

doi: 10.32620/oikit.2019.85.03

УДК 629.735.33.02.01:621.7.043

С.А. Бычков<sup>1</sup>, Б.В. Лупкин<sup>2</sup>,  
А.А. Павленко<sup>2</sup>, Ю.А. Корольков<sup>1</sup>

## Расчет усилий формообразования панелей воздушного судна при последовательной свободной гибке на специализированном оборудовании

<sup>1</sup> Компания ГП «Антонов»

<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет  
«Харьковский авиационный институт»

Конструкция современного воздушного судна предусматривает высокую степень панелирования обводообразующих элементов, которая может составлять до 80...85%. Это обеспечивает ее повышенную прочность и жесткость с одновременным снижением массы и улучшением летных характеристик изделия, в том числе, и за счет уменьшения количества крепежных деталей и заклепочных швов. Также улучшение параметров происходит из-за использования высокопрочных деформируемых алюминиевых и других сплавов. Однако, изготовление таких панелей является трудоемким и требует специального оборудования. В то время когда технологии и оборудование для изготовления панелей одинарной кривизны достаточно хорошо отработаны, изготовление с необходимой точностью панелей, имеющих переменную крутку поперечных сечений на существующем универсальном оборудовании пока еще затруднительно. В основном для изготовления таких панелей используется свободная гибка, требующая большого количества доводочных работ. Использование универсального оборудования типа РОП также недостаточно эффективно, так как обтяжные пуансоны изготавливаются индивидуально для каждой детали и имеют высокую стоимость. Для преодоления существующих недостатков предлагается использовать наборные управляемые роликовый пуансон и матрицу, форма которых задается устройством ЧПУ по информации с цифрового макета изделия. Разработана расчетная схема действия сил на ролики наборного пуансона для последовательного формообразования заготовки. Представлен метод расчета технологических параметров процесса формообразования панели, который позволяет определить, в частности, общее потребное усилие подачи роликов наборного пуансона, величины продольных и поперечных компенсационных углов наклона роликов наборного пуансона и расчетное количество проходов деформирования. Определены исходные данные для осуществления процесса, описана схема процесса формообразования панели с переменной круткой. Приведен пример решения задачи определения технологических параметров процесса формообразования панели на предложенном оборудовании предложенным методом.

**Ключевые слова:** свободная гибка-прокатка; последовательная гибка; панель; переменная крутка; наборной пуансон; роликовый пуансон; наборная матрица; многоэлементная формообразующая оснастка; радиус кривизны.

### Введение

Для современных конструкций воздушных судов (ВС) характерна большая степень панелирования обводообразующих поверхностей. К этим поверхностям относятся: крупногабаритные монолитные, монолитно-сборные и сборно-каркасные панели; панели с переменной кривизной ее поверхности; панели с поверхностью первого порядка с двойной кривизной. Степень панелирования обводообразующих поверхностей для широкофюзеляжных ВС в настоящее время составляет 80...85%. Внешняя обтекаемая поверхность

обшивки ВС воспринимает непосредственно аэродинамическую нагрузку и передает ее на продольный и поперечный набор каркаса изделия в целом. Применение панелей в качестве обводообразующих элементов внешней формы ВС обусловлено повышением прочности и жесткости конструкции с одновременным снижением массы и улучшением летных характеристик изделия.

Уменьшение общей массы изделия, улучшение аэродинамических характеристик его поверхностей происходит за счет уменьшения количества крепежных деталей и заклепочных швов, а это обуславливает изготовление панелей максимальной величины. При этом сокращается трудоемкость сборочно-клепальных работ. Однако, изготовление таких панелей является трудоемким и требует специального оборудования.

Заготовками для изготовления панелей и обшивок служат листы, получаемые прокаткой или прессованием, выполняются они из высокопрочных деформируемых алюминиевых и других сплавов.

Основными технологиями формообразования панелей являются: свободная гибка на прессовом оборудовании; гибка-прокатка на трех-, четырехвалковых листогибочных машинах; метод дробеударного формообразования (ДУФ); гибка с растяжением на специальных или обтяжных прессах [1, 2, 3].

Свободная гибка на прессах типа ПП-250 является одним из наиболее универсальных методов формообразования. Эта технология применяется как самостоятельный процесс формообразования обшивок и панелей одинарной кривизны, для правки заготовок, а также для подгибки мест усилений перед ДУФ [1]. Однако, формообразование прессовой гибкой нецелесообразно из-за утраты кривизны панелей при последующей обработке дробью. После гибки на прессе детали имеют такой дефект формы, как огранка [1, 4].

Процесс формообразования при свободной гибке связан с необходимостью выполнения большого числа нагружений с постепенной доводкой геометрии панели в ручном режиме до требуемой кривизны, заданной по чертежу.

Следует отметить, что ручное управление гибкой-прокаткой не позволяет достичь требуемых показателей точности формообразования аэродинамической поверхности детали. При этом задача автоматизации процесса гибки-прокатки панелей в продольном направлении с обеспечением точности и стабильности имеет ряд трудностей.

С внедрением в производственный процесс автоматизированного оборудования, необходимо отметить актуальность использования систем автоматизированного проектирования (САПР), в том числе и для оборудования с ЧПУ.

Известны зарубежные образцы автоматизированного прессового оборудования, предназначенные для последовательного формообразования панелей в программном режиме. Это оборудование выпускается фирмами «Verson-LCM», «Hammerly», «Sheridan-Grey» и др. [1].

