

УДК 620.179.16
DOI: 10.37890/jwt.vi79.492

Ультразвуковой мониторинг пластической деформации

В. М. Родюшкин¹

ORCID: 0000-0002-3081-0288

А.В. Иляхинский¹

ORCID: 0000-0002-7677-8455

А.Б. Корнев²

ORCID: 0009-0006-1954-2004

К.О. Карзанов²

ORCID: 0009-0000-8746-1691

¹*Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород*

²*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Оценка последствий аварий, анализ безопасности, снижение рисков являются одними из ключевых тем исследований в области судоходства. Анализ аварийных ситуаций показывает, что все они в большинстве случаев характеризуются комбинацией каких-то причин, одна из которых – возникновение в элементах судов недопустимого напряженно-деформированного состояния. Определение характера разрушения является одним из мероприятий, позволяющих повысить надежность судов. Наличие пластической деформации, являющиеся признаком предельного состояния при мониторинге конструкции, приводит к видимому изменению геометрии структурных составляющих, но не к нарушению сплошности, которое согласно правилам Регистра контролируется при техническом освидетельствовании судна. Имея в распоряжение только регламентированные стандартные средства контроля, выявить пластическую деформацию не удастся. В статье рассматриваются вопросы контроля пластических деформаций в судостроительной стали 10ХСНД методом, основанном на анализе распространения упругих волн в ультразвуковом диапазоне в контролируемом изделии. Описан комплекс проведенных механических испытаний на растяжение и металлографических исследований. Путем растяжения плоского пропорционального образца в материале создавалось одноосное напряженно-деформированное состояние. При достижении требуемого уровня деформации исследовались изменения в структуре металла. Приведен анализ ультразвуковых данных при импульсном ультразвуковом зондировании и уровня генерации второй гармоники при непрерывном монохроматическом излучении ультразвука. Экспериментальные данные демонстрируют чувствительность ультразвукового метода к накоплению пластической деформации в металле при статическом нагружении. Изложенная в работе методика позволяет исключить неоднозначность в оценке напряженно-деформированного состояния элементов судна. Применение ультразвукового мониторинга пластической деформации в рамках технического обслуживания судов будет способствовать уменьшению аварийности на флоте.

Ключевые слова: пластическая деформация, ультразвуковой контроль, скорость упругой волны, генерация второй гармоники, микротвердость, микроструктура.

Ultrasonic monitoring of plastic deformation

Vladimir M. Rodyushkin¹

ORCID: 0000-0002-3081-0288

Aleksandr V. Ilyakhinskiy¹

ORCID: 0000-0002-7677-8455

Andrey B. Kornev²

ORCID: 0009-0006-1954-2004

Kirill O. Karazanov²

ORCID: 0009-0000-8746-1691

¹*Institute of Problems of Machine Science RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. Accident impact assessment, safety analysis, and risk reduction are among the core research topics in the field of shipping. Analysis of emergency situations shows that all of them in most cases are characterized by a combination of some causes, one of which is the occurrence of inadmissible stress-strain state in ship elements. Determining the nature of fracture is one of the ship's reliability improving measures. The presence of plastic deformation is a sign of the limiting condition when monitoring the structure. This leads to a visible change in the geometry of the structural components, but not to a violation of continuity, which, according to the rules of the Register, is controlled during the technical inspection of the ship. Having only regulated standard controls at its disposal, it is not possible to identify plastic deformation. The article discusses the issues of plastic deformations' control in 10XCHД shipbuilding steel by a method that is based on the analysis of the ultrasonic wave propagation characteristics in a controlled product. The complex of mechanical tensile tests and metallographic studies is described. The uniaxial stress-strain state of the material was created by tensile testing of a flat proportional sample. Changes in the metal structure were investigated when the required level of deformation was reached. The analysis of ultrasonic data with pulsed ultrasonic sensing and the level of second harmonic generation with continuous monochromatic ultrasonic emission is presented. Experimental data demonstrate the ability of the ultrasonic method to detect the pre-existing defects in metal under static loading, and allow for a more accurate assessment of the stress and strain state of ship's components, which can fundamentally change the picture of destruction. The use of ultrasonic plastic deformation monitoring in the framework of ship maintenance will help reduce accidents in the fleet.

Keywords: plastic deformation, ultrasonic control, elastic wave speed, second harmonic generation, microhardness, microstructure.

Введение

Исключительная важность контроля за текущим состоянием металла высоконагруженных элементов судовых конструкций обусловлена особенностями их работы (агрессивная среда, безопасность эксплуатации). Повреждению судовых конструкций и последующему разрушению способствуют напряженное состояние деталей, структурные повреждения и микродефекты [1]. Непрерывность по времени процесса мониторинга состояния металла конструкции позволяет накапливать информацию об изменении состояния объекта и в дальнейшем с использованием различных математических моделей [2] прогнозировать накопление и развитие повреждений, а также остаточный срок службы. Большое значение приобретает концепция встроенного мониторинга состояния [Ошибка! Источник ссылки не найден.], предлагаемая на различных физических принципах: вибрации [4, 5], ультразвуковые волны [6], термография [7,8], акустическая эмиссия [9, 10], оптоволоконные датчики деформации [11], ультразвуковые волны Лэмба [12] и Рэлея [13].

