

Способ формообразования обшивок и панелей одинарной кривизны методом свободной гибки-прокатки на оборудовании с ЧПУ

Государственное предприятие «АНТОНОВ»

Предложен оригинальный метод формообразования как листового материала, так и панели - так называемый процесс последовательного формообразования. Этот процесс заключается в том, что сперва осуществляют деформацию на величину, которая составляет часть общей величины деформации (первая итерация формообразования), с помощью выставленных в ряд настраиваемых деформирующих пуансонов (роликов), расположенных вдоль края заготовки, с последующей их продольной прокаткой теми же роликами (перемещение роликов вдоль по листу, лежащему на регулируемой наборной матрице). Процесс последовательного формообразования заканчивается после осуществления нескольких итераций до достижения заготовкой требуемой окончательной формы.

Ключевые слова: лист, панель, формообразование, обводообразующие детали, кривизна, радиус кривизны, одинарная кривизна, поверхность второго порядка.

Введение

В современных летательных аппаратах (ЛА) силовые обводообразующие детали изготавливают из металлических сплавов. Как правило, чаще всего это термически упрочненные алюминиевые сплавы, а иногда – стали и титановые сплавы. Несмотря на то, что в последнее время все большую популярность приобретают композиционные материалы, однако, силовая основа планеров традиционно остается металлической. Из композиционных материалов изготавливают различные люки, обтекатели, капоты, щитки, рули и другие детали аналогичного класса.

Постановка задачи исследования

В силовой конструкции серийно выпускаемых и планируемых к производству ЛА по-прежнему применяют металлические обводообразующие детали. Возрастающие требования к качеству изготовления крупногабаритных металлических обводообразующих деталей, а также к повышению производительности оборудования и исключения ручных доводочных работ подчеркивают актуальность данной тематики как для науки, так и для практики при внедрении нового оборудования.

Основными методами формообразования обводообразующих деталей, как правило, являются гибка-прокатка, свободная гибка, обтяжка и обдувка дробью. Выбор метода формообразования зависит от совокупности конструкторских признаков детали. В ходе технологической классификации деталей устанавливают, прежде всего, соответствие между конструктивными и технологическими признаками оборудования, которое необходимо использовать при изготовлении. За основу можно взять классификатор

П. Н. Беянина [1], в котором наиболее значимым признаком (конструкторским) выбрана форма наружной поверхности детали, характеризуемая гауссовой кривизной $k=1/R$, а в качестве других признаков классификации приняты сочетания геометрических параметров детали. В соответствии с принятыми признаками детали подразделяют на два больших класса – класс деталей одинарной кривизны ($k=0$) и класс деталей двойной кривизны ($k \neq 0$). Внутри этих классов выделяют характерные группы. К первому классу относят детали имеющие цилиндрическую или конусную форму поверхности, а ко второму – детали с двойной кривизной поверхности (рис. 1).

