

V. Ya. Braverman, V. S. Belozertsev

DYNAMIC CHARACTERISTICS ANALYSIS OF THE FLUX GATE SENSOR OF JOINT WELDING PARTS

The investigation results of dynamic properties of the differential flux gate as a part of automatic tracking system, which measures the magnetic field of the welding current, with the information about the electrode position relatively to the junction are presented.

Keywords: flux gate, spectrum, Q-factor, transfer function.

УДК 658.512, 004.942

P. X. Axatov, K. A. Однокурцев

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ МЕТОД ВЫБОРА И АНАЛИЗА СБОРОЧНЫХ БАЗ В САМОЛЕТОСТРОЕНИИ

Исследование относится к области автоматизации технологической подготовки сборочного производства в самолетостроении. Метод формализованного выбора и анализа сборочных баз основан на применении координатной модели – дискретной информационной модели изделия.

Ключевые слова: сборка, планер, сборочная база, дискретная модель.

Изделия самолетостроения отличаются сложными формами, малой жесткостью деталей и высокими требованиями к точности сборки. Поэтому при сборке узлов и агрегатов самолета широко применяют сборочную оснастку. Компоновку сборочной оснастки и структуру технологического процесса сборки изделия определяет выбранная схема базирования деталей при сборке [1] – сборочная схема базирования.

При традиционном подходе к проектированию сборочной оснастки состав сборочных баз определяет технолог. Методы выбора и анализа сборочных баз слабо формализованы, а способ представления баз, удобный для человека, неудобен в условиях автоматизированного производства [2]. Поэтому необходимо разработать формализованный метод анализа и выбора сборочных баз и соответствующую математическую модель для его реализации.

Воспользуемся методом последовательной оптимизации состава сборочных баз по критериям технологичности сборки, собираемости, текущей жесткости, точности сборки и др. Тогда разработка сборочной схемы базирования включает несколько этапов (рис. 1):

- анализ структуры и геометрических параметров изделия;
- выбор основного способа базирования;
- выбор состава сборочных баз и последовательности сборки;
- анализ собираемости изделия;
- анализ текущей жесткости (жесткости установки деталей с учетом условий базирования и закрепления);
- анализ точности сборки;
- выбор измерительных баз.

Большинство исходных данных доступны из электронного макета (ЭМ) изделия, выполненного в САД-системе: массовые и геометрические характеристики деталей,

взаимное расположение деталей и крепежных элементов. Прочие исходные данные (точность изготовления деталей, требуемая точность сборки, технологические нагрузки и др.) доступны из PDM-системы предприятия или задаются технологом.

На основе перечисленных данных с применением формализованных алгоритмов анализа ЭМ изделия [3] построим конструкторскую схему базирования – двухуровневый гиперграф сопряжений деталей. На первом уровне графа в узлах находятся детали изделия, а на втором – отдельные грани. Дуги графа показывают сопряжения соответствующих элементов изделия. Такой граф отражает необходимый результат сборки изделия.

Выбор основного способа базирования определяет тип сборочного приспособления, используемого при сборке данного изделия. Различают три основных способа базирования (в порядке снижения технологичности и повышения точности сборки) [1]:

- по сборочным отверстиям (СО) на деталях – сборка без приспособления;
- по базовым отверстиям (БО) на приспособлении – сборка в приспособлении упрощенной конструкции;
- по поверхностям в приспособлении – сборка в приспособлении традиционной конструкции.

Выбираем основной способ базирования в порядке снижения технологичности. Это гарантирует сборку изделия с заданной точностью и наиболее технологичным способом.

Для выбора и анализа сборочных баз используем координатную модель [4]. Это дискретная математическая модель схемы базирования деталей в изделии, динамически связанная с твердотельной моделью изделия и состоящая из конечного множества точек (назовем их базовыми точками) с заданными в них дополнительными па-

раметрами. Она характеризуется набором данных в каждой точке и расположением точек (рис. 2).

