

УДК 621.43

DOI: 10.46960/2782-5477\_2023\_1\_18

Е.К. Березин<sup>1</sup>, А.Б. Корнев<sup>1</sup>, В.М. Родюшкин<sup>1,2</sup>

## СРАВНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТИФРИКЦИОННЫХ ВСТАВОК ПОРШНЯ ДВИГАТЕЛЯ Г60, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ И НАПЛАВЛЕНИЕМ

<sup>1</sup> Волжская государственная академия водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

<sup>2</sup> Институт проблем машиностроения РАН  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлены результаты применения ультразвуковой методики оценки качества антифрикционных вставок поршня газотурбинного двигателя Г60. Исследование акустических свойств вставок проводилось с использованием промышленного ультразвукового дефектоскопа, что позволяет проводить измерения оперативно и непосредственно на производстве. Актуальность работы определяется тем, что одной из практически решаемых задач оценки эксплуатационных характеристик поршней является исследование акустических свойств антифрикционных вставок, отражающих их прочностные кондиции. Справедливость этого утверждения в работе показана на специальных тестовых образцах поршня с антифрикционными вставками, изготовленных напылением и газопламенным напылением. Полученные результаты могут быть использованы как для совершенствования методов контроля качества изготовления антифрикционных вставок поршней, так и для идентификации типа вставок при экспертизе технического состояния двигателя, бывшего в эксплуатации.

**Ключевые слова:** антифрикционные вставки, поверхностная упругая волна; дефектоскоп; газопламенное напыление, наплавка.

### Введение

Методы ультразвуковой диагностики широко применяются в промышленности, чаще всего используют основанные на объемных волнах [1]. Данные о скорости распространения и поглощения поверхностных волн в различных материалах [2-8] эффективно используются при дефектоскопии поверхности изделий сложного профиля, исследовании физического состояния поверхностного слоя твердых материалов. Скорость и затухание поверхностных волн в значительной степени зависят от состояния материала, его структурных особенностей, обработки поверхности, наличия остаточных напряжений (наклепа), оксидных пленок и др. Для учета влияния структуры материала на распространение в нем упругой волны применяют безразмерный макроскопический параметр  $\psi$ , характеризующий на макроуровне степень поврежденности материала [9]. В длинноволновом приближении связь частотно-зависимого коэффициента затухания  $\alpha(\omega)$  с параметром структурной поврежденности материала  $\psi$  может быть представлена следующим образом [10]:  $\alpha(\omega) = (k_1 + k_2\psi) \cdot \omega^4$ . Соответственно, скорость распространения:  $V = V^*(1 - k_3\psi - k_4\psi\omega^2)$ , где  $\omega$ ,  $V^*$  – частота и начальная скорость упругих волн;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  – параметры, зависящие от плотности материала, модуля упругости, коэффициентов разложения текстурной функции (при необходимости они могут определяться экспериментально на образцах из контролируемого материала).

Из приведенных соотношений следует, что появление структурной поврежденности материала вносит поправки в скорость и затухание волны относительно исходной, а также приводит к некой зависимости от частоты. Очевидно, соотношения грубо отражают связь поврежденности и скорости упругих волн, но они определяют направление исследований в задаче оценки состояния материала, используя данные по скорости и затуханию ультразвука.



что выявленные структурные неоднородности влияют на условия распространения ультразвуковых упругих волн. Следовательно, степень неоднородности материала вкладки может быть доступна для контроля методом зондирования упругими волнами.

Попытки зондирования антифрикционной вкладки объемными волнами на частотах 4 МГц и 2,5 МГц не привели к успеху в силу сильного ослабления интенсивности колебаний. В пределах чувствительности дефектоскопа наблюдать устойчивый сигнал на этих частотах не удалось в силу структурных особенностей материала вкладки и конструктивных решений поршня. Видно, что внешняя поверхность кольца, с которой есть возможность проводить ультразвуковой контроль, не параллельна донной (противоположной) поверхности поршня в районе верхней и нижней вставки (рис. 1). Поэтому имеет смысл сравнивать результаты ультразвуковой диагностики объемными волнами среднюю антифрикционную вставку. Ультразвуковой контроль проводился на частоте 1,2 МГц с помощью промышленного дефектоскопа УСД50 и преобразователя ПЭП112-1,25-20x6-П-004 (раздельно-совмещенный прямой). Схема контроля приведена рис. 2.

