

УДК 669.715

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ШАГОВЫХ ДВИЖЕНИЙ ВИРТУАЛЬНОГО ПРЕССА РО-3М ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБТЯЖКОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ

© 2024 В.А. Михеев, М.М. Баранова, С.Г. Симагина, С.В. Сурудин, Д.И. Воробьев

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

Статья поступила в редакцию 12.04.2024

Выявлено, что жесткая привязка поверхности оболочковых деталей обшивок к обводообразующим контурам самолета не позволяет исследовать некоторые свойства поверхностей, связанные с их внутренней геометрией, независимо от самого трехмерного пространства самолета. В случае задания поверхности оболочковой детали обшивок линиями кривизны в качестве сопряженных ортогональных координатных линий, форма обтяжного пуансона может быть охарактеризована через внутреннюю геометрию поверхности оболочки. Предлагаемая нами система форм симметрии позволяет создать устойчивый процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки и обеспечить более рациональную кинематическую схему на растяжно-обтяжном прессе РО-3М.

Ключевые слова: обтяжка, формообразование, обводообразующий контур, листовая заготовка, гауссова кривизна, растяжно-обтяжной пресс

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-2-112-000

EDN: SWDGZA

### ВВЕДЕНИЕ

Сущность обтяжки листовой заготовки заключается в получении тонкой оболочки двойной кривизны путем копирования формы обтяжного пуансона приложением растягивающих усилий к двум противоположным краям листовой заготовки. Эти процессы во многом схожи с операциями формообразования, однако, отличаются наличием контактного трения листовой заготовки с поверхностью обтяжного пуансона и незамкнутым контуром приложения растягивающих нагрузок со стороны подвижных зажимных губок обтяжного пресса, перемещающихся с обеих сторон по касательной к формообразующему продольному контуру на сходе с поверхности обтяжного пуансона. Предельные возможности при такой схеме формообразования обтяжкой чаще всего ограничиваются разрушением концевых участков листовой заготовки в районе зажимных губок обтяжного

пресса. Степень формообразования при обтяжке не превышает аналогичных показателей в сравнении с процессами деформирования с осевой симметрией [1].

В ходе формообразования обтяжкой плоская листовая заготовка, зажата с двух противоположных краев, обертывается по обтяжному пуансону за счет перемещения зажимных блоков обтяжного пресса с дифференцированным натяжением под действием растягивающего усилия либо после оборачивания и установки зажимных блоков по касательной к формообразующему продольному контуру на сходе к поверхности обтяжного пуансона прикладывается растягивающее усилие. В результате растягиваются участки заготовки, которые прилегают к поверхности обтяжного пуансона до тех пор, пока вся внутренняя поверхность листа не будет прилегать к пуансону, а форма обтяжного пуансона по второй кривизне будет пластически «скопирована».

Это и есть процесс формообразования обтяжкой оболочки двойной кривизны, где средняя часть листовой заготовки приобретает вторую кривизну по ширине в окрестности вершины обтяжного пуансона в условиях осевой симметрии центрального поперечного сечения оболочки. Особенность данного поперечного сечения в том, что оно остается неподвижным и не скользит относительно поверхности пуансона. Сила трения меняет направление влево или вправо от нее, а пересечение данного поперечного сечения с продольным формообразующим контуром обтяжного пуансона, по которому было выполнено предварительное оборачива-

*Михеев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением. E-mail: vamticheev@rambler.ru*

*Баранова Марина Михайловна, аспирант кафедры обработки металлов давлением.*

*E-mail: marinaaaaad@mail.ru*

*Симагина Светлана Германовна, кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением.*

*E-mail: simaginasve@gmail.com*

*Сурудин Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением.*

*E-mail: innosam63@gmail.com*

*Воробьев Дмитрий Игоревич, студент.*

*E-mail: Dvorobev84@gmail.com*

ние листовой заготовки, определяет положение центральной точки  $O$  (вершина поверхности), в которой геометрическая форма оболочки двойной кривизны локально характеризуется величиной и знаком гауссовой кривизны, например эллиптическая (двояковыпуклая форма с положительной гауссовой кривизной) [2].

Известно [3], что величина гауссовой кривизны сохраняет свое значение при свободном разгибании в пространстве поверхности оболочки двойной кривизны из-за своей малой жесткости, приобретая изометрическую форму по отношению к поверхности обтяжного пуансона. Изометрическая форма оболочки будет иметь другие радиусы продольной и поперечной кривизны, меняя местами максимальную и минимальную величину и оставляя их произведение постоянным (инвариантным). При этом значение гауссовой кривизны в точке  $O$  используется для оценки потребной деформации в районе полюса поверхности, которая характеризует получение заданной геометрической формы оболочки двойной кривизны в целом, т.к. к поверхности оболочки в окрестности вершины локально близка некоторая квадратичная поверхность.

