

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБТЯЖКОЙ НА ПРИНЦИПАХ СИММЕТРИИ

© 2024 В.А. Михеев, В.А. Тарасов, М.М. Баранова, Т.Ю. Климова, Т.С. Саргаева, Д.И. Воробьев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 19.01.2024

Предполагаем, что понятие симметрии играет важную роль в совершенствовании теории и практики процесса формообразования обтяжкой несущих тонколистовых оболочек двойной кривизны, что гарантирует получение обводообразующих деталей обшивок современных самолетов точной геометрической формы и минимальной разнотолщинности. Чтобы понять наше предположение, необходимо вспомнить о том, что **сложность** теории пластических оболочек состоит в геометрической и физической нелинейности и необходимости учета сдвиговых напряжений и деформаций по поверхности оболочки и ее переменности по кривизне, поэтому до сих пор отсутствует единый подход при анализе формообразующих процессов обтяжки из листового материала. Данное предположение касается только тонколистовых оболочек двойной кривизны, обеспечивающих различное изометрическое положение (изгибаемые поверхности одна на другую) открытой поверхности в целом, а не замкнутой, как сфера. Поэтому процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки в оболочковую деталь самолета обладает некоторой формой симметрии относительно заданного набора преобразований поверхности, если при их выполнении не поменяются определенные свойства или соотношения, так называемые инварианты набора преобразований.

Ключевые слова: формообразование, обтяжка, принципы симметрии, тонколистовые оболочки, двойная кривизна, разнотолщинность, изометрическое положение, листовая заготовка.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-53-62

EDN: JQKFЕК

ВВЕДЕНИЕ

Если интуитивным путем устанавливается полный состав элементов симметрий некоторой системы, то задача поиска рациональной схемы преобразования самой системы и сопутствующих уравнений значительно упрощается. Уже не нужно перебирать всевозможные схемы преобразований и уравнения, достаточно ограничиться теми, которые имеют требуемые симметрии. Таким образом, симметрия помогает перейти от интуиции к построению модели эффектов, как результат различных сочетаний групп элементов симметрий или заданного набора преобразований.

В ряде случаев симметрия является достаточно очевидным фактом. Например, для опре-

деленного геометрического объекта, в том числе и для оболочек двойной кривизны нетрудно увидеть эту симметрию и показать путем преобразований ее поверхности в соответствующей системе координат, в результате которых поверхность стала регулярной и изометричной по отношению ее изгибания. В этом случае понятие симметрии гораздо шире и ее можно понимать как неизменность (инвариантность) каких-либо свойств объекта, например, одинаковые метрики. Две поверхности являются изометричными (изгибаемыми одна на другую), если между ними можно установить взаимно однозначное соответствие при существующей параметризации. При расширении понятия симметрии это может быть не только геометрический объект, но и закон, математическая формула или уравнение.

Например, гипотеза шаровой изотропии поликристаллического материала предопределила в основном феноменологический подход к процессу формообразования обтяжкой листового материала. В результате такой подход не позволил эффективно использовать преимущества анизотропии свойств, который обладает текстурованный лист за счет естественной анизотропии кристаллов. Характер анизотропии определяется наличием в листовом материале тех или иных преимущественных кристаллогра-

Михеев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением. E-mail: vaticheev@ramler.ru

Тарасов Владислав Александрович, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: tarasov.ali@yandex.ru

Баранова Марина Михайловна, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: marinaaaaaad@mail.ru

Климова Татьяна Юрьевна, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: klimova-7979@mail.ru

Саргаева Тамара Сергеевна, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: sargaeva1999@mail.ru

Воробьев Дмитрий Игоревич, студент.

E-mail: Dvorobev84@gmail.com

фических ориентировок, а текстура прокатки имеет совокупность элементов симметрии. Как правило, направление растяжения при обтяжке не совпадало с направлением прокатки листового материала.

Проблема в том, что в представлении поверхности обтяжного пуансона принята жесткая привязка к обводообразующим контурам самолета, кривизна которых характеризуется переменными величинами, закон изменения которых определяется теоретическими контурами элементов силового каркаса, составленными из шпангоутов и стрингеров. При этом сама поверхность детали обшивки рассматривается не как целая, а как составная из продольных полосок весьма малой ширины в направлении обводообразующих контуров самолета. В этом случае симметрия поверхности обтяжного пуансона в нашем понимании выпадает. Отсутствует обобщение кривых, которые, естественным образом, могли быть отнесены к криволинейной системе линий кривизны в виде сетки поверхности. Доказано, что всякую поверхность можно отнести к линиям кривизны и выделить главные направления поверхности, которые сопряжены и одновременно ортогональны [1].

Поэтому представление поверхности в виде продольных полосок весьма малой ширины не дают никакой информации о геометрической форме оболочки. Формообразующий продольный контур и центральный поперечный контур поверхности обтяжного пуансона не попадают в вертикальные плоскости симметрии растяжно-обтяжного пресса. Поэтому отсутствовали такие понятия, как симметрия геометрической формы и геометрический аспект деформации оболочки. Это привело к нарушению симметрии внешней нагрузки при обтяжке с растяжением, к неравномерной деформации растяжения, поперечному сдвигу листового материала при формообразовании оболочки по поверхности такого обтяжного пуансона и при усложнении пространственной формы к гофрообразованию [2,3].

