



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.05

УДК 534.2

О НЕЛИНЕЙНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ПАРАМЕТРЕ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ СПЛАВА АМГ61

А.В. Иляхинский, В.М. Родюшкин

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН», Нижний Новгород, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 апреля 2020 г.
Принята: 03 сентября 2020 г.
Опубликована: 09 ноября 2020 г.

Ключевые слова:

деформирование, сплав АМг61, упругая волна, преобразователь, гармоника, нелинейность, устройство, акустическая эмиссия, измерение, контроль.

АННОТАЦИЯ

При исследовании процесса деформирования используются различные акустические эффекты. Акустическая эмиссия наиболее часто упоминается в исследованиях процесса деформирования, а эффекты, связанные с нелинейными свойствами деформируемого металла, являются предметом изучения. Эти свойства реальных твердых тел приводят к нелинейным акустическим эффектам взаимодействия упругих волн, запрещенных теорией упругости однородного изотропного тела. В работе решается практическая задача использования принципов нелинейной акустики при исследовании процесса деформирования образцов сплава АМг61.

Для контроля состояния сплава использована поверхностная упругая волна. Процесс распространения упругой волны в деформируемом сплаве АМг61 в силу нелинейных эффектов сопровождается генерацией удвоенной частоты, как продольной составляющей волны, так и сдвиговой, «запрещенной» уравнениями классической теории упругости. Возбуждение и прием в образцах проводилось пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП). Для возбуждения поверхностной акустической волны (ПАВ) использовался клиновидный преобразователь с резонансной частотой 1 МГц, прошедшая ПАВ регистрировалась клиновидным преобразователем с резонансной частотой 2 МГц. Обоснована методика контроля нелинейного акустического параметра по отношению амплитуд первой и второй гармоник, измеряемого в течение всего процесса деформирования.

Разработано экспериментальное устройство, позволяющее контролировать НАП в процессе изменения структурного состояния металла образца. Приводятся результаты экспериментального исследования нелинейного акустического параметра при деформировании сплава АМг61.

Показано, что нелинейный акустический параметр, наравне с активностью акустической эмиссии, чувствителен к смене механизмов эволюции дефектной структуры. Зафиксировано формирование скачка нелинейности в процессе деформирования сплава АМг61, что может свидетельствовать о перестройке структуры металла.

Представленные данные демонстрируют увеличение акустической нелинейности в металле на различной стадии деформирования: как на ранних стадиях упругопластического деформирования, так и на стадии предразрушения, что может использоваться в качестве прогностического критерия.

© ПНИПУ

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

Aleksandr V. Ilyahinsky – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: ilyahinsky-aleks@bk.ru, iD: 0000-0002-7677-8455.

Vladimir M. Rodyushkin – Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: vlkn2005@yandex.ru, iD: 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)

ABOUT THE NONLINEAR ACOUSTIC PARAMETER DURING DEFORMATION OF AMG61 ALLOY

A.V. Ilyahinsky, V.M. Rodyushkin

Institute of Problems of Machine Science RAS – Branch of the "Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences," Nizhny Novgorod, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 27 April 2020
Accepted: 03 September 2020
Published: 09 November 2020

Keywords:

deformation, AMg61 alloy, elastic wave, transducer, harmonic, nonlinearity, device, acoustic emission, measurement, control.

ABSTRACT

Various acoustic effects are used in the study of deformation processes. Acoustic emission is most often mentioned in such studies, and the effects due to nonlinear properties of a deformable metal are the subject of the present work. These properties of real solids lead to nonlinear acoustic effects of the interaction elastic waves *forbidden* by the theory of elasticity of a homogeneous isotropic body. The work solves the problem of using the principles of nonlinear acoustics in studying the deformation of AMg61 alloy samples.

