

УДК 681.3

Компьютерное моделирование конфигурации сварочного шва

Грездов Г.И., Филиппенко Т.К.

Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е.Пухова

Abstract

Грездов Г.И., Филиппенко Т.К. Computer modeling of welded joint configuration. Work is devoted method relief navigation which defines a trajectory of the movements of welding device. Considered schemes welded designs configurations. Parametrical representation of crossing's lines in monitoring model is used.

Введение

Данная работа является развитием исследований по навигации, выполненных авторами в 80гг для авиации. Авторами проводилось машинное моделирование программных средств бортовых и стендовых систем навигации. Предлагаемое в статье направление тогда рассматривалось как одно из возможных в перспективе.

Траектория сварки

Объектом сварки может быть как одно тело, так и конструкция, составленная из нескольких тел, или даже из сборок нескольких тел.

В случае одного тела считается, что оно разделено на части, которые должны быть соединены в единое целое путем заваривания разделяющих щелей. Сварочную щель удобно задавать в виде пересечения поверхности тела и разделяющей поверхности сварки. В случае пресечения двух или более тел сварочная щель обычно проходит по линиям их пересечения.

В общем случае линии пересечения являются пространственными кривыми. С точки зрения навигации требуется провести сварочный аппарат по сварочной щели с заданной скоростью и точностью. Сварочная щель, таким образом, определяет траекторию движения сварочного аппарата. Она расположена на поверхности одного или нескольких свариваемых тел, образующих рельеф, по которому должен двигаться сварочный аппарат. Такую задачу здесь будем называть рельефной навигацией.

Ниже рассматривается компоновка свариваемой конструкции, которая представляется в виде иерархии сборок из деталей и самих деталей. Соединение конструкции в единое целое выполняется при помощи сварки по сварочной щели. Сварочная щель обычно проходит по линии пересечения деталей объекта сварки.

Линии пересечения в модели мониторинга

представляются параметрически. Параметром линий пересечения является длина дуги кривой между начальной и текущей точкой сварки. Линии пересечения представляются набором данных, в который входят радиус-вектор и данные о триэдре как функции параметра линии пересечения. Часто этот набор представляется сеточной моделью с последующим восстановлением методами интерполяции.

Алгоритмы вычисления линии пересечения рассматриваются в отдельном разделе, где представлены аналитические и численные методы, программы решения и несколько примеров.

Конфигурация сварочной канавки включает в себя линию пересечения и кромки свариваемых частей, которые разделяются в соответствии с использованным типом соединений. Существенным для сварочного процесса является ориентация на шве – текущие координаты точки и угловое положение сварочной площадки.

Компоновочная модель объекта

Свариваемая конструкция составляется либо из деталей, либо из секций. Деталь задается граничной моделью, являющейся набором поверхностей, ограничивающих тело детали. Конструкция может компоноваться из набора деталей, принадлежащих некоторой номенклатуре. Все детали заданы в системе координат деталей. Секция составляется из нескольких одинаковых или разных деталей, определенным образом расставленных друг относительно друга, и задается в системе координат секции. Расстановка деталей выполняется путем использования для каждой детали специального линейного преобразования, которое в системе однородных трехмерных координат задается однородной матрицей преобразования:

$$POS = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & p_1 \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & p_2 \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{p} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где p – координаты начала детали;
 P – матрица направляющих косинусов
координатных осей детали относительно
координатных осей секции.

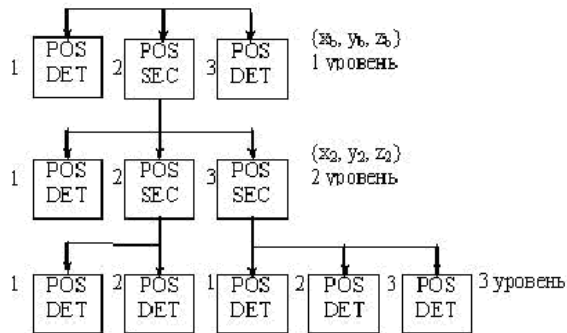


Рисунок 1 – Иерархия в конструкции

Если конструкцию представить в виде дерева (рис. 1), то детали являются листьями – оконечными, тупиковыми, неделимыми элементами такого дерева. Низший уровень такой иерархии – сплошь детали. Секции более высоких уровней могут содержать определенным образом расставленные детали и секции. Сам объект является секцией наивысшего уровня, ему соответствует объектная система координат.

