

УДК 620.179.16

Ю. Г. Безымянный¹, В. Г. Боровик¹, М. И. Галась²,
В. И. Трефилов¹, Г. А. Фролов¹

¹Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича, Київ

²Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетовськ

**Исследование возможностей ультразвукового
контроля элементов двигателя первой ступени
ракеты-носителя «Зенит».**
**1. Разработка физической модели
объекта контроля**

Надійшла до редакції 11.03.01

Досліджено можливість вирішення за допомогою ультразвукових методів неруйнівного контролю задачі виявлення наявності проміжку у стику кінцевого зварного з'єднання на зібраному двигуні першого ступеня ракети-носія «Зеніт». На основі аналізу конструкції та особливостей структури матеріалів частини двигуна, що підлягає контролю, прийнято критерії його дефектності та розроблено відповідні фізичні моделі об'єкта контролю. Проведено феноменологічний аналіз цих моделей, виявлено відображення частини двигуна, що підлягає контролю, в параметрах акустичних полів та обґрунтовано діагностичні параметри.

ВВЕДЕНИЕ

Неоспоримые преимущества ракеты-носителя «Зенит» отмечены в отзывах многих специалистов, занимающихся ракетно-космической техникой. Например, руководитель Австралийского космического агентства сказал: «Я побывал на всех стартовых площадках всех стран мира. Ничего подобного «Зениту» не видел. Это наивысшее техническое достижение XX века» [2]. Поэтому ракета-носитель «Зенит» является носителем в крупнейшем международном проекте «Морской старт», а также запланировано ее использование для доставки грузов на Международную космическую станцию.

Однако один из запусков ракеты-носителя «Зенит» закончился неудачей. «Зенит» — сложнейшая ракета. Комиссия, расследовавшая аварию, установила, что одной из ее причин могло стать отсутст-

вие зазора в концевом сварном стыке «газогенератор—проставка турбины» двигателя первой ступени. Поскольку разборка, визуальный контроль зазора, сборка и огневые испытания одного двигателя стоят очень дорого, комиссия предложила нескольким институтам Национальной академии наук Украины разработать методы контроля наличия зазора в концевом стыке «газогенератор—проставка турбины» без разборки двигателя.

В данной работе проведено исследование возможности решения поставленной задачи с помощью ультразвуковых (УЗ) методов неразрушающего контроля (НК) и показана принципиальная возможность выявления дефекта на собранном двигателе. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие работы: анализ конструкции и особенностей структуры материалов подлежащего контролю участка двигателя и принятие критериев

его дефектности; построение и анализ его физической модели; выявление отображения дефектов в параметрах акустических полей и обоснование диагностических параметров; разработка принципов УЗ-диагностики и выбор методов измерения диагностических параметров; аппаратно-методическая реализация выбранных методов НК; экспериментальная проверка эффективности УЗ-контроля дефектности контролируемого участка двигателя с помощью предложенных диагностических параметров; анализ полученных результатов с обобщающими выводами.

ОБЪЕКТ КОНТРОЛЯ

При использовании неразрушающего УЗ-контроля одним из определяющих факторов является правильный выбор методов и измеряемых параметров, связанный с особенностями конструкции и структуры материалов объекта контроля, которые формируются и полностью определяются технологическим процессом изготовления двигателя. В поставленной задаче контролируемый участок, сформированный в результате сборки двигателя (рис. 1), представляет собой сварную конструкцию, включающую конечную часть корпуса газогенератора 1 с охлаждающим экраном 2 и проставку турбины 3, которые соединены между собой семислойным сварным швом 4, ограниченным снизу перемычкой. Для взаимной центровки деталей 1 и 3 при сварке корпус газогенератора 1 со стороны его соединения с проставкой турбины 2 имеет направляющее кольцо. Между торцевой поверхностью направляющего кольца и деталью 3 имеется зазор A , ширина которого должна составлять 0.5—1 мм. В направляющем кольце выполнены четыре отверстия $\varnothing 2$ мм для выхода газов при сварке (на рисунке не показаны). Все остальные поверхности элементов конструкции свободны (граничат с воздушной средой). Газогенератор и проставка турбины изготовлены из жаропрочного сплава. Охлаждающий экран 2 представляет собой медную конструкцию, в которой для повышения эффективности охлаждения выполнены продольные канавки.

