

УДК 620.179.16

Ю. Г. Безымянный<sup>1</sup>, В. Г. Боровик<sup>1</sup>, М. И. Галась<sup>2</sup>,  
В. И. Трефилов<sup>1</sup>, Г. А. Фролов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича, Київ

<sup>2</sup>Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

**Исследование возможностей ультразвукового  
контроля элементов двигателя первой ступени  
ракеты-носителя «Зенит».**  
**2. Результаты ультразвуковой диагностики  
дефектности двигателя**

*Надійшла до редакції 11.03.01*

Розроблено принципи ультразвукової діагностики наявності проміжку у стикі кінцевого зварного з'єднання на зібраному двигуні першого ступеня ракети-носія «Зеніт» та вибрано методи вимірювань діагностичних параметрів. Наведено методику їхньої реалізації на базі оригінального апаратного комплексу для ультразвукових вимірювань, а також результати експериментальних вимірювань вибраних діагностичних параметрів, що отримані на зразках, виготовлених з натуральних двигунів. Проведено аналіз отриманих результатів і показано принципову можливість вирішення поставленої задачі.

**ПРИНЦИПЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ  
СОСТОЯНИЯ ЗАЗОРА В СТЫКЕ СВАРОЧНОГО  
СОЕДИНЕНИЯ «ГАЗОГЕНЕРАТОР — ПРОСТАВКА  
ТУРБИНЫ»**

Ранее [2] были установлены три группы диагностических параметров, изменение величин которых свидетельствуют о наличии дефектов в двигателе. Однако знание диагностических параметров еще не достаточно для решения поставленной задачи. Кроме этого, необходимо правильно выбрать условия (параметры) возбуждения ультразвуковых колебаний и прозвучивания контролируемого участка, а также снять полезную информацию. Анализ общей постановки задачи и физической модели объекта контроля в ее акустической интерпретации позволяет перейти к принципам практической реализации измерений. При этом решающим для достижения цели является обеспечение максимальной чувствительности диагностического параметра к нали-

чию дефекта и сведение к минимуму дестабилизирующих этот параметр и не связанных с наличием дефекта факторов.

Максимальная чувствительность диагностического параметра обеспечивается путем формирования акустического поля на характерных частотах зондирующего сигнала: низких частотах (НЧ) для направляющего кольца в целом, высоких частотах (ВЧ) — для его элементов.

На высоких частотах для обеспечения этого условия при измерении выбранных диагностических параметров необходимо использовать импульсно-фазовые ультразвуковые методы (УЗ), методы неразрушающего контроля (НК) [5], а на низких — резонансные методы [4]. Поэтому для измерения скорости распространения упругой волны в направляющем кольце и анализе параметров волн, отраженных от элементов направляющего кольца, был выбран эхо-импульсный метод с высокой разрешающей способностью по фронту волны (малой по

сравнению со временем распространения волны между элементами направляющего кольца длительностью импульса упругих колебаний) [4]. При измерении фазы и амплитуды отраженной упругой волны был выбран метод интерференции импульсов [5], а при измерении параметров спектра собственных упругих колебаний — метод вынужденных колебаний [4]. Аппаратура для реализации эхо-импульсного метода должна обеспечивать: в излучении — возможность формирования зондирующего сигнала в виде периодической последовательности одиночных и парных радиоимпульсов с возможностью регулировки их параметров (период следования, длительность, частота заполнения, расстояние между импульсами) в широких пределах области средних частот УЗ-диапазона, а в приеме — измерение параметров амплитудно-фазовой структуры сигнала в соответствующих диапазонах частот и интервалах времени. При аппаратурной реализации метода вынужденных колебаний необходимо обеспечить: в излучении — возможность регулировки частоты зондирующего сигнала в широких пределах области низких частот УЗ-диапазона, а в приеме — измерение амплитуд и частот спектра.

