

УДК 681.5

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СОПЕЛ КАМЕР ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.С. Сергеев^a, А.В. Федоров^b, А.В. Баринов^a, Н.В. Астрединова^b

^a ООО «НТЦ «Эталон», Санкт-Петербург, 195273, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: dmt.sergeev@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.06.15, принята к печати 25.11.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-139-149

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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 // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 139–149.

Аннотация

Рассмотрена проблема контроля качества паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей. Сопло камеры жидкостного ракетного двигателя представляет собой ответственное изделие, работающее в условиях высокого давления и градиента температур, обладающее сложной геометрической формой, и состоит из большого количества фрезерованных каналов. Проведен анализ существующих методов решения проблемы контроля качества паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей. Обоснована необходимость разработки автоматизированного лазерно-ультразвукового метода контроля паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей. Проведен анализ существующих автоматизированных средств ультразвукового контроля и факторов, влияющих на точность контроля. Разработан макет автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки неразрушающего контроля качества паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей. Для программного управления механизмами перемещения датчика при сканировании внутренней поверхности сопла камеры жидкостного ракетного двигателя и его позиционирования предложено применение трехслойной нейронной сети. Разработан адаптивный алгоритм проведения автоматизированного контроля качества паяных соединений. Предложен способ интегральной оценки качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей. В процессе исследований была разработана методика автоматизированных измерений геометрических характеристик дефектов и контроля качества паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей. Апробация разработанной методики проводилась на трехкоординатном автоматизированном стенде.

Ключевые слова

неразрушающий контроль, ЖРД, паяные соединения, автоматизация, аппроксимация, нейронная сеть, интегральная оценка качества

QUALITY CONTROL AUTOMATED LASER-ULTRASONIC METHOD FOR SOLDER JOINTS OF NOZZLES OF CHAMBERS IN LIQUID ROCKET ENGINES

D.S. Sergeev^a, A.V. Fedorov^b, A.V. Barinov^a, N.V. Astredinova^b

^a LLC «NTC «Etalon», Saint Petersburg, 195273, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: dmt.sergeev@gmail.com

Article info

Received 18.06.15, accepted 25.11.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-139-149

Article in English

For citation: Sergeev D.S., Fedorov A.V., Barinov A.V., Astredinova N.V. Quality control automated laser-ultrasonic method for solder joints of nozzles of chambers in liquid rocket engines. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 139–149.

Abstract

The paper deals with the problem of quality control for solder joints of nozzles of chambers in liquid rocket engines (LRE). The nozzle of LRE chamber is a responsible product, operating in conditions of high pressure and temperature gradient, having a complex geometric shape and consisting of a large number of milled channels. The analysis of existing methods for solving the problem of quality control of solder joints in LRE nozzles of chambers is carried out. The necessity of the development of an automated laser-ultrasonic control method of solder joints in LRE nozzles of chambers is proved. The

analysis of existing automated ultrasonic means of control and the factors affecting control accuracy is carried out. The prototype hardware has been designed for the automated laser ultrasonic nondestructive quality testing of solder joints of LRE nozzles. For software control of the sensor movement mechanism for scanning the inner surface of LRE chamber nozzles and its positioning, the usage of three-layer neural network is proposed. An adaptive algorithm of automated quality control of solder joints has been worked out. A method for the integrated assessment of the quality of solder joints of LRE chambers is suggested. In the process of research methodology was developed for automated measurement of geometrical characteristics of defects and quality control of solder joints in LRE nozzles of chambers. The approbation of the developed method was carried out on three-coordinate automated stand.

Keywords

non-destructive testing, LRE, solder joints, automation, approximation, neural network, quality integrated assessment

Введение

Повышение качества и конкурентоспособности изделий ракетно-космической техники (РКТ) является актуальной задачей ракетно-космической отрасли. Наиболее ответственными элементами РКТ являются жидкостные ракетные двигатели (ЖРД). Ответственную роль в этих изделиях играют паяные соединения стенок сопла камеры, которые при работе двигателя испытывают высокие нагрузки (силовые, тепловые и др.). Сопло камеры ЖРД представляет собой геометрически сложную конструкцию с множеством различных внутренних полостей, что, в свою очередь, обуславливает сложность технологии пайки, связанную с нанесением припоя и обеспечением стабильности величины гарантированного зазора между сопрягаемыми элементами (рис. 1).

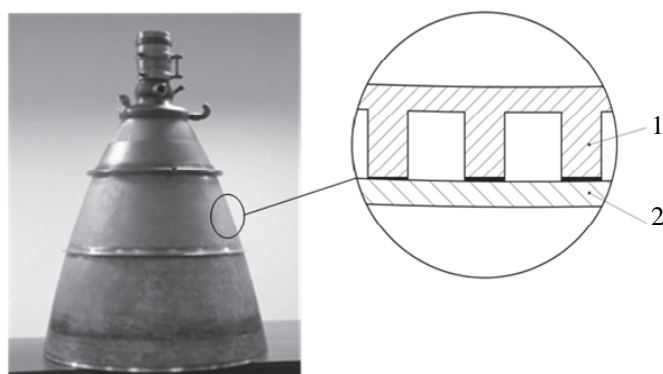


Рис. 1. Общий вид камеры жидкостного ракетного двигателя: стенка внутренняя (1), стенка наружная (2)

В процессе изготовления сопла камеры в паяных соединениях возможно образование дефектов типа несплошность (неспай, непропай), а их наличие в большинстве случаев приводит к отказу двигателя. На рис. 2 представлены дефекты паяных соединений типа «несплошность».

