

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДВИЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ УСТАНОВКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СОПЕЛ ЖРД

© 2023 г. В.В. Малый^{1,*}, А. С. Костюхин^{1,**}, А. В. Федоров^{1,***}, И. Ю. Кинжагулов^{1,****}

¹Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
E-mail: *banqvalera@mail.ru; **noxx9999@yandex.ru; ***afedor62@yandex.ru; ****kinzhiki@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023; после доработки 09.06.2023
Принята к публикации 09.06.2023

Рассматриваются вопросы разработки алгоритма движения измерительного модуля установки автоматизированного неразрушающего контроля качества паяных соединений сопла жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Описан объект контроля, возникающие в процессе изготовления дефекты паяных соединений, а также проблемы производства и испытаний сборочных единиц. Определены основные факторы, снижающие вероятность выявления дефектов, предложены пути решения. Обоснована необходимость использования алгоритмов построения маршрута в разработанном алгоритме движения. Определен алгоритм получения пути перемещения преобразователя для измерительного модуля установки автоматизированного неразрушающего контроля паяных соединений для выявления таких дефектов, как «неспай», «непропай» и «частичный непропай».

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, контроль паяных соединений, контроль сопла двигателя, автоматизированный неразрушающий контроль.

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR THE MOVEMENT OF THE MEASURING MODULE OF THE SYSTEM OF AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE NOZZLE OF A LPRE

© 2023 г. V.V. Malyy^{1,*}, A.S. Kostyukhin^{1,**}, A.V. Fedorov^{1,***}, I.Y. Kinzhagulov^{1,****}

¹ITMO University, Kronverksky Prospect, 4, Saint-Petersburg, 197101 Russia
E-mail: *banqvalera@mail.ru; **noxx9999@yandex.ru; ***afedor62@yandex.ru; ****kinzhiki@mail.ru

The paper considers the development of the algorithm for the movement of the measuring module of the system of automated non-destructive testing of solder joints of the nozzle of a liquid propellant rocket engine (LPRE). The object of control, the flaws in soldered joints that arise during the manufacturing process, as well as the problems of production and testing of assembly units, are described. The main factors that reduce the probability of detecting defects are determined, and solutions are proposed. The necessity of using route construction algorithms in the developed traffic algorithm is substantiated. An algorithm for obtaining the path of the transducer movement for the measuring module of the system of automated non-destructive testing of solder joints is defined to detect such defects as "dry joint", "cold lap" and "partial dry joint".

Keywords: non-destructive testing, ultrasonic testing, solder joint testing, engine nozzle testing, automated non-destructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308223090063, EDN: ECRARN

ВВЕДЕНИЕ

Сопло ЖРД представляет собой сложную геометрическую конструкцию с множеством внутренних полостей, что усложняет технологию пайки, связанную со сложностями нанесения припоя, и требует обеспечения стабильности зазора между элементами. Качество паяных соединений (ПС) является критически важным, так как из-за высоких эксплуатационных нагрузок и характера режимов работы сопла дефекты могут привести к выходу изделия из строя.

Объект контроля (ОК) представляет собой соединение двух деталей из разнородных металлов (бронза БрХ08 и никелевый сплав ЭК61) с фрезерованными канавками на одной из них, которые соединяются при помощи вакуумно-компрессионной пайки (рис. 1).

АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время оценку качества паяных соединений определяют путем огневых, гидравлических и пневматических испытаний, которые являются разрушающими. Использование вышечисленных методов оценки качества в большинстве случаев приводит к повреждению изделия.

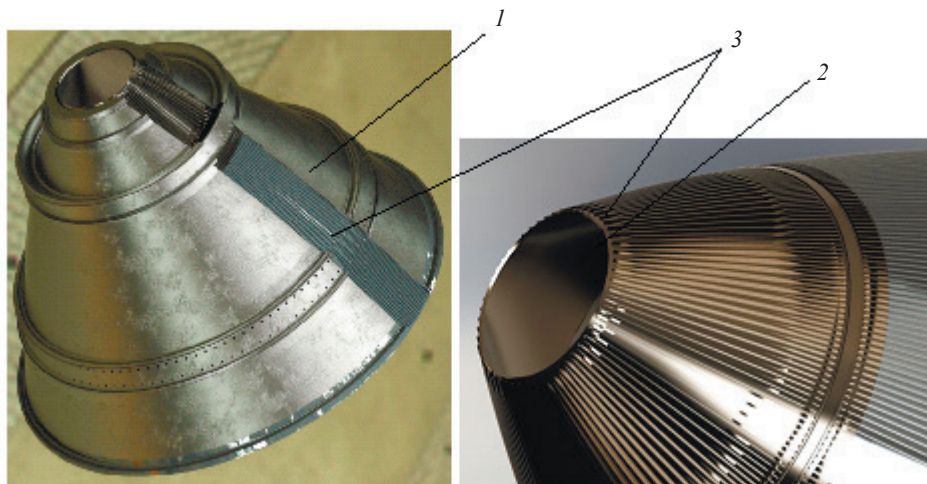


Рис.1. Внутренняя структура объекта контроля: 1 — наружная прочностная оболочка; 2 — внутренняя огневая оболочка; 3 — ребра.