Сможем ли мы изменить такую производственную ситуацию и «напрямую» построить геометрическую модель поверхности обтяжного пуансона пресса с учётом направления прокатки листовой заготовки и сориентировать поверхность обтяжного пуансона относительно основной линии кривизны по формообразующему контуру, направление которого совпадает с направлением растяжения при обтяжке. Экспериментально с помощью верификации расчетной модели уже доказали, что такое совпадение возможно, что обеспечивает симметричный характер развития очага деформации, и преимущественного образования зоны пластической деформации в центральной части листовой заготовки. В результате необходимо преобразо-

вать процесс формообразования обтяжкой оболочковых деталей обшивок в соответствующей системе координат. Так что эффекты, лежащие на принципах симметрии, приведут к точности получения геометрической формы оболочки к равномерному изменению толщины в различных областях листовой заготовки, отсутствию складок и разрыва и [4,5].

Путь от выделения инвариантов до аналитического оформления метода расчета метрик поверхности оболочки, к которым можно отнести кривизны линий, и требуемых величин деформации в характерных точках поверхности обшивки почти завершен. Считаем, что процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки в оболочковую деталь самолета обладает некоторой формой симметрии относительно заданного набора преобразований поверхности, если при их выполнении не поменяются определенные свойства или соотношения, так называемые инварианты набора преобразований. Предлагаемая система форм симметрии в целом не так далека от совершенства, но уже сейчас она может создать устойчивый процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки и предложить более рациональную кинематическую схему на растяжно-обтяжном прессе.

1. ОБОСНОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ПОДХОДА В ГЕОМЕТРИИ ОБОЛОЧКИ, ГРУППИРОВАНИЕ НАБОРА ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Наиболее характерным свойством данного типа деталей является то, что обшивка является незамкнутой оболочкой. Таким образом, срединная поверхность, толщина стенки, граничный контур и даже «вершина» оболочки как особая точка O , в совокупности определяют геометрию поверхности оболочки в целом. Однако подготовить нужную геометрическую модель поверхности оказалось непростой задачей, требующей значительных затрат времени. Для этой цели использовали существующие САД-системы широкого применения и методы, позволяющие описывать на ЭВМ любые контуры и строить любые изопараметрические линии, в том числе сопряженную ортогональную сетку из линий кривизны поверхности. Сетка линий кривизны поверхности связана с возможностью определения ее локальной формы в вершине поверхности обтяжного пуансона, причем в главных осях кривизн, используя метрику (функцию, задающую расстояние между двумя точками). Такой подход получил развитие в дифференциальной геометрии в отличие от геометрии поверхности в целом. В дифференциальной геометрии «квадрат элемента длины» поверхности называют первой фундаментальной формой и используется «запись в дифференциалах» [6].

Это позволило нам выполнить анализ внутренней геометрии поверхности оболочки, основанной на переменной кривизне поверхности согласно обводу самолета, ибо такое свойство, как переменная кривизна, может изменяться от точки к точке, перетекая из одной геометрии в другую. Мы сосредоточились на свойствах малой области окрестности «вершины» оболочки (точка O). Один из подходов к определению такого рода поверхности состоит в том, что она представляется как объединение лоскутов, каждый из которых задается уравнениями, причем считается, что координаты меняются в открытом множестве, например как в круге. При пересечении двух таких лоскутов возникают две системы координат. Требуется, чтобы одни координаты выражались через другие посредством непрерывных или «гладких» функций.

Такой подход – «наложение лоскутов друг на друга» – лежит в основе определения топологического или гладкого многообразия и лег в основу классической дифференциальной геометрии многообразий. Неформально многообразием M называется то, что локально устроено, как евклидово пространство», т.е., можно считать, что в окрестности всякой точки m , принадлежащей многообразию, имеются локальные координаты (u^1, u^2, \dots, u^n) с нулем в точке m и очевидно не единственной. Тогда можно сказать, что риманово многообразие приводится к евклидову многообразию.

Однако нам удобнее представить двумерную поверхность как объединение лоскутов, стыкующихся друг с другом, по участку поперечной границы, при этом для центрального лоскута, вблизи точки O , тип поверхности оболочки может быть представлен типом поверхности оболочки второго порядка. Остальные лоскуты поверхности будут левыми и правыми, имеющими поперечные границы с центральным лоскутом. При этом некоторые свойства поверхностей лоскутов, могут быть исследованы независимо от внешнего пространства. Такие свойства поверхностей называются внутренними, а геометрия, основанная на изучении дифференциальной фундаментальной формы, – внутренней геометрией.

Предложенная процедура геометрической интерпретации поверхности обтяжного пуансона связана с переходом от внешних поверхностей, привязанной к обводообразующим контурам самолета к поверхности двойной кривизны, привязанной к сетке главных линий кривизны, отнесенная к категории гауссово-параметрических поверхностей. Тогда свойства этой поверхности определяются первой фундаментальной формой поверхности приведения и относятся к внутренней геометрии. Такой подход стал основным инструментом для измерения кривизны поверхности в точке, например, тип

кривизны поверхности незамкнутой оболочки в целом можно получить, исследовав инвариант функций главных кривизн в «вершине» поверхности, известный как гауссова кривизна. Сегодня ее принято называть полной кривизной или просто кривизной.