A surface elastic wave is used to control the alloy condition. The process of the elastic wave propagation in the deformed AMg61 alloy due to nonlinear effects is accompanied by generating the double frequency, both of the longitudinal component of the wave and the shear one, the latter is *forbidden* by equations of the classical elasticity theory. Excitation and reception in the samples was carried out by piezoelectric converters (PES). A wedge converter with a resonance frequency of 1MHz was used to excite the surfactant. The passing surfactant was recorded by a wedge converter with a resonance frequency of 2 MHz. We justified the control technique of the nonlinear acoustic parameter with respect to amplitudes of the first and second harmonics measured during the whole deformation process.

An experimental device has been developed to control the nonlinear acoustic parameter in the process of changing the structural state of the sample metal. The pilot study results of the nonlinear acoustic parameter under Amg61 alloy deformation are given.

It is shown that the nonlinear acoustic parameter, as well as the acoustic emission activity, is sensitive to changing mechanisms of the defective structure evolution. The non-linearity jump formation during deformation of alloy AMg61 is recorded, which may indicate adjustment of the metal structure.

The presented data demonstrate the increase of acoustic nonlinearity in metal at various deformation stages, both at early stages of elastoplastic deformation and at pre-destruction stage, which can be used as the prognostic criterion.

© PNRPU

Введение

Для контроля процесса деформирования металла используются различные акустические эффекты, из них наиболее часто в исследованиях упоминается акустическая эмиссия, например в [1–3]. Однако в последнее время внимание привлечено к акустическим явлениям, обусловленным нелинейными свойствами деформируемого металла. В твердых телах с дефектами и механическими напряжениями наряду с традиционно обсуждаемой в физике твердого тела упругой решеточной нелинейностью, связанной с проявлением слабого ангармонизма межатомного потенциала (классическая нелинейность), проявляется структурно-обусловленная (неклассическая) нелинейность, существенно меняющая условия нелинейных взаимодействий. Нелинейные акустические эффекты в твердом теле при малых деформациях незначительны, поэтому в подавляющем большинстве работ описываются квадратичными поправками, ответственными за генерацию второй акустической гармоники [4]. В работах [5–11] наблюдаемые нелинейные эффекты не могут быть объяснены в рамках классической пятikonстантной теории упругости. Эти эффекты объясняются наличием в исследуемых образцах дефектной структуры исследуемого материала или мик-

роструктурных неоднородностей (контрастных по своим упругим параметрам по сравнению с однородной средой-матрицей) Аномально высокая структурная нелинейность характерна для тел, обладающих микроструктурой или дефектами сплошности (трещины, поры, отслоения и т.п.). Такая структурная нелинейность, возможные механизмы которой рассмотрены в [12], может на несколько порядков превышать классическую упругую нелинейность [13]. Уравнения упругопластической среды, описывающие процесс накопления структурных повреждений [14, 15], наглядно демонстрируют, что наличие даже малых пластических деформаций приводит к появлению удвоенной частоты (второй гармоники) в спектре сдвиговой волны, распространяющейся в материале. В [16] получены уравнения, описывающие динамические процессы в материалах, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию. Показано, что при распространении в таком материале сдвиговой волны появляется квадратичная нелинейность, приводящая к возможности генерации сдвиговой волны удвоенной частоты, «запрещенной» уравнениями классической теории упругости. В [9] описана генерация второй гармоники при зондировании сред со структурной нелинейностью, которая обусловлена дефектами.

Результаты исследований в упомянутых работах предполагают, что нелинейные эффекты могут служить источником информации о структуре твердого тела и быть использованы при создании новых методов неразрушающего контроля различных материалов и конструкций.

Для ответа на практический вопрос: как принципы нелинейной акустики могут быть использованы при оценке состояния материала – в работе экспериментально исследовано поведение нелинейного акустического параметра (НАП) при деформировании образцов сплава АМгб1.

1. Контроль нелинейного акустического параметра

Представляется перспективным рассмотреть вопрос о мониторинге процесса накопления структурных изменений при деформировании 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 [17–21]. Изучение взаимосвязи НАП со стадийностью пластической деформации сплава АМгб1 проводилось с использованием поверхностных волн Рэлея. Применение такого типа зондирующих волн обусловлено возможностью их практического использования для ультразвукового контроля деталей и заготовок любой формы [22].