Исходя из этого, использование неразрушающего контроля (НК) в данной области является актуальным.

Существующие методики НК, которые направлены на выявление дефектов типа «непропай» (полное незаполнение зазора припоем) и «частичный непропай» (частичное незаполнение зазора припоем), представляют собой ручную реализацию методов ультразвукового НК и представлены в работах [1, 2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ручной ультразвуковой контроль сопла двигателя трудоемок и приводит к ошибкам при сканировании и анализе результатов. Для повышения оперативности и точности контроля необходимо автоматизировать процесс сканирования поверхности ОК, что заключается в перемещении преобразователя по заданной траектории с постоянной скоростью.

Ультразвуковой контроль накладывает ряд ограничений на разрабатываемый алгоритм, такие как: точность позиционирования относительно ОК, плавность перемещения (отсутствие вибраций), скорость перемещения, минимальный шаг сканирования (равный ширине пятна контакта датчика) и т.д.

Источником исходных данных о геометрическом профиле ОК является ограниченный набор точек радиуса кривизны сопла ЖРД, удаленных от критического сечения. Для сканирования всей поверхности ОК этих данных недостаточно, поэтому необходимо вычислить значения координат точек в промежутках между известными точками путем аппроксимации.

Планирование маршрута

Планирование маршрута позволяет оптимизировать процесс сканирования, уменьшить время и повысить точность контроля. Решение задачи планирования маршрута является необходимым условием для автоматизации процесса НК. Она состоит из трех основных аспектов: определения пути от начальной до конечной точки, учета возможных препятствий на пути и выбора оптимального пути среди всех возможных вариантов [3, 4].

Использование планирования маршрута для аппроксимации геометрии объекта контроля, реализуется на базе известных точек профиля из конструкторской документации, через которые проходит маршрут. Затем используется метод интерполяции, такой как кубический сплайн, для аппроксимации пути через эти точки. Кубический сплайн позволяет создать кусочно-кубический полином, который будет проходить через все заданные точки и обладать свойствами гладкости и непрерывности производных.

Далее рассчитываются промежуточные значения обобщенных координат, скоростей и ускорений для каждого звена между заданными конфигурациями, используя полиномы вида:

$$q_i(t) = a_{l,i}t^l + a_{l-1,i}t^{l-1} + \dots + a_{2,i}t^2 + a_{1,i}t + a_{0,i}; \quad (1)$$

$$\dot{q}_i(t) = la_{l,i}t^{l-1} + (l-1)a_{l-1,i}t^{l-2} + \dots + 2a_{2,i}t + a_{1,i}; \quad (2)$$

$$\ddot{q}_i(t) = l(l-1)a_{l,i}t^{l-2} + (l-1)(l-2)a_{l-1,i}t^{l-3} + \dots + 2a_{2,i}, \quad (3)$$

где степень l и коэффициенты $a_{ij}, j = \{1, 2, \dots, l\}$ определяются в зависимости от граничных условий и наложенных требований на непрерывность траектории. При планировании траектории исходными данными выступают набор конфигураций и моменты времени их прохождения [5].

При разработке базовых принципов планирования маршрута были выполнены следующие шаги: определено количество сегментов траектории, нормировано время, определены граничные условия и требования на непрерывность траектории между смежными сегментами, а также определены степени полиномов для каждого звена и сегмента траектории. Затем составлено матричное уравнение и решено относительно неизвестных коэффициентов полиномов. Полученная траектория используется для перемещения преобразователя.

ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм движения на базе планирования маршрута позволяет учитывать геометрические особенности ОК и повысить эффективность контроля. Планирование движения в данном алгоритме позволяет обеспечить требования к ультразвуковому контролю. Таким образом, автоматизированный ультразвуковой контроль на базе разработанного алгоритма позволяет повысить точность контроля, снизить влияние человеческого фактора, а также уменьшить время, затрачиваемое на процесс контроля, что позволяет сократить издержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кинжагулов И.Ю. Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 7. С. 39—44.
2. Сергеев Д.С., Астрединова Н.В. Методика контроля качества паяных соединений камер ЖРД с применением метода лазерно-ультразвуковой диагностики // Сборник трудов II Всероссийский конгресс молодых ученых. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. С. 67.
3. Choset H., Lynch K., Seth H., Kantor G., Burgard W., Kavraki L.E., Thrun S. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation. MIT Press, 2005. 603 p.
4. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды ИСП РАН. 2016. Т. 28. № 4. С. 241—294.
5. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями: Учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 108 с.