Каждая поверхность может быть представлена как регулярная параметрическая поверхность. У этой поверхности параметризующее отображение взаимно однозначно с образом, что имеет место при локальном подходе к геометрии поверхности, когда рассматривается «вершина» оболочки как особая точка O : три типа точек (эллиптическая, гиперболическая и параболическая). В нашем случае рассматриваем эллиптическую точку и касательную горизонтальную плоскость к ней, в которой лежат два ортогональных главных направления x_0 и y_0 , проходящих через точку O и вместе с нормалью z_0 образуют репер (x_0, y_0, z_0) . Репер (x_0, y_0, z_0) в касательной плоскости в точке O считаем общим базисом, соответствующим локальным координатам поверхности оболочки (рисунок 1).

Пересечение поверхности с плоскостью, проходящей через нормаль z_0 , представляет собой плоскую кривую, называемую нормальным плоским сечением поверхности. В нашем случае имеем две плоские кривые. Продольная кривая (формообразующий продольный контур, длиной $2L$) и поперечная кривая (центральный поперечный контур, длиной $2l$), пересекаются в точке O . Центральный лоскут имеет осевую симметрию в виде оси $s - s$.

Кривизны этих нормальных сечений в точке O являются главными кривизнами этих линий среди множества линий, проходящих через эту точку. Направления x_0 и y_0 в виде касательных векторов к этим линиям, расположены на касательной плоскости P к поверхности. Кроме того, имеем две вертикальные плоскости F_1 и F_2 , проходящие через нормаль z_0 и примем их за вертикальные плоскости симметрии растяжно-обтяжных прессов, например, РО-3М и РО-630. К числу основных геометрических параметров оболочки отнесем:

- радиусы кривизны контуров сечений поверхности плоскостями симметрии прессы F_1 и F_2 в районе точки O : R_{10} (продольный) и R_{20} (поперечный);
- длину контура продольного сечения поверхности $2L$ плоскостью симметрии F_1 ;
- длину контура краевого сечения поверхности $2l_k$ плоскостью, параллельной F_1 ;
- прогиб контура поперечного сечения поверхности f_0 плоскостью симметрии F_2 ;
- углы охвата: продольный $2\alpha_k$ и поперечный $2\beta_k$;
- величину a , равную $(R_{10} - R_{20})$;
- ширину оболочки $2B$.

Контуры сечений поверхности оболочки плоскостями симметрии F_1 и F_2 представляют собой плоские кривые, пересекающиеся в точке O с локальными радиусами R_{1o} и R_{2o} . Величины, обратные радиусам:

$$k_{1o} = \frac{1}{R_{1o}}; k_{2o} = \frac{1}{R_{2o}}, \quad (1)$$

являются главными кривизнами поверхности в точке O , обладающими свойствами экстремальности: одна из них максимальная, а другая – минимальная.

При этом произведение главных кривизн определяет полную кривизну поверхности в точке O :

$$K_o = k_{1o} \cdot k_{2o}, \quad (2)$$

В системе координат x_o и y_o поверхность оболочки в окрестности точки O можно представить как соприкасающуюся квадратичную поверхность (поверхность приведения), ориентированную относительно нормальных сечений поверхности, соответствующих направлениям x_o и y_o .

$$z_o = \frac{1}{2} \cdot (k_{1o} \cdot x_o^2 + k_{2o} \cdot y_o^2). \quad (3)$$

Явная форма задания поверхности оболочки в виде (3) используется для нахождения свойств внутренней геометрии в лоскуте центральной части поверхности оболочки. Подобно тому, как

в бесконечной близости к точке кривой близка некоторая дуга окружности, так и к поверхности обшивки в окрестности точки O близка некоторая соприкасающаяся двумерная поверхность приведения. Вследствие этого, в зависимости от положительного знака гауссовой кривизны, точке O присваиваем название эллиптической.

В результате можно определить свойства внутренней геометрии локальной формы поверхности в точке O , принадлежащей вершине поверхности обтяжного пуансона. Такой подход можно использовать и для других форм, подбирая к ней соприкасающуюся в точке O классическую поверхность второго порядка, что существенно облегчает преобразование процесса формообразования обтяжкой в основе предполагаемой кинематической схемы на растяжно-обтяжном прессе.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАННОГО НАБОРА ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРОЦЕССА ОБТЯЖКИ С РАСТЯЖЕНИЕМ НА ПРИНЦИПАХ СИММЕТРИИ

Устойчивое управление процессами формообразования обтяжкой основано на первоначальном положении очага пластической деформации в центральной зоне листовой заготовки. Для этого нужно правильно позиционировать поверхность обтяжного пуансона на столе прес-

