемещениям, а также функционирует обратная связь, осуществляющая контроль процесса по усилию.

Обтяжной пресс поперечного действия типа FEKD имеет ЧПУ по четырем координатам (рис. 5.4.). Процесс обтяжки на этих прессах осуществляется по следующим схемам: оборачивание и растяжение, оборачивание с растяжением и ступенчатое оборачивание с растяжением. Фактически при изготовлении оболочек на этом оборудовании управляемыми являются четыре координаты: 1 – вертикальное перемещение стола; 2 и 3 – выдвижение штоков гидроцилиндров обоих балансиров прессы; 4 – наклон стола прессы в вертикальной плоскости.

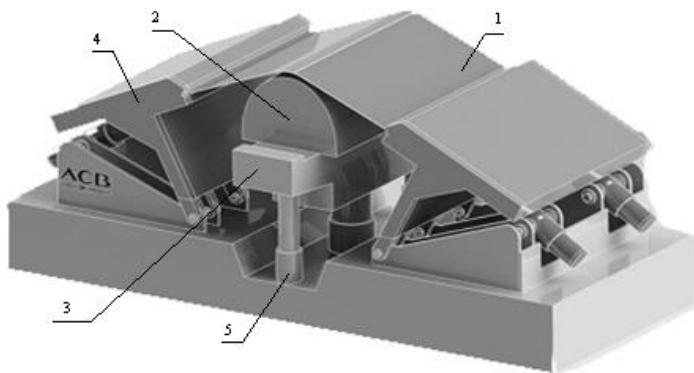


Рис. 5.4. Обтяжной пресс поперечного действия типа FEKD

Наличие устройств контроля растяжения листовой заготовки в отдельных локальных местах оболочки двойной кривизны позволяет осуществить при отработке управляющей программы контроль деформационного поля в зависимости от пространственного перемещения зажимных губок, обрабатывая псевдотраекторию их движения относительно выбранного продольного контура на поверхности обтяжного пуансона.

Перемещения зажимных губок пресса по псевдотраектории возможно с плавным увеличением угла охвата без растяжения либо с растяжением листовой заготовки. Наличие портала и горизонтальных прижимов для обратнoboковой формовки позволяет осуществлять формообразование оболочки со знакопеременной кривизной и с местными впадинами на поверхности обтяжного пуансона за счет местного подмятия листовой заготовки.

Псевдотраектории перемещения зажимных губок пресса осуществляются за счет синхронизации движений левого и правого балансиров и стола пресса согласно управляющей программе. Балансиры несут на себе зажимные губки, имеют горизонтальную ось вращения и приводятся во вращение гидроцилиндрами. Балансиры крепятся к поворотной плите, которая имеет вертикальную ось вращения и проходит через ось дальнего грузового винта, если смотреть со стороны пульта управления. Рабочий стол пресса установлен на центральной опоре и на штоках двух гидроцилиндров. Они имеют шарнирное соединение со станиной пресса для того, чтобы осуществить наклон стола вокруг центральной оси.

Выбор рациональной схемы нагружения в процессе обтяжки осуществляется с учетом индентификации геометрической формы оболочек двойной кривизны. Параллельно с отработкой программы составляется технологический процесс получения оболочки определенной геометрической формы.

Автоматизированное формообразование обтяжкой на обтяжном прессе типа FEKD требует тщательной подготовки, начиная с обработки электронной модели самого обтяжного пуансона и заканчивая расчетом управляющей программы. После моделирования процессов формообразования обтяжкой с использованием программ конечно-элементного анализа необходимо знать траектории движения зажимных губок в декартовых координатах стола пресса, соответствующих вертикальным плоскостям симметрии обтяжного пуансона при соответствующей параметризации его поверхности.

Одним из требований, предъявляемых к отдельным стадиям последовательной схемы формообразования обтяжкой, является раздельное их осуществление в условиях симметричной обтяжки при соответствующей параметризации поверхности обтяжного пуансона. Конструкторская проработка обтяжного пуансона определяет его правильное позиционирование на рабочем столе пресса, обеспечиваемое постоянное положение формообразующего контура в одной из вертикальных плоскостей обтяжного пресса и условия осесимметричного деформирования центрального поперечного сечения оболочки. Система координат пресса привязана к плоскости стола и вертикальной осевой линии, проходящей через полюс поверхности обтяжного пуансона. Такое условие обеспечивает постоянное положение формообразующего контура в одной из вертикальных плоскостей обтяжного пресса. В связи с этим требуется разработать модуль для перевода декартовых координат стола в параметры рабочих элементов обтяжного пресса и наоборот – параметры в координаты

Соответствующая параметризация поверхности обтяжного пуансона характеризуется двумя ортогональными линиями кривизн, взаимно пересекающимися в точке O поверхности, где радиусы линий принимают максимальное и минимальное значения, а их произведение характеризует значение гауссовой кривизны. Значение гауссовой кривизны затем используется для оценки потребной деформации в районе точки O поверхности, которая характеризует получение заданной геометрической формы оболочки двойной кривизны и нахождение ее метрических свойств, т.к. к поверхности оболочки в окрестности точки O близка некоторая квадратичная поверхность. Это позволяет разделить процесс формообразования обтяжкой на отдельные формообразующие операции и определить при разгибании новое положение оболочки двойной кривизны, которая будет изометрически расположена по отношению поверхности обтяжного пуансона.

Кроме того, требуется решить задачу определения оптимальных размеров листовой заготовки, позволяющих выполнить отдельные

формообразующие операции обтяжки, в том числе и разгибание поверхности оболочки за счет координатных перемещений зажимов пресса относительно формообразующего контура обтяжного пуансона при его правильном позиционировании на рабочем столе пресса. Моделирование процесса формообразования обтяжкой является основной задачей, которая учитывает кинематические особенности обтяжного пресса при выполнении последовательной схемы формообразования обтяжкой. Кроме этого, моделирование учитывает особенности самого процесса, характеризуемое параметрами, которые разделены на следующие группы: свойства материала; условия трения; размеры заготовки; условия термообработки; параметры размещения обтяжного пуансона на столе пресса; технологические условия процесса, например, получение оболочковой детали минимальной разнотолщинности.

