
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА,
ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ**

УДК 534.21: 620.179.16

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА
МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**© 2019 г. В. И. Ерофеев¹, А. В. Иляхинский^{1,*}, Е. А. Никитина¹, В. М. Родюшкин¹¹ *Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород, Россия***e-mail: ilyahinsky_aleks@bk.ru*

Поступила в редакцию 04.05.2017 г.

Предложен методический подход к исследованию дефектной структуры металла методом ультразвукового зондирования. Показано, что представление процессов, определяющих влияние состояния материала на параметры зондирующего импульса статистической моделью в виде распределения Дирихле, позволяет с учетом изменения дефектной структуры металла количественно охарактеризовать изменение формы зондирующего импульса, улучшить понимание феноменов взаимодействия упругой волны со средой.

DOI: 10.1134/S0235711919010061

Обеспечение безопасности объектов машиностроения является актуальной задачей, требующей разработки новых и совершенствования существующих методов неразрушающего контроля надежности металлических конструкций, связанной с изменением механических свойств и деградацией структуры материала в зависимости от характера внешнего воздействия [1]. Наиболее удобным в инженерном плане и структурно чувствительным методом неразрушающего контроля является метод акустического зондирования [2, 3]. Однако параметры ультразвукового импульса при распространении через поврежденную среду меняются комплексно и достаточно сложным образом. Имеют место как минимум шесть волновых эффектов, приводящих к изменению скорости импульса, центральной частоты, фазы огибающей и затухания [3]. Скорость распространения упругих волн и затухание зависят как от поврежденности металла, так и от ряда других факторов, в частности от величины действующих напряжений [3–7]. В поврежденном металле, наряду с нелинейностью сил межмолекулярного взаимодействия (физическая нелинейность), приводящей к нелинейной связи между напряжением и деформацией [8], проявляется структурная нелинейность [9, 10]. При исследовании реальной конструкции неизвестно, какой из факторов будет оказывать доминирующее влияние на характер взаимодействия упругой волны. Это не способствует достоверности оценки поврежденности металла методом измерения скорости и затухания, особенно на стадии накопления микроповреждений до образования макродефектов и зарождения трещин. Поскольку изменение скорости распространения ультразвука в сплавах в зависимости от их структуры или термической обработки не превышает 3%, для изучения природы связи структуры и скорости распространения звука нужны ультразвуковые методы исследования с точностью лучше 0.05% [2].

Работа посвящена поиску путей повышения чувствительности и достоверности ультразвуковой диагностики при оценке изменений в металле в результате трансформации дефектной структуры и накопления микроповреждений на стадии микротекучести до образования макродефектов и зарождения трещин.

Материалы и методика эксперимента. В качестве объекта исследования были выбраны пропорциональные плоские образцы тип I № 21 ГОСТ 1497-84 толщиной 4 мм, из-

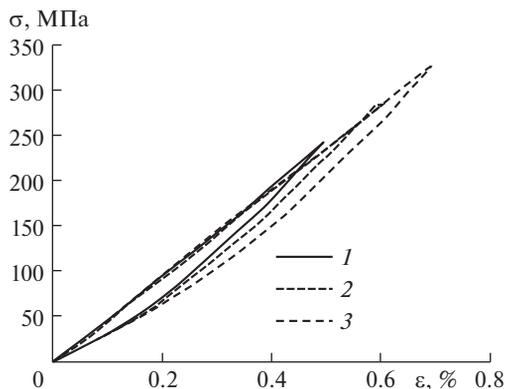


Рис. 1.

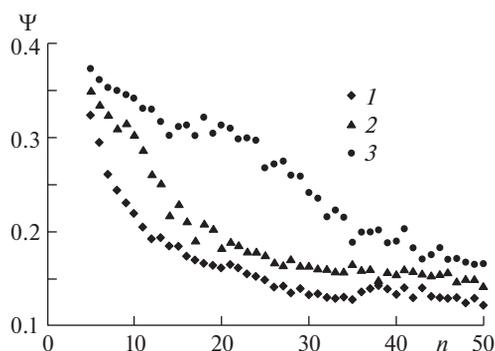


Рис. 2.