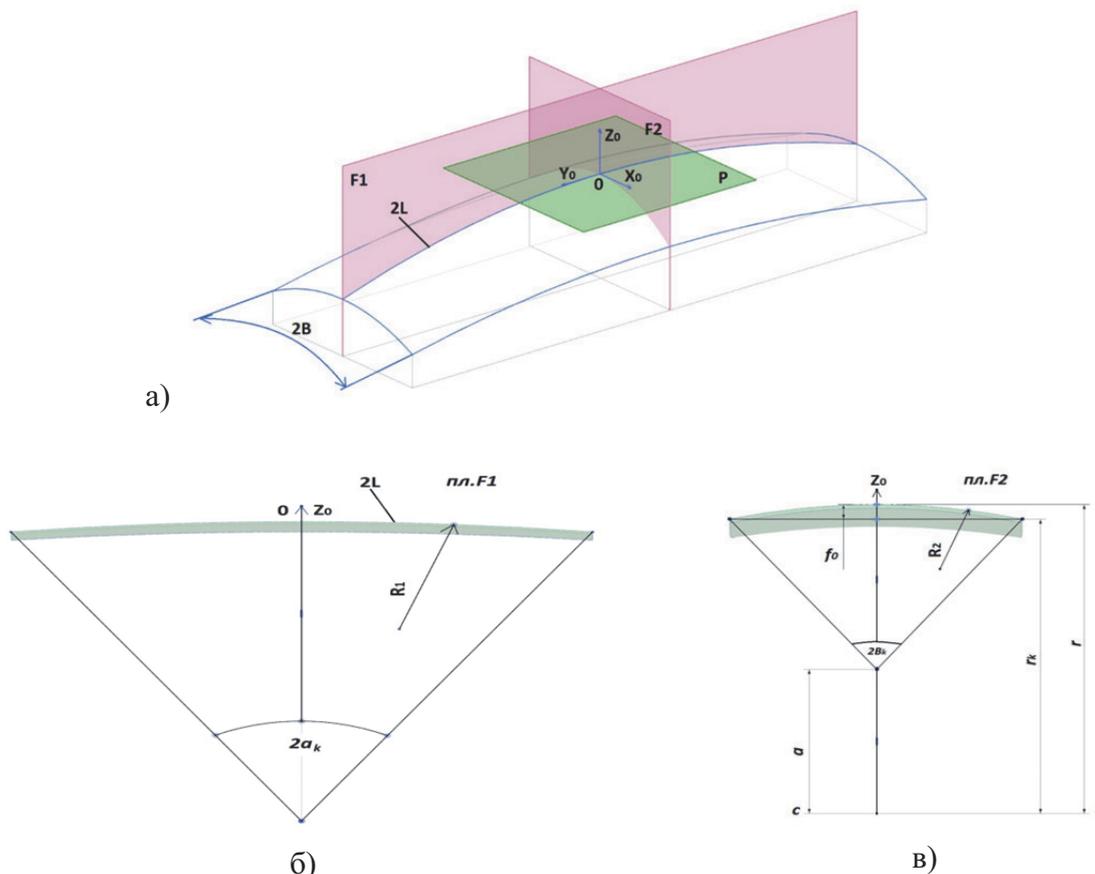


Рисунок 1 – а) поверхность оболочки двойной кривизны; б) формообразующий продольный контур (2L); в) центральный поперечный контур с прогибом (f_o)

са, знать траекторию движения зажимов относительно верхнего формообразующего гребня поверхности, проходящего через вершину обтяжного пуансона при его местоположении в вертикальной плоскости симметрии растяжно-обтяжного пресса.

Рассматривая определенные геометрические образы, например: оболочка двойной кривизны, направление прокатки листовой заготовки, поверхность обтяжного пуансона, его формообразующий гребень, эллиптическая точка O центрального лоскута и вертикальные плоскости симметрии растяжно-обтяжного пресса, отчетливо вырисовывается необходимость унификации учения о симметрии. Ее теоретической основой является математика, теория групп, свойства объектов, проявляемые в нашем опыте.

Мы поставили цель рассмотреть ряд разделов естествознания (дифференциальная геометрия поверхностей, теория тонких оболочек, дифференциальная топология, теория напряжений и деформаций, тензорное исчисление, тензорная кристаллография), используя простые представления точечной симметрии геометрических образов путем соответствующих преобразований при выборе системы координат возможность сохранять инвариантность, в

результате которых они не изменяют конфигурации. Геометрически закономерное равенство может быть конгруэнтным или зеркальным.

Мы рассматривали порядок ведения процесса формообразования согласно способу формообразования обтяжкой обтяжки деталей оболочек незначительной двойной кривизны [7] с помощью разработанного компьютерного приложения системы управления для виртуального отображения реального растяжно-обтяжного пресса РО-630 (рисунок 2). В дополнение к этому, был разработан графический интерфейс пользователя [8], который включает управление и позиционирование каждым рабочим органом виртуального растяжно-обтяжного пресса (рисунок 3).

Для нашей практики наиболее важными элементами симметрии является, прежде всего, касательная плоскость P к поверхности оболочки в точке O и вертикальные плоскости симметрии F_1 и F_2 растяжно-обтяжного пресса, при которой два любых направления, симметричных относительно плоскостей, будут иметь одинаковые свойства. Вторым элементом симметрии являются оси симметрии, например, пара главных осей анизотропии в плоскости листового материала. Третьим элементом являются два