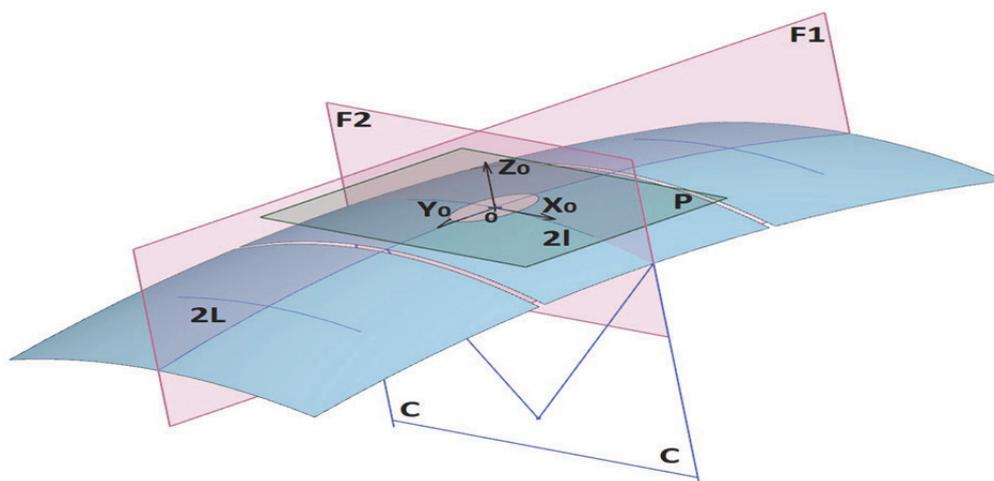
Однако, имея оболочковую деталь переменной кривизны, необходимо изучить локальное устройство поверхности оболочки в окрестности вершины. Самую «грубую» информацию предоставляют касательные векторы, которые создают двухмерное касательное пространство, в котором естественным образом возникает евклидова геометрия. Эта геометрия переносится на саму поверхность и относится к внутренней геометрии поверхности в выбранной точке касания. Для изучения внутренней геометрии поверхности важным является понятие проекции той или иной фигуры на касательную плоскость к поверхности в окрестности точки

касания последней, например, при рассмотрении малой области в окрестности «вершины» оболочки (точка  $O$ ), с возможностью определения ее локальной формы. Такой подход получил развитие в дифференциальной геометрии в отличие от геометрии поверхности в целом [4].

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения локальной формы оболочки нужно заменить «изогнутую» поверхность в окрестности выбранной точки на касательную плоскость в этой точке и все нужные измерения произвести в удобной линейной евклидовой плоскости. Для этого используем прием, который приведет к касательной плоскости, позволяющий рассматривать всевозможные кривые, лежащие на поверхности и проходящие через точку  $O$ . Отклонение кривой, выполненной в нормальном сечении поверхности оболочки, от ее касательной на плоскости описывается кривизной. Среди множества ортогональных линий в нормальных сечениях поверхности, проходящих через вершину оболочки (точка  $O$ ), имеется единственная ортогональная пара линий, отклонения которых от их касательных на плоскости имеют экстремальные значения. При таком положении касательные совмещены с главными направлениями поверхности в этой точке.

Система ортогональных осей  $x_0$  и  $y_0$ , проходящих через точку  $O$ , вместе с нормалью  $z_0$  образуют репер  $(x_0, y_0, z_0)$ . Таким образом, выбрана подвижная система координат в виде локального репера. Вектора репера  $x_0$  и  $y_0$  на касательной плоскости совмещены с направлениями главных кривизн нормальных сечений, проходящих через точку  $O$ , отображаемой как вершина поверхности обтяжного пуансона, имеющая касание с плоскостью. Пересечение поверхности с плоскостью, проходящей через нормаль



**Рисунок 1** – Центральная часть поверхности двойной кривизны с касательной плоскостью в точке  $O$  на примере лоскутной модели поверхности оболочки, состоящей из центрального, левого и правого лоскутов

$z_0$ , представляет собой плоскую кривую, называемую нормальным сечением поверхности. В нашем случае имеем две плоские нормальные кривые, совмещенные с главными направлениями поверхности в этой точке. Продольная кривая (формообразующий продольный контур, длиной  $2L$ ) и поперечная кривая (центральный поперечный контур, длиной  $2l$ ) пересекаются в точке  $O$  (рисунок 1).

Для практики наиболее важными элементами симметрии являются, прежде всего, касательная плоскость  $P$  к поверхности в точке  $O$  и вертикальные плоскости симметрии  $F_1$  и  $F_2$  растяжно-обтяжного пресса, при которых два любых направления, симметричных относительно плоскостей, будут иметь одинаковые свойства. Третьим элементом симметрии являются оси симметрии, например, пара главных осей анизотропии в плоскости листового материала. Четвертым элементом являются два главных направления в касательной плоскости к поверхности оболочки в точке  $O$  [5].