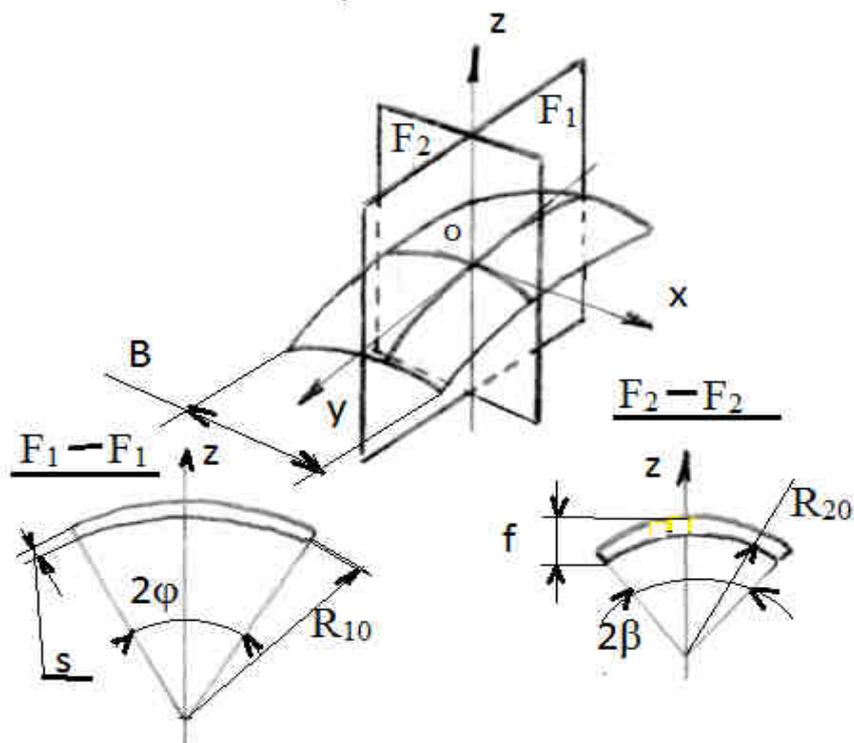


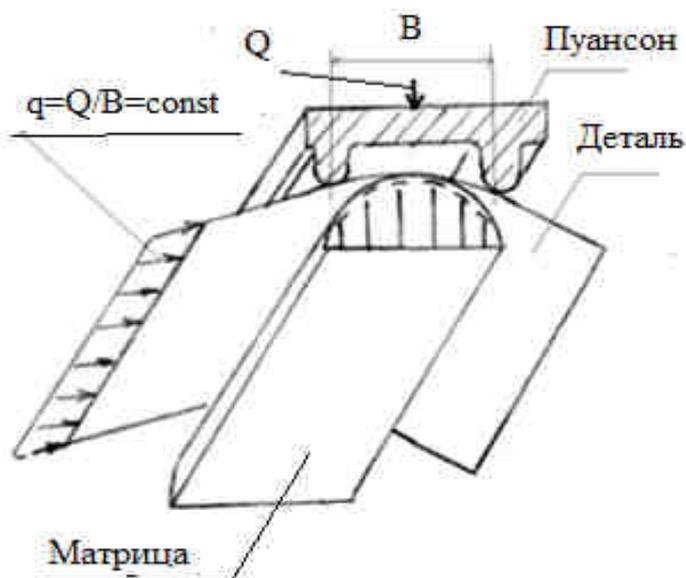
Рис. 1. Деталь с аэродинамическим профилем двойной кривизны ($K=0$):
 B – ширина заготовки; 2φ – угол охвата и R_{10} – радиус кривизны по сечению F_1 ;
 2β – угол охвата и R_{20} – радиус кривизны по сечению F_2 ; f – прогиб детали;
 s – толщина детали

Конструктивно-технологические признаки классификации деталей с обводообразующей поверхностью представлены в таблице.

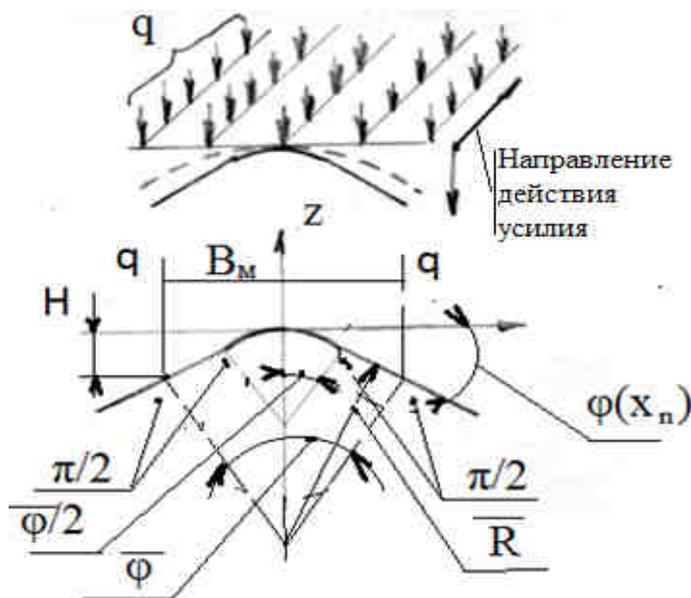
Классификация деталей

№ п/п	Метод формообразования	Классы			
		Детали с одинарной кривизной ($K=0$)		Детали с двойной кривизной ($K \neq 0$)	
		Группы			
		Цилиндрические	Конические	Листы	Панели
1	Гибка-прокатка	О			
2	Свободная гибка	О	О		О
3	Обтяжка			О	
4	Дробеобработка				О

Свободную гибку математически можно представить как частный случай гибки-прокатки, т.е. когда вращение гибочных валков равно нулю. В этом случае зона разгрузки будет отсутствовать, а правая и левая части изгибаемой заготовки будут зеркально отраженными зонами нагружения. Однако необходимо помнить, что такое утверждение справедливо лишь тогда, когда гибочные инструменты (пуансон и матрица) воздействуют на заготовку по всей длине (рис. 2), а жесткость заготовки и погонная нагрузка по длине постоянны.



а



б



Рис. 2. Свободная гибка детали по всей длине образующей:
 а – при постоянной погонной нагрузке; б – сечение с остаточным углом
 гибки φ и H – наибольший остаточный прогиб;
 в – условный вид системы пуансон-матрица.

Задачу нахождения остаточного радиуса кривизны детали R после гибки-прокатки и при свободной гибке приводят к совместному решению задачи консольного изгиба в зоне нагружения и разгрузки с наложением условий гладкой стыковки этих зон в точке сопряжения [2, 4].

