

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ОБТЯЖКОЙ ОБОЛОЧЕК ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ**© 2011 В.А. Михеев<sup>1</sup>, А.Ф. Гречникова<sup>2</sup>, А.А. Кузина<sup>1</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
<sup>2</sup>ЗАО “Алкоа СМЗ”, г. Самара

Поступила в редакцию 11.03.2011

В данной статье предложен метод проектирования технологического процесса обтяжки оболочки с минимальной разнотолщиной и заданными свойствами при формировании новой последовательной схемы формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны с позиции их симметрии и в условиях ортогональной анизотропии листового материала.

Ключевые слова: обтяжка, оболочки двойной кривизны, анизотропия, симметрия, гауссова кривизна.

В конструкциях современных летательных аппаратов среднего и тяжелого типов обводообразующие обшивки, как правило, делают из металлических сплавов. Чаще всего это термически упрочняемые алюминиевые сплавы, несмотря на большую популярность композиционных материалов на той же алюминиевой основе. Следует заметить, что лишь один крупный самолет, а именно Boeing Dreamliner практически сделан из композиционных материалов, тогда как у всех остальных обшивочная основа остается металлической, композиционными делаются различные люки, обтекатели, рули и другие детали аналогичного типа.

В связи с этим полномасштабного перехода от металлической конструкции планера летательного аппарата (ЛА) к конструкции из композиционного материала, который прогнозировали эксперты, не произошло. Серийно выпускаемые и планируемые к производству ЛА, по-прежнему, имеют в своей конструкции металлические обводообразующие обшивки из термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

Обводообразующие обшивки, а именно оболочки двойной кривизны, получают способом обтяжки, основанным на растяжении листового материала с его утонением по толщине. Ограничивающими факторами являются неравномерное растяжение из-за влияния сил трения и недопустимая локализация деформации заготовки вследствие разнотолщинности листового проката в поперечном направлении. Кроме

*Михеев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения.*

*E-mail: vaticheev@rambler.ru.*

*Гречникова Анна Фёдоровна, аспирант, ведущий инженер-технолог. E-mail: anna\_gr17@yahoo.com.*

*Кузина Антонина Александровна, аспирант, инженер кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения. E-mail: KuzinaAntonina@mail.ru.*

этого наибольшее утонение листового материала наблюдается при обтяжке именно алюминиевых листовых полуфабрикатов, что обусловлено особенностями их внутреннего кристаллического строения или анизотропией свойств, способствующей преимущественному развитию деформации по толщине [1].

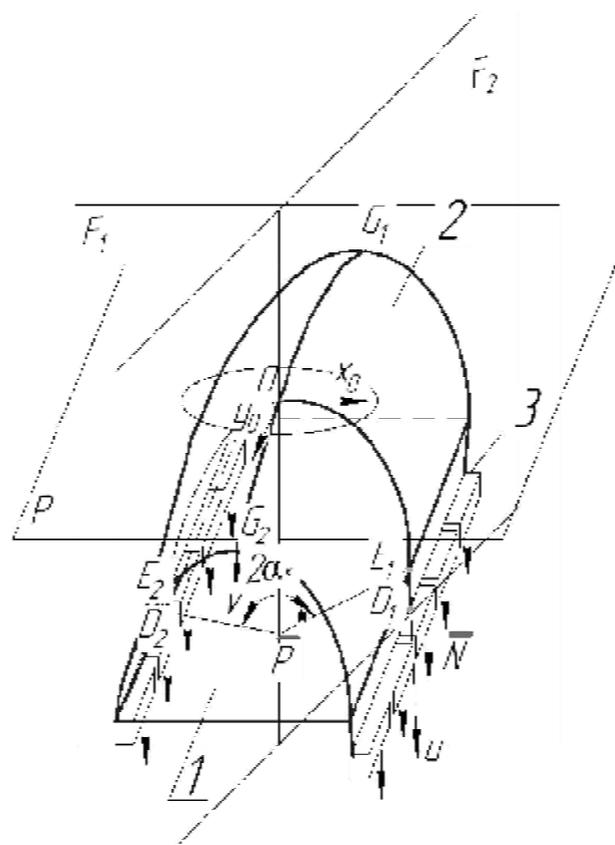
Как известно, величина и характер анизотропии деформационных характеристик определяется как кристаллическими свойствами самого материала, так и наличием в поликристаллическом материале преимущественных кристаллографических ориентировок или составом текстур. Для современных материалов управление текстурообразованием становится все более важным, т.к. оно позволяет создавать эффективную анизотропию свойств, приближая характеристики высокотекстурированного материала к композиционным материалам, но сохраняя при этом их высокую технологичность.