Поверхностные акустические волны (ПАВ) имеют эллиптическую поляризацию и содержат две упругие компоненты: поперечную и продольную. Процесс распространения упругой волны в деформируемом сплаве АМгб1 в силу нелинейных эффектов сопровождается генерацией удвоенной частоты, как продольной составляющей волны, так и сдвиговой, «запрещенной» уравнениями классической теории упругости.

На опыте в спектре акустической волны, прошедшей деформируемый образец, наблюдается первая гармоника и вторая гармоника:

$$A = A_f \sin(2\pi ft - kl) + A_{2f} \sin[2(2\pi ft - kl)].$$

где k – волновой вектор; l – расстояние между излучающим и приемным преобразователями ПАВ; f – частота сигнала; t – время.

Зависимость амплитуды второй гармоники A_{2f} от амплитуды основной волны A_f определяется выражением [25]

$$A_{2f} = N \cdot k_f^2 \cdot L \cdot A_f^m / 8,$$

где N – нелинейный акустический параметр второго порядка (НАП); k_f – волновой вектор основной волны; L – длина пути распространения волны. Параметр N характеризует величину упругой нелинейности в образце, а параметр m – механизм упругой нелинейности. В бездефектном твердом теле упругая нелинейность

определяется ангармонизмом межатомного взаимодействия. В этом случае показатель степени $m = 2$. В средах со структурной нелинейностью показатель степени $m = 1$.

Отсюда следует, что экспериментально измеренное отношение амплитуд первой и второй гармоник в течение всего процесса деформирования будет характеризовать зависимость НАП от структурного состояния металла образца. Для этого использовать стандартную процедуру ультразвукового контроля, основанную на возбуждении короткого импульса упругих волн, проблематично. Исходный спектр таких импульсов [23] маскирует информационные составляющие в прошедшем среде сигнале. В инженерной практике принимают (в первом приближении независимо от формы сигнала) $\Delta t \cdot \Delta f \approx 1$. Иными словами, чем длиннее импульс Δt , тем ширина его спектра частот Δf уже. Поэтому проблема экспериментального обоснования спектрального метода акустического зондирования состояла в генерации сигнала с узкой полосой спектра и низким уровнем шумов. Решение этих проблем потребовало создания специализированного экспериментального устройства [24], позволяющего измерять отношение амплитуд первой и второй гармоник.

Устройство, блок-схема которого приведена на рис. 1, позволяет измерять отношение амплитуды первой и второй упругих гармоник в автоматическом режиме. Возбуждение и прием в образцах проводилось пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП). Для возбуждения ПАВ использовался клиновидный преобразователь с резонансной частотой 1 МГц, прошедшая ПАВ регистрировалась клиновидным преобразователем с резонансной частотой 2 МГц. Этот преобразователь эффективно регистрировал ПАВ с частотами 1 МГц и 2 МГц. Аналогичная комбинация ПЭП использовалась в [25], где применили излучатель и приемник с резонансными частотами 5 МГц и 20 МГц соответственно.

Работа устройства заключается в следующем. По поступающей от компьютера по USB команде микроконтроллер запускает генератор, который формирует радиоимпульс с частотой заполнения 1 МГц и длительностью 3,5 мс, сигнал подается на пьезоизлучатель, имеющий резонансную частоту 1 МГц. Спектральные характеристики исходного сигнала, измеренные прибором DPO4032 фирмы Tektronix, составили значения: уровень второй гармоники – 83 дБ, уровень третьей – 53 дБ. После взаимодействия со средой при прохождении ПАВ в деформируемом образце сигнал фиксируется пьезоприемником, имеющим резонансную частоту 2 МГц. Сигнал с приемного ПЭП поступает на усилитель, имеющий, для расширения динамического диапазона, завал АЧХ на частоте 1 МГц по сравнению с 2 МГц около 20 дБ, затем сигнал оцифровывается 16-разрядным АЦП с частотой квантования 5 МГц и запоминается в буферном ОЗУ. После этого микроконтроллер выполняет спектральный анализ полученного сигнала и вычисляет отношение амплитуд спектральных компонент на частотах 2 МГц и 1 МГц. Результат по USB передается в компьютер.

