



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.04

УДК 534.21: 620.179.16

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТАЛИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

А.В. Иляхинский, В.М. Родюшкин

Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 24 июня 2018 г.  
Принята: 03 сентября 2018 г.  
Опубликована: 08 октября 2018 г.

#### Ключевые слова:

поврежденность, упругая поверхностная волна, внутреннее трение, циклические нагружения, коэффициент формы акустического зондирующего импульса.

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается вопрос о мониторинге процесса накопления поврежденности путем контроля акустических свойств металла. Целью работы является разработка доступной в производственных условиях ультразвуковой технологии оценки технического состояния металла до его разрушения. Исследовалась возможность создания «индикатора поврежденности», используя в качестве датчика высокочастотную упругую поверхностную волну.

Ультразвуковая технология зондирования, применяемая в данной работе, была ориентирована на расширении спектра зондирующего сигнала, что позволило повысить точность измерений.

В качестве параметра, характеризующего внутреннее трение, использован коэффициент формы акустического зондирующего импульса и в качестве альтернативы – время прохождения волной фиксированного расстояния в металле. Демонстрационные эксперименты проведены на плоских образцах из предварительно отожженной стали марки Ст10.

Циклические испытания проводились на универсальной испытательной машине фирмы TiniusOllsenLtd, модель H100KU, обеспечивающей погрешность измерения нагрузки 0,5 %. Образцы были подвергнуты 50 циклам мягкого нагружения с амплитудой напряжения в цикле 0,6; 0,7 и 0,8 от условного предела текучести при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин.

В основе методики анализа формы зондирующего импульса лежит обращение наблюдаемого сигнала из изменения амплитуды во времени в распределение по амплитуде и получение на основе этого обращения параметров априори выбранной статистической модели распределения Дирихле. Вычислялся параметр самоорганизации формы импульса, характеризующий изменение структуры зондирующего импульса. Изменение напряжения нагружения в цикле приводит к значимому изменению параметра самоорганизации формы зондирующего сигнала. Получена линейная связь между коэффициентом поглощения упругой энергии и показателем самоорганизации формы зондирующего импульса. Показано, что скорость распространения поверхностной волны для разных режимов нагружения меняется незначительно и не может служить признаком, характеризующим внутреннее трение.

Результаты демонстрируют возможность характеризовать величину упругого гистерезиса, являющуюся одной из мер внутреннего трения в твердых телах, посредством изменения коэффициента формы акустического зондирующего импульса поверхностных волн.

© ПНИПУ

© Иляхинский Александр Владимирович – с.н.с., e-mail: [ilyahinsky-aleks@bk.ru](mailto:ilyahinsky-aleks@bk.ru), ORCID: 0000-0002-7677-8455.  
Родюшкин Владимир Митрофанович – д.т.н., зав. лаб., e-mail: [vlkn2005@yandex.ru](mailto:vlkn2005@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-3081-0288.

Aleksandr V. Ilyahinsky – Senior Researcher, e-mail: [ilyahinsky-aleks@bk.ru](mailto:ilyahinsky-aleks@bk.ru), ORCID: 0000-0002-7677-8455.  
Vladimir M. Rodyushkin – Doctor of Technical Science, Head of Laboratory, e-mail: [vlkn2005@yandex.ru](mailto:vlkn2005@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-3081-0288.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF STEEL DAMAGE ON THE PATTERNS OF SURFACE WAVES PROPAGATION

A.V. Ilyahinsky, V.M. Rodyushkin

Institute of Mechanical Engineering Problems RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 24 June 2018  
Accepted: 03 September 2018  
Published: 08 October 2018

#### Keywords:

damage, surface elastic wave, the internal friction, cyclic loading, the shape factor of an acoustic probe pulse.

### ABSTRACT

The issue of monitoring the process of damage accumulation by controlling the acoustic properties of a metal is considered. The aim of the work is to develop an ultrasonic technology that is applicable in production conditions to assess the technical condition of a metal before it is destroyed. The possibility of creating a "damage indicator" was investigated using a high-frequency elastic surface wave as a sensor.

The ultrasonic sounding technology used in this work was focused on expanding the spectrum of the probing signal by making it possible to improve the accuracy of measurements.

As a parameter characterizing the internal friction, the shape of the acoustic probing pulse is used and, alternatively, the time of passage of a fixed distance in the metal by the wave. Demonstration experiments were carried out on flat samples from pre-annealed steel grade St10.

Cyclic tests were carried out using a universal test machine from Tinius Ollsen Ltd., model H100KU providing a load measurement error of 0.5%. The samples were subjected to 50 cycles of soft loading with a voltage amplitude in the cycle of 0.6; 0.7 and 0.8 of the conditional yield point at a constant rate of movement of the active grip of 5 mm/min.

The inversion of the observed signal from the amplitude change in time to the amplitude distribution and obtaining (on the basis of this inversion of the parameters) a priori of the chosen statistical Dirichlet distribution model are at the heart of the technique aimed at analyzing the shape of the probing pulse.

The change in the stress of loading in the cycle leads to a significant change in the parameter of self-organization of the shape of the probing signal, while there is no significant change in the propagation velocity of the surface wave for different loading regimes.