Однако для создания эффективной анизотропии свойств листового материала необходимо выяснить, какие сочетания показателей анизотропии отвечают требованиям совершенствования формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны. Прежде всего, это касается более сложных пространственных форм оболочек двойной кривизны двояковыпуклой и выпукло-вогнутой форм. Кроме того они представляют собой тонколистовые элементы обводообразующих обшивок малой жесткости, что существенно усложняет решение вопросов точности, связанных с геометрической увязкой элементов конструкции планера современного ЛА.

В совокупности выполнение всех этих требований зависит в первую очередь от решения проблемы получения оболочек с минимальной разнотолщиной и заданными свойствами. В свою очередь, это связано с отсутствием метода проектирования технологического процесса

обтяжки оболочки, учитывающего особенности геометрической формы оболочки двойной кривизны, механические свойства и толщину анизотропной листовой заготовки. Попытки обеспечить условия формообразования обтяжкой без локализации растяжения за счет дополнительного построения поверхности обтяжного пуансона, специального профилирования контура листовой заготовки, совмещения различных схем нагружения заготовки при обтяжке не дали существенного результата [2, 3, 4].

Предлагаемый метод проектирования технологического процесса обтяжки оболочки с минимальной разнотолщинностью и заданными свойствами рассматривается с позиции их симметрии. Прежде всего, это касается выполнения обтяжки листовой заготовки по обтяжному пуансону, поверхность которого путем параметрического преобразования приведена к геометрической форме, которая локально характеризуется в ее полюсе (точка  $O$ ) величиной и знаком гауссовой кривизны: эллиптическая (двояковыпуклая форма с положительной гауссовой кривизной) и гиперболическая (выпукло-вогнутая с отрицательной гауссовой кривизной). На рис. 1 показана обтяжка оболочки двояковыпуклой формы с положительной гауссовой кривизной,



**Рис. 1.** Обтяжка оболочки двояковыпуклой формы значительной двойной кривизны: 1– обтяжной пуансон; 2– обтягиваемая листовая заготовка; 3– зажимные губки обтяжного пресса

имеющей значительный угол продольного охвата обтяжного пуансона листовой заготовкой  $2\alpha_k$ , равной  $180^\circ$ .

Кривые сечений поверхности оболочки плоскостями симметрии  $F_1$  и  $F_2$  представляют собой линии, пересекающиеся в точке  $O$  с радиусами  $R_{10}$  и  $R_{20}$ . Кривая сечения поверхности оболочки плоскостью симметрии  $F_1$  определяет продольный формообразующий контур  $D_1OD_2$ , вдоль которого приложено усилие растяжения при обтяжке, а кривая сечения поверхности оболочки плоскостью симметрии  $F_2$  определяет центральный поперечный контур  $G_1OG_2$ , геометрические параметры которого характеризуют форму оболочки. Величины, обратные радиусам:

$$\kappa_{10} = \frac{1}{R_{10}}, \quad \kappa_{20} = \frac{1}{R_{20}}; \text{ являются главными кривизнами}$$

указанных контуров поверхности в точке  $O$ , обладающими свойствами экстремальности: одна из них максимальная, другая – минимальная в отличие от других пар ортогональных линий, которые можно провести на поверхности бесчисленное множество через точку  $O$ . Произведение главных кривизн:  $\kappa_0 = \kappa_{10} \cdot \kappa_{20}$ , является гауссовой кривизной в точке  $O$  и представляет собой инвариант метрического тензора кривизн, определяющей изометрию поверхности оболочки малой жесткости.

Направления касательных  $x_0$  и  $y_0$  к контурам сечений поверхности оболочки в плоскостях симметрии  $F_1$  и  $F_2$  в точке  $O$  определяют основной базис поверхности оболочки, задаваемый гауссовыми параметрическими координатами поверхности  $(u, v)$ . Тогда в системе координат  $x_0$  и  $y_0$  основного базиса лежащих в горизонтальной плоскости  $P$ , поверхность оболочки в окрестности точки  $O$  можно представить в виде функции:

$$z_0 = \frac{1}{2}(\kappa_{10} \cdot x_0^2 + \kappa_{20} \cdot y_0^2). \quad (1)$$

Явная форма задания поверхности в таком виде используется для нахождения свойств оболочки, т.к. в окрестности точки  $O$  в бесконечной близости к ней находится некоторая квадратичная поверхность в виде функции (1), а сама точка  $O$  является эллиптической. Однако обводообразующие обшивки, в том числе оболочки двойной кривизны, имеют явно выраженную аэрокосмическую специфику. Геометрическая форма такой оболочки определяется теоретическими контурами аэродинамического обвода планера ЛА, которые в большинстве случаев не совпадают с контурами поверхности оболочки, определяемыми плоскостями симметрии  $F_1$  и  $F_2$ . В результате имеются сложности геометрической увязки обводообразующих обшивок и осна-

стки с позиций их симметрии. Кроме того, после изготовления в металле тонколистовая оболочка из-за малой жесткости под действием собственного веса изменяет геометрическую форму и не может быть носителем формы и размеров для сборочной увязки агрегатов, узлов и деталей самолета.

