

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-17-25

Оценка возможностей использования фрактальной размерности и информационной энтропии упругих волн для оценки поврежденности стали 20 при малоциклового усталости*

А. А. Хлыбов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

Ю. Г. Кабалдин, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

М. С. Аносов, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

Д. А. Рябов, аспирант, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

Д. А. Шатагин, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

А. В. Киселев, аспирант, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

Приводятся результаты экспериментальных исследований образцов из стали 20 на малоцикловую усталость (консольный изгиб). Получена кривая усталости для исследуемого материала в диапазоне амплитуд напряжений 210...380 МПа. В логарифмических координатах данная зависимость имеет линейный характер.

По результатам исследований показано, что одной из структурно-чувствительных характеристик является форма импульса упругой волны, прошедшего в исследуемой среде. Для анализа формы импульса упругой волны предложен алгоритм оценки поврежденности материалов, использующий значения фрактальной размерности аттрактора и информационную энтропию в процессе усталостного нагружения.

Установлено, что по полученным зависимостям процесс накопления усталостных повреждений условно можно разделить на 2 фазы. В первой фазе энтропия ультразвукового сигнала практически не изменяется и сохраняется в пределах 0,05...0,1 нат., фрактальная размерность аттрактора ультразвукового сигнала возрастает с 1,5 до 1,8. При переходе во вторую фазу наблюдаются максимальные значения фрактальной размерности аттрактора ультразвукового сигнала, значения которого уменьшаются во второй фазе до 1,4 перед разрушением образца. Значения информационной энтропии во второй фазе монотонно возрастают до 0,55 нат. Исследования показали, что полученные зависимости практически не изменяются с изменением амплитуды напряжений.

Результаты исследований при различных амплитудах напряжений показали, что характеристики фрактальной размерности аттрактора и информационной энтропии импульсов упругой волны, прошедшие в металле через зоны накопленных повреждений, расширяют и дополняют возможности акустических методов в задачах оценки работоспособности материалов при малоциклового усталости и позволяют выявить стадию разрушения стали 20.

Ключевые слова: поврежденность, малоциклового усталость, упругие волны, сталь, фрактальная размерность, информационная энтропия.

Введение

Многие элементы конструкций работают в условиях малоциклового усталости. В процессе эксплуатации, часто наблюдаются случаи зарождения и развития трещины. На этапе до зарождения и развития макротрещины выделяют период, связанный с изменением структуры – зарождение и накоп-

ления рассеянных микроповреждений, зарождение и рост микропор, не взаимодействующих друг с другом [1, 2]. Процесс накопления повреждений начинается практически сразу после приложения переменной нагрузки, протекает скрытно, практически без видимых внешних признаков. Вторая стадия – развитие поврежденности. Образовавшиеся микропоры (так же

© Хлыбов А. А., Кабалдин Ю. Г., Аносов М. С., Рябов Д. А., Шатагин Д. А., Киселев А. В., 2021

* Исследование выполнено по гранту РФФИ № 19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

как и вновь зародившиеся) взаимодействуют друг с другом, образуя микроскопические трещины. Наблюдается изменение физико-механических характеристик материалов. Длительность периода накопления повреждений достигает до 80 % от полного разрушения образца. Скрытые процессы деградации материала приводят к изменению физико-механических характеристик: модулей упругости, прочностных и других характеристик. Завершается период накопления повреждений образованием макротрещины и разрушением конструкции. Под макротрещиной понимают трещину, способную локализовать поле напряжений и развиваться самостоятельно при воздействии внешних нагрузок. Такую трещину можно обнаружить визуально или с использованием средств дефектоскопии. При этом по условиям безопасной эксплуатации для некоторых конструкций макротрещина не допускается. Более того, ставится задача оценки степени деградации материала в процессе его эксплуатации.

Поэтому проблема контроля поврежденности материала, возможность оперативной оценки текущего состояния без нарушения работоспособности конструкций в современной промышленности достаточна актуальна.

Для определения поврежденности материалов, прогнозирования времени зарождения макротрещины разрабатываются и совершенствуются методики, использующие различные физические методы, основанные на различных физических явлениях, например, на изменении электромагнитных свойств (вихретоковый, коэрцитивной силы, шумов Баркгаузена, электрический и др.) и ряд других [3–5].