Секция получается всегда в результате сборки из составляющих ее N подсекций или деталей. Сборка определяется порядком установки элементов секции, местом установки элемента секции и типом устанавливаемого элемента. Последовательность расстановки элементов сцены при ее разворачивании может быть произвольной, но в некоторых случаях должна быть заданной, исходя из требований технологии или методов реализации (в порядке убывания важности, в зависимости от расстояния к точке зрения).

При расстановке возможны ситуации, когда детали одного или разных иерархических уровней пересекаются друг с другом. Для простой быстрой оценки пересечения объектов друг с другом каждый объект желательно представлять еще и высечкой, под которой будем понимать некоторый пространственный примитив, в который вписан рассматриваемый объект. В качестве высечек используются такие тела, как шар, цилиндр, прямоугольный параллелепипед и т.д. С помощью высечек можно просто и быстро определить их инцидентность друг с другом, а затем определять факт пересечения и линии, по которым пересекаются детали. Более подробно на этой задаче здесь останавливаться не будем.

Детали объекта являются чаще всего трехмерными телами и задаются ограничивающими их поверхностями – граничными моделями.

Наиболее распространенными граничными моделями являются тополого-геометрические,

использующие геометрическую информацию – координаты вершин, а также топологическую информацию: какие из вершин следует соединять линиями (ребра), какие из ребер образуют грань, какие грани образуют ограничивающую поверхность.

В данной работе предпочтение будет отдаваться кинематическим граничным моделям, для которых поверхность представляет собой след от перемещения некоторого образующего многообразия по другому направляющему многообразию. Перемещение состоит из трех преобразований: движения, масштабирования и изменения формы. Одним из частных случаев такого кинематического способа является движение вдоль по криволинейной траектории плоского контура, имеющего в своей плоскости отверстия, по мере движения сам контур и его отверстия могут менять размеры и форму.

Граничные модели обычно задаются формулами, представляющими поверхности явно, неявно или параметрически. Граничные модели при использовании численных методов удобно представлять сеточными моделями, по которым требуемые поверхности восстанавливаются путем интерполяции.

Трехмерные поверхности неявно представляются заданной функцией F трех переменных x, y, z

$$F(x, y, z) = 0. \quad (2)$$

Параметрическое представление функции – выражение функциональной зависимости между несколькими переменными посредством вспомогательных переменных – параметров. Количество параметров определяется числом степеней свободы функции (линия определяется одним параметром, поверхность – двумя), а количество компонентов функции определяется размерностью пространства. Таким образом, для параметрического представления линии в трехмерном пространстве требуется реализовать три функции одной переменной, а для представления поверхности – три функции двух переменных. Важнейшие достоинства параметрического представления – возможность выражать многозначные функции с помощью однозначных, область изменения параметров, как правило, прямоугольна. Параметрическое представление функции в трехмерном пространстве имеет вид

$$x = F_x(d, g), \quad y = F_y(d, g), \quad z = F_z(d, g), \quad (3)$$

где x, y, z – координаты точки на поверхности,

F_x, F_y, F_z – заданные функции двух переменных,

d, g – направляющий и образующий параметры поверхности.

Обычно при компоновке конструкций располагают банком граничных моделей деталей, заданных в системе координат деталей x, y, z .

Расстановка тел состоит в преобразовании координат деталей в координаты секции или объекта в соответствии с иерархией составляющих в конструкции и выполняется по-разному для тел, заданных неявно или параметрически. Рассмотрим объект, компоновка которого дана на рис.1. Будем номеровать элементы данных в соответствии с положением структурного элемента в иерархии, например, DET231 – деталь, входящая в секцию 2 верхнего уровня, секцию 3 второго уровня под номером 1. Аналогично номеруются операторы положения и наборы параметров детали. Координаты объекта обозначаются $rb = \{xb, yb, zb\}$, а координаты секций имеют цифровой, соответствующий номеру секции в иерархии.