Геометрическая увязка в этом случае может быть достигнута при условии, если оболочка двойной кривизны будет иметь внутреннюю поверхность, соответствующую “опорным” контурам силового набора планера, а наружную теоретическим контурам аэродинамического обвода планера. При этом обе поверхности будут отстоять друг от друга на одинаковом расстоянии по нормали в любой точке, равной толщине оболочки  $h_o$ .

Однако анализ существующих схем обтяжки позволил установить, что процесс формообразования листовой заготовки в оболочку двойной кривизны сопровождается неравномерным утонением при локализации растяжения на участке схода заготовки с пуансона перед зажимными устройствами пресса. При этом наибольшее утонение, возникающее в процессе обтяжки листовой заготовки, не зависит от схемы обтяжки, а зависит от коэффициента обтяжки, условий внешнего трения, толщины заготовки и ее термообработки [5]. В качестве коэффициента обтяжки  $K_{обм}$  обычно используют его геометрическое значение:

$$K_{обм} = 1 + e_{1n}, \quad (2)$$

где  $e_{1n}$  – потребная деформация растяжения для получения оболочки заданной формы.

В случае обтяжки оболочки двояковыпуклой формы потребная деформация определяется через геометрические параметры центрального поперечного сечения оболочки:

$$e_{1n} = \ln \frac{R_{1o} + f_o}{R_{1o}}. \quad (3)$$

где  $f_o$  – прогиб центрального поперечного контура  $G_1OG_2$ .

Так как лимитирующей деформацией при обтяжке является утонение  $e_3 = \ln \frac{h_o}{h_d}$ , тогда:

$$K_{обм} = 1 - \frac{e_3}{\frac{\mu_{21}(m - \mu_{12})}{\mu_{12}(1 - \mu_{21} \cdot m)} + 1}, \quad (4)$$

где  $\mu_{12}$  и  $\mu_{21}$  – показатели анизотропии листовой заготовки (коэффициенты поперечной деформации листового материала: 1 – направление прокатки и 2 – поперек прокатки);

$m$  – соотношение главных напряжений  $\left( m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)$ .

В формуле (4)  $e_3$  задается технологическими условиями, а в некоторых случаях принимается за допустимое значение.

Процесс обтяжки изначально внедрился в производство в несимметричном варианте. При этом прямоугольная листовая заготовка растягивается либо по длине, либо по ширине листа. В редких случаях прямоугольная листовая заготовка растягивается в двух направлениях (биаксиальная обтяжка) или равномерно по всему периметру круглой заготовки (круговая обтяжка). Как известно, в процессе обтяжки кромки листовой заготовки, жестко зажатые в прямолинейных захватах обтяжного пресса, движутся по касательным к продольному формообразующему контуру поверхности обтяжного пуансона, расположенному в плоскости симметрии  $F_1$ . При этом материальные точки заготовки на линии  $D_1OD_2$  перемещаясь по обтяжному пуансону относительно точки  $O$ , будут находиться в плоскости симметрии  $F_1$ .

При такой симметричной схеме растягивающее усилие при обтяжке листовой заготовки приложено вдоль линии  $D_1OD_2$ , которое для оболочки двояковыпуклой формы является формообразующим контуром. Тогда реализующий вектор возмущения от растягивающего усилия будет находиться в плоскости симметрии  $F_1$  в течение процесса формообразования обтяжкой такой оболочки. Это обеспечивает постоянство положений направлений главных напряжений и деформаций. В качестве самостоятельной формообразующей операции процесс симметричной обтяжки встречается редко, например, обтяжка прямоугольной заготовки по сферическому пуансону.

Приведенная на рис. 1 горизонтальная плоскость  $P$ , соприкасающаяся с поверхностью в точке  $O$ , представляет собой поверхность прямоугольной заготовки для обтяжки по обтяжному пуансону. Формообразование такой заготовки происходит за счет уменьшения толщины и увеличения площади заготовки. Степень формоизменения заготовки может быть охарактеризована отношением конечной и начальной площади, отношением соответствующих длин или толщин заготовки. Кроме того, при формообразовании анизотропной листовой заготовки знание деформированного состояния не позволяет судить о напряженном состоянии. Поэтому для конкретного процесса обтяжки нужно согласовать механическую схему деформации не только с осями анизотропии заготовки, но и с направлениями

координат  $x_0$  и  $y_0$  основного базиса, лежащего в горизонтальной плоскости  $P$ .