Закономерности распространения упругих ультразвуковых волн [14] зависят от многих факторов, к которым относятся как свойства материала, так и свойства волны. Некоторые из этих закономерностей, в частности, влияние напряженно-деформированного состояния металла на скорость распространения упругих волн, используются в практике мониторинга.

Показано [15-18], что влияние как упругих, так и пластических деформаций может вносить неоднозначность в результат контроля. Поэтому следует выявлять парциальный или «весовой» вклад в изменение скорости упругих волн от упругих и пластических типов деформаций. Разделить влияние на результат акустического

зондирования того или иного типа деформации представляется, в целях безопасной эксплуатации конструкции судна актуальной задачей. В качестве примера можно привести исследование причин разрушения гребных валов с применением упругих волн [19], где учет влияния пластических деформаций может принципиально изменить картину разрушения.

Целью настоящей работы выступает разработка методики оценки уровня пластических деформаций в металле при помощи соотношения основной и второй гармоник в непрерывном зондирующем ультразвуковом сигнале. Для достижения поставленной цели были проведены механические испытания образцов на растяжение, неразрушающий контроль по скорости волн Рэлея и металлографические исследования.

Мониторинг по данным о скорости упругих волн

В инженерных целях при построении алгоритма мониторинга механических напряжений используются соотношения аналогичные уравнениям фотоупругости [20].

Если основной причиной неоднородности среды, влияющей на изменение свойств металлов в результате их деформации, являются структурные изменения [21], то связь коэффициента затухания $\alpha(\omega)$ и скорости $V(\omega)$ упругой волны с параметром поврежденности материала ψ имеет вид [16]:

$$\alpha(\omega) = (k_1 + k_2\psi)\omega^4,$$
$$V(\omega) = V_0(1 - k_3\psi - k_4\psi(\omega^2)),$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 - постоянные материала.

В обоих случаях суть акустического метода заключается в измерении относительной разности $\Delta\alpha = 2(V_1 - V_2)/(V_1 + V_2)$ скоростей поперечной волны различной поляризации. При упругих деформациях $\Delta\alpha$ пропорциональна разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ [22]. Если имеет место пластическая деформация, то, как было показано в работах [23-25]:

$$\Delta\alpha = \alpha_0 + \alpha_1(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p) + C_A(\sigma_1 - \sigma_2),$$

где $\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p$ - главные пластические деформации, а слагаемое $\alpha_0 + \alpha_1(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p)$ интерпретируется как вклад изменения микроструктуры материала при пластическом деформировании. Приведенные математические модели описывают идеализированную ситуацию, связанную с влиянием механических напряжений на скорость упругих волн. На практике необходимо проводить тестовые экспериментальные исследования.

Механические испытания на растяжение и металлографические исследования

При работе на реальных конструкциях априори нельзя утверждать в каком НДС находится тот или иной высоконагруженный элемент конструкции. Поэтому однозначно использовать значение скорости упругой волна как диагностический признак предельного состояния конструкции некорректно по причине взаимосвязи упругих и пластических процессов деформации [26]. Экспериментально это показано при пластическом деформировании образца стали 10ХСНД, которая относится к классу корпусных свариваемых ферритно-перлитных хромо-кремненикелевых низколегированных сталей.

Плоские пропорциональные образцы, изготовленные из стали 10ХСНД, исследовались по методике, изложенной в [6]. При достижении значения абсолютной деформации в 10% исследовались изменения в структуре металла в участках из зоны

захвата (№1), переходной зоны (№2) и рабочей зоны (№3). Схема вырезки образцов для дальнейших исследований показана на рис. 1.

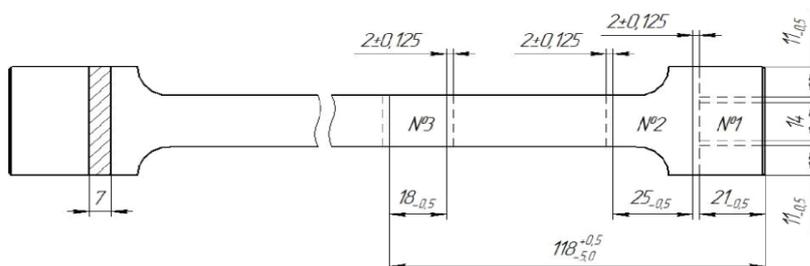


Рис.1. Деформированный образец.