Факт совмещения направления растяжения при обтяжке с направлением прокатки листового материала подтвержден положением «правильного» эллипса, фигура которого получается при опускании вниз горизонтальной касательной плоскости к поверхности в точке  $O$  в положение секущей плоскости. Для правильной ориентации рабочей поверхности пуансона, относительно горизонтально расположенной в зажимах пресса листовой заготовки, необходимо обеспечить фигуру сечения рабочей поверхности горизонтальной плоскостью в виде «правильного» эллипса. Как известно, эллипс может быть «правильным», если его продольные и поперечные полуоси попарно равны между собой. Этого можно достичь за счёт изменения положения секущей плоскости относительно центра симметрии фигуры сечения.

Можно показать, что главным направлениям соответствуют главные кривизны, одна из которых является максимальной, а другая – минимальной по отношению к кривизнам плоских линий нормальных сечений, проходящих через точку  $O$ , а вершина обтяжного пуансона является пятым элементом симметрии. Если главные кривизны не равны, то очевидно, что главные направления будут обязательно ортогональны. Продольная кривая (формообразующий продольный контур) и поперечная кривая (центральный поперечный контур) ортогонально пересекаются в точке  $O$  и вложены в вертикальные плоскости симметрии  $F_1$  и  $F_2$  растяжно-обтяжного пресса. При этом вертикальная плоскость симметрии  $F_1$  проходит через вершину поверхности обтяжного пуансона (точка  $O$ ) и середины центральных губок левого и правого зажимного устройства растяжно-обтяжного пресса (рисунок 1).

При изучении локального строения центрального лоскута оболочки использовали прием, который привел к изучению касательной плоскости. Однако каждая поверхность лоскута наделяется своей геометрией. Получение изометрической формы поверхности оболочковой детали в целом по отношению к поверхности обтяжного пуансона производится в условиях осевой симметрии для центрального лоскута, поперечное сечение которого является образующей поверхности вращения. Имея две изометрические поверхности, можно так изогнуть одну из них в окружающем пространстве, что она точно ляжет на вторую поверхность.

Важнейшим из свойств оболочковой детали является кривизна. При этом переменная кривизна является топологическим свойством оболочковой детали. Кривизну можно квантифицировать, т.е. для каждой точки геометрической поверхности существует число, говорящее о том, насколько изогнута поверхность вблизи этой точки. При этом, перемещая подвижный 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. Описанный прием позволил выполнить анализ внутренней геометрии поверхности оболочковой детали в целом, определить кривизны продольной и поперечной произвольно параметризованных кривых, пересекающиеся в точке  $O$ , не прибегая к натуральной параметризации, определить локальную форму в вершине поверхности обтяжного пуансона, причем в главных кривизнах.

При этом строить геометрическую модель обтяжного пуансона необходимо с учётом направления прокатки листовой заготовки. Была сориентирована поверхность обтяжного пуансона относительно основной линии кривизны по формообразующему контуру, направление которого совпало с направлением растяжения при обтяжке. Экспериментально с помощью верификации расчетной модели было доказано, что такое совпадение оказалось возможным при формообразовании обтяжкой листовой заготовки по предложенному нами обтяжному пуансону, что обеспечивало симметричный характер развития очага деформации, и преимущественное образования зоны пластической деформации в центральной части листовой заготовки.

В результате необходимо преобразовать процесс проектирования обтяжного пуансона в соответствующей системе координат. Так что эффекты, лежащие на принципах симметрии, привели к контролируемой точности получения геометрической формы оболочки, к равномерному изменению толщины в различных областях листовой заготовки, отсутствию складок

и разрывов. Проведены исследования методом конечных элементов в программном комплексе CAE QForm при моделировании процессов формообразования обтяжкой листовой заготовки по обтяжному пуансону, размещенному на столе виртуального растяжно-обтяжного пресса РО-3М с помощью программного модуля (плагин АвиаФорм с интерфейсом пользователя).

Он включает управление и позиционирование каждым рабочим органом виртуального растяжно-обтяжного пресса. Реализация передачи данных между плагином АвиаФорм и QForm выполнен через промежуточный формат (файл XML для импорта), который позволил на первом этапе в ручном режиме передавать кинематику виртуального пресса из плагина в QForm. Подбран кинематический шаговый режим растяжения листовой заготовки на виртуальном прессе с максимизацией степени формообразования при допустимом уровне утонения листовой заготовки и получен патент на способ формообразования обтяжкой длинномерных деталей оболочек двойной кривизны, имеющих двояковогнутую пологую форму [6].