Требования по обеспечению стабильности параметров АП в процессе интроскопии ОК могут быть сформулированы в соответствии с описанием акустического поля в контролируемом участке. Так, при минимизации дестабилизирующих факторов в одном изделии следует учесть исходное требование в постановке задачи: необходимость проведения НК без разборки двигателя. Это условие приводит к тому, что источники и приемники упругих колебаний должны располагаться на внешней поверхности контролируемого участка двигателя, а между источником и приемником колебаний, с одной стороны, и направляющим кольцом, с другой, должен находиться тот или иной участок газогенератора, при прохождении упругой волны которого изменение параметров акустического поля должно быть стабильным и прогнозируемым. Поэтому устранение дестабилизирующих факторов может быть достигнуто при выполнении трех основных условий: стабильности параметров источника упругих колебаний, однородности и стабильности акустических свойств материала, по которому проходит упругая волна от источника упругих колебаний до объекта контроля и от объекта до приемника колебаний и стабильности граничных условий вне объекта и в объекте контроля, если они не связаны с проявлением дефекта.

Так как для рассматриваемой модели фактором нестабильности акустического поля в контролируемом участке на пути к объекту контроля могут

служить сварной шов и околошовные зоны в материале газогенератора и проставки турбины, то их необходимо исключить при выборе пути прохождения упругих волн через газогенератор. На первом этапе исследований можно принять, что нестабильность граничных условий несущественно влияет на параметры акустического поля.

#### АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫБРАННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Разработанные принципы неразрушающего УЗ-контроля были реализованы в лабораторных условиях на базе аппаратного измерительного комплекса, разработанного в Институте проблем материаловедения НАН Украины [1], а также специальной методики измерений.

Исходным условием решения поставленной задачи являлось обеспечение возможностей свободного доступа к местам ввода и снятия упругих колебаний и прозвучивания контрольного участка без разборки двигателя. Поэтому предлагаемые места для размещения УЗ-преобразователей были определены в результате осмотра двигателя, смонтированного на ракетоносителе. Было установлено, что УЗ-преобразователи могут быть расположены практически в любом месте наружной поверхности трубоподобной конструкции, включающей концевой сварной стык «газогенератор—проставка турбины». Однако анализ особенностей контролируемого элемента двигателя показал, что вести прозвучивание через сварной шов и вблизи него нецелесообразно. Во-первых, для сварного шва характерна неравномерность акустических характеристик; во-вторых, скорость волн зависит от напряженного состояния материала, и остаточные напряжения вблизи сварного шва вызовут неинформативные искажения картины акустического поля в исследуемой детали. Поскольку стабилизация факторов, не связанных с наличием дефекта, является критерием выбора мест ввода и приема упругих колебаний, то для ввода УЗ-импульсов и их приема были выбраны торцевые поверхности, смежные с  $\varnothing D$  (рис. 1).

Учитывая тот факт, что объект контроля в контролируемом участке вполне локализован, для отработки методики УЗ-контроля из подлежащих контролю элементов натурального двигателя были вырезаны два вида образцов концевой сварного стыка. Первый представлял собой кольцо высотой 90 мм, а второй — полосу шириной 25 мм, вырезанную из образца первого вида вдоль образующей. С торцов  $T$  образцы были обточены на токарном станке. Для ввода и приема упругих колебаний использовалась

левая торцевая поверхность  $T$  (рис. 1). Изначально в образцах имелся зазор между направляющим кольцом и проставкой турбины (дефект отсутствовал). Наличие дефектов моделировалось введением в зазор усилием руки стального клина шириной 15 мм, имитирующего исчезновение зазора. Стабильность параметров источника упругих колебаний обеспечивалась выбором метрологических характеристик используемой изучающей аппаратуры и условиями стабилизации акустического контакта.

В работе исследовались две разновидности акустического поля: бегущая упругая волна и установившиеся упругие колебания. Используемая аппаратура позволила реализовать на высоких частотах эхо-импульсный метод прозвучивания в диапазоне частот 2—6 МГц, а на низких — метод вынужденных колебаний в диапазоне частот 100—500 кГц.

При измерениях в ВЧ-диапазоне скорости упругой волны длительность зондирующего радиоимпульса была выбрана меньше, чем время распространения упругой волны между элементами образца, дающими отражение сигнала, чтобы получить разрешение между временем их прихода и анализировать характеристики сигнала, отраженных от каждого элемента детали независимо.

