

УДК 620.179

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-344-353

ОБ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ МЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИИ ПРИ НАКОПЛЕНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ*

© 2021 г.

**Ерофеев В.И.¹, Иляхинский А.В.¹,
Мотова Е.А.¹, Родюшкин В.М.¹, Шекоян А.В.²**

¹*Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального
исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН»,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Институт механики Национальной академии наук
Республики Армения, Ереван, Армения*

vlkn2005@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021

С применением методов неразрушающего контроля рассмотрены вопросы определения допустимой долговечности или безопасного ресурса. Показано, что процедура мониторинга конструкции состоит в определении исходного состояния – нулевой зоны, где материал изделия подвергается небольшим эксплуатационным нагрузкам. С применением методов неразрушающего контроля измеряются акустические параметры, такие как скорость упругих акустических волн, нелинейный акустический параметр, разность скоростей при двухчастотном зондировании и др. Производится акустическое сканирование металла изделия в зонах, где имели место значительные нагрузки, знакопеременные напряжения, приводящие к интенсивному накоплению повреждений (разрушению металла, ведущего к появлению трещин); определяется зона «N», где параметр состояния металла, за который принимается величина, характеризующая отличие акустического параметра (скорости упругих волн, нелинейного акустического параметра, разности скоростей при двухчастотном зондировании) относительно этого же параметра в зоне ноль, превышает установленный уровень. Установленные закономерности, связывающие наличие пластической деформации с разностью задержек (скорости) упругих волн Рэлея на разных частотах зондирования при фиксированной базе между излучателем и приемником упругих волн, а также поведение нелинейного акустического параметра в течение времени безопасного ресурса дает основание предположить возможность использования наблюдаемого факта в качестве принципа контроля предельного состояния материала, обусловленного пластическими деформациями на производственных конструкциях. На основании указанного подхода предложена инженерная методика определения технического состояния материала конструкций производственных объектов, позволяющая установить три этапа эксплуатации: режим надежной эксплуатации, режим контролируемой эксплуатации и критический режим эксплуатации.

* Выполнено в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021–2023 гг. по теме №0030-2021-0025 и при поддержке РФФИ (грант №19-08-00965-а).

Ключевые слова: повреждения, предельное состояние, критическое состояние, ресурс безопасного повреждения, методы дефектоскопии, трещинообразование, акустические параметры.

Введение

В процессе эксплуатации в конструкциях производственных объектов происходят накопления повреждений, приводящие к изменению прочностных свойств материала. Этот процесс может быть обусловлен усталостью, коррозией, ползучестью, деградацией материала, износом подвижных соединений и т.д. [1]. В связи с этим конструкция с течением времени может перейти в предельное состояние, при котором произойдет отказ в работе или снижение надежности до предельно низкой величины, после которой возникает опасность катастрофического отказа.

В рамках принципа безопасного повреждения возможно постепенное развитие повреждений, которые могут быть своевременно обнаружены до достижения ими опасных размеров. При постепенном отказе (накоплении повреждений) в качестве параметра состояния в [1] принята величина:

$$\Pi = \sum \left(\frac{\Theta_i}{\Theta_{i*}} \right),$$

где Θ_i – повреждение в конструкции на i -м этапе эксплуатации (текущее техническое состояние); Θ_{i*} – предельное повреждение в условиях i -го этапа.

При обеспечении ресурса конструкции возникают проблемы определения допустимой долговечности $t_d = T_* + T_{тр}$, рис. 1, где $T_{тр}$ – время роста повреждения (трещины) до критического размера, T_* – время постепенного развития повреждений, или безопасного ресурса, определяемого экспериментально на нескольких конструкциях или теоретическим путем, как указано в [2]; временные отсечки на горизонтальной оси – интервал между техническими осмотрами.