Известны универсальные станки для гибки-прокатки типа КГЛ, ГЛС, ГЛП. Автоматизация управления процессом резки увеличивает производительность оборудования за счет уменьшения остановок, связанных с замерами кривизны и регулировкой положения валков. Однако, получение с требуемой точностью деталей, имеющих переменную крутку поперечных сечений, на перечисленных

станках не представляется возможным.

Наиболее перспективной является универсальная формообразующая оснастка, а именно оснастка, реализующая процесс последовательного формообразования поверхности из заготовок в панели, и при этом охватывающая широкий спектр их номенклатуры [6, 7, 8].

Ранее в известной статье представлен расчет усилий формообразования панелей способом поперечного обжатия с продольной прокаткой роликами на специализированном оборудовании [8].

Оборудование имеет в своем составе настраиваемые многоэлементные матрицу и пуансон, а сам процесс формообразования реализуется в автоматическом режиме с использованием CALS (ИПИ)-технологий [9].

### 1. Расчет усилий формообразования заготовки панелей

Так как процесс формообразования в данной технологии предусматривает осуществление многократного продольного обкатывания (итераций, или переходов) заготовки по универсальной переналаживаемой матрице, то общую потребную мощность формообразования ( $N_n$ ) можно определять, как сумму мощностей затраченной для продольного перемещения ролика при каждом переходе. В первом приближении потребную мощность каждого перехода будем рассчитывать относительно крайнего ролика, где имеется максимальный прогиб консоли изделия  $f$  по формуле:

$$N_n = k \cdot P_n \cdot v_{об}, \quad (1)$$

где  $v_{об}$  – скорость обкатки (принимается постоянной по всей длине заготовки изделия и равной  $2 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$  м/с);

$P_n$  – усилие подачи приходящееся на крайний ролик;

$k$  – количество роликов в наборном пуансоне (НП) (рис.1).

Располагаемая мощность формообразования ( $N_p$ ) зависит от мощности привода ( $N_{пр}$ ) автоматизированного стенда и общего механического к.п.д. (задаемоя значениями  $\eta = 0,5 \dots 0,6$ ) процесса деформирования заготовки при качении ролика по ее поверхности:

$$N_p = N_{пр} \cdot \eta. \quad (2)$$

Процесс будет осуществляться при выполнении условия:

$$N_p > N_n. \quad (3)$$

Необходимые для деформации заготовки усилие подачи  $P_n$  и вертикальное усилие  $P_a$  зависят от физико-механических характеристик материала заготовки (например алюминиевый или титановый сплавы) и геометрических параметров: толщины, длины, стрелы прогиба кромки  $f_n$  для того или иного перехода  $n$ .

Величина потребного вертикального усилия  $P_a$  определяется экспериментально, в зависимости от физико-механических свойств материала заготовки, путем подбора усилия на вертикальном приводе ролика (для гидравлического привода определяется по давлению рабочей жидкости).

Расчетные схемы для вычисления требуемых усилий приведены на рисунках 1 и 2.

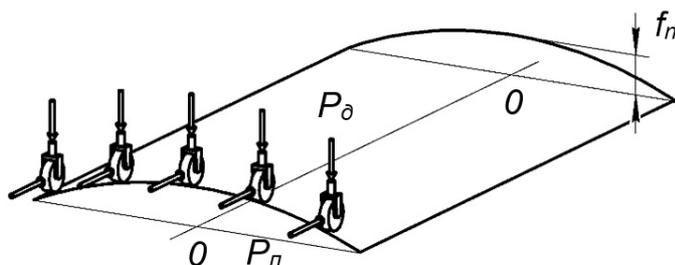


Рис. 1 – Расчетная схема действия сил на ролики при последовательном формообразовании заготовки

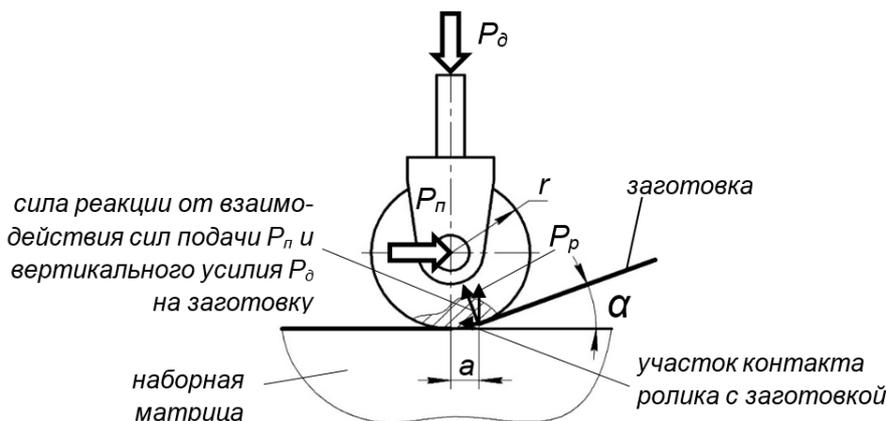


Рис. 2 – Расчетная схема действия сил на ролик, максимально удаленный от продольной оси 0-0 заготовки

На рис. 2 обозначено:  $P_p$  – вертикальная составляющая результирующей силы реакции заготовки на усилия  $P_n$  и  $P_\delta$ ;  $\alpha$  – угол продольного деформирования заготовки;  $a$  – плечо приложения усилия  $P_p$  (расстояние между вертикальной осью ролика и направлением силы  $P_p$ );  $r$  – радиус ролика.

