

УДК 53.082.4

Аспирант Н.В. Астрединова, аспирант А.В. Баринов,
аспирант Д.С. Сергеев

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики) факультет точной механики и технологий.

тел. 89119407661

E-mail: astra-nadezhda@ya.ru

Graduate N.V. Astredinova, graduate A.V. Barinov,
graduate D.S. Sergeev

(St. Petersburg national research University of information technologies, mechanics and optics)
faculty of fine mechanics and technology.

phone 89119407661

E-mail: astra-nadezhda@ya.ru

Возможность применения лазерно-ультразвуковой диагностики для контроля качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей

The possibility of using laser-ultrasound to monitor the quality soldered connections chambers of liquid rocket engines

Реферат. В процессе изготовления к конструкции современных жидкостных ракетных двигателей предъявляются важные требования, такие как: минимальная масса, максимальная жесткость и прочность узлов, максимальный ресурс работы в условиях эксплуатации, высокая надежность и качество паяных и сварных швов. В связи с высокими требованиями к качеству паяных соединений и особенностями конструкции сопла, возникла необходимость в разработке и отработке нового нетрадиционного неразрушающего метода контроля - лазерно-ультразвуковая диагностика. В соответствии с нормативной документацией, при контроле качества паяных соединений допускается применять акустический вид контроля методами отраженного излучения, прошедшего излучения, резонансного, свободных колебаний и акустико-эмиссионным. Попытки использования традиционных методов неразрушающего контроля не привели к положительным результатам. Это связано, прежде всего, с размерами типовых дефектов паяного соединения, а также с конструктивными особенностями ЖРД, данные конструкции являются неконтролепригодными. В связи с этим был разработан новый метод, обеспечивающий контроль качества паяных соединений камер ЖРД, основанный на термооптическом возбуждении ультразвука. Методы ультразвуковой дефектоскопии с оптоакустическим эффектом, в большинстве случаев обладают рядом преимуществ по сравнению с методами, которые применяют стандартные (традиционные) пьезопреобразователи. В ходе проведения исследований получили, что чувствительность лазерно-ультразвукового метода и дефектоскопа УДЛ-2М позволяет обнаруживать некропаи в паяных соединениях по ребрам сопла верхнего в зоне подколлекторного узла.

Summary. During the manufacturing process to the design of modern liquid rocket engines are presented important requirements, such as minimum weight, maximum stiffness and strength of nodes, maximum service life in operation, high reliability and quality of soldered and welded seams. Due to the high quality requirements soldered connections and the specific design of the nozzle, it became necessary in the development and testing of a new non-conventional non-destructive testing method – laser-ultrasound diagnosis. In accordance with regulatory guidelines, quality control soldered connections is allowed to use an acoustic kind of control methods of the reflected light, transmitted light, resonant, free vibration and acoustic emission. Attempts to use traditional methods of non-destructive testing did not lead to positive results. This is due primarily to the size of typical solder joint defects, as well as the structural features of the rocket engine, the data structure is not controllable. In connection with this, a new method that provides quality control soldered connections cameras LRE based on the thermo generation of ultrasound. Methods of ultrasonic flaw detection of photoacoustic effect, in most cases, have a number of advantages over methods that use standard (traditional) piezo transducers. In the course of studies have found that the sensitivity of the laser-ultrasonic method and flaw detector UDL-2M can detect lack of adhesion in the solder joints on the upper edges of the nozzle in the sub-header area of the site.

Ключевые слова: жидкостной ракетный двигатель, контроль, качество, паяные соединения, ультразвук, диагностика, некропаи.

Keywords: liquid rocket engine, control, quality, soldering connections, ultrasound, diagnostics, lack of adhesion, object of verification.

Основным агрегатом жидкостного реактивного двигателя (ЖРД) принято считать камеру сгорания - агрегат, в котором происходит преобразование химической энергии топлива в кинетическую энергию поступательного движения продуктов сгорания, вытекающих через сопло. Упомянутый процесс сопровождается выделением большого количества тепла и продуктов сгорания, имеющих высокую температуру (от 2000 до 4500°C), которая при прочих равных условиях зависит главным образом от используемых компонентов топлива. Очевидно, что обеспечение работоспособности стенок камеры являлось одной из основных проблем при разработке ЖРД [1].

В процессе изготовления ЖРД широко применяются средства и методы неразрушающего контроля, обеспечивающие качество и надежность изготавливаемых двигателей. Однако при изготовлении ЖРД неразрушающие методы контроля (НМК) качества паяных соединений стенок не использовались [2].