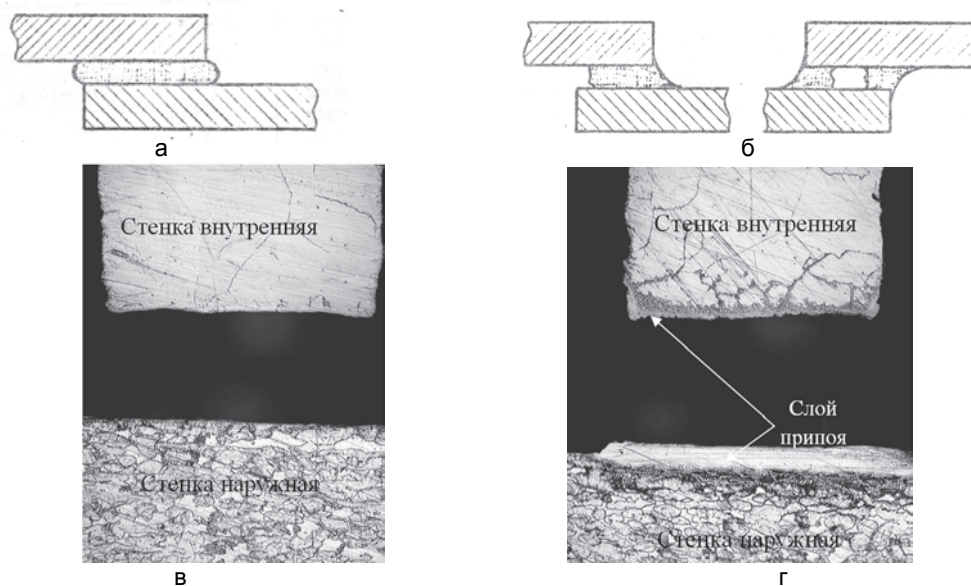


Рис. 2. Дефекты паяных соединений типа несплошность: дефект типа «неспай» (а); дефект типа «непропай» (б); металлография образца с дефектом типа «неспай» (в); металлография образца с дефектом типа «непропай» (г)

В настоящее время контроль качества сопел камер ЖРД осуществляется на основе результатов гидравлических и огневых испытаний двигателя. В случае наличия дефектов пайки в процессе испытаний дорогостоящая камера ЖРД переходит в неработоспособное состояние и становится непригодной для дальнейшего использования по назначению. Одним из путей решения задачи обеспечения качества паяных соединений сопел камер ЖРД является внедрение новых технологий неразрушающего контроля (НК), а также совершенствование уже используемых методов, средств и методик дефектоскопии и дефетометрии.

Решению проблемы НК качества паяных соединений изделий и, в частности, камер ЖРД, посвящен ряд работ как отечественных [1, 2], так и зарубежных ученых [3, 4]. Анализ научно-технической литературы [5–7] показал, что перспективным методом НК качества паяных соединений сопел камер ЖРД является лазерно-ультразвуковой метод, который позволяет не только определить наличие дефектов, но и измерить их геометрические характеристики [8]. Однако применение данного метода для контроля качества паяных соединений сопла камеры ЖРД в ручном режиме связано со значительной трудоемкостью и, как следствие, высокой вероятностью ошибок оператора (дефектоскописта), что сказывается на точности измерений и достоверности результатов контроля и является сдерживающим фактором для внедрения данного метода. Одним из путей решения данной проблемы является автоматизация процессов измерения и контроля. Таким образом, разработка автоматизированного лазерно-ультразвукового метода измерений геометрических характеристик дефектов и контроля качества паяных соединений сопел камер ЖРД является актуальной научной задачей, имеющей прикладной характер.

Постановка решаемой задачи

Целью исследования является повышение точности измерений геометрических характеристик дефектов и достоверности НК качества паяных соединений сопел камер ЖРД на основе автоматизации процесса лазерно-ультразвукового контроля.

Для достижения данной цели необходимо решение следующих логически взаимосвязанных частных задач:

- обоснование необходимости автоматизации процесса лазерно-ультразвукового контроля;
- разработка основных конструктивных решений автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки;
- разработка моделей и алгоритма автоматизированного измерения геометрических характеристик дефектов;
- разработка и практическая апробация методики автоматизированных измерений геометрических характеристик дефектов и контроля качества паяных соединений сопел камер ЖРД.