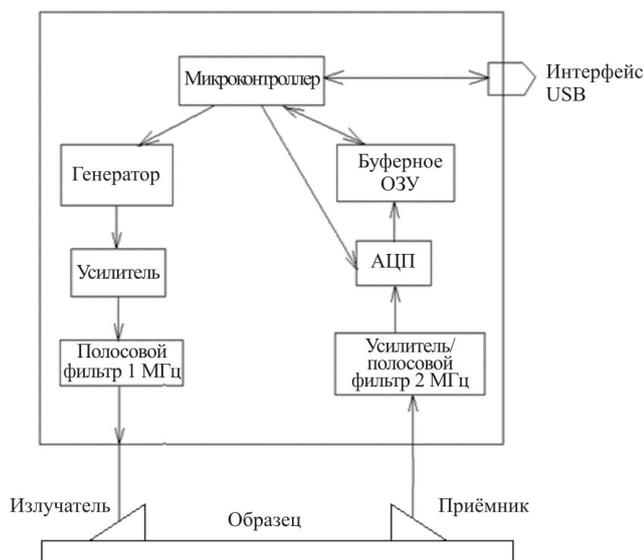


Рис. 1. Функциональная схема устройства для контроля параметра, характеризующего акустическую нелинейность

Fig. 1. Functional diagram of a device for monitoring a parameter that characterizes acoustic nonlinearity

Описанное экспериментальное устройство, представляющее собой компактный энергонезависимый прибор, позволяет исследовать металл на реальных конструкциях, что переводит его в ранг средств неразрушающего контроля.

2. Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на образцах сплава АМг61. Одноосная упругопластическая деформация материала создавалась путем испытания на растяжение пропорциональных плоских образцов толщиной 6 мм с шириной рабочей части 20 мм (тип 1 № 21 приложение 3 ГОСТ 1497). Деформирование образцов осуществлялось на универсальной испытательной машине фирмы Tinius Olsen Ltd, модель H100KU при скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин. Предельная нагрузка, реализуемая на машине, 100 000 Н; погрешность измерения нагрузки 0,5%; скорость траверсы 0,001–500 мм/мин; разрешающая способность системы измерения перемещения траверсы 0,001 мм; жесткость рамы при нормальных точках нагружения не менее 470 кН/мм.

В процессе деформирования широкополосным датчиком акустической эмиссии фиксировались изменения уровня акустической активности, вызванной перестройкой структуры АМг6. Для наблюдения за упругими импульсами АЭ использовался цифровой осциллограф. Регистрация амплитуды сигнала АЭ проводилась с помощью модуля АЦП/ЦАП ZET 210 в режиме непрерывного ввода аналогового сигнала датчика АЭ GT 205 в память персонального компьютера.

Одновременно с упругими импульсами АЭ при деформировании образцов контролировался НАП. Следу-

ет заметить, что генерация в зондирующем сигнале ПАВ второй гармоники может быть обусловлена различными причинами: нелинейностью пьезоэлектрических элементов в преобразователях; контактной нелинейностью; нелинейностью, связанной с ангармонизмом межатомного взаимодействия и, наконец, структурной нелинейностью в деформируемом металле. В процессе деформирования металла первые три причины генерации сигнала второй гармоники неизменны. Поэтому можно считать, что наблюдаемые флуктуации НАП в основном определяются структурной нелинейностью металла.

3. Результаты исследований

На рис. 2 представлены поведение амплитуды акустической эмиссии и НАП при деформировании образцов сплава АМг61.

