

И. Ю. КИНЖАГУЛОВ, В. А. БЫЧЕНОК

МЕТОДИКА ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассматривается возможность применения лазерно-ультразвукового контроля для оценки качества изготовления паяных соединений элементов ракетно-космической техники. Изложены основные принципы разработанной методики контроля и приведены результаты ее апробации на натуральных образцах камер жидкостных ракетных двигателей.

Ключевые слова: лазерно-ультразвуковой контроль, ракетно-космическая техника, неразрушающий контроль, пайка.

В настоящее время резко увеличилось число нештатных ситуаций при выведении космических аппаратов на околоземную орбиту. Одной из причин такого состояния дел является низкий уровень контроля качества изготовления элементов ракетно-космической техники (РКТ). Вследствие высокой стоимости изготовления таких элементов широкое применение в системе контроля качества находят методы неразрушающего контроля (МНК).

Современные жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) представляют собой двустенные конструкции, наружная и внутренняя стенки которых соединены при помощи пайки. С увеличением удельного импульса двигателей, а следовательно, и с увеличением рабочих давлений внутри камер и в межстеночном пространстве проблема контроля данных соединений приобретает особую актуальность. Решение этой проблемы с использованием традиционных методов неразрушающего контроля, таких как магнитный, рентгеновский и ультразвуковой, по различным причинам не привело к положительному результату. Как альтернатива традиционным МНК авторами был предложен лазерно-ультразвуковой метод контроля, разработана методика его проведения и осуществлена ее апробация на примере контроля качества изготовления паяных соединений сопел камер ЖРД 14Д23 ракеты-носителя „Союз 2-1-Б“.

Сопло камеры ЖРД 14Д23 имеет такую отличительную особенность, как сложная геометрическая форма верхнего коллектора, который является концентратором напряжений различного рода. Поэтому в качестве наиболее критичной области, с точки зрения ее контроля, была выбрана зона подколлекторного кольца, в которой наблюдалось наибольшее количество обнаруженных дефектов. Схема подколлекторной зоны показана на рис. 1.

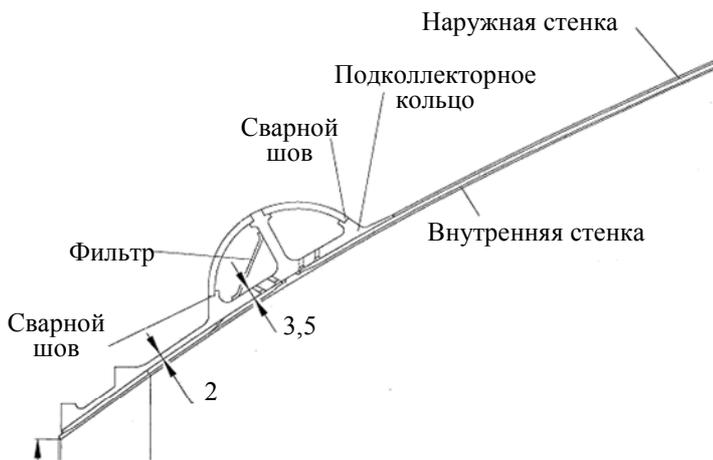


Рис. 1

Паяные соединения в зоне подколлекторного кольца получают методом вакуумно-компрессионной пайки. Типовой дефект паяных соединений, возникающий как в процессе изготовления, так и при эксплуатации, — отсутствие контакта (неплотность: неспай, непропай, отрыв) между поверхностями вследствие нарушения технологии или больших тепловых и (или) механических напряжений при ис-

пытаниях. Внешний вид несплошности в зоне подколлекторного кольца двигателя 14Д23 представлен на рис. 2.