Одними из наиболее распространенных методов являются акустические, основанные на регистрации зависимости скорости распространения, затухания, дисперсии упругих волн – продольных, сдвиговых, поверхностных волн Рэлея (А. А. Хлыбов, Ю. Г. Кабалдин, М. С. Аносов, Д. А. Рябов. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-38-44; Khlybov A. A., Ryabov D. A., Anosov M. S. DOI:10.1088/1757-899X/969/1/012011) – от величины накопленной поврежденности и ряда других параметров [6, 7]. В многочисленных теоретических работах показано влияние полей внутренних напряжений в материале, формируемых системой микродефектов (микропорами, дислокациями, дисклинациями, субграницами зерен и пр.), на параметры упругих волн. Экспериментальные работы также показывают, что скорость распространения упругих волн, затухание является параметрами, чувствительными к не-

обратимым процессам, протекающим при усталостном нагружении: развитию микро-, а затем и макроповреждений, приводящих к появлению макротрещины и разрушению объекта контроля.

Развитие современной вычислительной техники, программного обеспечения расширяет возможности методов контроля, в том числе и акустических. При этом повышается оперативность получения информации, снижается погрешность определения контролируемых величин. В этой связи методы обработки акустических сигналов, распространяющихся в поврежденном материале, основанные на фрактальной размерности, представляют значительный интерес исследования поврежденности материала по данным фрактального анализа [8–10], так как появляется возможность получения сведений о поврежденности материала с помощью прошедших через этот материал ультразвуковых сигналов.

Целью настоящего исследования является оценка возможности использования фрактальной размерности и информационной энтропии упругих волн для оценки поврежденности стали 20 при малоциклового усталости.

Материалы и методы исследования

Исследовались изменения акустических параметров в процессе усталостного нагружения образцов из стали 20. Образцы изготавливались по размерам в соответствии с ГОСТ 25.502–79 (тип IV). Размеры рабочей части образцов: толщина 4 мм, ширина 25 мм, длина 110 мм, $R = 35$. Химический состав стали 20, %: C – 0,25; Si – 0,24; Mn – 0,5; S ≤ 0,04; P ≤ 0,04; Cr ≤ 0,25, Ni ≤ 0,25, остальное – Fe. Образцы исследовались в состоянии поставки (горячекатаный прокат). Шероховатость образцов в рабочей зоне Ra = 0,4 (достигалась полированием).

Образцы испытывались на малоцикловую усталость. Нагружение осуществлялось по схеме консольного изгиба (коэффициент асимметрии цикла $R = -1$). Температура испытаний $t = 20$ °С. Частота циклического нагружения 30 Гц. В процессе испытаний регистрировалось число циклов N и амплитуд напряжений σ_{\max} . Исследования проводились при следующих амплитудах напряжений σ_{\max} : 210, 220 230 и 245 МПа.

Измерения проводились после наработки с шагом ≈ 10 % от предельного числа циклов N_{Σ} . Для измерений нагрузку сбрасывали до нуля, образец извлекался из испытательной машины. Для оценки предельного числа циклов до разрушения на каждом из уровней напряжений были проведены предварительные испытания.

Для оценки микроструктуры исследуемого материала после усталостного нагружения применялось травление в 4%-м растворе HNO_3 и металлографический оптический микроскоп Keyence VHX-1000.

Акустические измерения проводились по схеме, изображенной на рисунке 1.

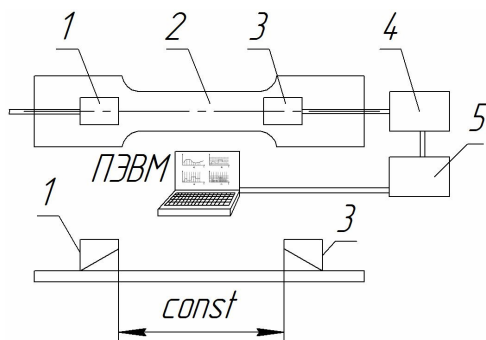


Рис. 1. Схема испытаний образца на малоцикловую усталость: 1 – излучающий преобразователь; 2 – образец; 3 – приемный преобразователь; 4 – согласующее устройство с блоком питания; 5 – АЦП

Fig. 1. Scheme of testing the sample for low-cycle fatigue: 1 - emitting converter; 2 - sample; 3 - receiving transducer; 4 - matching device with power supply unit; 5 - ADC

На каждом этапе было проведено не менее 5 измерений с последующей статистической обработкой полученных данных. При проведении измерений ультразвуковые колебания в образце 2 возбуждались преобразователем 1 с использованием ИВК «Астрон». Упругие волны, прошедшие через образец 2, регистрировались пьезоприемником 3. Область с наибольшими повреждениями находилась между приемным и излучающим преобразователями: разрушение образцов происходило между этими датчиками.