Использование НМК, позволяющих избежать разрушения готового изделия, то есть

изготовление образцов для проведения контроля, приводит к сокращению времени и снижению материальных затрат, обеспечивает полный или частичный автоматизированный контроль со значительным повышением качества и надежности изделий. На сегодняшний день каждый технологический процесс, направленный на получение ответственных изделий, не вводится в промышленность без определенной системы НМК [3].

Рассмотрим неразрушающие методы контроля качества паяных соединений. Большинство методов НМК позволяют обнаруживать открытые поверхностные и подповерхностные дефекты. При контроле качества паяных соединений необходимо применять метод, который позволяет качественно определять внутренние дефекты типа непропай.

Согласно ГОСТ 24715-81 основными традиционными методами неразрушающего контроля для обнаружения несплошностей (непропай, неспай) являются радиационный, акустический и вихретоковый (таблица 1) [4].

Т а б л и ц а 1

Традиционные НМК внутренних дефектов паяных соединений

Вид контроля	Метод контроля	Характеристика метода	
		Минимальные размеры выявляемых дефектов	Особенности метода
Радиационный	Радиографический	2 - 5 % от общей толщины исследуемого материала изделия	Чувствительность зависит от толщины и марок соединяемых материалов и припоев.
	Радиоскопический	3 - 8 % от общей толщины исследуемого материала изделия	
Акустический	Отраженного излучения (эхо-метод) Прошедшего излучения	Дефекты площадью 1 - 15 мм ² при толщине материала 2,5 - 150 мм	Выявляют дефекты типа непропаев. Определяют условные размеры дефекта, эквивалентную площадь, конфигурацию и число дефектов. Метод не гарантирует
	Резонансный Свободных колебаний Акустико-эмиссионный		выявление одиночных пор, шлаковых и инородных включений диаметром ≤1-2 мм. Вид дефекта не определяется. Не выявляются дефекты, расположенные по глубине в мертвой зоне дефектоскопа, а также дефекты, расположенные от отражающей поверхности на расстоянии меньшем, чем разрешающая способность дефектоскопа
Вихретоковый	Трансформаторный Параметрический	Дефекты с раскрытием 0,0005-0,001 мм и глубиной ≥0,2 мм	Параметр шероховатости поверхности, доступные для преобразователей, контролируемых соединений - $Rz \leq 40$ мкм.

При радиационном (рентгеновском) методе излучения рентгеновских аппаратов и радиоактивных источников используются для обнаружения внутренних несплошностей в паяных соединениях изделий, просвечивая изделия на рентгеновскую пленку или на преобразователи изображений.

Применение радиационного метода не обеспечивает выявление некоторых дефектов:

- дефекты, протяженность которых в направлении излучения значительно меньше чувствительности контроля, или изображение дефектов накладывается на другие изображения, что затрудняет процесс распознавания;
- трещины с раскрытием менее 0,1 мм;
- трещины, у которых не совпадает плоскость раскрытия с направлением излучения;
- непропаи при условии, что нет обеспечения достаточного радиационного контраста между коэффициентом ослабления излучения и паяемым материалом и толщиной паяного шва.

На заводе-изготовителе ракетных двигателей ЖРД был проведен рентгеновский контроль качества паяного соединения по длине всего сопла. Данный метод хорошо подходит для определения наличия заплывания каналов припоем, но не подходит для обнаружения несплошностей (непропай, неспай, трещина) в паяном соединении. Не возможность обнаружения связана с тем, что небольшая трещина или непропай ориентированы не по направлению максимальной чувствительности прибора (рисунок 1).

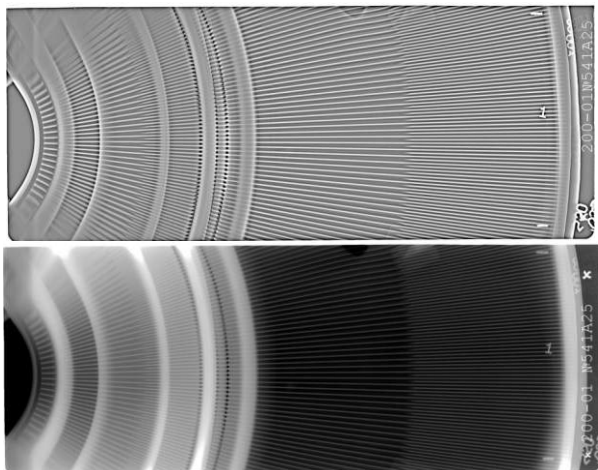


Рисунок 1. Рентгеновский контроль подколлекторной зоны камеры ЖРД (данные ОАО КБХА)