Обоснование необходимости автоматизации процесса лазерно-ультразвукового контроля качества паяных соединений сопел камер ЖРД

На достоверность НК качества паяных соединений сопел камер ЖРД существенным образом влияет точность измерения геометрических характеристик дефектов данных соединений. В основе поиска дефекта и определения его геометрических размеров, а именно, площади дефекта, лежит анализ отраженных ультразвуковых сигналов.

Учитывая особенности конструкции объекта контроля (рис. 1), а также особенности применения лазерно-ультразвукового метода контроля [9], были рассмотрены виды типовых ультразвуковых сигналов, регистрируемых оптоакустическим преобразователем, как в случае бездефектного паяного соединения, так и при наличии дефектов типа «полный непрой» и «частичный непрой» (рис. 3).

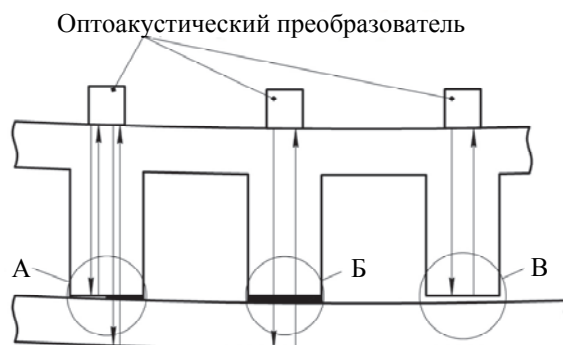


Рис. 3. Схема лазерно-ультразвукового контроля: частичный непрой (А); бездефектное паяное соединение (Б); полный непрой (В)

В случае отсутствия дефекта паяного соединения (Б на рис. 3) ультразвуковой импульс отражается от поверхности раздела сред (наружная стенка сопла камеры – воздух), при этом время между зондирующим ультразвуковым сигналом и первым отраженным ультразвуковым сигналом соответствует прохождению импульсом пути, равному удвоенной толщине внутренней (по ребру) и внешней стенок сопла камеры (рис. 4, а).

В случае наличия дефекта паяного соединения типа «полный непропай» (В на рис. 3) ультразвуковой импульс отражается от поверхности раздела сред (ребро внутренней стенки сопла камеры – воздух), при этом время между зондирующим ультразвуковым сигналом и первым отраженным ультразвуковым сигналом соответствует прохождению импульсом пути, равному удвоенной толщине внутренней стенки сопла камеры по ребру, а амплитуда первого отраженного ультразвукового сигнала – площади непропая (рис. 4, б).