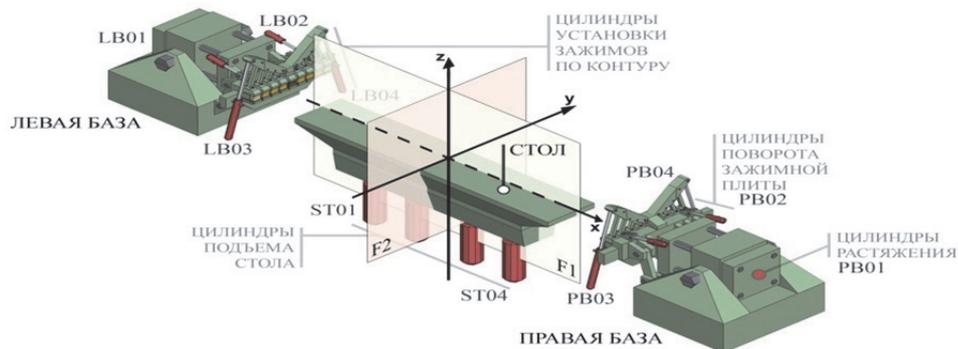


Рисунок 2 – Трехмерная виртуальная модель растяжно-обтяжного пресса РО-630-11

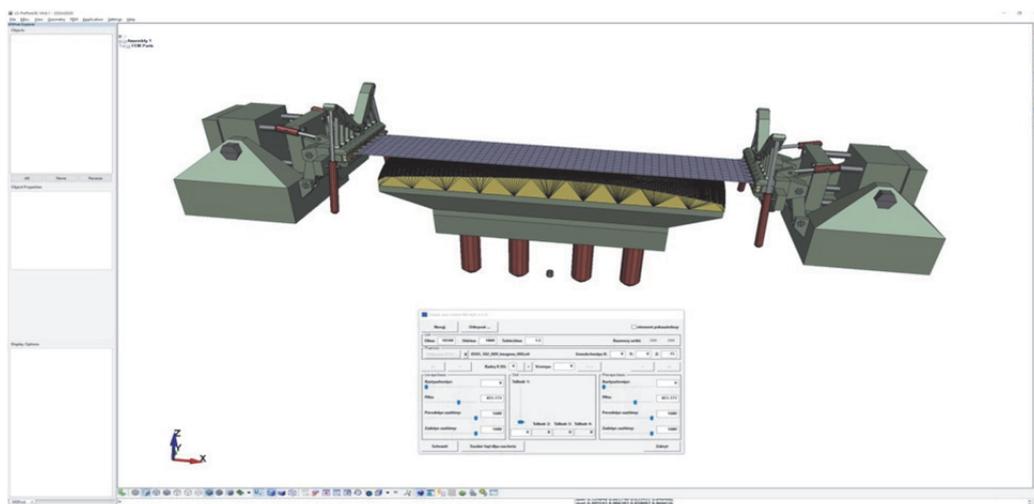


Рисунок 3 - Интерфейс пользователя для виртуальной модели растяжно-обтяжного пресса

главных направления в касательной плоскости к поверхности оболочки в точке O . Можно показать, что главным направлениям соответствуют главные кривизны, одна из которых является максимальной, а другая – минимальной по отношению к кривизнам всех плоских линий нормальных сечений, проходящих через точку O .

Вершина поверхности в точке O является четвертым элементом симметрии. Продольная кривая (формообразующий продольный контур) и поперечная кривая (центральный поперечный контур) пересекаются в точке O и вложены в вертикальные плоскости симметрии F_1 и F_2 растяжно-обтяжного пресса. При этом, двигая репер (x_0, y_0, z_0) вдоль продольной кривой (формообразующий контур) влево, а потом вправо можно изучать саму поверхность оболочки и выхватывать закономерности изменения кривизны от точки к точке, переходя с одного лоскута на другой.

В результате будем иметь случай с поверхностью, связанный со сменой координат и называемый диффеоморфизмом. Стандартный подвижный репер (x_0, y_0, z_0) двигается основанием по поверхности по разным направлениям (в нашем случае достаточно вдоль отображения продольной и поперечной кривой) есть просто совокупность реперов, т.е. имеется стандартный базис касательных плоскостей, каждый из которых «приклеен» к соответствующей точке поверхности.

Приведенные элементы симметрии являются в нашем случае участниками заданного набора преобразований: отражение в плоскости, поворот и наклон вокруг оси и инверсия, как центр симметрии. Они задают условия симметричной обтяжки, которые предусматривают, прежде всего, соответствие текстурных осей симметрии свойств листовой заготовки и направлений линий кривизн оболочки, пересекающихся в вершине поверхности обтяжного пуансона с направлением обтяжки, соответствующей продольной плоскости вертикальной симметрии F_1 растяжно-обтяжного пресса.

Согласно принципу симметрии, мы интуитивно понимаем не тот или иной частный случай симметрии, а их совмещение. Сначала вложим плоскость листовой заготовки в касательную плоскость P в точке O к вершине поверхности обтяжного пуансона, а затем совместим текстурные оси симметрии свойств листовой заготовки и два главных направления в касательной плоскости к поверхности оболочки в точке O . Остается только вложить эти оси и направления в вертикальные плоскости симметрии растяжно-обтяжного пресса F_1 и F_2 и получить при их пересечении нормали z_0 к вершине поверхности обтяжного пуансона в точке O . В результате получаем репер (x_0, y_0, z_0) в точке O , который счита-

ется общим базисом для всех элементов симметрии и заданного набора преобразований.

Отличительной особенностью является наличие контактного трения листовой заготовки с поверхностью обтяжного пуансона и незамкнутый контур приложения растягивающей нагрузки (только к узким сторонам листовой заготовки). Формообразование осуществляется при практически нестационарном очаге деформации. Форма очага деформации и направление его развития при обтяжке с растяжением сохраняется из-за максимальной контактной площади листовой заготовки с поверхностью обтяжного пуансона.

Однако до момента завершения формообразования заготовки процесс обтяжки с растяжением сопровождается не увеличением напряжений, а изменением ширины очага деформации. На этом этапе формообразования напряжения не зависят от внешнего трения, и распределяются равномерно по сечениям оболочки в направлении растяжения заготовки. Влияние данного этапа на предельные возможности деформирования заготовки при обтяжке с растяжением проявляется значительно. Данный этап можно расширить за счет сохранения местоположения наибольших деформаций в средней части листовой заготовки, обеспечивая симметричный характер развития очага деформации за счет выбранной кинематической схемы формообразования для растяжно-обтяжного пресса.