Линия изгиба для зон нагружения и разгрузки находится методом решения дифференциального уравнения равновесия Кирхгофа:

$$dM / dS + [\omega \cdot M] - [\tau \cdot Q] = 0 \quad (1)$$

где Q и M – главный вектор и главный момент внутренних сил, действующих в сечении и проходящих через произвольную точку O ;

τ – единичный вектор сопровождающего трехгранника, определяющий положительное направление касательной в данной точке нейтральной линии;

ω – вектор угловой скорости вращения главного трехгранника (главных осей кручения и изгиба, совпадающих с главными осями инерции поперечного сечения стержня) вокруг своего начала.

Для зоны разгрузки, представляющую собой упругоизогнутую консоль с исходной кривизной $\bar{k} = 1/\bar{R}$ применимо известное решение Е. П. Попова [2], а для зоны нагружения, охватывающей как упругие, так и пластические задачи изгиба консоли, – решение М. И. Лысова [3].

Для практического применения свободной гибки и простоты расчетов будем считать, что ширина изгибаемого элемента равна единице.

В дальнейших рассуждениях принимаем:

$\kappa=1/R$ – кривизна элемента под нагрузкой;
 $\bar{\kappa} = 1/\bar{R}$ – остаточная кривизна после снятия нагрузки;
 $\varepsilon_p = (\kappa/\varepsilon)^{1/(1-n)}$ – деформация, соответствующая точке перехода линейной зависимости $\sigma = E \varepsilon$ в степенную $\sigma = \kappa \varepsilon^n$;
 M – изгибающий момент;
 y – координата, изменяемая от середины толщины заготовки;
 y_p – координата, в которой $\varepsilon = \kappa y_p = \varepsilon_p$.
 Изгибающий момент, накопленный в элементе единичной ширины при деформации до кривизны κ , представляется в виде

$$M=2\int_0^{y_p} E\kappa y^2 dy+2\int_{y_p}^{s/2} \kappa(\kappa y)^{ny} dy=(2E\kappa y_p^3)/3+(2\kappa\kappa^n)/(n+2)[(s/2)^{n+2}-y_p^{n+2}]. \quad (2)$$

Для дальнейшего удобства линеаризуем функцию $M(\kappa)$, т. е. представим в виде $M = a_i + b_i\kappa$,

где a_i и b_i – постоянные коэффициенты в пределах $k_{i-1} \leq \kappa \leq k_i$.

Значения k_i зададим: $k_0 = 0$; $k_1 = \kappa_p = \varepsilon_p/(s/2)$; $k_2 = \kappa$.

Вычислим M_i для каждого k_i по формуле (2).

На рис. 3 показан линеаризованный график зависимости $M = f(\kappa)$.

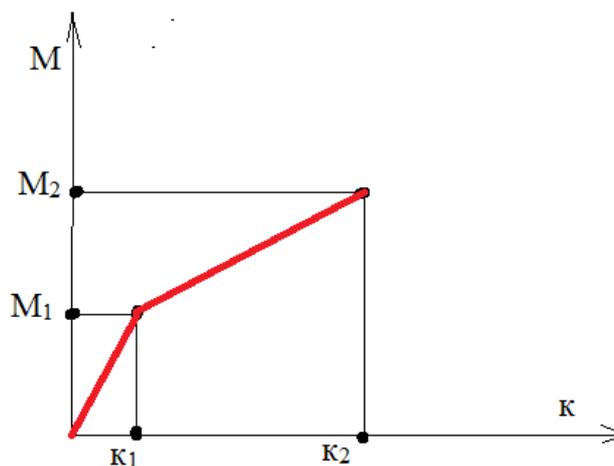


Рис. 3. График зависимости изгибающего момента от кривизны под нагрузкой κ

Коэффициенты a_i и b_i вычисляем по формулам:

$$\begin{cases} a_i = M_i - ((M_i M_{i-1}) / (\kappa_i - \kappa_{i-1})) \kappa_i ; \\ b_i = (M_i M_{i-1}) / (\kappa_i - \kappa_{i-1}). \end{cases} \quad (4)$$

В случае снятия внешней нагрузки в исследуемом элементе происходит пружинение, под нагрузкой он имеет кривизну κ , после снятия приходит в равновесное состояние, которое характеризуется остаточной кривизной $\bar{\kappa}$.

Связь между ними выражается формулой

$$\bar{\kappa} = \kappa - M / (EJ), \quad (5)$$

где $J = s^3/12$ – момент инерции элемента единичной ширины.

Подставив в эту формулу значение M формулы (3), будем иметь:

$$\bar{k} = c_i + d_i k, \quad (6)$$

где $c_i = -12d_i/(Es^3)$; $d_i = 1 - (12b_i)/(Es^3)$.

Эпюра изгибающего момента для нагруженных элементов рассчитывается по формуле:

$$M_{изг} = Q_n(B/2-x)/2. \quad (7)$$

На рис. 4 показана эпюра изгибающего момента в формообразующей детали.