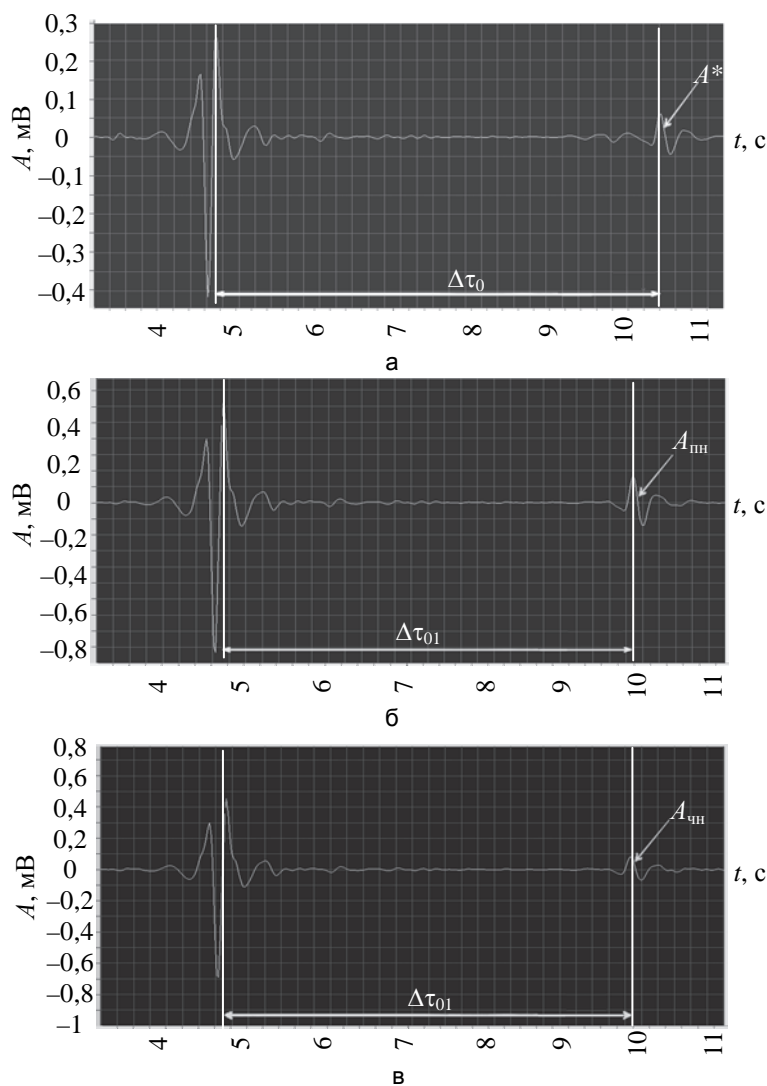


Рис. 4. Вид А-сканов при ультразвуковом контроле: бездефектное паяное соединение (а); полный непропай (б); частичный непропай (в). A – амплитуда сигнала, мВ; A^* – амплитуда донного сигнала, мВ; $A_{\text{чн}}$ – амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела сред при частичном непропае, мВ; $A_{\text{пн}}$ – амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела сред при полном непропае, мВ; t – время прохождения сигнала, с; $\Delta\tau_0$ – время между зондирующим ультразвуковым сигналом и первым отраженным ультразвуковым сигналом, с; $\Delta\tau_{01}$ – время между зондирующим ультразвуковым сигналом и первым отраженным от дефекта ультразвуковым сигналом, с

В случае наличия дефекта паяного соединения типа «частичный непропай» (А на рис. 3) ультразвуковой импульс частично отражается от поверхности раздела сред (ребро внутренней стенки сопла камеры – воздух), при этом время между зондирующим ультразвуковым сигналом и первым отраженным ультразвуковым сигналом соответствует прохождению импульсом пути, равному удвоенной толщине

внутренней стенки сопла камеры по ребру, а амплитуда первого отраженного ультразвукового сигнала – площади частичного непропая (рис. 4, в). Таким образом, информативными параметрами, характеризующими наличие и площадь дефекта паяного соединения, можно считать время между зондирующим ультразвуковым сигналом и первым отраженным ультразвуковым сигналом и амплитуду первого отраженного ультразвукового сигнала.

В работе [1] показана корреляционная связь между эффективной площадью непропая $\bar{S}^{\text{эф}}$ = $S_{\text{чн}} / S_{\text{пн}}$ ($S_{\text{чн}}$ и $S_{\text{пн}}$ – площадь частичного и полного непропая соответственно) и относительной амплитудой первого отраженного ультразвукового сигнала $A = A_{\text{чн}} / A_{\text{пн}}$ ($A_{\text{чн}}$ – амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела сред при частичном непропае, $A_{\text{пн}}$ – амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела сред при полном непропае). При этом данная взаимосвязь достаточно точно описывается эмпирической регрессионной зависимостью $\bar{S}^{\text{эф}} = 1,015A^2 - 0,058A$ [1]. Следует также отметить, что площадь дефекта типа «полный непропай» соответствует площади генерируемого ультразвукового пучка.

При лазерно-ультразвуковом контроле качества паяных соединений сопла камеры необходимо произвести сканирование поверхности ее внутренней стенки в области паяных соединений, т.е. по ребрам. При этом на точность измерения суммарной площади дефектов соединений особое влияние будет оказывать точность позиционирования датчика относительно поверхности сканирования и места его размещения относительно ребра внутренней стенки сопла камеры. Необходимо также учитывать влияние шумов на уровень и характер сигналов в режиме приема. При применении лазерно-ультразвукового метода контроля в ручном режиме существенный вклад в суммарную погрешность измерения вносят случайные ошибки, вносимые оператором (дефектоскопистом), что не обеспечивает необходимой достоверности результатов НК из-за сложной конфигурации объекта контроля, в том числе сканируемой поверхности, и малых размеров дефектов. Одним из путей повышения точности измерений и достоверности НК является автоматизация процесса контроля.

Анализ современных автоматизированных ультразвуковых средств НК показал, что, несмотря на большое разнообразие автоматизированных систем контроля качества, все они направлены на контроль изделий цилиндрической формы [9–12]. Контроль изделий плоскопараллельной формы (листовой прокат) осуществляется, как правило, в механизированном режиме с применением разного рода оснасток и приспособлений [13]. Автоматизированный ультразвуковой контроль качества изделий РКТ сложной геометрической формы, в том числе сопел камер ЖРД, в настоящее время не осуществляется.

Основные конструктивные решения автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки

Автоматизация процесса лазерно-ультразвукового контроля качества паяных соединений сопел камер ЖРД предполагает разработку автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки НК, которая включает:

- средство измерения (СИ) – лазерно-ультразвуковой дефектоскоп с датчиком;
- средства автоматизации измерений – механизмы, обеспечивающие перемещение датчика вдоль внутренней поверхности сопла камеры ЖРД и его позиционирование;
- систему управления позиционированием датчика, обеспечивающую точность его перемещения.

Такой установкой, например, может быть роботизированная система, в которой в качестве движущего устройства используется робот, как правило, представляющий собой «механическую руку» с пятью или семью степенями свободы [14, 15]. Одним из основных достоинств использования такой системы является возможность обеспечить любое взаимное расположение датчика и объекта контроля, а также обеспечить повторяемость и точность позиционирования. Однако специфика роботов – сложность и трудоемкость программирования – ограничивает их применение в технологических задачах, предполагающих большое число одинаковых операций. Недостатком роботов является и их высокая стоимость, тем более в случае использования гибридной системы управления движением датчика, например, робот со сканером. Следует также отметить, что существующие на сегодняшний день подобные системы в основном являются системами импортного производства.

