

В. А. БЫЧЕНОК, И. Ю. КИНЖАГУЛОВ

ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТОНКОСТЕННЫХ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАМЕР ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Представлен пример применения метода лазерно-ультразвукового контроля качества паяных тонкостенных изделий ракетно-космической техники. Достоверность полученных в ходе эксперимента данных подтверждена результатами прочностных гидроиспытаний.

Ключевые слова: лазерно-ультразвуковой контроль, лазерное излучение, неразрушающий контроль, пайка.

Тонкостенные конструкции, получаемые при помощи пайки, широко применяются в ракетном двигателестроении. Современные жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) в России представляют собой конструкции, наружная и внутренняя стенки которых соединены при помощи пайки. С увеличением удельного импульса двигателей, и следовательно с повышением рабочего давления внутри камер и в межстенном пространстве, возросла необходимость контроля таких соединений. Данный вопрос пытались решить с помощью различных методов контроля: как разрушающих, так и неразрушающих. Использование первых экономически неэффективно, поэтому выбор был сделан в пользу неразрушающих методов контроля (МНК). Использование традиционных методов неразрушающего контроля (магнитного, рентгеновского и ультразвукового) по разным причинам не привело к положительному результату. В качестве альтернативы был предложен лазерно-ультразвуковой метод контроля, с использованием которого был проведен ряд экспериментов по оценке качества паяных соединений сопел камер ЖРД 14Д23 ракеты-носителя „Союз 2-1-Б“.

Характерными дефектами паяных соединений камер сгорания ЖРД являются неспаи (непропаи). Минимальный размер площади неспая (непропая), который в соответствии с конструкторской документацией (КД) необходимо выявлять, составляет 1 мм^2 . Величина раскрытия неспая и непропая точно не установлена, однако, по предварительным оценкам, она может составлять для неспая порядка нескольких микрометров, а для непропая — нескольких десятков микрометров.

Современные ультразвуковые методы с возбуждением ультразвуковых волн пьезоэлектрическими преобразователями не могут применяться для неразрушающего контроля паяных соединений камер сгорания ЖРД. Это связано со следующими факторами [1]:

1) длительность ультразвукового импульса составляет порядка $\Delta t = 0,1—0,5$ мкс, что соответствует продольному разрешению $\Delta l = 0,6—3,0$ мм;

2) глубина „мертвой зоны“ составляет не менее $0,8—1,0$ мм;

3) диаметр зондирующего импульса (ультразвукового луча) более 4 мм.

Для возможности акустического контроля необходимо, чтобы метод характеризовался следующими показателями:

1) малая длительность ($\Delta t = 5—20$ нс) зондирующего ультразвукового импульса, что приводит к повышению продольного пространственного разрешения $\Delta l = 5—10$ мкм;

2) малый диаметр зондирующего пучка $0,6—1$ мм, что позволяет повысить чувствительность контроля на эффективной площади неоднородности;

3) апериодичность зондирующего импульса, которая дает практическое отсутствие „мертвой зоны“ и позволяет определять акустический импеданс неоднородности. Последнее позволяет различить, например, расслоение (непропай или неспай).

Указанные характеристики позволяют сделать вывод о возможности применения лазерно-ультразвукового метода контроля для оценки качества паяных соединений сопел камер ЖРД [2].

Эксперимент. Для проведения экспериментальных исследований была предоставлена вырезка из сопла верхнего в подколлекторной зоне (далее — фрагмент), предварительно была подвергнута гидроиспытаниям с избыточным давлением 900 атм. Эти испытания могли привести к появлению локальных отрывов в местах пайки ребер. Поэтому было сделано предположение о том, что при лазерно-ультразвуковом контроле будут выявляться как собственно неспай, так и отрывы в паяных соединениях ребер, появившиеся при гидроиспытаниях. Указанные несплошности не различить при лазерно-ультразвуковом контроле, поскольку их акустическая картина идентична. При этом и глубина залегания этих несплошностей будет примерно одинаковой и будет соответствовать толщине ребер внутренней стенки между канавками перетока ($\approx 2,3 \pm 0,1$ мм).

