

**А.В. Иляхинский<sup>1</sup>, В.М. Родюшкин<sup>1</sup>, А.А. Хлыбов<sup>2</sup>**  
**ВЛИЯНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛА НА**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ**

*<sup>1</sup>Институт проблем машиностроения РАН*

*<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Предложен способ количественной оценки влияния малоциклового нагружения на изменение амплитудного спектра зондирующего импульса. В основе оценки лежит представление процессов влияющих на изменение параметров упругой волны статистической моделью в виде распределения Дирихле. Проведена оценка в терминах статистической модели Дирихле амплитудных спектров продольного и сдвигового отраженных импульсов в образце стали 12Х18Н10Т при испытании на малоцикловую усталость в режиме жесткого нагружения.

*Ключевые слова:* ультразвуковой импульс, амплитудный спектр, статистическая модель, распределение Дирихле.

Обеспечение надежности и безопасности объектов машиностроения является актуальной задачей, требующей разработки новых и совершенствование существующих методов ультразвуковой диагностики состояния материала особенно на ранней стадии эксплуатации при исчерпании всего лишь 3-5% общего ресурса. Неразрушающий контроль с помощью ультразвуковой диагностики позволяет перейти от выборочной проверки прочности и долговечности металлических конструкций на специально изготовленных образцах к их стопроцентному контролю на готовых изделиях без их разрушения или повреждения. Уникальность метода ультразвуковой диагностики состоит в том, что внутреннее пространство практически всех конструкционных материалов доступно для «видения» волнами механической природы. Механические колебания распространяются в твердой среде на большие расстояния, не вносят искажения в происходящие в материале процессы и в то же время несут информацию о состоянии исследуемого объекта [1-3]. Методы ультразвуковой диагностики, заключающиеся в возбуждении ультразвукового импульса и его приеме после прохождения через исследуемую среду, основаны на установлении корреляции между параметрами ультразвука и свойствами металла исследуемого объекта. Одним из параметров, традиционно измеряемых в задачах ультразвуковой диагностики, является скорость ультразвуковой волны [4-6]. Для её вычисления используется временное положение двух синфазных точек в ультразвуковых импульсах (как варианты несколько временных отсечек). Вся остальная временная диаграмма импульсов не анализируется, хотя очевидно, что структура импульса, прошедшего среду меняется комплексно и достаточно сложным образом [6-8]. При этом, в силу осознанного ограничения информации в принимаемом сигнале, чувствительность изменения этих параметров к состоянию металла заведомо низка. Заманчиво выглядит перспектива использования всего «массива» информации, полученного от упругой волны при прохождении через поврежденный металл. Работа посвящена поиску путей повышения чувствительности и достоверности метода ультразвуковой диагностики при оценке изменений в металле в результате испытаний на малоцикловую усталость.

**Методика исследования.** В качестве объекта исследования были выбраны круглые образцы, изготовленные из стали 12Х18Н10Т, представленные на рисунке 1, в рабочей зоне которых для установки пьезоэлектрических преобразователей были выполнены две плоскопараллельные лыски размером 40х3 мм.