В качестве приемных и излучающих использовались клиновидные преобразователи с углом ввода 62 град с резонансной частотой 5 МГц. В работе приемный и излучающий преобразователи жестко соединялись в один корпус, расстояние между которыми 20 мм.

Прошедшие через рабочую область акустические сигналы обрабатывались по заданному алгоритму, реализованному на базе графической среды разработки LabVIEW. Алгоритм обработки регистрируемого ультразвукового сигнала приведен на рисунке 2.

В качестве информативных характеристик использовались:

- фрактальная размерность аттрактора ультразвукового сигнала;
- информационная энтропия ультразвукового сигнала.

Для получения полной информации о состоянии структуры и целостности материала образца был проанализирован его фазовый портрет (аттрактор). Для реконструкции фазового портрета использовался временной ряд регистрируемого ультразвукового сигнала и метод временной задержки. Реконструкция аттрактора по временному ряду регистрируемого ультразвукового сигнала производилась на основе положений теоремы Такенса. Данная теорема дает предпосылки для реконструкции аттрактора по одной временной реализации. Полученный аттрактор несет полную информацию об устойчивости материала, и для каждой комбинации напряжений количество циклов до разрушения является индивидуальным.

Количественным показателем хаотичности аттрактора является его фрактальная размерность D_f .

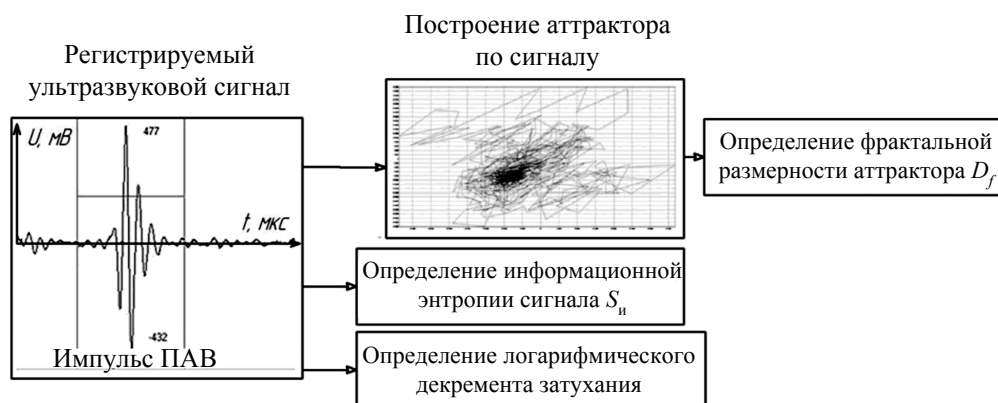


Рис. 2. Алгоритм обработки регистрируемого ультразвукового сигнала

Fig. 2. Algorithm for processing the recorded ultrasonic signal

Отметим, что имеются значительные наработки в области оценки структурной устойчивости материалов при различных видах нагружения с использованием показателей фрактальной размерности D_f акустических сигналов, прошедших через область с повреждениями, аттракторов акустических сигналов, а также информационной энтропии S_{ii} [11, 12]. Применение данных показателей показало хорошую эффективность для решения задач прогнозирования остаточного ресурса.

В работе также использовалась накопленная энтропия, которая может рассматриваться как критерий предельного состояния твердого тела и его устойчивости.

Одной из разновидностей энтропии является информационная энтропия, определяемая по формуле

$$S_{ii} = -\sum_i p_i \cdot \log p_i,$$

где p_i – функция вероятности.

При расчете информационной энтропии использовался временной ряд регистрируемого ультразвукового сигнала. При этом в каждый рассматриваемый промежуток времени оценивалась вероятность (p_i) появления в сигнале текущей амплитуды сигнала. Таким образом, высокие значения информационной энтропии S_{ii} характеризуют хаотичные сигналы.

Исследования показывают, что информационную энтропию также целесообразно использовать для оценки необратимых изменений материалов (Белых В. В., Муравьев В. В., Степанов В. А. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-15-24.), в частности в процессе циклического нагружения в режиме реального времени.

Анализ результатов экспериментальных исследований

По результатам испытаний образцов на малоцикловую усталость была построена кривая усталости (зависимость числа циклов до разрушения образца (N_{Σ}) от амплитуды напряжений (σ_{\max}) (рис. 3)). Как видно из рисунка 3, полученный результат аппроксимируется логарифмической кривой с величиной достоверности аппроксимации не ниже $R^2 = 0,98$.