Набор данных в каждой базовой точке включает координаты этой точки и связанные с ней дополнительные параметры. Координаты точек определим из ЭМ изделия в САД-системе. Дополнительные параметры обусловлены поставленной задачей: ограничения степеней свобо-

ды детали, отклонения точек от номинального положения, приложенная к деталям нагрузка и др. Большинство из них заданы в векторном виде.

Расположение базовых точек определяется их количеством и способом расположения на поверхности базирования. Оно зависит от формы и относительных габаритов поверхности, а также от поставленной задачи.

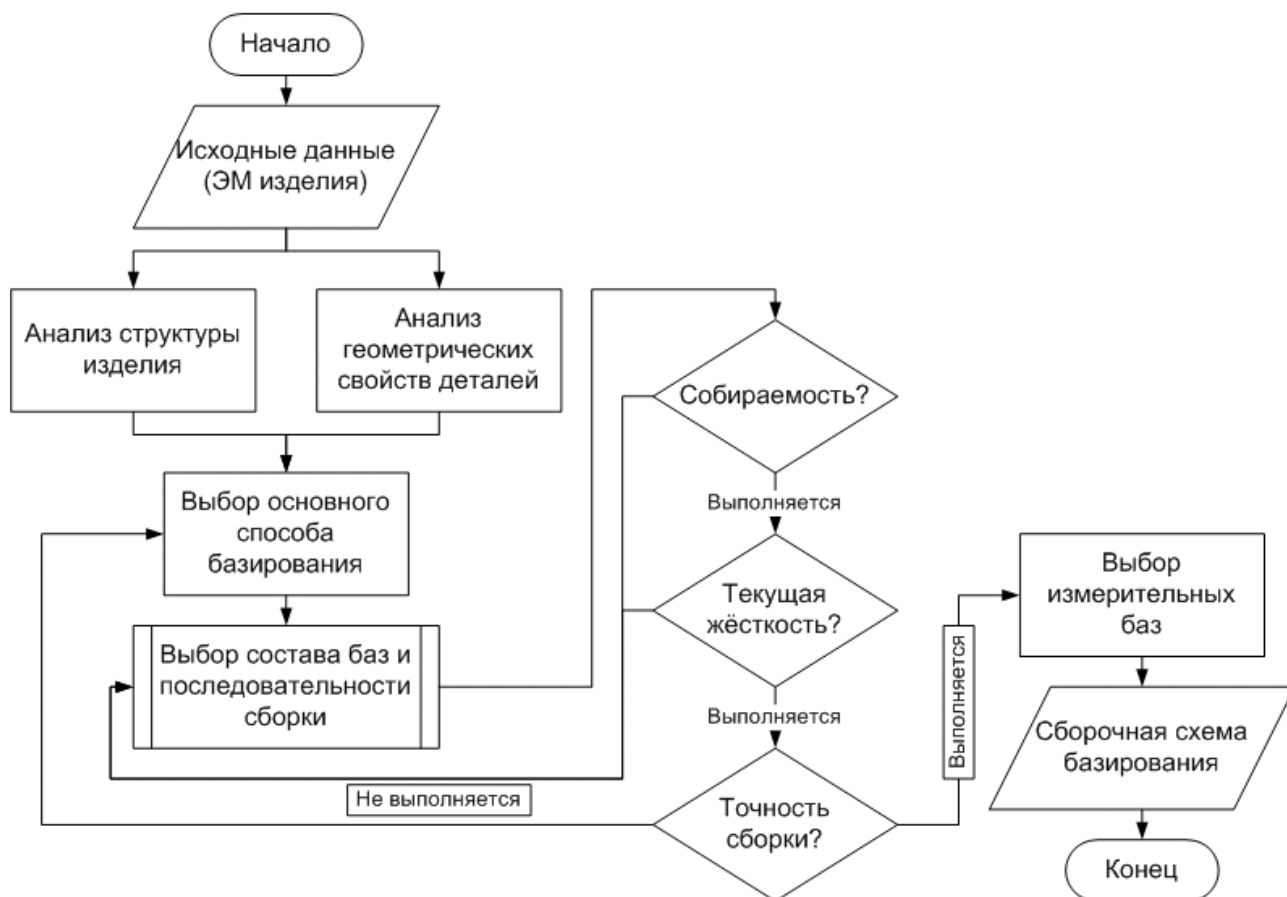


Рис. 1. Последовательность разработки сборочной схемы базирования

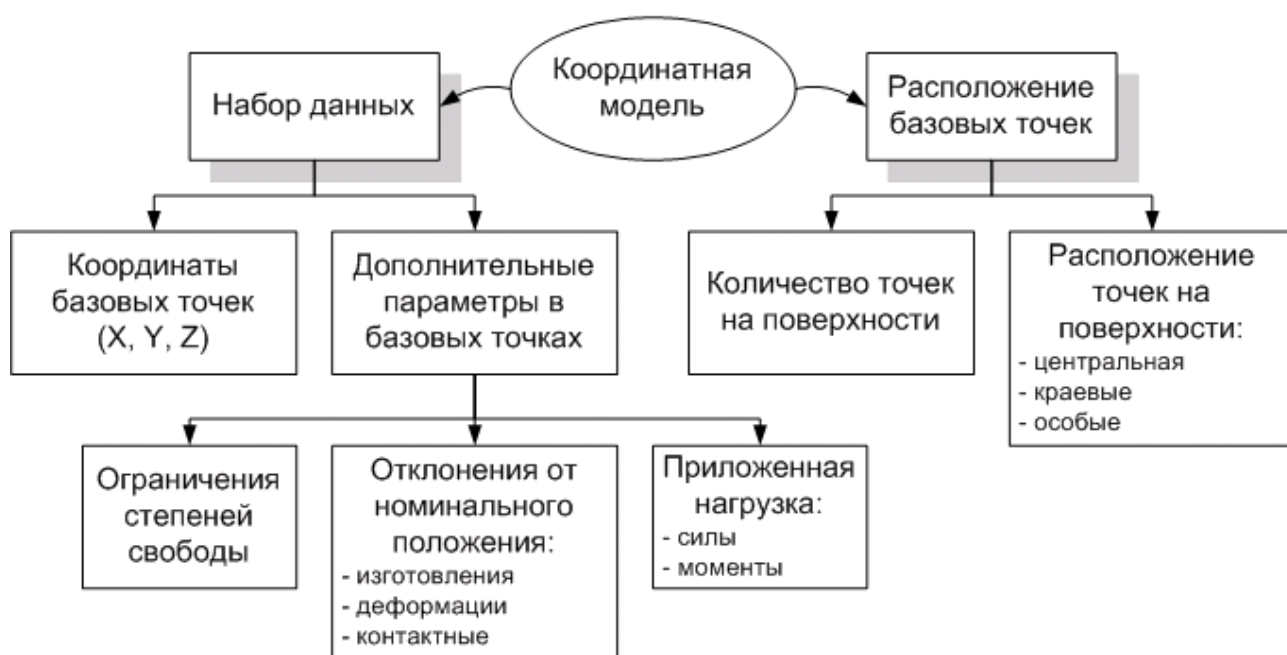


Рис. 2. Структура координатной модели

Начало связанной системы координат поверхности находится в точке ее геометрического центра (по относительным координатам $U=0,5$; $V=0,5$). Оси X и Y соответствуют направлениям U и V , а ось Z направлена по нормали к поверхности. В общем случае рассматривается простой отсек поверхности – топологический эллипс (рис. 3). В более сложных ситуациях выполняется декомпозиция сложной поверхности на простые составляющие.