The results demonstrate the possibility of characterizing the value of the elastic hysteresis, which is one of the measures of internal friction in solids by measuring the shape coefficient of the acoustic probe pulse of surface waves.

© PNRPU

В [1] приводится технология оценки повреждаемости на основании деформационно-энергетических критериев, полученных из петель механического гистерезиса. Площадь петли гистерезиса пропорциональна той части механической энергии, которая за каждый цикл изменения напряжения в образце переходит во внутреннюю энергию. Известны методы экспериментального изучения упругого гистерезиса: посредством прямых записей петель с помощью измерительной аппаратуры, регистрирующей усилия и деформации; по затуханию свободных колебаний; по измерению резонансных пиков амплитуд вынужденных колебаний или ширины резонансной кривой. Удастся измерять мощность резонансного возбуждения, сдвиг фаз между силами и перемещениями, оценивать теплоотдачу и проводить прямое калориметрирование выделенного тепла. Все вышеназванные методы измерения петель механического гистерезиса (внутреннего трения) нуждаются в специализированном лабораторном оборудовании. Аналогичных условий требуют методы исследования изменения текстуры сплава в процессе усталостного нагружения, приведенные в работах [2–4]. Технически сложные и уникальные методы оценки поврежденности применять на производстве проблематично. Однако если возникает такая необходимость, то оценить повреждаемость стали, находящейся в реальных условиях эксплуатации, позволяют измерения косвенных характеристик металла, значе-

ния которых опосредованно отражают долю механической энергии, поглощенной металлом (значение площади петли механического гистерезиса). Тогда вопрос о мониторинге процесса накопления поврежденности по кинетике изменения ширины петли механического гистерезиса решается в пользу косвенного параметра. При этом важнейшим условием следует считать осуществимость процедуры контроля косвенных характеристик в условиях производства, «в поле», на эксплуатируемых объектах, а не только в лабораторных условиях.

В связи с этим представляется перспективным рассмотреть вопрос о мониторинге процесса накопления поврежденности путем контроля акустических свойств металла, что позволит, имея в виду простоту и доступность ультразвуковых технологий, проводить оценку технического состояния металла до его разрушения (до появления дефектов: несплошностей, трещин и т.д.) в процессе его текущей эксплуатации [5–7].

Для осуществления такого мониторинга исследовалась возможность создания акустического «индикатора поврежденности», используя в качестве датчика высокочастотную упругую поверхностную волну [8–13], сканирующую поверхностный слой. Для этого, в отличие от лабораторных стендов, требуется лишь пара клиновых ультразвуковых преобразователей. Известны методы, оценивающие состояние металла по акустической нели-

нейности среды [14–19]. В настоящее время применяются методы математической обработки параметров сигнала [20, 21], статистические методики [22–24]. На основе предложенного И.Р. Пригожиным [25] энтропийного критерия с использованием статистической модели распределения Дирихле [26–29] вычислялся параметр самоорганизации формы импульса, характеризующий изменение структуры зондирующего импульса.

В работе акустические свойства металла контролировались по измерению коэффициента формы акустического зондирующего импульса [8, 9] и времени прохождения волной фиксированного расстояния в поврежденном металле [6, 7, 30], рассматриваемых авторами на роль косвенных характеристик, отражающих долю поглощенной механической энергии.

Экспериментальные исследования, демонстрирующие возможность создания «индикатора поврежденности» металла с использованием в качестве индикатора поверхностной волны, проведены на плоских образцах № 21 толщиной 4 мм, изготовленных в соответствии с ГОСТ 1497–84 из предварительно отожженной стали марки Ст10. Образцы были подвергнуты 50 циклам мяг-

кого нагружения при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин с постоянной амплитудой напряжения в цикле. Циклические испытания проводились на универсальной испытательной машине фирмы TiniusOlsenLtd, модель H100KU, обеспечивающей погрешность измерения нагрузки 0,5 %. Реализован отнулевой цикл мягкого нагружения, при котором в процессе испытания амплитудные значения циклических напряжений сохраняют свои исходные значения соответственно 0,6σ·0,2; 0,7σ·0,2 и 0,8σ·0,2. Деформация образца измерялась посредством экстензометра модели 3542 с базой 50 мм и разрешающей способностью системы измерения деформации 0,0001 мм. Зависимость деформации от напряжения для пятидесяти циклов нагружения (петли гистерезиса) при напряжениях в цикле 0,6σ·0,2; 0,7σ·0,2 и 0,8σ·0,2 представлены на рис. 1.

Зависимость коэффициента поглощения упругой энергии  $\psi_i = \Delta U_i / U_i$  (здесь  $i$  – номер цикла,  $\Delta U$  – площадь петли гистерезиса, пропорциональная доле поглощенной энергии,  $U$  – площадь под кривой деформации разгрузки, пропорциональная энергии упругой деформации) от числа циклов нагружения представлена на рис. 2.

