

## **Алгоритм пространственного позиционирования каркасной панели второго порядка с двойной кривизной при ее сборке**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»  
Государственное предприятие «Антонов»  
Киевский авиационный техникум*

В данной работе предложена оригинальная методика формирования массива данных базовых точек панели в процессе ее пространственного позиционирования с целью постановки заклёпок.

**Ключевые слова:** алгоритм, панель, поверхность второго порядка, двойная кривизна, базовые точки.

### **Введение**

Технология сборки каркасной панели предусматривает приклепывание к обшивке как участков шпангоутов так и участков стрингеров. Для этого производят предварительную сборку, например, по фиксирующим отверстиям. А сверление с зенковкой и с постановкой заклёпок перпендикулярно обшивке, осуществляют с помощью сверлильно-клепального устройства (СКУ) в ложементе сборочного стенда. При этом перемещают базовые точки (от 3-х до 4-х, например угловые точки панели) таким образом, чтобы нормаль к поверхности панели, где необходимо устанавливать заклёпку, совпадала с осью СКУ. Весь процесс сборки каркасной панели является целиком автоматизированным и выполняется на соответствующем оборудовании, которое базируется на микропроцессорной технике и функционирует в соответствии с заданным алгоритмом. В данном случае одной из основных частей является использование конструкторских электронных макетов (КЭМ) массива данных координат выше упомянутых базовых точек с увязкой с координатами мест установки заклёпок на обшивке панели. Алгоритм этой увязки представлен в данной статье [1].

### **Подготовка исходных данных**

Исходными данными алгоритма является наличие КЭМ собираемой каркасной панели воздушного судна как поверхности второго порядка с одинарной или двойной кривизной. Часть поверхности агрегата описывается уравнением  $F(XYZ)$  в системе координат, где  $XYZ$  строительные оси воздушного судна. В дальнейшем с преобразованием этих моделей в систему координат  $X_c, Y_c, Z_c$ , где  $X_c, Y_c, Z_c$  — строительные оси сборочного стенда (рис. 1, 2).

Преобразованные координаты мест постановки заклёпок, на обшивке панели в системе координат сборочного стенда, представлены на рисунке 2, (от точки  $M_1(X_{c_1}, Y_{c_1}, Z_{c_1})$  до  $M_i(X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i})$ , где  $i$  — требуемое количество заклёпок, и данные сводим в таблицу 1.

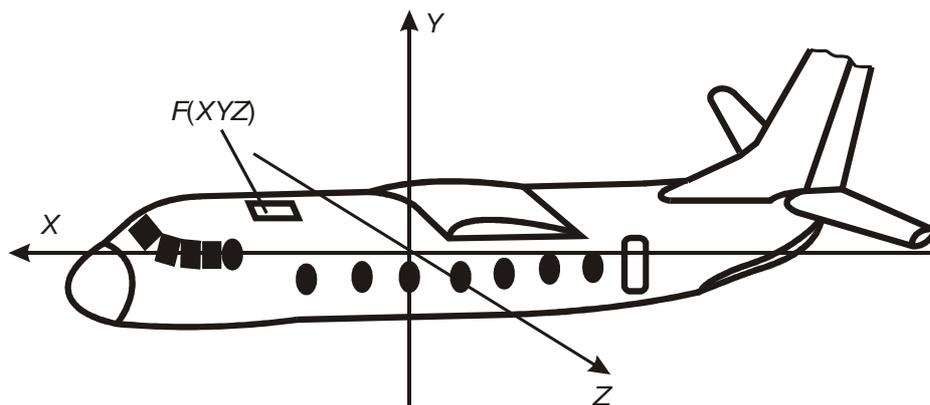


Рис. 1. Схема строительных осей воздушного судна

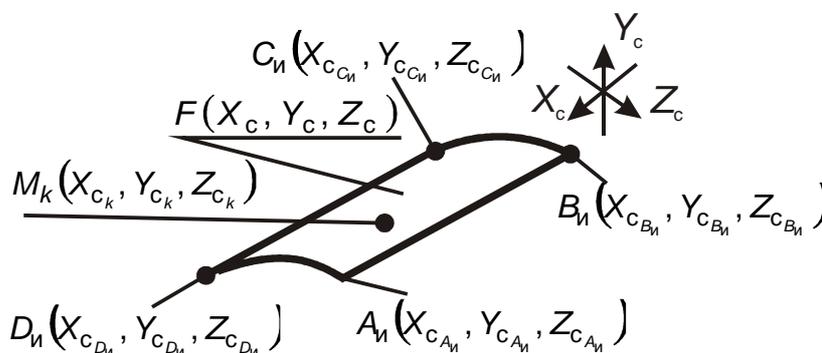


Рис. 2. Схема собираемой панели (внешний обвод) воздушного судна в системе координатных осей сборочного стенда