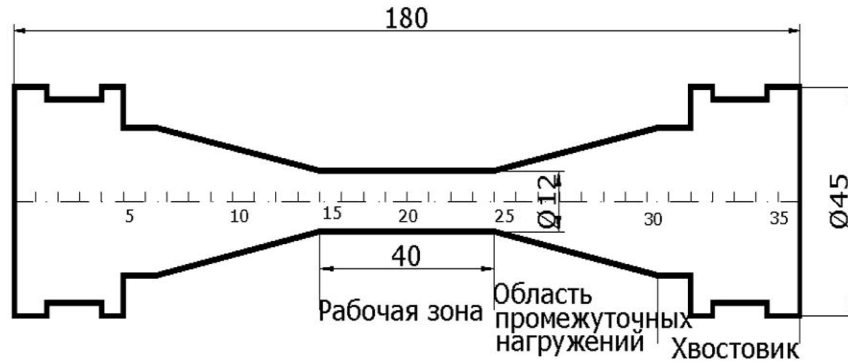


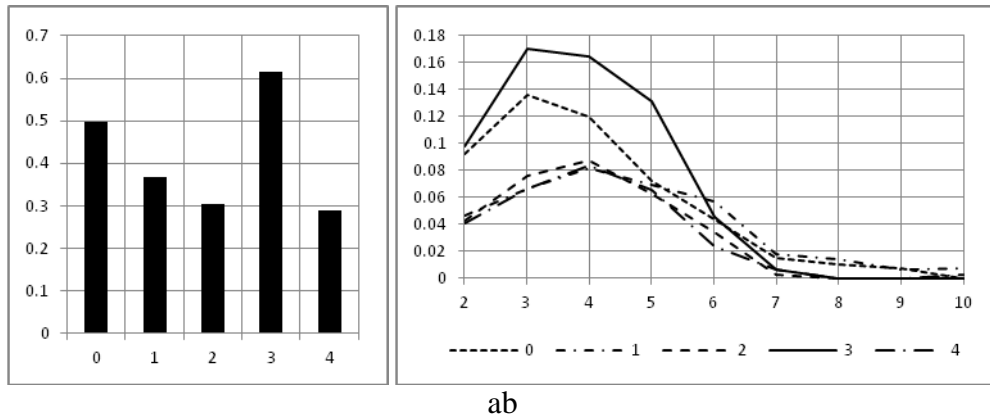
Рис. 1. Образец для испытаний на малоцикловую усталость.

Испытания на малоцикловую усталость в режиме жесткого нагружения проводились на универсальной испытательной машине МИУ-200К при  $\varepsilon_{пл}$  в цикле равной 0.3%. Образцы были последовательно подвергнуты четырем сериям нагружений по 17000 циклов нагружения в каждой серии. Последняя серия нагружений проводилась до появления видимой трещины. Регистрация формы зондирующего импульса проводилась после каждой серии нагружения эхо-импульсным методом с помощью измерительно – вычислительного комплекса «АСТРОН», позволяющего проводить прецизионные измерения времени задержек (времени распространения) упругих волн. Погрешность измерения временных интервалов между синфазными точками отраженных импульсов составляла  $\pm 2$ нс. Установление информационной структуры зондирующего импульса после циклического нагружения проводилась с использованием статистической модели распределения Дирихле [9]. по показателю  $k_c^i = k_{D-}^i / \sum_i k_{D+}^i$ , где  $k_{D-}^i$  – количество выявленных за анализируемый период во временном ряде упругой волны двухмерных, трехмерных, четырехмерных, пятимерных и т.д. моделей Дирихле, имеющих отрицательное значение внешней энтропии, а  $\sum_i k_{D+}^i$  – суммарное количество выявленных за анализируемый период двухмерных, трехмерных, четырехмерных, пятимерных и т.д. моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии. В качестве меры степени нелинейности исследуемого материала был принят показатель информационной самоорганизации зондирующего импульса  $k_c = \sum_i k_c^i$ . Методологически результат вычисления параметров  $k_c$  и  $k_c^i$  достигался тем, что каждая выборка спектра зондирующего сигнала объема N непрерывно-скользящим методом при шаге смещения на одно значение базовой выборки m равной 24 разбивалась на последовательность выборок  $m_i$ , где  $i = 1, \dots, N-m$ . Для каждой выборки  $m_i$  определяли значение коэффициента асимметрии и показателя эксцесса, по которым находили параметры формы последовательности бета-распределений (одномерных распределений Дирихле) [10]. В соответствии с правилами информационно-статистической теории [11] проводили свертку следующих друг за другом бета-распределений к последовательности распределений Дирихле, для которых по значению параметра  $\alpha_n$  вычисляли значения внешней энтропии  $H_e$  распределений Дирихле каждой из размерностей как