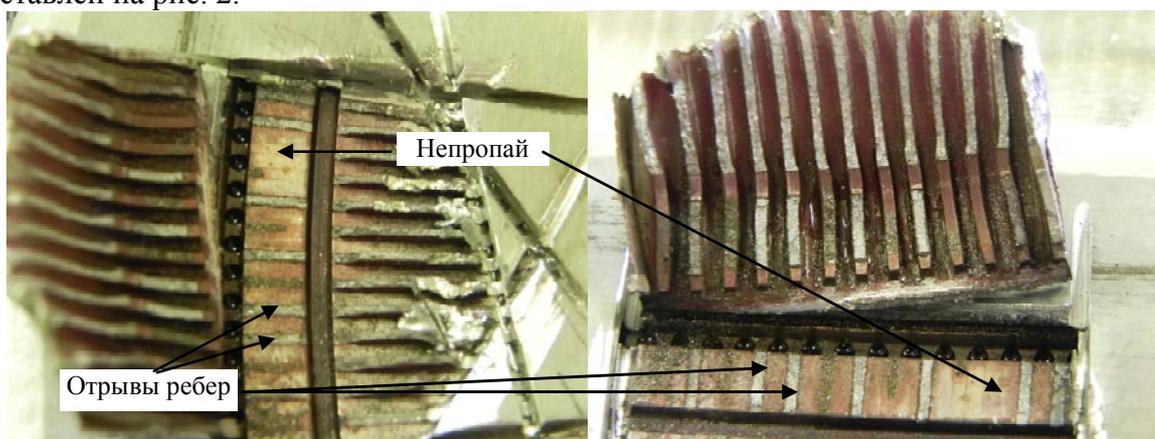


Рис. 2

Разработанная методика позволяет проводить лазерно-ультразвуковой контроль качества паяных соединений на предмет наличия несплошностей ребер внутренней стенки и подколлекторного кольца верхнего сопла камеры двигателя. В качестве средства контроля используется лазерно-ультразвуковой дефектоскоп УДЛ-2М, в состав которого входят:

- оптоэлектронный блок, содержащий импульсный Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности и высокой частотой повторения импульсов;
- широкополосный оптико-акустический преобразователь ПЛУ-15Ц-02;
- оптоволоконный кабель;
- специализированное программное обеспечение.

Контроль проводится эхо-методом при контактном вводе продольных ультразвуковых колебаний с использованием оптико-акустического преобразователя, генерирующего продольную волну, путем ручного сканирования внутренней поверхности подколлекторной зоны сопла.

На рис. 3 представлена схема, демонстрирующая принцип работы широкополосного оптико-акустического преобразователя ПЛУ-15Ц-02 [1].

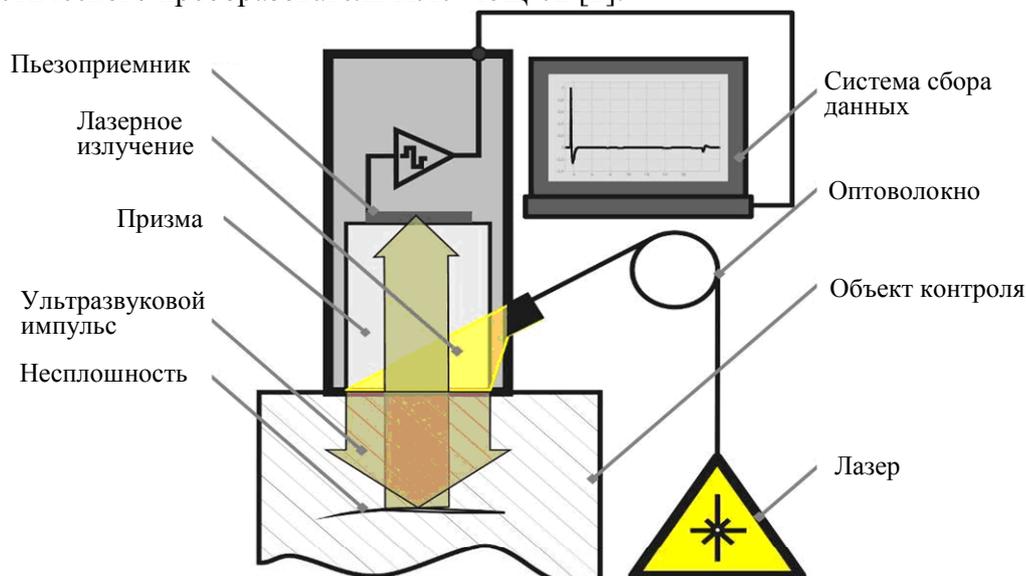


Рис. 3

Излучение лазера, проходя через прозрачную призму, падает под углом на лицевую поверхность объекта контроля (подколлекторного кольца верхнего сопла). Призма находится в акустическом контакте с объектом контроля и является одновременно звукопроводом широкополосного пьезоэлектрического приемника. Выходная поверхность преобразователя имеет

цилиндрическую форму с кривизной, соответствующей кривизне подколлекторного кольца в окружном направлении. Акустический контакт при контроле обеспечивается прижимом преобразователя к внутренней поверхности подколлекторного кольца через тонкий иммерсионный слой контактной жидкости. Поглощаясь в металле, лазерное излучение нагревает тонкий поверхностный слой объекта контроля и граничащий с ним слой жидкости, что приводит к тепловому расширению и возбуждению ультразвуковых импульсов — акустических сигналов, временной профиль которых повторяет форму огибающей интенсивности лазерного импульса. Этот ультразвуковой импульс распространяется как в объекте контроля, так и в прозрачной призме-звукопроводе [1].

Особенностью данного объекта контроля является то, что контроль качества пайки осуществляется между канавками перетока в зоне 10 мм (в меридиональном направлении).