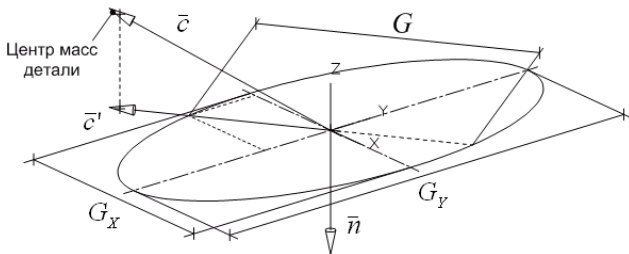


Рис. 3. Определение габаритных коэффициентов поверхности сопряжения

При решении большинства задач имеет значение направление нормали в произвольной точке поверхности. Оно описано углами α и β отклонения вектора нормали от оси Z связанной системы координат в плоскостях OXZ и OYZ соответственно:

$$\begin{cases} \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2], \\ \beta \in [\beta_1, \beta_2]. \end{cases}$$

Границы диапазона $[\alpha_1, \alpha_2]$ и $[\beta_1, \beta_2]$ определяются по точкам внешнего контура поверхности и точкам перегиба (изменения знака кривизны) поверхности методом сечений.

На ограничения степеней свободы и текущую жесткость детали влияет соотношение габаритов поверхности базирования и координат центра масс детали относительно связанной системы координат поверхности. Выразим его через габаритные коэффициенты K_X , K_Y – в направлении осей X и Y связанной системы координат и K – в направлении центра масс устанавливаемой детали (рис. 3):

$$\begin{cases} K = \frac{c}{G}, \\ K_Y = \frac{\sqrt{c_Y^2 + c_Z^2}}{G_Y}, \\ K_X = \frac{\sqrt{c_X^2 + c_Z^2}}{G_X}, \end{cases}$$

где c – длина радиус-вектора $\vec{c}$ центра масс устанавливаемой детали в связанной системе координат поверхности базирования; c_X , c_Y , c_Z – проекции радиус-вектора $\vec{c}$ на оси координат; G_X , G_Y – габариты поверхности базирования в направлении осей X и Y связанной системы координат; G – габарит поверхности, измеренный в плоскости пересечения вектора $\vec{c}$ с осью Z .

Сравним значения габаритных коэффициентов с заданной величиной δ и определим тип базы [5]:

– установочная ($K_X \leq \delta$ и $K_Y \leq \delta$) – ограничено перемещение в направлении оси Z и повороты вокруг осей X и Y связанной системы координат;

– направляющая ($K_X > \delta$, или $K_Y > \delta$, или $K > \delta$) – ограничено перемещение в направлении оси Z и повороты вокруг оси X (при $K_Y > \delta$) или Y (при $K_X > \delta$) связанной системы координат, либо вокруг проекции вектора $\vec{c}$ на плоскость OXY (при $K > \delta$);

– опорная ($K_X > \delta$ и $K_Y > \delta$) – ограничено только перемещение в направлении оси Z связанной системы координат.

Соответственно, на координатной модели для опорной базы достаточно задать единственную точку, для направляющей – не менее двух точек, лежащих на одной прямой, а для установочной – не менее трех точек, не лежащих на одной прямой. Значение δ определяется экспертной системой либо задается технологом.

Рассмотрим пример нервюры (рис. 4): поверхность сопряжения стойки со стенкой является для стойки установочной базой, а для стенки (при обратной последовательности сборки) – направляющей (при значении $\delta = 1$). Габаритные коэффициенты приведены в табл. 1.