Для этого надо построить геометрическую модель поверхности обтяжного пуансона с учётом направления прокатки листовой заготовки и сориентировать поверхность обтяжного пуансона относительно основной линии кривизны по формообразующему контуру, направление которого совпадает с направлением растяжения при обтяжке. Такое совпадение на этапе формообразования обеспечивает контроль симметричного развития очага деформации, и преимущественного образования зоны пластической деформации в центральной части листовой заготовки за счет действия эффекта принудительного положения плоской и достаточно длинной листовой заготовки в прямолинейно расположенных дискретных зажимных устройствах пресса.

Обеспечивается пластическое формоизменение средней части листовой заготовки до момента получения формы поверхности приведения в окрестности вершины обтяжного пуансона и решается проблема формообразования обтяжкой оболочковых деталей обшивок, что приводит к равномерному изменению толщины в различных областях листовой заготовки и отсутствию складок и разрыва. Это позволяет увеличить степень формоизменения при минимальной вероятности обрыва листа на одном из

свободных ее участков между краем пуансона и зажимами пресса.

Напряженно-деформированное состояние при формообразовании обтяжкой характеризуется плоской схемой по напряжениям ($\sigma_3 = 0$). При этом отношение двух других напряжений

$$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1},$$

не превышает 0,15, т.е. напряженное состояние близко к линейной схеме. Деформированное состояние – объемное. Деформация растяжения ε_1^P , необходимая для получения заданной формы обшивки, идет в основном за счет деформации утонения – ε_3^P , а в случае благоприятной анизотропии, и за счет деформации сжатия – ε_2^P . Тогда из условия несжимаемости суммарная деформация растяжения увеличится:

$$\varepsilon_1^P = -(\varepsilon_2^P + \varepsilon_3^P). \quad (4)$$

Соотношение между деформациями ε_2^P и $-\varepsilon_3^P$ определяется как отношением напряжений σ_1 и σ_2 , так и параметрами η_{ij} , характеризующими константы кристаллической решетки и компоненты текстуры деформируемой заготовки:

$$\frac{\varepsilon_2^P}{\varepsilon_3^P} = \frac{\eta_{12} - (\eta_{12} + \eta_{23})m}{\eta_{23}m + \eta_{31}}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что для увеличения потребной деформации растяжения ε_1^P и снижения утонения – ε_3^P необходимо увеличивать деформацию сужения ε_2^P , формируя в заготовке необходимый состав компонент текстуры. Поскольку симметрия свойств листового материала отражает их анизотропию, иметь нужную анизотропию свойств можно за счет текстуры. Известно, что предельные возможности процесса обтяжки характеризуются чрезмерным утонением (деформацией по толщине листа ε_3^P), которое (обычно не более 15-20%, задаваемые техническими условиями на поставку изделия в случае локализации). Данная ситуация в нашем случае исключается и имеет подтверждение при верификации.

Моделирование процесса формообразования обтяжкой является основной задачей, которая может учитывать кинематические особенности обтяжного пресса. Кроме этого, моделирование может учитывать 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 пресса; технологические условия процесса. Для рас-

четной программы необходимо создать новую геометрическую модель рабочей поверхности обтяжного пуансона.

Далее необходимо установить обтяжной пуансон относительно системы вертикальных плоскостей симметрии растяжно-обтяжного пресса F_1 и F_2 , чтобы в этой системе была возможность моделирования процесса формообразования обтяжкой в изопараметрических линиях кривизны поверхности. В результате моделирования можно проследить распределения пластической деформации и толщины по поверхности листовой заготовки после каждого движения согласно кинематической схеме формообразования для растяжно-обтяжного пресса.

Кинематическая схема формообразования обтяжкой длинномерных деталей оболочек двояковыпуклой пологой формы состоит в выполнении в определенной последовательности шаговых движений на растяжно-обтяжном прессе при первоначальной установке зажимов пресса для обтяжки прямолинейной листовой заготовки и эффекта изометрического распрямления оболочковой детали, которая включает следующие шаговые движения растяжно-обтяжного пресса:

1. Растяжение плоской листовой заготовки прямолинейно выставленными дискретными зажимами пресса.
2. Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола пресса.
3. Растяжение оболочковой детали, принявшей изометрически распрямленную форму.
4. Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола пресса.
5. Установка левых и правых дискретных зажимов пресса по соответствующим контурам.
6. Движение стола вверх до положения обвертки формообразующего контура обтяжного пуансона;
7. Растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки.

При этом производится совмещение всех этапов формообразования на одном и том же обтяжном пуансоне и на одном и том же прессе с программным управлением, оставляя листовую заготовку в зажимах, даже на этапах разгрузки. Геометрическая проработка обтяжного пуансона для реализации условий симметричной обтяжки позволила оперативно производить сложные расчеты деформации процессов формообразования обтяжкой даже без применения традиционного метода конечных элементов, который характеризуется длительностью выполнения вычислений и сравнительно высокой вероятностью ошибки.