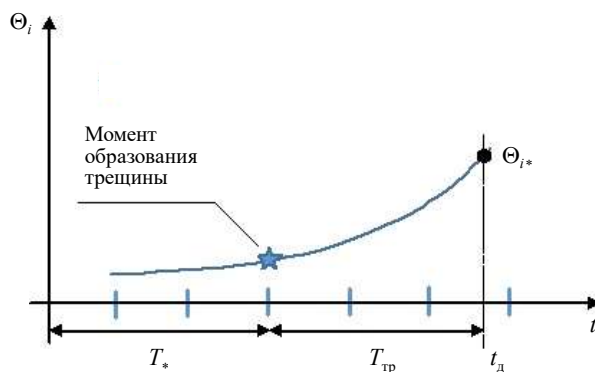


Рис. 1. Ресурс безопасного повреждения

Достижение предельного состояния конструкциями: накопление больших деформаций из-за ползучести материала, усталостных повреждений, превышение предела текучести и т.д. – считается недопустимым. Важно знать, какие предельные состояния возможны, и ввести по их числу параметры состояния, величина каждого из которых характеризует близость напряженно-деформированного состояния (НДС) элемента к соответствующему предельному состоянию.

В случае усталостных повреждений, чтобы определить длительность первой стадии T_* – времени безопасного ресурса или число циклов до образования усталостной трещины, можно использовать модель А. Веллера [1, 2]; $T_{тр}$ – время до критического роста повреждения (трещины) можно определить диаграммой Е.М. Морозова [3]. Техническое состояние в течение $T_{тр}$ оценивается контролем конструкции методами дефектоскопии (контроль трещин), в течение T_* вследствие отсутствия дефектов оценивать текущее техническое состояние проблематично.

Известно, что методики контроля состояния металла технических объектов на этапах их эксплуатации до появления макродефектов (трещин и других несплошностей) могут быть построены на основе современных методов физической акустики [4–14]. Установлено, что акустические характеристики материала, подвергаемого эксплуатационным воздействиям, начинают изменяться при исчерпании всего 3–5% общего ресурса. Для недопущения предельного состояния, обусловленного пластическими деформациями, необходимо проводить мониторинг поврежденности, внесенной при деформировании металла. Рост поврежденности можно оценивать, используя данные значений скорости ультразвука. Тогда при постепенном накоплении повреждений в качестве параметра состояния можно принять отношение величины скорости в текущий момент к значению скорости при критическом техническом состоянии. Например, по данным, приведенным в [15, 16], изменение скорости звука в 2% можно считать свидетельством предельного состояния.

Методика исследований

Для оценки диапазона изменения акустического параметра в зависимости от внесенной поврежденности металла проведены экспериментальные исследования на образцах из стали 20ГЛ. На рис. 2 приведены данные измерений задержки – времени распространения упругой волны между излучающим и приемным преобразователем в металле, подверженном деформированию. На свободном от нагрузки образце металла проводится повторное измерение скорости звука. Снижение скорости (увеличение задержки) значительно проявилось в районе 300 МПа, что соответствует пределу текучести, то есть началу пластического деформирования. В качестве параметра повреждения использована величина Q_i – задержка волн, способная «чувствовать» текущее состояние металла в течение времени безопасного ресурса до образования явного повреждения.