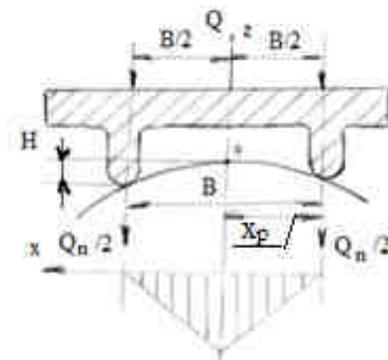


Рис. 4. Эпюра изгибающего момента

Для построения графика зависимости остаточной кривизны изогнутого элемента $\bar{k}_{ост}$ от кривизны под нагрузкой воспользуемся формулой (6) в предположении, что $s = 1$. Обозначим остаточную кривизну таким образом: $\bar{k}_{ост} = \bar{k}S$; $k_{ост} = kS$. При таком условии график зависимости $\bar{k}_{ост} = f(k_{ост})$ можно считать универсальным для любых значений толщины s . На рис. 5 изображен график зависимости $\bar{k}_{ост} = f(k_{ост})$ для сплавов Д16Т и В95Т2.

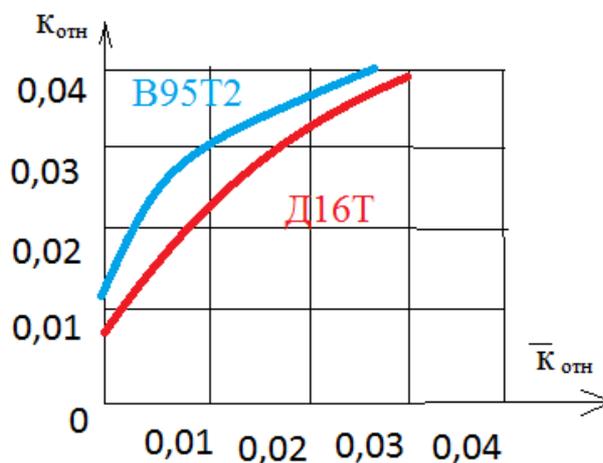


Рис. 5. График зависимости $k_{ост} = f(\bar{k}_{ост})$ для сплавов Д16Т и В95Т2

Для расчета упругопластического прогиба под нагрузкой принимаем известную математическую зависимость

$$k=f(x) = y''/[1+(y')^2]^{3/2}. \quad (8)$$

Если учесть, что прогибы очень малы, то первую производную приравняем к нулю, тогда

$$\kappa=f(x) = y'' \quad (9)$$

Функцию $\kappa=f(x)$ выводим путем совместного решения уравнений (3) и (7), после чего получаем:

$$\kappa=f(x) = l_i + f_i x, \quad (10)$$

где $l_i = (Q_n b_m - 4a_i)/4b_i$, $f_i = -Q_n/2 b_i$.

После дифференцирования уравнений и дальнейшего интегрирования запишем уравнение для угла наклона касательной к изогнутой оси

$$y' = f(x) = \varphi f(x) = l_i x + (f_i x^2)/2 - q, \quad (11)$$

из которого получаем, что в точке сопряжения упругого и пластического участков изогнутой оси кривизна $\kappa=f(x) = \kappa_p$.

Тогда из формулы (10) находим

$$x_p = (\kappa_p - l_i)/f_i. \quad (12)$$

После дальнейших преобразований получаем, что прогиб изогнутого элемента под нагрузкой равен:

$$H = y(B_M/2) = [l_i (B_M/2)^2]/2 + [f_i (B_M/2)^3]/6 + \zeta_1(B_M/2) + q_1, \quad (13)$$

где $q_1 = y_i - l_i (x_p^2/2) - f_i (x_p^3/6) - \zeta_1 x_p$;

$$\zeta_1 = \varphi_i - l_i x_p - f_i (x_p^2/2).$$

Наибольший остаточный прогиб можно вычислить при подстановке – вместо $x = B_M/2$, тогда будем иметь

$$\bar{y}(B_M/2) = \bar{y}(x_p) + \bar{\varphi}(x_p)(B_M/2 - x_p). \quad (14)$$

Для построения графика зависимости прогиба H от усилия на пуансоне Q_n при заданном чертежом остаточном радиусе кривизны \bar{R} по графику $\bar{k}_{отн} = f(k_{отн})$ (рис. 4) находим активный радиус кривизны R . При этом изгибающий момент M , соответствующий активной кривизне $K = 1/R$, находим по формуле (3).

Усилие на пуансоне Q_n , необходимое для создания изгибающего момента M при ширине ручья B , вычисляем по формуле:

$$Q_n = 4M / B. \quad (15)$$

Величину прогиба вычисляем по формуле (13).

На рис. 6 показан график зависимости прогиба H от усилия на пуансоне для сплава Д16Т толщиной $t = 1,5$ мм одиночной ширины (1 мм) при ширине ручья $B = 40$ мм, рассчитанная по формуле (13).