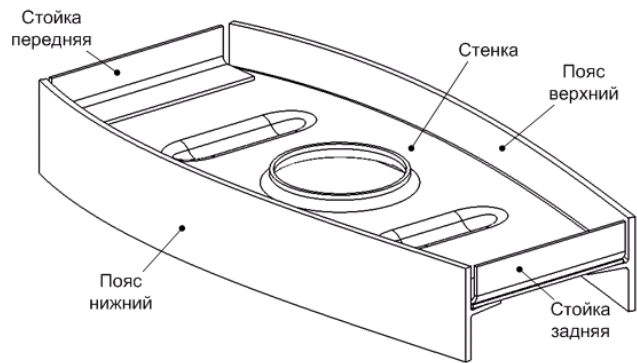


Рис. 4. Пример конструкции нервюры

При размещении точек координатной модели учитываем взаимное расположение поверхностей базирования. Соответствующие базовые точки в пределах размерной цепи располагаются таким образом, чтобы длина образованной ими ломаной линии была наименьшей. Например, базовые точки одного пакета следует располагать на общей нормали к поверхности сопряжения, совпадающей с осью крепежного элемента в ЭМ изделия.

Анализ собираемости включает в себя анализ ограничений степеней свободы и анализ возможности установки детали в заданное положение. Исходными данными являются координаты базовых точек и связи, наложенные на детали в этих точках.

Для ограничения степеней свободы используем односторонние линейные связи в базовых точках координатной модели, заданные единичными векторами $\vec{t}_i$. Для полного ограничения линейных перемещений детали как твердого тела необходимо шесть ограничений, представленных логическими (булевыми) векторами $T_{-\bar{x}}$, $T_{+\bar{x}}$, $T_{-\bar{y}}$, $T_{+\bar{y}}$, $T_{-\bar{z}}$, $T_{+\bar{z}}$. Найдем их с помощью проекции вектора $\vec{t}_i$ на заданную ось, с учетом угла φ_i между вектором и искомой осью:

$$T = \begin{cases} 1, & \text{если } \exists \cos \varphi_i \geq t_{\min}, \\ 0, & \text{если } \forall \cos \varphi_i < t_{\min}. \end{cases}$$

Угловые степени свободы, обозначенные логическими векторами $R_{-\bar{x}}$, $R_{+\bar{x}}$, $R_{-\bar{y}}$, $R_{+\bar{y}}$, $R_{-\bar{z}}$, $R_{+\bar{z}}$, ограни-

чиваются сочетанием линейных связей, заданных в различных точках, с учетом плеча l_i одного вектора связи $\vec{l}_i$ относительно точки приложения другого и угла ψ_i между векторами:

$$R = \begin{cases} 1, & \text{если } \exists (l_i \cos \psi_i) \geq r_{\min}, \\ 0, & \text{если } \forall (l_i \cos \psi_i) < r_{\min}. \end{cases}$$

Возможность установки детали при выбранном составе сборочных баз определяет сектор подхода – сектор сферы пространства, содержащий множество доступных векторов перемещения детали в сборочное положение. Сектор подхода S равен пересечению секторов подхода $S_{i,j}$ к каждой поверхности j -й базы, используемой при установке i -й детали:

$$S = \bigcap_{i \in I, j \in J} S_{i,j}.$$

Из сектора подхода выберем такой вектор, при перемещении детали вдоль которого не возникает пересечения заштрихованного тела $T_{\text{зам}}$, описываемого деталью, с уже установленными деталями и элементами оснастки $T_{\text{дет } i}$:

$$T_{\text{зам}} \cap T_{\text{дет } i} = 0.$$

В результате, построенная по выбранному составу сборочных баз координатная модель отвечает условию собираемости изделия.

Состав сборочных баз и последовательность сборки зависят от основного способа базирования. При базировании по СО используются только сборочные базы, совмещенные с конструкторскими. Графы сборочной и конструкторской схем базирования идентичны по форме. Началом станет деталь, имеющая наибольшее число сопряжений с другими деталями и обладающая достаточной жесткостью, а последовательность установки про-

чих деталей определяется сопряжениями между ними. При возможности одновременной установки нескольких деталей выбирается вариант с наибольшей текущей жесткостью.

