

УДК 621.791:004.94

В.В. ЛИТВИНОВ, В.В. КАЗИМИР*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Украина***МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ
УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНСТРУКЦИЙ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ**

Предлагается подход к производству конструкций авиадвигателей с помощью электронно-лучевой сварки, который основан на использовании встроенных компьютерных моделей различных видов. Рассматриваются метод визуального проектирования программ сварок с многокоординатными перемещениями и метод адаптивного слежения за стыком во время сварки, которые обеспечивают высокое качество получаемых сварных соединений при серийном производстве сложных пространственных конструкций.

конструкция, электронно-лучевая сварка, компьютерная модель, визуальное проектирование, адаптивное слежение

Введение

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) в наше время рассматривается как наиболее перспективное средство построения сложных конструкций ответственного назначения, когда используются разнообразные тугоплавкие металлы и нежелательна их последующая термическая или механическая обработка. Благодаря использованию остро сфокусированного электронного луча большой мощности в условиях высокого вакуума, при ЭЛС удается достичь желательной точности и чистоты соединения, нанося изделиям минимальные деформации [1 – 3]. Именно поэтому наиболее развитой областью применения ЭЛС является аэрокосмическая промышленность. От того, насколько эффективно будет организован процесс ЭЛС, во многом будет определяться надежность и качество получаемой продукции – конструктивных элементов авиадвигателей, в частности.

Формулирование проблемы. Основным требованием, предъявляемым к установкам электронно-лучевой сварки, является высокая точность попадания электронного пучка в стык свариваемых изделий. Выполнение данного требования предусматривает решение двух последовательных задач: автома-

тического обучения траектории стыка при подготовке к сварке и автоматического слежения за стыком в процессе выполнения сварки с целью корректировки положения электронного пучка.

Рассматриваемое высокотехнологическое производство добавляет особую сложность в процесс ЭЛС, поскольку предполагает использование во время сварки большого числа изменяемых координат. В таких условиях возможности традиционных подходов к составлению программ сварок становятся неэффективными. На подготовку программы сварки конструктивного элемента турбины авиадвигателя, которая записывается в кодах ЧПУ, требуется несколько дней или даже недель. Что же касается автоматического слежения за стыком во время сварки, то данная задача для сложных пространственных траекторий вообще не может быть решена без использования адаптивных методов управления.

Одним из способов преодоления указанных выше трудностей является применение модельно-ориентированного подхода к управлению установкой ЭЛС, предполагающего использование компьютерных моделей, встроенных в контур управления и используемых в реальном масштабе времени.

Целью данной статьи является изложение концептуальных основ, теоретических методов и прак-

тических решений, связанных с реализацией модельно-ориентированного подхода к управлению установками ЭЛС, которые используются при производстве конструкций авиадвигателей.

Решение проблемы

Концепция модельно-ориентированного управления. Модельно-ориентированное управление (МОУ) [4] заключается в широком использовании компьютерных моделей в процессе выработки и осуществления управляющих воздействий в реальном масштабе времени на принципах ситуационного, адаптивного и многоагентного управления. МОУ не утверждает новые принципы организации управления, а только выступает в роли способа их реализации с учетом сложной иерархической структуры и динамики поведения объекта управления (ОУ). Этот подход требует использования компьютерных моделей, встроенных непосредственно в контур управления, которые могут динамично изменяться соответственно условиям функционирования системы, оставаясь все время актуальными. Схема использования моделей в контуре управления показана на рис. 1.

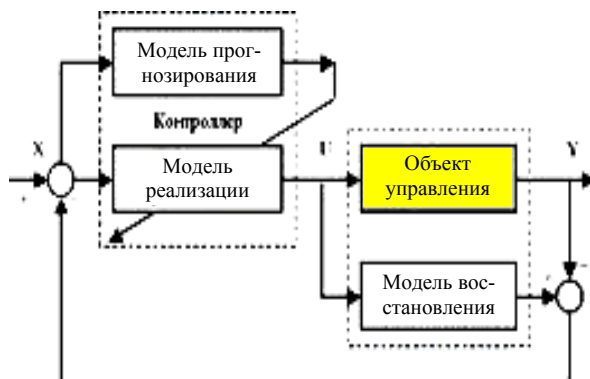


Рис. 1. Схема использования моделей в контуре управления

Модели реализации являются имитационными моделями процесса управления, которые выполняются контролерами. Они описывают и реализуют алгоритм управления (АУ) с учетом изменения состояния как контролера, так и ОУ.