Схема вырезки образцов для металлографического исследования

После испытаний на растяжение проводились вырезка, шлифовка, полировка и травление образцов для выявления микроструктуры. Микрофотографии были получены при помощи оптического микроскопа и представлены на рисунках 2-4. Результаты испытаний на микротвердость приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний на микротвердость

№ образца	Микротвердость по Виккерсу, HV	Твердость по Бриннелю, HB
1	178 ± 12	165
2	191 ± 11	180
3	214 ± 11	207

На микрофотографиях, представленных на рисунках 2-4, видны структурные изменения, внесенные пластической деформацией. Для подсчета среднего размера зерна был использован метод секущих по ГОСТ 5639-82. Исходный материал демонстрирует характерную полосчатую ферритно-перлитную структуру с некоторой разнотернистостью.

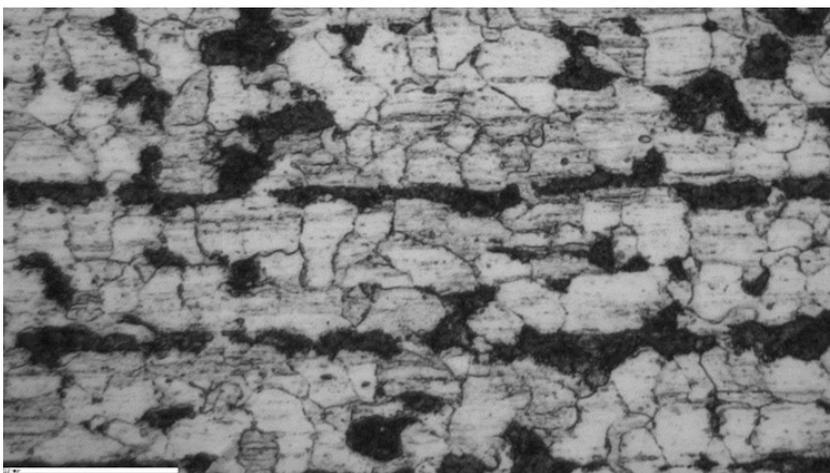


Рис. 2. Микроструктура участка образца 1 (из зоны захвата), увеличение x500

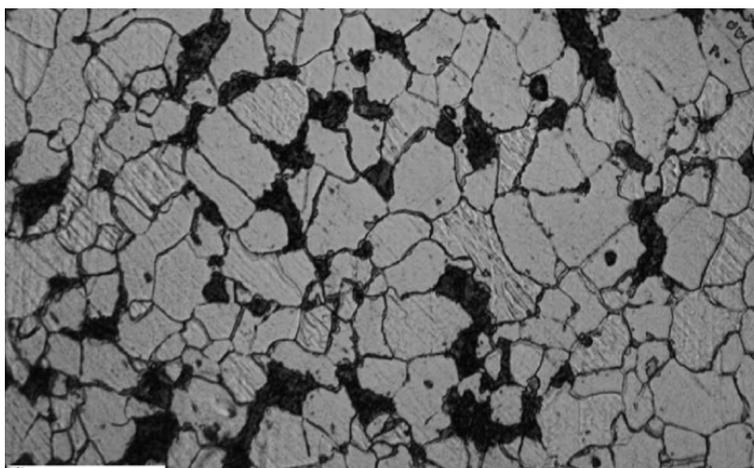


Рис. 3. Микроструктура участка образца 2 (из переходной зоны), увеличение x500

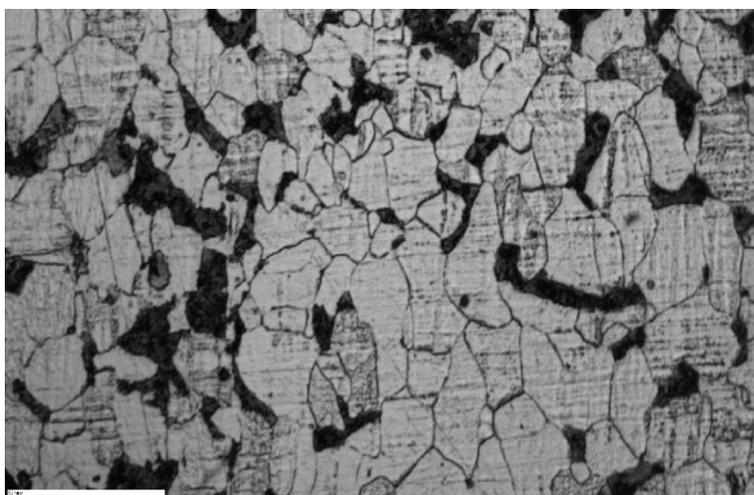


Рис. 4. Микроструктура участка образца 3 (из рабочей части), увеличение x500

Измеренные параметры микроструктуры образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерения параметров микроструктуры

№ образца	Средний размер зерна феррита, мкм	Степень неравноосности зерна феррита	Расстояние между полосами перлита, мкм	Толщина слоев перлита, мкм
1	13	1,3	50	13
2	12	1,2	~250	~150
3	12	1,2	~350	~200

В образцах замечены ферритные зерна с явными следами деформации в виде более темного цвета и с рельефной структурой. Накопление деформации приводит к закономерному повышению микротвердости фазы. Самым хорошо наблюдаемым результатом внесения пластической деформации в образцы является «размывание» полос перлита: замечена тенденция к переходу от ярко выраженных полос к более равномерному распределению по всему объему образца. В образце из зоны захвата

перлитные слои имеют ширину, сопоставимую с размером ферритного зерна. В переходной зоне и в области рабочей зоны перлитные полосы теряют свою форму и многократно расширяются.