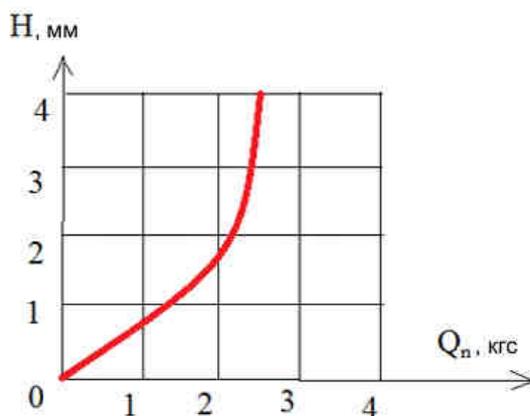


Рис. 6. График зависимости $H = f(Q_n)$

Следует отметить, что информацию, содержащуюся на графиках рис. 5, 6 можно использовать в памяти микропроцессора, которым может быть оснащена система устройств для осуществления процесса формообразования с ЧПУ.

Методика решения задачи

В статье предложен способ формообразования листового материала (панелей), заключающийся в свободной гибке и последовательной продольной раскаткой, осуществляемой на оборудовании с ЧПУ с помощью регулируемых пуансона и матрицы.

Формообразование детали осуществляется с помощью наборной жесткозакрепленной матрицы и пуансона, передвигаемого по заданной программе как по высоте, так и вдоль матрицы. Наборные элементы матрицы и пуансона выполнены с определенной степенью свободы и фиксируются в соответствии с кривизной профиля детали.

Процесс свободной гибки-прокатки осуществляется в такой последовательности: после расчетов и ввода в ЭВМ технологических параметров, таких, как усилие гибки Q_n ; ход пуансона H ; остаточная кривизна $\bar{R}_{ост}$. Далее происходит настройка в нулевой позиции матрицы и пуансона по конфигурации детали. Затем на матрице закрепляют заготовку, после чего осуществляется вертикальное перемещение пуансона вниз, при этом происходит свободная симметричная гибка, затем пуансон совершает горизонтальные возвратно-поступательные перемещения (итерации) до тех пор, пока на заготовке (панели) не сформируется требуемая чертежом кривизна детали без пружинения (рис. 7).

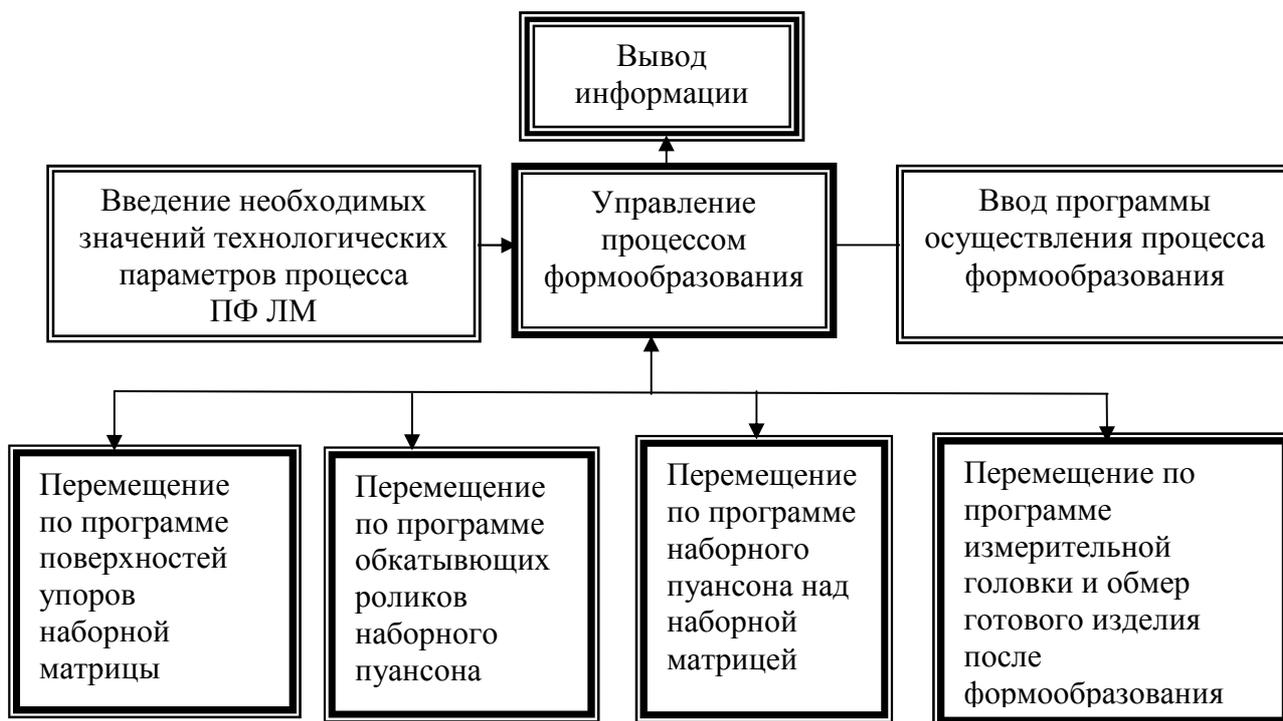


Рис. 7. Блок-схема функционирования автоматизированной системы устройств

Для процесса характерна реализация многоходовой совмещенной поперечной деформации с продольной обкаткой детали, что позволяет осуществить ее бездефектную деформацию в широком диапазоне толщин. Гибка