Принципы симметрии прослеживаются на каждом этапе шаговых движений виртуального растяжно-обтяжного пресса РО-3М в процессе формообразования обтяжкой, также как и эффекты, лежащие в основе разработанного способа, подчиняются вполне определенным симметричным взаимосвязям каждый на своем шаговом движении пресса. Эффект при первоначальной установке зажимов пресса для обтяжки прямолинейной листовой заготовки, эффект изометрического распрямления оболочковой детали и эффект увеличения градиента прилегания листовой заготовки в центральной области листовой заготовки с сохранением границ зоны пластической деформации без сползания в сторону зажимов. Разработанный способ включает следующие этапы, соответствующие шаговым движениям растяжно-обтяжного пресса РО-3М:

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 пресса вверх до положения обертки формообразующего контура обтяжного пуансона;
7. Растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки.

Для создания условий симметричной обтяжки необходимо поверхность обтяжного пуансо-

на (макет обтяжного пуансона в формате IGES) импортировать в криволинейную систему координат, к поверхности двойной кривизны, привязанной к сетке линий кривизны с вершиной в качестве начала координат в точке **O**.

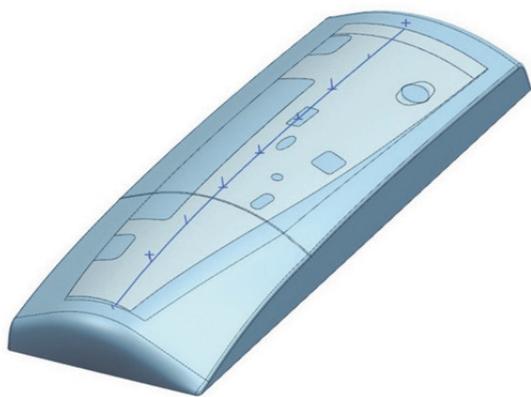
Введены средства параметрического определения поверхности через криволинейные координаты, а установка обтяжного пуансона выполнена так, чтобы положение формообразующего контура поверхности было совмещено с первой вертикальной плоскостью  $F_1$ . Вторая вертикальная плоскость  $F_2$ , ортогональная первой, содержит положение контура центрального поперечного сечения, пересекающего формообразующий контур в вершине (точка **O**) поверхности оболочки двойной кривизны. В результате такой привязки обе ортогональные плоскости переходят в вертикальные плоскости симметрии растяжно-обтяжного пресса.

Процесс формообразования обтяжкой совершается в соответствии с алгоритмом моделирования и представляет собой последовательность операций, выполняемых рабочими механизмами растяжно-обтяжного пресса РО-3М согласно шаговым движениям цикловой диаграммы. Основным источником получения информации о шаговых движениях технологического оборудования является измерение параметров управления с помощью компьютерного приложения системы управления для виртуального отображения реального растяжно-обтяжного пресса РО-3М с учетом его кинематических особенностей.

В центре внимания рассматриваются исследования, проводимые методом конечных элементов при моделировании процессов формообразования обтяжкой листовой заготовки по обтяжному пуансону, с поверхностью, ориентированной относительно сетки линий кривизны и размещенного на столе виртуального растяжно-обтяжного пресса. Сетка линий кривизны поверхности связана с возможностью определения локальной формы в вершине поверхности обтяжного пуансона, причем в главных осях, используя симметричные взаимосвязи. Необходимо выполнить соответствующее преобразование системы координат: вместо линий дискретного каркаса использовать линии кривизны. Относительно линий кривизны определяются значения геометрических параметров в нормальных поперечных сечениях поверхности обтяжного пуансона (рисунок 2).

При этом учитывали метрику самой поверхности в окрестности ее вершины с возможностью определения локальной формы оболочки, требовании симметрии к положению рабочей поверхности и позиционирование обтяжного пуансона на столе растяжно-обтяжного пресса РО-3М относительно его плоскостей симметрии.

Именно в условиях симметрии внешней нагрузки при обтяжке с растяжением листо-



**Рисунок 2** – Модель обтяжного пуансона и положение на поверхности контура детали обшивки, формообразующего контура и центральной поперечной линии, на пересечении которых обозначилась вершина поверхности обтяжного пуансона

вой заготовки был отработан порядок ведения процесса формообразования по новой схеме формообразования обтяжкой длинномерных деталей оболочек двойной кривизны, имеющих двояковыпуклую симметричную форму, при которой первоначально выполняется формообразование листовой заготовки с зажимами, выставленными прямолинейно.

Программа для управления виртуальным прессом реализована в виде плагина Компас-3D с использованием Компас SDK (КОМПАС-МАСТЕР) для языка C# и получила название АвиаФорм. Первоначальным этапом в моделировании процесса является подготовка геометрических моделей элементов, участвующих в процессе: листовой заготовки; обтяжного пуансона и оболочки двойной кривизны в двух программных комплексах QForm и LS-DYNA для подтверждения соответствия результатов моделирования.