Порядок эксперимента:

— разметка по внутренней поверхности кольцевой зоны в районе перемычки на участки (с 1-го по 14-й) длиной по 40 мм;

— лазерно-ультразвуковой контроль с использованием двух типов преобразователей (ПЛУ-6Ц-01 и ПЛУ-15Ц-01), регистрация результатов контроля в виде исходных файлов;

— анализ акустических изображений (с использованием исходных файлов и программных средств лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М) контролируемых участков и определение мест возможных неспаев;

— уточнение местоположения возможных неспаев;

— гидравлические испытания фрагмента. Испытания проводятся ступенчато (800, 900, ..., 1100 атм) до полного разрушения фрагмента. На каждой ступени ведется визуальный контроль предполагаемых мест неспаев с измерением размеров выпучины;

— оптический контроль разрушенных мест с использованием микроскопа МБС-2 и последующие металлографические исследования на шлифах.

В результате испытаний были выявлены места предполагаемых неспаев (несплошностей), которые располагались на участках № 1, 12 и 13.

Результаты контроля, проведенного с использованием преобразователя ПЛУ-15Ц-01, имеющего диаметр зондирующего импульса 0,5 мм, показали следующее.

В местах, в которых отсутствовали неспаи (несплошности), типовая акустическая картина в зоне между канавками перетока со стороны сопла верхнего имеет вид, представленный на рис. 1 (сканирование при контроле проводилось поперек ребер).

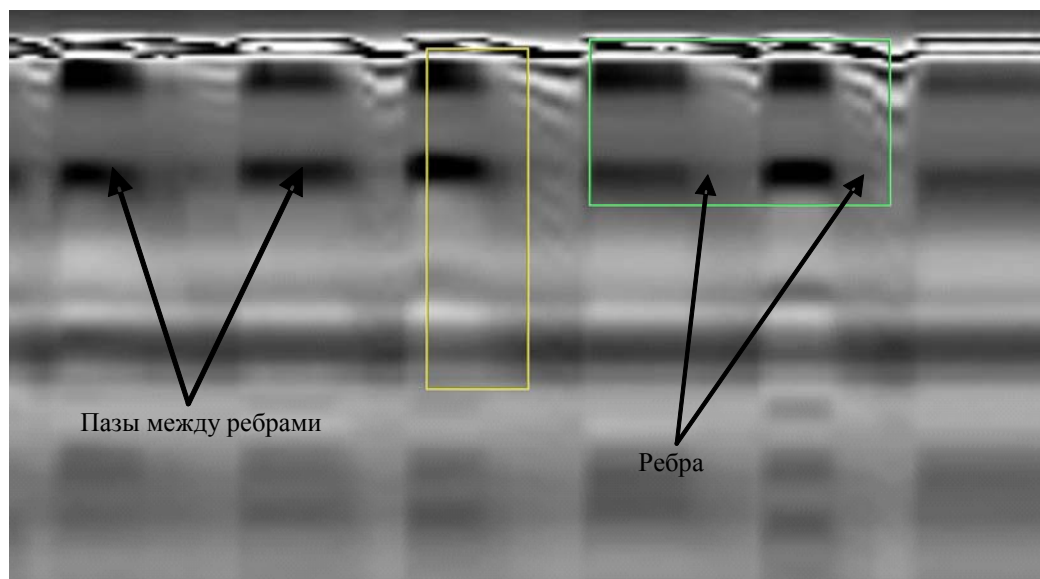


Рис. 1

Между ребрами внутренней и кольцом наружной стенок фрагмента должно присутствовать сплошное паяное соединение. В этом случае заметного отражения от границы паяного соединения не происходит, и на акустическом изображении отсутствуют сигналы, длительность которых соответствует времени пробега от поверхности до внутренней стенки по ребру ($2,3 \pm 0,1$ мм). При нахождении преобразователя над пазом внутренней стенки, а также над канавкой перетока наблюдаются отражения, приходящие с глубин, соответствующих их толщине — 0,8 и 1,4 мм соответственно (рис. 2).