Обработка экспериментальных данных позволяет записать уравнение кривой малоцикловой усталости в виде

$$\lg(\sigma_{\max}) = -0,1403 \cdot \lg N + 2,94.$$

Были получены зависимости фрактальной размерности аттрактора ультразвукового сигнала D_f , а также информационной энтропии ультра-

звукового сигнала S_{ii} при воздействии различных амплитуд напряжений. В качестве переменной «число циклов» использовалось относительное количество циклов до разрушения (N/N_{Σ}). Данные зависимости приведены на рисунке 4, а, б.

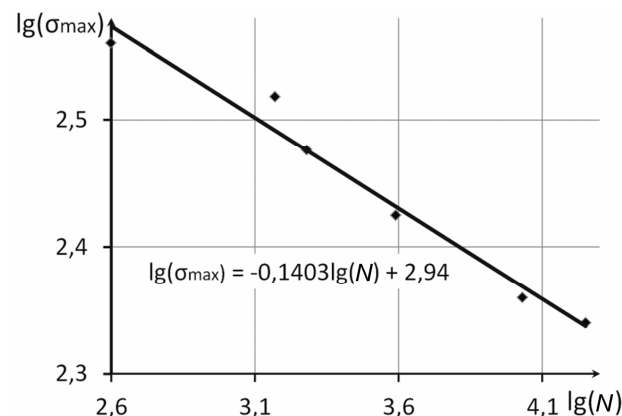


Рис. 3. Зависимость логарифма числа циклов до разрушения образца $\lg(N)$ от логарифма амплитуды напряжений $\lg(\sigma_{\max})$, сталь 20

Fig. 3. The dependence of the logarithm of the number of cycles before the destruction of the sample $\lg(N)$ on the logarithm of the stress amplitude $\lg(\sigma_{\max})$, steel 20

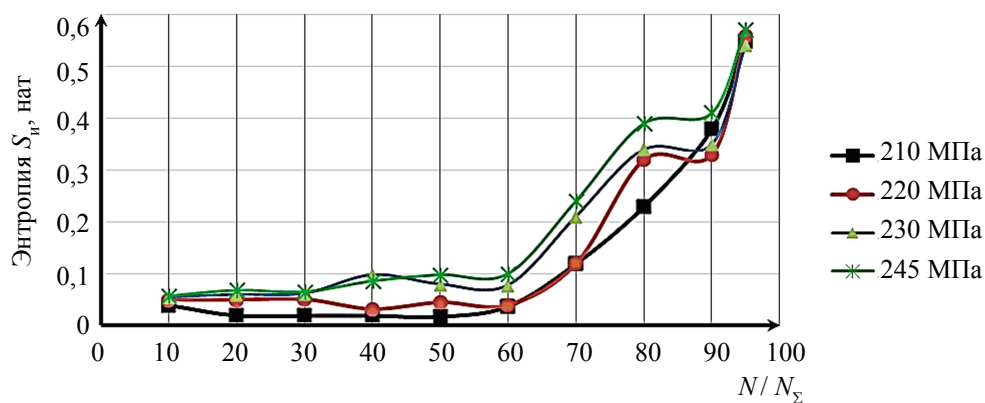
Результаты, представленные на рисунке 4, показывают, что процесс накопления усталостных повреждений условно можно разделить на 2 фазы. В первой фазе энтропия ультразвукового сигнала практически не изменяется, фрактальная размерность аттрактора ультразвукового сигнала возрастает. При переходе во вторую фазу наблюдаются максимальные значения логарифмического декремента затухания и фрактальной размерности аттрактора ультразвукового сигнала.

Эти результаты не противоречат данным специалистов в области механики поврежденной среды. В этих работах [14, 15] развита математическая модель, описывающая процессы накопления усталостных повреждений в конструкционных металлических материалах. В соответствии с выводами работы [16] процесс накопления усталостных повреждений до образования макроскопической трещины состоит из ряда стадий.