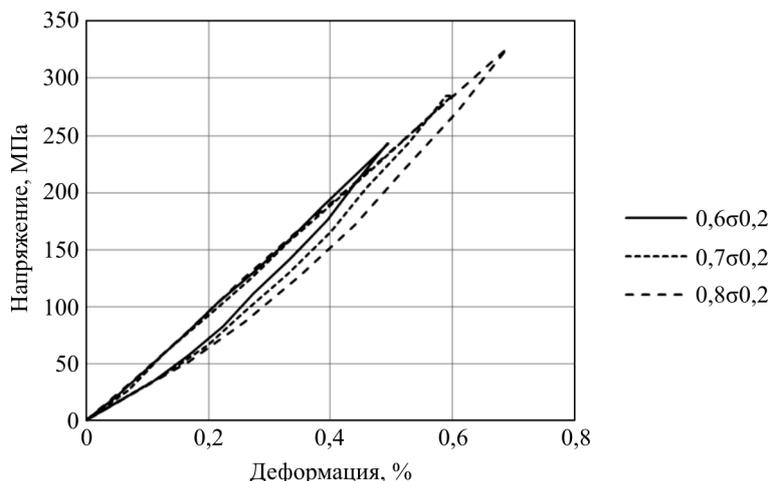


Рис. 1. Зависимость деформации от напряжения для пятидесяти циклов нагружения при различных напряжениях в цикле

Fig. 1. The dependence of the strain for 50th loading cycles at different stresses in the cycle

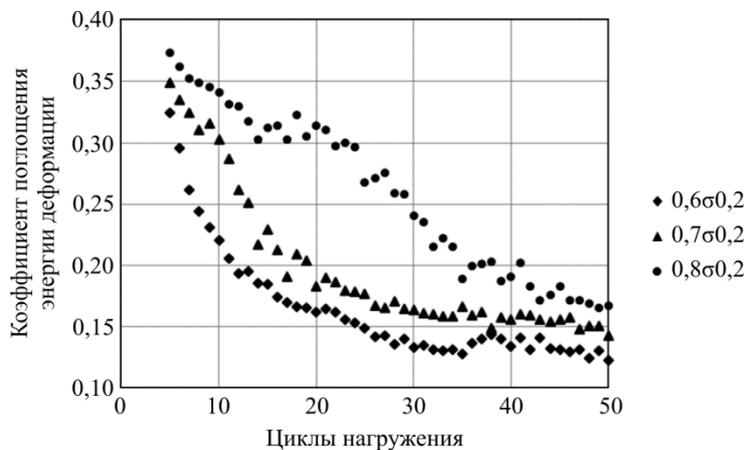


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения упругой энергии от числа циклов нагружения при различных напряжениях в цикле

Fig. 2. The dependence of the elastic energy absorption coefficient on the number of loading cycles at different stresses in the cycle

Стандартная ультразвуковая технология зондирования основана на том, что упругая волна, распространяясь в исследуемом металле, отражается от несплошности (дефекта либо границы объекта) и регистрируется прибором как полезный сигнал, свидетельствующий о наличии и величине несплошности. В нашем случае разрушения (несплошностей) еще нет. Распространяясь в поврежденном металле, упругая волна претерпевает многочисленные микропереотражения от неоднородностей структуры, что приводит к искажениям в сигнале, принимаемом прибором. Задача ультразвукового зондирования поврежденного металла сводится к тому, чтобы зафиксировать эти искажения для оценки структурных особенностей исследуемой среды. Решение этой задачи базируется на расширении спектра зондирующего импульса упругой волны. Такой подход использован, например, в [10], где применение широкополосных сигналов позволило повысить точность измерений скорости ультразвуковых волн в бетонных изделиях.

В работе использована следующая схема измерительного тракта, позволившая расширить его частотные возможности: возбуждение зондирующей волны проводилось излучателем с резонансной частотой 5 МГц, а регистрация зондирующего сигнала проводилось приемником с резонансной частотой 10 МГц. Используются стандартные, соответствующие ГОСТам, преобразователи: излучение проводилось с использованием приемного преобразователя П121-5.00-90S, регистрация формы зондирующего импульса – с использованием приемного преобразователя П121-10.0-90S и осциллографа TDS2022B, обеспечивающего частоту дискретизации при записи исследуемого сигнала 5 нс.

При анализе структуры импульса поверхностной упругой волны использован информационно-статистический подход, описанный в [8]. По количеству распределений Дирихле в анализируемой выборке  $N$  ( $N$  – оцифрованный зондирующий сигнал, принимаемый прибором), имеющих положительное и отрицательное значение внешней энтропии, определялось значение параметра самоорганизации формы импульса  $K_c$  как

$$K_c = \frac{\sum K_{D-}^i}{\sum K_{D+}^i},$$

т.е. как отношение суммарного количества выявленных в анализируемом числовом ряде зарегистрированного сигнала моделей Дирихле, имеющих отрицательное значение внешней (потока) энтропии, к количеству моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии.

Параллельно с анализом сигнала проводились измерения скорости поверхностной волны импульсным методом, осуществляемые с использованием измерителя временных интервалов, для чего можно применить любое сертифицированное оборудование с приемлемой точностью. В работе измерения проводились с помощью измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН», позволяющего проводить прецизионные измерения вре-

мени задержек (времени распространения) упругих волн в соответствии с [6].