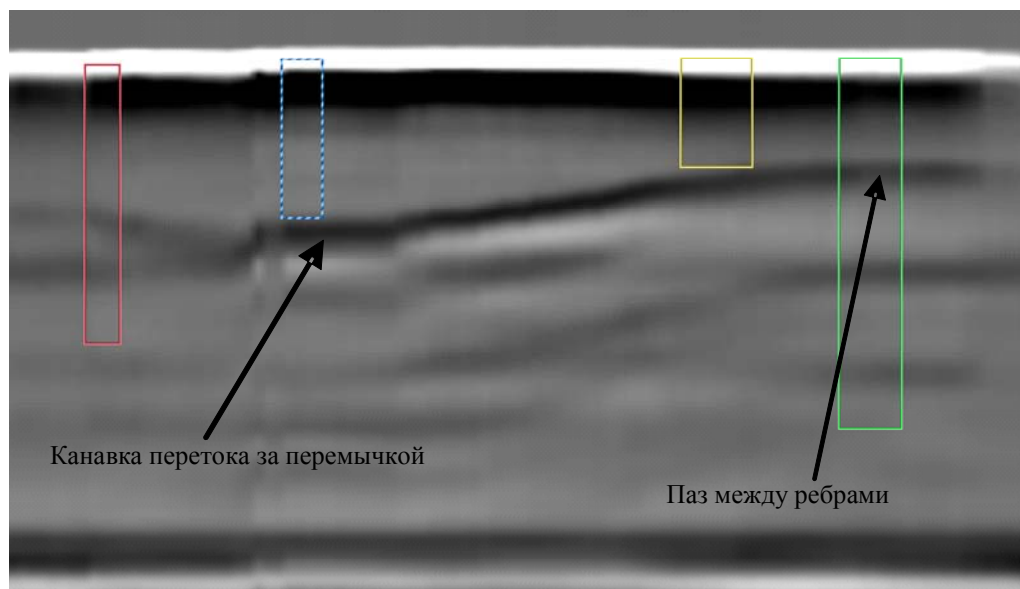


Рис. 2

Как видно из рис. 1, в зонах с регулярной структурой отсутствуют сигналы, соответствующие отражениям от паяного соединения, что должно свидетельствовать об отсутствии неспаев.

На участках № 1, 12, 13 были выявлены места, на акустическом изображении которых присутствовали отражения с глубины $\approx 2,3$ мм. Это свидетельствовало об отражении акустического сигнала от свободной границы ребра внутренней стенки сопла (рис. 3). Данный вид акустического изображения соответствует наличию неспая или несплошности.