происходит за пределами упругости в области пластических деформаций обрабатываемого материала. К листовой заготовке, установленной на регулируемых упорах наборной матрицы, прикладывается нагрузка с помощью роликов наборного пуансона, в результате чего в листе-заготовке возникают как остаточная пластическая, так и упругая деформация. После снятия нагрузки заготовка за счет сил остаточной деформации приобретает новую форму, а за счет упругих деформаций в ней возникает так называемый эффект «пружинения».

Благодаря многоитерационности процесса достигается требуемая теоретическая кривизна поверхности, при этом заготовка должна облегать матрицу без упругих деформаций.

Предложенный процесс последовательного формообразования реализован с помощью автоматизированной системы устройств, принципиальная схема которой изображена на рис. 8.

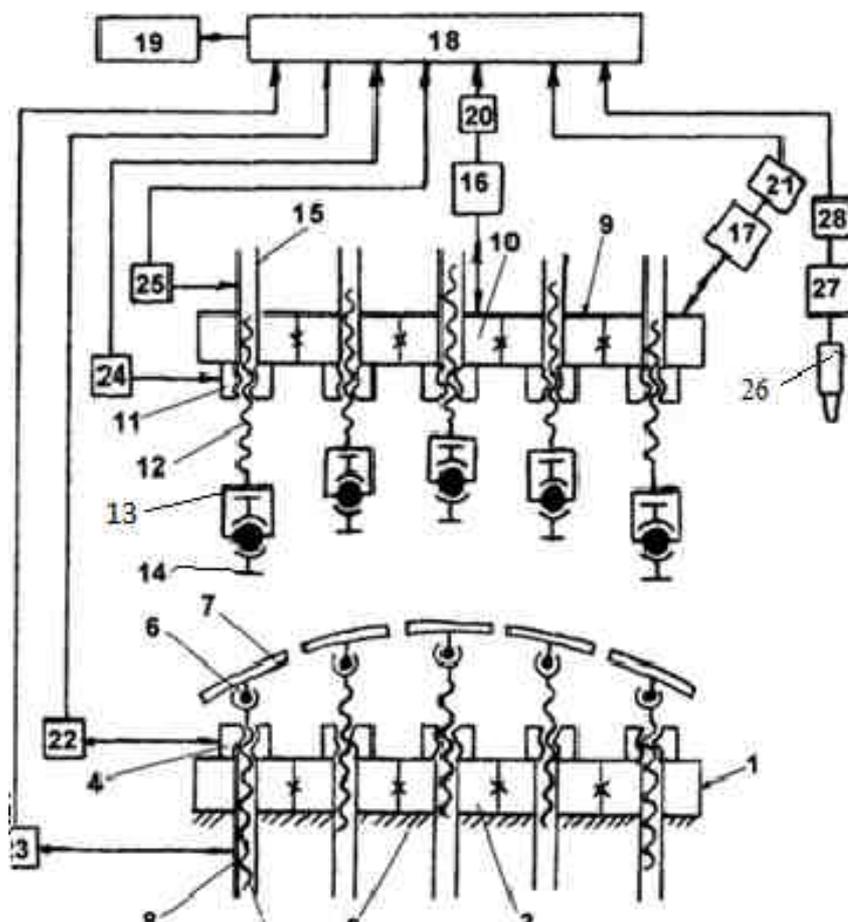


Рис. 8. Принципиальная схема автоматизированной системы для реализации процесса последовательного формообразования

Автоматизированная система содержит наборную матрицу 1, неподвижно установленную на основе 2. Матрица 1 состоит из ряда однотипных элементов 3, а они, в свою очередь, жестко соединены в массив, который должен соответствовать размеру листовой заготовки, предназначенной для формообразования. Сверху каждого элемента 3 расположена опорная гайка 4, которая выполнена с возможностью вращения вокруг винта 5 с помощью

электропривода (на рис. 1 не показан) для создания его возвратно-поступательного перемещения внутри элемента 3. При этом на верхнем торце винта 5 через шарнирное соединение 6 установлен упор 7. Он выполнен в виде одной пластины, например, изготовленной из металла или пластика, или из пакета пластин (обеспечивается эффект рессоры). Каждый элемент 3 снабжен датчиком перемещения 8 для винта 5 и упора 7, выполненных в бесконтактном или контактном варианте, например, в виде емкостного, индукционного или реостатного типа. Над упорами 7 расположен наборный пуансон 9, состоящий из ряда однотипных элементов 10. Они, в свою очередь, жестко соединены в один ряд, при этом количество элементов 10 равно количеству элементов 3 сборочной матрицы в одном ее поперечном ряду.