Характерными особенностями сварных швов являются неоднородность и случайный характер формирования структуры материала. При этом дефекты наблюдаются не только в материале самого сварного шва, но и в материале околошовной зоны свариваемых деталей за счет микропластического деформирования. Эти дефекты тоже имеют случайный и неравномерный характер [7]. Поэтому естественно считать, что такая неоднородная структура

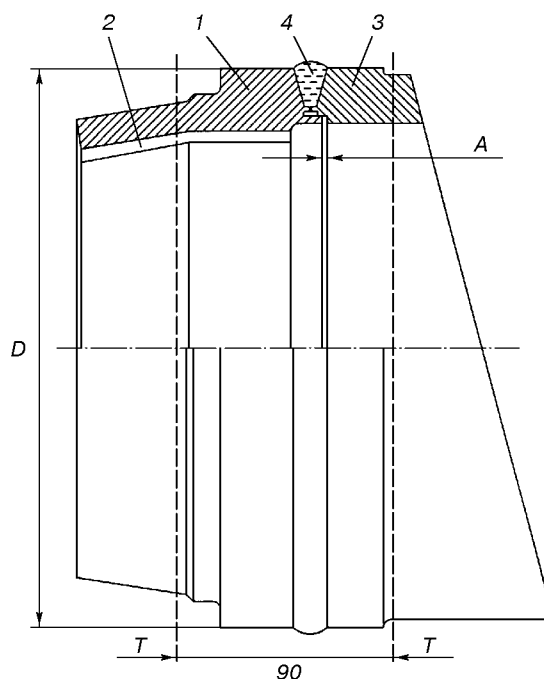


Рис. 1. Концевой сварной стык «газогенератор—проставка турбины» двигателя первой ступени ракеты-носителя «Зенит»: 1 — концевая часть корпуса газогенератора; 2 — охлаждающий экран; 3 — проставка турбины; 4 — сварной шов

тем более имеет место в семислойном шве и близлежащих участках корпуса газогенератора и проставки турбины исследуемой конструкции.

При формировании семислойного сварного шва, особенно его первых слоев, перемычка на дне сварочной ванны может проплавиться, что вызовет неравномерную усадку сварного шва и нарушит центровку деталей 1, 3. Это, в свою очередь, может привести к уменьшению или даже к исчезновению зазора A и соприкосновению торцевой поверхности направляющего кольца газогенератора с ответной поверхностью проставки 3. В этом случае вибрации, возникающие при работе двигателя, могут вызвать «фреттинг-процесс», приводящий при трении к локальному разогреву поверхностей деталей 1 и 3 в точках соприкосновения, что в кислородной среде может вызвать горение, привести к прогару стенок проставки и газогенератора, и в конечном итоге — к аварии.

Таким образом, в бездефектном двигателе торцевая поверхность направляющего кольца и ответная поверхность проставки свободны и разделены зазором. В дефектном двигателе этот зазор исчезает частично или полностью, а рассматриваемые по-

верхности перестают быть свободными, соответственно частично или полностью взаимно защемляются. Поэтому критерием дефектности двигателя следует считать исчезновение зазора A вследствие нарушения технологии сварки.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛИРУЕМОГО УЧАСТКА ДВИГАТЕЛЯ

Как было отмечено, непосредственный визуальный контроль наличия дефекта на собранном двигателе невозможен. Однако конструкционные и структурные изменения, сопровождающие появление дефекта, проявляются в изменении физических свойств объекта контроля. В связи с этим построим и проведем анализ физической модели контролируемого участка двигателя.

В поставленной задаче физическую модель целесообразно строить как отражение конструкции и структуры материалов ее элементов, а состояние элементов такой модели и его изменение в процессе изготовления и эксплуатации контролируемого участка двигателя можно описывать в рамках механики сплошных сред [8].