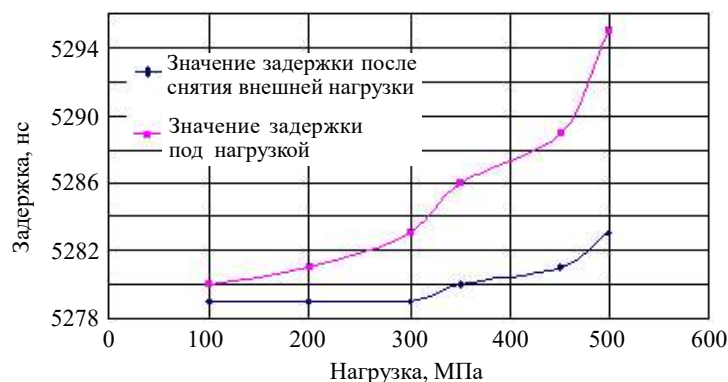


Рис. 2. Зависимость задержек упругих волн

На основе такого подхода разработана инженерная методика определения технического состояния материала на примере боковых рам тележек грузовых вагонов [17]. Образцы металла (20ГЛ) рамы подвергались механическим испытаниям и зондированию поверхностными волнами. Показано, что в металле, доведенном до состояния предразрушения, скорость волны снижается до 2% относительно первоначального значения. Поскольку несущая способность металла зависит от уровня накопленных повреждений и характеристик текущей дефектности, весь ресурс или жизненный путь изделия (с точки зрения накопления повреждений) делится на три этапа, определяемых степенью изношенности металла (рис. 3): режим надежной эксплуатации, режим контролируемой эксплуатации, критический режим эксплуатации [17]. В качестве показателя для оценки состояния металла боковых рам тележек предложена величина, характеризующая отличие скорости в зоне «1» (зона с максимальными эксплуатационными повреждениями) рамы тележки относительно скорости в зоне «0» (зона с незначительными повреждениями (исходное состояние)).

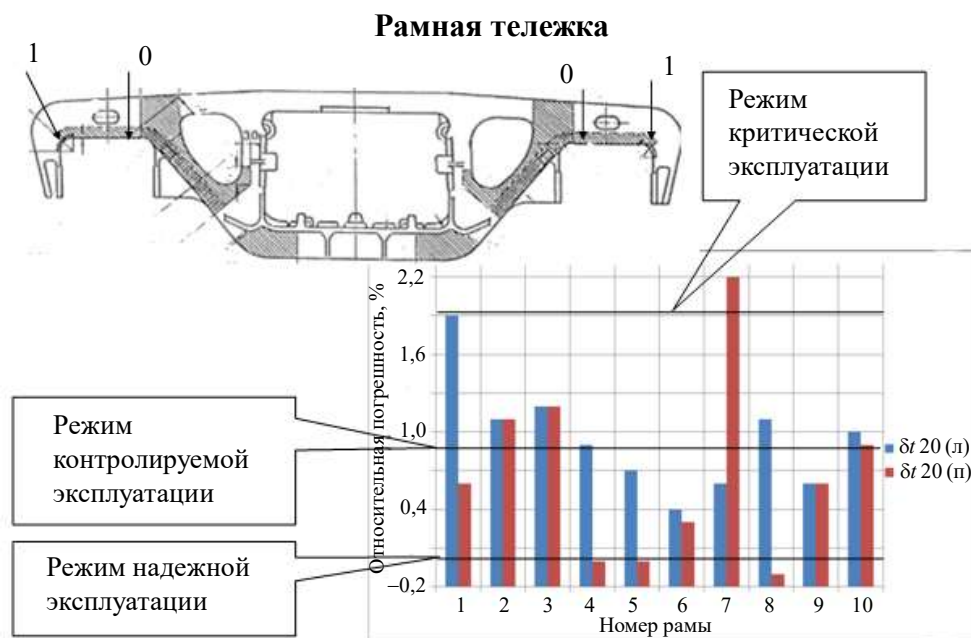


Рис. 3. Режимы эксплуатации

Экспериментальные данные, полученные непосредственно на рамах тележек, прошедших различный срок эксплуатации, свидетельствуют о чувствительности предложенного акустического метода к «преддефектному» состоянию металла. Из представленных данных видно, что в числе проверенных рам имеются экземпляры, где задержка ультразвука в металле контролируемых зон отличается более чем на 1%, что можно считать показателем наличия рассеянных повреждений, являющихся причиной начинающегося усталостного разрушения. Относительные изменения скорости упругих волн в металле рамных конструкций порядка 2% свидетельствуют о том, что металл в этой зоне утратил свои эксплуатационные свойства. Для всех рам (эксплуатируемых различное время и в разных условиях) зафиксировано различное по величине уменьшение скорости распространения рэлеевских волн в опасной зоне, что говорит о развитии в той или иной степени деградационных процессов, подго-

тавливающих зарождение макротрещин. Таким образом, появляется техническая возможность контроля состояния металла рамы на стадии предразрушения, а следовательно, перспектива построения количественного метода оценки уровня эксплуатационной поврежденности. Конечно, конкретная реализация этой возможности потребует доработки методики измерений, аппаратной и программной частей используемого средства измерения, осуществления обучающих экспериментов на представительной выборке объектов контроля с известной историей эксплуатации.