Условие равновесия ролика при воздействии сил после первичного деформирования заготовки с последующим продольным его перемещением описывается следующим уравнением (рис. 2):

$$P_n = \frac{4}{3} \cdot P_\delta \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

При этом угол продольной деформации заготовки  $\alpha$  определяется как:

$$\sin \alpha = \frac{f}{(n \cdot b)}, \quad (5)$$

где  $f$  – максимальный прогиб заготовки;

$n$  – количество переходов в процессе формообразования;

$b$  – продольный размер заготовки.

Общее потребное усилие подачи  $P_n$  наборного пуансона (НП) из  $k$  роликов, учитывая уравнения (1) и (4), записывается (при  $P_\delta = P_p$ ) как:

$$P_n = \frac{4}{3} \cdot k \cdot P_\delta \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

а учитывая зависимость (5), уравнение(6) принимает вид:

$$P_n = \frac{4}{3} \cdot k \cdot P_{\partial} \cdot \frac{f}{(n \cdot b)} \quad (7)$$

Основываясь на формулах (1), (2) и из условия (3) получаем зависимость в виде:

$$\frac{4}{3} \cdot k \cdot P_{\partial} \cdot \frac{f}{(n \cdot b)} \cdot v_{об} < N_{np} \cdot \eta, \quad (8)$$

откуда получаем количество переходов:

$$n > \frac{3 \cdot N_{np} \cdot \eta}{4 \cdot k \cdot P_{\partial} \cdot f \cdot v_{об}} \quad (9)$$

Полученное значение  $n$  округляем в сторону ближайшего большего целого числа.

## 2. Исходные данные для осуществления процесса

Геометрические параметры готового изделия выбираем исходя из конструкторской электронной модели (КЭМ) панели ВС в виде функции  $F(X, Y, Z)$ , где  $X, Y, Z$  – строительные оси ВС, преобразованные в систему стеновых координат  $F(X_2, Y_2, Z_2)$ , см. рисунки 3, 4, 5, 6.

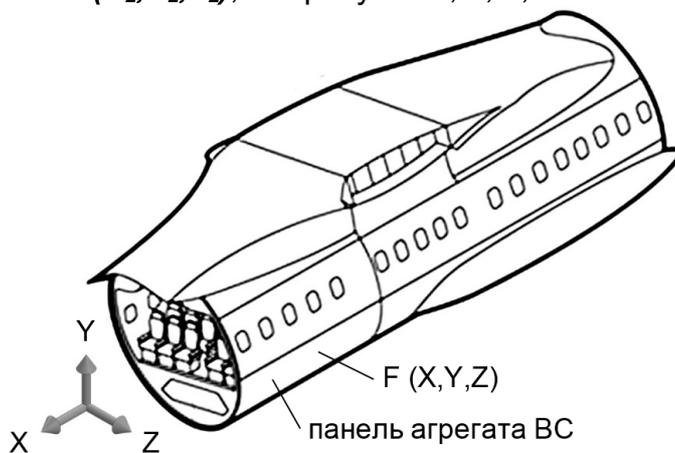


Рис. 3 – Расположение панели с цилиндрической поверхностью в агрегате воздушного судна в системе координат  $X, Y, Z$

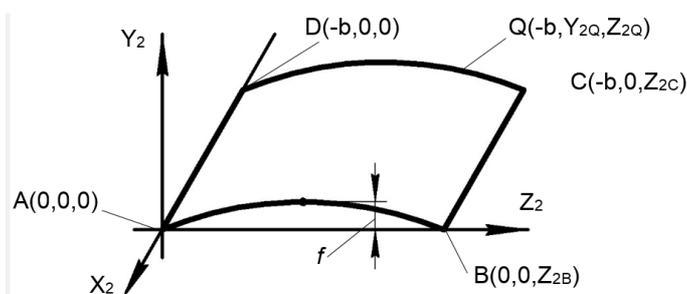


Рис. 4 – Расположение панели с цилиндрической поверхностью в системе координат  $X_2, Y_2, Z_2$

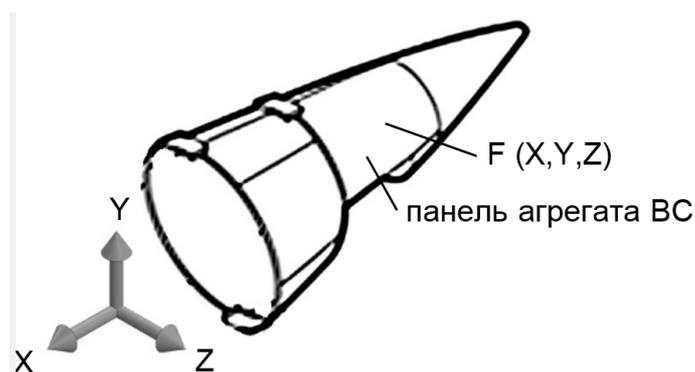


Рис. 5 – Расположение панели с конической поверхностью в агрегате воздушного судна в системе координат  $X, Y, Z$

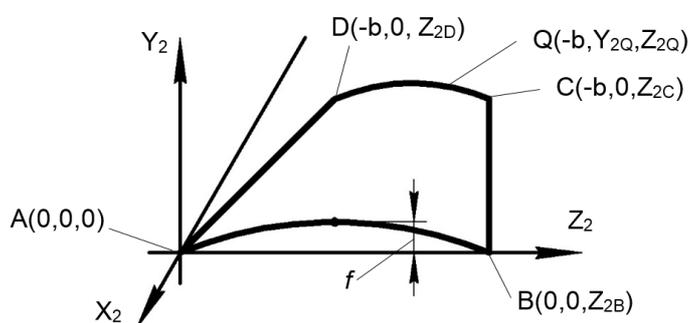


Рис. 6 – Расположение панели с конической поверхностью в системе координат  $X_2, Y_2, Z_2$

При формообразовании заготовки роликами (рис. 7) по криволинейной матрице могут возникнуть ситуации, когда угол самоориентации ролика пуансона будет ограничиваться критическим углом наклона  $\beta_{кр}$  его шаровой кинематической пары (рис. 8).