На основании сказанного физическую модель бездефектного контролируемого участка двигателя можно представить как систему четырех взаимосвязанных физических тел: участка корпуса газогенератора 1 , проставки турбины 3 , охлаждающего экрана 2 и сварного шва 4 , которые взаимодействуют между собой по общим поверхностям (рис. 1). Свойства этих тел определяются характеристиками упругости и инерции материалов, а состояние описывается внутренними статическими полями напряжений и деформаций. Будем считать, что корпус газогенератора и проставка турбины изготовлены из одного жаропрочного сплава с одинаковыми физико-механическими свойствами по всему объему, а макроскопических напряжений в материалах каждого тела до их соединения не было (или были несущественными). После сварки на свободных поверхностях напряжения остаются равными нулю. Вдали от сварного шва материал этих тел сохранил одинаковые физико-механические свойства (рис. 2). Однако вблизи сварного шва (примем размеры этих зон 1_1 и 3_1 порядка размеров самого шва) материал приобрел неоднородную структуру, и его физико-механические свойства будут зависеть от координат рассматриваемых точек. Поскольку формирование структуры обусловлено случайными факторами, то характер этой зависимости неизвестен. Кроме того, в околошовных зонах появились поля остаточных напряжений, также имеющие слу-

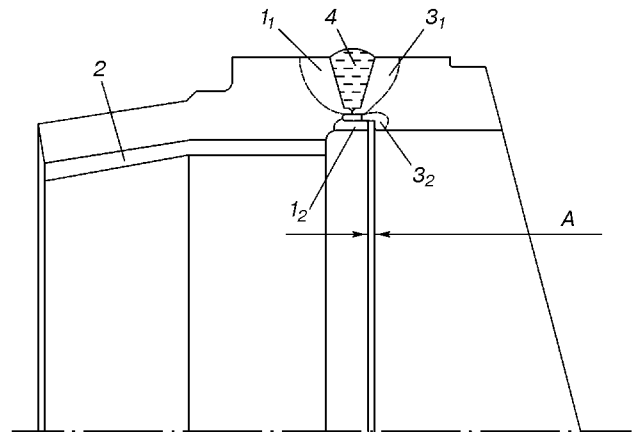


Рис. 2. Физическая модель контролируемого участка двигателя: $1_1, 3_1$ — зоны остаточных напряжений в корпусе газогенератора и проставки турбины вблизи сварного шва 4 ; $1_2, 3_2$ — зоны напряженно-деформированного состояния в материале газогенератора и проставки турбины, возникающие в дефектном двигателе при соприкосновении соответствующих поверхностей, в частности, при исчезновении зазора A

чайный и неравномерный характер [7]. Из тех же соображений неизвестно распределение физико-механических свойств и полей остаточных напряжений по объему сварного шва.

В физической модели дефектного контролируемого участка двигателя сохраняются те же четыре взаимосвязанных физических тела с теми же физико-механическими свойствами, однако число связей между этими элементами увеличится при исчезновении зазора A , когда торец направляющего кольца упрется в ответную поверхность проставки турбины. При этом возникнет силовое взаимодействие между кольцом и проставкой, приводящее к статическим механическим напряжениям в направляющем кольце газогенератора и близлежащих к нему участках проставки турбины. В результате на контактных поверхностях появятся напряжения, что приведет к изменению напряженно-деформированного состояния близлежащих участков 1_2 и 3_2 этих элементов. Поэтому решение задачи будет заключаться в определении механического состояния направляющего кольца и (или) ответной части проставки турбины. Поскольку взаимные усилия воздействия одного элемента на другой одинаковы, то уровень напряжений в направляющем кольце корпуса газогенератора будет выше в силу его формы. Следовательно, в качестве объекта контроля будем рассматривать направляющее кольцо корпуса газо-

генератора, т. к. его состояние более чувствительно к наличию дефекта.

АКУСТИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО УЧАСТКА ДВИГАТЕЛЯ

Механическое состояние объекта контроля можно описывать не только статическим, но и динамическим (в частности акустическим) полем напряжений и деформаций и контролировать по изменению тех или иных параметров генерируемого в объекте акустического поля [9]. При использовании акустических полей поставленная задача может быть решена в рамках динамической теории упругости [4]. В этом случае остаются справедливыми рассмотренные физические модели дефектного и бездефектного контролируемого участка. При этом для материалов, рассматриваемых в этих моделях физических тел, мерами упругости будут выступать скорости распространения упругих волн, инерции — плотность, а неоднородности — коэффициенты затухания упругих волн [4].

Проанализируем закономерности формирования акустического поля в объекте контроля, связанные с проявлением дефектности участка двигателя. Если поле сформировано, то его параметры будут определяться характеристиками источника упругих колебаний, акустическими характеристиками материала и граничными условиями [5].

В качестве источника упругих колебаний можно рассматривать упругую волну, падающую со стороны корпуса газогенератора. Ее параметры задаются условиями возбуждения упругих колебаний, зависят от условий распространения до объекта контроля и не связаны с наличием дефекта. Если параметры источника упругих колебаний стабильны, то они, естественно, не влияют на стабильность параметров акустического поля в объекте.

Акустические характеристики, являясь проявлением физических свойств, отражают состояние материала. Если они стабильны, то тоже не будут влиять на стабильность параметров акустического поля в объекте. Одна из них, скорость распространения упругих волн, чувствительна к изменению напряжений в материале [3]. Поэтому изменение напряженного состояния направляющего кольца при появлении дефекта приводит к изменению скорости волны, что отразится в акустическом поле на распределении фаз его параметров. Сама же скорость распространения волны в материале направляющего кольца может служить самостоятельным диагностическим параметром дефектности контролируемого участка двигателя.

Влияние граничных условий на характеристики акустического поля обусловлено формой исследуемого объекта и волновыми размерами его элементов. В этом плане направляющее кольцо, в зависимости от его волнового размера, можно рассматривать и как акустический волновод — геометрические размеры направляющего кольца значительно больше длины упругой волны, и как резонатор — длина волны одного порядка с геометрическими размерами кольца [9]. Второе условие достигается на низкочастотном (НЧ) участке УЗ-диапазона, а первое — при более высоких частотах (ВЧ) УЗ-диапазона.

При волноводном распространении упругой волны на ВЧ-участке УЗ-диапазона для контроля наиболее эффективно используется акустическое поле в виде бегущей упругой волны [6]. В рассматриваемом случае его можно представить как сгусток УЗ-энергии, возбуждаемый расположенным на поверхности газогенератора источником упругих колебаний. Этот сгусток УЗ-энергии распространяется через внутренний объем газогенератора до направляющего кольца, проходит через него, отражается от торца кольца и по этому же пути возвращается обратно до приемника упругих колебаний, расположенного на поверхности газогенератора. Параметры сгустка будут зависеть от координат и времени. При малой (по сравнению с расстоянием между элементами направляющего кольца) протяженности сгустка УЗ-энергии можно получить различные во времени отраженные акустические сигналы от всех элементов этой концевой части корпуса газогенератора. Фазы и уровни этих сигналов связаны с взаимным расположением отражающих элементов, напряженным состоянием материала и условиями на поверхности отражения (закреплена/свободна). Изменение скорости упругой волны в направляющем кольце приведет к дополнительному изменению фазы волны. Кроме того, при зажатии направляющего кольца изменяется акустическая нагрузка на него, что приводит к изменению условий отражения/прохождения упругой волны на его торцевой поверхности: на 180° изменяется фаза напряжения в отраженной упругой волне и уменьшается коэффициент ее отражения от торца за счет оттока энергии упругих колебаний в проставку турбины [5]. Таким образом, кроме скорости волны диагностическими параметрами дефектности контролируемого участка могут служить фаза падающей и отраженной от торцевой поверхности кольца волны и уровень отраженной волны.