При изменении фазы и амплитуды сигнала длительность зондирующего импульса была выбрана немного большей, чем время распространения упругой волны в направляющем кольце. При этом сигналы, отраженные от свободного торца кольца и от радиусов, образующих его заделку, накладывались друг на друга (суммировались), а суммарное акустическое поле в месте приемного преобразователя определялось, кроме состояния торца, моментом времени и волновыми расстояниями между отражающими поверхностями, что позволяло фиксировать изменение фазы сигнала. Для усиления эффекта эхо-сигналы от торцевой поверхности кольца сопоставлялись с эхо-сигналами от нечувствительных к наличию зазора поверхностей. При изменении частоты заполнения радиоимпульса в указанном диапазоне частот происходило изменение фазы, с которой эти сигналы приходят в приемный датчик, и наблюдались ряды частот, при которых эти сигналы полностью вычитаются, давая нулевую амплитуду сигнала, или складываются, давая максимальную амплитуду сигнала. Степень этого вычитания или сложения зависит от граничных условий на свободном торце кольца. Проводился анализ амплитудно-фазовой структуры эхо-сигнала как функции частоты заполнения зондирующих импульсов. Исследовалось влияние клина, который вводился в зазор, на уровни и фазу эхо-сигналов от отражающих элементов кольца.

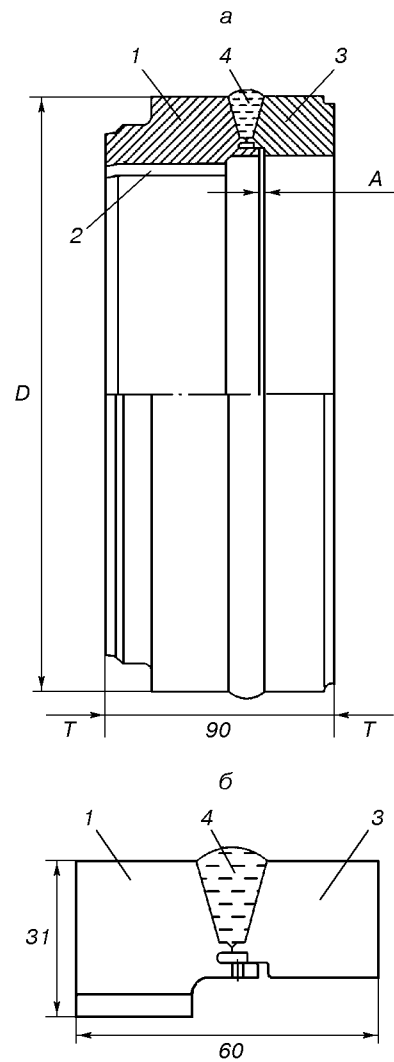


Рис. 1. Образцы для экспериментальных исследований: *a* — кольцевой образец, включающий концевой стык сварного соединения «газогенератор—проставка турбины»; *б* — элемент концевого стыка

При измерениях в НЧ-диапазоне исследовалась амплитуда упругих колебаний установившегося акустического поля как функции частоты упругих колебаний на поверхность направляющего кольца, в частности интерференционная картина акустического поля на частоте резонанса по высоте направляющего кольца, на которой упругие колебания на кольце имеют наибольшую амплитуду. При этом источник упругих колебаний устанавливался в произвольном месте на левом (рис. 1) торце  $T$  образца, а приемник перемещался по окружности торцевой поверхности, смежной с  $\varnothing D$ . Исследовалось влияние введения клина в зазор на уровень акустического поля в различных точках образца.

**РЕЗУЛЬТАТЫ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Основная задача экспериментальных исследований состояла в определении относительной чувствительности выбранных диагностических параметров к наличию дефекта и оценке возможности выявления информативных изменений этих параметров на фоне мешающих факторов.

В ВЧ-области экспериментально были выделены и идентифицированы сигналы от всех элементов направляющего кольца корпуса газогенератора (рис. 2), определены фазовые соотношения между ними, измерена скорость волны. По этим данным были рассчитаны собственные частоты продольных колебаний по толщине направляющего кольца. Установлено, что в этой области погрешность экспериментального определения собственных частот колебаний кольца не превышала 1 %, исключая отдельные аномальные зоны. При введении клина на всех частотах наблюдалось изменение фазы сигнала на 3 %, а вычитание (или суммирование) происходило не полностью. При этом изменение уровня эхо-сигнала достигало 40 %.

