

УДК 620.179.16

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДВИЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© В. В. Малый^{1,2}, М. С. Губин^{1,2}, А. С. Костюхин², А. В. Федоров^{1,2},
И. Ю. Кинжагулов^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

²Учреждение науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации
космической техники»,

197343, Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57, лит. А, пом. 141-Н
E-mail: banqvalera@mail.ru

Рассматриваются вопросы разработки алгоритма движения измерительного модуля автоматизированной установки неразрушающего контроля качества паяных соединений сопла двигателя. Описан объект контроля, имеющий сложную геометрическую форму и возникающие в процессе изготовления дефекты паяных соединений, такие как непропай, частичный непропай и неспай. Обоснована актуальность разработки, а также проблемы производства и испытаний сопел двигателя, не позволяющих на ранних этапах изготовления сборочных единиц выявлять требуемые дефекты без разрушения целостности сопла двигателя. Описаны существующие подходы в части выбора методов и средств неразрушающего контроля сопел двигателей сложной геометрической формы, выявлены их достоинства и недостатки. Проанализированы существующие проблемы в части автоматизации эхоимпульсного и теневого методов ультразвукового контроля, выявлены достоинства и недостатки предложенных методов. Выявлены основные факторы, снижающие вероятность выявления дефектов, а именно: нестабильность акустического контакта между преобразователем и объектом контроля, а также отклонение акустической оси преобразователя от нормали к поверхности объекта контроля. Определены требования к алгоритму движения измерительного модуля автоматизированной установки неразрушающего контроля с обратной связью, основанной на измеренной при сканировании амплитуде сигнала от конструктивных элементов внутренней структуры сопла двигателя.

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

DOI: 10.15372/AUT20240312

EDN: YPARMN

Введение. Современные реалии контроля качества сложных объектов ставят всё более высокие требования к методам и средствам их реализации. Повышение требований к достоверности результатов контроля обуславливает необходимость создания и внедрения автоматизированных комплексов неразрушающего контроля (НК), которые минимизируют влияние человеческого фактора (оператора). Одним из таких объектов является сопло двигателя, который представляет собой сложную геометрическую конструкцию со множеством внутренних полостей, что усложняет технологию пайки, связанную с особенностями нанесения припоя, и требует обеспечения стабильности зазора между сопрягаемыми элементами. Качество паяных соединений (ПС) является критически важным, так как из-за высоких эксплуатационных нагрузок и характера режимов работы сопла двигателя дефекты могут привести к выходу дорогостоящего изделия из строя, затраты на производство которого в ряде случаев достигают 40 % от стоимости всего изделия [1].

Целью работы является уменьшение трудоёмкости и повышение достоверности результатов НК качества паяных соединений сопла двигателя путём создания установки автоматизированного НК на основе алгоритма движения с обратной связью по измерительному ультразвуковому сигналу.

Актуальность. В настоящее время оценку качества ПС определяют путём огневых, гидравлических и пневматических испытаний, которые являются разрушающими. Использование вышеперечисленных методов оценки качества в большинстве случаев приводит к повреждению изделия, что требует дополнительных затрат на его изготовление. Исходя из этого, применение НК в данной области становится более популярным.

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 описаны в [2, 3].

В свою очередь, ручные реализации методов НК имеют довольно существенные недостатки, так как такой контроль трудоёмок и приводит к ошибкам при сканировании и анализе результатов. Также важно понимать, что, поскольку для ввода ультразвуковых волн в объект контроля (ОК) необходима иммерсионная среда, требуется соблюдать постоянный по величине зазор между пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) и поверхностью ОК.

Учитывая данную проблематику, для повышения оперативности и точности контроля необходимо автоматизировать процесс сканирования поверхности ОК, который заключается в перемещении преобразователя по заданной траектории с постоянной скоростью.

Тем самым автоматизация процесса НК качества ПС позволит:

- минимизировать влияние человеческого фактора при проведении НК, так как квалификация оператора не будет влиять на процесс измерений;
- стабилизировать акустический контакт путём использования иммерсионных ванн или струйных подач иммерсионной жидкости, а также обеспечения постоянного зазора между ПЭП и ОК;
- повысить оперативность контроля за счёт повышения скорости сканирования и протоколирования результатов контроля по удобной для интерпретации форме (В-скан, С-скан).