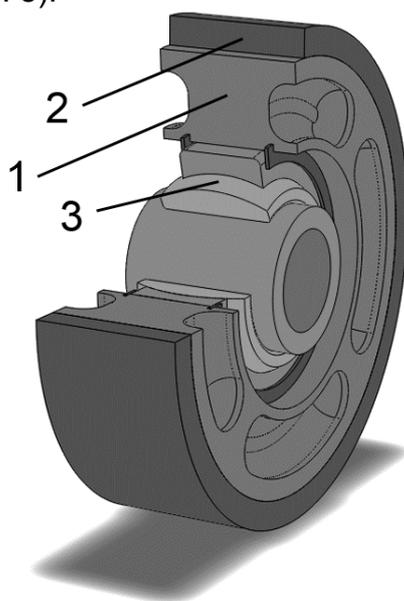


Рис. 7 – Конструкция ролика с внешним эластичным покрытием из резины или пластика: 1 – металлический корпус ролика; 2 – эластичное покрытие; 3 – шаровая кинематическая пара

Если в качестве шаровой кинематической пары (3) выбран стандартный шарнирный подшипник (например по ГОСТу 3635-78), то критичный угол наклона  $\beta_{кр}$  лежит в пределах  $13^\circ \dots 16^\circ$  (в зависимости от типоразмера подшипника).

Для каждого из  $n$  переходов определяем координаты расположения опорных элементов наборной матрицы (НМ) и наборного пуансона (НП) согласно методики описанной в работе [6]. А именно, сначала, в специализированную автоматизированную систему вводится программа формообразования листового материала, в которой отражается технологический процесс формообразования со следующими параметрами: количество переходов при формообразовании листа; геометрия расположения упоров по всей поверхности НМ (соответствует теоретической геометрии поверхности для каждого перехода формообразования) и геометрия расположения обкатных роликов (для каждого перехода формообразования).

Для упреждения случаев, когда в процессе переходов критичный угол наклона шаровой кинематической пары будет ограничивать угол самоориентации ролика пуансона  $\beta > \beta_{кр}$  (рис. 8), корпус пуансона следует развернуть на компенсационный угол  $\gamma$  (рис. 9).

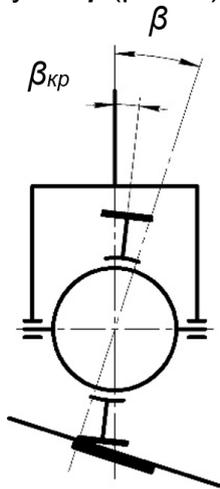


Рис. 8 – Схема расположения углов шаровой кинематической пары при недостаточном контакте ролика с поверхностью заготовки

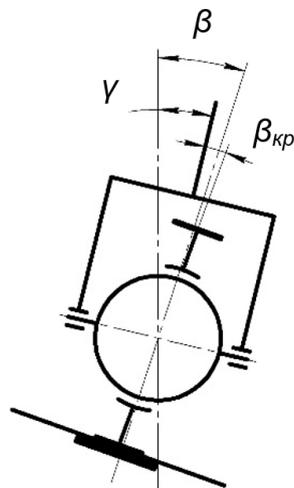


Рис. 9 – Схема поворота корпуса пуансона на компенсационный угол

для обеспечения правильного контакте ролика с поверхностью заготовки

Для каждого из  $n$  переходов, компенсационный угол  $\gamma$  находим по формуле:

$$\gamma = \gamma_{\max} \cdot \frac{(n-1)}{n}. \quad (10)$$

При этом  $\gamma_{\max}$  определяем по аппроксимирующему концевой участок контура  $F(X_2, Y_2, Z_2)$  готовой панели кривой (в виде части окружности  $F_0(0, Y_2, Z_2) = 0$  или  $Y_2 = f_0(Z_2)$ ). Для цилиндрической поверхности  $F_0(0, Y_2, Z_2) = 0$  кривизна постоянна вдоль всей панели, а для конической поверхности берется контур с большей кривизной, например,  $F_0(-b, Y_2, Z_2)$  (см. рис. 6).

Угол разворота  $\gamma_{\max}$ , принимаем как угол между осью 1-1 расположения опорного элемента матрицы и направлением вектора  $\bar{v}$ . В идеальном случае угол разворота  $\gamma_{\max}$ , рассчитывается как угол между осью расположения опорного элемента матрицы и вектором нормали  $\bar{n}$ . Погрешность в этом случае полностью компенсируется критичным углом наклона  $\beta_{кр}$ .