Результатом этого являются управляющие программы для ЧПУ пресса, для расчета и формирования которых фирма АСВ предоставляет программное обеспечение S3F. Для этой программы необходимо создать электронную модель (ЭМ) рабочей поверхности обтяжного пуансона. Далее необходимо ее ориентировать относительно системы координат пресса, чтобы в системе координат программы S3F была возможность моделирования процесса формообразования обтяжкой. Поверхность обтяжного пуансона разбивается на отдельные сечения, где с помощью двух точек указывается область расположения контура детали. В программу S3F задаются геометрические припуски к размерам детали для определения размеров плоской листовой заготовки и условия трения. Далее в каждом сечении рассчитываются параметры формообразования. Расчет останавливается в момент, когда в каждом сечении листовая заготовка накроет отмеченную область детали. Таким образом, в программе S3F предусмотрена возможность построения управляющей программы для ЧПУ пресса, осуществляющей только один способ обтяжки по принципу "оборачивание" листовой заготовкой обтяжного пуансона при дифференцированном растяжении с заданным нарастанием давления.

Предварительно в программу S3F задаются реологические характеристики материала листовой заготовки и условия внешнего трения. Используя ЭМ рабочей поверхности обтяжного пуансона и базу данных о листовом материале, программа S3F создает модель движения рабочих органов обтяжного пресса. Вполне очевидно, что фирма ACB предложила расчетный вариант формирования управляющих программ. Технолог должен предварительно сообщить всю совокупность сведений, необходимых для автоматизированного расчета.

Однако отследить распределения пластической деформации и толщин по поверхности листовой заготовки в любой момент времени с помощью программы S3F невозможно. Программа S3F не предоставляет инструментов для проведения такого анализа. Для этого необходимо дополнительно моделировать процесс формообразования обтяжкой на методе конечных элементов, который позволяет более точно анализировать данный процесс. Для конечно-элементного анализа можно использовать программу конечно-элементного анализа PAM-Stamp французской фирмы ESIGroup или многоцелевую программу конечно-элементного анализа ANSYS/LS-DYNA американской компании LSTC. В этих программах можно моделировать процесс формообразования обтяжкой полностью. Создаются объемные модели обтяжного пуансона, объемные модели губок и зажимов, рабочих элементов пресса, а также названные выше параметры, учитывающие особенности самого процесса, например, пружинение оболочки после формообразования. Рассмотрен метод моделирования, выполняемый в два этапа: предварительное моделирование в программе S3F и точный расчет процесса формообразования обтяжкой с оценкой величины пружинения.

Однако в комплексе задач, которые можно отнести к категории импортозамещающих, относим задачу обмена данными на базе поверхностных геометрических моделей, необходимых для разработки управляющих программ. В создании электронной модели самого обтяжного пуансона должны участвовать технологи, которые в режиме

группового использования данных проводят отработку технологичности оболочковой детали и дают рекомендации по изменению конструкции обтяжного пуансона еще до его изготовления. Однако создание такого информационного пространства является одной из приоритетных задач внедрения CALS-стандартов. Стандарты на технологическую подготовку производства могут носить фрагментарный характер, реализуя пилотные проекты типа работ, связанных с модернизацией ЧПУ обтяжного пресса типа FEKD и отладкой новой технологии формообразования обтяжкой с помощью программного обеспечения, отрабатывая определенные этапы формирования нужного информационного пространства.

Кроме того, к комплексу задач, которые можно осуществить, относим задачу разработки математической модели пресса с целью автоматизации процесса подготовки управляющих программ для обтяжного пресса типа FEKD с ЧПУ. Данная модель пресса даст возможность определять исходные положения рабочих органов пресса и обтяжного пуансона на столе пресса и предусмотреть паузы для отработки отдельных операций. В состав отдельных операций включим установку листовой заготовки в зажимы пресса, ее предварительное растяжение, выполнение рабочего хода между процессами обтяжки для разгрузки, предварительное оборачивание или разгибание без растяжения, предварительную обтяжку, повторную обтяжку, контроль прилегания оболочки к обтяжному пуансону, снятие давления и разжим листовой заготовки. Разработка математической модели пресса должна включать модуль импорта геометрических характеристик обтяжного пуансона, модуль импорта реологических свойств листового материала, модуль численного расчета одной или двух оболочковых деталей.

Моделирование процесса формообразования обтяжкой является основной задачей, которая учитывает кинематические особенности обтяжного пресса при выполнении последовательной схемы формообразования обтяжкой. Кроме этого, моделирование учитывает особенности самого процесса, характеризуемое параметрами, которые

разделены на следующие группы: свойства и анизотропия материала; условия трения; размеры заготовки; условия термообработки; параметры размещения обтяжного пуансона на столе прессы; технологические условия процесса. Для этой программы необходимо создать электронную модель (ЭМ) рабочей поверхности обтяжного пуансона. Далее необходимо ее ориентировать относительно системы координат прессы, чтобы в этой системе координат была возможность моделирования процесса формообразования обтяжкой. В результате моделирования можно отследить распределения пластической деформации и толщин по поверхности листовой заготовки в любой момент времени.

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите основную кинематическую характеристику, которая резко разделяет обтяжные прессы с программным управлением старой и новой серии.
2. Какую технологическую проработку обтяжного пуансона необходимо выполнить, чтобы реализовать на нем новые способы формообразования анизотропной листовой заготовки на принципах симметричной обтяжки?
3. Какое свойство имеет гауссова кривизна при разгибании поверхности оболочки двойной кривизны в свободном состоянии?
4. Приведите требование, предъявляемое к отдельным стадиям последовательной схемы формообразования обтяжкой.
5. Приведите причину, по которой необходимо разделить процесс формообразования на предварительную обтяжку и повторную обтяжку.
6. Какие кинематические движения необходимо выполнить с листовой заготовкой перед повторной обтяжкой?
7. Перечислите координатные оси управления обтяжного прессы типа FEKD.

8. Какие координатные оси синхронизируются системой управления для осуществления псевдотраектории перемещения зажимных губок пресса?
9. Какие предварительные задачи необходимо решить с помощью программного обеспечения системы управления обтяжным прессом?
10. Приведите приоритетную задачу создания информационного пространства для внедрения CALS-стандартов.
11. Какое назначение математической модели обтяжного пресса типа FEKD для автоматизации процесса подготовки управляющих программ для с ЧПУ?

6. МОДЕРНИЗАЦИЯ И ПЕРЕВОД НА ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОБТЯЖНОГО ПРЕССА

6.1. Новый подход к проектированию и отладке технологического процесса формообразования обтяжкой на современном этапе

Проектирование технологических задач на современном этапе должно осуществляться с использованием прикладных систем, причём исходная информация деталей и изделия будет передаваться в виде электронных макетов и должна поддерживаться информационной средой подготовки производства. Из-за отсутствия на отечественных предприятиях информационной среды они стали заложниками зарубежного программного обеспечения, которое поставляется вместе с обтяжным оборудованием нового поколения.