Снизу каждого элемента 10 расположена опорная гайка 11, которая выполнена с возможностью вращения вокруг винта 12 с помощью электропривода (на рис. 8 не показано) для создания его возвратно-поступательного перемещения внутри элемента 10. При этом на нижнем торце винта 12 установлено вилочное соединение 13 с обкатывающим роликом 14, со сферическим подшипником, который имеет возможность вращения вокруг своей горизонтальной оси и колебания относительно вертикальной оси. Каждый элемент 10 снабжен датчиком 15 перемещения винта 12 в виде бесконтактного или контактного типа. Для осуществления вертикального возвратно-поступательного перемещения наборного пуансона 9 относительно наборной матрицы 1 к нему присоединен управляемый силовой привод 16. Привод может быть выполнен как гидравлического, так и электромеханического типа с соответствующим блоком управления 20.

В целях осуществления горизонтального возвратно-поступательного перемещения наборного пуансона 9 вдоль наборной матрицы 1 к нему присоединяется управляемый силовой привод 17. Привод может быть как гидравлического, так и электромеханического типа с соответствующим блоком управления 21, который обеспечивает скорость перемещения. Наборный пуансон 9 с управляемым силовым приводом 16 устанавливаются на подвижном портале (на рис. 8 не показан), выполненном с возможностью перемещения вдоль наборной матрицы от управляемого силового привода 17. Усилия деформации, приходящие на один обкатывающий ролик 14, зависят от марки материала листа и его толщины. Автоматизированная система содержит измерительную головку 26 с приводом 27 и систему позиционирования 28, которая может быть выполнена как роботизированный комплекс или как установка на подвижном портале (на рис. 8 не показан). Автоматизированная система снабжена системным блоком управления (СБУ) 18, выполненным на базе микропроцессорной техники, к которому подключено показывающее устройство (ПУ) 19, например компьютерный монитор. На монитор выводят все необходимые значения технологических параметров процесса последовательного формообразования и для сравнения результатов обмеров геометрии полученного изделия.

В схему управления процессом формообразования в СБУ 18 подключены:

- силовой привод 16 вертикального перемещения наборного пуансона 9 (через блок управления (БУ) 20);
- силовой привод 17 горизонтального возвратно-поступательного перемещения наборного пуансона 9, вдоль всей сборочной матрицы 1 (через БУ 21);
- регулирующий электропривод каждой гайки 4 винта 5 (через БУ 22);

– датчик перемещения 8 каждого винта 5 (через БУ 23), регулирующий электропривод каждой гайки 11 винта 12 (через БУ 24), датчик перемещения 15 каждого винта 12 (через БУ 25);

– измерительная головка 26, подключенная к приводу 27 системы позиционирования 28.

На рис. 9 показана принципиальная циклограмма функционирования системы управления реализации процесса последовательного формообразования деталей одинарной кривизны. В ней отражен вид технологического процесса (прямой) со следующими значениями параметров:

1) количество итераций при формообразовании детали;

2) геометрия расположения упоров 7 по всей поверхности наборной матрицы 1 (соответствует заданной кривизне и теоретической геометрии поверхности);

3) геометрия (координаты) расположения обкатывающих роликов 14 (для каждой итерации формообразования);

4) необходимое усилие деформации для формообразования детали с помощью обкатывающих роликов с помощью силового привода 16;

5) координаты перемещения измерительной головки 26 по поверхности детали после окончания процесса формообразования с помощью системы позиционирования 27.

На основе описанной выше автоматизированной системы реализуется процесс прямого последовательного формообразования, который носит циклический характер. Для дальнейших итераций циклограмма аналогична.

Технологические операции при реализации прямого процесса ПФ	Первый проход формообразования						
Начальное положение автоматизированной системы	○						
Установка упоров на требуемую высоту по всей матрице		○					
Установка роликов на требуемую высоту		○					
Размещение ЛМ и его фиксация по краям (по нейтральной линии)			○				
Перемещение роликов в сторону листа и его начальное деформирование на упорах первого ряда				○			
Прямая продольная обкатка листа					○		
Обратная обкатка листа (выглаживание)						○	
Подъем пуансона (роликов) в исходное положение							○
Подъем пуансона в начальное положение автоматизированной системы	○						

Рис. 9. Циклограмма прямого процесса

При реализации прямого процесса сперва СБУ 18 подает сигнал на перемещение каждого из упоров 7 и роликов на необходимое для них расстояние (контур расположения упоров 7 и роликов 14 соответствует расчетной теоретической линии контура формообразованного листа) для осуществления первого прохода формообразования. После этого заготовку детали располагают