Неразрушающий контроль пластической деформации

Поиск нарушения сплошности металла образца (дефектов в виде трещин и пор) осуществлялся с помощью ПВК дефектоскопии ГОСТ 18442-80. Набор для капиллярного контроля «Элитест» класс чувствительности 2 (от 1 до 10 мкм). Поверхностных дефектов не обнаружено. Выявления внутренних дефектов металла образца проводилось эхо методом [16,29].

На пределе чувствительности дефектоскопа USN 50 с прямыми и наклонными преобразователями на 5 МГц нарушений сплошности не обнаружено, хотя пластическая деформация произошла. Это подтверждает кривая нагружения и металлографические исследования.

Таким образом, наличие пластической деформации, являющиеся признаком предельного состояния при мониторинге конструкции, привело к видимому изменению геометрии структурных составляющих, но не к нарушению сплошности, которое, согласно нормативно-технической документации, контролируется при техническом освидетельствовании конструкции, например, судна [31]. Имея в распоряжении только регламентированные стандартные средства контроля, выявить пластическую деформацию не удастся. Возможность обнаружения такого состояния существует при организации контроля скорости упругих волн (метод велосиметрии) в соответствии с ГОСТ 23829-85, ГОСТ 31244-200432.

Контроль скорости волн Рэлея

Как показано в [18, 27], объемные волны позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние, усредненное по толщине образца. При изгибных деформациях объемные волны покажут, что механические напряжения в образце отсутствуют в связи с разнонаправленными деформациями по толщине. Следовательно, напряжения, вызванные изгибом, следует контролировать поверхностными волнами, которые покажут максимальные значения напряжений. Результаты измерения времени задержки распространения импульса упругих волн Рэлея в деформируемом в момент действия напряжения и после его разгрузки приведены на Рисунке 5. Фиксируемая в эксперименте задержка характеризует изменение скорости волны в металле, так как база распространения волны от излучателя до приемника постоянна.

Идентификация напряженно-деформированного состояния становится неопределенной, так как задержка для напряжения 400 МПа и после разгрузки с напряжения 500 МПа имеет одинаковое значение.

Для исключения такой неоднозначности в области пластических деформаций к контролю за скоростью звука предложено дополнительное ультразвуковое зондирование непрерывным монохроматическим сигналом с контролем за уровнем генерации второй гармоники. Предложение базируется на принципах нелинейной акустики [31-33]. Практическое применение нелинейных акустических свойств отражено в работах [16, 19].

На исследуемом образце, что подвергнут металлографическому исследованию и неразрушающему контролю в исходном состоянии и после пластической деформации, проведена экспериментальная оценка нелинейного акустического параметра. Непрерывное излучение ультразвука и мониторинг уровня генерации второй гармоники осуществлялся с помощью генератора Tektronix Function Generator, сигнал с которого на частоте 5МГц поступал на излучающий ПЭП, создающего упругую волну в образце.

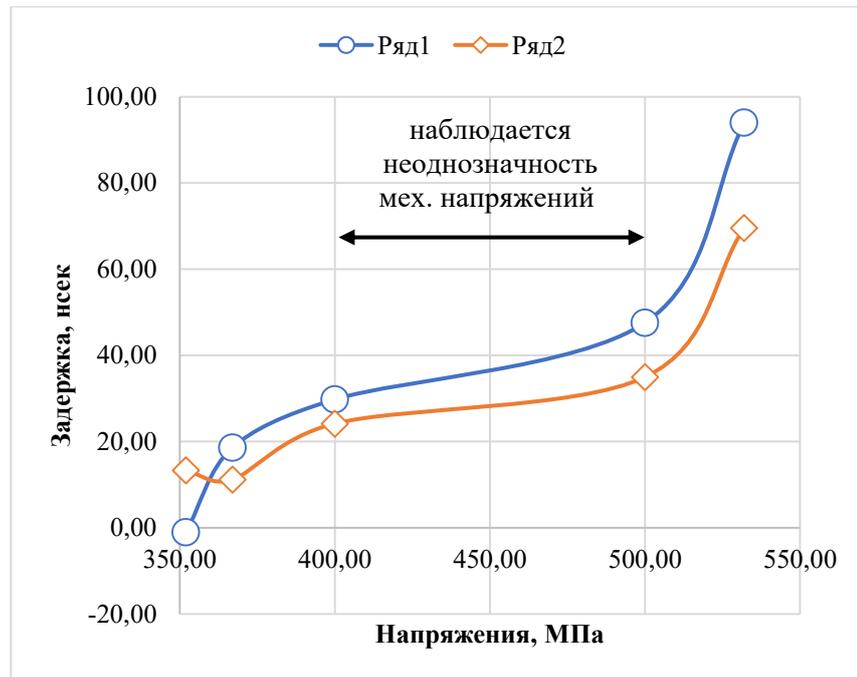


Рис. 5. Связь действующих механических напряжений и времени задержки сигнала.
Ряд 1 – под нагрузкой, ряд 2 – после снятия нагрузки