Для решения этих проблем необходимо выпускать отечественное обтяжное оборудование с программным управлением. Правительством России разрабатывается федеральная целевая программа для отечественного авиационного производства. Данная программа должна быть выполняемой на существующей технологической базе российских предприятий. Возможный путь модернизации отечественного авиационного производства – это своевременное создание российского обтяжного оборудования с программным управлением ЧПУ типа CNC, не забывая тот опыт, который имела наша страна в недалеком прошлом. Реализацию федеральной целевой программы можно осуществить по двум направлениям: «сверху» – разрабатывая нормативные документы и отраслевую программу модернизации, и «снизу» – реализуя пилотные проекты, обрабатывающие определен-

ные этапы формирования единого информационного пространства. На втором этапе можно провести разработку и обоснование предложения по созданию российского обтяжного оборудования с программным управлением ЧПУ типа CNC.

Основное направление, в котором работает фирма ACB, это совершенствование конструкции и системы управления обтяжного прессы, что, по их мнению, расширяет технологические возможности процесса обтяжки. Например, отказ в конструкции обтяжных прессов новой серии типа FET, FEL и FETL от подвижного стола в отличие от конструкции обтяжных прессов предыдущей серии типа FEKD позволяет существенно сократить подготовительное время. Конструкции обтяжных прессов предыдущей серии типа FEKD имели подвижный стол. Два вертикальных для стола и две пары наклонных гидравлических цилиндров для поворота балансиров с зажимами для прессов типа FEKD вполне обеспечивали его кинематические возможности.

При этом обтяжные прессы типа FEKD были спроектированы и поставлены на отечественные авиационные предприятия по специальному заказу нашей страны с учетом особенностей, сформировавшихся в отечественной авиационной отрасли по технологичности самолетных конструкций. Успешная и длительная эксплуатация обтяжных прессов типа FEKD показала технологическую преэминентность наших самолетных конструкций в Ту-334, Ан-140, Ан-148, Бе-200, Ил-103, Ил-114, Ил-112 и МС-21. Этот обтяжной пресс обеспечивает действие растягивающего усилия листовой заготовки в поперечном направлении. Зажимные губки выставлены по линии и закреплены неподвижно. Кинематика прессы и схема обтяжки на нем показаны на рис. 6.1.

Обтяжные прессы типа FEKD обеспечивают реализацию различных схем формообразования обтяжкой. Выбор рациональной схемы в процессе обтяжки осуществляется в зависимости от геометрии оболочки и предельного коэффициента обтяжки. Процесс обтяжки на этих прессах осуществляется по следующим схемам: изгиб и растяжение (И-Р), изгиб с растяжением (ИР-Р) и ступенчатый изгиб

с растяжением (ИР-ИР-ИР) и т.д. По схеме (И-Р) производится оборачивание на полный угол охвата $2\alpha_k$ без растяжения листовой заготовки, затем заготовку растягивают, создавая во всех сечениях напряжения растяжения, превышающие напряжения текучести материала заготовки. Эта схема проста (близка к простой обтяжке на прессе типа ОП), не требует высокой квалификации оператора.

Однако ввиду того, что процесс обтяжки осуществляется при максимальном угле охвата заготовкой поверхности пуансона, силы трения велики, что приводит к значительной неравномерности деформации растяжения, а следовательно, к деформации по толщине. Поэтому такая схема рекомендуется для оболочек одинарной кривизны и оболочек малой двойной кривизны и углами охвата $2\alpha_k < 180^\circ$.

По схеме (ИР-Р) осуществляется оборачивание листовой заготовкой рабочей поверхности пуансона одновременно с растяжением заготовки. При этом напряжения в течение всего процесса обтяжки должны увеличиваться монотонно во всех сечениях листовой заготовки так, чтобы формообразование выполнялось без разгрузки.

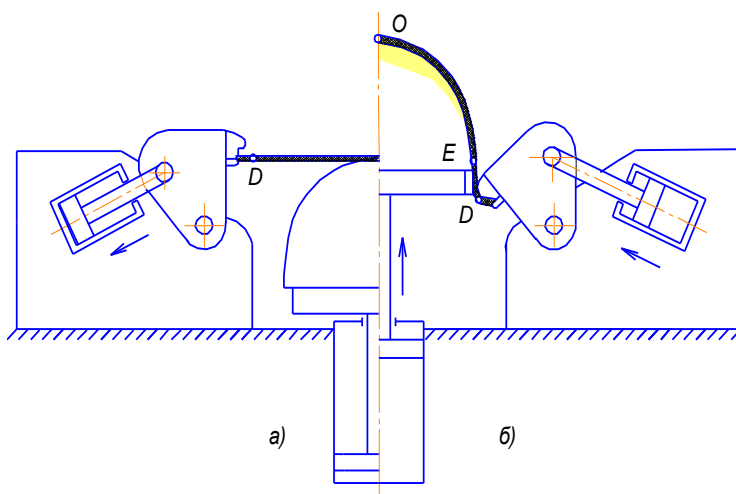


Рис.б.1. Кинематика прессы типа FEKD и схема обтяжки:
а – начальное положение; б – конечное положение

При этом угол охвата пуансона заготовкой увеличивается постепенно по мере обеспечения прилегания, начиная от «полюса» точки О. Это способствует уменьшению сил трения и обеспечивает наиболее равномерное распределение деформации по сечениям оболочки. Такая схема нагружения является основной схемой формообразования для обтяжных прессов с ЧПУ.

По схеме (ИР-ИР-ИР) реализована ступенчатая обтяжка оболочек с $2\alpha_k > 120^\circ$, т.е. когда невозможно осуществить формообразование за один переход. По этой схеме обворачивается часть рабочей поверхности пуансона листовой заготовкой, затем растягивают, производят дальнейшую обертку рабочей поверхности пуансона с последующим растяжением до полного формообразования оболочки.

Таким образом, процесс формообразования обтяжкой осуществляется по различным схемам обтяжки в зависимости от геометрической формы поверхности обтяжного пуансона и материала листовой заготовки. Наличие устройств контроля растяжения листовой заготовки в отдельных локальных местах оболочки двойной кривизны позволяет осуществить при отработке управляющей программы контроль деформационного поля в зависимости от пространственного перемещения зажимных губок, обрабатывая псевдотраекторию их движения относительно выбранного продольного контура на поверхности обтяжного пуансона.

Псевдотраектории перемещения зажимных губок пресса осуществляются за счет синхронизации движений левого и правого балансиров и стола пресса согласно управляющей программе. Балансиры несут на себе зажимные губки, имеют горизонтальную ось вращения и приводятся во вращение гидроцилиндрами. Балансиры крепятся к поворотной плите, которая имеет вертикальную ось вращения и проходит через ось дальнего грузового винта, если смотреть со стороны пульта управления. Рабочий стол пресса установлен на центральной опоре и на штоках двух гидроцилиндров. Они имеют шарнирное соединение со станиной пресса для того, чтобы осуществить наклон стола вокруг центральной оси.