Например, для рассмотренной нервюры (рис. 3) стенка имеет наибольшее число сопряжений – четыре. Тогда сборочная схема базирования имеет один уровень сборки (рис. 5), т. е. все прочие детали могут устанавливаться одновременно.

Сравним текущую жесткость при различных последовательностях сборки косвенно по суммарным моментам инерции установленных деталей: чем больше минимальный момент инерции, тем выше текущая жесткость. Согласно данным табл. 2 наибольшую жесткость обеспечивает соединение стенки с верхним поясом, поэтому он устанавливается вторым. Аналогично определим последовательность установки прочих деталей: третьим установим нижний пояс, затем переднюю и заднюю стойки.

При сборке в приспособлении в конструкторскую схему базирования вводим технологические базы – сборочные базы приспособления. На графе схемы базирования добавим еще один узел – приспособление – и связи с теми деталями, которые базируются по приспособлению. Сборочное приспособление обеспечивает взаимное расположение измерительных баз различных деталей с заданной точностью. Поэтому в координатной модели добавим базовые точки на технологических базах, выбранных по следующим критериям:

- существует связь с измерительными базами изделия;
- размерная цепь между измерительными базами двух различных деталей содержит компенсирующее звено;
- деталь обладает достаточной жесткостью.



Рис. 5. Пример графа сборки по конструкторским базам

Таблица 1

Габаритные коэффициенты базовой поверхности при установке по ней различных деталей

№ п/п	Устанавливаемая деталь	Координаты центра масс детали, мм				Габаритные размеры поверхности, мм			Габаритные коэффициенты		
		c_x	c_y	c_z	c	G_x	G_y	G	K	K_x	K_y
1	Стенка	117	1,78	0,88	117	16	72	16	7,31	7,31	0,03
2	Стойка	5,64	0	4,28	7,08				0,44	0,44	0,06

Таблица 2

Массовые характеристики первой и второй деталей в сборе

№ п/п	Присоединяемая деталь	Масса в сборе, кг	Центральные моменты инерции, мм ⁴		
			I_x	I_y	I_z
1	Верхний пояс	0,203	242	1 012	1 233
2	Нижний пояс	0,202	240	1 011	1 231
3	Передняя стойка	0,111	98	609	705
4	Задняя стойка	0,109	96	612	706

Измерительные базы назначим на поверхностях, к точности расположения которых предъявляются повышенные требования. Это поверхности внешних конструкторских баз (основных и вспомогательных баз сборочной единицы в изделии) и исполнительные поверхности (для планера – поверхности теоретического обвода). Поверхность считаем связанной с измерительной базой, если измерительная база назначена на ней непосредственно либо находится в одном пакете с данной поверхностью. Это определяется по ЭМ изделия и координатной модели.

Размерная цепь строится по кратчайшему маршруту на графе сборочной схемы базирования, на котором есть компенсирующее сопряжение. Такое сопряжение не ограничивает степени свободы в направлении размерной цепи. Найдем его, исследовав связи в базовых точках координатной модели.

Жесткость деталей оцениваем косвенно по массовым и геометрическим характеристикам с учетом условий базирования и закрепления, как было рассмотрено выше. Детали для базирования в приспособлении выбираем по наибольшей текущей жесткости.

Поверхности базирования деталей в приспособлении выберем с учетом основного метода базирования в порядке снижения технологичности. Так, в первую очередь исследуем возможность базирования наиболее жестких деталей по БО, совмещенных с отверстиями крепежа, что позволит сократить число фиксаторов БО в приспособлении. Если это невозможно для данного изделия, то исследуем возможность базирования по БО на свободных поверхностях. В последнюю очередь применяется базирование по поверхностям для деталей с меньшей жесткостью, но имеющих измерительные базы. В случае недостаточной текущей жесткости или точности сборки изменим схему базирования, добавив технологические базы в местах наибольших отклонений.