Таким образом, остро стоит вопрос о создании технологии автоматизированного НК качества ПС сопла двигателя.

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

Толщина внутренней поверхности изменяется в диапазоне от 1 до 3 мм в области канавки и от 3 до 7 мм в области ребра. Ширина ребра изменяется от 1,5 до 4 мм, канавки — от 1 до 2 мм. Рёбра одной пластины соединяются с другой посредством припоя.

Основными дефектами ПС являются непропай и неспай (рис. 2), а их наличие в большинстве случаев приводит к нарушениям теплообменных режимов в аппарате и, как следствие, к выходу изделия из строя.

Термины дефектов (непропай и неспай), рассматриваемых в статье, согласно ГОСТ 17325-79 [4] имеют следующие определения:

- непропай — дефект паяного соединения, проявляющийся в частичном или полном незаполнении паяльного зазора припоем (рис. 2, а);
- неспай — дефект паяного соединения, проявляющийся в отсутствии сцепления паяемого материала с материалом паяного слоя (рис. 2, б).

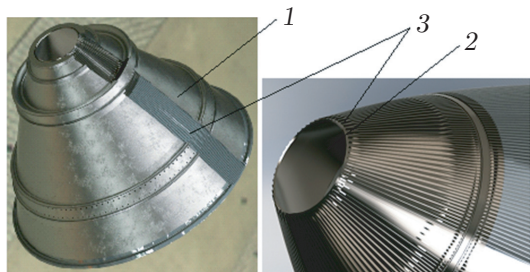


Рис. 1

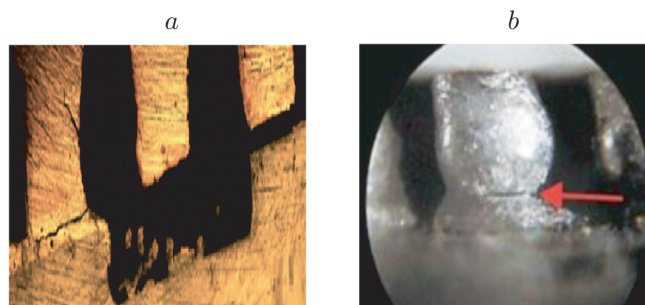


Рис. 2

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

Рис. 2. Дефекты паяных соединений типа несплошность: непропай (а); неспай (b)

Неразрушающий контроль. Проанализировав работы [2, 3, 5], было отмечено, что ультразвуковой эхо-импульсный метод является наиболее перспективным методом контроля качества ПС. Также, проведя анализ текущих достижений в области неразрушающего контроля паяных соединений, был сделан вывод, что на данный момент существуют методы и средства контроля, позволяющие обнаруживать дефекты типа непропай и частичный непропай.

При контроле со стороны внутренней поверхности в эхо-режиме в любом случае (для дефектного и бездефектного изделия) будет присутствовать сигнал, отражённый от границы ребра с нанесённым припоем, так как корпус сопла и припой имеют разные акустические сопротивления. Сигнал будет присутствовать и в случае отсутствия припоя. О наличии припоя можно было бы судить по амплитуде сигнала, поскольку меняется коэффициент отражения, но в гораздо большей степени на точности измерений будет сказываться нестабильность акустического контакта.

При контроле эхо-методом с внешней стороны места неспая выявляются достаточно уверенно. Но при этом возникает другая проблема — необходимость осуществления сканирования с точной локализацией преобразователя. Причём сканирование должно выполняться по рёбрам. Следует учитывать, что шаг расположения рёбер изменяется для разных областей сопла двигателя. Соответственно, необходимо менять геометрию сканирования и уровни срабатывания, при этом нужно учитывать и необходимость поддержания акустического контакта. В результате сложность такой системы превышает порог, после которого она становится неработоспособной.

Исходя из вышеизложенного, было принято решение о дополнении технологии контроля теньевым методом и реализации контроля в иммерсионной ванне.

Автоматизация. Результаты автоматизированного ультразвукового контроля могут быть представлены различными способами.

Первый способ заключается в проведении контроля путём сканирования по образующей сопла по кольцу. В таком случае при контроле имеется возможность записывать амплитуды принимаемых сигналов. При наличии дефекта сигнал становится ниже порогового уровня, который устанавливается в процессе настройки дефектоскопического оборудования. Для проведения контроля в каждом следующем сечении ОК требуется перемещение преобразователей вдоль оси ОК с шагом 4 мм.