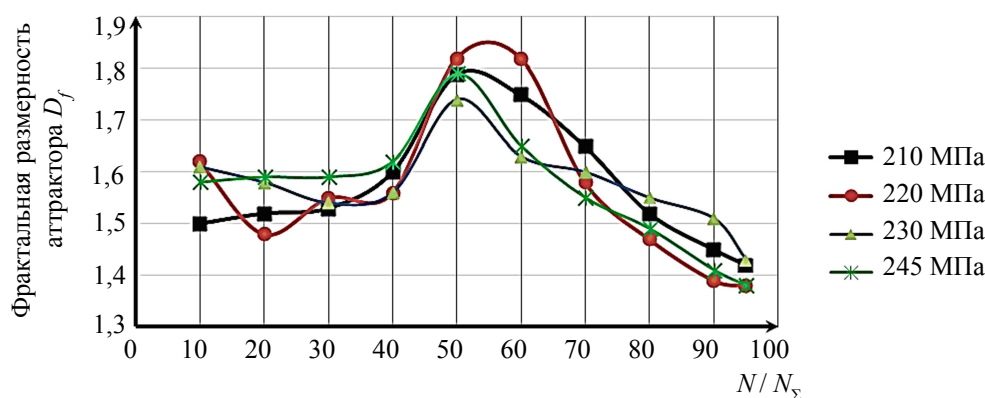
Первая стадия. Зарождение и рост микропор, не взаимодействующих друг с другом. Влияние поврежденности на физико-механические характеристики материалов практически отсутствует. С одной стороны, поврежденность как мера трещиноватости на этой стадии оказывает слабое влияние на макрохарактеристики материалов. С другой стороны, результаты исследований с использованием современных фи-

зических методов (электронной микроскопии, рентгенографии, методов физической акустики) неопровержимо свидетельствуют о начале структурной перестройки материала (микропластические деформации, эволюция дислокационной структуры и др.) на очень ранних стадиях

усталостного нагружения практически с самого его начала. При этом различные информационные параметры структуры, важнейшая роль которым отводится и в моделях поврежденной среды [17], также начинают изменяться на очень ранних стадиях нагружения.



a



b

Рис. 4. Изменение информационной энтропии (a) и фрактальной размерности (b) регистрируемого сигнала в процессе нагружения образца из стали 20

Fig. 4. Changes in the information entropy (a) and fractal dimension (b) of the recorded signal during loading of a sample made of steel 20

Наблюдаемое изменение информационной энтропии регистрируемого сигнала в процессе нагружения образца качественно совпадает с результатами механики поврежденной среды. Похожие результаты были получены при исследовании накопления поврежденности материала в процессе испытаний образцов из стали 12Х18Н10Т на малоцикловую усталость (Хлыбов А. А., Кабалдин Ю. Г., Рябов Д. А., Аносов М. С., Шатагин Д. А. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67). В частности, изменения скоростей упругих волн (продольные, сдвиговые и волны Рэлея), распространяющихся в образцах из стали 12Х18Н10Т, качественно совпадают с данными, полученными при испытании

образцов из стали 20. Имеющееся различие может быть объяснено разными механизмами, протекающими в образцах из стали 12Х18Н10Т и стали 20 – стали относятся к разным классам.

Вторая стадия. Развитие поврежденности. Образовавшиеся микропоры (как и вновь зародившиеся) взаимодействуют друг с другом, образуя микроскопические трещины (рис 5, б). Наблюдается изменение физико-механических характеристик материалов.

Мерой поврежденности в элементарном объеме материала является некоторая функция Ω , которая трактуется как отношение накопленного объема дефектов к его критической величине, соответствующей появлению макротрещины при

усталостном нагружении [18–20]. В связи с этим на второй стадии происходит резкий рост значе-

ний информационной энтропии и уменьшение фрактальной размерности аттрактора (см. рис. 4).

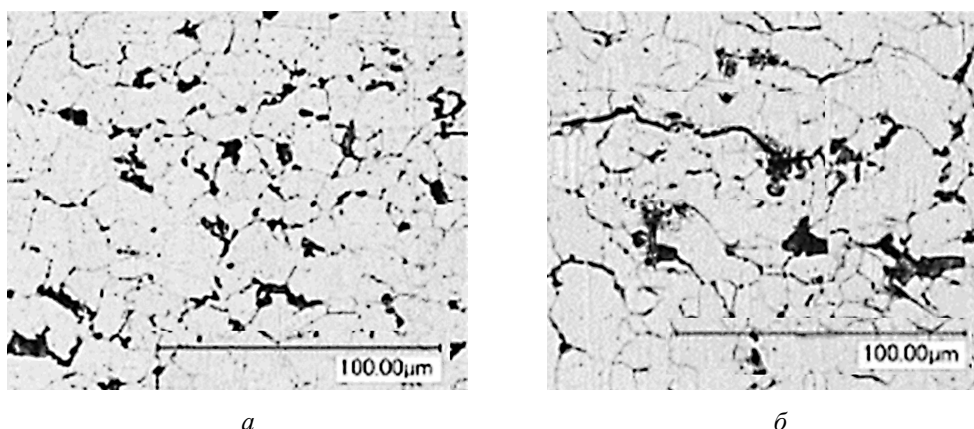


Рис. 5. Микроструктура стали 20 до испытаний (а) и на 2-й стадии (б) развития поврежденности