Оценка значимости изменения анализируемых параметров проводилась с использованием  $t$ -критерия Стьюдента.

Результаты исследования обобщены в таблице.

#### Обобщенные результаты исследования

##### Generalized results of the study

Режим нагружения	$\psi$	Задержка нс	$K_c$
50 циклов 0,6 $\sigma$ 02	1,6 $\pm$ 0,1	5340 $\pm$ 4,4	0,306 $\pm$ 0,074
50 циклов 0,7 $\sigma$ 02	2,2 $\pm$ 0,12	5330 $\pm$ 4,4	0,466 $\pm$ 0,096
50 циклов 0,8 $\sigma$ 02	3,8 $\pm$ 0,15	5336 $\pm$ 4,4	0,823 $\pm$ 0,182

После пятидесяти циклов одноосного мягкого циклического нагружения образцов из стали 10 при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин до напряжения 0,6 $\sigma$ -0,2; 0,7 $\sigma$ -0,2 и 0,8 $\sigma$ -0,2 измерены задержки распространения поверхностной волны на фиксированной базе, определяющие скорость волны, параметр самоорганизации формы зондирующего импульса  $K_c$  и обобщенный показатель поглощения упругой деформации  $\psi$ .

Результаты циклического нагружения показали, что диаграмма, отображающая зависимость деформации от приложенного напряжения (см. рис. 1), дает петлю гистерезиса, что свидетельствует о поглощении материалом энергии упругой деформации. Доля поглощения этой энергии в цикле (коэффициент поглощения  $\psi$ ) пропорциональна величине максимального напряжения в цикле нагружения и убывает с увеличением количества циклов нагружения (см. рис. 2). Сопоставление режимов нагружения (см. таблицу) демонстрирует значимое ( $p < 0,01$ ) отличие между обобщенным показателем поглощения упругой энергии  $\psi = \Sigma \Delta U_i / \Sigma U_i$ , для циклов нагружения при напряжении 0,6 $\sigma$ -0,2; 0,7 $\sigma$ -0,2 и 0,8 $\sigma$ -0,2, что при постоянной скорости деформации и постоянной температуре испытания свидетельствует о разном уровне накопленных в материале исследуемых образцов микроповреждений. Изменение напряжения нагружения в цикле приводит к значимому ( $p < 0,01$ ) изменению параметра самоорганизации формы зондирующего сигнала, при этом большему значению коэффициента  $\psi$  практически с линейной зависимостью соответствует большее значение показателя самоорганизации формы зондирующего импульса  $K_c$ . Сопоставление значений скорости распространения поверхностной волны для разных режимов нагружения по  $t$ -критерию Стьюдента не выявило достоверного отличия для средней скорости между всеми режимами нагружения,

Следует отметить, что изменение режима нагружения (накопления микроповреждений) влияет не только на значение показателя степени самоорганизации формы зондирующего импульса, но и на структуру самоорганизации. На рис. 3 наглядно показано, как меняется структура самоорганизации при увеличении циклической деформации для исследуемого материала. Вклад моделей Дирихле размерностью 4–7 возрастает, что также может быть дополнительным косвенным признаком роста поврежденности металла.

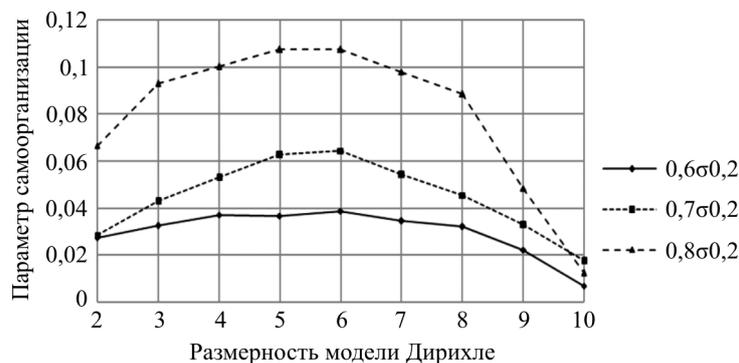


Рис. 3. Влияние максимального напряжения при мягком циклическом нагружении стали Ст10 на изменение параметров самоорганизации формы зондирующего импульса

Fig. 3. The effect of the maximum stress under soft cyclic loading of ST10 steel to change the self-organization parameters of the probe pulse forms

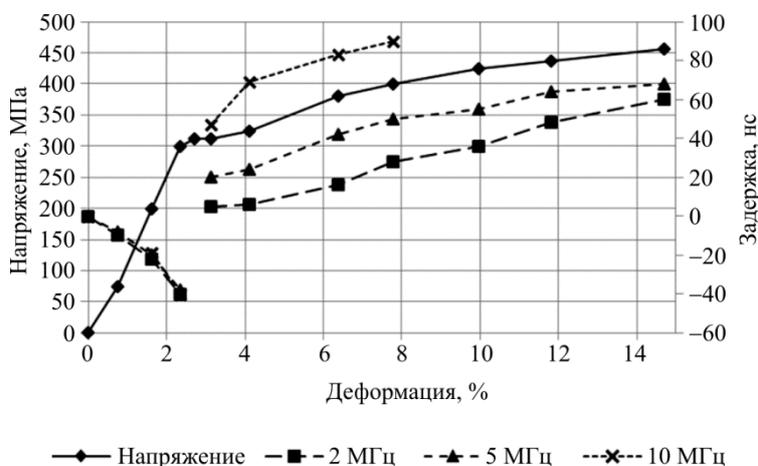


Рис. 4. Зависимость напряжения и величины задержки (скорости) упругой волны Релея от величины деформации