Модели прогнозирования оценивают будущее поведение АУ с точки зрения соответствия заданным свойствам. Благодаря моделям прогнозирования появляется возможность своевременного динамического изменения АУ с целью своевременного предупреждения нежелательного развития событий.

Модели восстановления решают задачу восполнения отсутствующей информации об ОУ и внешнем окружении, устраняют эффект запаздывания обратной связи, фактически замыкая ее через себя, и обеспечивают данными относительно параметров, не охваченных обратной связью. Для установок ЭЛС решающими в этом плане являются модели отображения виртуальной реальности и распознавания изображений, которые лежат в основе визуального метода проектирования программ сварок [5] и метода адаптивного управления положением электронного пучка во время сварки [6].

Существует аналогия между модельно-ориентированным управлением и объектно-ориентированным программированием, которая заключается в использовании в структуре системы управления компьютерных моделей подобно тому, как в структуре объектно-ориентированной программы используются объекты, которые взаимодействуют со своим окружением.

Метод визуального проектирования программ сварок. Данный метод позволяет отказаться от традиционного программирования сварочных перемещений в G-кодах за счет построения трехмерного виртуального отображения обстановки внутри вакуумной камеры и автоматического обучения траектории стыка произвольной формы.

Фактически, в процессе визуального проектирования формируется синтетическое окружение ОУ, которое используется как операторами, так и аппаратными средствами при управлении установкой. Разработанный инструментарий моделей отображения позволяет не только создавать трехмерные образы изделий, управлять ракурсом и масштабом по-

лученных изображений, но и отображать расположение запрограммированной сварочной траектории на поверхности изделия и осуществлять автоматический контроль перемещений с целью недопущения повреждения изделия и оборудования внутри камеры. Примеры моделей виртуального отображения сложных конструкций, которые свариваются на основе предложенного метода и требуют как минимум четырех одновременно управляемых осей перемещения, приведены на рис. 2.

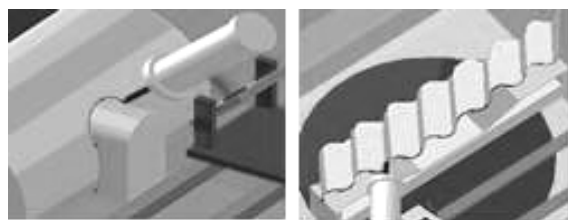


Рис. 2. Примеры моделей виртуального отображения сложных конструкций

Для отображения траектории стыка на поверхности изделия в трехмерном пространстве разработан алгоритм трансформации семикоординатных векторов (X, Y, Z, V, Q, W, U) , которые описывают точки траектории, полученные в процессе автоматического обучения, в трехмерные векторы (x, y, z) . Алгоритм учитывает углы обращения и наклона пушки, а также углы обращения и наклона платформы, где установлено изделие.

Автоматическое обучение траектории стыка произвольной формы осуществляется в процессе совместной работы моделей восстановления и моделей реализации. В процессе движения программа распознавания в каждом новом кадре изображения, который формируется с помощью специальной системы наблюдения, разработанной в Институте электросварки имени Е.О. Патона [7], находит стык и определяет вектор перемещения в новую точку траектории, расположенную посередине стыка. Выбор очередной точки из области стыка осуществляется из расчета получения кусочно-линейной аппроксимации

траектории стыка с возможным отклонением от середины стыка на величину не более 0,1 мм.