Так как эффект генерации второй гармоники выражен для продольных волн сильнее [34], чем для поверхностных, применены ПЭП головных волн. В качестве измерителя временных интервалов использовался осциллограф RIGOL MSO5354 с разрешением по времени 1 нс. Для примера на Рисунке 6 представлены синусоидальные сигналы на излучающем и приемном ПЭП, а также спектральный состав зондирующей волны.

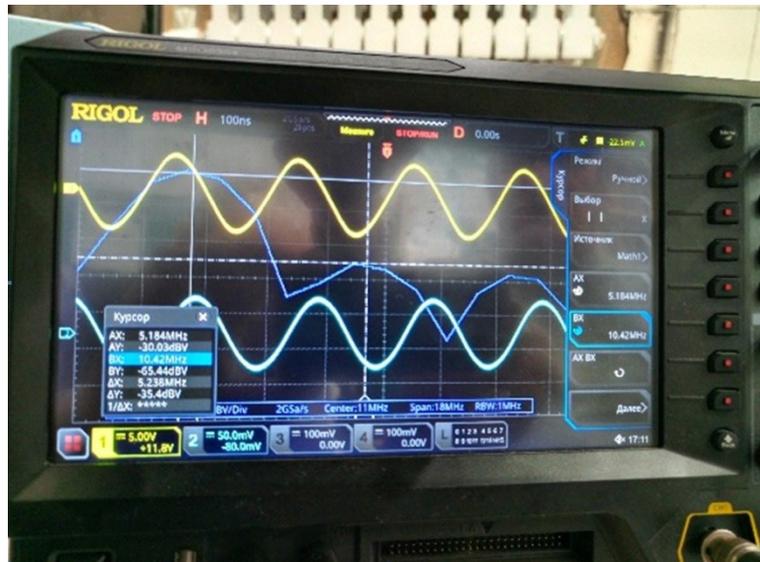


Рис.6. Сигналы на излучающем и приемном ПЭП и спектральный состав зондирующей волны.
Образец деформирован на 10 %

Результат наблюдения отношения уровня спектральных составляющих в сигнале с ПЭП через недеформированный образец 10ХСНД на частоте 5 и 10 МГц составил -41 дБ, в то время как соотношение в сигнале с ПЭП через деформированный на 10% образец 10ХСНД составило -35 дБ. Условия эксперимента в обоих случаях были идентичны, за исключением уровня пластических деформаций в металле. Разница в 6 дБ не оставляет сомнений в наличии пластических деформаций, приводящих к изменению нелинейности среды. Это отличие исключает неоднозначность оценки напряженно-деформированного состояния металла, тем самым решая проблему учета влияния пластических деформаций при анализе причин разрушения.

Следует заметить, что использовать такой метод исключения неоднозначности в оценке пластических деформаций на практике, в условиях эксплуатации конструкции, представляется затруднительным, так как он требует применения высокостабильного с малым уровнем шумов генератора напряжения одной частоты с наличием гармоник по уровню настолько низким, что позволило бы уверенно зафиксировать влияние нелинейности среды на генерацию второй гармоники. В нашем случае это удалось сделать на пределе возможностей стандартного генератора Tektronix Function Generator. Развитие предлагаемого подхода видится в разработке специализированных средств экспресс-контроля [35].

Заключение

Представленные экспериментальные данные свидетельствуют о чувствительности ультразвукового метода к состоянию металла до образования магистральной трещины (состояние «преддефекта») при статическом нагружении. При контроле НДС по скорости волн следует оценивать уровень соотношения основной и второй гармоник в непрерывном зондирующем сигнале для исключения неоднозначности в оценке в уровне пластических деформаций, что может принципиально изменить картину разрушения и будет способствовать уменьшению аварийности при эксплуатации конструкции судна.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2024-2026 гг. (FFUF -2024-0031, № НИОКТР 1023032800130-3-2.3.2).