Проведен анализ основных функциональных узлов, необходимых для проведения автоматизированных измерений.

Разработан макет автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки НК. Он представляет собой основание 1, на котором установлено устройство центрирования объекта контроля 2. На устройство центрирования объекта контроля устанавливается объект контроля (камера ЖРД). На устройство позиционирования 3 установлено устройство обеспечения акустического контакта 4 с датчиком. Особенности макета является простота конструкции, высокая точность перемещения, достигаемая за счет применения прецизионных шарико-винтовых передач. Разработанный макет состоит из элементов отечественного производства и отвечает современным требованиям импортозамещения.

Общий вид макета автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки НК качества паяных соединений сопел камер ЖРД представлен на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид макета автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки неразрушающего контроля: 1 – каркасное основание; 2 – устройство центрирование объекта контроля; 3 – устройство позиционирования; 4 – устройство обеспечения акустического контакта

В процессе исследований была произведена оценка величины основной погрешности разработанного макета автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки НК. Так как в состав автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки НК входят механические, электрические и оптические элементы, то на этапе разработки макета установки НК при оценке основной погрешности учитывались лишь погрешности СИ, устройств позиционирования и вращения датчика, а также системы управления позиционированием датчика. Основная относительная погрешность макета автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки НК составила 4,23%.

Модель и алгоритм автоматизированного измерения геометрических характеристик дефектов

Для программного управления механизмами перемещения датчика при сканировании внутренней поверхности сопла камеры ЖРД и его позиционирования необходимо задать траекторию движения датчика. Логичным способом для задания данной траектории является применение различных многокоординатных сканеров, позволяющих получать 3D-модель объекта контроля. Тогда, загружая модели из базы, можно легко перенастраиваться на различную геометрию камеры ЖРД. Однако современные сканеры позволяют получить на выходе лишь базовую полигональную модель, а общий процесс обработки и получения 3D-модели объекта контроля довольно сложен, что и определяет более высокую стоимость 3D-модели объекта сканирования по сравнению с другими способами. Так как сопло камеры ЖРД в общем случае представляет собой фигуру вращения, учитывая предлагаемую конструкцию автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки НК, для задания траектории движения датчика целесообразно использовать аппроксимирующую функцию кривой, описывающей газодинамический профиль сопла камеры ЖРД. При этом в качестве исходных данных для получения аналитической зависимости аппроксимирующей функции следует рассматривать ограниченный дискретный набор численных значений радиуса сопла камеры ЖРД в конкретном его сечении, которые берутся из конструкторской документации на камеру двигателя.

Существует множество способов аппроксимации [16]. В процессе исследований были проанализированы аналитические выражения (линейный полином, кубический полином, полином девятой степени, дробно-рациональная модель), которые могут быть использованы для описания газодинамического профиля сопла камеры ЖРД. Основными требованиями для выбора метода аппроксимации были точность и простота описания функции, а также возможность решения задачи адаптивной автоматизации процесса НК. Для аппроксимации данных конструкторской документации по геометрии сопла камеры ЖРД было предложено использовать искусственную нейронную сеть. Была разработана модель нейронной сети (трехслойный персептрон) и проведена апробация ее работоспособности на дискретном наборе значений геометрических характеристик газодинамического профиля сопла камеры ЖРД. Результаты сравнительного анализа различных методов аппроксимации приведены в табл. 1.

По приведенным данным можно сделать вывод о том, что применение нейронных сетей позволяет достичь высокой точности аппроксимации исходных данных, прежде всего благодаря наличию в нейросетях скрытого слоя нейронов с нелинейными функциями активации (гиперболический тангенс), а также позволяет обеспечивать адаптивное управление автоматизированной лазерно-ультразвуковой установкой НК.

Анализ нормативных требований по допустимости дефектов паяных соединений сопла камеры

ЖРД, установленных в конструкторской документации на двигатель, показал, что не допускаются непропаи ребер длиной более 2 мм, а дефекты типа «полный непропай» не должны находиться подряд на двух и более соседних ребрах (рис. 6).

Аппроксимирующая функция	Ошибка (Error), мм		Среднеквадратическое отклонение (RMSE), мм		Метрика Хаусдорфа, мм	
	для 52 точек	для 179 точек	для 52 точек	для 179 точек	для 52 точек	для 179 точек
Линейный полином	60	150	31,398	71,524	58,834	158,834
Кубический полином	4	145	1,821	38,596	3,557	143,567
Полином 9 степени	0,2	32	0,069	7,264	0,18	30,18
Дробно-рациональная модель (в числителе – квадратичный полином, в знаменателе – линейный)	0,8	165	0,382	62,871	14,378	164,38
Дробно-рациональная модель (в числителе – кубический полином, в знаменателе – линейный)	15	155	6,869	40,937	0,789	145,378
Трехслойный персептрон	0,04	10	0,033	1,317	0,044	7,234