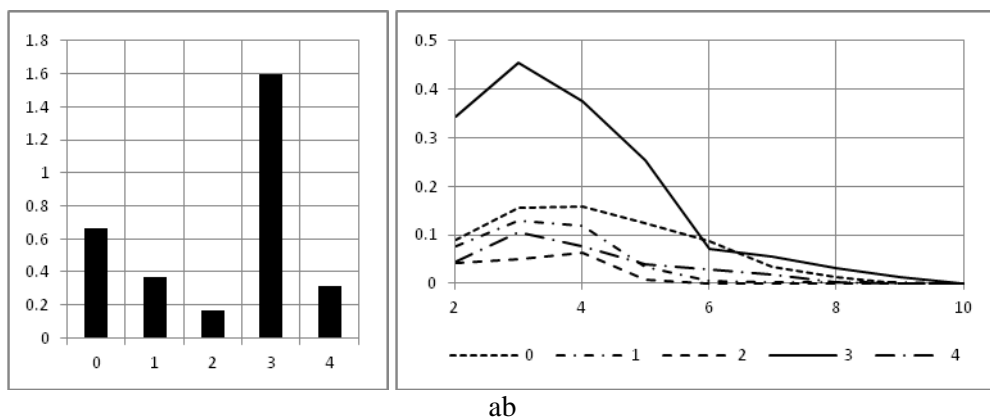
$$H_e(\alpha_n) = -\ln \Gamma(\alpha_n) + (\alpha_n - n) \times \psi(\alpha_n)$$

Здесь  $\Gamma(x)$  – гамма функция, а  $\psi(x) = \frac{d}{dx} \ln \Gamma(x)$  – логарифмическая производная гамма функции.

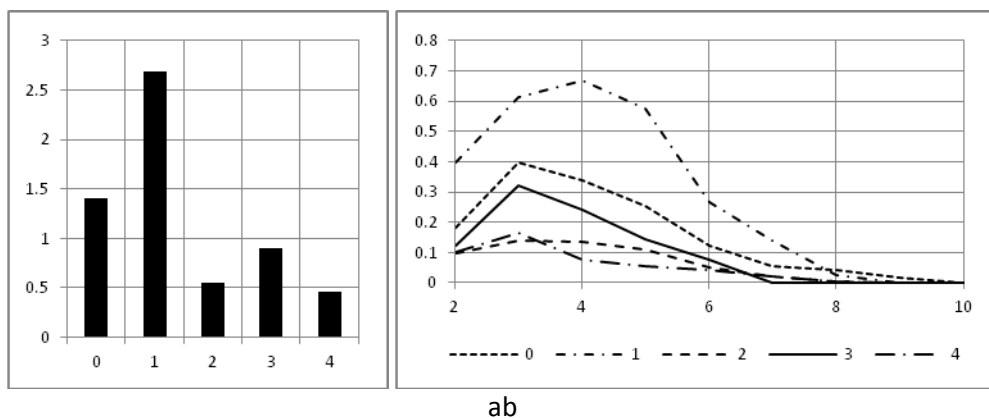
При обработке данных, расчетах, математическом моделировании использовались оригинальные и стандартные программы Excel из пакета Microsoft Office.



**Рис. 2.** Влияние времени испытания на малоцикловую усталость при жестком нагружении стали 12X18H10T на изменение величины показателя информационной самоорганизации  $k_C$  (а) и информационной структуры  $k_C^i$  (б) спектра сдвиговой волны первого отраженного зондирующего импульса. с поляризацией вдоль оси образца



**Рис.3.** Влияние времени испытания на малоцикловую усталость при жестком нагружении стали 12X18H10T на изменение величины показателя информационной самоорганизации  $k_C$  (а) и информационной структуры  $k_C^i$  (б) спектра сдвиговой волны первого отраженного зондирующего импульса. с поляризацией перпендикулярно оси образца



**Рис. 4. Влияние времени испытания на малоцикловую усталость при жестком нагружении стали 12X18H10T на изменение величины показателя информационной самоорганизации  $k_c^i$  (а) и информационной структуры  $k_c^i$  (б) спектра продольной волны первого отраженного зондирующего импульса**

### Результаты исследования и их обсуждение

Нарисунках 1–3 по оси ординат приведены зафиксированные значения показателей информационной самоорганизации  $k_c^i$  (а) и информационной структуры  $k_c^i$  до десятерной размерности (б) спектров зондирующего импульса сдвиговых волн с поляризацией вдоль и перпендикулярно рабочей части образца и спектра импульса продольных волн в исходном состоянии (0) и после каждой из четырех серий жесткого нагружения (1–4).