Кинематика прессы типа FEKD позволяет реализовать оборачивание листовой заготовки, обеспечивающее движение наматывания на поверхность пуансона. Тогда траекторией движения точки D является эвольвента. Фактически на этом прессе управляемыми являются четыре координаты: 1 – вертикальное перемещение стола; 2 и 3 – выдвигание штоков гидроцилиндров обоих балансиров прессы и 4 – наклон стола прессы в вертикальной плоскости.

Однако формообразование обтяжкой деталей обшивок на обтяжных прессах с программным управлением требует специальной подготовки, начиная с обработки электронной модели обтяжного пуансона и заканчивая расчетом управляющей программы. Для эффективного использования анизотропных листовых материалов нужны условия сохранения информации о формировании оптимальной текстуры листового материала, а также выполнения технологических проб для оценки степени формообразования новых анизотропных листовых материалов, их устойчивости и предельного формоизменения при условии реализации симметричной обтяжки. Для решения этих задач необходимо модернизировать и перевести на программное управление лабораторный обтяжной пресс.

6.2. Кинематический метод обеспечения подготовки управляющих программ

В процессе расчета псевдотраектории перемещения зажимных губок прессы предоставляется информация только о параметрах рабочих органов прессы, но этого недостаточно для определения траектории движения зажимов. Требуется разработать инструментарий для перевода координат элементов зажима в параметры рабочих органов прессы и наоборот – параметры в координаты. Для определения траектории движения концов заготовки вместе с зажимами был проведен кинематический анализ механизмов на примере лабораторного обтяжного прессы. Он имеет ручное управление двумя автономными гидравлическими системами в виде механических трехходовых кра-

нов. Одна система предназначена для двух гидроцилиндров, растягивающих листовую заготовку в режиме продольной обтяжки, а другая система – для приведения в действие гидроцилиндра стола, растягивающего листовую заготовку в режиме поперечной обтяжки. При этом зажимные губки переставляются вручную с положения в режиме продольной обтяжки в положение в режиме поперечной обтяжки.

Лабораторный обтяжной пресс имеет кинематические ограничения. Однако его конструкция может остаться базовой. Необходимо установить слева и справа от стола пресса специальные балансиры, повороты которых будут осуществляться двумя существующими гидроцилиндрами, а зажимные устройства установить стационарно на поворотных плитах предлагаемых балансиров (рис. 6.2 и 6.3).

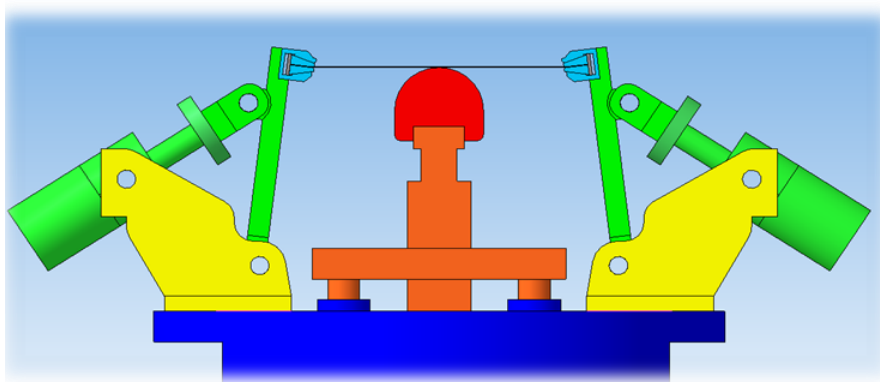


Рис. 6.2. Схема лабораторного обтяжного пресса
(начальное положение рабочих органов)

После определения начального положения балансиров и стола пресса можно переходить к непосредственному расчету величин перемещений рабочих органов пресса в процессе обтяжки листовой заготовки по разрабатываемому кинематическому методу, который предполагает определенную последовательность операций обтяжки, разделенных разгрузкой и разгибанием с разверткой тонколистовой детали. Для этого выполняется программная синхронизация верти-

кального движения гидроцилиндра движения стола и повороты балансиров. Таким образом, возможны любые кинематические движения зажимных устройств, точнее, зажатых краев листовой заготовки, обеспечивающие ее оборачивание поверхности обтяжного пуансона и ее дифференцированное растяжение, получая в конце процесса обтяжки вполне контролируруемую деталь.

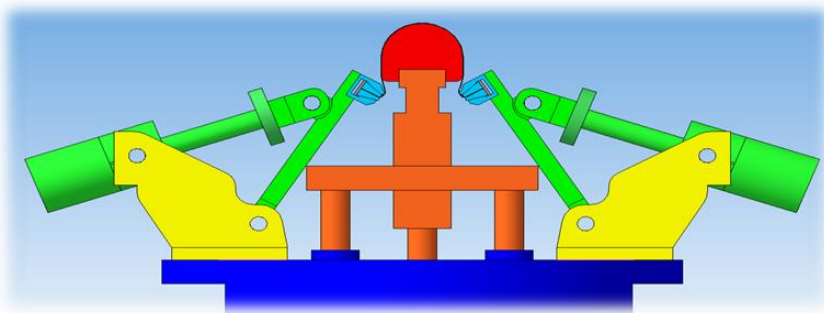


Рис. 6.3. Схема лабораторного обтяжного пресса
(конечное положение рабочих органов)

Траектории движений балансиров и стола пресса определяются достаточным количеством точек, которые будем называть шагами. Каждый балансир имеет фиксированные узлы, принадлежащие к своим осям вращения, а их поворот осуществляется за счет перемещения ключевого узла, например по «координате» X . Ключевые узлы располагаются в одной плоскости на углах балансиров, «левому» и «правому» балансиру принадлежит свой ключевой узел. Перевод на компьютерное управление лабораторного обтяжного пресса приводит его в сопоставление с французским прессом типа FEKD фирмы ACB-ALSTHOM.

Фирма ACB сумела создать для гидравлических прессов специализированную систему управления CIMER. Она была установлена как на прессах типа FEKD, так и на более современных обтяжных прессах FET и FEL, выпускаемых фирмой ACB-ALSTHOM в настоящее время. Система управления CIMER осуществляет управление

рабочими органами обтяжных прессов по перемещениям. Имеется обратная связь, выполняющая контроль процесса обтяжки по усилию. Благодаря обратной связи по усилию появилась возможность предварительного растяжения листовой заготовки для вывода материала за предел упругости. Кроме того, было предусмотрено за счет перемещения зажимных устройств осуществлять «оборачивание» листовой заготовкой обтяжного пуансона при дифференцированном растяжении с заданным нарастанием давления в гидравлической системе рабочих органов.