Таблица 1. Сравнение методов аппроксимации

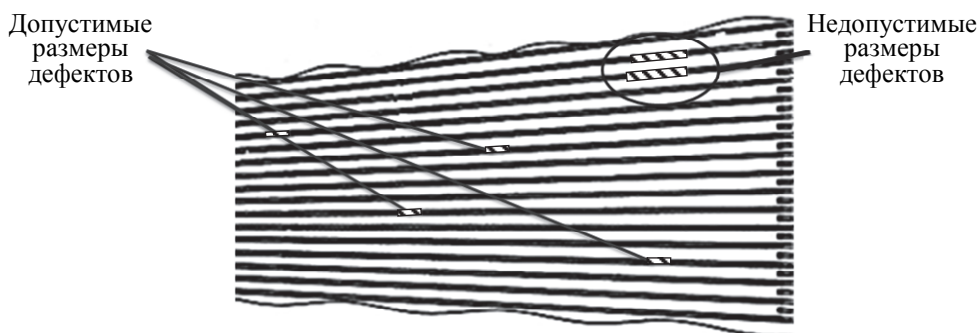


Рис. 6. Схематическое изображение дефектов

Это позволило разработать адаптивный алгоритм проведения автоматизированных лазерно-ультразвуковых измерений геометрических характеристик дефектов паяных соединений сопел камер ЖРД. Новизна данного алгоритма заключается в следующем:

- впервые для оценки дефектности предложено использовать весовой коэффициент w_i , значение которого определяется по значению амплитуды донного сигнала и времени между зондирующим ультразвуковым сигналом и первым отраженным ультразвуковым сигналом;
- предложен новый показатель дефектности паяных соединений сопел камер ЖРД – коэффициент дефектности $K = \frac{S_{\text{сумм}}}{S_{\text{общ}}}$, где $S_{\text{сумм}}$ – суммарная площадь измеренных ребер сопел камер ЖРД; $S_{\text{общ}}$ –

расчетная площадь ребер сопел камер ЖРД. Значение коэффициента K изменяется от $K = 0$ (отсутствие дефектов) до $K = 1$ (все ребра дефектные). Предложенный коэффициент позволяет осуществлять интегральную оценку их качества.

Полученное по результатам контроля значение коэффициента дефектности K необходимо сравнить с допустимым значением коэффициента, который должен определяться прочностным расчетом паяного соединения для каждого типа камер ЖРД. Таким образом, решение о качестве паяных соединений сопла камеры ЖРД и ее дальнейшей эксплуатации предлагается принимать на основании двухпараметрического анализа значений коэффициентов w_i и K .

Для наглядного отображения информации о дефектности паяных соединений сопла камеры ЖРД предлагается использовать графическое представление результатов автоматизированного измерения геометрических характеристик дефектов (рис. 7), где по осям откладывается площадь дефектных сечений, а количество осей равно количеству проконтролированных сечений сопла камеры двигателя.

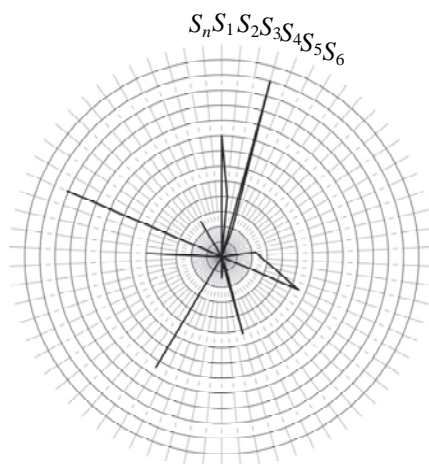


Рис. 7. Графическое представление результатов измерений геометрических характеристик паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей (S_0 – S_6 – номера сечений)

Экспериментальная часть

В процессе исследований была разработана методика автоматизированных измерений геометрических характеристик дефектов и контроля качества паяных соединений сопел камер ЖРД. Реализация методики заключается в последовательном выполнении следующих этапов:

- подготовка к проведению измерений;
- проведение автоматизированных измерений;
- оценка качества изготовления изделия;
- оформление результатов контроля.

В процессе апробации методики автоматизированных измерений геометрических характеристик дефектов паяных соединений сопел камер ЖРД был проведен контроль качества паяных соединений в автоматизированном и ручном режиме. В качестве объекта контроля выступала вырезка из сопла камеры ЖРД размером 200×200 мм и общей площадью 40000 мм^2 . Данная вырезка содержала 42 ребра с общей площадью контролируемой поверхности 20000 мм^2 .

В качестве СИ использовался лазерно-ультразвуковой дефектоскоп УДЛ-2М с оптоакустическим преобразователем ПЛУ-12. Для экспериментальной апробации методики был разработан автоматизированный стенд на базе трехкоординатного фрезерного станка фирмы BZT (PF-1000) (рис. 8).

Для обеспечения надежного акустического контакта датчика с поверхностью объекта контроля была разработана специализированная оснастка (рис. 9). Оснастка состоит из кронштейна, внешнего корпуса и внутреннего корпуса, датчик устанавливается во внутренний корпус, после чего внутренний корпус устанавливается в внешнем корпусе с возможностью поступательного движения, между корпусами устанавливается пружина, обеспечивающая тарированный прижим.