Представляется актуальным поиск иных акустических характеристик, способных «чувствовать» текущее состояние металла в течение времени безопасного ресурса до образования явного повреждения (трещины). К таким акустическим характеристикам относится нелинейный акустический параметр (НАП) [18–21].

Нелинейность упругой среды при распространении в ней акустических волн приводит к генерации в зондирующем сигнале спектральных составляющих на частотах, кратных основной частоте. Контролируя параметры нелинейности среды, возрастающей при появлении структурных изменений, «зародышей» процесса разрушения, можно косвенно оценивать состояние металла. Уравнения упругопластической среды, описывающие процесс накопления структурных повреждений [22], наглядно демонстрируют, что наличие даже малых пластических деформаций приводит к появлению удвоенной частоты (второй гармоники) в спектре сдвиговой волны, распространяющейся в материале. Необходимо выяснить, как связана акустическая нелинейность волны с накопленной поврежденностью для различных степеней деформирования образцов.

В качестве параметра состояния можно использовать уровень спектральной составляющей в зондирующей упругой волне на удвоенной частоте исходного сигнала. Изучение взаимосвязи НАП со стадийностью пластической деформации проводилось с использованием поверхностных волн Рэлея [23]. Возбуждение зондирующей волны экспериментально исследовалось преобразователем с резонансной частотой 2 или 5 МГц. Вместе с тем регистрация зондирующего сигнала проводилась идентичным преобразователем, расположенным на фиксируемом расстоянии от излучателя. Путь распространения волны при деформировании образца оставался постоянным. Использованы стандартные, соответствующие ГОСТам, преобразователи (П121-5.00-90S и П121-2.00-90S), регистрация формы зондирующего импульса проводилась с использованием осциллографа TDS2022B, обеспечивающего частоту дискретизации при записи исследуемого сигнала 5 нс. Спектральное разложение прошедшего через деформированный металл импульса на гармонические составляющие с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволяет оценить соотношение основной и второй гармоники, характеризующее величину нелинейного акустического параметра. На рис. 4 представлены результаты контроля НАП при деформировании образцов сплава Ст3. Можно предположить, что увеличение значения нелинейного акустического параметра в результате эволюции дефектной структуры – результат реакции материала на приложенное к нему механическое напряжение. Следует заметить, что переходу состояния материала без повреждения к состоянию с интенсивным накоплением повреждений соответствует изменение выбранного нелинейного акустического параметра на 5 дБ (в 1,78 раза), что существенно более представительно по отношению к относительному изменению скорости при изменении указанных состояний.

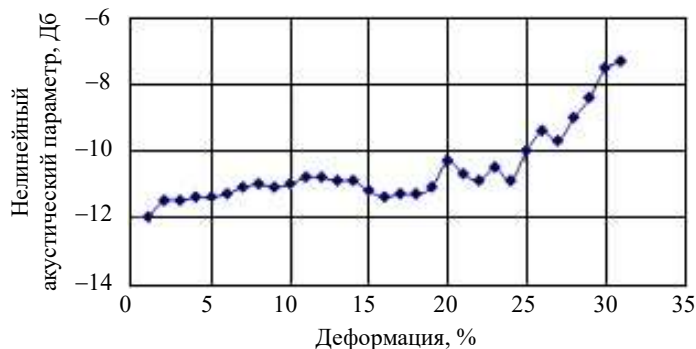


Рис. 4. Поведение контролируемого нелинейного акустического параметра при деформировании образца из Ст3

Представляют интерес частотно-зависимые акустические характеристики, которые в течение времени безопасного ресурса чувствительны к степени упругопластического деформирования и могут выступать в качестве параметра, оценивающего предельное состояние по достижению накопленной деформацией предела текучести.

Проведены экспериментальные исследования влияния пластической деформации на разность скорости упругих волн Рэлея при различных частотах зондирования. Сравнивались величины, измеренные на недеформированном образце металла и на образце, доведенном до остаточной деформации 3%, для сталей марки С275 (ГОСТ 27772-88) и 10ХСНД (ГОСТ 19281-2014). Одноосное НДС материала образцов создавалось путем испытания на растяжение на универсальной испытательной машине фирмы Tinius Ollsen Ltd модель H100KU.