Список литературы

1. Молоков К. А., Новиков В. В., Антоненко С. В. Повреждаемость судовых конструкций и основы построения математической модели оценки трещиностойкости конструкционных сталей // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2022. – №. S1. – С. 46-54.
2. Руководство по оценке напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе метода конечных элементов. РМРС.НД № 2-030101-045. Санкт-Петербург. 2021.
3. García Márquez F.P., Peco Chacón A.M. A review of non-destructive testing on wind turbines blades // Renew. Energy. 2020. V. 161. P. 998—1010.
4. Jamadar N.I., Kivade S.B., Dhande K.K., Pedada S. Vibration based damage inspection in composite structures - A critical review // Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol. 2014. V. 3. P. 201—208.
5. Kernicky T., Whelan M., Al-Shaer E. Vibration-based damage detection with uncertainty quantification by structural identification using nonlinear constraint satisfaction with interval arithmetic // Struct. Heal. Monit. 2019. V. 18. P. 1569—1589.
6. Соловьев В.В., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В., Сова А.Н. Мониторинг предельного состояния, обусловленного пластическими деформациями в стали 10ХСНД / «Двойные технологии» №2 (99) – 2022 С.38-43
7. Talai S.M., Desai D.A., Heyns P.S. Infrared thermography applied to the prediction of structural vibration behaviour // Alexandria Eng. J. 2019. V. 58. P. 603—610.

8. Hwang S., An Y.K., Sohn H. Continuous-wave line laser thermography for monitoring of rotating wind turbine blades // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1010—1021.
9. Zhou J., Mathews V.J., Adams D.O. Acoustic emission based impact location estimation on composite structures // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1652—1668.
10. Zhao W., Zhou W. Cluster analysis of acoustic emission signals and tensile properties of carbon/glass fiber reinforced hybrid composites // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1686—1697.
11. Kwon H., Park Y., Kim J. H., Kim C. G. Embedded fiber Bragg grating sensor based wing load monitoring system for composite aircraft // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1337—1351.
12. Weiland J., Hesser D.F., Xiong W., Schiebahn A., Markert B., Reisgen U. Structural health monitoring of an adhesively bonded CFRP aircraft fuselage by ultrasonic Lamb Waves // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G. J. Aerosp. Eng.* 2020. V. 234. I. 13. P. 2000—2010.
13. Соловьев В.В., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В., Неретина А.С. Метод и результаты моделирования акустических волн для оценки напряженно-деформированного состояния при пластическом деформировании/ *Двойные технологии.* 2023. №1 (102). С.45-53
14. Taleb S., Rittmeier L., Sinapius M., Boubenider F., Schmidt D. Experimental Study of Lamb Waves Propagation inside an Impact Damage in the Size of the Used Wavelength // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2020. V. 56. I. 2. P. 141—150.
15. Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Никитина Е.А., Пахомов П.А., Родюшкин В.М. Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций. *Мезомеханика.* 2019, 22(3), с. 65–70.
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.-279с.
17. Бритенков А.К., Родюшкин В.М., Иляхинский А.В. Исследование методом акустического зондирования физико-механических свойств титанового сплава Тi-6Al-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления/ *Физика и механика материалов.* 2021. Т. 47. № 1. С. 139-158.
18. 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.
19. Матвеев Ю.И., Хлыбов А.А., Глебов В.В. Исследования и разработка методики технической диагностики гребных валов/ *Вестник АГТУ. серия: морская техника и технология.* / 2021. №4. с.52-61
20. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с
21. Caiulo A., Kachanov M. On absence of quantitative correlations between strength and stiffness in microcracking materials. *International Journal of Fracture.* 2010. Vol. 164. P. 155–158.
22. Hughes D.S., Kelly J.L. Second_order elastic deformation of solids // *Phys. Rev.* 1953. V. 92. №. 5.P. 1145–1149
23. Hiraо M., Pao Y.H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam // *J. Acoustical Society America.* 1985. V. 77. № 5. P. 1659–1664.
24. Беляев А.К., Лобачев А.М., Модестов В.С. и др. Оценка величины пластических деформаций с использованием акустической анизотропии// *МТТ.* 2016. №5. сс.124-131
25. Pao Y.H., Wu T.T., Gamer U. Acoustoelastic Birefringences in Plastically Deformed Solids: Part I—Theory // *J. Appl. Mech.* 1991. V. 58. № 1. P. 11–17.
26. Зуев Л.Б., Лунев А.Г., Стаскевич О.С. Энтروпийная интерпретация упругопластического инварианта деформации/ *ПМТФ.* 2018. Т. 59, N 6 (352). с.135-142
27. Курашкин К.В. Оценка напряжений в сварных соединениях с помощью акустического метода. *Контроль. Диагностика.* 2016, № 10, с. 52–56.
28. Правила РРР
29. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении — Изд. 4-е, перераб. / Е.Ф. Кретов. - Санкт-Петербург: СВЕН, 2014. – с.312
30. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 309 с

31. Наугольных К.А., Островский Л. А. Нелинейные волновые процессы в акустике / Отв. ред. А. В. Гапонов-Грехов; АН СССР, Науч. совет по пробл. "Акустика", Акуст. ин-т им. Н. Н. Андреева, Ин-т прикл. физики. Москва: Наука, 1990. 236с.
32. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов акустической диагностики // УФН.2006. Т.176. №1. С.77-95
33. Зайцев В.Ю., Назаров В.Е, Таланов В.И. Неклассические проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // УФН. 2006. Т176. №1. С.97–102.
34. Deputat J. Application of the acoustoelastic effect in measurements of residual stresses // Archives of acoustics. 1990. 15.1-2. С.69-92
35. Ванягин А.В., Родюшкин В.М. Измерение акустической нелинейности поврежденного металла// Измерительная техника. 2017.№10. С.42-44.