Например, для рассмотренной ранее нервюры назначим измерительные базы на внешних поверхностях стоек (внешние конструкторские базы) и внешних поверхностях поясов (внешние конструкторские базы в одном пакете с поверхностью теоретического обвода). Получим следующие варианты базирования:

- по БО, совмещенным с отверстиями крепежа – четыре БО в местах сопряжения стенки с поясом и стойкой одновременно (рис. 6, а);
- по БО на свободных поверхностях деталей – невозможно (нет свободных поверхностей);

– по поверхностям измерительных баз – пояса и стойки по внешним поверхностям (поверхностям измерительных баз), а стенка – по СО к верхнему поясу (рис. 6, б).

Для последнего варианта фиксация выполняется прижимами к поверхностям баз приспособления. Усилия прижима условно показаны на рис. 6, б стрелками.

Анализ текущей жесткости с учетом деформаций сборной части изделия и сборочного приспособления выполним методом конечных элементов. Для этого воспользуемся одной из существующих программ конечно-элементного анализа твердых тел: Ansys, Nastran и др. Условия закрепления деталей определим по ограничениям степеней свободы на координатной модели. Данные для построения сетки конечных элементов возьмем из ЭМ изделия. С помощью экспертной системы определим усилия прижимов и статические эквиваленты технологических нагрузок при сверлении, клепке и др.

Результаты анализа отобразим на координатной модели в виде векторов отклонений базовых точек от номинального положения. Они будут учтены при выполнении размерного анализа.

При выполнении размерного анализа воспользуемся векторами отклонений, заданных на координатной модели. Векторы наибольших отклонений в каждой точке координатной модели отражают следующие характеристики:

- точность изготовления деталей и сборочной оснастки;
- контактные отклонения и деформации;
- деформации деталей под действием собственного веса и технологических нагрузок.

Расчет по минимуму/максимуму выполним методом сложения векторов отклонений на каждой размерной цепи, определяющей взаимное положение пары измерительных баз. Такая размерная цепь определяется описанным выше способом. Для расчета по вероятностному методу введем по данным экспертной системы вероятностные коэффициенты для каждого вида отклонений.

На сборочной схеме базирования, обеспечивающей заданную точность сборки, назначим измерительные базы. При автоматизированном выполнении контроля измерительные базы представляют собой точки, располагающиеся на поверхностях и осях с повышенными требованиями к точности их расположения. Измерение координат всех точек должно выполняться за наименьшее число установов. Чтобы исследовать возможность подхода к каждой измерительной базе, воспользуемся век-

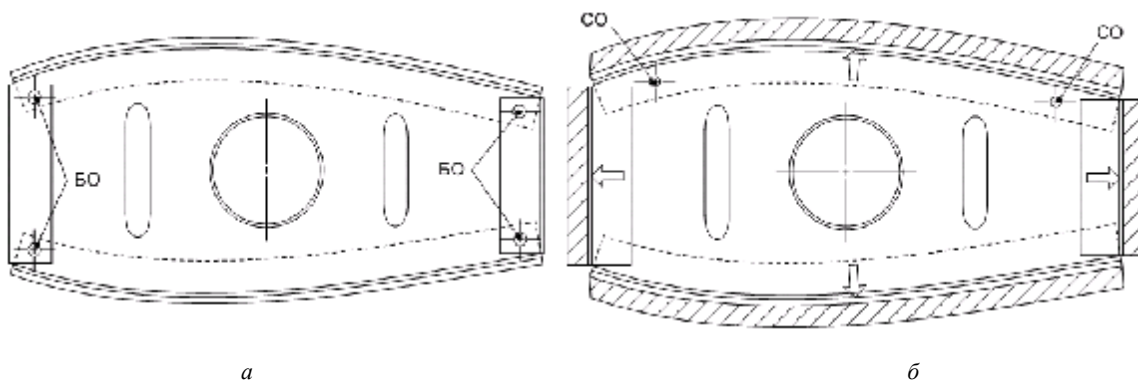


Рис. 6. Способы базирования нервюры в приспособлении:

а – по БО, совмещенным с отверстиями крепежа; б – по поверхностям измерительных баз

торным методом, подобным методу определения собираемости изделия [3]. Для этого потребуются геометрические данные из ЭМ изделия, характеристики средства измерения из соответствующей базы данных и перечень поверхностей и осей с повышенными требованиями к точности их расположения из координатной модели.