Зондирование образцов стали С275 проводилось на плоских пропорциональных образцах по ГОСТ 1497 толщиной 8 мм с шириной рабочей части 20 мм на разных стадиях упругопластического деформирования с использованием поверхностных волн Рэлея. Упругие волны создавались пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП) на частотах колебаний 2, 5 и 10 МГц. Излучающий и приемный ПЭП устанавливались в одном блоке на фиксированном расстоянии друг от друга, рис. 5. Возбуждение излучающего ПЭП осуществлялось с помощью дефектоскопа А1214. Регистрация зондирующего импульса осуществлялась на осциллографе Tektronix TDS2022 с максимальным разрешением по времени 2 нс.



Рис. 5. Излучающий и приемный ПЭП в одном блоке

В качестве параметра состояния выбрано отличие задержек принятого сигнала относительно исходного положения информативной точки (переход импульса через нулевое значение между полуволнами противоположного знака, имеющими максимальное значение), измеренных на разных частотах зондирования. Увеличение значения задержки при постоянном расстоянии между излучающим и приемным

преобразователями свидетельствует об уменьшении скорости зондирующего импульса и наоборот. Прослеживается значимая зависимость скорости от частоты. Задержка на 5 МГц относительно задержки на 2 МГц увеличилась на 20 нс, задержка на частоте 10 МГц относительно задержки на 5 МГц увеличилась на 50 нс.

Зондирование образцов стали 10ХСНД проводилось также на плоских пропорциональных образцах толщиной 12 мм с шириной рабочей части 15 мм и длиной рабочей части 300 мм на частотах 1, 2 и 5 МГц. Сравнивались результаты, полученные на недеформированном образце и деформированном до 3%. Зондирование на частоте 1 МГц не дало значимого результата, для волны на частоте 2 МГц разница в задержке составила 0,1 мс, для волны с частотой 5 МГц – 0,3 мс.

Представленные акустические данные грубо отражают факт накопления эксплуатационной поврежденности, но они дают решение плохо обусловленной диагностической задачи. Кроме того, предлагаемый метод оценки состояния металла рам обеспечен средствами измерений и, следовательно, уже сейчас может быть использован на практике.

Заключение

На основе проведенных экспериментальных исследований и процедуры мониторинга при постепенном отказе (накоплении повреждений) в качестве параметра состояния предложена величина $\Pi = \sum (\Theta_i / \Theta_{i*})$, где в качестве Θ_i могут выступать акустические параметры, такие как скорость упругих волн, нелинейный акустический параметр, разность скоростей при многочастотном зондировании в конструкции на i -м этапе эксплуатации; Θ_{i*} – предельное значение в условиях i -го этапа.

Установленная закономерность, связывающая наличие пластической деформации с разностью задержек (скорости) упругих волн Рэлея на разных частотах зондирования при фиксированной базе между излучателем и приемником упругих волн, а также поведение нелинейного акустического параметра в течение времени безопасного ресурса дает основание предположить возможность использования наблюдаемого факта в качестве принципа контроля предельного состояния материала, обусловленного пластическими деформациями на производственных конструкциях.

Список литературы

1. Волков В.М. *Надежность машин и тонкостенных конструкций: Учеб. пособие.* Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2011. 365 с.
2. Волков В.М. *Прочность корабля: Учебник.* Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 1994. 256 с.
3. Parton V.Z., Morozov E.M. *Mechanics of Elastic-Plastic Fracture.* New York: Hemisphere Publ. 1989. 522 p.
4. Бритенков А.К., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В. Исследование методом акустического зондирования физико-механических свойств титанового сплава ТИ-6AL-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления. *Физика и механика материалов.* 2021. Т. 47. №1. С. 139–158. DOI: 10.18720/MPM.4712021_14.
5. Ono K. Acoustic emission. In: *Springer Handbook of Acoustics.* Ed. T.D. Rossing. New York: Springer, 2014. P. 1209–1229. DOI: 10.1007/978-1-4939-0755-7_30.
6. Bayer P., Singher L., Notea A. Early detection of fatigue damage through ultrasonic non-destructive evaluation. Part II: Experimental. *Journal of Testing and Evaluation.* 1999. Vol. 27. Iss. 6. P. 432–440. <https://doi.org/10.1520/JTE12172J>.
7. Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A., Pakhomov P.A., Rodyushkin V.M. Ultrasonic sensing method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic

deformation. *Physical Mesomechanics*. 2020. Vol. 23. Iss. 3. P. 241–245. <https://doi.org/10.1134/S102995992003008X>.