Для граничных моделей деталей, заданных неявно, рассмотрение расстановки начнем с детали 1 уровня 1. Уравнение ее границ представляется как

$$DET_1(r) = 0,$$

координаты детали преобразуются в координаты объекта с помощью оператора

$$rb = POS_1 r,$$

который с использованием однородных координат имеет вид

$$\begin{pmatrix} r_b \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 & p_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ 1 \end{pmatrix}$$

Выразим координаты детали через координаты объекта:

$$r = POS_1^{-1} r_b, \text{ где } POS_1^{-1} = \begin{pmatrix} P^T & -P^T p \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

После подстановки выражения для координат детали в уравнение ее границ получим $DET_1(POS_1^{-1} r_b) = 0$,

что и является искомым результатом.

Представим конечный результат расстановки для объекта, компоновка которого дана на рис.1, а детали заданы в неявной форме.

$$\{DET_1(POS_1^{-1} r_b), \{DET_{21}(POS_{21}^{-1} r_2), \{DET_{221}(POS_{221}^{-1} r_{22}), DET_{222}(POS_{222}^{-1} r_{22})\},$$

$$\{DET_{231}(POS_{231}^{-1} r_{23}), DET_{232}(POS_{232}^{-1} r_{23}), DET_{233}(POS_{233}^{-1} r_{23})\}, DET_3(POS_3^{-1} r_b)\},$$

$$r_2 = POS_2^{-1} r_b, r_{22} = POS_{22}^{-1} r_2, r_{23} = POS_{23}^{-1} r_2.$$

В этом выражении принято:

- фигурными скобками объединены детали одной и той же секции, внутренние скобки соответствуют секциям нижнего уровня, внешние скобки – секциям более высокого уровня;
- нумерация деталей и операторов положения соответствует определенной выше;
- для того, чтобы скомпоновать конструкцию, детали должны подвергнуться операции отсечения: детали необходимо проверить на взаимное пересечение, если оно имеет место, найдены линии пересечения и

удалены отсекаемые части деталей.

Для граничных моделей деталей, заданных параметрически, рассмотрение, как и для неявного задания, начнем с детали 1 уровня 1. Уравнение ее границ представляется как

$$r = DET_1(p_1),$$

где $p_1 = \{d_1, g_1\}$; координаты детали преобразуются в координаты объекта с помощью оператора

$$r_b = POS_1 r,$$

что дает параметрическое представление DET_1 в координатах объекта

$$r_b = POS_1 DET_1(p_1).$$

Представим конечный результат расстановки для объекта, компоновка которого дана на рис.1, а детали заданы в параметрической форме.

$$\{POS_1 DET_1(p_1), POS_2 \{POS_{21} DET_{21}(p_{21}), POS_{22} \{POS_{221} DET_{221}(p_{221}), POS_{222} DET_{222}(p_{222})\}, POS_{23} \{POS_{231} DET_{231}(p_{231}), POS_{232} DET_{232}(p_{232}), POS_{233} DET_{233}(p_{233})\}\}, POS_3 DET_3(p_3)\}.$$

Здесь, как и для неявного задания, для того, чтобы скомпоновать конструкцию, детали должны подвергнуться операции отсечения: детали нужно проверить на взаимное пересечение, если оно имеет место, найти линии пересечения и удалить отсекаемые части деталей – подготовить детали к сварке.

Таким образом, объектами сварки являются конструкции, образуемые расставленными в соответствии с заданием деталями, для которых найдено их пересечение и удалены отсекаемые части. Соединение конструкции в единое целое выполняется путем заваривания разделяющих щелей, оси которых проходят по линиям пересечения деталей

Конфигурация сварочной канавки

Основными компонентами сварочной канавки являются ее осевая линия, формы кромок прилегающих тел, расположение сварочной площадки. В модели мониторинга сварочная канавка задается определенным набором данных.