Требования к анизотропии свойств материала для интенсификации процессов деформирования листовых заготовок в различных операциях различные и даже требуются противоположные сочетания показателей анизотропии. В одних процессах эти показатели должны быть максимальными, в других минимальными. При этом в одних процессах желателен иметь одинаковые значения показателей анизотропии в плоскости листа, а в других предпочтительней иметь плоскостную анизотропию свойств [5].

В случае ортогональной анизотропии листовой полуфабрикат характеризуется тремя осями анизотропии. Ось 1 совпадает с направлением прокатки; ось 2 – поперек прокатки; ось 3 – направлена по толщине. При этом каждому из направлений присущи свои показатели анизотропии, относительно которых и следует осуществлять формообразование обтяжкой. Это тот случай, когда через точку  $O$ , можно провести три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии механических свойств и деформационных характеристик листового материала, совпадающие с приведенными плоскостями симметрии поверхности оболочки  $F_1, F_2$  и горизонтальной плоскостью  $P$ .

Если рассмотреть поверхность листа, совпадающей с горизонтальной плоскостью  $P$ , то в случае ортогональной анизотропии симметрия механических свойств и деформационный характеристик листа будет иметь характер эллипса, построенного вокруг точки  $O$  в координатах  $x_0$  и  $y_0$  основного базиса. В результате положения линий главных кривизн поверхности оболочки двояковыпуклой формы, определяемые направлениями координат  $x_0$  и  $y_0$  основного базиса, совмещены с осями анизотропии: 1 – направление прокатки и 2 – поперек прокатки листа.

Как было показано выше, симметрия есть качественная характеристика поверхности оболочки, и является отражением той или иной инвариантности при преобразовании координат. Реальная осуществимость обтяжки оболочки без локализации растяжения, в свою очередь, обусловлена свойствами симметрии листового материала вообще и оболочки в частности. В общем случае для ортотропного листа существует деформационная мера анизотропии. Поэтому создание в листах эффективной анизотропии свойств, может изменить соотношение между деформациями в пользу той, увеличение которой приводит к повышению предельных возможностей того или иного процесса [1].

Тогда в случае обтяжки листовой заготовки формообразование будет осуществляться не за

счет деформации по толщине, а за счет ее сужения при растяжении листовой заготовки в направлении прокатки. Поэтому проблема пластического деформирования ортогонально анизотропных материалов пока не утрачивает своей актуальности. Другими словами, создавая в листовом материале различную текстуру, можно, в принципе, обеспечить процесс обтяжки оболочки с минимальной разнотолщинностью и заданными свойствами.

Значительная разнотолщинность оболочки двойной кривизны, получаемой обтяжкой, не будет наблюдаться, если выполняется условие, что изменение относительных значений продольной разнотолщинности меньше некоторой величины. Данное условие можно выразить в эквивалентной квадратичной форме, соответствующей гауссовым параметрическим координатам поверхности  $(u, v)$  [7]:

$$(\bar{h}_i - \bar{h}_{i-1})^2 \leq \gamma_i^2, \quad (5)$$

где

$$\bar{h}_i = \left( \frac{\Delta h(v)}{h(u)} \right)_i; \quad \bar{h}_{i-1} = \left( \frac{\Delta h(v)}{h(u)} \right)_{i-1};$$

$\Delta h_i(v)$  – изменение поперечной толщины сечения оболочки под углом  $\alpha_i$ ;

$h_i(u)$  – продольная толщина сечения оболочки под углом  $\alpha_i$ ;

$\gamma_i$  – некоторая минимальная величина, определяемая устойчивостью расчета.

В нормализованном виде условие (5) имеет следующий вид:

$$\lambda_i (\bar{h}_i - \bar{h}_{i-1})^2 \leq 1, \quad (6)$$

С учетом того, что условие (6) обладает свойством аддитивности, критерий минимального изменения относительных значений продольной разнотолщинности запишется в виде функционала первого уровня:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \lambda_i (\bar{h}_i - \bar{h}_{i-1})^2 = \min. \quad (7)$$

К выражению (7) добавляются ограничения в виде условий направленного изменения толщины в продольном направлении без локализации деформации на участке схода заготовки с пуансона перед зажимными устройствами прессы:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \delta_i \bar{h}_i = c, \quad \bar{h}_n = 0, \quad (8)$$

где  $\delta_i, c$  – некоторые коэффициенты.

Решение системы уравнений (7) и (8) проводился путем исключения любой переменной, например  $h_j$  из первого ограничения

$$\bar{h}_1 = \frac{c}{\delta_1} - \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\delta_1} \cdot \bar{h}_i \text{ и подстановки ее в функ-}$$

кционал первого уровня  $J_1$  (7). Необходимым условием его минимума является равенство частных производных  $J_1$  по  $h_p$ , начиная со второй переменной  $i = 2$  до  $i = n-1$ . Направленное изменение толщины заготовки при обтяжке оболочки с минимальной разнотолщинностью осуществляется при выполнении ограничений (8) за счет подбора начального угла охвата  $\alpha_1$  и предварительной обтяжки с угла  $\alpha_1$  до  $\alpha_k$  по ступенчатой схеме растяжения заготовки по углу  $\alpha_i$  (рис. 2).