Второй способ заключается в проведении контроля с идентификацией дефекта по пороговому уровню амплитуды сигнала. Для применения такого способа требуется реализация

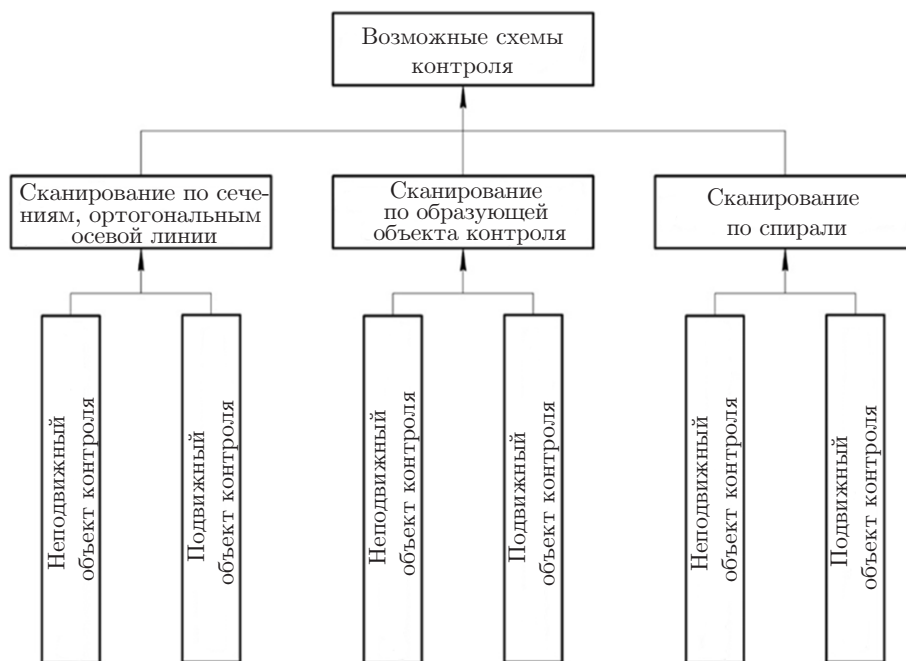


Рис. 3. Классификация возможных схем сканирования

аналогичного алгоритма перемещения, что и в первом случае, однако, фиксируется только сигнал, имеющий амплитуду меньше порогового уровня.

Схема сканирования. Немаловажным вопросом является выбор схемы сканирования. Сложность выбора схемы сканирования заключается в том, что в некоторых схемах сканирования сложная траектория движения датчика может привести к накоплению погрешности результатов измерений, тем самым это приводит к снижению достоверности результатов контроля.

Согласно рис. 3 возможные схемы проведения автоматизированных измерений условно можно разбить на три группы: сканирование по сечениям, ортогональным осевой линии; сканирование по образующей; сканирование по спирали. Каждая из предложенных схем имеет как преимущества, так и недостатки. Критерием выбора той или иной схемы служит простота исполнения.

После проведения анализа было выявлено, что наиболее оптимальной схемой сканирования в нашем случае является сканирование по сечениям ортогонально осевой линии с неподвижным объектом контроля (рис. 4, а). Данная схема обеспечивает необходимую точность измерений и является простой в исполнении. Она заключается в фиксации и центрировании объекта контроля, позиционировании датчика относительно поверхности объекта контроля и последующем перемещении датчика на один оборот относительно центральной оси на шаг, равный ширине пятна контакта датчика, и последующем перемещении на один оборот датчика вокруг оси. Эта схема позволяет получать чередующуюся акустическую картину «ребро — канавка» и не зависит от изменения числа рёбер в контролируемом сечении. Применение других схем контроля нецелесообразно ввиду неоднозначности результатов измерения из-за изменения числа рёбер в контролируемом сечении и сложности траектории движения датчика, что приводит к накоплению погрешности результатов измерений и неадекватности результатов [1].