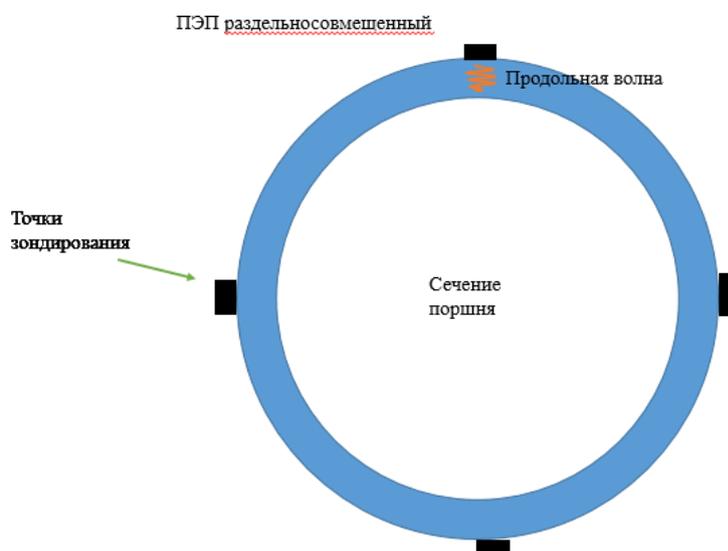


Рис. 2. Условная схема ультразвукового контроля

Измерения уровня донного сигнала проводились в 4 точках по окружности. Толщина наплавления и напыления антифрикционной вкладки одинакова, следовательно, вариации значения отклика будут характеризовать вариации качества материала вкладки. В табл. 1 приведены результаты контроля. Среднеквадратичное отклонение уровня сигнала –  $\sigma$  для наплавленной вставки составило величину 2,9 дБ. Для вставки, выполненного газопламенным напылением – 1,4 дБ, что говорит о более стабильных параметрах материала вкладки и контакта слоя «бронза-чугун» в случае напыляемого варианта.

Исключить влияние на результат ультразвукового контроля конструктивных решений поршня позволяют поверхностные волны. Взаимодействие поверхностной волны с неоднородностями в силу ее проникновения в материал будет происходить на всей толщине вставки. Толщина антифрикционных вставок для обоих поршней составила 10 мм, что сравнимо с длиной волны – глубиной проникновения волны в материал вставки на частоте 1 МГц. Колебания создавались с помощью излучающего и приемного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) типа П121-1,0-90S, соединенные в единый блок, который устанавливался на поверхность вставки. Это позволяло избирательно (на одной частоте) возбуждать поверхностную волну методом «клина» [1, 10]. Схема контроля приведена рис. 3.

Таблица 1.  
Результаты контроля

Значение донного импульса в дБ					
Точка измерения	1	2	3	4	$\sigma$
наплавка	43,1	49,7	46,1	44,3	2,9
напыление	34	37,2	36,3	35,2	1,4

Среднеквадратичное отклонение уровня сигнала –  $\sigma$  для наплавленной вставки составило величину 2,9 дБ. Для вставки, выполненного газопламенным напылением – 1,4 дБ, что говорит о более стабильных параметрах материала вкладки и контакта слоя «бронза-чугун» в случае напыляемого варианта.

Исключить влияние на результат ультразвукового контроля конструктивных решений поршня позволяют поверхностные волны. Взаимодействие поверхностной волны с неоднородностями в силу ее проникновения в материал будет происходить на всей толщине вставки. Толщина антифрикционных вставок для обоих поршней составила 10 мм, что сравнимо с длиной волны – глубиной проникновения волны в материал вставки на частоте 1 МГц. Колебания создавались с помощью излучающего и приемного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) типа П121-1,0-90S, соединенные в единый блок, который устанавливался на поверхность вставки. Это позволяло избирательно (на одной частоте) возбуждать поверхностную волну методом «клина» [1, 10]. Схема контроля приведена на рис. 3.

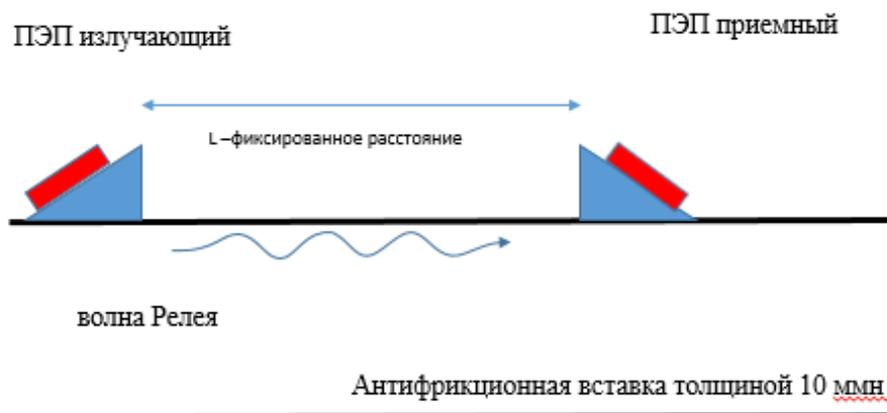


Рис. 3. Схема контроля антифрикционной вставки поверхностными упругими волнами

Развертку дефектоскопа и строб настраивали так, чтобы наблюдать на экране прошедший фиксированное расстояние через материал вставки импульс. Зафиксированное дефектоскопом в стробе время прихода импульса (временная задержка импульса при распространении его от излучателя до приемника) свидетельствовало о скорости распространения упругой волны, значение амплитуды – об ослаблении волны (на протяжении всего пути следования импульса происходили расхождения, затухания и рассеяния структурными фрагментами).