Таблица 1

Таблица координат мест установки заклёпок

Заклёпка	Координаты точек постановки заклёпок $M_i(X_c Y_c Z_c)$		
	по оси $X_c$	по оси $Y_c$	по оси $Z_c$
1	$X_{c_1}$	$Y_{c_1}$	$Z_{c_1}$
2	$X_{c_2}$	$Y_{c_2}$	$Z_{c_2}$
...	...	...	...
$k$	$X_{c_k}$	$Y_{c_k}$	$Z_{c_k}$
...	...	...	...
$i$	$X_{c_i}$	$Y_{c_i}$	$Z_{c_i}$

\* — под буквой  $k$  принимается произвольная заклёпка между первой и  $i$ -той.

В качестве исходного положения панели с базовыми точками (они же, например, угловые точки)  $A_{и}, B_{и}, C_{и}, D_{и}$ , будем считать первоначальное положение панели в ложементе на сборочном стенде с преобразованными координатами  $A_{и}(X_{C_{A_{и}}}, Y_{C_{A_{и}}}, Z_{C_{A_{и}}}), B_{и}(X_{C_{B_{и}}}, Y_{C_{B_{и}}}, Z_{C_{B_{и}}}), C_{и}(X_{C_{C_{и}}}, Y_{C_{C_{и}}}, Z_{C_{C_{и}}}), D_{и}(X_{C_{D_{и}}}, Y_{C_{D_{и}}}, Z_{C_{D_{и}}})$  (см. рис. 2).

**Алгоритм расчета** координат базовых точек, например, для  $k$ -й заклёпки (место  $M_k$  на рисунках 2, 3), производится в следующей последовательности, используя аппарат аналитической геометрии, а именно метод вспомогательных плоскостей [2].

Первым шагом является построение вспомогательных плоскостей проведённых через точку  $M_k$ , а именно:

- плоскость  $M_{пл}$ , перпендикулярную горизонтальной координатной плоскости  $X_c O_c Z_c$  и проведённую через прямую  $M_k B_{и}$ , где  $M_k B_{и}$  — прямая соединяющая точку  $M_k$  на поверхности панели в  $k$ -той точке с базовой исходной точкой  $B_{и}$  панели, обозначим как прямая  $b-b$  (рис. 3, 4);
- плоскость  $N_{пл}$ , которая проведена через нормаль  $n-n$  (см. рис. 3, 4) к поверхности обшивки в точке с координатами  $M_k(X_{C_k}, Y_{C_k}, Z_{C_k})$  и прямую  $b-b$ .

Следующим шагом проводим через точку  $M_k$  перпендикуляр  $m-m$  (см. рис. 2) к плоскости  $X_c O_c Z_c$ , принадлежащую плоскости  $M_{пл}$