Fig. 5. Microstructure of steel 20 before tests (a) and at stage 2nd (b) of damage development

Представляется перспективным совмещение упомянутых выше весьма развитых расчетных методов механики поврежденной среды с возможностями использования современных информационных методов в задачах диагностики. Используемые информационные характеристики позволяют уточнить и ускорить получение необходимых для численных методов характеристик, получаемых в ходе достаточно сложных экспериментов. Использование фрактальной размерности D_f и информационной энтропии S_{in} расширяет и дополняет возможности акустических методов в задачах оценки работоспособности материалов при малоцикловой усталости. С практической стороны необходимо в первую очередь учитывать физическую сторону измерений, а именно: частоты и геометрию конструкций. Чистота постановки эксперимента и соответствующее практическое использование результатов эксперимента не должны противоречить общепринятым законам распространения упругих волн, в частности распространению поверхностных волн Рэлея.

Выводы

В результате испытаний образцов из стали 20 на малоцикловую усталость и анализа параметров упругих волн, распространяющихся в исследуемых образцах, получено следующее.

1. Для анализа формы импульса упругой волны в процессе усталостного нагружения предложен алгоритм оценки поврежденности материалов, использующий значения фрактальной размерности аттрактора (D_f) и информационную энтропию (S_{in}).

2. Однозначная зависимость приведенных выше параметров от числа циклов нагружения

показывает, что эти информативные параметры могут быть использованы для получения оперативной информации о необратимых процессах, протекающих в материале при малоцикловой усталости.

3. Установлено, что процесс накопления усталостных повреждений можно разделить на 2 фазы. В первой фазе энтропия ультразвукового сигнала практически не изменяется и сохраняется в пределах 0,05...0,1 нат., фрактальная размерность аттрактора ультразвукового сигнала возрастает с 1,5 до 1,8. При переходе во вторую фазу наблюдаются максимальные значения фрактальной размерности аттрактора ультразвукового сигнала, значения которого уменьшаются во второй фазе до 1,4 перед разрушением образца. Значения информационной энтропии во второй фазе монотонно возрастают до 0,55 нат.

4. Результаты исследований при различных амплитудах напряжений показали, что характеристики фрактальной размерности аттрактора (D_f) и информационной энтропии (S_{in}) импульсов упругой волны, прошедшие в металле через зоны накопленных повреждений, расширяют и дополняют возможности акустических методов в задачах оценки работоспособности материалов при малоцикловой усталости и позволяют выявить стадию поврежденности стали 20.

Библиографические ссылки

1. Терентьев В. Ф., Коралева С. А. Усталость металлов. М. : Наука, 2015. 484 с.
2. Zavoichinskaya E. B. On the Theory of Stage-by-Stage Fatigue Failure of Metals upon a Complex Stress

State. Mach. Manuf. Reliab., 2018, vol. 47, pp. 72-80. <https://doi.org/10.3103/S1052618818010156>.

3. Ефимов А. Г. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля для контроля накопления поврежденности в конструкционных сталях и сплавах (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. № 86 (8). С. 49–57. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-8-49-57>.

4. Муравьев В. В., Муравьева О. В. Оценка роста усталостных трещин в боковых рамах тележек грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 9. С. 24–29.

5. Gonchar A. V., Bizyaeva O. N., Klyushnikov V. A., Mishakin V. V. Ultrasonic and Eddy-Current Study of Plastic Deformation in Austenitic-Steel Welds. *Russian J. of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 10, pp. 598-604.

6. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V., Kachanov M. On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring. *International J. of Engineering Science*, 2019, vol. 135, pp. 17-22.

7. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Gromov V.E., Glezer A.M. Estimation of the Residual Stresses in Rails Using Electromagnetic - Acoustic Introduction - Reception of Waves. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, no. 10, pp. 1002-1005.

8. Kumar J., Ananthakrishna G. Modeling the Complexity of Acoustic Emission During Intermittent Plastic Deformation: Power Laws and Multifractal Spectra. *Physical Review*, 2018, vol. 97, no. 1, pp. 1-12.

9. Ваньков Ю. В., Филаретов Г., Червова А. Применение фрактального анализа для совершенствования методов акустического неразрушающего контроля // Датчики и системы = Sensors&Systems. 2016. № 12. С. 29–35.

10. Sysoev O. E., Kolykhalov D. G., Kuznetsov E. A., Belykh S. V. Forecasting Durability and Cyclic Strength of Aluminum Alloy AA2219 Using Fractal Analysis of Acoustic Emission. *ASRTU Conference Proceedings: IV Sino-Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Processing Technology (Ekaterinburg, Russia, 23-26 June 2016)*. Dubai: Knowledge E, 2016, pp. 161-167. DOI: 10.18502/kms.v1i1.579.