Результаты экспериментов на упругой ВЧ-волне представлены на рис. 3, а. По оси абсцисс отложена частота заполнения зондирующего радиоимпульса, а по оси ординат — амплитуда принимаемого сигнала. Отдельно нанесены точки, на которых суммы амплитуд двух отраженных сигналов (см.

рис. 2, сигналы 3 и 4) достигают максимальных и минимальных значений при свободном и заземленном торце. На рис. 3, б показаны погрешности результатов измерений для случая синфазного суммирования сигналов при свободном торце.

Из приведенных зависимостей видно, что заземление торца направляющего кольца приводит к сдвигу фазы и изменению амплитуды отраженной УВ на всех исследованных частотах. При этом чувствительность каждого диагностического параметра к введению клина превышает погрешность его измерения.

В НЧ-области при свободном торце направляющего кольца, в зависимости от положения излучающего и приемного преобразователей на торце образца, легко фиксировались максимумы и минимумы амплитуды УК, что подтверждает интерференционный характер АП. Введение клина изменяло уровень принимаемого сигнала от 0 до 100 %.

**ВЫВОДЫ**

В результате феноменологического анализа и экспериментальных исследований показано, что фаза и амплитуда бегущей упругой волны, отраженной от торца направляющего кольца, и распределение амплитуд в интерференционной картине установившегося акустического поля могут быть использованы в качестве диагностических параметров на-

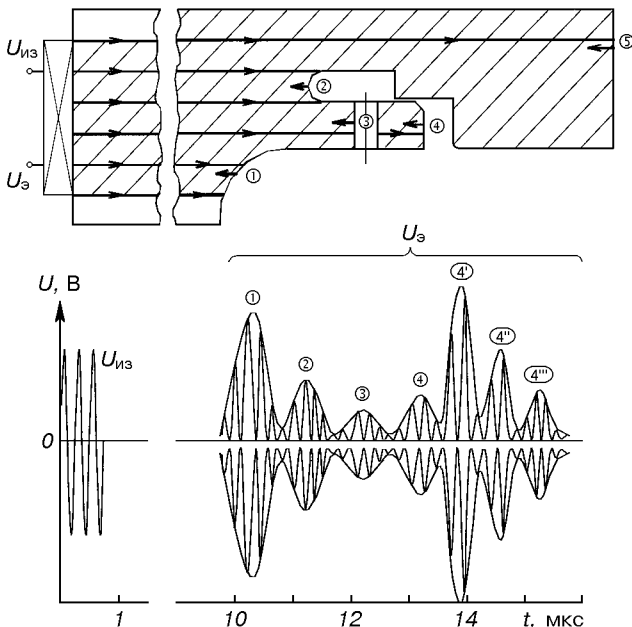


Рис. 2. Осциллограммы сигналов от элементов конца корпуса газогенератора

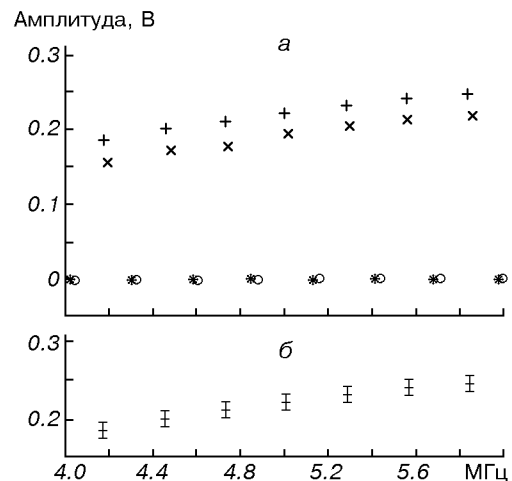


Рис. 3. Результаты экспериментов в высокочастотной области упругой волны: а — измеренные амплитуды (прямые крестики — синфазные сигналы, торец свободен, косые крестики — синфазные сигналы, торец заземлен, звездочки — контрфазные сигналы, торец свободен, кружки — контрфазные сигналы, торец заземлен); б — погрешности измерений для случая синфазного суммирования сигналов при свободном торце