Механические свойства листового материала из алюминиевого сплава 1163РДМВ (обшивочный (В) лист из сплава марки 1163 с твердой регламентированной плакировкой РД, в оттоженном состоянии М) были получены в ходе испытания пяти образцов (толщиной 1,5мм) и статистической обработки их результатов: предел прочности ( $\sigma_B$ ) – 174 МПа; предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) – 78 МПа; равномерное удлинение ( $\delta$ ) – 18%; касательный модуль (К) – 241,4 МПа, показатель упрочнения (n) – 0,204 и коэффициенты анизотропии  $\mu_{21} = 0,428$ ,  $\mu_{12} = 0,40$  и  $\mu_1 = 0,471$ ; коэффициенты Лэнкфорда  $R_{00} = 0,666$ ,  $R_{45} = 0,889$ ,  $R_{90} = 0,748$ .

Далее было выполнено согласованное моделирование реальной кинематики растяжно-обтяжного пресса РО-3М в трехмерной среде, которое позволило получить более точные симуляции процессов формообразования деталей из листового металла на принципах симметрии

согласно алгоритму моделирования процесса формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставим качественную палитру очага пластической деформации при формообразовании обтяжкой данной оболочковой детали в системе QForm (рисунки 3–9). Габариты листовой заготовки 1900x7000 (мм). Продемонстрируем качественные «картинки» очага пластической деформации оболочковой детали, соответствующие семи шаговым движениям растяжно-обтяжного пресса РО-3М (обозначены римскими цифрами).

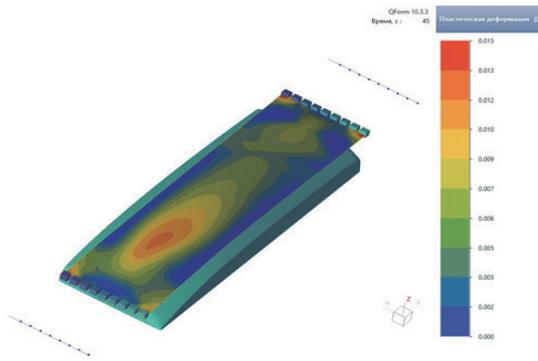
Подробное описание каждого шага представим в таблице 1.

Результаты изменения толщины оболочковой детали зафиксированы в условно выбранных точках на поверхности листовой заготовки (рисунок 10) Эти точки расположены на трех линиях, расположенных на листе спереди фронтально (синий цвет P0, P3, P6, P9, P12), по центру (красный цвет P1, P4, P7, P10, P13) и сзади (зеленый цвет P2, P5, P8, P11, P14) по отношению к позиции оператора пресса. Точки на линиях синего и зеленого цвета соответствуют боковым контурам детали. Касание листовой заготовки в вершине поверхности обтяжного пуансона отмечено точкой P7.

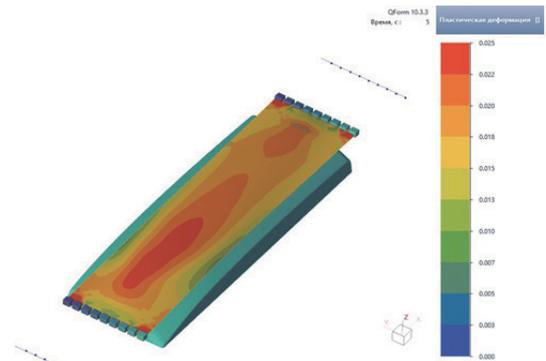
Результаты изменения толщины оболочки в условно выбранных точках на поверхности листовой заготовки приведены в виде графиков (рисунок 11), имеющих достаточно монотонный падающий характер (условное время процесса моделирования в системе QForm – 8 с).

Наблюдается монотонное изменение толщины листовой заготовки в направлении условных единиц времени. Разнотолщинность оболочковой детали составляет диапазон 1,473 – 1,460 мм. На графиках выделены вертикальные линии, четко разделяющие семь шаговых движений растяжно-обтяжного пресса (обозначены римскими цифрами).