между наборной матрицей 1 и наборным пуансоном 9 и жестко ее закрепляют по нейтральной линии. Затем СБУ 18 подает сигнал через БУ 20 на силовой привод 16 вертикального перемещения наборного пуансона 9 для начального обжатия листа с помощью обкатывания роликов 14 над первым рядом упоров 7. Силовой привод 17 по сигналу от СБУ 18 из БУ 21 осуществляет горизонтальное перемещение наборного пуансона 9 вдоль всей наборной матрицы 1. При этом перемещаются обкатывающие ролики 14 вдоль всего прохода по листу, деформируют его (прямая обкатка) до соприкосновения с соответствующими упорами 7. После окончания первого прохода формообразования наборный пуансон 9 по сигналу от СБУ 18 и с помощью привода 17 возвращается (обратная обкатка) в исходное положение. В исходном положении пуансон 9 поднимается с помощью привода 16 вверх над листом, а упоры 7 по сигналу от СБУ 18 с помощью каждого винта 5 и гайки 4 с электроприводом опускаются до величины соответствующей геометрии, необходимой для формообразования ЛМ второго прохода. После этого обкатывающие ролики опускаются до геометрии, которая соответствует второму проходу, и цикл (деформация ЛМ обкатывающими роликами 14 и их перемещения вдоль листа) повторяется такое количество итераций, которое заложено в программе.

Выводы

Преимущество последовательного формообразования по сравнению с другими процессами заключается в следующем:

1. Усилие деформации листового материала меньше в несколько раз по сравнению с существующими процессами формообразования с помощью следующих факторов:

- первоначальная краевая изгибная деформация листа ограничивается относительно узкой полосой порядка 30 ... 50 мм;
- последующая продольная прокатка происходит от полосы с краевой деформацией до конца листа;
- формообразование осуществляется вследствие многоитерационности самого процесса порядка 3 – 4 раз.

2. При последовательном формообразовании возникают только нормальные изгибающие напряжения $\sigma_{изг}$ без нормальных растягивающих напряжений σ_p , что позволяет получить деформированный лист без утонений (разнотолщинности).

Процесс свободной гибки с последовательной продольной прокаткой наиболее предпочтителен в силу того, что он может обеспечивать формообразование деталей одинарной кривизны ($K=0$) с переменной жесткостью (клиновидные плиты), плиты с локальными усилениями, панели с нерегулярным оребрением и с переменной кривизной вдоль прямолинейных образующих.

Список литературы

1. Белянин, П. Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. [Текст] / П. Н. Белянин. – М.: Машиностроение, 1979. – 360с.
2. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки. [Текст] / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 300с.

3. Мошнин, Е. И. Гибка, обтяжка и правка на прессах. [Текст] / Е. И. Мошнин. – М.: Машгиз, 1959. – 254 с.

4. Лысов, М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методом гибки. [Текст] / М. И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. -236с.

5. Патент Украины №102792. Способ формообразования крупногабаритных деталей из листовых материалов.

6. Патент Украины №102793. Автоматизированная система устройств для формообразования крупногабаритных деталей из листовых материалов.

Поступила в редакцию 10.03.2016

Спосіб формоутворення обшивок і панелей одинарної кривизни методом вільного згинання-прокатки на обладнанні з ЧПУ

Запропоновано оригінальний метод формоутворення як листового матеріалу, так і панелі – так званий процес послідовного формоутворення. Він полягає в тому, що спершу здійснюють деформацію на величину, яка становить частину загальної величини деформації (перша ітерація формоутворення), за допомогою виставлених в ряд деформуючих пуансонів (роликів), що настроюються та розташовані уздовж краю заготовки, з подальшою її повздовжньою прокаткою за такими же роликами (переміщення роликів уздовж по листу, що лежить на регульованій набірній матриці). Процес послідовного формоутворення закінчується після здійснення декількох ітерацій до досягнення заготовкою необхідної остаточної форми.

Ключові слова: лист, панель, формоутворення, обводоутворюючі деталі, кривизна, радіус кривизни, одинарна кривизна, поверхня другого порядку.

Method of Forming Panels Coverings and Single Curvature Method Free Bendingrolling on CNC Equipment

An original method of forming as a sheet material and panels, the so-called process of successive formation, which is that the first exercise deformation by an amount that is part of the total amount of deformation (the first iteration of forming) by exhibited in a number of successive deforming punches (clips) along the edge of the workpiece, with their subsequent longitudinal rolling using the same rollers (rollers moving along the sheet lying on the adjustable inlaid matrix). PF process ends after the number of iterations to achieve the desired final shape of the workpiece.

Key words: leaf, panel, forming, profile details, the curvature radius of curvature, single curvature quadric surface.