В нашем случае мы доказали, что симметрия является достаточно очевидным фактом. Как принципы симметрии прослеживаются в

процессе формообразования обтяжкой, так и эффекты, лежащие в основе предполагаемого способа, подчиняются вполне определенным симметричным взаимосвязям каждый на своем шаговом движении растяжно-обтяжного пресса:

- **первый** – эффект принудительного положения плоской и достаточно длинной листовой заготовки в прямолинейно расположенных дискретных зажимных устройствах пресса, изогнутой в продольном направлении на втором шаговом движении пресса, обеспечивает при растяжении пластическое формоизменение средней части листовой заготовки до момента получения формы поверхности приведения в окрестности вершины обтяжного пуансона. Данный формообразующий эффект возникает за счет преимущественного деформирования области контакта листовой заготовки в окрестности вершины обтяжного пуансона. Принудительное действие прямолинейно расположенных дискретных зажимных устройств оказывает формообразующий эффект на центральную область поверхности оболочки, обеспечивая получение кривизны в центральном поперечном сечении оболочки, несмотря на влияние внешнего трения;

- **второй** – эффект изометрического разгибания поверхности оболочки после разгрузки листовой заготовки на третьем шаговом движении пресса. Гауссова кривизна поверхности считается инвариантом тензора кривизн плоских линий, проходящих через точку O и сохраняет свое значение при разгибании. Такая деформация называется изометрическим разгибанием, при которой длины нанесенных на поверхности оболочки линий и углы между ними сохраняются. Изменяется только геометрическая форма оболочки двойной кривизны при взаимно обратном изменении радиусов R_{10} и R_{20} , но ее поверхность остается изометрически подобной поверхности до разгибания. Тогда согласно цикловой диаграмме пластического растяжения краевых волокон оболочки пластически конфигурируется кривизна в центральном поперечном сечении оболочки и наблюдается сближение значений толщины листовой заготовки в поперечном направлении.

- **третий** – эффект увеличения градиента прилегания листовой заготовки в центральной области листовой заготовки с сохранением границ зоны пластической деформации без сползания в сторону зажимов на пятом шаговом движении пресса. Он подтверждает получение геометрической формы оболочки при соответствующей кривизне в точке O центрального лоскута и плотный прижим угловых частей листовой заготовки к поверхности обтяжного пуансона. Листовая заготовка, получившая полную пластическую конфигурацию центрального

лоскута и поперечный изгиб за счет установки дискретных зажимных губок, испытывает значительное пластическое растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки к поверхности обтяжного пуансона. Допускается наличие небольшого калибровочного растяжения отформованной поверхности оболочки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая кинематическая схема формообразования обтяжкой обеспечивают расширение формообразующей стадии средней части листовой заготовки в районе центрального поперечного сечения, поместив формообразующий контур поверхности обтяжного пуансона в продольную плоскость симметрии растяжно-обтяжного пресса. После достижения деформации потребной для рассматриваемой 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 пресса.

Такая кинематическая схема обтяжкой включает этапы формообразования, разделенные разгрузкой оболочки и ее разгибанием в новое изометрическое положение. Это очень важное свойство тонких оболочек, возвращая нас к затронутому ранее понятию об изгибании и разгибании поверхностей, построенной на принципах симметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филин, А.П.* Элементы теории оболочек [Текст] / А.П. Филин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат. Ленингр. Отделение, 1987. – 384 с.
2. *Михеев, В.А.* Метрическое преобразование поверхности обтяжного пуансона для формообразования листовых оболочек двойной кривизны [Текст] / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, Р. де Алваренга, В.В. Бодров // Серия конференций ИОР: Материаловедение и машиностроение. – 2021. – Т. 1155. – С. 12010. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012010> (дата обращения 10.02.2023).
3. *Михеев, В.А.* Моделирование траектории перемещения зажимов листовой заготовки при формообразовании обтяжкой оболочковой детали [Текст] / В.А. Михеев, А.Ф. Гречникова, Р. де Алваренга, М.М. Демидова // Серия конференций ИОР: Материаловедение и машиностроение. – 2021. – Т. 1181. – С. 12016. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1181/1/012016> (дата обращения 10.02.2023).
4. *Михеев, В.А.* Компьютерное приложение системы управления кинематикой виртуального растяжно-обтяжного пресса РО-630-11 [Текст] / В.А. Михеев, Р. де Алваренга, М.М. Демидова // Серия

- конференций IOP: Материаловедение и машиностроение. – 2021. – Т. 2094. – С. 42057. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2094/4/042057> (дата обращения 10.02.2023).
5. *Михеев, В.А.* Исследование влияния реологического поведения деформируемого листового алюминиевого сплава на пределы процесса формообразования обтяжкой [Текст] / В.А. Михеев, Е.А. Носова, Р. де Алваренга, М.М. Демидова // Серия конференций IOP: Материаловедение и машиностроение. – 2021. – Т. 1181. – С. 12013. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1181/1/012013> (дата обращения 10.02.2023).
 6. *Мищенко, А.С.* Курс дифференциальной геометрии и топологии [Текст] / А.С. Мищенко, А.Т. Фоменко. – М.: Изд-во Моск. университета, 1980. – 439 с.
 7. Патент на изобретение № 2799365 Способ формообразования обтяжкой длинномерных деталей оболочек двойной кривизны, имеющих двояковыпуклую пологую форму / Бодров В.В., Михеев В.А., Багаутдинов Р.М., Бухаров И.В., Батуринов А.А., Сурудин С.В., заявка № 2022129012, приоритет изобретения 09.11.2022 г., дата государственной регистрации 05.06.2023 г.
 8. Программа управления кинематикой виртуального растяжно-обтяжного пресса РО-630-11 для обеспечения моделирования в среде препостпроцессора LS-PREPOST для комплекса LS-DINE/ де Алваренга Р., Михеев В.А., Гречников Ф.В., Бодров В.В./ Гос. регистрация программы для ЭВМ № 2021681756, дата регистрации 24.12.2021 г.