Вихретоковый метод основан на воздействии переменного электромагнитного поля в металле, в исследуемой детали возникают так называемые вихревые токи. Важным достоинством вихретокового метода неразрушающего контроля является то, что его проведение возможно без контакта объекта и преобразователя. Это позволяет получать качественные ре-

зультаты контроля при высоких скоростях исследуемых объектов. Этот метод пригоден для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов, таких как коррозия, износ, эрозия, питтинг, повреждения и утончение стенок. При использовании вихретокового метода невозможно контролировать элементы деталей и конструкций:

- при резком изменении магнитных или электрических свойств;
- дефекты, полость которых располагается параллельно поверхности контроля (паяные соединения камер ЖРД) или составляет угол относительно поверхности менее 10° ;
- если не снято усилие на сварном шве.

Акустический метод – один из основных физических методов диагностики состояния материалов, изделий, в котором определяются параметры упругих волн, возбуждаемые или возникающих в объекте контроля. Диапазон частот ультразвуковых и звуковых колебаний для акустического метода составляет от 50 Гц до 50 МГц.

Преимущества акустического метода: возможность контроля большой толщины, по сравнению с радиографией безопасность и меньшие затраты, выявление дефектов малого раскрытия. Но также есть ряд недостатков: объемные дефекты выявляются плохо, не выявляются дефекты, расположенные перпендикулярно направлению распространения волны, по сравнению с радиационными методами сложнее определить вид дефекта.

Существенным недостатком данного метода при контроле качества паяных соединений камер ЖРД является наличие в приборах мертвой зоны и невозможность определять дефекты на глубине меньшей, чем отражающая способность дефектоскопа. Также в таблице 1, указано, что дефекты определяются по площади от 1 мм при соответствующей толщине материала от 2,5 мм, а контролируемое изделие (камера сгорания ЖРД) имеет толщину ребра равное 0,8 мм (см. рисунок 2).

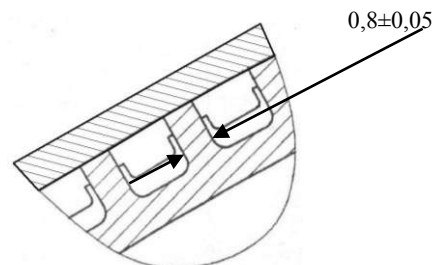


Рисунок 2. Разрез стенки камеры сгорания

Использование традиционных методов неразрушающего контроля для обеспечения качества паяных соединений не привели к по-

ложительным результатам. Это связано, прежде всего, с размерами типовых дефектов паяного соединения (неспай, непропай), а также с конструктивными особенностями ЖРД, данные конструкции являются неконтролепригодными.

Контроль качества пайки в процессе изготовления ЖРД подтверждается косвенными методами, в том числе прочностными и огневыми испытаниями (КИ, КВИ и КТИ), которые иногда могут привести к разрушению камеры ЖРД. В связи с этим необходимость применения методов неразрушающего контроля возросла [2]. Количество дефектных сопел после огневых испытаний можно увидеть на рисунке 3.

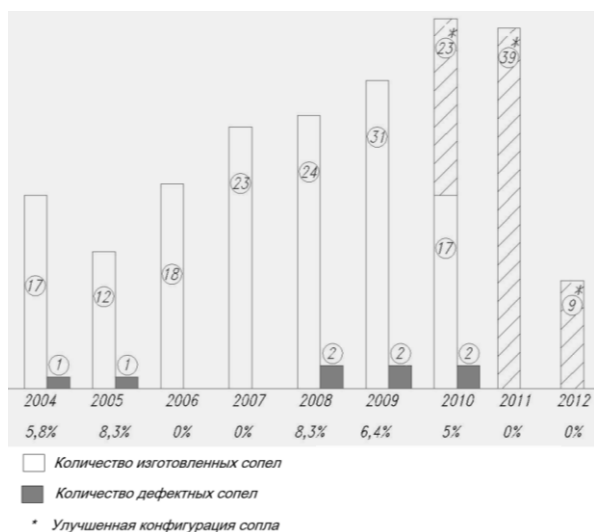


Рисунок 3. Процент дефектных сопел после огневых испытаний (по данным ОАО КБХА)

В связи с имевшимися случаями разрушения сопла верхнего при огневых испытаниях двигателя 14Д23, РД0124А (рисунок 4) был опробован неразрушающий контроль качества паяных соединений методом лазерно-ультразвуковой диагностики с помощью лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М (ЛУД УДЛ-2М).