личия зазора в стыке концевого сварного соединения «газогенератор—статор турбины», а сами эти параметры могут быть измерены на собранном двигателе. Таким образом, установлено, что как в низкочастотной, так и высокочастотной областях спектра акустический сигнал несет информацию о наличии зазора в стыке сварного соединения «газогенератор—статор турбины» и доказана принципиальная возможность использования ультразвуковых методов для неразрушающего контроля дефектности двигателя первой ступени ракетносителя «Зенит» без его разборки.

На образцах, изготовленных из реального объекта, показано, что информативное изменение диагностических параметров превышает погрешность измерений за счет дестабилизирующих эти параметры факторов. При переходе к реальному объекту следует ожидать не только усиление маскирующего эффекта полезного сигнала (например, за счет усложнения условий ввода-приема упругих колебаний с поверхности газогенератора или разброса акустических свойств материалов от изделия к изделию), но и положительные эффекты.

Так как клин (вследствие своей формы) очень приблизительно моделирует касание поверхностей направляющего кольца корпуса газогенератора и проставки статора турбины (соприкосновение поверхностей в одной-двух точках), то следует предположить, что в реальных условиях, при взаимодействии торцевой поверхности кольца с проставкой турбины, изменение диагностических параметров, обусловленное наличием дефекта, будет выражено значительно сильнее.

В области низких частот неодинаковая чувствительность по окружности образца связана с тем, что принимаемый сигнал является суммой сигнала от свободного торца направляющего кольца (полезного сигнала) и переотражений внутри образца (помехи). Значительный вклад в эти переотражения вносят плоско-параллельные торцевые поверхности экспериментального образца. Реальное изделие не имеет упомянутых плоско-параллельных поверхностей вблизи области контроля, и поэтому

уровень сигналов переотражения, маскирующих сигналы на собственных частотах колебаний по высоте кольца, будет значительно меньше, и их подавление возможно с помощью аппаратных и методических приемов.

Полученные результаты были использованы при контроле торцевого зазора в соединении генератор—статор турбины на двигателе ракетносителя «Зенит» [3].

1. Безымянный Ю. Г. Контроль за развивающимися дефектами методами измерений коэффициента затухания и скорости распространения ультразвука // *Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций*.—1986.— № 2.—С. 42—48.
2. Безымянный Ю. Г., Боровик В. Г., Галась М. И., Трефилов В. И., Фролов Г. А. Исследование возможностей ультразвукового контроля элементов двигателя первой ступени ракеты-носителя «Зенит». 1. Разработка физической модели объекта контроля // *Космічна наука і технологія*.—2001.— № 5/6.—С. 3—7.
3. Лантратов К., Антипов В. «Зенит» поднимает «Целину» // *Новости космонавтики*.—2000.—№ 4.—С. 17—19.
4. *Неразрушающий контроль: В 5 кн.* — М.: Высш. шк., 1991.—Кн. 2. Акустические методы контроля / Под ред. В. В. Сухорукова.—283 с.
5. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. — М.: Мир, 1972.—238 с.

---

#### FEASIBILITY OF THE ULTRASOUND CHECKING OF THE FIRST-STAGE ENGINE OF THE ZENITH ROCKET CARRIER. 2. RESULTS OF THE ULTRASOUND DIAGNOSTICS OF THE ENGINE DEFECTIVENESS

Yu. G. Bezymyannyi, V. G. Borovik, M. I. Galas, V. I. Trefilov, and G. A. Frolov

We investigate the possibility revealing a gap in the juncture of the terminal welding junction on the assembled first-stage engine of the Zenith rocket carrier by the non-destructive ultrasound checking methods. Principles of ultrasound diagnostics were developed, and methods for measuring the diagnostic parameters were selected. A technique for their realization based on an original apparatus complex for ultrasound measurements is described, as well as some results of the experimental measurements of selected diagnostic parameters which were obtained on samples produced of full-size engines. The analysis of the results obtained shows that the task set can be solved in principle.