готовленные из стали марки Ст10. С целью снятия внутренних напряжений и получения равновесной дефектной структуры исходные заготовки образцов были подвергнуты отжигу в вакууме при температуре 860°C . Механические свойства материала отожженных образцов, определенные в результате механических испытаний на растяжение, составили: предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 412$ МПа; условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 290$ МПа и относительное удлинение $\delta = 28\%$.

Образцы были подвергнуты 50 циклам знакопостоянного отнулевого нагружения при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин с амплитудой напряжения в цикле $0.6\sigma_{0,2}$, $0.7\sigma_{0,2}$ и $0.8\sigma_{0,2}$. Циклические испытания и испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине фирмы Tinius Olsen Ltd, модель H100KU обеспечивающей погрешность измерения нагрузки 0.5%. Деформацию образца измеряли посредством экстензометра модели 3542 с базой 50 мм с разрешающей способностью системы измерения деформации 0.0001 мм.

Зависимость напряжения σ от деформации ϵ для пятидесяти циклов нагружения при напряжениях в цикле $0.6\sigma_{0,2}$ (1), $0.7\sigma_{0,2}$ (2) и $0.8\sigma_{0,2}$ (3) представлены на рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения упругой энергии $\Psi_i = \Delta U_i / U_i$ (где ΔU – площадь петли гистерезиса, пропорциональная доле поглощенной энергии, U – площадь под кривой деформации разгрузки, пропорциональная энергии упругой деформации) от числа циклов нагружения n для напряжений $0.6\sigma_{0,2}$ (1), $0.7\sigma_{0,2}$ (2), и $0.8\sigma_{0,2}$ (3) представлена на рис. 2.

Регистрация формы зондирующего импульса частотой 5 МГц проводилась с использованием приемного преобразователя П121-10.0-90S с частотой 10 МГц осциллографом TDS2022B, обеспечивающим частоту дискретизации при записи исследуемого сигнала 5 нс. В основе методики анализа формы зондирующего импульса лежит обращение наблюдаемого сигнала изменения амплитуды во времени $A(t)$ в распределение по амплитуде $Y(A)$ и получение на основе этого обращения параметров априори выбранной статистической модели распределения Дирихле [11]

$$D(x_1, \dots, x_k) = \frac{\Gamma(a_n)}{\prod_{i=1}^k \Gamma(v_i)} \prod_{i=1}^k x_i^{v_i-1} \left(1 - \sum_{i=1}^k x_i\right)^{v_n-1},$$

где $0 \leq \sum x_i \leq 1$; $v_i \geq 0, \dots, v_n \geq 0$; $\sum_{i=1}^n v_i = a_n$; $n = k + 1$.

Как статистическая модель распределение Дирихле, определенное на ограниченном интервале, удовлетворяет формальной связи между равновесной и неравновесной термодинамикой. Энтропию распределения Дирихле можно представить в виде суммы $H(D) = H_i(v_1, \dots, v_n) + H_e(a_n)$, в которой всегда положительное слагаемое

$$H_i(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \prod_{i=1}^n (v_i - 1)\psi(v_i)$$

представляет собой производство энтропии, а слагаемое

$$H_e(a_n) = -\ln \Gamma(a_n) + (a_n - n)\psi(a_n)$$

представляет собой поток энтропии и может принимать положительные и отрицательные значения. Здесь $\Gamma(x)$ – гамма функция, $\psi(x) = \frac{d}{dx} \ln \Gamma(x)$ – логарифмическая производная гамма функции.