References

1. Molokov K. A., Novikov V. V., Antonenko S. V. Povrezhdanost' sudovykh konstruksii i osnovy postroyeniya matematicheskoi modeli otsenki treshchinostoikosti konstruksionnykh staley // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2022. №. S1. pp. 46-54.
2. Guidelines for assessing the stress-strain state of ship hull structures based on the finite element method.RMRS.ND No. 2-030101-045. Saint Petersburg. 2021.
3. García Márquez F.P., Peco Chacón A.M. A review of non-destructive testing on wind turbines blades // Renew. Energy. 2020. V. 161. P. 998—1010.
4. Jamadar N.I., Kivade S.B., Dhande K.K., Pedada S. Vibration based damage inspection in composite structures - A critical review // Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol. 2014. V. 3. pp. 201—208.
5. Kernicky T., Whelan M., Al-Shaer E. Vibration-based damage detection with uncertainty quantification by structural identification using nonlinear constraint satisfaction with interval arithmetic // Struct. Heal. Monit. 2019. V. 18. P. 1569—1589.
6. Solov'ev V.V., Rodyushkin V.M., Ilyakhinskii A.V., Sova A.N. Monitoring predel'nogo sostoyaniya, obuslovlennogo plasticheskimi deformatsiyami v stali 10KHSND / «Dvoynye tekhnologii» №2 (99), 2022, pp.38-43
7. Talai S.M., Desai D.A., Heyns P.S. Infrared thermography applied to the prediction of structural vibration behaviour // Alexandria Eng. J. 2019. V. 58. P. 603—610.
8. Hwang S., An Y.K., Sohn H. Continuous-wave line laser thermography for monitoring of rotating wind turbine blades // Struct. Heal. Monit. 2019. V. 18. P. 1010—1021.
9. Zhou J., Mathews V.J., Adams D.O. Acoustic emission based impact location estimation on composite structures // Struct. Heal. Monit. 2019. V. 18. P. 1652—1668.
10. Zhao W., Zhou W. Cluster analysis of acoustic emission signals and tensile properties of carbon/glass fiber reinforced hybrid composites // Struct. Heal. Monit. 2019. V. 18. P. 1686—1697.
11. Kwon H., Park Y., Kim J. H., Kim C. G. Embedded fiber Bragg grating sensor based wing load monitoring system for composite aircraft // Struct. Heal. Monit. 2019. V. 18. P. 1337—1351.
12. Weiland J., Hesser D.F., Xiong W., Schiebahn A., Markert B., Reisgen U. Structural health monitoring of an adhesively bonded CFRP aircraft fuselage by ultrasonic Lamb Waves // Proc. Inst. Mech. Eng. Part G. J. Aerosp. Eng. 2020. V. 234. I. 13. P. 2000—2010.
13. Solov'ev V.V., Rodyushkin V.M., Ilyakhinskii A.V., Neretina A.S. Metod i rezul'taty modelirovaniya akusticheskikh voln dlya otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri plasticheskom deformirovanii/ Dvoynye tekhnologii. 2023. №1 (102). pp.45-53
14. Taleb S., Rittmeier L., Sinapius M., Boubenider F., Schmidt D. Experimental Study of Lamb Waves Propagation inside an Impact Damage in the Size of the Used Wavelength // Russ. J. Nondestruct. Test. 2020. V. 56. I. 2. P. 141—150
15. Erofeev V.I., Ilyakhinskii A.V., Nikitina E.A., Pakhomov P.A., Rodyushkin B.M. Metod ul'trazvukovogo zondirovaniya pri otsenke predel'nogo sostoyaniya metallokonstruksii, svyazannogo s poyavleniem plasticheskikh deformatsii. Mezomekhanika. 2019, 22(3), s. 65–70.
16. Uglov A.L., Erofeev V.I. Smirnov A.N. Akusticheskii kontrol' oborudovaniya pri izgotovlenii i ehkspluatatsii / otv. red. F.M. Mitenkov. M.: Nauka.2009.-279s.