Приведенные данные демонстрируют увеличение амплитуды измеренной акустической эмиссии в результате эволюции дефектной структуры как результата реакции материала на приложенное к нему механическое напряжение, что согласуется с результатами работ [26, 27]. Однако на ранних стадиях упругопластического деформирования проследить процесс эволюции дефектной структуры по активности сигналов АЭ на примере образца из сплава АМг6 затруднительно.

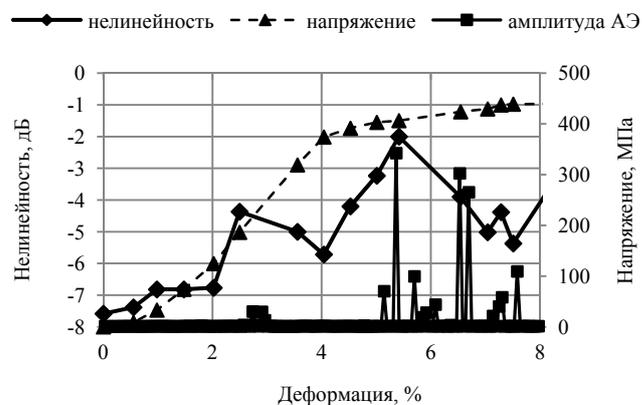


Рис. 2. Поведение контролируемых акустических параметров при деформировании образцов сплава АМг61

Fig. 2. Behavior of controlled acoustic parameters during deformation of AMg61 alloy samples

В то же время полученные данные свидетельствуют о том, что на ранних стадиях упругопластического деформирования НАП более чувствителен, чем параметр АЭ, при этом флуктуации активности АЭ коррелируют с поведением НАП, что косвенно говорит в пользу адекватности данных о НАП при контроле процесса деформирования АМг61. Следовательно, экспериментально зафиксированное формирование скачков нелинейности в процессе деформирования сплава АМг61 может свидетельствовать о перестройке структуры металла, смене механизма перестройки [28–30].

Следует отметить, что акустическая нелинейность волны для различной накопленной поврежденности (для различных степеней деформирования образцов) изменяется более существенно, чем скорость волны. Результаты, приведенные в [30], свидетельствуют об изменении скорости поверхностной волны при состоянии предразрушения не более чем 1 %, в то время как изменение акустической нелинейности волны составляет величину порядка до 6 дБ или почти в 2 раза по линейной шкале.

Заключение

Как видно из приведенных результатов, НАП является, наравне с параметрами акустической эмиссии, параметром, чувствительным к смене механизмов эволюции дефектной структуры, и может использоваться в качестве прогностического критерия. Аналогичное поведение НАП было зафиксировано в [25], где экспериментально определили влияние статического давления, приложенного к контакту двух материалов на величину нелинейного акустического параметра второго порядка (НАП) для ПАВ. Было обнаружено, что НАП немонотонно зависит от величины внешнего давления,

Библиографический список

1. Акустические свойства малоуглеродистой стали на различных стадиях разрушения / Л.Р. Ботвина [и др.] // Деформация и разрушение. – 2005. – № 4. – С. 35–41.
2. Плотников В.А., Макаров С.В. Акустическая эмиссия и деформационные процессы в алюминии при высоких температурах // Изв. вузов. Физика. – 2005. – № 11. – С. 33–38.
3. Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Исследование режимов развития процесса разрушения на основе данных наблюдений акустической эмиссии // Физ. мезомех. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 77–84.
4. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966. – 309 с.
5. Коробов А.И., Агафонов А.А., Изосимова М.Ю. Нелинейные упругие волны в твердотельном изотропном клине с дефектами // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88, вып. 3. – С. 385–391.
6. Генерация третьей гармоники и акустическая нелинейность высших порядков в твердых телах / Е.М. Баллад [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2001. – № 6. – С. 44–48.
7. Иляхинский А.В., Родюшкин В.М. Экспериментальные исследования влияния повреждаемости стали на закономерности распространения поверхностных волн // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 3. – С. 36–43.
8. Асаинов А.Ф., Ко Сел Лен, Солодов И.Ю. Нелинейное рассеяние поверхностных акустических волн механическими дефектами твердого тела // Акустический журнал. – 1993. – Т. 39, вып. 4. – С. 592–597.
9. Назаров В.Е., Сутин А.М. Генерация гармоник при распространении упругих волн в твердых нелинейных средах // Акустический журнал. – 1989. – Т. 35, вып. 4. – С. 711–716.
10. Экспериментальное исследование нелинейных акустических эффектов в зернистых средах / В.Ю. Зайцев

приложенного к границе: при увеличении давления величина НАП проходит через максимум.