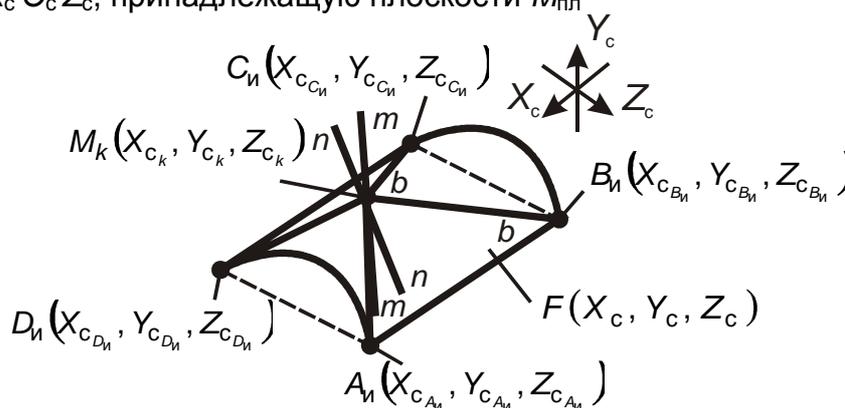


Рис. 3. Расчётная схема собираемой каркасной панели

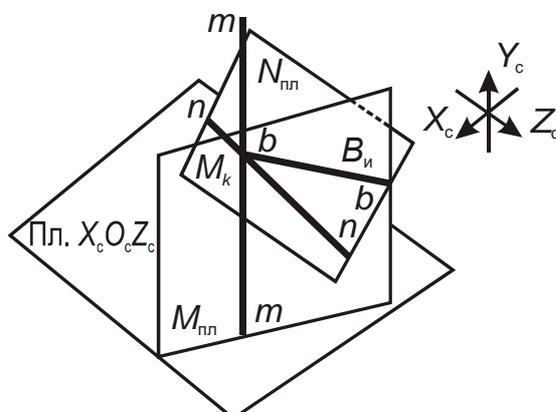


Рис. 4. Система вспомогательных плоскостей для соответствующего выполнения расчётов (поверхность панели на рисунке не показана)

От перемещения плоскостей образованные углы  $\varphi_k$  и  $\alpha_k$  между прямыми  $n-n$  и  $b-b$ , прямыми  $n-n$  и  $m-m$  (рис. 5) определяем по известным из аналитической геометрии зависимостям [2].

Далее находим новые координаты перемещённой точки  $B_{и}$  в точку  $B_k(X_{c_{B_k}}, Y_{c_{B_k}}, Z_{c_{B_k}})$ .

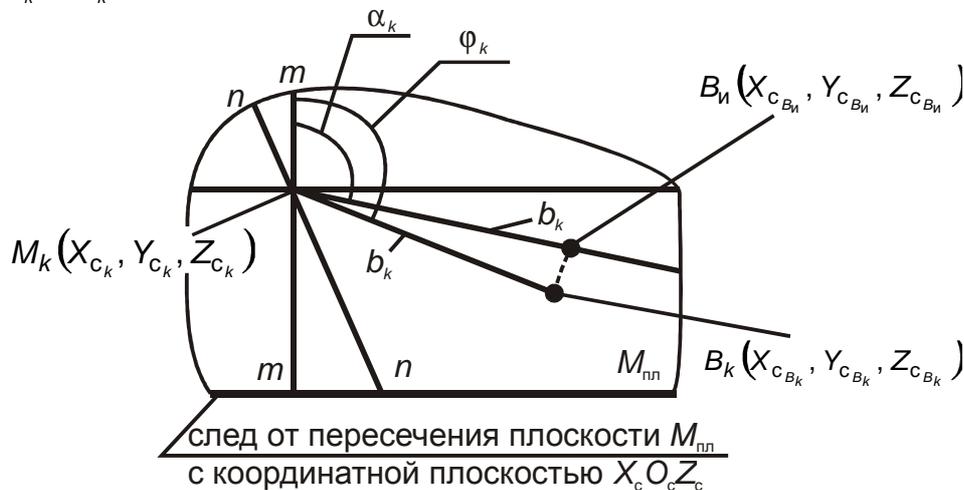


Рис. 5. Изображение плоскости  $M_{пл}$  в плане

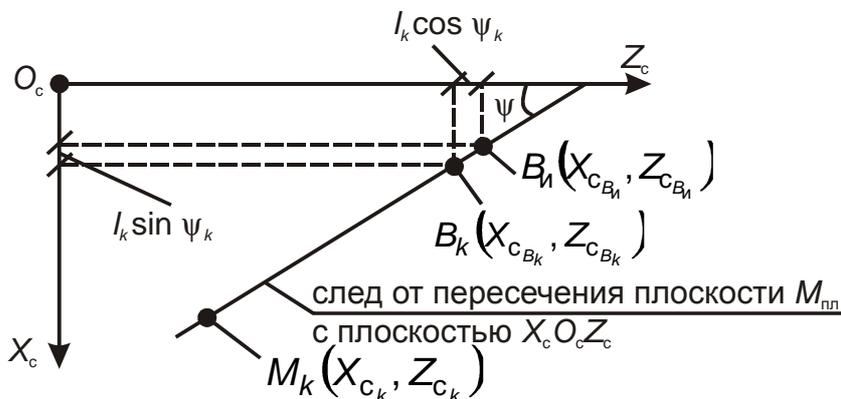


Рис. 6. Вид сверху на плоскость  $X_c O_c Z_c$

Следующим шагом определяем координаты точки  $B_k$  (см. рис. 5, 6) по ниже приведённым формулам.