Линия пересечения

Осевой линией сварочной канавки является линия пересечения ограничивающих поверхностей свариваемых тел. Линия пересечения обычно представляется в параметрической форме, элементами такого представления являются параметр, текущий радиус-вектор и сопровождающий триэдр.

Параметр

На замкнутой или разомкнутой линии пересечения выбирается каким-либо образом точка начала линии. В этой точке значение параметра равно нулю. Сам параметр выбирается по-разному, наиболее распространенным и удобным параметром является длина дуги по линии пересечения между этой начальной и

текущей точками. Этот параметр s является аргументом остальных элементов, представляющих линию пересечения.

Текущий радиус-вектор

Текущий радиус-вектор представляет объектные координаты текущей точки линии пересечения. Эти координаты являются функциями параметра линии пересечения, то есть изменяются в соответствии с изменением параметра $r=r(s)$.

Вычислению функциональной зависимости радиус-вектора от параметра линии пересечения для заданных пересекающихся поверхностей посвящен раздел.

Траекторная система координат

Траекторная система является подвижной системой координат, все ее элементы зависят от одного параметра – длины дуги по линии траектории от начальной до текущей точки.

Начало координат траекторной системы находится в текущей точке на траектории, текущая точка имеет объектные координаты.

Оси траекторной системы направлены следующим образом: ось Ox по касательной к траектории в сторону положительного направления движения, ось Oy – по направлению, комбинирующему орты внешних нормалей примыкающих к линии пересечения поверхностей, ось Oz дополняет эти две оси до правой прямоугольной системы координат.

Координатные плоскости траекторной системы имеют следующий смысл. В окрестности начала координат плоскость xz совпадает со сварочной площадкой, плоскость yz дает плоскость поперечного сечения сварочного шва, а плоскость xy является диаметральной.

Преобразование координат из траекторной системы xk, yk, zk в объектную систему xb, yb, zb выполняется по формулам

$$\begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{b0} \\ y_{b0} \\ z_{b0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x & n_x & b_x \\ t_y & n_y & b_y \\ t_z & n_z & b_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Здесь x_{b0}, y_{b0}, z_{b0} , - координаты начала траекторной системы, по определению являющиеся текущими координатами точки на траектории

$$\{x_{b0}, y_{b0}, z_{b0}\} = \{x(s), y(s), z(s)\}, \quad (5)$$

а элементы матрицы преобразования при использовании сопровождающего триэдра находятся как

$$\{t_x, t_y, t_z\} = \text{Ort}(d\mathbf{r}/ds),$$

$$\{n_x, n_y, n_z\} = \text{Ort}(d^2\mathbf{r}/ds^2), \quad \mathbf{b} = \mathbf{t} \times \mathbf{n} \quad (6)$$

Определение операции Ort приведено в (12).

Триэдр

Линия пересечения является пространственной, поведение в окрестности текущей точки определяется триэдром \mathbf{M} , который включает в себя три вектора \mathbf{t} , \mathbf{n} и \mathbf{b} и соединяющие их плоскости.

$$\mathbf{M} = \{\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{b}\} = \left\| \begin{pmatrix} t_x & n_x & b_x \\ t_y & n_y & b_y \\ t_z & n_z & b_z \end{pmatrix} \right\|. \quad (7)$$

В зависимости от способов вычисления векторов \mathbf{t} , \mathbf{n} и \mathbf{b} существуют разные виды триэдров.

Когда неизвестно происхождение пространственной линии, поведение в окрестности текущей точки, как известно, определяется *сопровождающим* триэдром, который находится по ее дифференциальным свойствам. Здесь направляющими векторами являются вектора касательной, главной нормали и бинормали, они вычисляются по формулам

$$\mathbf{t} = \frac{d\mathbf{r}}{ds}, \quad \mathbf{n} = \frac{d^2\mathbf{r}}{ds^2}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{t} \times \mathbf{n}. \quad (8)$$

Когда линия получена в результате пересечения поверхностей F и W (известно ее происхождение), формируется *сопутствующий* триэдр с использованием дифференциальных свойств этих поверхностей – нормалей к поверхностям \mathbf{n}_F и \mathbf{n}_W в точке на линии пересечения. Вектор касательной линии к линии пересечения \mathbf{t} здесь может вычисляться как (когда \mathbf{n}_F и \mathbf{n}_W не коллинеарны)

$$\mathbf{t} = \mathbf{n}_F \times \mathbf{n}_W. \quad (9)$$

Рассмотрим два случая пересечения.