Модели распознавания изображений выполняют задачу воспроизведения форм объектов путем получения изображений поверхностей изделий, фильтрации изображений, их контрастирования, сегментации, утончения и восстановления траекторий. После кусочно-линейной аппроксимации траектория представляется отрезками прямых и круговых интерполяций, для которых автоматически рассчитываются соответствующие параметры. Во всех случаях соблюдается заданная точность аппроксимации, которая вычисляется по формулам:

- для линейной интерполяции

$$E = \max_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} d_i^2, \quad (1)$$

где d_i – расстояние от точки (x_i, y_i) , $i = \overline{k, n}$ до аппроксимирующей прямой;

- для круговой интерполяции

$$E = \max \left[\max_{k \leq i \leq n} d_i^2, \max_{1 \leq j \leq (n-k)} c_j^2 \right], \quad (2)$$

где d_i – расстояние от точки (x_i, y_i) , $i = \overline{k, n}$ до аппроксимирующей окружности; c_j – расстояние от центра отрезка прямой, которая соединяет две сопредельные точки сегмента, до аппроксимирующей окружности.

Траектория стыка, которая воспроизводится во время обучения, отображается на трехмерном виртуальном представлении изделия и на базовых плоскостях, как это показано на рис. 3.

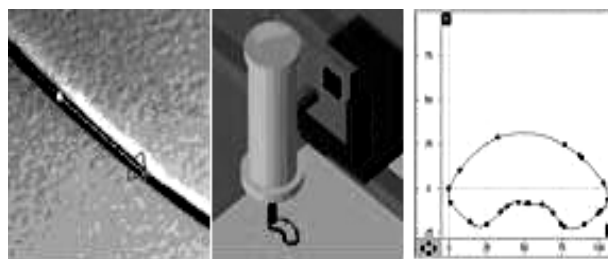


Рис. 3. Отображение траектории стыка во время автоматического обучения

В дальнейшем полученные модели восстановления используются при построении графических образов моделей виртуального отображения с помощью методов компьютерной графики, а также при реализации метода адаптивного управления электронным пучком во время сварки.

Метод адаптивного управления положением электронного луча при слежении за стыком. Целью данного метода является точное удержание центра пучка на середине стыка во время проведения сварки, когда через возникающие сварочные деформации возможен сдвиг стыка в сторону от заданной траектории движения.

Вид изображения стыка, который обрабатывается алгоритмом адаптивного управления, показан на рис. 4.

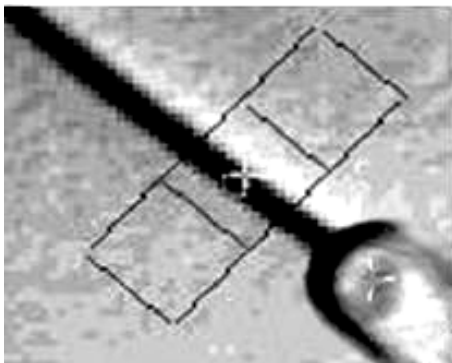


Рис. 4. Вид изображения стыка во время слежения

Совмещение пучка со стыком происходит за счет отклонения электронного пучка в плоскости торца пушки на угол, рассчитанный программой управления.

Расчет параметров отклонения производится таким образом, чтобы обеспечить необходимую точность удержания пучка на середине стыка.

Разработанный метод адаптивного управления обеспечивает поддержание показателя качества сварки в заданных пределах путем вычисления отклонений, которые возникают в упрежденной точке, используя для этого модели распознавания реального положения стыка по кадрам изображения и графическую модель траектории, которая сохраняется в

памяти компьютера после автоматического обучения.

В результате выполнения алгоритма слежения реализуется схема адаптивного управления, которая включает:

- оператор основного контура управления H_1 :

$$dp(k+1) = H_1[dp(k), p'_c(k), d\gamma(k)], \quad (3)$$

где $dp(k+1)$ – вектор отклонений центра пучка в упрежденной точке на следующем шаге; $dp(k)$ – вектор отклонений центра пучка в упрежденной точке на текущем шаге; $p'_c(k)$ – вектор координат текущего положения середины стыка в упрежденной точке; $d\gamma(k)$ – текущий угол отклонения пучка;

- оператор адаптации H_2 :

$$p'_c(k+1) = H_2[dp(k), p'_c(k), d\gamma(k)]. \quad (4)$$

Информация о процессе, которая содержится в векторе $(p'_x(k), p'_y(k))$, формируется путем использования моделей восстановления, а именно моделей распознавания стыка, которые учитывают текущее отклонение пучка. Вектор управления $d\gamma = (d\gamma_x, d\gamma_y)$ пересчитывается на каждом шаге работы алгоритма.