Fig. 4. The dependence of the stress and the delay (velocity) of the elastic Rayleigh wave on the deformation value

Следует отметить, что данные ультразвуковых экспериментов для различных частот применяемых волн могут отличаться. Частотно зависимый результат может быть обусловлен как глубиной проникновения упругих колебаний в металл [11], так и поврежденностью [12, 30]. Так, предварительные эксперименты при испытаниях плоских стальных образцов на растяжение показали (рис. 4), что на частотах колебаний 2, 5, и 10 МГц величины задержек (скорости) упругой волны Релея различны.

С увеличением величины пластической деформации происходит увеличение задержки (скорость волны Релея убывает) и прослеживается значимая зависимость скорости от частоты. Что касается разрыва в зависимостях задержки (см. рис. 4) от деформации, наблюдающейся для всех представленных частот в районе 2,5 %, то скачок связан с изменением механизма деформации при переходе от упругой области к пластической. Этот переход, связанный с площадкой текучести, требует дополнительного изучения. Полученные нами результаты согласуются с данными, полученными в [31] для скорости ультразвука в зависимости от действующих

напряжений в поликристаллическом алюминии, где описывается трехстадийность процесса пластического деформирования.

В области упругой деформации при растяжении с увеличением деформации задержка линейно уменьшается (скорость упругой волны увеличивается). Изменение задержки в области упругости не зависит от частоты зондирующего импульса. В области пластической деформации зависимость скорости упругой волны Релея имеет сложный нелинейный характер. Поскольку проникновение волны Релея в глубину металла составляет величину порядка длины волны, то эти зависимости и различия скоростей касаются разных толщин зондируемого материала. Последнее при отсутствии дисперсии фазовой скорости релеевской волны [11] (классическая теория) свидетельствует о неравномерном распределении по толщине трансформации структуры при пластической деформации [32, 33].

Полученные экспериментальные результаты демонстрируют возможность оценивать действующие напряжения при пластическом деформировании по измерению скорости распространения ультразвука в материале.

ле. Однако при исследовании реальной конструкции априори неизвестно, какой уровень деформаций имеет место в объекте исследования. Для того чтобы отличить упругие деформации от пластических, следует оценить степень нелинейности зондирующего сигнала, как это делается в работе [12]. Только выяснив, в какой области по уровню деформаций находится конструкция, следует приступить к оценке уровня пластической деформации по результатам измерения скорости волн.

Получены следующие экспериментальные результаты:

- построена зависимость коэффициента поглощения упругой энергии от числа циклов нагружения при различных напряжениях в цикле;

- показано, что изменение напряжения нагружения в цикле приводит к значимому изменению параметра самоорганизации формы зондирующего сигнала;

- найдена линейная связь между коэффициентом поглощения упругой энергии и показателем самоорганизации формы зондирующего импульса;

- в качестве диагностического признака, характеризующего внутреннее трение, предложен коэффициент формы акустического зондирующего импульса;

- показано, что скорость распространения поверхностной волны для разных режимов нагружения меняется незначительно и не может служить признаком, характеризующим внутреннее трение;

- в качестве дополнительного косвенного признака роста поврежденности металла предложено использовать изменение параметров самоорганизации формы зондирующего импульса.

Результаты испытаний плоских стальных образцов на растяжение показали:

- скорость поверхностной волны в металле при его растяжении в области упругой деформации линейно возрастает и не зависит от частоты зондирующего импульса;

- в области пластической деформации при растяжении скорость волны Релея уменьшается с увеличением деформации сложным образом и зависит от частоты зондирующего импульса;

## Библиографический список

1. Трошенко В.Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 1. Неупругость, методы и результаты исследования // Проблемы прочности. – 2005. – № 4. – С. 5–32.
2. Texture development of Mg AZ80 after cyclic loading at 80 % yield stress / H.-G. Brokmeier, E. Maawad, Miao Jiang, B. Schwebke, T. Lippmann // Materials Science Forum. Trans Tech Publications. – Switzerland, 2011. – Vol. 690. – P. 198–201.
3. Yamagishi Hideki, Fukuhara Mikio Degradation behavior of moduli in extruded pure magnesium during low- to giga-scale cyclic tension fatigue // Acta Materialia. Elsevier. – United Kingdom, 2012. – No. 12 (60). – P. 4759–4767.
4. Fatigue Behaviors and Microstructures in an Extruded Mg-Al-Zn Alloy / Hidetoshi Somekawa, Norio Maruyama, Sachiko Hiromoto, Akiko Yamamoto, Toshiji Mukai // Materials transactions / The Japan Institute of Metals. – Japan, 2008. – No. 3 (49). – P. 681–684.