Первый случай – линия пересечения образуется на основной поверхности при ее пересечении с разделяющей поверхностью. В этом случае сопутствующий триэдр строится следующим образом. Продольная ось проходит по касательной к линии пересечения \mathbf{t} , в качестве вектора \mathbf{n} целесообразно использовать нормаль к основной поверхности \mathbf{n}_F , которая определяет расположение сварочной площадки. Тогда

$$\mathbf{M} = \{\mathbf{t}, \mathbf{n}_F, \mathbf{t} \times \mathbf{n}_F\}. \quad (10)$$

Второй случай – линия образуется при пересечении двух поверхностей. Здесь линия пересечения поверхностей проходит по вершине ребра, образованного примыкающими к нему пересекающимися поверхностями. В этом случае сопутствующий триэдр имеет следующие элементы: продольная ось проходит по касательной к линии пересечения \mathbf{t} , поскольку поверхность объекта на линии пересечения имеет перелом, вторую ось целесообразно проводить по направлению, комбинирующему орты нормалей примыкающих к линии пересечения поверхностей \mathbf{n}_F и \mathbf{n}_W

$$\mathbf{n} = \lambda \mathbf{n}_F + (1-\lambda) \mathbf{n}_W, \quad \lambda \in [0, 1]. \quad (11)$$

При $\lambda=0.5$ \mathbf{n} проходит по биссектрисе угла между нормальными примыкающих к линии пересечения поверхностей \mathbf{n}_F и \mathbf{n}_W , при $\lambda=0$ вектор \mathbf{n} совпадает с \mathbf{n}_W , а при $\lambda=1$ вектор \mathbf{n} совпадает с \mathbf{n}_F .

Используемый здесь орт нормали к поверхности \mathbf{n}_F вычисляется следующим образом. Нормированными компонентами нормали n_{Fx} , n_{Fy} , n_{Fz} неявно заданной поверхности $F(x,y,z) = 0$ являются

$$\begin{aligned} n_{Fx} &= \frac{l}{L}, n_{Fy} = \frac{m}{L}, n_{Fz} = \frac{n}{L}, l = \frac{\partial F}{\partial x}, \\ m &= \frac{\partial F}{\partial y}, n = \frac{\partial F}{\partial z}, L = \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Эта операция иногда обозначается как

$$\mathbf{n}_F = \text{Ort}\left(\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z}\right).$$

Производные вычисляются в текущей точке на линии пересечения.

При параметрическом задании поверхности $x_F = F_x(u, v)$, $y_F = F_y(u, v)$, $z_F = F_z(u, v)$ (13) нормированные компоненты нормали поверхности определяются как

$$\begin{aligned} n_{Fx} &= \frac{l}{L}, n_{Fy} = \frac{m}{L}, n_{Fz} = \frac{n}{L}, \\ l &= \begin{vmatrix} \frac{\partial F_y}{\partial u} & \frac{\partial F_z}{\partial u} \\ \frac{\partial F_y}{\partial v} & \frac{\partial F_z}{\partial v} \end{vmatrix}, m = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_z}{\partial u} & \frac{\partial F_x}{\partial u} \\ \frac{\partial F_z}{\partial v} & \frac{\partial F_x}{\partial v} \end{vmatrix}, n = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial u} & \frac{\partial F_y}{\partial u} \\ \frac{\partial F_x}{\partial v} & \frac{\partial F_y}{\partial v} \end{vmatrix}, \\ L &= \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

или

$$\mathbf{n}_F = \text{Ort}\left(\left\{\frac{\partial F_x}{\partial u}, \frac{\partial F_y}{\partial u}, \frac{\partial F_z}{\partial u}\right\} \times \left\{\frac{\partial F_x}{\partial v}, \frac{\partial F_y}{\partial v}, \frac{\partial F_z}{\partial v}\right\}\right).$$