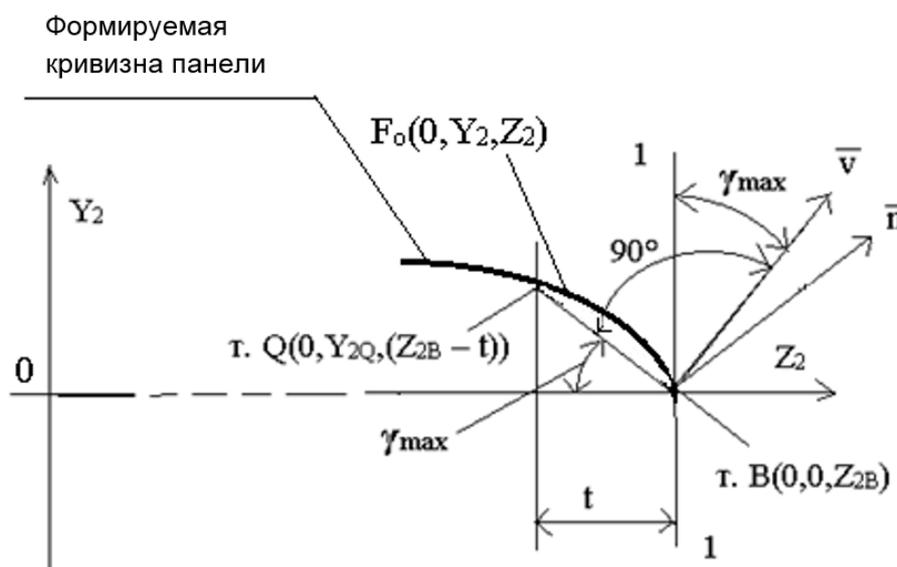


Рис.10 – Расчетная схема определения максимального угла поворота РП

В соответствии со схемой приведенной на рис. 9, максимальный компенсационный угол для  $n$  - перехода:

$$\gamma_{\max} = \arctg\left(\frac{Y_{2Q}}{t}\right), \quad (11)$$

где:  $Y_{2Q}$  – координата точки  $Q$  по оси  $Y_2$  на контуре  $F_0$  (кривая второго порядка от точки  $B$  до точки  $Q$ );

$t$  – заданное расстояние между точками  $B$  и  $Q$  по оси  $Z_2$ .

Для случая, когда компенсационный угол  $\gamma_{\max}$  меньше критического угла наклона шаровой кинематической пары, то в этом случае все переходы формообразования осуществляем без разворота концевых частей НП.

Если угол  $\gamma_{\max} < \beta_{кр}$ , то разворот концевых частей НП необязателен. В случае, если угол  $\gamma_{\max} > \beta_{кр}$ , необходимо угол  $\gamma_{\max}$  разбить на  $n$  частей, и в

начале каждого перехода осуществлять процесс разворота роликов НП на полученную долю компенсационного угла.

Из зависимостей (11), (12) определяем потребный компенсационный угол  $\gamma$  для каждого из  $n$  переходов (кроме первого перехода, для него  $\gamma = 0$ ):

$$\gamma = \gamma_{\max} \cdot \frac{(n-1)}{n} = \operatorname{arctg}\left(\frac{Y_{2Q}}{t}\right) \cdot \frac{(n-1)}{n} \quad (12)$$

Результаты расчетов сведем в таблицу 1.

Таблица 1

Величина компенсационного угла  $\gamma$  для разворота ролика НП для переходов последовательного формообразования, по формуле (12)

для 1-го перехода	для 2-го перехода	для 3-го перехода	...	для $n$ -го перехода
0	$1 \cdot \gamma_{\max}/n$	$2 \cdot \gamma_{\max}/n$	...	$n \cdot \gamma_{\max}/n$

### 3. Схема процесса формообразования

Процесс формообразования состоит из нескольких этапов:

**1-й этап.** Подготавливаем наборную матрицу (НМ) под первый переход (рис. 11).

**2-й этап.** Размещаем заготовку на поверхности НМ и фиксируем ее от смещения в процессе формообразования, используя конструктивные элементы станда (рис.12).

**3-й этап.** Размещаем НП над заготовкой и прижимаем ее центральным роликом к НМ с усилием  $P_d$  (рис.13).

**4-й этап.** Осуществляем последовательное поперечное обжатие заготовки, начиная от центра, по обе ее стороны от продольной оси  $X_2$  за счет последовательного нагружения ее поверхности через ролики НП с усилием  $P_d$  в зависимости от прочностных характеристик материала заготовки (рис. 14).

**5-й этап.** Не поднимая НП осуществляем первый переход формообразования путем продольной обкатки заготовки по всей ее длине с выбранной скоростью.