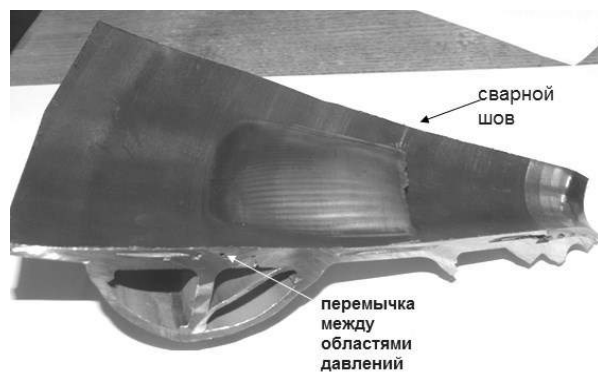


Рисунок 4. Разрушение сопла верхнего после огневых испытаний

Одной из наиболее сложных с точки зрения реализации лазерно-ультразвукового контроля зон является зона подколлекторного кольца сопла верхнего (рисунки 4 и 5). По статистическим данным наибольшее число дефектов возникает именно в этой области.



Рисунок 5. Эскиз подколлекторной зоны сопла

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

В широкополосном оптико-акустическом преобразователе через прозрачную призму под определенным углом падает лазерный импульс

на контролируемую поверхность объекта контроля (рисунок 6). Прозрачная призма находится в акустическом контакте с объектом контроля и является одновременно звуководом широкополосного пьезоэлектрического приемника. Поверхность преобразователя имеет цилиндрическую форму с кривизной, соответствующей кривизне подколлекторной зоны в окружном направлении.

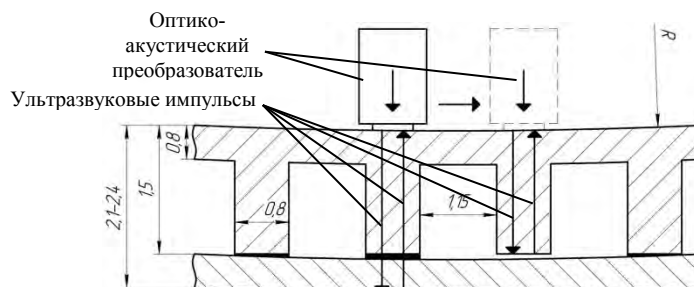


Рисунок 6. Схема расположения преобразователя и распространения ультразвуковых волн в объекте контроля

Акустический контакт при контроле обеспечивается прижимом преобразователя к внутренней поверхности подколлекторной зоны 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 объект контроля, так и в прозрачную призму-звукопровод [5].

Поглощение лазерного излучения происходит из-за неоднородности нагрева, что приводит к расширению среды, в которой возникает импульс давления, описываемый формулой (1):

$$p'(\tau) = \frac{I_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\omega) K(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega, \quad (1)$$

где $\tau = t - z/V_L$ – время в сопровождающей системе координат; V_L – фазовая скорость продольных звуковых волн в поглощающей среде;

$I_0 \tilde{f}(\omega)$ – частотный спектр огибающей интенсивности лазерного импульса; $K(\omega)$ – передаточная функция термооптического преобразователя.

Следовательно, спектр $p(\omega)$ импульса давления, который возникает за счет термооптического преобразования в поглощающей среде, является произведением спектра лазерного импульса $I_0 \tilde{f}(\omega)$ огибающей интенсивности и передаточной функции $K(\omega)$ [6, 7]:

$$p(\omega) = I_0 \tilde{f}(\omega) K(\omega). \quad (2)$$

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

Результаты исследований представляются в виде дефектограмм (рисунок 7), на которых отсутствуют или отображаются дефекты типа непропай.

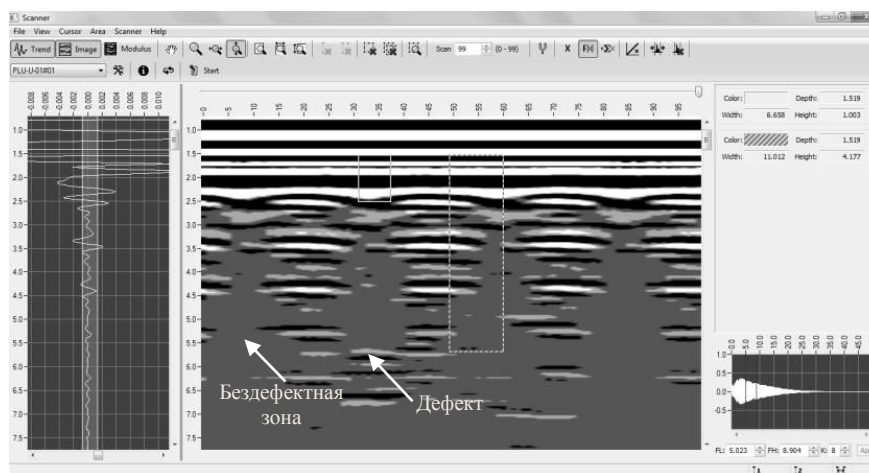


Рисунок 7. Акустическое изображение дефектного участка

На бездефектном участке (рисунок 7) дефектограммы периодически появляется и проседает темная полоса, свидетельствующая о переходе с желоба между ребрами на ребро. Отсутствие темной полосы на глубине 2,3 мм в