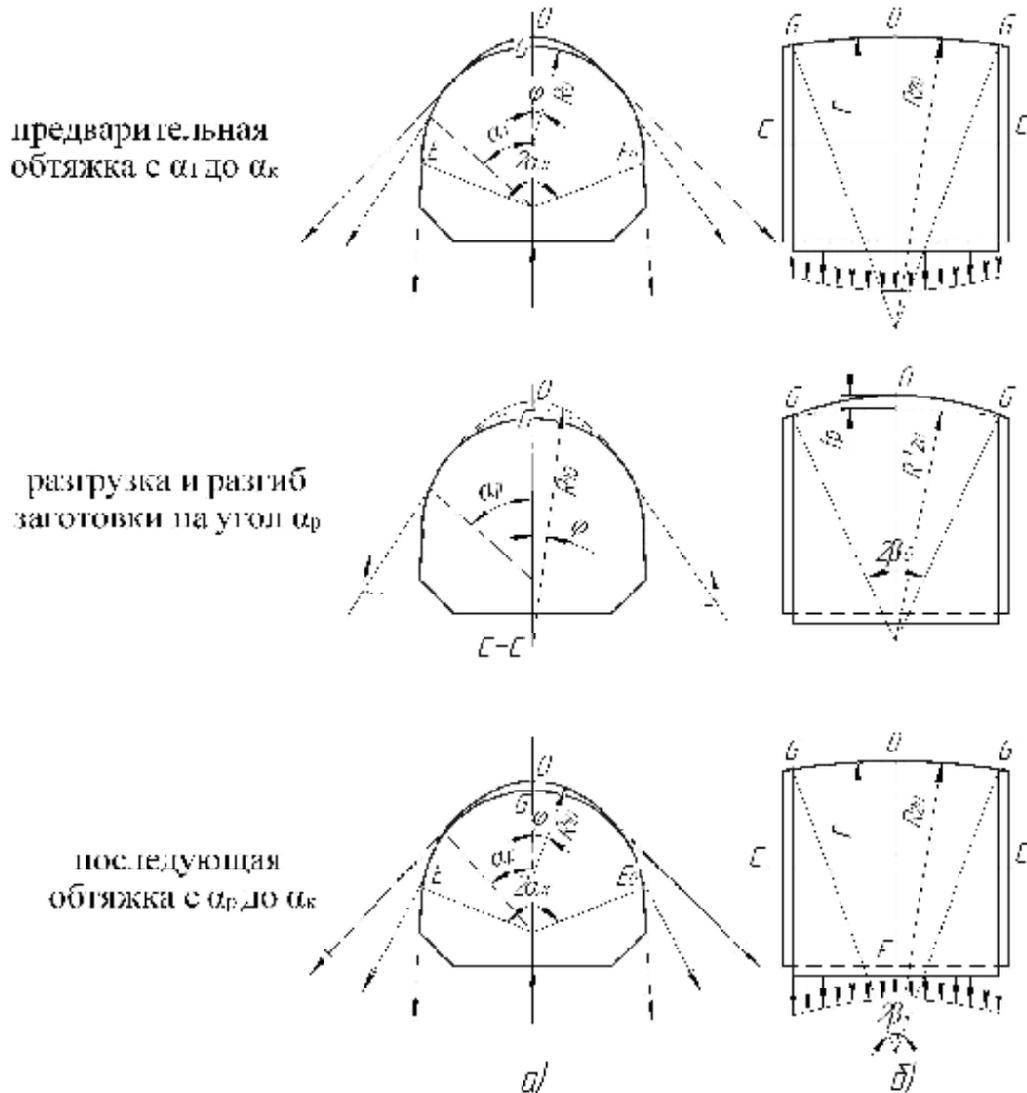
Правильный подбор угла  $\alpha_1$  должен обеспечить полное формообразование заготовки по ширине в центральном сечении оболочки, проходящем через точку  $O$  без локализации деформации в свободной части заготовки, находящейся между сходом с пуансона и зажимами прессы. В результате создаются условия направленного изменения толщины в сечениях той части заготовки, которая уже уложена на обтяжной пуансон под углом  $\alpha_1$ , начиная со значения:

$$\bar{h}_i = \bar{h}_{k, \text{зад}}, \quad (9)$$

где  $k$  – номер сечения, соответствующий углу охвата  $\alpha_1$ , предварительной обтяжки заготовки.