8. Erofeev V.I., Ilyahinsky A.V., Nikitina E.A., Rodyushkin V.M. Study of the defective structure of metal by the method of ultrasonic sounding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2019. Vol. 48. Iss.1. P. 93–97. <https://doi.org/10.3103/S1052618819010060>.

9. Ilyakhinskiy A., Rodyushkin V., Berezin E. Ultrasonic flaw detection capabilities at first stage of technological process of ship engine overhaul. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. P. 02012-1–02012-6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402012>.

10. Erofeev V.I., Ilyahinskiy A.V., Nikitina E.A., Rodyushkin V.M. Means for increasing the sensitivity of acoustic probing when studying the structure of metals. *Russian Journal of Non-destructive Testing*. 2018. Vol. 54. Iss. 2. P. 92–95. <https://doi.org/10.1134/S106183091802002X>.

11. Иляхинский А.В., Родюшкин В.М. Экспериментальные исследования влияния повреждаемости стали на закономерности распространения поверхностных волн. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2018. №3. С. 36–43. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2018.3.04>.

12. 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.10.003>.

13. Ерофеев В.И., Никитина Е.А., Хазов П.А. Влияние поврежденности материала на эволюцию акустической волны. *Приволжский научный журнал*. 2015. №2 (34). С. 32–41.

14. Yamagishi H., Fukuhara M. Degradation behavior of moduli in extruded pure magnesium during low- to giga-scale cyclic tension fatigue. *Acta Materialia*. 2012. Vol. 60. Iss. 12. P. 4759–4767. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.05.027>.

15. Zuev L.B., Murav'ev V.V., Danilova Yu.S. Criterion for fatigue failure in steels. *Technical Physics Letters*. 1999. Vol. 25. Article No 352. <https://doi.org/10.1134/1.1262478>.

16. Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. *Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации*. Отв. ред. Ф.М. Митенков. М.: Наука, 2009. 280 с.

17. Родюшкин В.М., Углов А.Л., Хлыбов А.А., Широкий Г.Б. О возможности оценки состояния металла боковых рам тележек грузовых вагонов акустическим методом. *Вестник ВНИИЖТ*. 2014. №1. С. 19–24.

18. Korobov A.I., Agafonov A.A., Izosimova M.Yu. Nonlinear elastic waves in a solid isotropic wedge with defects. *Technical Physics*. 2018. Vol. 63. Iss. 3. P. 374–380. <https://doi.org/10.1134/S106378421803012X>.

19. Korobov A.I., Prokhorov V.M. Nonlinear acoustic properties of the B95 aluminum alloy and the B95/nanodiamond composite. *Acoustical Physics*. 2016. Vol. 62. Iss.6. P. 681–687. <https://doi.org/10.1134/S1063771016050067>.

20. Родюшкин В.М., Мотова Е.А. Возможность использования нелинейных акустических эффектов для контроля структурных изменений металла. *Вестник научно-технического развития*. 2019. № 11(147). С. 26–32. DOI: 10.18411/vntr2019-147-4.

21. Иляхинский А.В., Родюшкин В.М. О нелинейном акустическом параметре при деформировании сплава АМг61. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2020. №3. С. 41–47. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.05.

22. Доронин А.М., Ерофеев В.И. Генерация второй гармоники сдвиговой волны в упругопластической среде. *Письма о материалах*. 2016. Т. 6. №2. С. 102–104. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2016-2-102-104>.

23. Vanyagin A.V., Rodyushkin V.M. Measurement of acoustic nonlinearity of damaged metal. *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 60. Iss. 10. P. 1028–1031. DOI: 10.1007/s11018-018-1312-x.