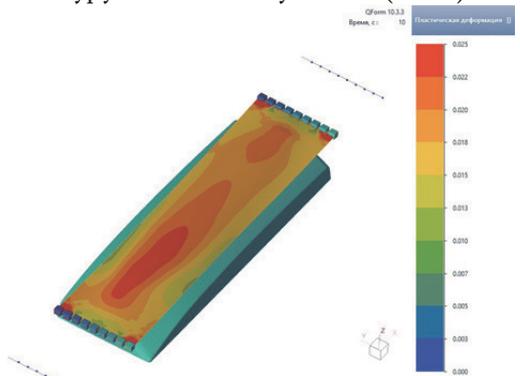
Это указывает на полную кинематическую управляемость процессом формообразования обтяжкой листовых оболочковых деталей переменной кривизны - топологически сложной пространственной формы. Способ формообразования обтяжкой листовых оболочковых деталей переменной кривизны, построенный на принципах симметрии, поддается оптимизации за счет подбора кинематической схемы управления параметрами рабочих органов растяжно-обтяжного пресса. Увеличивается этап формообразования при сохранении местоположения зоны наибольших деформаций в центральной части листовой заготовки при отсутствии локализации деформации на концевых участках



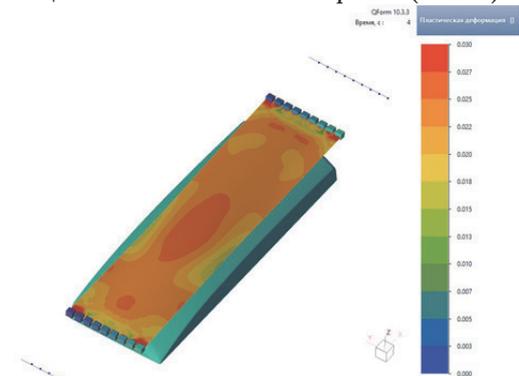
**Рисунок 3** – Полное оборачивание плоской листовой заготовки по формообразующему контуру обтяжного пуансона (I шаг)



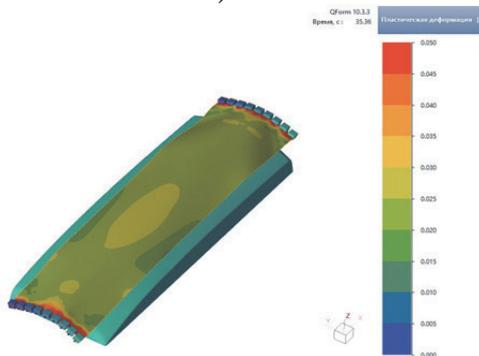
**Рисунок 4** – Растяжение плоской листовой заготовки прямолинейно выставленными секционными зажимами прессы (II шаг)



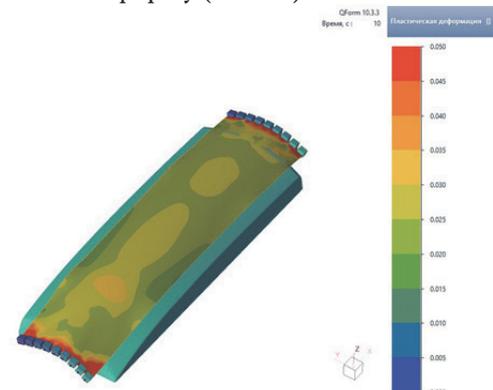
**Рисунок 5** – Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола прессы (III шаг)



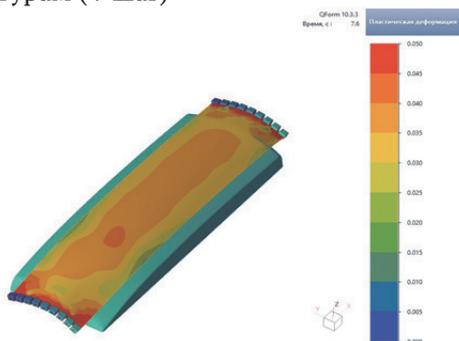
**Рисунок 6** – Растяжение оболочковой детали, принявшей изометрически распрямленную форму (IV шаг)



**Рисунок 7** – Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола прессы и установка левых и правых секционных зажимов прессы по соответствующим контурам (V шаг)