$$а) Y_{c_{B_k}} = Y_{c_k} - b_k(\sin(\varphi_k - 90^\circ)), \quad (1)$$

где  $b_k$  — расстояние от точки  $M_k$  до точки  $B_{и}$ ;

$$b_k = ((X_{c_k} - X_{c_{B_{и}}})^2 + (Y_{c_k} - Y_{c_{B_{и}}})^2 + (Z_{c_k} - Z_{c_{B_{и}}})^2)^{0,5},$$

$\varphi_k$  — определяем из выражения (3);

$$б) Z_{c_{B_k}} = Z_{c_{B_{и}}} - I_k \cos \psi_k, \quad (2)$$

$I_k$  — расстояние между следами от проекции точек  $B_{и}$  и  $B_k$  на плоскость  $X_c O_c Z_c$ ;

$$I_k = b_k(\cos(\varphi_k - 90^\circ) - \cos(\alpha_k - 90^\circ));$$

$\psi_k$  — угол между осью  $O_c Z_c$  и следом пересечения  $M_{пл}$  с плоскостью  $X_c O_c Z_c$  (см. рис. 5);

$$\psi = \arctg \frac{X_{C_k} - X_{C_{B_k}}}{Z_{C_{B_k}} - Z_{C_k}}.$$

в)  $X_{C_{B_k}} = X_{C_{B_k}} + l_k \sin \psi_k.$

(3)

Аналогичные формулы применимы и для остальных угловых точек  $A_k, C_k, D_k$  для  $k$ -той заклёпки, см. формулы (4), (5), (6) (см. рис. 4, 5).

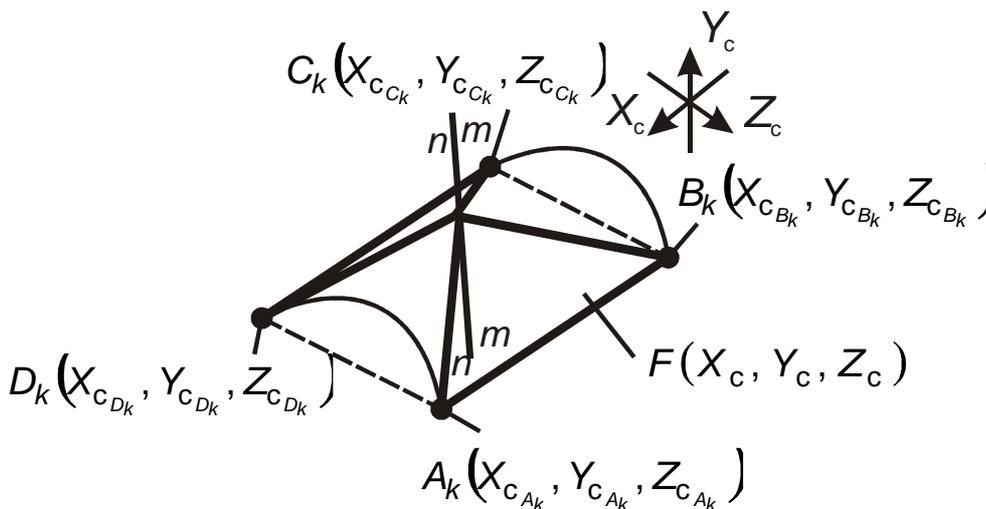


Рис. 7. Схема панели после её поворота для  $k$ -той заклёпки

Полученный массив данных по результатам расчётов сводим в таблицу 2.