TRANSFORMATION OF THE SHAPE FORMATION SCHEME BY COVERING ON THE PRINCIPLES OF SYMMETRY

© 2024 V.A. Mikheev, V.A. Tarasov, M.M. Baranova, T.Yu. Klimova, T.S. Sargaeva, D.I. Vorobiev

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

We assume that the concept of symmetry plays an important role in improving the theory and practice of the forming process by covering load-bearing thin-sheet shells of double curvature, which guarantees the production of contour-forming parts of the skin of modern aircraft with an exact geometric shape and minimal variation in thickness. To understand our assumption, it is necessary to remember that the complexity of the theory of plastic shells lies in the geometric and physical nonlinearity and the need to take into account shear stresses and deformations along the surface of the shell and its variability in curvature, therefore there is still no unified approach to the analysis of the formative processes of covering from sheet material. This assumption applies only to thin-sheet shells of double curvature, providing a different isometric position (curved surfaces one on top of the other) of the open surface as a whole, and not closed like a sphere. Therefore, the process of shaping a sheet blank into a shell part of an aircraft has some form of symmetry with respect to a given set of surface transformations, unless certain properties or relationships, the so-called invariants of the set of transformations, change when they are performed.
Key words: shaping, covering, principles of symmetry, thin-sheet shells, double curvature, variation in thickness, isometric position, sheet blank.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-53-62

EDN: JQKFEK

REFERENCES

1. *Filin, A.P.* Elementy teorii obolochek [Tekst] /A.P. Filin. – 3-e izd., pererab. i dop. – L.: Strojizdat. Leningr. Otdelenie, 1987. – 384 s.
2. *Miheev, V.A.* Metricheskoe preobrazovanie poverhnosti obtyazhnogo puansona dlya formoobrazovaniya listovyh obolochek dvoynoy krivizny [Tekst] / V.A. Miheev, F.V. Grechnikov, R. de Alvarenga, V.V. Bodrov // Seriya konferencij IOP: Materialovedenie i mashinostroenie. – 2021. – Т. 1155. – S. 12010. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012010> (data obrashcheniya 10.02.2023).
3. *Miheev, V.A.* Modelirovanie traektorii peremeshcheniya zazhimov listovoj zagotovki pri formoobrazovanii obtyazhkoj obolochkovoj detali [Tekst] / V.A. Miheev, A.F. Grechnikova, R. de Alvarenga, M.M. Demidova // Seriya konferencij IOP: Materialovedenie i mashinostroenie. – 2021. – Т. 1181. – S. 12016. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1181/1/012016> (data obrashcheniya 10.02.2023).
4. *Miheev, V.A.* Komp'yuternoe prilozhenie sistemy upravleniya kinematikoj virtual'nogo rastyazhno-obtyazhnogo pressa RO-630-11 [Tekst] / V.A. Miheev, R. de Alvarenga, M.M. Demidova // Seriya konferencij IOP: Materialovedenie i mashinostroenie. – 2021. – Т. 2094. – S. 42057. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2094/4/042057> (data obrashcheniya 10.02.2023).
5. *Miheev, V.A.* Issledovanie vliyaniya reologicheskogo povedeniya deformiruemogo listovogo alyuminievogo splava na predely processa formoobrazovaniya obtyazhkoj [Tekst] / V.A. Miheev, E.A. Nosova, R. de Alvarenga, M.M. Demidova

- // Seriya konferencij IOP: Materialovedenie i mashinostroenie. – 2021. – Т. 1181. – С. 12013. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1181/1/012013> (data obrashcheniya 10.02.2023).
6. *Mishchenko, A.S.* Kurs differencial'noj geometrii i topologii [Tekst] / A.S. Mishchenko, A.T. Fomenko. – М.: Izd-vo Mosk. universiteta, 1980. – 439s.
 7. Patent na izobretenie № 2799365 Sposob formoobrazovaniya obtyazhkoj dlinnomernyh detalej obolochek dvojnoj krivizny, imeyushchih dvoyakovypukluyu pologuyu formu / Bodrov V.V., Miheev V.A., Bagautdinov R.M., Buharov I.V., Baturin A.A., Surudin S.V., zayavka № 2022129012, prioritet izobreteniya 09.11.2022 g., data gosregistracii 05.06.2023 g.
 8. Programma upravleniya kinematikoj virtual'nogo rastyazhno-obtyazhnogo pressa RO-630-11 dlya obespecheniya modelirovaniya v srede pre-postprocessora LS-PREPOST dlya kompleksa LS-DINE/ de Alvarenga R., Miheev V.A., Grechnikov F.V., Bodrov V.V./ Gos. registraciya programmy dlya EVM № 2021681756, data registracii 24.12.2021 g.

Vladimir Mikheev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Forming.

E-mail: vamicheev@ramler.ru

Vladislav Tarasov, Graduate Student of the Department of Metal Forming. E-mail: tarasov.ali@yandex.ru

Marina Baranova, Graduate Student of the Department of Metal Forming. E-mail: marinaaaaad@mail.ru

Tatyana Klimova, Graduate Student of the Department of Metal Forming. E-mail: klimova-7979@mail.ru

Tamara Sargaeva, Graduate Student of the Department of Metal Forming. E-mail: sargaeva1999@mail.ru

Dmitry Vorobyov, Student. E-mail: Dvorobev84@gmail.com