Одним из наиболее важных факторов, обеспечивающих приём сгенерированного сигнала приёмником, является условие перпендикулярности оси ПЭП, образующей ОК. Наиболее остро эта проблема стоит при контроле теньевым методом в иммерсионном режи-

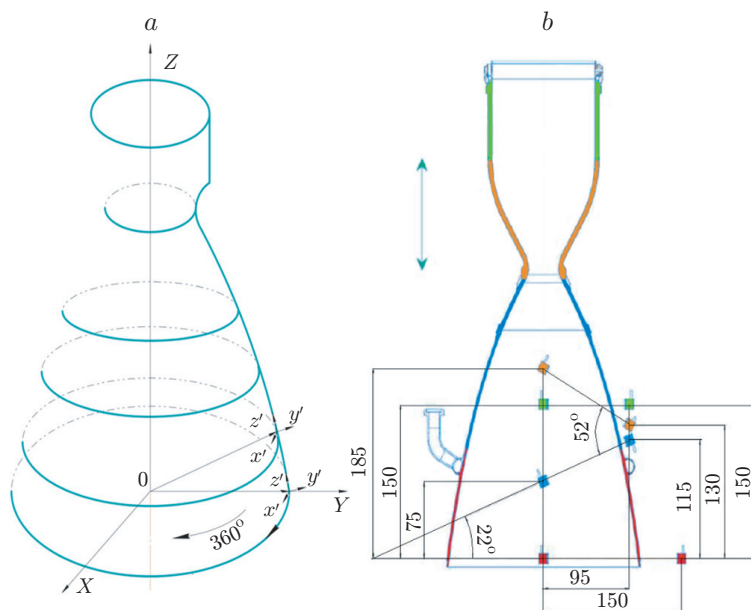


Рис. 4. Схема проведения контроля: *a* — выбранная схема сканирования; *b* — схема расположения датчиков относительно поверхности объекта контроля

ме, так как приёмник и генератор находятся на некотором расстоянии друг от друга, вследствие которого отклонение угла распространения ультразвуковой волны приводит к потере полезного сигнала на приёмнике. Задача обеспечения необходимого угла наклона ПЭП также обосновывается сложной формой ОК: образующая представляет собой кривую с закруглениями в нескольких местах.

На основе данной схемы сканирования, учитывая требования к проведению ультразвукового НК, была разработана технология контроля качества паяных соединений сопла двигателя, а также представлена схема движения группы датчиков при проведении автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля качества паяных соединений теньевым методом (рис. 4, *b*).

Также одним из факторов обеспечения условий проведения ультразвукового контроля в иммерсионном режиме является отсутствие инородных включений на контролируемой поверхности, в том числе пузырьков воздуха. Это обуславливается законами распространения ультразвуковых колебаний на границе сред: в случае, если импеданс сред разный, на границе сред часть сигнала отражается, вызывая тем самым затруднение анализа полезного сигнала. В связи с этим в рамках разработки автоматизированной установки требуется предусмотреть возможность удаления пузырьков воздуха с поверхности изделия.

Планирование движения. Автоматизация технологически сложных процессов в машиностроении, энергетике, транспортной отрасли, медицине, строительстве, а также создание новых продуктов и сервисов невозможны без решения задач планирования движения.

Обычно под планированием движения понимается поиск бесконфликтного пути для перемещения твёрдого тела или кинематической конструкции в пространственно-трёхмерной сцене. Искомый путь представляет собой непрерывную кривую в конфигурационном пространстве объекта, которая соединяет его начальное и конечное положения, исключает столкновения с препятствиями сцены и удовлетворяет всем установленным кинематическим и динамическим ограничениям [6–8].

Планирование движения — важнейшая задача в области навигации мобильных робо-

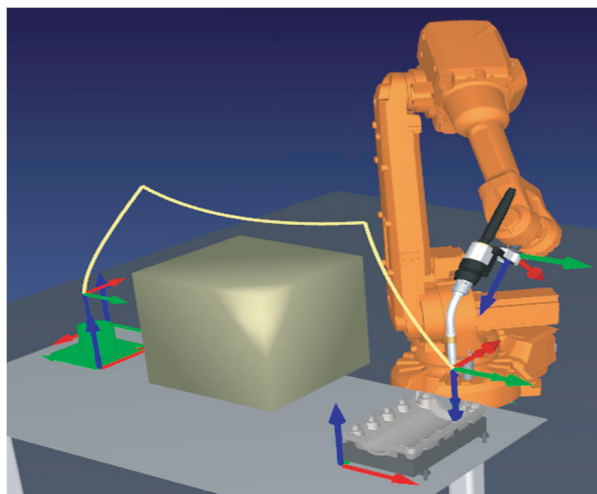


Рис. 5. Планирование движения робота-манипулятора

тов, которая включает в себя в основном три аспекта. Во-первых, спланированный путь должен пролегать от заданной начальной точки к заданной конечной точке. Во-вторых, этот путь должен обеспечивать движение робота с обходом возможных препятствий. В-третьих, путь должен быть среди всех возможных вариантов, удовлетворяющих первым двум требованиям, в определённом смысле оптимальным. Пример планирования движения представлен на рис. 5.