После предварительной обтяжки плоской заготовки с угла  $\alpha_1$  до  $\alpha_k$  наибольшая деформация будет в точке  $O$  в районе центрального сечения оболочки с гауссовой кривизной  $\kappa_o$ . Предварительная обтяжка выполняется в условиях симметрии и является первой формообразующей операцией последовательной схемы формообразования обтяжкой.

Затем предлагается разгрузить оболочку после предварительной обтяжки и, не освобождая ее из зажимов прессы, осуществить ее разгиб на угол  $\alpha_p$  за счет движения зажимов по расчетной траектории. Известно, что гауссова кривизна при разгибании оболочки в свободном состоянии сохраняет свое значение, так как квадратичная форма поверхности остается неизменной, хотя



**Рис. 2.** Последовательная схема обтяжки (предварительная и последующая):  
 а – ступенчатое нагружение с угла  $\alpha_1$  или  $\alpha_p$ ;  
 б – центральное сечение оболочки двояковыпуклой формы

главные кривизны в районе точки  $O$  будут меняться. Это понятие играет важную роль в теории тонких оболочек.

В результате получим так называемую изометрическую форму поверхности оболочки по отношению к поверхности обтяжного пуансона с радиусами кривизны в точке  $O$  соответственно  $R'_{1o}$  и  $R'_{2o}$ , связанных соотношением при постоянном значении самой гауссовой кривизны  $\kappa_o$ :

$$R'_{2o} = \frac{1}{\kappa_o R'_{1o}}, \quad (10)$$

где, если  $R'_{1o}$  при разгибе на угол  $\alpha_p$  увеличивается до  $R'_{1o'}$ , то  $R'_{2o}$ , наоборот, уменьшается до  $R'_{2o'}$ , а оболочка отступает от поверхности пуансона в районе центрального сечения на величину  $f_p$ , касаясь обтяжного пуансона только краевыми участками заготовки.

В результате при последующей обтяжке оболочки с изометрической формой поверхности с угла  $\alpha_p$  до  $\alpha_k$  по ступенчатой схеме растяжения заготовки по углу  $\alpha_i$  обеспечивается растяжение краевых практически недеформируемых участков заготовки и создаются условия выравнивания толщины заготовки в поперечном направлении за счет подбора угла разгиба  $\alpha_p$ :

$$\sum_{i=1}^n \delta_i \bar{h}_i = 0, \quad \bar{h}_1 = 0. \quad (11)$$

Последовательная схема обтяжки строится на совмещении способов формообразования в условиях симметричной обтяжки. Показана реализация этой схемы обтяжки с угла  $\alpha_1$  до  $\alpha_k$ , разгрузки с разгибом оболочки до угла  $\alpha_p$  для получения изометрической по отношению к пуансону поверхности и последующей ее обтяжки с угла  $\alpha_p$  до  $\alpha_k$ .

Минимизация функционала первого уровня  $J_1$  (7) достигается за счет введения поочередно условий (8) и (11) в систему уравнений. Однако в рамках системы уравнений не установлены значения начальных параметров, подбор которых остается интуитивным. Прежде всего, это толщина заготовки  $h_o$  и другие параметры, в качестве которых приняты показатели плоскостной анизотропии  $\mu_{12}$  и  $\mu_{21}$  листового материала.

Тогда цикл подбора углов охвата  $\alpha_1$  и  $\alpha_p$  в системе уравнений будет повторяться путем расчета оптимальных значений толщины заготовки  $h_o$  и показателей анизотропии  $\mu_{12}$ ,  $\mu_{21}$  при существующих ограничениях этих значений в пределах допуска. В качестве меры близости расчетного значения толщины  $h_i$  и заданной конструктором  $h_o$  можно принять квадратичное изменение поперечной толщины в виде:

$$\Delta h_i^2(v) = \sum_{i=1}^n [h_i(v) - h_o]^2, \quad (12)$$

где  $h_i(v)$  – поперечная толщина в сечении  $\alpha_i$ , связанная с методом расчета, например прямая последовательность расчета напряжений и деформаций с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$h_i(v) = L[f_i(v)] \quad (13)$$

где  $L$  – дифференциальный оператор.

В случае отклонений начальных параметров решения (13) их удобно искать в виде линейной комбинации независимых функций:

$$f_i(v) = Q^T \cdot \varphi_i(v), \quad (14)$$

где  $Q^T = q_i(\mu_{12}, \mu_{21})^T$  – вектор – строка начальных параметров;

$\varphi_i(v)$  – вектор – столбец подходящих функций.