- по измерению скорости распространения ультразвука в материале можно оценивать действующие напряжения при пластическом деформировании.

Объем проведенных исследований не может претендовать на решение задачи создания универсальной ультразвуковой технология оценки технического состояния металла до его разрушения. Однако идея создания доступного в условиях эксплуатации «индикатора поврежденности», где в качестве датчика используется высокочастотная упругая поверхностная волна, на наш взгляд, является перспективной с точки зрения оперативного контроля накопления поврежденности. В пользу этой идеи говорят полученные результаты, демонстрирующие возможность характеризовать величину упругого гистерезиса посредством измерения коэффициента формы акустического зондирующего импульса поверхностных волн.

Доступность измерения акустических характеристик металла в эксплуатационных условиях, в отличие от лабораторных установок, переводит изложенный подход оценки внутреннего трения в металлах из ранга лабораторных инструментов в ранг методов неразрушающего контроля и диагностики металла до его разрушения.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00715А) и по теме государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013–2020 гг. № 0035-2014-0402 (№ госрегистрации 01201458047).

## Acknowledgements

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-08-00715A) and the State Assignment of the Institute of Mechanical Engineering Problems, RAS for fundamental scientific studies in 2013–2020, No. 0035-2014-0402 (State Registration Number 01201458047).

5. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 106. – P. 153–158.

6. Углов, А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. – М.: Наука, 2009. – 280 с.

7. Изменение упругих характеристик метастабильной аустенитной стали при циклическом деформировании / А.В. Гончар [и др.] // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – Вып. 4. – С. 518–521.

8. Иляхинский А.В., Родюшкин В.М. Распределение Дирихле в задаче оценки состояния металла методом акустического зондирования // Дефектоскопия. – 2015. – № 7. – С. 13–17.

9. Пути повышения чувствительности метода акустического зондирования при исследовании структуры металла / В.И. Ерофеев [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – № 2. – С. 11–13.
10. Применение сложномодулированных сигналов для повышения точности измерения скорости ультразвука в бетоне / В.К. Качанов [и др.] // Измерительная техника. – 2015. – № 7. – С. 61–64.
11. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 287 с.
12. Ерофеев В.И., Никитина Е.А., Хазов П.А. Влияние поврежденности материала на дисперсию, диссипацию и нелинейность акустических волн // Вестник научно-технического развития. – 2016. – № 5 (105). – С. 3–11.
13. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Влияние более раннего течения поверхностного слоя на упрочнение и разрушение металлов и сплавов // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – № 1. – С. 79–89.
14. Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Шульга А.Е. Дисперсионные и диссипативные свойства микронеоднородных сред // Акуст. журн. – 2000. – Т. 46, № 3. – С. 348–355.
15. Зайцев В.Ю., Назаров В.Ю., Таланов В.И. Неклассические проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // УФН. – 2006. – Т. 176:1. – С. 97–102.
16. Расчетно-экспериментальная визуализация сверхзвукового обтекания управляющих щитков на телах вращения сегментно-конической формы / С.И. Герасимов [и др.] // Научная визуализация. – 2014. – Т. 6, № 3. – С. 55–67.
17. Устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим ракетного трека / С.И.Герасимов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 1. – С. 3–8.
18. Расчетно-экспериментальное изучение ударно-волнового нагружения твердых тел / С.И. Герасимов [и др.] // Научная визуализация. – 2016. – № 4. – С. 91–103.
19. К визуализации нелинейных волн деформации / С.И. Герасимов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Теоретическая и прикладная физика. – 2012. – № 2. – С. 18–23.
20. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление: пер. с англ. / под ред. В.Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974. – Кн. 1. – 406 с.
21. Pearson K. Contributions of the mathematical theory of evolution // Philosophical transactions of royal society of London (A). –

1984. – Vol. 185. – P. 1. – P. 74–100; 1985. – Vol. 186. – P. 1. – P. 343–415.
22. Иляхинский А.В. Середа Ю.С. Статистические модели в задачах зондирования // Изв. вузов, Радиофизика. – 1989. – Т. 32, № 12. – С. 1502–1505.
23. Шеннон К. Статистическая теория передачи электрических сигналов при наличии помех: сб. пер. – М.: Изд-во иностр. лит., 1953. – С. 7–87.
24. Вероятностные методы в инженерных задачах: справочник / А.Н. Лебедев, М.С. Куприянов, Д.Д. Недосекин, Е.А. Чернявский. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 333 с.
25. Пригожин И.Р., Кондеруди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур (Послесловие). – М.: Мир, 2002.
26. Середа Ю.С. Основы диагностики и прогнозирования. – Н. Новгород: Поволжье, 2005. – 188 с.
27. Распределение Дирихле как модель состояния адаптационных регуляторных систем организма человека при анализе вариабельности сердечного ритма / Г.Б. Широкий [и др.] // Клиническая телемеханика и телемедицина. – 2013. – Т. 10. – Вып. 9. – С. 75–78.
28. Информационно-статистические показатели самоорганизации систем регуляции сердечной деятельности в оценке вариабельности ритма сердца спортсменов / А.В. Иляхинский [и др.] // Физиология человека. – 2017. – Т. 43, № 3. – С. 116–122.
29. Терентьев В.Ф. Эволюция структуры при усталости металлов как результат самоорганизации диссипативных структур // Синергетика и усталостное разрушение материалов. – М.: Наука, 1989. – С. 78–87.
30. Дисперсия и затухание акустической волны, распространяющейся в поврежденном материале / В.И. Ерофеев [и др.] // Приволж. науч. журн. – 2014. – № 4. – С. 22–28.
31. Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Бушмилова К.И. Зависимость скорости ультразвука при пластической деформации Al // ЖТФ. – 2000. – Т. 70. – Вып. 1. – С. 52–56.
32. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 5–22.
33. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Основы физической мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18, № 5. – С. 100–113.