Задача планирования движения состоит из двух подзадач: планирование маршрута и траектории, которые имеют следующие определения:

- планированием маршрута (пути) движения робота называется процесс поиска такой последовательности конфигураций, соединяющей начальное положение и заданное конечное, что при перемещении робота по ней не возникает столкновений с препятствиями.
- планированием траектории движения робота называется процесс параметризации по времени перемещения робота по спланированному маршруту, т. е. расчёт функций от времени для обобщённых координат, скоростей и ускорений [8].

Решение задачи планирования маршрута состоит из трёх основных аспектов: определения пути от начальной до конечной точки, учёта возможных препятствий на пути и выбора оптимального пути среди всех возможных вариантов [6, 7].

Решение задачи планирования движения является необходимым условием для автоматизации процесса НК ПС по следующим причинам:

- ультразвуковые методы НК накладывают на разрабатываемый алгоритм ряд ограничений, таких 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 двигателя, удалённых от критического сечения, чего недостаточно для сканирования всей поверхности ОК. Поскольку для алгоритма управления необходима функция, описывающая геометрический профиль ОК, требуется вычислить значения координат точек в промежутках между известными точками путём аппроксимации.

Для решения поставленной задачи необходимо реализовать метод планирования движения, который позволит удовлетворить требованиям, наложенным ультразвуковым методом НК, а именно: минимизировать вибрацию манипулятора и, самое главное, обеспечить перемещение по кривой профиля ОК с минимальной погрешностью.

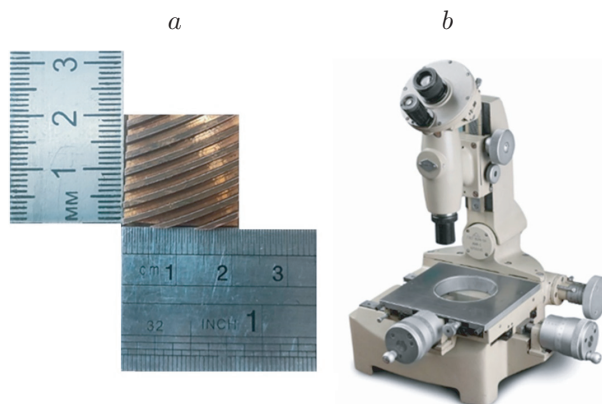


Рис. 6. Оборудование для проведения эксперимента: *a* — образец-имитатор внутренней стенки сопла двигателя; *b* — малый инструментальный микроскоп ММИ-2 75 × 25

Для дальнейшего анализа и подбора наиболее подходящего метода планирования движения были экспериментально определены допустимые отклонения по позиционированию измерительного преобразователя относительно объекта контроля с учётом требований ультразвукового метода неразрушающего контроля и особенностей внутренней структуры объекта контроля. Для этого использовались образец-имитатор внутренней стенки сопла двигателя (рис. 6, *a*) и оснастка на базе малого инструментального микроскопа ММИ-2 75 × 25 (рис. 6, *b*), позволяющая перемещать объект контроля по горизонтали и вертикали с шагом 0,005 мм, а также наклонять измерительный преобразователь с шагом 0,25°. В результате эксперимента стало известно, что предельно допустимым отклонением по линейным осям является $\pm 0,5$ мм, а предельно допустимый наклон ПЭП составляет $\pm 0,25^\circ$.

По итогам анализа существующих методов планирования маршрута [6–8] был разработан следующий алгоритм: планирование маршрута, применяемое 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.

При разработке принципов планирования траектории выполняются следующие шаги:

- 1) устанавливается количество сегментов траектории;
- 2) нормируется время;
- 3) определяются граничные условия и требования на непрерывность траектории между смежными сегментами;
- 4) определяются степени полиномов для каждого звена и сегмента траектории;
- 5) составляется матричное уравнение;
- 6) решается матричное уравнение относительно неизвестных коэффициентов полиномов.