В результате подстановки (14) в (13) запишем (12) в виде функционала второго уровня:

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \{L[Q^T \cdot \varphi_i(v)] - h_o\}^2 = \min. \quad (15)$$

Значения функционала второго уровня  $J_2$  при таком вычислении минимизируются только в центральном сечении  $i=1$  и по сходу с пуансона  $i=n$ . Параметром, обеспечивающим минимизацию функционала  $J_2$  независимо от схемы формообразования обтяжкой, является толщина заготовки  $h_o$ . Так как варьируемый параметр входит в дифференциальный оператор, то расчетную толщину оболочки можно представить в виде двух сомножителей, аналогично выражению (14):

$$h_i = h_o \cdot \exp(e_{3i}). \quad (16)$$

В результате введения (16) в (13) вместо  $f_i(v)$  (14) условие минимизации функционала второго уровня  $J_2$  по  $h_o$  примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial h_o} \sum_{i=1}^n (h_o \cdot \exp(e_{3i}) - h_o)^2 u_i = 0. \quad (17)$$

Кроме толщины заготовки  $h_o$  в качестве параметров варьирования в функционале  $J_2$  выбраны показатели анизотропии  $\mu_{12}$  и  $\mu_{21}$ . Возможность процесса обтяжки оболочки с минимальной разнотолщинностью и заданными свойствами намного возрастает. Для этого разложим в ряд Тейлора выражение (16):

$$h_i = h_o \cdot \exp(e_{3i}) \left[ 1 + (\mu_{12} - \mu_{12}^0) \frac{\partial}{\partial \mu_{12}} e_{3i} + (\mu_{21} - \mu_{21}^0) \frac{\partial}{\partial \mu_{21}} e_{3i} \right], \quad (18)$$

где  $\mu_{12}$  и  $\mu_{21}$  – варьируемые значения показателей анизотропии;

$\mu_{12}^0$  и  $\mu_{21}^0$  – исходные (номинальные) значения показателей анизотропии.

Тогда запишем условия минимизации  $J_2$  для варьируемых параметров:

$$\frac{\partial}{\partial h_0} \sum_{i=n}^n [h_0 - h_0 \varphi_i (1 + \Delta\mu_{12} \psi_{1i} + \Delta\mu_{21} \psi_{2i})]^2 u_i = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial \mu_{12}} \sum_{i=n}^n [h_0 - h_0 \varphi_i (1 + \Delta\mu_{12} \psi_{1i} + \Delta\mu_{21} \psi_{2i})]^2 u_i = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial \mu_{21}} \sum_{i=n}^n [h_0 - h_0 \varphi_i (1 + \Delta\mu_{12} \psi_{1i} + \Delta\mu_{21} \psi_{2i})]^2 u_i = 0; \quad (19)$$

где  $\psi_{1i} = \frac{\partial}{\partial \mu_{12}} (e_{3i})$ ;  $\psi_{2i} = \frac{\partial}{\partial \mu_{21}} (e_{3i})$ ;

$$\psi_i = \exp(e_{3i}), \Delta\mu_{12} = \mu_{12} - \mu_{12}^0; \Delta\mu_{21} = \mu_{21} - \mu_{21}^0.$$

Варьируемые параметры определяются из системы уравнений (19) для завершающей стадии, когда имеет место совпадение заданной толщины оболочки  $h_0$  и расчётной  $h_i$ . Так как сечение оболочки под углом  $\alpha_i = \alpha_k$  прямолинейное, достаточно выполнить условие минимизации  $J_2$  для сечения  $i=1$  под углом  $\alpha_i = 0$  и получить систему линейных алгебраических уравнений относительно  $\Delta\mu_{12}$  и  $\Delta\mu_{21}$ . Решение системы определяет оптимальные значения показателей анизотропии  $\mu_{12}$  и  $\mu_{21}$ .

Расчет толщины по (16) проводится в рамках деформационной теории. Исходя из этого, можно сделать допущение, что уменьшение толщины заготовки при формообразовании обтяжкой происходит в рамках малого параметра. Тогда решение с постоянной толщиной соответствует нулевому решению. Последующее решение, устанавливающее изменение толщины с использованием нулевых решений, соответствует первому приближению. Точность расчета толщины зависит от принятых допущений в рамках тонких оболочек первого приближения. Кроме этого, точность расчета зависит от значений показателей плоскостной анизотропии  $\mu_{12}$ ,  $\mu_{21}$ .

Процесс обтяжки относится к процессам, в которых формоизменение осуществляется как за счет утонения листовой заготовки, так и за счет ее сужения. В результате можно достичь увеличения степени допустимого формоизменения обтяжкой путем высоких значений показателей плоскостной анизотропии  $\mu_{12}$ ,  $\mu_{21} > 0,5$  при сочетании с достаточной пластичностью листового материала  $\delta > 20\%$ . В работе [1] показано, что сочетания значений показателей анизотропии и пластичности ( $\mu_{12}$ ,  $\mu_{21}$  и  $\delta$ ) в листовом материале, могут изменяться в достаточно широком диапазоне в зависимости от сочетания технологических режимов прокатки и термообработки.