Типы соединений

Сечение сварочной канавки располагается в координатной плоскости yz траекторной системы, а ее вид – типом соединения. Имеется специфика использования типов соединений для сварочных канавок, оси которых являются криволинейными пространственными кривыми. Пересекающиеся поверхности подходят к линии пересечения под углами, определяемыми проекциями нормалей к поверхностям на координатную плоскость yz , которые в общем

случае зависят от параметра, то есть изменяются при движении вдоль по траектории. Это накладывает ограничения на числовые значения параметров выбранного типа соединения, а кромки прилегающих деталей в некоторых случаях должны формироваться как функционально зависящие от параметра траектории. На Рис.2 приведены два примера форм поперечного сечения для разных типов соединения. Тип соединения на Рис.2 а) имеет кромки деталей, полученные обрезанием краев по нормали к поверхности, у этого типа соединения в районе сечений б..8 происходит налегание свариваемых тел друг на друга. Тип соединения на Рис.2 б) имеет развал примыкающих кромок 45°, тело с большей толщиной имеет кромку касательную к внутренней поверхности тела с меньшей толщиной, налегания свариваемых тел друг на друга здесь нет, однако угол кромок и нормалей к поверхности функционально зависит от параметра осевой линии.

Плоскость поперечного сечения шва расположена в текущей траекторной координатной плоскости y_Tz_T , координатные оси чертежа Ox_D , Oy_D текущего сечения сварочной канавки располагаются следующим образом: ось чертежа Ox_D совпадает с осью Oz_T траекторной системы, а ось Oy_D совпадает с осью Oy_T .

Уравнение поверхности сварочной канавки около траектории.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_g(g, s) &= \mathbf{r}_{T0}(s) + \{ \mathbf{b}, \mathbf{n} \} \mathbf{r}_D(g, s), \\ \mathbf{r}_D &= \{ x_D, y_D \}(g, s), g \in [0, n_g], s \in [0, S], \end{aligned} \quad (15)$$

где $\mathbf{r}_g(g, s)$ – поверхность сварочной канавки около траектории;

$\mathbf{r}_{T0}(s)$ – осевая линия сварочной канавки;

$\mathbf{r}_D(g, s) = \{ x_D, y_D \}(g, s)$ – описание сечения сварочной канавки;

g – параметр сечения;

n_g – число участков в описании сечения сварочной канавки;

S – длина сварочной линии.

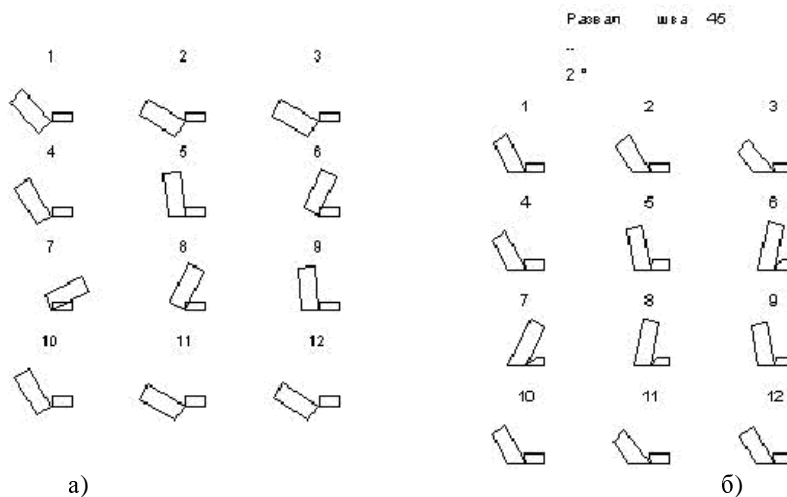


Рисунок 2 – Два типа соединений на криволинейном шве

Сварочная площадка

Плоскость сварочной площадки расположена в текущей траекторной координатной плоскости $x_T z_T$, координатные оси Ox_D , Oy_D текущего сечения сварочной канавки располагаются следующим образом: ось чертежа Ox_D совпадает с осью Ox_T траекторной системы, а ось Oy_D совпадает с осью Oz_T .