Далее рассчитываются промежуточные значения обобщённых координат, скоростей и ускорений для каждого звена между заданными конфигурациями с использованием полиномов вида:

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

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



Рис. 7. Функциональная схема системы автоматизированного контроля

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

где степень l и коэффициенты a_{ji} , $j = \{1, 2, \dots, l\}$ определяются в зависимости от граничных условий и наложенных требований на непрерывность траектории [8].

Полученная траектория используется для перемещения преобразователя.

Обратная связь. Анализ автоматизированных систем НК показал, что все они имеют схожее устройство и алгоритм работы. Функциональная схема системы автоматизированного контроля представлена на рис. 7.

Процесс контроля осуществляется по следующей схеме: перед проведением контроля оператор вводит начальные данные в блок сбора и обработки информации, после чего формируется управляющая программа (УП) и подаётся на средства автоматизации (двигатели, устройства обеспечения контакта и т. д.). Средства автоматизации передают механическое воздействие на датчик, который входит в состав средства измерения, результаты измерений передаются на блок сбора и обработки информации, где происходит корректировка управляющей программы для получения достоверной информации.

Для контроля теневым методом необходимо обеспечить перпендикулярность преобразователей друг к другу с помощью жёсткой механической связи по осям, при этом предусмотреть возможность корректировки электроприводом каждого из преобразователей, так как геометрия реальных объектов контроля часто отличается от модели. Аналогично при использовании эхо-метода также необходима возможность корректировки угла ПЭП для достижения перпендикулярности с образующей ОК.

Учитывая данную проблематику, в разработанный алгоритм движения измерительного модуля была внедрена обратная связь, основанная на измеренной при сканировании амплитуде сигнала от конструктивных элементов внутренней структуры ОК. При нестандартном поведении акустического сигнала происходит корректировка управляющей про-

граммы для повторного сканирования потенциально дефектной зоны и/или калибровки преобразователей.

Заключение. Разработанный алгоритм движения на базе планирования движения позволяет учитывать геометрические особенности ОК и повысить эффективность контроля за счёт внедрения обратной связи, основанной на измеренной амплитуде ультразвукового сигнала. Корректно подобранный метод планирования движения обеспечивает выполнение необходимых условий при перемещении преобразователя, накладываемых ультразвуковым НК, таких как отсутствие вибраций, перемещение с подходящей скоростью, непрерывность траектории, плавность ускорений, минимальный шаг сканирования и другие факторы, которые влияют на качество контроля. Таким образом, автоматизированный ультразвуковой контроль на базе разработанного алгоритма позволяет повысить точность контроля, снизить влияние человеческого фактора, повысить удобство протоколирования результатов, а также уменьшить время, затрачиваемое на процесс контроля, что позволяет сократить издержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Малый В. В., Костюхин А. С., Кинжагулов И. Ю.** Разработка технологии неразрушающего контроля качества паяных соединений теплообменных аппаратов и определение принципов её автоматизации // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2022. № 3, вып. 61. С. 11–17.
2. **Кинжагулов И. Ю.** Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. 54, № 7. С. 39–44.
3. **Астрединова Н. В., Сергеев Д. С.** Методика контроля качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей с применением метода лазерно-ультразвуковой диагностики // Сб. тр. II Всеросс. конгресса молодых учёных. СПб-б: Ун-т ИТМО, 2013. С. 14–18.
4. **ГОСТ 17325-79.** Пайка и лужение. Основные термины и определения. Введ. 01.01.81 / Сварка, пайка и термическая резка металлов. Ч. 1. М.: Изд-во стандартов, 1990. С. 57–68.
5. **Сергеев Д. С., Федоров А. В., Баринов А. В., Астрединова Н. В.** Автоматизированный лазерно-ультразвуковой метод контроля качества паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2016. 16, № 1. С. 139–149.
6. **Choset H., Lynch K. M., Hutchinson S. et al.** Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2005. 626 p.
7. **Казаков К. А., Семенов В. А.** Обзор современных методов планирования движения // Тр. ИСП РАН. 2016. 28, вып. 4. С. 241–293.
8. **Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А.** Методы управления робототехническими приложениями. СПб-б.: Ун-т ИТМО, 2016. 108 с.

Поступила в редакцию 13.11.2023

После доработки 06.12.2023

Принята к публикации 17.04.2024