Как видно из результатов, приведенных на рисунках 2–4 последовательное действие серий испытаний по 17000 циклов нагружения приводит к изменению информационной структуры параметров упругой волны как для отраженных зондирующих импульсов сдвиговой волны, так и отраженных импульсов продольной волны. При этом следует отметить, что это влияние зависит от механизма воздействия. Так увеличение до 34000 числа циклов нагружения приводит к уменьшению показателя информационной самоорганизации зондирующих импульсов и изменению их информационной структуры в сторону возрастания влияния моделей более высоких размерностей, что свидетельствует о повышении нелинейности анализируемого материала в результате накопления повреждений, вызванного увеличением числа циклов жесткого нагружения. Малоцикловая усталость с жестким нагружением при увеличении числа циклов нагружения до 75% (последовательное нагружение тремя циклами) приводит к увеличению нелинейности материала в основном за счет малых размерностей 2–4 (а). Здесь и далее за размерность акустической нелинейности принята размерность статистической модели распределения Дирихле. За меру нелинейности принят вклад этой модели в процесс самоорганизации. Следует отметить, что попытка оценить степень изменения скорости волн в результате действия серии нагружений методом измерения положения двух синфазных точек позволила оценить изменение скорости только после проведения полного цикла испытаний при нагружении образца до состояния разрушения (появления в рабочей зоне видимой трещины).

### Заключение

Представление процессов, определяющих влияние поврежденности конструкционного материала на параметры упругой волны, статистической моделью в виде распределения Дирихле, позволяет с учетом множества факторов количественно охарактеризовать изменения структуры отраженного импульса, улучшить понимание феноменов

взаимодействия упругой волны со средой, повысить чувствительность метода ультразвуковой диагностики и достоверность расшифровки показаний акустических приборов.

### ***Библиографический список***

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. [Текст] / под общ. ред. В.В.Клюева. Т.3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.
2. Гончар, А.В. Исследование микропластической деформации конструкционной стали на начальном этапе усталостного разрушения методами неразрушающего контроля / А.В. Гончар, А.Л. Руденко, В.В. Мишакин [Текст] // Деформация и разрушение материалов. 2012. №7. С. 37-42.
3. Мишакин, В.В. Использование акустического метода для оценки поврежденности стали 08Х18Н10Т при усталостном разрушении / В.В. Мишакин, Ф.М. Митенков, Н.Н. Данилова, В.А. Клюшников [Текст] // Контроль. Диагностика. 2012. №7. С. 9-13.
4. Зуев, Л.Б. О признаке усталостного разрушения сталей [Текст] / В.В. Муравьев, Ю.С. Данилова // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 9. С.31-34.
5. Смирнов, А.Н. Акустический критерий предельного состояния длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов / А.Н. Смирнов, В.В. Муравьев, Н.А. Хапонен [Текст] // Контроль. Диагностика. 2004. № 5. С. 19-23.
6. Углов, А.Л. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации [Текст] / А.Л. Углов, В.И. Ерофеев, А.Н. Смирнов; отв. ред. академик РАН Ф.М. Митенков. – М.: Наука, 2009. – 280с.
7. Физические основы прочности материалов / Л.Б. Зуев, В.И. Данилов // уч. пос. – ИД Интеллект, 2013. С. 376.
8. Поляков, В.В. Влияние пористости на скорость ультразвуковых волн в металлах / В.В. Поляков, А.В. Головин [Текст] // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 11. С.54-57
9. Иляхинский, А.В. Распределение Дирихле в задаче оценки состояния металла методом акустического зондирования / А.В. Иляхинский, В.М. Родюшкин [Текст] // Дефектоскопия. 2015. №7. С.13-17.
10. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах [Текст] / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
11. Серeda, Ю.С. Основы информационно-статистической теории [Текст] / Ю.С. Серeda. – Н.Новгород: ООО «Типография «Поволжье», 2007 – 356 с.