Уравнение поверхности сварочной площадки около траектории:

$$\mathbf{r}_g(\mathbf{g}, s) = \mathbf{r}_{T0}(s) + \{ \mathbf{b}(s), \mathbf{n}(s) \} \{ x_D, y_D \}, s \in [0, S], \quad (16)$$

где $\mathbf{r}_g(\mathbf{g}, s)$ - поверхность сварочной площадки около траектории;

$\mathbf{r}_{T0}(s)$ – осевая линия сварочной канавки;

S – длина сварочной линии

Формы представления

Траектория сварки используется в комплексе задач, обеспечивающем мониторинг. В этих задачах часто используется сопутствующий триэдр. Сопутствующий триэдр имеет вид (7), касательный вектор вычисляется чаще по формуле (9), но когда нормали \mathbf{n}_F и \mathbf{n}_W коллинеарны, - по первой формуле системы (8), вектор \mathbf{n} определяется по формуле (11), то есть

$$\mathbf{M} = \{ \mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{b} \} = \begin{vmatrix} t_x & n_x & b_x \\ t_y & n_y & b_y \\ t_z & n_z & b_z \end{vmatrix}.$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{n}_F \times \mathbf{n}_W \text{ или } \mathbf{t} = \frac{d\mathbf{r}}{ds},$$

$$\mathbf{n} = \lambda \mathbf{n}_F + (1-\lambda) \mathbf{n}_W, \lambda \in [0, 1].$$

Плоскость сечения канавки, в которой размещается чертеж выбранного типа соединения, определяется в соответствии с (15), а в формировании текущих чертежей соединения для разных значений параметра принимают участие текущие значения нормалей \mathbf{n}_F и \mathbf{n}_W .

Сварочная площадка используется в мониторинге для определения ее положения относительно местного горизонта и определяется по формуле (16).

Дифференциальное уравнение движения по траектории имеет несколько разновидностей. Здесь приведем две из них. Когда касательный вектор \mathbf{t} имеет отличную от единицы длину, движение по траектории с заданным модулем скорости v описывается дифференциальным

уравнением:

$$\frac{ds}{dt} = vL(\mathbf{t}), s(t_0) = s_0, \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(s(t)).$$

Здесь $L(\mathbf{t})$ – длина вектора \mathbf{t} .

Если же длина вектора \mathbf{t} удерживается равной 1, то движение по траектории с заданным модулем скорости v описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{ds}{dt} = v, s(t_0) = s_0, \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(s(t)).$$

Рекомендуемый набор данных о траектории сварки, который удобен при реализации описанного комплекса задач, включает в себя набор трех векторных функций от параметра s : $\mathbf{r}_{T0}(s)$, $\mathbf{n}_F(s)$ и $\mathbf{n}_W(s)$ – радиус-вектора осевой линии и нормалей к примыкающим поверхностям.

Указанный набор может быть представлен сеточной моделью – набором узловых значений каждой функции для узловых значений параметра s с некоторым шагом.

Литература

1. Аммерал Л., Интерактивная трехмерная машинная графика - М, Сол Систем, 1992. – 318 с.
2. Грездов Г.И., Филиппенко Т.К., Метод параметрической интерполяции в машинной графике, К.: (Препринт / НАН Украины. Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике, №1/2007) – 56 с.
3. Грездов Г.И., Филиппенко Т.К., Фундаментальная локальная сплайн-интерполяция табличных функций нескольких переменных, К.: (Препринт / НАН Украины. Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике, №3/1998) – 48 с.
4. Корн Г., Корн Т., Справочник по математике - Москва, Наука, 1974.- 832 с.
5. Ньюмен У., Спрулл Р., Основы интерактивной машинной графики – М.: Мир, 1976. – 574 с.
6. Сван Т., Delphi 4: Библия разработчика – К., М., СПб.: Диалектика, 1998. – 672 с.
7. Wolfram S., Mathematica: A System for Doing Mathematics by Computer, Addison-Wesley, 1991. – 962 с.

Поступила в редколлегию 04.03.2009