Отражением изменения формы зондирующего импульса упругой волны выступает изменение значения знака внешней энтропии распределения Дирихле, характеризующее в терминах модели степень самоорганизации зондирующего сигнала. Именно изменение знака внешней энтропии принято в качестве информативного параметра происходящего в результате внешнего воздействия накопления повреждений до образования макродефектов и зарождения трещин. Методологически результат достигался тем, что зондирующий сигнал объема N значений амплитуды непрерывно-скользящим методом при шаге смещения на одно значение базовой выборки m , равной 24 значения, разбивался на последовательность выборок m_i , где $i = 1, \dots, N - m$. Для каждой выборки m_i определяли значение коэффициента асимметрии и показателя эксцесса, по которым находили параметры формы v_i последовательности бета-распределений (одномерных распределений Дирихле) [12]. В соответствии с правилами информационно-статистической теории, изложенными в [13], ограничиваясь десятимерной моделью, проводили свертку следующих друг за другом бета-распределений к последовательности распределений Дирихле, для которых, используя свойства распределения Дирихле, вычисляли значения параметра a_n . По значению параметра a_n вычисляли значения внешней энтропии распределений Дирихле каждой из размерностей. По количеству распределений Дирихле в анализируемой выборке N , имеющих положительное и отрицательное значение внешней энтропии определяли значение параметра самоорганизации формы импульса K_c как $K_c = \sum K_{D_-}^i / \sum K_{D_+}^i$, где $\sum K_{D_-}^i$ – суммарное количество выявленных за анализируемый период во временном ряде упругой волны двухмерных, трехмерных, четырехмерных, пятимерных и т.д. моделей Дирихле, имеющих

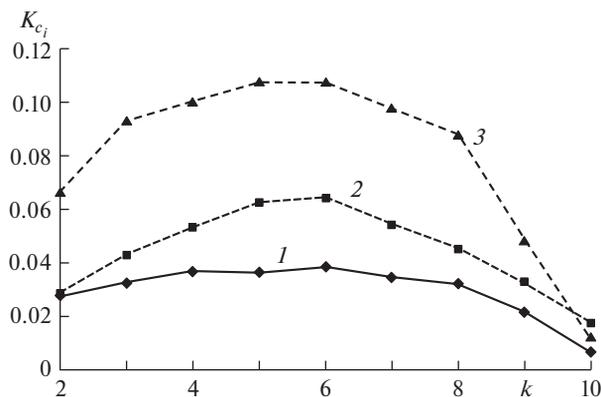


Рис. 3. Влияние максимального напряжения при мягком циклическом нагружении стали Ст10 на изменение параметров самоорганизации формы зондирующего импульса.

отрицательное значение внешней энтропии, а $\sum K_{D_+}^i$ — суммарное количество выявленных за анализируемый период двухмерных, трехмерных, четырехмерных, пятимерных и т.д. моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии. Вклад в значение K_c каждой из размерностей распределения Дирихле (структура самоорганизации формы зондирующих импульсов) после пятидесяти циклов нагружения для напряжений $0.6\sigma_{0.2}$, $0.7\sigma_{0.2}$ и $0.8\sigma_{0.2}$ представлен на рис. 3.

Измерение скорости релеевской волны проводилось импульсным методом с помощью измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН», позволяющего проводить прецизионные измерения времени задержек (времени распространения) упругих волн. Применялся преобразователь релеевских волн номинальной частотой 2.8 МГц, выполненный в виде сдвоенной призмы с расстоянием (базой) между излучателем и приемником равным пятнадцати миллиметрам [2, 14]. Предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении временных интервалов составлял ± 2 нс.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Excel из пакета Microsoft Office 2010. Оценку значимости изменения анализируемых параметров проводили с использованием t -критерия Стьюдента [15].

Результаты исследования и их обсуждение. В таблице 1 приведены значения обобщенного за пятьдесят циклов нагружения показателя поглощения упругой деформации $\Psi_{50} = \sum \Delta U_i / \sum \Delta$, параметра самоорганизации формы зондирующего импульса K_c и зафиксированные измерения времени задержки (скорости) распространения релеевской волны для одноосного мягкого циклического нагружения напряжением $0.6\sigma_{0.2}$, $0.7\sigma_{0.2}$ и $0.8\sigma_{0.2}$. Результаты циклического нагружения показали, что диаграмма, отображающая зависимость напряжения от деформации (рис. 1), дает петлю гистерезиса. Это свидетельствует о необратимом поглощении материалом энергии упругой деформации. Доля поглощения этой энергии в цикле (коэффициент поглощения Ψ_i) пропорциональна величине максимального напряжения в цикле нагружения и убывает с увеличением количества циклов нагружения (рис. 2). Сопоставление режимов нагружения (табл. 1) демонстрирует значимое ($p < 0.01$) отличие между средними значениями обобщенных показателей поглощения упругой энергии Ψ_{50} для циклов нагружения напряжением $0.6\sigma_{0.2}$, $0.7\sigma_{0.2}$ и $0.8\sigma_{0.2}$. Это при постоянной скорости деформации и постоянной температуре испытания свидетельствует о разном уровне изменения дефектной структуры и накопления микрповреждений. Изменение напря-