**Рисунок 8** – Движение стола вверх до положения обертки формообразующего контура обтяжного пуансона (VI шаг)



**Рисунок 9** – Растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки (VII шаг)

**Таблица 1.** Шаговые движения растяжно-обтяжного прессы РО-3М

№ шага	Описание шага	Комментарии
I	Полное оборачивание плоской листовой заготовки по формообразующему контуру обтяжного пуансона	Проявилась вершина обтяжного пуансона, имеющая эллипсоидный тип (деформация порядка 1,5%)
II	Растяжение плоской листовой заготовки прямолинейно выставленными секционными зажимами прессы	Пластическое формоизменение листовой заготовки до момента получения формы эллипсоидной поверхности в окрестности вершины обтяжного пуансона, с охватом границы центрального лоскута (деформация порядка 2,5%)
III	Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола прессы	Деформационный «фон» остался без изменений. Поверхность оболочки изменяется, принимая новую изометрическую распрямленную форму по отношению к поверхности обтяжного пуансона. Такая деформация называется изометрическим разгибанием.
IV	Растяжение оболочковой детали, принявшей изометрически распрямленную форму	В результате пластического растяжения краевых волокон оболочки пластически конфигурируется кривизна в центральном поперечном сечении и сближаются значения толщины листовой заготовки в поперечном направлении (деформация порядка 3,0%)
V	Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола прессы и установка левых и правых секционных зажимов прессы по соответствующим контурам	Деформационный «фон» остался без изменений. В районе зажимов имеются локальные флуктуации деформаций на фоне разгрузки и изгибной деформации
VI	Движение стола вверх до положения обертки формообразующего контура обтяжного пуансона	Движение стола вверх приводит к «возмущению» деформационного «фона», выделяется местонахождение вершины обтяжного пуансона
VII	Растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки	Увеличение градиента прилегания листовой заготовки в центральной области листовой заготовки с сохранением границ зоны пластической деформации без сползания в сторону зажимов. Пластическое растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки к поверхности обтяжного пуансона (деформация порядка 4,0% с небольшим калибровочным растяжением

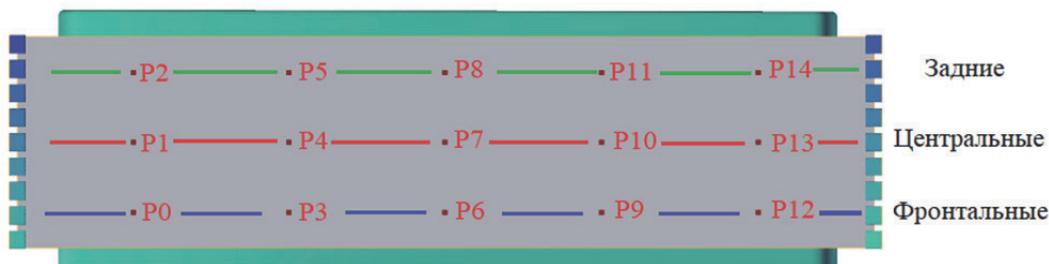
листовой заготовки. Жесткость кинематической схемы формообразования обтяжкой обеспечивает высокую равномерность деформации растяжения листовой заготовки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

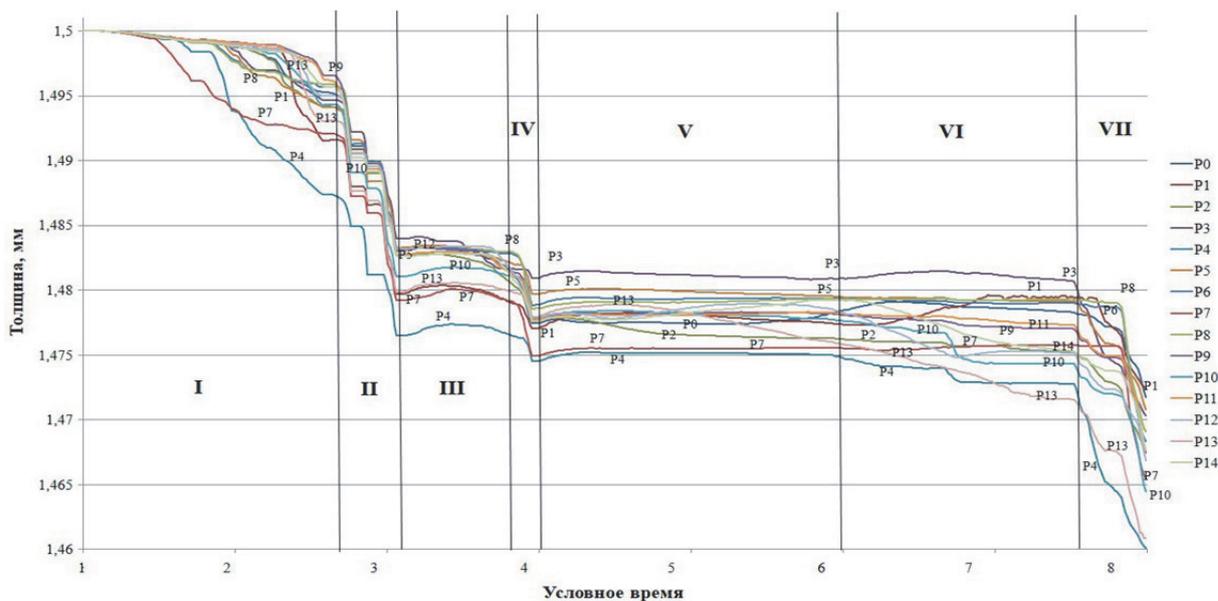
Для обеспечения монотонности деформации формообразование листовой заготовки необходимо проводить в условиях симметричной обтяжки без ее локализации в части листовой заготовки, расположенной между краем обтяжного пуансона и зажимными губками прессы.