Поскольку испытания проходили в идентичных условиях (конструкция и параметры ПЭП, путь следования импульса), различия в ослаблении упругой волны отражали в основном состояние среды. Погрешность измерений, обусловленная нестабильностью установки преобразователей на объект, учитывали путем проведения пяти независимых (при каждой установке ПЭП на поверхность покрытия) наблюдений. По данным наблюдений вычисляли

средние значения амплитуды импульса и временного интервала прохождения волной фиксированного расстояния и среднеквадратичное отклонение –  $\sigma$ .

В табл. 2. приведены результаты измерения амплитуды импульса поверхностных волн и временного интервала, отражающего скорость распространения волны в материале вставки.

**Таблица 2.**  
**Результаты измерения**

<b>Технология напыления вставки</b>		
№ вставки	Амплитуда, дБ	временной интервал, мкс
1	59	465
2	58	463
3	60	460
$\sigma$	1	2,5
<b>Технология наплавления вставки</b>		
1	59	490
2	64	508
3	63	502
$\sigma$	2,6	9,1

Среднеквадратичное отклонение уровня сигнала для наплавленной вставки составило величину 2,6 дБ. Для вставки, выполненного газопламенным напылением – 1,0 дБ. Среднеквадратичное отклонение значения скорости распространения скорости волны для вставки, выполненной газопламенным напылением, составило величину 2,5. Для наплавленного варианта среднеквадратичное отклонение значения скорости распространения волны составило 9,1. В случае наплавленного варианта визуальный контроль поверхности вставок констатирует наличие рассеянных неоднородностей, что подтверждает полученный разброс акустических параметров.

Полученные данные свидетельствуют о различии акустических амплитудных и временных характеристик для разных технологий изготовления антифрикционных вставок поршня двигателя Г60. Выявленный разброс акустических параметров говорит о более однородных свойствах материала антифрикционной вставки в случае напыляемой технологии.

### **Заключение**

Выявленные относительные изменения акустических параметров, полученные в результате исследований, могут быть использованы как для совершенствования методов контроля качества изготовления антифрикционных вставок поршня двигателя Г60, так и для идентификации типа кольца при экспертизе технического состояния двигателя, бывшего в эксплуатации. Амплитудно-временные характеристики импульса поверхностных упругих волн при прохождении их вдоль антифрикционных вставок поршня двигателя Г60 не противоречат полученным данным визуально-измерительного контроля. Таким образом, предлагаемый способ может быть использован как дополнительный неразрушающий метод оценки качества антифрикционных вставок поршня двигателя Г60 и идентификации технологии его изготовления.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021-2023 гг. (тема № 0030-2021-0025).*

## Библиографический список

1. **Кретов, Е.Ф.** Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е.Ф. Кретов. – СПб.: СВЕН, 2014. – 312 с.
2. **Викторов, И.А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов – М.: Наука, 1981. – 287 с.
3. **Пасманик, Л.А.** Параметры акустической неоднородности для неразрушающей оценки влияния технологии изготовления и эксплуатационной поврежденности на структуру металла / Л.А. Пасманик, А.В. Камышев, А.В. Радостин, В.У. Зайцев // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 24-36.
4. **Воробьев, Р.А.** Применение метода ультразвукового контроля для оценки трещиностойкости низкоуглеродистой мартенситной стали 07ХЗГНМЮА / Воробьев Р.А., Литовченко В.Н. // Завод. лаб. Диагност. мат. 2021. Т..87. № 1. С. 45-51.
5. **Gonchar, A.V.** Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands /A.V. Gonchar, K.V Kurashkin, O.V. Andreeva, M.S. Anosov, V.A. Klyushnikov // Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2021. P. 1-12.
6. **Алешин, Н.П.** Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем / Н.П. Алешин [и др.] // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 22-23.
7. **Ерофеев, В.И.** Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций / В.И. Ерофеев [и др.] // Мезомеханика. 2019. № 22(3). С. 65–70.
8. **Березин, Е.К.** Оценка качества восстановления наплавкой порошковой проволокой быстроизнашивающихся деталей черпаковой цепи с помощью ультразвука [Текст] / Е.К. Березин, В.М. Родюшкин // Научные проблемы водного транспорта. 2020. Вып. 65. С. 11-15.
9. **Шермергор, Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред [Текст] / Т.Д. Шермергор. – М.: Наука, 1977. – 399 с.
10. **Углов, А.Л.** Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А.Л. Углов, В.И. Ерофеев, А.Н. Смирнов. – М.: Наука, 2009. – 279 с.