References

1. Volkov V.M. *Nadezhnost mashin i tonkostennikh konstruksiy: Uchebnoye posobiye [Reliability of Machines and Thin-Walled Structures: Tutorial]*. Nizhny Novgorod. NGTU Publ. 2011. 365 p. (In Russian).

2. Volkov V.M. *Prochnost korablia: Uchebnik [Ship Strength: Textbook]*. Nizhny Novgorod. NGTU Publ. 1994. 256 p. (In Russian).

3. Parton V.Z., Morozov E.M. *Mechanics of Elastic-Plastic Fracture*. New York. Hemisphere Publ. 1989. 522 p.

4. Britenkov A.K., Rodyushkin V.M., Ilyakhinsky A.V. Issledovanie metodom akusticheskogo zondirovaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv titanovogo splava TI-6AL-4V, poluchennogo metodom posloynogo lazernogo splavlaniya [Acoustic sensing study of the physical and mechanical properties of titanium alloy TI-6AL-4V, made by selective laser melting]. *Fizika i mekhanika materialov [Materials Physics and Mechanics]*. 2021. Vol. 47. No 1. P. 139–158 (In Russian).
5. Ono K. Acoustic emission. In: *Springer Handbook of Acoustics*. Ed. T.D. Rossing. New York. Springer. 2014. P. 1209–1229. DOI: 10.1007/978-1-4939-0755-7_30.
6. Bayer P., Singher L., Notea A. Early detection of fatigue damage through ultrasonic non-destructive evaluation. Part II: Experimental. *Journal of Testing and Evaluation*. 1999. Vol. 27. Iss. 6. P. 432–440. <https://doi.org/10.1520/JTE12172J>.
7. Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A., Pakhomov P.A., Rodyushkin V.M. Ultrasonic sensing method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic deformation. *Physical Mesomechanics*. 2020. Vol. 23. Iss. 3. P. 241–245. <https://doi.org/10.1134/S102995992003008X>.
8. Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A., Rodyushkin V.M. Study of the defective structure of metal by the method of ultrasonic sounding. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2019. Vol. 48. Iss. 1. P. 93–97. <https://doi.org/10.3103/S1052618819010060>.
9. Ilyakhinskiy A., Rodyushkin V., Berezin E. Ultrasonic flaw detection capabilities at first stage of technological process of ship engine overhaul. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. P. 02012-1–02012-6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402012>.
10. Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A., Rodyushkin V.M. Means for increasing the sensitivity of acoustic probing when studying the structure of metals. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. Vol. 54. Iss. 2. P. 92–95. <https://doi.org/10.1134/S106183091802002X>.
11. Ilyakhinsky A.V., Rodyushkin V.M. Eksperimentalnye issledovaniya vliyaniya povrezhdaemosti stali na zakonmernosti rasprostraneniya poverkhnostnykh voln [Experimental studies of the effect of steel damage on the patterns of surface waves propagation]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2018. Iss. 3. P. 36–43 (In Russian).
12. 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. *Int. J. Fatigue*. 2018. Vol. 106. P. 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.10.003>.
13. Erofeev V.I., Nikitina E.A., Khazov P.A. Vliyanie povrezhdennosti materiala na evolyutsiyu akusticheskoy volny [Influence of material damage on evolution of an acoustic wave]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. 2015. No 2 (34). P. 32–41 (In Russian).
14. Yamagishi H., Fukuhara M. Degradation behavior of moduli in extruded pure magnesium during low- to giga-scale cyclic tension fatigue. *Acta Mater.* 2012. Vol. 60. Iss. 12. P. 4759–4767. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.05.027>.
15. Zuev L.B., Murav'ev V.V., Danilova Yu.S. Criterion for fatigue failure in steels. *Technical Physics Letters*. 1999. Vol. 25. Article No 352. <https://doi.org/10.1134/1.1262478>.
16. Uglov A.L., Erofeev V.I., Smirnov A.N. *Akusticheskiy kontrol oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatatsii [Acoustic Control of Equipment During Manufacture and Operation]*. Ed. F.M. Mitenkov. Moscow. Nauka Publ. 2009. 280 p. (In Russian).
17. Rodyushkin V.M., Uglov A.L., Khlybov A.A., Shiroky G.B. O vozmozhnosti otsenki sostoyaniya metalla bokovykh ram telezhek gruzovykh vagonov akusticheskim metodom [Freight car bogie sideframe metal condition estimability by acoustic method]. *Vestnik VNIIZHT zheleznodorozhnogo transporta [VNIIZHT Scientific Journal]*. 2014. No 1. P. 19–24 (In Russian).
18. Korobov A.I., Agafonov A.A., Izosimova M.Yu. Nonlinear elastic waves in a solid isotropic wedge with defects. *Technical Physics*. 2018. Vol. 63. Iss. 3. P. 374–380. <https://doi.org/10.1134/S106378421803012X>.
19. Korobov A.I., Prokhorov V.M. Nonlinear acoustic properties of the B95 aluminum alloy and the B95/nanodiamond composite. *Acoust. Phys.* 2016. Vol. 62. Iss. 6. P. 681–687. <https://doi.org/10.1134/S1063771016050067>.
20. Rodyushkin V.M., Motova E. A. Vozmozhnost ispolzovaniya nelineynykh akusticheskikh effektiv dlya kontrolya strukturnykh izmeneniy metalla [Methodical bases of nonlinear acoustic methods of estimates of structural changes of metal]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya [Bulletin of Science and Technical Development]*. 2019. No 11(147). P. 26–32 (In Russian).