## References

1. Troshenko V.T. Rasseyanoe ustalostnoe povrezhdenie metallov i splavov. Soobshenie 1. Neuprugost, metody i rezultaty issledovaniya [Dissipated fatigue damage of metals and alloys. Communication 1. Inelasticity, methods and results of the study]. *Problemy prochnosti*, 2005, no. 4, pp. 5-32.
2. Brokmeier H.-G., Maawad E., Miao Jiang, Schwebke B., Lippmann T. Texture development of Mg AZ80 after cyclic loading at 80% yield stress. *Switzerland, Materials Science Forum / Trans Tech Publications*, 2011, vol. 690, pp. 198-201.
3. Yamagishi Hideki, Fukuhara Mikio Degradation behavior of moduli in extruded pure magnesium during low- to giga-scale cyclic tension fatigue. *United Kingdom. Acta Materialia. Elsevier*, 2012, no. 12 (60), pp. 4759-4767.
4. Hidetoshi Somekawa, Norio Maruyama, Sachiko Hiromoto, Akiko Yamamoto, Toshiji Mukai Fatigue behaviors and microstructures in an extruded Mg-Al-Zn Alloy. *Materials transactions / The Japan Institute of Metals*, 2008, no. 3 (49), pp. 681-684.
5. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel. *International journal of fatigue*, 2018, vol. 106, pp. 153-158.
6. Uglov, A.L., Erofeev V.I., Smirnov A.N. Akusticheskij kontrol oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatatsii [Acoustic control of equipment during manufacture and operation], *Moscow, Nauka*, 2009, 280 p.
7. Gonchar A.V. Izmenenie uprugih karakteristik metastabilnoj austenitnoj stali pri ciklicheskom deformirovanii [Changes in the elastic characteristics of metastable austenitic steel during cyclic deformation]. *Zhurnal tehnichejskoj fiziki*, 2017, vol. 87, iss. 4, pp. 518-521
8. Ilyahinskij A.V., Rodyushkin V.M. Raspredelenie Dirihle v zadache ocenki sostoyaniya metalla metodom akusticheskogo zondirovaniya [The Dirichlet distribution in the problem of estimating the state of a metal by the acoustic sounding method]. *Defektoskopiya*, 2015, no. 7, pp. 13-17.