зоне проседания свидетельствует об отсутствии непропая в зоне пайки ребра.

На дефектном участке дефектограммы наблюдается появление темной полосы на глубине 2,3 мм, соответствующей толщине внутренней стенки на ребре, где закладывается

припой и проходит паяный шов. Данные сигналы (темные полосы) свидетельствуют о наличии дефекта типа непропай (рисунок 7).

С целью подтверждения результатов лазерно-ультразвуковой диагностики были проведены металлографические исследования (рисунок 8).

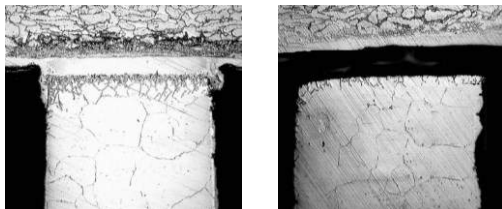


Рисунок 8. Шлифы с качественной пайкой (слева) и непропаем (справа)

Результаты, полученные в ходе проведения исследований с использованием методики лазерно-ультразвуковой диагностики качества паяных соединений камер ЖРД, показали что данный метод является наиболее пригодным методом неразрушающего контроля в процессе изготовления и в ходе эксплуатации на заводе-изготовителе ОАО КБХА.

ЛИТЕРАТУРА

1 Рахманин В.Ф., Сагалович В.В. Разработка технологии пайки камер сгорания отечественных ЖРД // Двигатель. 2009. №1(61). С. 34-37.

2 Астрединова Н.В. Производственный контроль качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. 2012. Ч. IV. С.122-124

3 Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль: учебник для специалистов первого и второго уровней квалификации. М.: Азимут, 2006. 208 с.

4 ГОСТ 17325-79 Пайка и лужение. Основные термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1989. 22 с.

5 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.

6 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.

7 Карабутов А.А., Керштейн И.М., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б. Распространение широкополосных акустических сигналов в однонаправленных волокнистых композитах // Вестник МУ. 1997. № 5. С. 47.

REFERENCES

1 Rakhmanin V.F., Sagalovich V.V. Soldering technology combustors domestic rocket engine. *Dvigatel'*. [Engine], 2009, no. 1(61), pp. 34-37. (In Russ.).

2 Astredinova N.V. Production quality control solder joint chambers of rocket engines. XLI Nedelia nauki SPbGPU. [XLI Weeks of science SPbGPU: materials of scientific-practical conference with international participation], 2012, part. IV, pp 122-124. (In Russ.).

3 Ermolov, I.N., Ermolov M.I. Ul'trazvukovoi kontrol': uchebnik dlia spetsialistov pervogo i vtorogo urovnei kvalifikatsii [Ultrasonic testing: a textbook for professionals first and second skill levels]. Moscow, Azimut, 2006. 208 p. (In Russ.).

4 GOST 17325-79 Paika i luzhenie. Osnovnye terminy i opredeleniia [Soldering and tinning. Basic terms and definition-ing], Moscow, Izd-vo standartov, 1989. 22 p. (In Russ.).

5 Karabutov A.A., Matrosov M.P., Podymova N.B., Pyzh V.A. Im-pulse acoustic spectroscopy with a laser source of the sound. *Akusticheskii zhurnal*. [Acoustic journal], 1991, vol. 37 (2), pp. 311. (In Russ.).

6 Karabutov A.A., Pelivanov I.M., Podymova N.B., Skipetrov S.E. Measurement of the optical characteristics of scattering media optical-to-acoustic method. *Kvantovaia elektronika*. [Quantum electronics], 1999, vol. 29, no. 3, pp. 215. (In Russ.).

7 Karabutov A.A., Kershtein I.M., Pelivanov I.M., Podymova N.B. Spread of broadband acoustic signals in one sonapravlennykh fibrous composites. *Vestnik MU*. [Bulletin of MU], 1997, no. 5, pp. 47. (In Russ.).