Представленные данные убедительно демонстрируют увеличение акустической нелинейности в металле на различной стадии деформирования: как на ранних стадиях упругопластического деформирования, так и на стадии предразрушения. Таким образом, продемонстрирована возможность использования нелинейных волн Рэлея характеризовать поврежденность, связанную с пластической деформацией, и эта количественная информация может быть полезной для моделей прогнозирования ресурса.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00715А; № 19-08-00965а).

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research Project No.18-08-00715A and Project No.19-08-00965a.

[и др.] // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, вып. 5. – С. 633–644.

11. Коробов А.И., Прохоров В.М. Нелинейные акустические свойства алюминиевого сплава В95 и композита В95 // Акустический журнал. – 2016. – № 6. – С. 661–667.
12. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. – 2006. – Т. 176, № 1. – С. 77–95.
13. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Нелинейные явления при распространении упругих волн в твердых телах // УФН. – 1970. – Т. 102, № 4. – С. 549–586
14. Бакушев С.В. Продольно-поперечные волны деформаций слабого разрыва // Проблемы прочности и пластичности. – 2014. – Т. 76. – С. 114–121.
15. Доронин А.М., Ерофеев В.И. Генерация второй гармоники сдвиговой волны в упругопластической среде // Письма о материалах. – 2016. – Т. 6, № 2. – С. 102–104.
16. Генерация сдвиговых волн удвоенной частоты в материалах, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию / В.И. Ерофеев [и др.] // Дефектоскопия. – 2006. – № 4. – С. 28–36.
17. 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.
18. Erofeyev V.I., Monichev S.A. Elastic wave propagation in damaged materials and construction elements // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2000. – Vol. 11, no. 1–3. – P. 31–35.
19. Хазов П.А. Влияние поврежденности материала на эволюцию акустической волны // Приволжский научный журнал. – 2015. – № 2. – С. 32–41.
20. 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. – № 12 (60). – P. 4759–4767.

21. 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. – № 3 (49). – P. 681–684.

22. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 287 с.

23. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 240 с.

24. Ванягин А.В., Родюшкин В.М. Измерение акустической нелинейности поврежденного металла // *Измерительная техника*. – 2017. – № 10. – С. 42–44.

25. Ширгина Н.В., Кокшайский А.И., Коробов А.И. Нелинейные упругие явления при распространении акустических волн на плоской шероховатой границе твердых тел // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. – 2017. – № 4. – 1740802

References

1. Akusticheskie svoystva malouglerodistoi stali na razlichnykh stadiiakh razrusheniia [Acoustic properties of mild steel at various stages of destruction] /Botvina L.R. [i d.r.] // *Deformatsiia i razrushenie*. -2005.- №4.- S.35-41.

2. Plotnikov V.A., S.V. Makarov Akusticheskaia emissiia i deformatsionnye protsessy v aliuminii pri vysokikh temperaturakh // *Izv. vuzov. Fizika*. – 2005. – № 11. – S.33-38.

3. Belikov V.T., Rvkin D.G. Issledovanie rezhimov razvitiia protsessa razrusheniia na osnove dannykh nabliudeniia akusticheskoi emissii // *Fiz. mezomekh.* – 2017. – Т. 20. – № 4. – S. 77-84.

4. Zarembo L.K., Krasil'nikov V.A. Vvedenie v nelineinuiu akustiku [Introduction to nonlinear acoustics].-M.: Nauka, 1966. -309 s.