17. Britenkov A.K., Rodyushkin V.M., Ilyakhinskii A.V. Issledovanie metodom akusticheskogo zondirovaniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv titanovogo splava TI-6AL-4V, poluchennogo metodom posloinogo lazernogo splavleniya/Fizika i mekhanika materialov. 2021. T. 47. № 1. pp. 139-158.
18. 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.
19. Matveev YU.I., Khlybov A.A., Glebov V.V. Issledovaniya i razrabotka metodiki tekhnicheskoi diagnostiki grebnykh valov//Vestnik AGTU. seriya: morskaya tekhnika i tekhnologiya. / 2021. №4. pp.52-61
20. Nikitina N.E. Akustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya. N. Novgorod:TALAM, 2005. 208 s
21. Caiulo A., Kachanov M. On absence of quantitative correlations between strength and stiffness in microcracking materials. International Journal of Fracture. 2010. Vol. 164. P. 155–158.
22. Hughes D.S., Kelly J.L. Second_order elastic deformation of solids // Phys. Rev. 1953. V. 92. №. 5.P. 1145–1149
23. Hirao M., Pao Y.H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam //J. Acoustical Society America. 1985. V. 77. № 5. P. 1659–1664.
24. Belyaev A.K., Lobachev A.M., Modestov V.S. i dr. Otsenka velichiny plasticheskikh deformatsii s ispol'zovaniem akusticheskoi anizotropii//MTT.2016. №5. ss.124-131
25. Pao Y.H., Wu T.T., Gamer U. Acoustoelastic Birefringences in Plastically Deformed Solids: Part I–Theory // J. Appl. Mech. 1991. V. 58. № 1. P. 11–17.
26. Zuev L.B., Lunev A.G., Staskevich O.S. Ehntropiinaya interpretatsiya uprugoplasticheskogo invarianta deformatsii/ PMTF. 2018. T. 59, N 6 (352). s.135-142
27. Kurashkin K.V. Otsenka napryazhenii v svarnykh soedineniyakh s pomoshch'yu akusticheskogo metoda. Kontrol'. Diagnostika. 2016, № 10, s. 52–56.
28. Pravila RRR
29. Kretov E.F. Ul'trazvukovaya defektoskopiya v ehnergomashinostroenii — Izd. 4-e, pererab. / E.F. Kretov. - Sankt-Peterburg: SVEN, 2014. – s.312
30. Zarembo L.K., Krasil'nikov V.A. Vvedenie v nelineinuyu akustiku. M.: Nauka, 1966. 309 s
31. Naugol'nykh K.A., Ostrovskii L. A. Nelineinye volnovye protsessy v akustike / Otv. red. A. V. Gaponov-Grekhov; AN SSSR, Nauch. sovet po probl. "Akustika", Akust. in-t im. N. N. Andreeva, In-t prikl. fiziki. Moskva: Nauka, 1990. 236s.
32. Rudenko O.V. Gigantskie nelineinosti strukturno-neodnorodnykh sred i osnovy metodov akusticheskoi diagnostiki //UFN.2006. T.176. №1. S.77-95
33. Zaitsev V.YU., Nazarov V.E., Talanov V.I. Neklassicheskie proyavleniya mikrostrukturno-obuslovennoi nelineinosti: novye vozmozhnosti dlya akusticheskoi diagnostiki // UFN. 2006. T176. №1. S.97–102.
34. Deputat J. Application of the acoustoelastic effect in measurements of residual stresses // Archives of acouatics. 1990. 15.1-2. C.69-92
35. Vanyagin A.V., Rodyushkin V.M. Izmerenie akusticheskoi nelineinosti povrezhdennoogo metalla// Izmeritel'naya tekhnika. 2017.№10. S.42-44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Родюшкин Владимир Митрофанович, д.т.н., заведующий лабораторией волновой динамики, экспериментальной механики и виброзащиты Института проблем машиностроения РАН им. А. В. Гапонова-Грехова, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, e-mail: vlkn2005@yandex.ru

Иляхинский Александр Владимирович, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории волновой динамики, экспериментальной механики и виброзащиты

Vladimir M. Rodyushkin, Dr Sci (Eng), Head of Laboratory Wave dynamics and experimental mechanics, Institute of Problems of Machine Science RAS (603024, Nizhny Novgorod, Belinsky str., 85)

Aleksandr V. Ilyakhinskii, Ph. D. (Eng), Senior Researcher of Laboratory Wave dynamics and experimental mechanics, Institute of Problems of Machine Science RAS (603024, Nizhny

Института проблем машиностроения РАН им. А. В. Гапонова-Грехова, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, e-mail: ilyahinsky-aleks@bk.ru

Корнев Андрей Борисович, к.т.н., доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, начальник Научно-Технического Тренажерного Центра «Механик», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kornev.ab@vsuwt.ru

Каразанов Кирилл Олегович, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, инженер Научно-Технического Тренажерного Центра «Механик», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: karazanov.kirill@mail.ru

Novgorod, Belinsky str., 85)

Andrey B. Kornev, Ph. D (Eng), Associate Professor of the Lifting and Transport Machines and Mechanisms Department, Head of Scientific and Technical Training Center «Mechanic», Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, e-mail: kornev.ab@vsuwt.ru

Kirill O. Karazanov, graduate student of the Lifting and Transport Machines and Mechanisms Department, engineer of Scientific and Technical Training Center «Mechanic», Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, e-mail: karazanov.kirill@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.05.2024; опубликована онлайн 20.06.2024.
Received 08.05.2024; published online 20.06.2024.