11. Штофель О. А., Рабкина М. Д. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей // Universum: технические науки. 2016. № 10 (31). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/3791> (дата обращения: 27.07.2021).

12. Jan Urban, *Intech Open* (July 7th 2016). Information Entropy, Applications from Engineering with MATLAB Concepts. DOI: 10.5772/63401.

13. Tanvir F., Sattar T., Mba D. Identification of Fatigue Damage Evaluation Using Entropy of Acoustic Emission Waveform. *SN Appl.*, 2020, Sci. 2, 138. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1694-7>.

14. Курбатов Ю. Е., Каишеварова Г. Г. Поврежденность как основанная мера усталостного разрушения // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5 (47). Ч. 3. С. 126–133.

15. Базулин Е. Г. Применение процедуры «выбеления» экосигналов для уменьшения уровня структурного шума при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 3–15.

16. Ellyin F., Kujawski D. Anenergy-Based Fatigue Failure Criterion. *Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials*, 2016, vol. 11, EAMS, pp. 591-601.

17. Антонов А. М., Ерофеев В. И., Леонтьева А. В. Влияние поврежденности материала на распространение волны Рэлея вдоль границы полупространства // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12, № 3. С. 293–300.

18. Структурный шум при ультразвуковом контроле изделий из материалов со сложной структурой / В. Г. Карташев [и др.] // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 19–32.

19. Романишин П. И., Романишин И. М. Обработка обратно рассеянного сигнала в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2018. № 6. С. 11–16.

20. Chaoshuai Han, Xianqiang Qu, Yongliang Ma, Dexin Shi. Experimental and Numerical Study of Fatigue Damage Assessment under Combined High and Low Cycle Loading. *Hindawi Shock and Vibration*, 2018, Article ID 9045658, 12 p.

References

1. Terentyev V.F., Korableva S.A. *Uсталost' metallov* [Fatigue of metals]. Moscow, Nauka Publ., 2015, 484 p. (in Russ.).

2. Zavoichinskaya E.B. On the Theory of Stage-by-Stage Fatigue Failure of Metals upon a Complex Stress State. *Mach. Manuf. Reliab.*, 2018, vol. 47, pp. 72-80. <https://doi.org/10.3103/S1052618818010156>.

3. Yefimov A.G. [Electromagnetic and magnetic methods of non-destructive testing for control of damage accumulation in structural steels and alloys (review)]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2020, no. 86, pp. 49-57 (in Russ.).

4. Murav'ev V.V., Muravyova O.V. [Evaluation of the growth of fatigue cracks in the side frames of freight car bogies by the acoustic emission method]. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2016, no. 9, pp. 24-29 (in Russ.).

5. Gonchar A.V., Bizyaeva O.N., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Ultrasonic and Eddy-Current Study of Plastic Deformation in Austenitic-Steel Welds. *Russian J. of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 10, pp. 598-604.

6. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V., Kachanov M. On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring. *International J. of Engineering Science*, 2019, vol. 135, pp. 17-22.

7. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Gromov V.E., Glezer A.M. Estimation of the Residual Stresses in Rails Using Electromagnetic - Acoustic Introduction - Reception of Waves. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, no. 10, pp. 1002-1005.

8. Kumar J., Ananthakrishna G. Modeling the Complexity of Acoustic Emission During Intermittent Plas-

tic Deformation: Power Laws and Multifractal Spectra. *Physical Review*, 2018, vol. 97, no. 1, pp. 1-12.

9. Vankov Yu.V., Filaretov G., Chervova A. [Application of fractal analysis to improve methods of acoustic non-destructive testing]. *Datchiki i sistemy = Sensors & Systems*, 2016, no. 12, pp. 29-35 (in Russ.).

10. Sysoev O.E., Kolykhalov D.G., Kuznetsov E.A., Belykh S.V. Forecasting Durability and Cyclic Strength of Aluminum Alloy AA2219 Using Fractal Analysis of Acoustic Emission. *ASRTU Conference Proceedings: IV Sino-Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Processing Technology* (Ekaterinburg, Russia, 23-26 June 2016). Dubai: Knowledge E, 2016, pp. 161-167. DOI: 10.18502/kms.v1i1.579.

11. Shtofel O.A., Rabkina M.D. [Using multifractal analysis to assess the properties of structural steels]. *Universum: tekhnicheskiye nauki: elektron. nauchn. zhurn*, 2016, no. 10. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/3791> (date of access: 27.07.2021) (in Russ.).