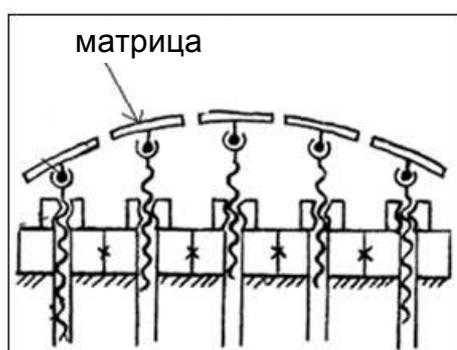


Рис. 11 – Схема осуществления первого этапа формообразования

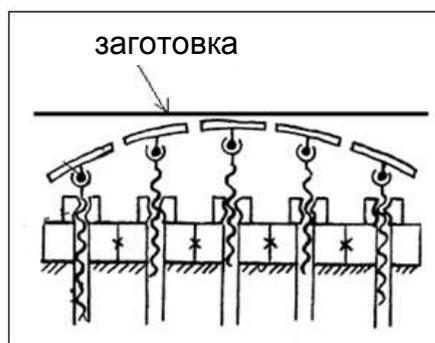


Рис. 12 – Схема осуществления второго этапа формообразования

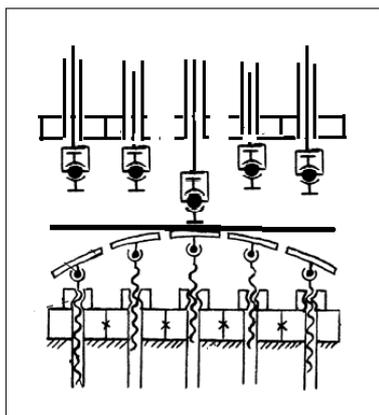


Рис. 13 – Схема осуществления третьего этапа формообразования

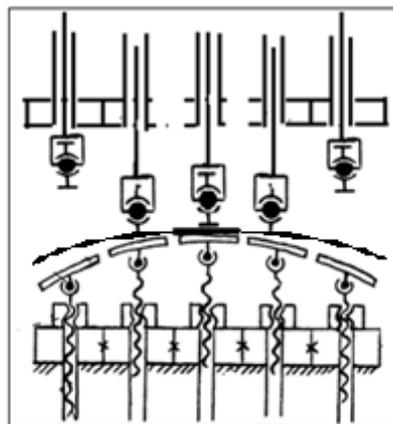


Рис. 14 – Схема осуществления четвертого этапа формообразования

**6-й этап.** Подготавливаем НМ под второй переход, по соответствующей методике [4]. При необходимости концевую часть НП поворачивают на компенсационный угол определенный по уравнению (13).

**7-й этап.** На следующих этапах формообразования (для последующих переходов) реализуются действия аналогичные этапам с 1-го по 6-й до получения контура  $F(X_2, Y_2, Z_2)$ , который соответствует контуру готовой панели.

После реализации последнего перехода, в случае, когда контур заготовки (по результатам обмеров) не совпадет с теоретическим контуром готовой панели по ее КЭМ (из-за возникновения эффекта «пружинения» заготовки), НМ перенастраивается под контур с большей кривизной, для того чтобы компенсировать данный дефект за один или несколько дополнительных переходов.

#### 4. Пример расчета

Исходные данные:

Из КЭМ чертежа конкретной панели известна форма ее поверхности, представляющая поверхность второго порядка одинарной кривизны, которая описывается функцией  $F(X, Y, Z)$  в системе координат  $X, Y, Z$ , а именно  $Y^2 + Z^2 - 2^2 = 0$  (радиус окружности  $R = 2м$ ). Преобразуем функцию поверхности из системы координат  $X, Y, Z$  в систему координат  $X_2, Y_2, Z_2$  станда, т.е. получим функцию поверхности панели как  $F_2(X_2, Y_2, Z_2)$ . При этом панель будет размещена в системе координат  $X_2, Y_2, Z_2$  согласно рис. 15.

Формоизменение панели ведется в точке  $Q$ .

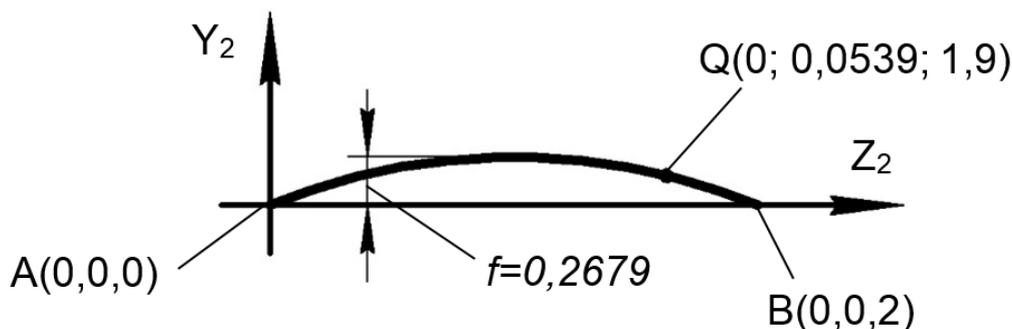


Рис. 15 – Расчетная схема панели

Таблица 2

Результаты расчётов параметров для панели, выбранной в примере:

Количество переходов, рассчитанное по уравнению (9)	$n > \frac{3 \cdot N_{np} \cdot \eta}{4 \cdot k \cdot P_{\partial} \cdot f \cdot v_{об}}$					
Компоненты уравнения (9)	$N_{np}, Bm$	$\eta$	$k$	$P_{\partial}, H$	$f, M$	$v_{об}, M/c$
Значения компонентов уравнения (9)	1000	0,5	15	1000	0,2679	0,03
Значение $n$ округленного до ближайшего большего значения	4					
Величина компенсационного угла, рассчитанное по уравнению (11)	$\gamma_{max} = arctg\left(\frac{Y_{2Q}}{t}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$					
<b>Проверка по критерию угла <math>\beta_{кр}</math>.</b> Если максимальное значение компенсационного угла $\gamma_{max} > \beta_{кр}$ , то этот угол равномерно распределяем между всеми переходами $n$ (кроме первого где $\gamma = 0$ ) или распределяют между двумя-тремя последними переходами, чтобы при остальных переходах $\gamma < \beta_{кр}$ . Для шарнирного подшипника по ГОСТ 3635-78 критичный угол наклона $\beta_{кр}$ лежит в пределах $13^{\circ} \dots 16^{\circ}$ .						
Компоненты уравнения (11)	$t, M$	$Z_{2B}, M$		$Y_{2Q}$		
Значения компонентов уравнения (11)	0,1	2,0		0,0539		

Окончание таблицы 2

Значение $\gamma_{max}$ округлено в большую сторону, в градусах	29			
	Переходы $n$			
	1	2	3	4
Значение компенсационного угла $\gamma$ , при его равномерном распределении по нарастающей, в градусах.	0	9,6	19,2	29,0

Значения компонентов из уравнения (9), приведенных в таблице 2, а именно  $N_{np}$ ,  $\eta$ ,  $P_{\partial}$ ,  $V_{об}$  – задаются. Количество роликов  $k$  в НП рассчитываются исходя из шага их расположения от точки **A** до точки **B** (шаг равен от 0,1 до 0,2 м). Прогиб  $f$  панели рассчитывается по ее модели, см. рис. 15.