Таблица 2

Заклёпки	Точка A			Точка B			Точка C			Точка D		
	$X_{C_A}$	$Y_{C_A}$	$Z_{C_A}$	$X_{C_B}$	$Y_{C_B}$	$Z_{C_B}$	$X_{C_C}$	$Y_{C_C}$	$Z_{C_C}$	$X_{C_D}$	$Y_{C_D}$	$Z_{C_D}$
1	$X_{C_{A1}}$	$Y_{C_{A1}}$	$Z_{C_{A1}}$	$X_{C_{B1}}$	$Y_{C_{B1}}$	$Z_{C_{B1}}$	$X_{C_{C1}}$	$Y_{C_{C1}}$	$Z_{C_{C1}}$	$X_{C_{D1}}$	$Y_{C_{D1}}$	$Z_{C_{D1}}$
2	$X_{C_{A2}}$	$Y_{C_{A2}}$	$Z_{C_{A2}}$	$X_{C_{B2}}$	$Y_{C_{B2}}$	$Z_{C_{B2}}$	$X_{C_{C2}}$	$Y_{C_{C2}}$	$Z_{C_{C2}}$	$X_{C_{D2}}$	$Y_{C_{D2}}$	$Z_{C_{D2}}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$k$	$X_{C_{A_k}}$	$Y_{C_{A_k}}$	$Z_{C_{A_k}}$	$X_{C_{B_k}}$	$Y_{C_{B_k}}$	$Z_{C_{B_k}}$	$X_{C_{C_k}}$	$Y_{C_{C_k}}$	$Z_{C_{C_k}}$	$X_{C_{D_k}}$	$Y_{C_{D_k}}$	$Z_{C_{D_k}}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$i$	$X_{C_{A_i}}$	$Y_{C_{A_i}}$	$Z_{C_{A_i}}$	$X_{C_{B_i}}$	$Y_{C_{B_i}}$	$Z_{C_{B_i}}$	$X_{C_{C_i}}$	$Y_{C_{C_i}}$	$Z_{C_{C_i}}$	$X_{C_{D_i}}$	$Y_{C_{D_i}}$	$Z_{C_{D_i}}$

Для проверки правильности расчета координат базовых точек  $A_k, B_k, C_k, D_k$  (для  $k$ -ой заклёпки) определяется таким алгоритмом последовательности.

Вначале определяем величины отрезков  $A_iB_i, B_iC_i, C_iD_i$  на собираемой каркасной панели  $F(X_c, Y_c, Z_c)$  по имеющимся двум координатам в пространстве соответствующих точек.

Затем определяем величины отрезков  $A_kB_k, B_kC_k, C_kD_k, D_kA_k$  на повернутой панели  $F(X_c, Y_c, Z_c)$  по полученным (см. выше) двум координатам в пространстве соответствующих точек.

Координаты угловых точек определены **верно** при условии выполнения следующего критерия:

$$A_kB_k = A_iB_i, B_kC_k = B_iC_i, C_kD_k = C_iD_i, D_kA_k = D_iA_i. \quad (4)$$

### Выводы

Предложенный алгоритм определения координат точек панели для постановки заклёпок в процессе её поворота на сборочном стенде позволяет реализовать процесс сборки панелей второго порядка с двойной кривизной. Алгоритм представляет собой быстро программируемую технологическую систему для устанавливаемых заклёпок на панели и определяется следующими факторами:

- цифровое задание координат расположения точек установки заклёпок согласно конструкторской электронной модели панели в виде массива цифровых данных;
- обеспечение необходимого координатного позиционирования панели в пространстве сборочного стенда с использованием системы «лазерный трекер – лазерный отражатель-панель»;
- программное обеспечение и автоматическое управление процессом сборки.

### Список литературы

1. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / Пекарш А. И. и др. — М.: Аграф-пресс, 2006. — 304 с. с ил.
2. Аналитическая геометрия / Ильин В. А. и др. — М., 2004.

Поступила в редакцию 13.11.2017

## Алгоритм просторового позиціонування каркасної панелі другого порядку з подвійною кривизною при її складанні

У даній роботі запропонована оригінальна методика формування масиву даних базових точок панелі в процесі її просторового позиціонування з метою постановки заклёпок.

**Ключові слова:** алгоритм, панель, поверхня другого порядку, подвійна кривизна, базові точки.

## **Algorithm of Spatial Positioning of the Second-Order Frame Panel with Double Curvature During its Assembly**

In this paper, we propose an original technique for forming an array of data base points of the panel in the process of its spatial positioning for the purpose of setting rivets.

**Keywords:** algorithm, panel, surface of second order, double curvature, base points.

### **Сведения об авторах:**

**Лупкин Борис Владимирович** – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

**Корольков Юрий Акимович** – инженер, ГП «АНТОНОВ», Украина.

**Мамлюк Олег Владимирович** – доктор технических наук, профессор, директор Киевского авиационного техникума, Украина.