12. Jan Urban, Intech Open (July 7th 2016). Information Entropy, Applications from Engineering with MATLAB Concepts. DOI: 10.5772/63401.

13. Tanvir F., Sattar T., Mba D. Identification of Fatigue Damage Evaluation Using Entropy of Acoustic Emission Waveform. *SN Appl.*, 2020, Sci. 2, 138. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1694-7>.

14. Kurbatov Yu.E., Kashevarova G.G. [Damage as a basic measure of fatigue failure]. *International Research J.*, 2016, no. 5, part 3, pp. 126-133 (in Russ.).

15. Bazulin E.G. [Application of the procedure of "whitening" of echo signals to reduce the level of structure-borne noise during ultrasonic testing]. *Defectoscopy*, 2019, no. 11, pp. 3-15 (in Russ.).

16. Ellyin F., Kujawski D. Anenergy-Based Fatigue Failure Criterion. *Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials*, 2016, vol. 11, EAMS, pp. 591-601.

17. Antonov A.M., Erofeev V.I., Leont'eva A.V. [The influence of material damage on the propagation of the Rayleigh wave along the boundary of the half-space]. *Vychislitel'nay amekhanik asploshnykh sred*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 293-300 (in Russ.).

18. Kartashev V.G. [Structural noise during ultrasonic testing of products made of materials with a complex structure]. *Defectoscopy*, 2018, no. 1, pp. 19-32 (in Russ.).

19. Romanishin R.I., Romanishin I.M. [Backscattered signal processing in ultrasonic control]. *Defectoscopy*, 2018, no. 6, pp. 11-16 (in Russ.).

20. Chaoshuai Han, Xianqiang Qu, Yongliang Ma, Dexin Shi. Experimental and Numerical Study of Fatigue Damage Assessment under Combined High and Low Cycle Loading. *Hindawi Shock and Vibration*, 2018, Article ID 9045658, 12 p.

Estimation of Possibilities of Using Fractal Dimension and Information Entropy of Elastic Waves for Assessment of Damage to Steel 20 at Low Cycle Fatigue

A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Yu.G. Kabaldin, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

M.S. Anosov, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Ryabov, Post-graduate, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Shatagin, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Kiselev, Post-graduate, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

The paper presents the results of experimental studies of specimens made of steel 20 for low-cycle fatigue (cantilever bending). A fatigue curve was obtained for the material under study in the range of stress amplitudes from 210 to 380 MPa. In logarithmic coordinates, this dependence is linear.

According to the research results, it has been shown that one of the structure-sensitive characteristics is the shape of an elastic wave pulse transmitted through the medium under study. To analyze the pulse shape of an elastic wave, an algorithm is proposed for assessing the damage of materials, using the values of the fractal dimension of the attractor and the information entropy in the process of fatigue loading.

It was found that according to the obtained dependences, the process of fatigue damage accumulation can be conditionally divided into 2 phases. In the first phase, the entropy of the ultrasonic signal practically does not change and remains within the range of 0.05-0.1 nat. The fractal dimension of the attractor of the ultrasonic signal increases from 1.5 to 1.8. During the transition to the second phase, the maximum values of the fractal dimension of the attractor of the ultrasonic signal are observed, the values of which decrease in the second phase to 1.4 before the destruction of the sample. The information entropy values in the second phase increase monotonically up to 0.55 nat. Studies have shown that the obtained dependences practically do not change with a change in the stress amplitude.

The results of studies at various stress amplitudes have shown that the characteristics of the fractal dimension of the attractor and the information entropy of elastic wave pulses that have passed through the zones of accumulated

damage in the metal expand and supplement the capabilities of acoustic methods in the problems of assessing the performance of materials with low-cycle fatigue and make it possible to identify the stage of destruction of steel 20.

Keywords: damage, low-cycle fatigue, elastic waves, steel, fractal dimension, information entropy.

Получено 30.07.2021

Образец цитирования

Оценка возможностей использования фрактальной размерности и информационной энтропии упругих волн для оценки поврежденности стали 20 при малоциклового усталости / А. А. Хлыбов, Ю. Г. Кабалдин, М. С. Аносов, Д. А. Рябов, Д. А. Шагагин, А. В. Киселев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 3. С. 17–25. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-17-25.

For Citation

Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Shatagin D.A., Kiselev A.V. [Estimation of Possibilities of Using Fractal Dimension and Information Entropy of Elastic Waves for Assessment of Damage to Steel 20 at Low Cycle Fatigue]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 17-25 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-17-25.