Кроме процессов слежения за стыком во время сварки данный метод также используется для корректировки параметров программных траекторий стыков при серийном производстве однотипных конструкций.

Заключение

Рассмотренные методы модельно-ориентированного управления реализованы в установках КЛП115 и КЛП118, которые период с 2002 по 2004 г.г. были разработаны Институтом электросварки им. Е.О. Патона совместно с Институтом проблем математических машин и систем НАН Украины. В настоящее время данные установки внедрены на предприятиях GKN (Boeing Thermal Joining Center – США) и с успехом эксплуатируются при производ-

стве сложных конструкций аэрокосмического назначения, в том числе при создании авиадвигателей самолетов F119. Пример подобной конструкции авиадвигателя приведен на рис. 5.

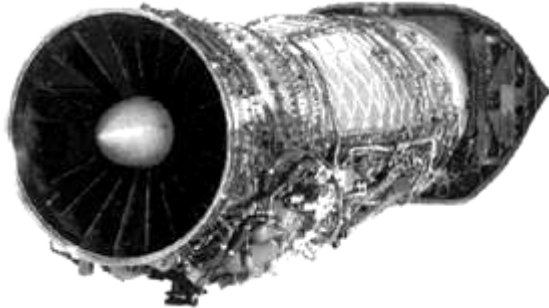


Рис. 5. Пример конструкции авиадвигателя, создаваемой с помощью ЭЛС

По своим функциональным характеристикам указанные выше установки по праву занимают ведущие позиции в мире, опережая аналогичную продукцию других зарубежных фирм-производителей оборудования для ЭЛС, таких как SCIAKY (США), TECHMETA (Франция), STEIGERWALD STRAHLTECHNIK (Германия). Благодаря применению методов модельно-ориентированного управления, в данных установках был сделан технологический прорыв, который позволил:

- значительно расширить сферу применения электронно-лучевой сварки в высокотехнологическом производстве за счет использования многокоординатного управления [8];
- более чем на порядок повысить производительность работы технолога при разработке программ сваривания за счет автоматического обучения;
- повысить качество шва за счет повышения точности попадания электронного луча в стык;
- реализовать серийное производство однотипных изделий по одной программе сварки в одном цикле работы установки электронно-лучевой сварки.

Литература

1. Патон Б.Е., Спыну Г.А., Тимошенко В.Г. Промышленные роботы для сварки. – К.: Наук. думка, 1977. – 228 с.
2. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. – К.: Наук. думка, 1987. – 256 с.
3. Schiller S., Heisig U., Panzer S. Electron Beam Technology. – J. Wiley and Sons: N.Y., 1988. – 136 p.
4. Литвинов В.В., Казимир В.В. Модельно-ориентированное управление как стратегия функционирования интеллектуальных производственных систем // Математичні машини і системи. – 2004. – № 4. – С. 143-156.
5. Казимир В.В. Методи візуального проектування програм управління для установок електронно-променевого зварювання // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2004. – № 21. – С. 120-129.
6. Морозов А.А., Литвинов В.В., Казимир В.В. Адаптивное управление с моделями в электронно-лучевой сварке // Математичні машини і системи. – 2003. – № 3, 4. – С. 170-180.
7. Наблюдение процесса электроннолучевой сварки и автоматическое слежение за стыком / О.К. Назаренко, В.И. Шаповал, Г.А. Лоскутов, В.Н. Рыбак, В.С. Ланбин, А.В. Хоменок // Автоматическая сварка. – 1993. – № 5. – С. 35-38.
8. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия / Б.Е. Патон, О.К. Назаренко, В.М. Нестеренков, А.А. Морозов, В.В. Литвинов, В.В. Казимир // Автоматическая сварка. – 2004. – № 5. – С. 3-7.

Поступила в редакцию 31.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Е. Литвиненко, Национальный авиационный университет, Киев.