Для оценки чувствительности применяемой при контроле дефектоскопической аппаратуры используется комплект контрольных образцов [3]. Контрольные образцы представляют собой сегменты металла, вырезанные из верхнего сопла камеры двигателя.

Комплект содержит следующие контрольные образцы.

1. *Контрольный образец КО-1*, его изображение, а также обозначение и расположение имитаторов дефектов представлены на рис. 4, а, б соответственно. В этом образце выделены следующие зоны:

— зона 1 (обозначена как КО-1БД1, КО-1БД2, КО-1БД3) — бездефектный участок (отсутствуют несплошности) для определения типовой дефектограммы образца;

— зона 2 (обозначена как КО-1Д1, КО-1Д2, КО-1Д3), в которой выполнены имитаторы несплошностей в виде прорезей размером 1 мм по длине ребра.

2. *Контрольный образец КО-2*, в нем выделены зоны, аналогичные зонам КО-1, где в зоне 2 имитаторы несплошностей выполнены в виде прорезей размером 2 мм по длине ребра.

3. *Контрольный образец КО-3*, в котором выделены зоны, аналогичные зонам предыдущих образцов, и в зоне 2 имитаторы несплошностей выполнены в виде прорезей размером 3 мм по длине ребра.

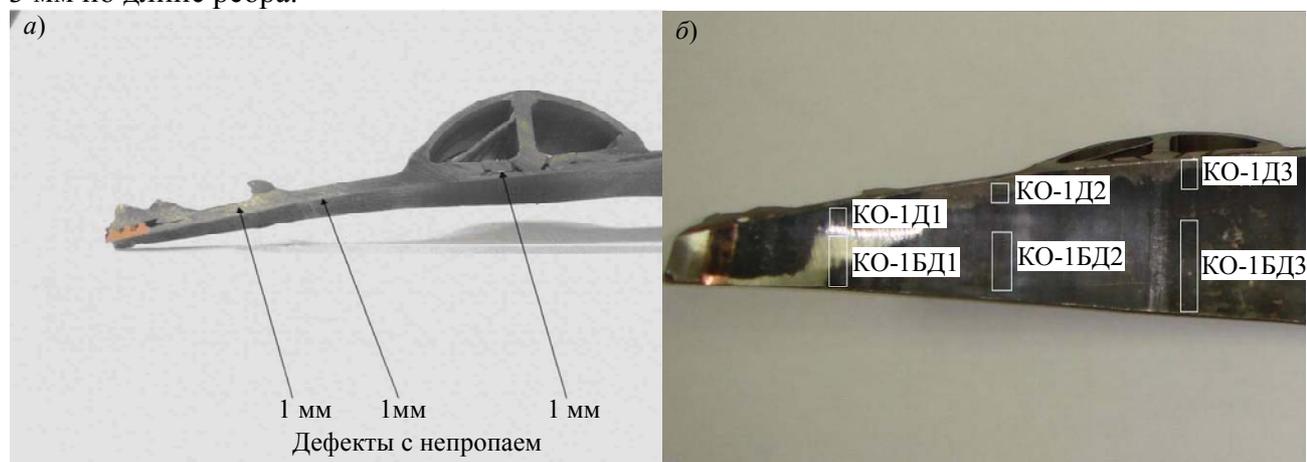


Рис. 4

Камера двигателя 14Д23, подлежащая контролю, закрепляется в стенде отдельно или в сборке так, чтобы обеспечить возможность удобного сканирования датчиком внутренней поверхности подколлекторной зоны. Сканирование производится от нулевой метки, нанесенной на внутреннюю поверхность. Положение и способ нанесения нулевой метки определяются согласно ГОСТ 3.1102-81 и ГОСТ 3.1502-85.

При контроле в процессе сканирования необходимо располагать датчик на контролируемой поверхности с приложением усилия не более 1 кг перпендикулярно поверхности. Качество акустического контакта контролируется по виду акустического изображения на экране монитора.

В зоне нулевой метки необходимо провести сканирование поверхности в меридиональном направлении (вдоль образующей) в целях определения местоположения датчика относительно перемычки и канавок перетока. Вид акустического изображения указанной области показан на рис. 5.