Результатом этого являются управляющие программы для ЧПУ обтяжных прессов, для расчета и формирования которых фирма АСВ предоставляет программное обеспечение S3F. Однако моделирование процесса формообразования обтяжкой является основной задачей, которая учитывает кинематические особенности обтяжного пресса при выполнении любой кинематической схемы формообразования обтяжкой. Но отследить распределения пластической деформации и толщин по поверхности листовой заготовки в любой момент времени с помощью программы S3F невозможно. Программа S3F не предоставляет инструментов для проведения такого анализа. Кроме того, введение санкций Евросоюзом изменило систему поддержки пользователя программным обеспечением.

Для этого необходимо дополнительно моделировать процесс формообразования обтяжкой на методе конечных элементов, который позволяет более точно анализировать данный процесс. Необходима подготовка других вычислительных блоков. Поэтому предлагаем новый расчетный вариант формирования управляющих программ, а точнее независимое программное обеспечение в рамках импортозамещения. Для этого необходимо модернизировать и перевести на программное управление лабораторный обтяжной пресс и на нем апробировать наши вычислительные блоки. В результате этой работы будет создан проект отечественного обтяжного пресса с ЧПУ и предложена отечественная система формирования управляющих программ взамен программного обеспечения S3F на новой технологической основе.

Для подготовки отдельных управляющих программ обтяжного прессы типа FEKD система управления должна быть оснащена блоком автоматизированного формирования программ управления. Система управления позволит путем компьютерного моделирования процесса формообразования обтяжкой сформировать и оптимизировать программу управления прессом. Встроенный в компьютерную систему блок автоматизированного формирования управляющих программ позволит осуществить адаптивное управление процессом формообразования обтяжкой, учитывающим разброс случайных факторов.

Использование адаптивной системы повышает надежность работы системы управления. Блок автоматизированного формирования управляющих программ должен быть согласован с САПР предприятия, эксплуатирующего обтяжное оборудование, в котором подготавливается исходная геометрическая и технологическая информация для работы системы управления. Это позволит обеспечить комплексное решение с учетом геометрической формы оболочки двойной кривизны при соответствующей параметризации ее поверхности.

Для этого необходимо выполнить большой объем вычислений на ЭВМ, провести анализ параметров управления с учетом кинематики обтяжного оборудования в вертикальных плоскостях симметрии обтяжного пуансона с учетом его положения относительно зажимов обтяжного прессы. Относительно данных реологических (механических) свойств листовой заготовки необходимо получить результаты пластометрических исследований большой группы металлов и сплавов на основе алюминия и титана в Самарском университете. Они могут лечь в основу данных, передаваемых предприятию для использования в практике производства авиационных оболочек при оптимизации новой технологии формообразования обтяжкой на обтяжном прессе типа FEKD с ЧПУ.

Автоматизированное формообразование обтяжкой на обтяжном прессе типа FEKD требует тщательной подготовки, начиная с обработки электронной модели самого обтяжного пуансона и заканчивая

расчетом управляющей программы. После моделирования процессов формообразования обтяжкой с использованием программ конечно-элементного анализа необходимо знать траектории движения зажимных губок в декартовых координатах стола пресса, соответствующих вертикальным плоскостям симметрии обтяжного пуансона при соответствующей параметризации его поверхности. Такое условие обеспечивает постоянное положение формообразующего контура в одной из вертикальных плоскостей обтяжного пресса. В связи с этим требуется разработать модуль для перевода декартовых координат стола в параметры рабочих элементов обтяжного пресса и наоборот – параметры в координаты.

6.3. Внедрение автоматизированной системы управления в лабораторный обтяжной пресс

Кроме процесса формообразования оболочек двойной кривизны на обтяжном оборудовании при модернизации обтяжного лабораторного пресса необходимо изменить гидравлическую систему. Как видно на рис. 6.4, гидроцилиндры растяжения и стола ГЦ1, ГЦ2, ГЦ3 работают от двухпоточной насосной установки, включающей многоступенчатый насос Н1 и предохранительный клапан КП1. Установка приводится в действие электродвигателем мощностью 3 кВт. Напряжением питания электродвигателя является напряжение 380 В.

Обтяжной лабораторный пресс имеет две автономные гидравлические системы. Одна система предназначена для приведения в действие цилиндров ГЦ1, ГЦ2, растягивающих заготовку при продольной обтяжке деталей, другая применяется для приведения в действие цилиндра подъема стола ГЦ3 при обтяжке.

Для того чтобы лабораторный обтяжной пресс был подобен прессу FEKD французской фирмы ACB_ALSTHOM, предлагается заменить распределители на ручном управлении на электромагнитные двухпозиционные распределители Р2 и Р3, которые управляются сигналами с датчиков либо по команде программы управления об-

тяжного пресса или с пульта управления. Но при этом систему с распределителями P1 и P4 не убираем. Она будет использоваться как дублирующая система. Данный прием взят из аэрокосмической области, а именно использование гидравлической системы как дублёра электрической. Разъединение основной и дублирующей системы производится с помощью вентилей ВН1, ВН2, ВН3, ВН4. При использовании основной системы вентили ВН1 и ВН4 должны быть закрыты.

В качестве автоматизированной системы управления предлагается стандартная двухуровневая иерархическая система управления (рис. 6.5), включающая «нижний» и «верхний» уровни и обеспечивающая контроль и управление объектом автоматизации (лабораторным прессом).

«Нижний» уровень системы состоит из нулевого и первого уровней. Нулевой уровень реализует функции получения и первичного преобразования информации о протекании процесса обтяжки и об оперативном состоянии оборудования. В аппаратном плане этот уровень представлен такими устройствами, как датчики положения, угловые датчики, исполнительные механизмы в виде распределителей. Связь с первым уровнем производится по стандарту RS-485.

Первый уровень в аппаратном плане представлен программируемым логическим контроллером (ПЛК) ОВЕН-150. Кроме задач регулирования и блокировок, основными задачами нижнего уровня будут являться:

- сбор информации с первичных преобразователей (датчиков);
- первичная обработка информации (масштабирование, подготовка к передаче и т.д.);
- управление исполнительными устройствами, обмен информацией со вторым уровнем системы через устройства связи;
- ретрансляция информации на контролируемые пункты, непосредственная связь с которыми по ряду причин невозможна.