Перемещение датчика по образцу осуществлялось по схеме, представленной на рис. 10.

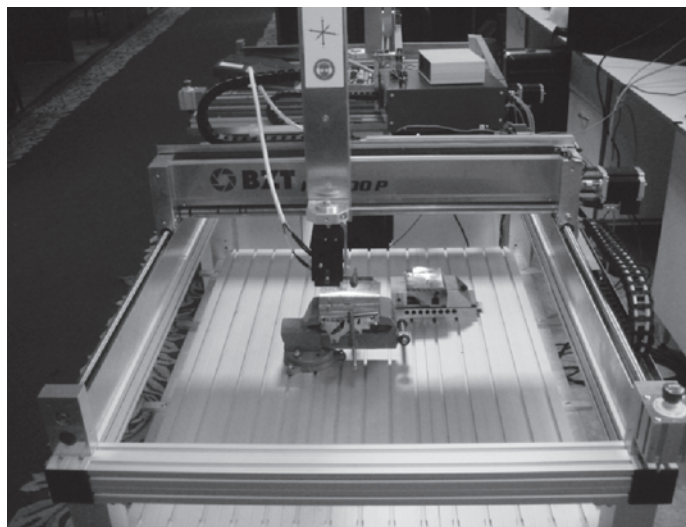


Рис. 8. Автоматизированная установка контроля качества паяных соединений изделий ракетно-космической техники

На первом этапе был проведен автоматизированный лазерно-ультразвуковой контроль качества паяных соединений. Сканирование проводилось со скоростью 20 мм/с и заняло 3000 с (50 мин). В результате контроля обнаружено 110 дефектов паяных соединений суммарной площадью 800 мм² дефектов. По результатам измерений построен симплекс, представленный на рис. 11, на котором отображены ребра с дефектами паяных соединений и их площадь.

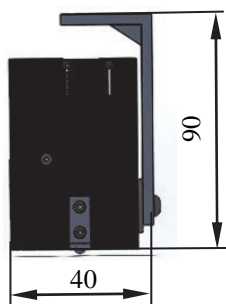


Рис. 9. Специализированная оснастка (размеры указаны в мм)

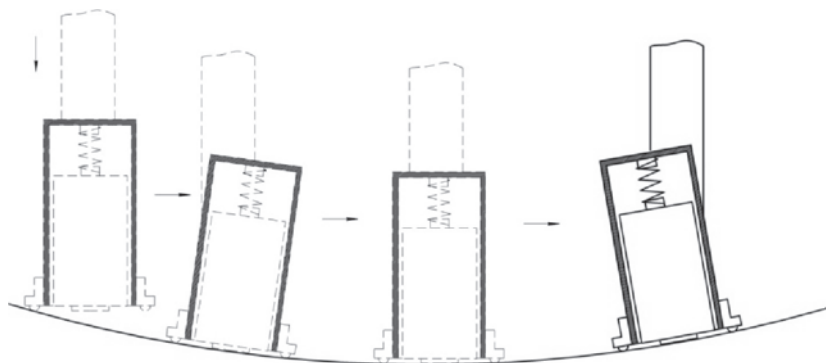


Рис. 10. Схема движения датчика по образцу

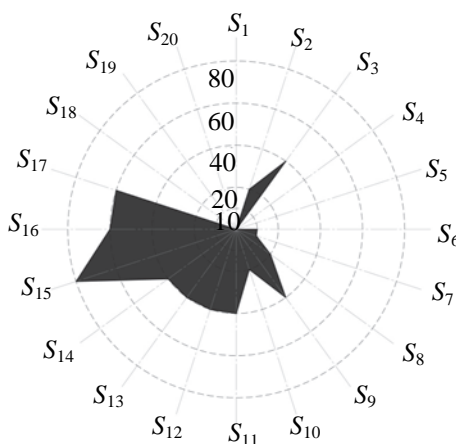


Рис. 11. Результаты автоматизированных измерений. S_1 – S_{20} – количество контролируемых сечений; 10, 20, 40, 60 и 80 – значения общей площади дефектов в сечении (мм²)

На втором этапе лазерно-ультразвуковой контроль осуществлялся в ручном режиме. Суммарное время контроля в ручном режиме составило 24 ч. При ручном контроле было выявлено 50 дефектов паяных соединений суммарной площадью 10 мм². Точность измерений геометрических характеристик дефектов и достоверность результатов НК подтверждалась металлографическим исследованием данной вырезки. Суммарная площадь дефектов при металлографических исследованиях определялась с использованием Carl Zeiss Axiovert 40 MAT и составила 750 мм².

Результаты лазерно-ультразвукового контроля в автоматизированном и ручном режиме представлены в табл. 2.

Согласно результатам, представленным в табл. 2, автоматизированный лазерно-ультразвуковой метод контроля является более точным, достоверным и оперативным. Разработанный автоматизированный лазерно-ультразвуковой метод контроля качества паяных соединений позволяет проводить измерение геометрических характеристик дефектов паяных соединений камер ЖРД и давать оценку качества паяных соединений камер ЖРД с высокой степенью вероятности.