На низких частотах обычно используется акустическое поле в виде суперпозиции прямой и переотраженных от граничных поверхностей непрерыв-

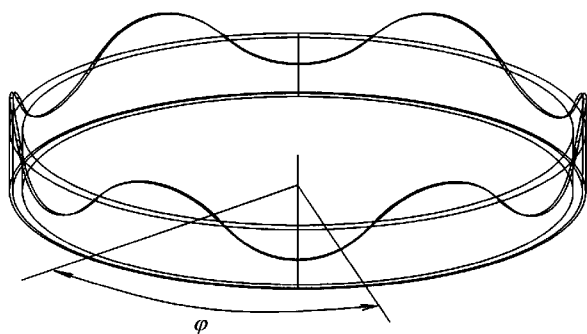


Рис. 3. Интерференционная картина ультразвуковых колебаний в направляющем кольце газогенератора

ных во времени упругих волн. При этом в объекте контроля формируется интерференционная картина акустического поля. Пример такой картины для рассматриваемого случая показан на рис. 3. Эта картина характерна для данного элемента при каждом виде граничных условий, своеобразна на каждой частоте и наиболее ярко проявляется при определенных волновых размерах контролируемого объекта, что отражается в спектрах собственных продольных, поперечных и изгибных механических колебаний [1]. Поэтому величины и местоположение характерных частот спектра собственных колебаний направляющего кольца, в силу изменения фаз и уровней отдельных упругих волн, обусловленного наличием дефекта, будут чувствительны к условиям на границах этого элемента и также могут быть диагностическими параметрами состояния его торца, т. е. «наличия/отсутствия» зазора A .

Таким образом, при использовании обоих видов акустических полей можно выделить три группы диагностических параметров, изменения величин которых будут свидетельствовать о наличии дефектов в двигателе: акустические свойства материала направляющего кольца (скорость распространения упругих волн); параметры бегущих через направляющее кольцо упругих волн (фаза падающей, а

также фаза и амплитуда отраженной от торца волны) и параметры спектра собственных колебаний направляющего кольца (уровни спектральных составляющих в характерных точках на характерных частотах).

1. Бабаков И. М. Теория колебаний. — М.: Наука, 1968.— 260 с.
2. Губарев В. Г. Южный старт. — М.: Агентство «НЭКОС», 1998.—400 с.
3. Гузь А. В. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. — Киев: Наук. думка, 1986.—Т. 2: Закономерности распространения.—1986.—536 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: В 10 т. — М.: Наука, 1987.—Т. 7: Теория упругости.— 1987.—248 с.
5. Методы акустического контроля металлов / М. П. Алешин, В. Е. Белый, А. Х. Вopilкин и др. — М.: Машиностроение, 1989.—456 с.
6. Неразрушающий контроль: В 5 кн. — М.: Высш. шк., 1991.—Кн. 2: Акустические методы контроля / Под ред. В. В. Сухорукова.—283 с.
7. Троицкий В. А., Радько В. П., Демидко В. Г. Дефекты сварных соединений и средства их обнаружения. — Киев: Вища школа, 1983.—144 с.
8. Физика твердого тела. Энциклопедический словарь: В 2 т. — Киев: Наук. думка.—Т. 1.—1996.—656 с.; Т. 2.— 1998.—648. с.
9. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980.—280 с.

FEASIBILITY OF THE ULTRASOUND TESTING OF THE FIRST-STAGE ENGINE OF THE ZENITH ROCKET CARRIER. 1. CONSTRUCTION OF THE PHYSICAL MODEL OF THE OBJECT TO BE TESTED

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

We investigated the possibility of 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 testing methods. The analysis of the construction and structure peculiarities of the materials in the engine part to be tested served as the basis for adopting its efficiency criteria and developing appropriate physical models of the object tested. These models were subjected to a phenomenological analysis, a representation of the engine part to be tested in the terms of the acoustic field parameters was found, and the diagnostic parameters were substantiated.