Таблица 1

Режим нагружения	Ψ_{50}	K_c	Задержка нс
50 циклов $0.6\sigma_{02}$	0.16 ± 0.01	0.306 ± 0.074	5340 ± 4.4
50 циклов $0.7\sigma_{02}$	0.20 ± 0.012	0.466 ± 0.096	5330 ± 4.4
50 циклов $0.8\sigma_{02}$	0.26 ± 0.015	0.823 ± 0.182	5336 ± 4.4

жения нагружения в цикле приводит к значимому ($p < 0.01$) изменению среднего значения параметра самоорганизации формы зондирующего сигнала K_c . При этом большему значению коэффициента Ψ_{50} практически с линейной зависимостью соответствует большее значение показателя самоорганизации формы зондирующего импульса K_c . Сопоставление значений скорости распространения релеевской волны для разных режимов нагружения по t -критерию Стьюдента не выявило достоверного отличия для средних значений скорости между всеми режимами нагружения. Для сравнения одноосное нагружение образцов до образования шейки, связанное с образованием макроповреждений, привело к значимому изменению времени задержки до 5377 ± 4.6 нс. Следует отметить, что изменение режима нагружения, в нашем случае – накопление микроповреждений, связанное с изменением дефектной структуры, влияет не только на изменение значения показателя степени самоорганизации формы зондирующего импульса K_c , но, как видно из рис. 3, меняет структуру самоорганизации формы импульса – перераспределение вклада K_c^i моделей Дирихле разной размерности.

Выводы. Проведенное исследование показало, что информационно-статистический показатель анализа формы зондирующего импульса K_c адекватно отражает накопление микроповреждений, связанное с изменением дефектной структуры на стадии микротекучести до образования макроповреждений и трещин. Этот факт может иметь существенное значение при оценке процессов накопления повреждений методом ультразвукового зондирования и улучшить понимание феноменов взаимодействия упругой волны со средой.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований в 2013–2020 гг. по теме № 0035-2014-0402, номер государственной регистрации 01201458047 и при поддержке РФФИ (гранты № 18-08-00715 и № 16-08-00776).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 частях / Под ред. К.В. Фролова и В.В. Москвичева. Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. 494 с. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. 610 с.
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справочник / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
3. 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.
4. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности материалов. Долгопрудный: ИД “Интеллект”, 2013. 376 с.
5. Поляков В.В., Головин А.В. Влияние пористости на скорость ультразвуковых волн в металлах // Письма в Журнал технической физики. 1994. Т. 20. № 11. С. 54–57.
6. Секоян С.С., Шлегель В.Р., Бацанов С.С., Гаврилкин С.М., Поярков К.Б., Гурков А.А., Дуров А.А. Влияние пористости и дисперсности материалов на скорость распространения звуковых волн // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 4. С. 121–127.

7. *Никитина Н.Е.* Акустоупругость. Опыт практического применения. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
8. *Лурье А.И.* Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
9. *Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И.* “Неклассические” проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 1. С. 97–102.
10. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
11. *Иляхинский А.В., Родюшкин В.М.* Распределение Дирихле в задаче оценки состояния металла методом акустического зондирования // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 13–17.
12. *Хан Г., Шапиро А.* Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1989. 344 с.
13. *Серета Ю.С.* Проблемы информационно-статистической теории. Нижний Новгород: “Типография “Поволжье”, 2007. 356 с.
14. *Углов А.Л., Хлыбов А.А., Пичков С.Н., Шишулин Д.Н.* Акустический метод оценки поврежденности аустенитной стали при термопульсациях // Дефектоскопия. 2016. № 2. С. 3–10.
15. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.