В результате выполнения описанных выше этапов получим сборочную схему базирования, представленную в виде координатной модели изделия. Процесс ее разработки полностью формализован и использует данные ЭМ изделия из САД-системы, связанные с ней данные из PDM-системы предприятия и данные экспертной системы.

Полученная схема базирования обеспечивает заданную точность сборки изделия и наибольшую возможную технологичность сборки в данных условиях производства. Она также определяет последовательность сборки изделия и компоновку сборочной оснастки. Координатная модель позволяет учесть расчётные отклонения сборочных и измерительных баз при изготовлении и монтаже сборочной оснастки, а также использовать координаты точек модели при разработке и выполнении автоматизированной сборки изделия.

Библиографический список

1. Пекарш, А. И. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Г. А. Кривов [и др.]. М. : Аграф-пресс, 2006.
2. Ахатов, Р. Х. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства : учеб. пособие / Р. Х. Ахатов. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007.
3. Ахатов, Р. Х. Формализация анализа и выбора сборочных баз конструкции изделия с применением интегрированной системы управления данными об изделии / Р. Х. Ахатов, К. А. Однокурцев // Науч. вестн. Норил. индустриал. ин-та. 2007. № 1. С. 31–36.
4. Ахатов, Р. Х. Координатный подход к разработке схемы базирования при проектировании технологического процесса сборки / Р. Х. Ахатов, К. А. Однокурцев // Решетневские чтения : материалы XII Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. С. 253–255.
5. ГОСТ 21495–76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1982.

R. Kh. Ahatov, K. A. Odnokurtsev

FORMALIZED METHOD OF ASSEMBLY DATUM SURFACES SELECTION AND ANALYSIS IN AIRCRAFT CONSTRUCTION

The research refers to the field of automation of aircraft assembly planning. The formalized method of assembly datum surfaces selection and analysis is founding on the coordinate model, which is an item of discrete information model.

Keywords: assembly, airframe, assembly datum surface, discrete model.

УДК 669.715/782

Г. Г. Крушенко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Установлено влияние температуры нагрева на величину коэффициента линейного расширения алюминиево-кремниевых сплавов (5...40 %Si). Его величина определяет, насколько могут изменяться размеры литых деталей при эксплуатации в разных температурных режимах.

Ключевые слова: алюминиево-кремниевые сплавы, коэффициент линейного расширения, температурный режим.

Литейные алюминиево-кремниевые сплавы широко применяются в авиационно-космической отрасли для литья деталей сложной геометрии, работающих в условиях высоких эксплуатационных нагрузок. При этом одной из важных характеристик, определяющих надежную их эксплуатацию, является коэффициент линейного расширения (КЛР), который показывает относительное изменение длины тела при нагревании на температуру ΔT . Значение КЛР можно показать на примере алюминиевого трубопровода – изменение температуры от 293 К до 77

К приводит к изменению его длины на ~4 мм на каждый метр трубы (КЛР алюминия при температуре ~20 °С составляет $22,9 \cdot 10^{-6}$ (1/град)).

КЛР определяли относительным методом при помощи дифференциального оптического dilatометра Шевенара на сплавах, содержащих 5; 7; 9; 11,4; 18; 25 и 40 % Si, отпрессованных из гранул алюминия А99 и кремния полупроводниковой чистоты.

В результате проведенного исследования было установлено, что по характеру изменения КЛР с нагревом