Растяжение листовой заготовки при формообразовании обтяжкой различается не только величиной усилий, но и областью их приложения по краю заготовки. Данная особенность оказывает влияние на характер зоны пластической деформации.

Путь от выделения инвариантов до аналитического оформления метода расчета метрик поверхности оболочки, к которым можно отнести кривизны линий и величины деформации в характерных точках поверхности обшивки, почти завершен. Считаем, что процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки в оболочко-



**Рисунок 10** – Условно выбранные точки на поверхности листовой заготовки для идентификации значений толщины оболочковой детали в системе QForm



**Рисунок 11** – Распределение толщины в условно выбранных точках на поверхности оболочковой детали в зависимости от условного времени расчета (8 с)

вую 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. Выполнено соответствующее преобразование системы координат, т.е. вместо линий дискретного каркаса самолета использовали сетку линий кривизны. Предлагаемая система форм симметрии в целом ещё далека от совершенства, но уже сейчас она может обеспечить устойчивый процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки и предложить более рациональную кинематическую схему на растяжно-обтяжном прессе РО-3М.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михеев, В.А.* Основы расчета процесса формообразования обтяжкой тонких оболочек двойной кривизны / В.А. Михеев, С.В. Сурудин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19. № 1(3). – С. 555-562.
2. *Михеев, В.А.* Моделирование последовательной

схемы формообразования обтяжкой обводообразующих оболочек двойной кривизны минимальной разнотолщинности / В.А. Михеев, Ю.С. Клочков, А.А. Кузина и др. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – №5. – С. 257-263.

3. *Филин, А.П.* Элементы теории оболочек / А.П. Филин. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 384 с.
4. *Никиреев, В.М.* Практические методы расчета оболочек / В. М. Никиреев, В.Л. Шадурский. – М.: Стройиздат, 1966. – 269 с.
5. *Михеев, В.А.* Преобразование схемы формообразования обтяжкой на принципах симметрии / В.А. Михеев, В.А. Тарасов, М.М. Баранова и др. // Известия Самарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26. №1. – С. 53-62.
6. 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 09.11.2022г., дата госрегистрации 05.06.2023 г.

**ANALYSIS OF THE STEP MOVEMENTS SEQUENCE  
OF THE RO-3M VIRTUAL PRESS FOR SHAPING A SHEET BLANK**

© 2024 V.A. Miheev, M.M. Baranova, S.G. Simagina, S.V. Surudin, D.I. Vorobiev

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

It is revealed that the rigid surface binding of the skin shell parts to the contour of the aircraft does not allow us to study some surfaces properties associated with their internal geometry, regardless of the three-dimensional space of the aircraft itself. In the case of specifying the shell part surface of the cladding with lines of curvature as conjugate orthogonal coordinate lines, the shape of the tight punch can be characterized through the internal geometry of the shell surface. The system of symmetry forms proposed by us allows to create a stable process of forming a tight sheet blank and provide a more rational kinematic scheme on the RO-3M stretch-tight press.

*Keywords:* skinning, shaping, circumference contour, sheet blank, Gaussian curvature, stretch-tight press.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-2-112-000

EDN: SWDGZA

**REFERENCES**

1. *Miheev, V.A. Osnovy rascheta processa formoobrazovaniya obtyazhkoj tonkih obolochek dvojnoj krivizny / V.A. Miheev, S.V. Surudin // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2017. – T. 19. № 1(3). – S. 555-562.*
2. *Miheev, V.A. Modelirovanie posledovatelnoj shemy formoobrazovaniya obtjazhkoj obvodooobrazujushhih obolochek dvojnoj krivizny minimalnoj raznotolshhinnosti / V.A. Miheev, Ju.S. Klochkov, A.A. Kuzina i dr. // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroljova (nacionalnogo issledovatel'skogo universiteta). – 2012. – №5. – S. 257-263.*
3. *Filin, A.P. Elementy teorii obolochek / A.P. Filin. – L.: Strojizdat. Leningr. otd-nie, 1987. – 384 s.*
4. *Nikireev, V.M. Prakticheskie metody rascheta obolochek / V.M. Nikireev, V.L. Shadurskij. – M.: Strojizdat, 1966. – 269 s.*
5. *Miheev, V.A. Preobrazovanie shemy formoobrazovaniya obtjazhkoj na principah simmetrii / V.A. Miheev, V.A. Tarasov, M.M. Baranova i dr. // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2024. – T. 26. №1. – S. 53-62.*
6. *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.*

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

*E-mail: vamicheev@rambler.ru*

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

*Svetlana Simagina, Candidate of Technical Sciences, Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Metal Forming. E-mail: simaginasve@gmail.com*

*Sergey Surudin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Forming.*

*E-mail: innosam63@gmail.com*

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