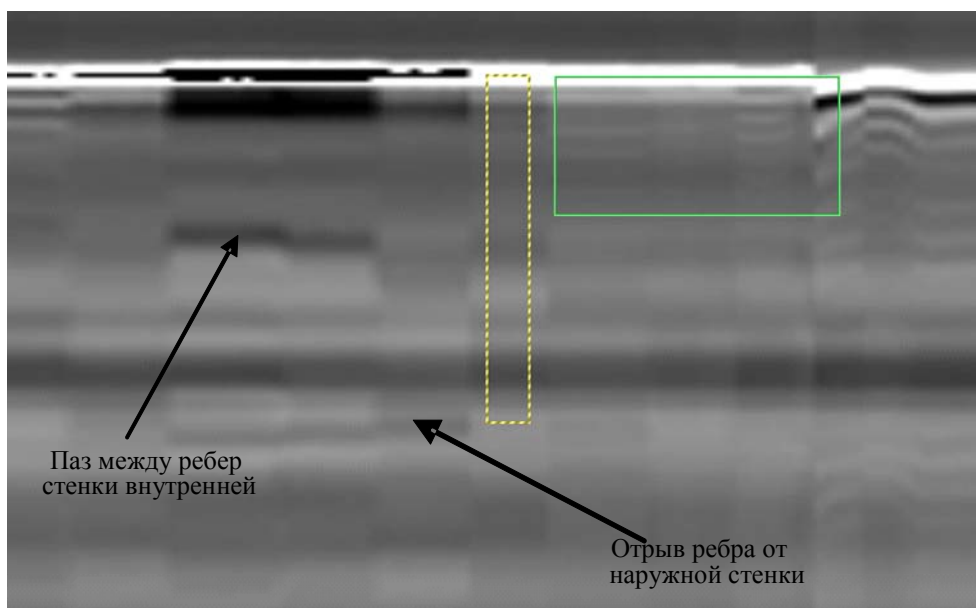


Рис. 3

Для правильной интерпретации результатов визуального контроля выявленных мест предполагаемых неспаев было необходимо окрасить области неспаев (несплошностей), образовавшихся при предварительных испытаниях. С этой целью в пазы фрагмента была залита проникающая красная краска, применяемая при контроле методом Ц1 [3], с последующей сушкой и фиксацией окраски путем выдержки фрагмента в печи при 150 °С.

Прочностные гидроиспытания проводились на специальном стенде в следующем режиме: нагружение фрагмента давлением 800 атм, выдержка 5 мин, сброс давления и внешний осмотр вырезки с контролем предполагаемых мест неспаев путем измерения расширения выпучин [4].

Процесс нагружения повторялся с повышением давления на 100 атм выше предыдущего до разрушения фрагмента.

При давлении 1100 атм произошло разрушение фрагмента в выделенной зоне предполагаемого неспая на участке № 13. После гидроиспытаний было произведено вскрытие разрушенного участка (рис. 4), исследования проводились с использованием микроскопа МБС-2. Между канавками переточа со стороны высокого давления обнаружены:

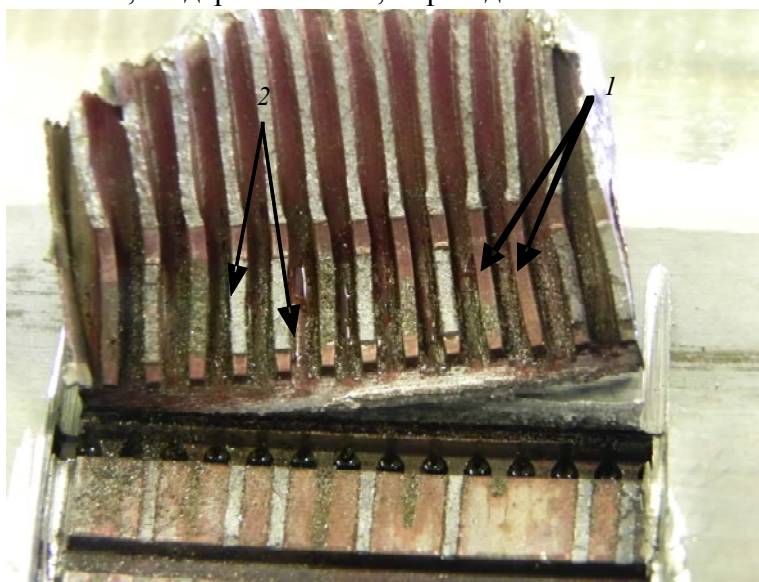


Рис. 4

— неспая двух ребер, положение которого точно соответствовало положению предполагаемого неспая, обнаруженного при лазерно-ультразвуковом контроле (рис. 4, 1);

— места разрушения паяного соединения по четырем ребрам, образовавшиеся при автономных двигательных испытаниях (2);

— места разрушения паяного соединения по семи ребрам, образовавшиеся при данных гидроиспытаниях (1100 атм).

Анализ полученных результатов дает возможность сделать вывод, что чувствительность лазерно-ультразвукового метода с использованием дефектоскопа УДЛ-2М позволяет обнаруживать неспаи (непропаи) в соединениях по ребрам сопла верхнего в зоне подколлекторного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
2. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 4. Акустическая тензометрия. В. А. Анисимов, Б. И. Каторгин, А. Н. Куценко и др. Магнитопорошковый метод контроля. Г. С. Шелихов. Капиллярный контроль. М. В. Филинов. М.: Машиностроение, 2004. 736 с.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 1. Ф. Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль. Ф. Р. Соснин. Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2006. 560 с.

Сведения об авторах

Владимир Анатольевич Быченко — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;

E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru

Игорь Юрьевич Кинжагулов — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;

E-mail: kinzhiki@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.