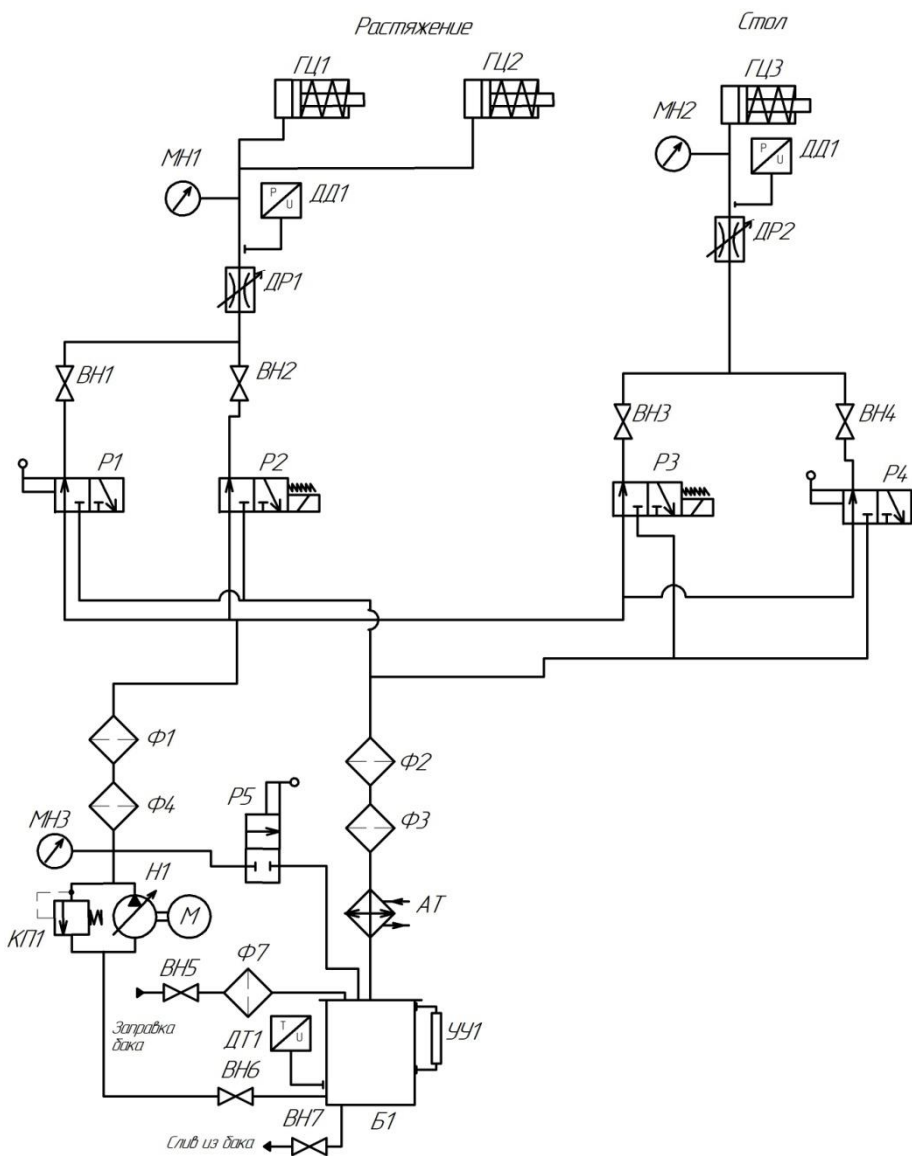


Рис. 6.4. Гидравлическая система лабораторного обтяжного пресса

Основу «верхнего» уровня системы управления составляет персональный компьютер (ПК), который предназначен для накопления, хранения, обработки (обобщения) и представления значительных массивов информации.

«Верхний» уровень также будет обеспечивать:

- сбор, обработку и хранение информации, поступающей с «нижнего» уровня системы;
- оперативный контроль и управление процессом формообразования обтяжкой;
- хранение информации в базе данных;
- предоставление информации пользователям системы по запросам пользователей.

Непосредственное управление процессом предполагается производить по командам с панели управления либо ПК, с помощью программного обеспечения.

Данная модель лабораторного обтяжного пресса даст возможность определять исходные положения рабочих органов пресса и обтяжного пуансона на столе пресса и предусмотреть паузы для обработки следующих операций:

- установка листовой заготовки в зажимы пресса;
- предварительное растяжение;
- выполнение рабочего хода между процессами обтяжки для разгрузки;
- предварительное оборачивание или разгибание без растяжения;
- предварительная обтяжка;
- повторная обтяжка;
- контроль прилегания оболочки к обтяжному пуансону;
- снятие давления и разжим листовой заготовки.

Контроль деформации растяжения рекомендуется осуществлять дефометром, включающим датчики деформации, блок 3-канального электронного усилителя, тарировочное устройство. Прибор дает ин-

формацию обратной связи на любом из трех каналов. При достижении заданной деформации усиленный до необходимой величины сигнал поступает в блок управления обтяжным прессом. Контроль размеров и формы производят обычными для листовых деталей способами и средствами. При обтяжке в автоматическом режиме производится полный контроль деформаций, т.е. производятся замеры локальных деформаций и абсолютной величины удлинения листовой заготовки согласно программному алгоритму с учетом группы сложности и геометрической формы детали обшивки.

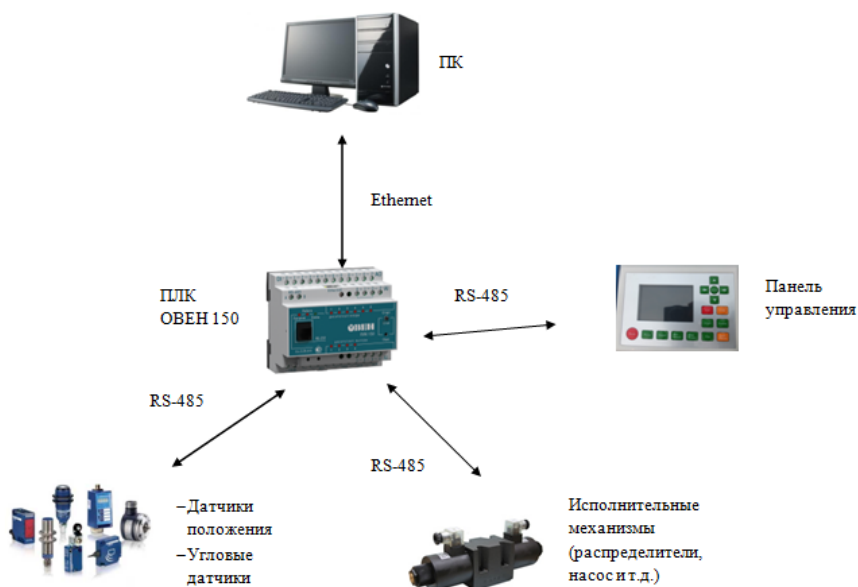


Рис.6.5. Структура системы управления

Использование лабораторного обтяжного оборудования с программным управлением потребует нового подхода к проектированию и отладке технологического процесса формообразования обтяжкой, применения при этом ПК для управляющей программы. Управление процессом обтяжки осуществляется в режимах «Ручное управление»;