9. Erofeev V.I. Puti povysheniya chuvstvitelnosti metoda akusticheskogo zondirovaniya pri issledovanii struktury metalla [Ways of increasing the sensitivity of the acoustic sounding method in studying the structure of a metal]. *Defektoskopiya*, 2018, no. 2, pp.11-13
10. Kachanov V.K. Primenenie slozhnomodulirovannykh signalov dlya povysheniya tochnosti izmereniya skorosti ultrazvuka v betone [Application of complex modulated signals to improve the accuracy of ultrasonic velocity measurement in concrete]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2015, no. 7, pp. 61-64
11. Viktorov I. A. Zvukovye poverhnostnye volny v tverdykh telakh [Sound surface waves in solids]. *Moscow, Nauka*, 1981, 287 p.
12. Erofeev V.I., Nikitina E.A., Hazov P.A. Vliyanie povrezhdennosti materiala na dispersiyu, dissipatsiyu i nelinejnost akusticheskikh voln [Influence of material damage on dispersion, dissipation and nonlinearity of acoustic waves]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2016, no. 5 (105), pp. 3-11.
13. Ivanova V.S., Terentev V.F. Vliyanie bolee rannego techeniya poverhnostnogo sloya na uprochnenie i razrushenie metallov i splavov [Influence of the earlier course of the surface layer on the hardening and destruction of metals and alloys]. *Fizika i himiya obrabotki materialov*, 1970, no. 1, pp. 79-89.
14. Zajcev V.Yu., Nazarov V.E., Shulga A.E. Dispersionnye i dissipativnye svoystva mikro neodnorodnykh sred [Dispersion and dissipative properties of microinhomogeneous media]. *Akust. Zhurn*, 2000, vol. 46, no. 3, pp. 348-355.
15. Zajcev V.Yu., Nazarov V.Yu., Talanov V.I. Nekllassicheskie» proyavleniya mikrostrukturno-obuslovennoj nelinejnosti: novye vozmozhnosti dlya akusticheskoy diagnostiki [Nonclassical manifestations of microstructural-conditioned nonlinearity: new possibilities for acoustic diagnostics]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2006, vol. 176:1, pp. 97-102.
16. Gerasimov S.I. Raschetno-eksperimental'naya vizualizatsiya sverkhzvukovogo obtekaniya upravlyayushih shitkov na telakh vrasheniya segmentno-konicheskoy formy [Calculation-experimental visualization of supersonic flow past control flaps on rotating bodies of segment-conical shape]. *Nauchnaya vizualizatsiya*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 55-67
17. Gerasimov S.I. Ustojchivost dvizheniya vysokoskorostnykh obektov po napravlyayushim raketnogo treka [Stability of motion of high-speed objects along the rocket track guides]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2015, no. 1, pp. 3-8
18. Gerasimov S.I. Raschetno-eksperimentalnoe izuchenie udarno-volnovogo nagruzheniya tverdykh tel [Calculation-experimental study of shock-wave loading of solids]. *Nauchnaya vizualizatsiya*, 2016, no. 4, pp. 91-103
19. Gerasimov S.I. K vizualizatsii nelinejnykh voln deformatsii [To the visualization of nonlinear waves, the deformation]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Teoreticheskaya i prikladnaya fizika*, 2012, no. 2, pp.18-23.
20. Boks Dzh., Dzenkins G. Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravlenie: Per. s angl [Time series analysis, forecast and management: Per. with English], *Moscow, Mir*, 1974, kn. 1, 406 p.
21. Pearson K. Contributions of the mathematical theory of evolution. *Philosophical transactions of royal society of London (A)*, 1984, vol. 185, part 1, pp. 74-100.
22. Ilyahinskij A.V. Sereda Yu.S. Statisticheskie modeli v zadachah zondirovaniya [Statistical models in probing problems]. *Izvestiya VUZov, Radiofizika*, 1989, vol. 32, no. 12, pp. 1502-1505.
23. Shennon K. Statisticheskaya teoriya peredachi elektricheskikh signalov pri nalichii pomeh. Sbornik perevodov [Statistical theory of the transmission of electrical signals in the presence of interference]. *Moscow, Izd. inostrannoj literatury*, 1953, pp. 7-87.
24. Lebedev A.N., Kupriyanov M.S., Nedosekin D.D., Chernyavskij E.A. Veroyatnostnye metody v inzhenernykh zadachah : spravochnik [Probabilistic methods in engineering problems: a reference book]. *Saint Petersburg, Energoatomizdat*, 2000, 333 p.
25. Prigozhin I.R., Konderudi D. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigatelej do dissipativnykh struktur (Posleslovie) [Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures (Afterword)]. *Moscow, Mir*, 2002.
26. Sereda Yu.S. Osnovy diagnostiki i prognozirovaniya [Basics of diagnostics and forecasting]. *Nizhnii.Novgorod, OOO «Tipografiya «Povolzhe»*, 2005, 188 p.
27. Shirokij G.B. Raspredelenie Dirihle kak model sostoyaniya adaptatsionnykh regulatorynykh sistem organizma cheloveka pri analize variabelnosti serdechnogo ritma [Distribution of Dirichlet as a model of the state of adaptive regulatory systems of the human body in the analysis of heart rate variability]. *Klinicheskaya telemehanika i telemedicine*, 2013, vol. 10, iss. 9, pp. 75-78.
28. Ilyahinskij A.V. Informatsionno-statisticheskie pokazateli samoorganizatsii sistem regulatsii serdechnoy deyatel'nosti v ochenke variabelnosti ritma serdca sportsmenov [Information and statistical indicators of self-organization of cardiac regulation systems in assessing the variability of the rhythm of the heart of athletes]. *Fiziologiya cheloveka*, 2017, vol. 43, no. 3, pp. 116-122.
29. Terentev V.F. Evolyutsiya struktury pri ustalosti metallov kak rezultat samoorganizatsii dissipativnykh struktur [Evolution of the structure with metal fatigue as a result of self-organization of dissipative structures]. *Moscow, Nauka, Sinergika i ustalostnoe razrushenie materialov*, 1989, pp. 78-87.
30. Erofeev V.I. Dispersiya i zatuhaniye akusticheskoy volny, rasprostranyayusheysya v povrezhdennom material [Dispersion and attenuation of an acoustic wave propagating in a damaged material]. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal*, 2014, no. 4, pp. 22-28.
31. Zuev L.B., Semuhin B.S., Bushmileva K.I. Zavisimost' skorosti ul'trazvuka pri plasticheskoy deformatsii Al [The dependence of the ultrasonic velocity of the plastic deformation Al]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2000, vol.70, iss.1, pp. 52-56
32. Panin V.E., Egorushkin V.E. Osnovy fizicheskoy mezomekhaniki [Fundamentals of physical mesomechanics]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2015, vol. 18, no. 5. pp. 100-113.
33. Panin V.E. Osnovy fizicheskoy mezomekhaniki plasticheskoy deformatsii i razrusheniya tverdykh tel kak nelinejnykh ierarhicheskikh organizovannykh sistem [Fundamentals of physical mesomechanics of plastic deformation and destruction of solids as nonlinear hierarchically organized systems]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 1998, no. 1, pp. 5-22.