21. Ilyahinsky A.V., Rodyushkin V.M. O nelineynom akusticheskom parametre pri deformatsii splava AMG61 [About nonlinear acoustic parameter at deformation AMG61 alloy]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2020. No 3. P. 41–47 (In Russian).

22. Doronin A.M., Erofeev V.I. Generatsiya vtoroy garmoniki sdvigovoy volni v uprugoplasticheskoy srede [A generation of second harmonic of shear wave in elasto-plastic media]. *Pisma o materialakh [Letters on Materials]*. 2016. Vol. 6. Iss. 2. P. 102–104. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2016-2-102-104> (In Russian).

23. Vanyagin A.V., Rodyushkin V.M. Measurement of acoustic nonlinearity of damaged metal. *Meas. Tech.* 2018. Vol. 60. Iss. 10. P. 1028–1031. DOI: 10.1007/s11018-018-1312-x.

ON THE ACOUSTIC PARAMETERS OF METAL CONSTRUCTION WHEN DAMAGE IS ACCUMULATED

Erofeev V.I.¹, Ilyahinskii A.V.¹, Motova E.A.¹,
Rodyushkin V.M.¹, Shekoyan A.V.²

¹*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences –
Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences
of the Republic of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia*

In the work with the use of non-destructive control methods, the issues of determining acceptable durability or safe resource are considered. It is shown that the design monitoring procedure can be presented as follows: determines the original state -zero zone, where the material of the product was subjected to low operational loads; further, with the use of non-destructive control methods, the acoustic parameter is measured (without disassembling the product), such as the speed of elastic acoustic waves, non-linear acoustic parameter, difference of velocities with two-frequency sensing, etc.; acoustic scanning of the product's metal is performed, in areas where there have been significant loads, sign-off voltages, leading to an intensive accumulation of damage (the destruction of metal leading to cracks); defined zone “N” where the metal state parameter, for which the value is taken, characterizing the difference of the acoustic parameter (the speed of elastic waves, non-linear acoustic parameter, the difference in velocity in two-frequency sensing) relative to the same parameter in the zone of zero exceeds the established level. The regularities established in the work linking the presence of plastic deformation with the difference in the delays (velocity) of elastic Rayleigh waves at different sounding frequencies at a fixed base between the emitter and the receiver of elastic waves, as well as the behavior of a nonlinear acoustic parameter during the safe resource time, suggest the possibility of using the observed fact as a principle for controlling the limiting state of the material due to plastic deformations on industrial structures. Based on the proposed approach, an engineering methodology for determining the technical condition of the material of the structures of production facilities is proposed, which allows to establish three stages of operation: the reliable operation mode; the controlled operation mode and the critical operation mode.

Keywords: damage, extreme condition, critical condition, resource of safe damage, methods of defectoscopy, cracking, acoustic parameters.