«Шаговое перемещение» (полуавтоматический режим) и «Числовое программное управление» (автоматический режим). Наличие устройства контроля деформации позволяет осуществлять обратную связь по средней величине деформации либо абсолютной величине удлинения при отработке программных алгоритмов той или иной кинематической схемы. Для этого рекомендуют применять специально изготовленный плоский шаблон, который повторяет формообразующий контур соответствующего пуансона, равный по высоте и установленный сбоку от него на столе пресса. Перемещение зажимных губок будет происходить по круговым траекториям с плавным увеличением или уменьшением угла огибания с последующим растяжением, обеспечивая «чистое» формообразование без избыточного деформирования при выполнении технологических проб для оценки степени формообразования новых анизотропных листовых материалов, их устойчивости и предельного формоизменения при условии реализации симметричной обтяжки.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите кинематические особенности, которые необходимо реализовать при модернизации обтяжного лабораторного пресса.
2. Приведите этапы тщательной подготовки для организации автоматизированного формообразования обтяжкой на обтяжном прессе с программным управлением.
3. Перечислите общие кинематические особенности лабораторного обтяжного пресса и пресса FEKD французской фирмы ACB_ALSTHOM.
4. Приведите функции двухуровневой иерархической системы управления обтяжным прессом.
5. Какие задачи поставлены перед модернизацией обтяжного лабораторного пресса?

6.4. Применение автоматизированного лабораторного обтяжного пресса при выполнении технологических проб на формуемость анизотропных материалов

Освоение новых процессов формообразования обтяжкой высокотехнологичных оболочек требует минимизировать разнотолщинность до рекомендуемых пределов, но для этого нужна новая технология увеличения степени формоизменения при обтяжке, достигаемой практически за один переход без локализации деформации утонения, и выравнивающая их значения в различных областях листовой заготовки. Кроме того, необходимы знания о механических свойствах анизотропных материалов и о влиянии реологических свойств деформируемых листов на напряженное состояние очага деформации, определяющее характер развития деформации в этих процессах и формирующее качество готового изделия.

Испытания технологических свойств листового материала сводится к испытаниям механических, физических свойств, поскольку технологические свойства, от которых зависит формообразуемость листа в операции, определяется частью этих свойств. Технологическая проба представляет собой пробное выполнение операции на образцах с помощью лабораторной оснастки и лабораторного испытательного оборудования, моделирующих производственный процесс. Она позволяет определить показатели формообразуемости анизотропной листовой заготовки и сравнить их с показателями, удовлетворяющими требования производства. Однако многие технологические пробы и методы испытаний должны быть стандартизированы.

Процесс формообразования обтяжкой осуществляется по различным схемам обтяжки в зависимости от геометрической формы поверхности обтяжного пуансона и материала листовой заготовки. Наличие устройств контроля растяжения листовой заготовки в отдельных локальных местах оболочки двойной кривизны позволяет осуществить при отработке управляющей программы контроль деформационного поля в зависимости от пространственного перемещения зажимных губок, обрабатывая псевдотраекторию их движения

относительно выбранного продольного контура на поверхности обтяжного пуансона.

Перемещения зажимных губок пресса по псевдотраектории возможно с плавным увеличением угла охвата без растяжения либо с растяжением листовой заготовки. Псевдотраектории перемещения зажимных губок пресса осуществляются за счет синхронизации движений левого и правого балансиров и стола пресса согласно управляющей программе. Балансиры несут на себе зажимные губки, имеют горизонтальную ось вращения и приводятся в движение гидроцилиндрами. Рабочий стол пресса установлен на центральной опоре гидроцилиндра. Он имеет шарнирное соединение со станиной пресса для того, чтобы осуществить наклон стола вокруг центральной оси.

Автоматизированный лабораторный обтяжной пресс обеспечивает реализацию различных схем формообразования обтяжкой. Выбор рациональной схемы нагружения в процессе обтяжки осуществляется с учетом идентификации геометрической формы оболочек двойной кривизны. Параллельно с отработкой программы составляется технологический процесс получения оболочки определенной геометрической формы.

При этом указывается предельная деформация растяжения по каждому переходу с обеспечением более равномерного распределения деформации вдоль «клюва» зажимов по сечению листовой заготовки за счет различных способов расширения технологических возможностей процесса, уменьшающих растягивающие деформации в зонах «опасного» сечения и исключают складкообразование при обтяжке тонколистовых оболочек.

Новая технология формообразования обтяжкой сводится к анализу отдельных формообразующих операций, набор которых позволит из листовой заготовки указанного материала и заданных размеров и толщины получить оболочку двойной кривизны минимальной разнотолщинности. Совмещение различных способов обтяжки: предварительной и повторной обеспечивает возможность управления «встречным» движением границ деформационного поля

с достижением равномерного утонения листовой заготовки в различных сечениях оболочки двойной кривизны. Это достигается за счет предварительного формообразования средней части листовой заготовки и кинематической управляемости прессы с ЧПУ при минимально необходимом количестве управляемых параметров. Появилась возможность получения сложных по геометрической форме оболочек при минимально необходимых деформациях растяжения листовой заготовки за счет реализации «чистой» формовки без разрывов и складок.

Для подготовки отдельных управляющих программ система управления лабораторного обтяжного прессы должна быть оснащена блоком автоматизированного формирования программ управления. Система управления позволит путем компьютерного моделирования процесса формообразования обтяжкой сформировать и оптимизировать программу управления прессом. Встроенный в компьютерную систему блок автоматизированного формирования управляющих программ позволит осуществить адаптивное управление процессом формообразования обтяжкой, учитывающим разброс случайных факторов.

К ним можно отнести неточность раскроя листовой заготовки, погрешности при ее зажиме в губках при установке на первом и последующих переходах, а также отсутствие надежных экспериментальных данных о реологических (механических) свойствах отожженного или свежезакаленного материала листовой заготовки из алюминиевых сплавов с учетом его старения во времени. Пластометрические исследования должны рассматриваться уже не как вспомогательные испытания, необходимые для получения расчетных данных о механических свойствах металлов и сплавов, а как новое научно-экспериментальное направление исследований сложных реологических свойств деформируемых материалов, в том числе из анизотропных материалов.