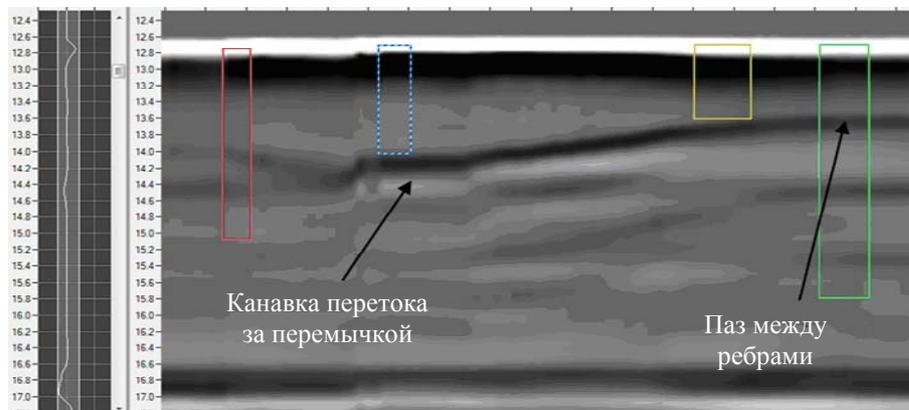


Рис. 5

Наличие дефектов в подколлекторной зоне после проведения контроля определяется путем анализа полученных дефектограмм.

На бездефектном участке, акустическое изображение которого приведено на рис. 6, на экране монитора периодически появляется и „проседает“ темная полоса, характеризующая переход с желоба между ребрами на ребро. Отсутствие темной полосы на глубине $H=2,3$ мм в зоне „проседания“ свидетельствует об отсутствии несплошности в зоне пайки ребра.

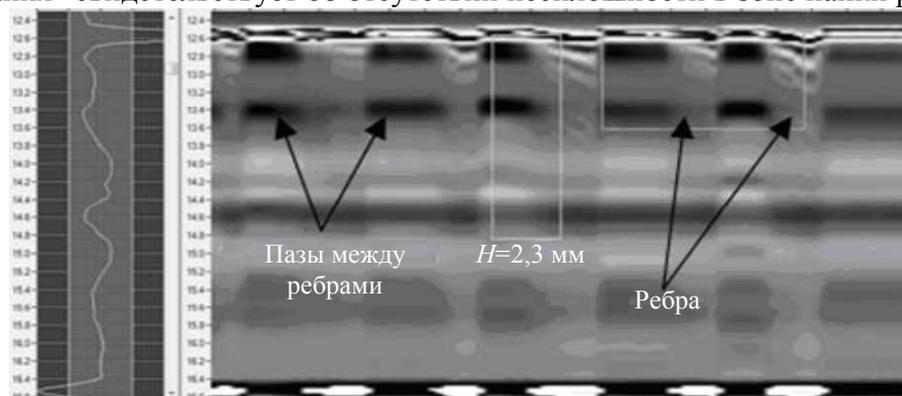


Рис. 6

На дефектном участке в области „просадки“ темной полосы на глубине 2,3 мм регистрируются сигналы, свидетельствующие о наличии дефекта. Данное акустическое изображение представлено на рис. 7.

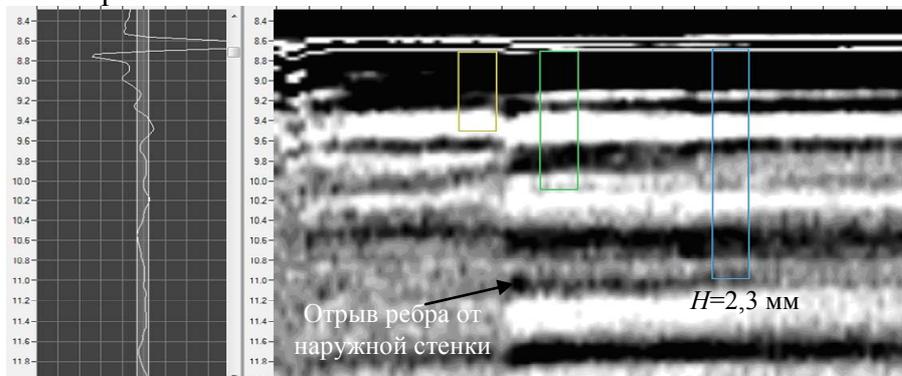


Рис. 7

Проведенная апробация на примере контроля качества изготовления паяных соединений сопел камер ЖРД 14Д23 позволяет сделать вывод о применимости разработанной методики

неразрушающего контроля. Чувствительность лазерно-ультразвукового метода и дефектоскопа УДЛ-2М с преобразователем ПЛУ-15Ц-02 позволяет обнаруживать несплошности в паяных соединениях в зоне подколлекторного кольца верхнего сопла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карабутов А. А., Матросов М. П., Подымова Н. Б.* Термооптический генератор широкополосных импульсов сдвиговых волн // Акуст. журн. 1993. Т. 39(2). С. 373.
2. *Ахманов С. А., Руденко О. В.* Параметрический лазерный излучатель ультразвука // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1(15). С. 725.
3. *Неразрушающий контроль: Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ермолов И. Н., Ланге Ю. В.* Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.

Сведения об авторах

- Игорь Юрьевич Кинжагулов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: kinzhiki@mail.ru
- Владимир Анатольевич Быченок** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
18.10.12 г.