5. Korobov A.I., Agafonov A.A., Izosimova M.Iu. Nelineinye uprugie volny v tverdotel'nom izotropnom kline s defektami [Non-linear elastic waves in a solid-state isotropic wedge with defects] // *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*.-2018.-Т.88.- вып. 3.-S.385-391.

6. Generatsiia tret'ei garmoniki i akusticheskaiia nelineinost' vysshikh poriadkov v tverdykh telakh [Third-harmonic generation and higher-order acoustic nonlinearity in solids] / Ballad E.M. [i dr.] // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiia*. -2001.- № 6. – S.44-48.

7. Iiakhinskii A.V., Rodiushkin V.M. Eksperimental'nye issledovaniia vliianiia povrezhdaemosti stali na zakonomernosti rasprostraneniia poverkhnostnykh voln [Experimental studies of the influence of steel damage on the patterns of surface wave propagation] // *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. – 2018. – № 3.- S. 36–43.

8. Asainov A.F., Ko Sel Len, Solodov I.Iu. Nelineinoe rasseianie poverkhnostnykh akusticheskikh voln mekhanicheskimi defektami tverdogo tela [Nonlinear scattering of surface acoustic waves by mechanical defects of a solid]//*Akust. zhurn.* -1993.-T.39.-vyp.4.-S.592-597.

9. Nazarov V.E., Sutin A.M. Generatsiia garmonik pri rasprostraneniі uprugikh voln v tverdykh nelineinykh sredakh [Harmonic generation during the propagation of elastic waves in solid nonlinear media]// *Akust. zhurn.* – 1989.-Т. 35. вып. 4.- S. 711-716.

10. Eksperimental'noe issledovanie nelineinykh akusticheskikh effektov v zernistykh sredakh [An experimental study of non-

26. Тютин М.Р. Применение b – параметра акустической эмиссии как критерия разрушения материалов // *Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. ст. Междунар. конф.* – М., 2015. – С. 112–113.

27. Гиляров В.Л., Слуцкер А.И., Корсуков В.Е. Пространственное и временное самоподобие в процессах разрушения и деформирования нагруженных материалов // *Структура и свойства перспективных металлов и сплавов: сб. ст. XI междунар. сем. «Актуальные проблемы прочности».* – Великий Новгород, 2002. – С. 10.

28. Зуев А.Б., Семухин Б.С., Бушмелов К.И. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al // *Журнал технической физики*. – 2000. – Т. 70, вып. 1. – С. 52–56.

29. Конева Н.А., Козлов Э.Б. Современная картина стадий пластической деформации // *Вестник ТГУ*. – 2003. – Т. 8, вып. 4. – С. 521–518.

30. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности материалов. – Долгопрудный: Интеллект, 2016. – 376 с.

linear acoustic effects in granular media] / Zaitsev V.Iu. [i dr.]// *Akusticheskii zhurnal*. -2005.-Т.51.- в. 5.-S. 633-644.

11. Korobov A. I., Prokhorov V. M. Nelineinye akusticheskie svoystva aliuminiyevogo splava B95 i kompozita B95 [Non-linear acoustic properties of aluminum alloy B95 and composite B95]// *Akusticheskii zhurnal*. – 2016. – № 6. – S. 661-667.

12. Rudenko O.V. «Gigantskie nelineinosti strukturno-neodnorodnykh sred i osnovy metodov nelineinoy akusticheskoi diagnostiki [Giant nonlinearities of structurally heterogeneous media and the fundamentals of nonlinear acoustic diagnostic methods] // *UFN*.-2006.-Т.176.-№ 1.-S.77–95.

13. Zarembo L.K., Krasil'nikov V.A. // *UFN*. 1970. Т. 102. № 4. S. 549–586

14. Bakushev S.V. Prodol'no-poperechnye volny deformatsii slabogo razryva [Longitudinal-transverse waves of weak tensile strains]// *Problemy prochnosti i plastichnosti*. -2014.-Т.76.- S. 114-121.