Известно, что существенное влияние на реологические свойства листового материала оказывают история нагружения и условия по монотонности деформации. Для анализа этих условий использу-

ются различные теоретические подходы к описанию реологического поведения металлов и сплавов при различных законах развития деформации во времени. Пластометрические исследования позволяют расширить возможности изучения и предельной пластичности деформируемого листового материала с применением феноменологических моделей и вероятностного характера его разрушения. Это требует методологического и теоретического обобщения, разработки принципов практического применения результатов проводимых исследований.

Использование адаптивной системы повышает надежность работы системы управления. Блок автоматизированного формирования управляющих программ должен быть согласован с блоком, в котором подготавливается исходная геометрическая и технологическая информация для работы системы управления. Это позволит обеспечить комплексное решение с учетом геометрической формы оболочки двойной кривизны при соответствующей параметризации ее поверхности. Для этого необходимо выполнить большой объем вычислений на ЭВМ, провести анализ параметров управления с учетом кинематики лабораторного обтяжного прессы.

Относительно данных реологических (механических) свойств анизотропной листовой заготовки необходимо получить результаты пластометрических исследований большой группы металлов и сплавов на основе алюминия в Самарском университете. Они могут лечь в основу данных, передаваемых предприятию для использования в практике производства авиационных оболочек при оптимизации новой технологии формообразования обтяжкой на современных металлоформовочных прессах с программным управлением.

Автоматизированное формообразование обтяжкой анизотропной листовой заготовки за счет создания условий симметричной обтяжки требует тщательной подготовки, начиная с обработки электронной модели самого обтяжного пуансона и заканчивая расчетом управляющей программы. После моделирования процессов формообразования обтяжкой с использованием программ конечно-элементного анализа необходимо знать траектории движения зажим-

ных губок в декартовых координатах стола прессы, соответствующих вертикальным плоскостям симметрии обтяжного пуансона при соответствующей параметризации его поверхности. Такое условие обеспечивает постоянное положение формообразующего контура в одной из вертикальных плоскостей обтяжного прессы. В связи с этим требуется разработать модуль для перевода декартовых координат стола в параметры рабочих элементов обтяжного прессы и наоборот – параметры в координаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для деформированных материалов анизотропия свойств является скорее правилом, чем исключением, т.к. анизотропия физико-механических свойств является следствием кристаллического строения металлических материалов и их последующего текстуробразования при больших пластических деформациях, например в процессе прокатки листов. Наиболее широко распространенные в авиационной технике алюминиевые листовые материалы наряду со многими преимуществами имеют и существенный недостаток в виде резкой анизотропии свойств. В результате при последующем формообразовании обтяжкой из таких листовых заготовок происходит преимущественное развитие деформации по толщине листа и его разрушение. Искажаются форма и размеры оболочек двойной кривизны, возникает фестнообразование и разнотолщинность стенки детали обшивки, что в конечном итоге приводит к завышению толщины листовых заготовок, увеличению веса конструкции самолета.

Данные недостатки алюминиевых сплавов могут быть устранены, если при прокатке целенаправленно формировать в листовых материалах такую кристаллографию структуры, при которой не только устраняются отмеченные искажения формы и размеров изделий, но и обеспечивается повышение деформационных возможностей листовых материалов и эксплуатационных характеристик самолета. Однако для этого необходимо создать условия симметричной обтяжки оболочек двойной кривизны. Они предусматривают соответствие текстурных осей симметрии свойств листовой заготовки и направлений линий кривизн, пересекающихся в геометрическом полюсе поверхности обтяжного пуансона, а также местоположение вертикальной плоскости симметрии обтяжного пресса.

Только от такого механического совмещения главных осей анизотропии листовой заготовки при ее обтяжке с ортогональными направлениями главных кривизн, проходящих через точку касания плоского листа в геометрическом полюсе поверхности обтяжного пуансона, можно повысить эффективность использования анизотропных листовых материалов. Целевое использование анизотропных листовых материалов обеспечит получение оболочек двойной кривизны симметричной обтяжкой практически за один переход без локализации деформации утонения и выравнивания их значений в различных областях листовой заготовки.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выбор кинематической схемы формообразования обтяжкой обво-дообразующих оболочек сложной пространственной формы / В.А. Михеев, Ю.С. Клочков, А.А. Кузина [и др.] // Вестник СГАУ. – Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – №5 (36). – С. 239-245.
2. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капуткина. – 3-е изд. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
3. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов / Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
4. Методы исследований текстур в материалах: учеб.-метод. пособие / [М.Л. Лобанов и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. – 115с.
5. Смирнов, В.С. Текстурирование металлов при прокатке / В.С. Смирнов, В.Д. Дурнев. – М.: Металлургия, 1971. – 256 с.
6. Вишняков, Я.Д. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко. – М.: Наука, 1979. – 343 с.
7. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ. изд. – М.: Металлургия, 1974. – 432 с.
8. Пластометрические исследования металлов. / Н.А. Мочалов, А.М. Галкин, С.Н. Мочалов [и др.]. – М.: Интермет Инженеринг, 2003. – 318 с.
9. Современные технологические процессы сборки планера самолета / кол. авторов; под ред. Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 304 с.
10. Кузмин, В.Ф. Обеспечение требований к аэродинамическим обводам самолета в авиационном производстве / В.Ф. Кузмин. – М.: Машиностроение, 2002. – 272 с.

11. Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения: системы и технологии CALS: учеб.-метод. пособие / [А.Н. Ковшов и др.]. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 304 с.
12. Фокс, А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
13. Изометрические условия при формообразовании обтяжкой оболочки двойной кривизны минимальной разнотолщинности. / В.А. Михеев, С.Г. Дементьев, В.П. Самохвалов [и др.] // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15. – № 6-1. – С. 161-166.
14. Михеев, В.А. Основы расчета процесса формообразования обтяжкой тонких оболочек двойной кривизны / В.А. Михеев, С.В. Сурудин // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19. – № 1 (3). – С. 555-562.
15. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
16. Гречников, Ф.В. Проектирование оптимальной кристаллографии структуры конструкционных материалов / Ф.В. Гречников, В.Ю. Арышенский, Я.А. Ерисов // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2018. – Т. 20. – № 4. – С. 5-12.
17. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

Учебное издание

*Михеев Владимир Александрович,
Гречникова Анна Федоровна*

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
АНИЗОТРОПНОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ЗА СЧЕТ
СОЗДАНИЯ УСЛОВИЙ СИММЕТРИЧНОЙ ОБТЯЖКИ**

Учебное пособие

Редактор Т.К. К р е т и н и н а
Компьютерная верстка Л.Р. Д м и т р и е н к о

Подписано в печать 18.04.2019. Формат 60x84
1/16. Бумага офсетная. Печ. л. 7,25.
Тираж 200 экз. (1 з-д 1-25). Заказ № 55.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