Метод контроля	Общая площадь контроля, мм ²	Время контроля, мин	Дефектная площадь, мм ²	Достоверность, %
Лазерно-ультразвуковой контроль в ручном режиме	20000	1440	10	85
Автоматизированный лазерно-ультразвуковой метод	20000	50	800	95

Таблица 2. Результаты лазерно-ультразвукового контроля

Заключение

В ходе исследований была решена актуальная научно-техническая задача, которая состояла в разработке автоматизированного лазерно-ультразвукового метода контроля качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей, обусловленных требованиями развития современной дефектоскопии и средств неразрушающего контроля и обеспечивающих повышение достоверности контроля и качества изготовления паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований обосновано применение нейросетевой аппроксимации описания газодинамического профиля камер жидкостных ракетных двигателей для программного управления траекторией движения датчика. Разработан адаптивный алгоритм автоматизированных лазерно-ультразвуковых измерений геометрических характеристик дефектов паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей и метод интегральной оценки площади дефектов паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей.

Литература

1. Кинжагулов И.Ю. Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 7. С. 39–44.
2. Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Скипетров С.Е. Измерение оптических характеристик рассеивающих сред оптико-акустическим методом // Квантовая электроника. 1999. Т. 29. № 3. С. 215–220.
3. Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов // Стохастическая оптимизация в информатике. 2009. Т. 5. № 1–1. С. 157–166.
4. Francini E., Hoft T., Santosa F. An inverse problem in nondestructive evaluation of spot-welds // Inverse Problems. 2006. V. 22. N 2. P. 645–661. doi: 10.1088/0266-5611/22/2/016
5. Brierley N., Tippetts T., Cawley P. Data fusion for automated non-destructive inspection // Proceedings of the Royal Society A. Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2014. V. 470. N 2167. P. 89–99. doi: 10.1098/rspa.2014.0167
6. Карабутов А.А., Матросов М.П., Подымова Н.Б., Пыж В.А. Импульсная акустическая спектроскопия с лазерным источником звука // Акустический журнал. 1991. Т. 37. № 2. С. 311–323.
7. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Автоматизированная система для измерения параметров ультразвуковых пьезопреобразователей // В мире неразрушающего контроля. 2010. №1. С. 35–39.
8. Ефимов И.М. Высокопроизводительный контроль сварных соединений с помощью механизированных сканеров // Территория NDT. 2014. №1. С. 26–18.
9. Панков В.В., Померанцев Д.С. Промышленные сканеры для замены радиографического контроля ультразвуковым // Территория NDT. 2014. №1. С. 38–39.
10. Efremov A. Havran V., Seidel H. Robust and numerically stable Bezier clipping method for ray tracing NURBS surfaces // Proc. 21st Spring Conference on Computer Graphics (SCCG 2005), 2005. P. 123–131. doi: 10.1145/1090122.1090144
11. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применения ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 576 с.
12. Самокрутов А.А., Бобров В.Т., Шевалдыкин В.Г., Алёхин С.Г., Козлов В.Н. Акустические методы и средства исследования напряженно-деформированного состояния конструкций и сооружений // В мире неразрушающего контроля. 2005. № 1. С. 22–26.
13. Быченко В.А., Кинжагулов И.Ю. Лазерно-ультразвуковой контроль тонкостенных паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 7. С. 50–54.
14. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. СПб.: Лань, 2012. 608 с.
15. Турыгин Ю.В., Зубкова Ю.В. Исследование точности позиционирования выходного звена мехатронной системы // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012). Санкт-Петербург, 2012. С. 814–817.
16. Голубинский А.Н. Методы аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей // Вестник Воронежского института МВД России. 2007. № 2. С. 138–143.

<i>Сергеев Дмитрий Сергеевич</i>	–	научный сотрудник, ООО «НТЦ «Эталон», Санкт-Петербург, 195273, Российская Федерация, dmt.sergeev@gmail.com
<i>Федоров Алексей Владимирович</i>	–	доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, afedor62@yandex.ru
<i>Баринов Андрей Валерьевич</i>	–	научный сотрудник, ООО «НТЦ «Эталон», Санкт-Петербург, 195273, Российская Федерация, sapok89@mail.ru
<i>Астрединова Надежда Витальевна</i>	–	аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, astra-nadezhda@ya.ru
<i>Dmitriy S. Sergeev</i>	–	scientific researcher, LLC «NTC «Etalon», Saint Petersburg, 195273, Russian Federation, dmt.sergeev@gmail.com
<i>Alexey V. Fedorov</i>	–	D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, afedor62@yandex.ru
<i>Andrey V. Barinov</i>	–	scientific researcher, LLC «NTC «Etalon», Saint Petersburg, 195273, Russian Federation, sapok89@mail.ru
<i>Nadezhda V. Astredinova</i>	–	postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, astra-nadezhda@ya.ru