15. Doronin A.M., Erofeev V.I. Generatsiia vtoroi garmoniki sdvigoivoi volny v uprugoplasticheskoi srede [Generation of the second harmonic of a shear wave in an elastic-plastic medium]// *Pis'ma o materialakh*. -2016.- Т. 6.-№ 2. -S.102-104.

16. Generatsiia sdvigovykh voln udvoennoi chastoty v materialakh, po-raznomu soprotivliaiushchikhsia rastiazheniiu i szhatiui [Generation of shear waves of double frequency in materials that differently resist tensile and compression] / Erofeev V.I. [i dr.] // *Defektoskopiia*. - 2006.-№ 4.- S.28-36.

17. 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.

18. V.I. Erofeev, S.A. Monichev. Elastic wave propagation in damaged materials and construction elements // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. -2000.- V. 11.- No. 1-3. -pp. 31-35.

19. Khazov P.A. Vliianie povrezhdennosti materiala na evoliutsiiu akusticheskoi volny [The effect of material damage on the evolution of an acoustic wave]//*Privolzhskii nauchnyi zhurnal*.- 2015.-№2.-S.32-41.

20. Yamagishi Hideki, Fukuhara Mikio Degradation behavior of moduli in extruded pure magnesium during low- to gigascale cyclic tension fatigue // *Acta Materialia* / Elsevier. – United Kingdom.- 2012. -№12 (60). – pp. 4759 – 4767.

21. 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. – Japan.- 2008. - №3 (49). -rr. 681 – 684.
22. Viktorov I.A. Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh [Sound surface waves in solids] – M.: Nauka,- 1981 – 287 s.
23. Kharkevich A.A. Spektry i analiz [Spectra and analysis]. M.: Knizhnyi dom «Librokom». -2009.-240 s.
24. Vaniagin A.V., Rodiushkin V.M. Izmerenie akusticheskoi nelineinosti povrezhdenogo metalla [Measurement of acoustic nonlinearity of damaged metal]. Izmeritel'naia tekhnika. 2017. № 10. S. 42-44.
25. Shirgina N.V., Kokshaiskii A.I., Korobov A.I. Nelineinye uprugie iavleniia pri rasprostraneni akusticheskikh voln na ploskoi sherokhovatoi granitse tverdykh tel [Nonlinear elastic phenomena during the propagation of acoustic waves on a flat rough border of solids] // Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta moskovskogo universiteta. -2017. – №4.- 1740802.
26. Tiutin M.R. Primenenie b – parametra akusticheskoi emissii kak kriteriia razrusheniia materialov [Application of the b – parameter of acoustic emission as a criterion for the destruction of materials] // sbornik statei Mezhdunarodnaia konferentsiia «Deformatsiia i razrushenie materialov i nanomaterialov». –Moskva, 2015.-S.112-113.
27. Giliarov V.L., Slutsker A.I., Korsukov V.E. Prostranstvennoe i vremennoe samopodobie v protsessakh razrusheniia i deformirovaniia nagruzhennykh materialov // Struktura i svoistva perspektivnykh metallov i splavov [Spatial and temporal self-similarity in the processes of fracture and deformation of loaded materials]. sbornik statei XL mezhdunarodnogo seminara «Aktual'nye problemy prochnosti»-Velikii Novgorod, 2002.- S.10.
28. Zuev A.B., Semukhin B.S., Bushmelov K.I. Izmenenie skorosti ul'trazvuka pri plasticheskoi deformatsii Al [The change in the speed of ultrasound during plastic deformation Al]//Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.- 2000.-T.70.-vyp.1.- S.52-56
29. Koneva N.A., Kozlov E.B. Sovremennaia kartina stadii plasticheskoi deformatsii [The modern picture of the stages of plastic deformation]. Vestnik TGU. 2003. T.8. vyp.4. S.521-518.
30. Zuev L.B., Danilov V.I. Fizicheskie osnovy prochnosti materialov-Dolgoprudnyi [Physical foundations of the strength of materials-Dolgoprudny]. ID Intellekt, 2016. 376s.