Наиболее эффективное формирование значений  $\mu_{12}$ ,  $\mu_{21}$  достигается на стадии холодной

прокатки и отжига. Причем у термически упрочняемых алюминиевых сплавов величина обжатия не должна превышать критических значений. В противном случае нельзя получить благоприятных для обтяжки сочетаний показателей анизотропии при отжиге или закалке листов. Например, при деформациях до 60% включительно листовые заготовки из сплава Д16 необходимо отжигать при температуре 350-370С°. В этом случае они приобретают оптимальное сочетание показателей анизотропии и максимальную пластичность.

Приведенные данные показывают, что изменением температуры отжига можно регулировать анизотропию свойств листов в значительном диапазоне, добиваясь оптимального сочетания с характеристиками прочности и пластичности. Кроме того, необходимо отметить, что последовательная схема обтяжки практически выравнивает деформацию растяжения по всей поверхности оболочки. В результате допустимое формоизменение при обтяжке характеризуется только предельно-допустимой деформацией, лимитируемой утонением материала анизотропной заготовки согласно формуле (4).

При этом коэффициент обтяжки  $K_{обт}$  будет иметь допустимое значение в зависимости от толщины заготовки. Обтяжку листа из термически упрочняемых алюминиевых сплавов за один переход применяют в том случае, когда  $K_{обт}$  не будет превышать некоторых значений в зависимости от толщины заготовки и когда

$$\frac{R_1}{h_0} > 125.$$

При этом обтяжку такой заготовки

обязательно выполняют только в свежезакаленном состоянии для получения заданных свойств материала оболочки последующим старением. Необходимо отметить, что значения показателей анизотропии слабо реагируют на режим закалки и практически идентичны высокотемпературному отжигу.

В целом предлагаемый метод проектирования технологического процесса обтяжки оболочки с минимальной разнотолщинностью и заданными свойствами позволяет, во-первых, выбрать листовый материал с рациональной для формообразования обтяжкой оболочек двойной кризисной анизотропией свойств, определить ориентацию листовой заготовки при ее обтяжке, обосновать технические условия на поставку листов с требуемой направленностью свойств, во-вторых, рассчитать компоненты текстуры, формирование которых обеспечит заданные значения показателей анизотропии.

Статья подготовлена в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 годы, финансируемых за счет средств федерального бюджета, выделяемых по направлению расходов “НИОКР”, мероприятию 1.2.1 “Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
2. Максименков В.И., Жиляев А.И. Обтяжной пуансон // Авторское свидетельство Российской Федерации №2823794/27. 1996. Бюл. №26.
3. Максименков В.И., Жиляев А.И. Способ построения поверхности обтяжного пуансона // Авторское свидетельство Российской Федерации №2823794/27. 1981. Бюл. №48.
4. Максименков В.И. Способ формообразования листовых деталей двойной кривизны и устройство для его осуществления // Авторское свидетельство Российской Федерации №5026875/27. 1993. Бюл. №41.
5. Арьшенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов. М.: Metallurgia, 1990. 304 с.
6. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Ленинград: Стройиздат, 1987. 340 с.
7. Михеев В.А. Направленное изменение толщины заготовки при формообразовании обтяжкой обводообразующих оболочек двойной кривизны // МНТК “Проблемы и перспективы развития двигателестроения”. Самара: СГАУ. 2003. С. 91.

### IMPROVEMENT OF THE PROCESSES OF FORMING BY THE STRETCH-WRAP FORMING OF THE SHELLS OF THE DUAL CURVATURE

© 2011 V.A. Miheev<sup>1</sup>, A.F. Grechnikova<sup>2</sup>, A.A. Kuzina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University

<sup>2</sup> Closed Joint-Stock Company “Alkoa SMZ”, Samara

In this article is proposed the method of designing the technological process of the stretch-wrap forming of shell with the minimum variation in thickness and the assigned properties with the formation of the new series circuit of forming by the stretch-wrap forming of the shells of dual curvature from the position of their symmetry and under the conditions of the orthogonal anisotropy of sheet material.

Keywords: stretch-wrap forming, the shell of dual curvature, anisotropy, symmetry, Gaussian curvature.

Vladimir Miheev, Doctor of Technics, Professor, Head at the Technology of Metals and Aviation Materials Science Department. E-mail: vamicheev@rambler.ru.

Anna Grechnikova, Post-Graduate Student, Leading Process Engineer. E-mail: anna\_gr17@yahoo.com.

Antonina Kuzina, Post-Graduate Student, engineer at the Technology of Metals and Aviation Materials Science Department. E-mail: KuzinaAntonina@mail.ru.