### Выводы

Предложенный расчет усилий формообразования представляет программируемую циклическую технологическую систему. Ее основной особенностью является технологическая гибкость внутри цикла, а также технологическая гибкость для быстрого перехода на изготовление новых деталей в автоматизированной системе последовательного формообразования.

Технологическая гибкость данной системы определяется следующими факторами:

- задание размеров изготавливаемых деталей происходит непосредственно исходной геометрической информации в виде конструкторской электронной модели;

- подбор количества переходов для осуществления процесса последовательного формообразования производится исходя из располагаемых мощностей приводов автоматизированного специализированного станда;
- настройка станда для панелей с большим спектром кривизны производится по расчетным данным усилий;
- управление всеми операциями формообразование автоматизировано;
- возможность выполнения предусматриваемой коррекции параметров формообразования детали, в частности и для устранения эффекта «пружинения» заготовки.

### Список литературы:

1. Технология и оборудование для производства широкофюзеляжных самолетов в США / П.Н. Белянин. – Москва : Машиностроение, 1979. 256 с.
2. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов / М.Н. Горбунов. Москва : Машиностроение, 1981. – 224 с.
3. Рыбин Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением / Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской, А.М.Золотов. – СПб. : Наука, 2004. – 614 с.
4. Мошнин Е. И. Гибка, обтяжка и правка. М.:Машгиз. 1969. – 254с.
5. Baughman D. An overview of peenforming technology // 2-th Int. Conf. on Shot Peening. - Chicago. IL, USA, 14-17 May, 1984 (JCSD-2). P. 28-33.
6. Автоматизована система пристроїв та способ для формоутворення великогабаритних деталей з листового матеріалу : пат. 114337 Україна: МПК17.1 В210 5/00, В2Ю 11/20, В210 37/14 № 201503496; заявл. 15.04.2015; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10. 8 с.
7. Лупкин Б.В., Подгребельный Н. С., Корольков Ю. А., Асташкин В. И. Способ формообразования обшивок и панелей одинарной кривизны методом свободной гибки-прокатки на оборудовании с ЧПУ, Открытые информационные и компьютерные технологии : сб. научн. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2016. Вып. 71. С. 100-112.
8. Лупкин Б.В., Подгребельный Н. С., Корольков Ю. А., Асташкин В. И. Алгоритм подготовки массива цифровых данных для программирования автоматизированной системы с числовым программным управлением (ЧПУ) для процесса последовательного формообразования листа (панели) // Открытые информационные и компьютерные технологии : сб. научн. тр. / сб. научн. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2016. Вып. 72. С. 27-41.
9. CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделия в авиастроении [Текст] : /А.Г. Братухин и др. под ред. д-ра техн. наук, проф. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 304 с.

### References

1. Tehnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva shirokofyuzelyazhnyih samoletov v SShA / P.N. Belyanin. – Moskva : Mashinostroenie, 1979. 256 s.
2. Gorbunov M.N. Tehnologiya zagotovitelno-shtampovochnyih работ v proizvodstve samoletov / M.N. Gorbunov. Moskva : Mashinostroenie, 1981. – 224 s.

3. Ryibin Yu.I. Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tehnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem / Yu.I. Ryibin, A.I. Rudskoy, A.M.Zolotov. – SPb. : Nauka, 2004. – 614 s.

4. Moshnin E. I. Gibka, obtyazhka i pravka. M.:Mashgiz. 1969. – 254s.

5. Baughman D. An overview of peenforming technology // 2-th Int. Conf. on Shot Peening. - Chicago. IL, USA, 14-17 May, 1984 (JCSD-2). P. 28-33.

6. Avtomatizovana sistema pristroYiv ta sposlb dlya formoutvorennaya velikogabaritnih detaley z listovogo materlalu : pat. 114337 UkraYina: MPK17.1 V210 5/00, V2Yu 11/20, V210 37/14 # 201503496; zayavl. 15.04.2015; opubl. 25.05.2017, Byul. # 10. 8 s.

7. Lupkin B.V., Podgrebelnyiy N. S., Korolkov Yu. A., Astashkin V. I. Sposob formoobrazovaniya obshivok i paneley odinarney krivizny metodom svobodnoy gibki-prokatki na oborudovanii s ChPU, Otkryitye informatsion-nyie i kompyuternyye tehnologii : sb. nauchn. tr. / Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI». Harkov, 2016. Vyip. 71. S. 100-112.

8. Lupkin B.V., Podgrebelnyiy N. S., Korolkov Yu. A., Astashkin V. I.

Algoritm podgotovki massiva tsifrovyyh dannyyh dlya programmirovaniya avtomatizirovannoy sistemyi s chislovyim programmnyim upravleniem (ChPU) dlya protsessa posledovatel'nogo formoobrazovaniya lista (paneli) // Otkryitye informatsionnyie i kompyuternyye tehnologii : sb. nauchn. tr. / sb. nauchn. tr. / Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI». Harkov, 2016. Vyip. 72. S. 27-41.

9. CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) – nepreryivnaya informatsionnaya podderzhka zhiznennogo tsikla izdeliya v aviastroenii [Tekst] : /A.G. Bratuhin i dr. pod red. d-ra tehn. nauk, prof. – M.: Izd-vo MAI, 2000. – 304 s.

Поступила в редакцию 13.05.2019, рассмотрена на редколлегии 15.05.2019

## **Розрахунок зусиль формоутворення панелей повітряного судна при послідовному вільному гнутті на спеціалізованому обладнанні**

Конструкція сучасного повітряного судна передбачає високу ступінь панелювання обводоутворюючих елементів, яка може становити до 80 ... 85%. Це забезпечує її підвищену міцність і жорсткість з одночасним зниженням маси і поліпшенням льотних характеристик виробу, в тому числі, і за рахунок зменшення кількості кріпильних деталей і клепаних швів. Також поліпшення параметрів відбувається через використання високоміцних деформованих алюмінієвих та інших сплавів. Однак, виготовлення таких панелей є трудомістким і вимагає спеціального обладнання. У той час коли технології і обладнання для виготовлення панелей одинарної кривизни досить добре відпрацьовані, виготовлення з необхідною точністю панелей, що мають змінну кривку поперечних перерізів на існуючому універсальному обладнанні поки ще важко. В основному для виготовлення таких панелей використовується вільне гнуття, що вимагає великої кількості фінішних робіт. Використання універсального обладнання типу РОП також недостатньо ефективно, використовується обтяжний пуансон, який виготовляється індивідуально для кожної деталі та має високу ціну. Для подолання існуючих недоліків

пропонується використовувати збірні керовані роликовий пуансон і матрицю, форма яких задається пристроєм ЧПУ за інформацією з цифрового макету виробу. Розроблено розрахункову схему дії сил на ролики набірною пуансона для послідовного формоутворення заготовки. Представлено метод розрахунку технологічних параметрів процесу формоутворення панелі, який, зокрема, дозволяє визначити загальне потрібне зусилля подачі роликів набірною пуансона, величину поперечних компенсаційних кутів нахилу роликів набірною пуансона і розрахункову кількість проходів деформування. Визначено вихідні дані для здійснення процесу, описана схема процесу формоутворення панелі зі змінною кривкою. Наведено приклад рішення задачі визначення технологічних параметрів процесу формоутворення панелі на запропонованому обладнанні за запропонованим методом.

**Ключові слова:** вільне гнуття-прокочування; послідовне гнуття; панель; змінна кривка; збірний пуансон; роликовий пуансон; збірна матриця; багатоелементне формоутворююче оснащення; радіус кривизни.

## Calculation of Forces for Forming of Aircraft Panels by Sequential Wheeling on Specialized Equipment

The design of a modern aircraft provides for a high degree of panelizing of outline elements which can reach up to 80...85%. This allows to increase strength and rigidity with a simultaneous reduction in weight and improved flight performance of the product by reducing the number of fasteners and riveted seams. Also, the improvement of parameters occurs due to the use of high-strength aluminum and other alloys. However, the manufacture of such panels is time consuming and requires special equipment. At a time when technologies and equipment for the manufacture of single-curvature panels are fairly well developed, it is still difficult to manufacture panels with variable twist (washout) of cross-sections on the existing universal equipment with the prescribed accuracy. Basically, for the manufacture of such panels free bending, requiring a large number of finishing works is used. The use of universal equipment such as Sheet Stretch Forming Press is also not sufficiently effective, since the form die produced individually for each part and has a high price. To overcome the existing shortcomings it is proposed to use a multi-point controlled roller punch and a die, the shape of which is set by the CNC device according to information from a digital mock-up. A design diagram for determining the acting forces on the rollers of a multipoint punch during the sequential formation of the workpiece was developed. A method for calculating the technological parameters of the panel forming process is presented. It allows to determine, in particular, the total force required to feed the rollers of multi-point punch, the values of the transverse compensation angle of the rollers of multi-point punch and the number of deformation strokes. The initial data for the implementation of the process are determined, the scheme of the process of forming a panel with variable twist is described. An example of solving the problem of determining the technological parameters of the process of forming a panel on the proposed equipment by the proposed method is given.

**Key words:** sheet metal wheeling; sequential forming; panel; variable washout (twist); multi-point punch; multi-point die; multi-point forming tooling; radius of curvature

**Сведения об авторах:**

**Бычков Сергей Андреевич** – д-р техн. наук, профессор, главный инженер ГП «Антонов», г. Киев, Украина.

**Лупкин Борис Владимирович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Технологии производства летательных аппаратов» №104 Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

**Павленко Алексей Анатольевич** – старший преподаватель кафедры «Технологии производства летательных аппаратов» №104 Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

**Корольков Юрий Акимович** – ведущий инженер ГП «Антонов», г. Киев, Украина.

**About the Authors:**

**Bychkov Serhii** – doctor of technical sciences, professor, Principal Engineer at “Antonov” State Company, Kyiv, Ukraine.

**Lupkin Borys** – doctor of technical sciences, professor, professor Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine.

**Pavlenko Oleksiy** – assistant professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine.

**Korolkov Yurii** – Leading Engineer at “Antonov” State Company, Kyiv, Ukraine.