

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-18-26

Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами*

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

А. Л. Углов, доктор технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

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

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

Целью настоящего исследования является изучение поврежденности конструкционных металлических материалов акустическим методом при различных внешних усталостных и термических воздействиях. Предложена структурная модель, описывающая процесс накопления рассеянных микроповреждений в материале, параметры которой могут быть измерены акустическим методом. Показано, что в структуре конструкционных металлических материалов в процессе циклического нагружения происходят необратимые процессы, приводящие к изменению физико-механических характеристик. Проведена оценка изменения большого количества информативных параметров акустического контроля в процессе накопления поврежденности. Установлено, что параметры упругих волн зависят от характеристик исследуемой среды. Показано, что состояние поверхностного слоя может быть использовано в задачах более ранней оценки выработанного ресурса материала конструкций. Предложена модель, учитывающая влияние процессов деградации поверхностного слоя на параметры поверхностных волн; приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие данную модель. Представлены методики для определения механических характеристик материала – модуля упругости, предела текучести, вязкости разрушения, внутренних напряжений, размера зерна и др. – на элементах конструкций без нарушения их прочностных характеристик. Результаты исследований влияния среды на параметры упругих волн служат основой для построения комплексного акустического метода определения физико-механических характеристик конструкционных материалов. Рассматриваются примеры практического использования полученных результатов в задачах обеспечения безопасной эксплуатации ответственных элементов конструкций.

Полученные в ходе исследования данные дают возможность оперативно оценить поврежденное состояние и свойства металлических материалов при циклическом нагружении при использовании параметров акустических волн.

Ключевые слова: безопасная эксплуатация, структурные изменения, усталость, ультразвуковой контроль.

Введение

Одной из основных задач развития современного машиностроения является обеспечение безопасной эксплуатации конструкций, как в целом, так и отдельных ее элементов. Это связано в первую очередь со значительным сроком службы действующих технических объектов. Требуют большого внимания конструкции, в которых разрушение отдельных узлов приводит к катастрофическим последствиям (авиационная, энергетическая, железнодорожная отрасли).

Длительный срок службы конструкций приводит к проявлению в разные периоды эксплуа-

тации различных механизмов деградации материала, инкубационные периоды которых протекают скрытно [1–3]. Постепенно развивающиеся неконтролируемые процессы деградации приводят к зарождению и развитию микроскопических трещин, внезапным отказам отдельных узлов и разрушению всей конструкции. Предельное состояние материала, из которого изготовлены машины и конструкции, зависит от деградации структуры, накопленных повреждений в процессе эксплуатации.

Таким образом, для обеспечения безопасной эксплуатации изделий, необходима надежная оценка текущего состояния материала, как на

© Хлыбов А. А., Углов А. Л., Рябов Д. А., Аносов М. С., 2022

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-19-00332-П «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».

этапе изготовления, так и в процессе эксплуатации. По причине выработки ранее назначенного ресурса также актуальной является задача prolongation срока службы конструкций.

Особую роль в задачах оценки степени поврежденности структуры материалов играет диагностика, ключевым элементом которой являются методы неразрушающего контроля. В основе методов лежит использование физических полей различной природы – электромагнитных, упругих и др. [4–8]. Методы неразрушающего контроля позволяют получить информацию о состоянии контролируемой конструкции без разрушения и нарушения ее работоспособности.

Решение задачи безопасной эксплуатации возможно в том случае, если ее рассмотрение осуществлять с точки зрения синергии различных научных подходов, применяемых в металловедении, механике деформируемого твердого тела, механике разрушения и методов неразрушающего контроля. Надежная оценка технического состояния материалов конструкций возможна только при наличии хорошей корреляционной связи между оцениваемыми параметрами материала конструкции и измеряемыми характеристиками используемого физического поля. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля является акустический метод [9, 10]. Это вполне естественно, так как параметры упругих волн зависят от характеристик исследуемой среды: плотности, модулей упругости, размера и геометрии структурных неоднородностей и др. [11, 12].

Целью настоящей работы является исследование накопления повреждений в конструкци-

онных металлических материалах акустическими методами, а также разработка и внедрение методик оценки состояния материала для обеспечения безопасной эксплуатации ответственных элементов конструкций.

Материалы и методы исследования

Объекты контроля (материалы) и условия их эксплуатации

Исследования проводились на аустенитной коррозионностойкой стали 08X18N10T, используемой при строительстве корпуса колонны синтеза пентакарбонила железа. Материал указанных объектов подвергается воздействию статических, переменных термомеханических нагрузок. Режимы нагружения образцов соответствуют реальным условиям эксплуатации.

Для экспериментальных исследований использовались приборы и средства оптической микроскопии (макроанализ), измерения плотности, прецизионных акустических измерений.

Акустические исследования проводились с использованием специально разработанного измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) «АСТРОН», используемого для акустического контроля материалов различных технических объектов [13, 14]. ИВК «АСТРОН» позволяет проводить измерения задержек (времени распространения продольных, сдвиговых, поверхностных и головных волн) с точностью 10^{-9} с и затухания в диапазоне частот 1...50 МГц.

Погрешности определения основных информативных акустических параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Погрешности измерений информативных параметров

Table 1. Measurement errors of informative parameters

Параметр	h , мм	t_l , нс	V_l , м/с	t_r , нс	V_r , м/с	A	D	t_R , нс	δ	α , 1/мкс
Погрешность	$\pm 2 \cdot 10^{-3}$	± 2	± 4	± 2	± 2	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 9 \cdot 10^{-4}$	± 2	$\pm 9 \cdot 10^{-4}$	$\pm (6 \dots 10) \%$

Нагружение образцов осуществлялось на серийных испытательных машинах и специально изготовленных стендах. При оценке деградации материала конструкции использовались экспериментальные данные, полученные на натуральных объектах и крупномасштабных моделях в условиях нормальной эксплуатации.

При обработке экспериментальных данных использовался регрессионный анализ и стандартные пакеты вычислительных программ (MathCAD, MatLAB). Для анализа результатов акустических измерений использовалось специально разработанное программное обеспечение, входящее в состав ИВК «АСТРОН».

Разработка критериев поврежденности материала

Из литературных данных следует, что поврежденность, возникающая при знакопеременном силовом воздействии (усталость), физически интерпретируется как непрерывный процесс образования, роста и взаимодействия микродефектов различного уровня – от атомного до структурного, определяемого размером зерна [15, 16]. Существует критическая концентрация микродефектов и критический уровень пластической деформации, приводящие к разуплотнению материала. Перед разрушением разуплотнение может достигать несколько процентов.

Длительность периода до появления видимой макротрещины оценивается величиной 80...90 % от долговечности образца. При этом в поверхностном слое металла (глубиной порядка размера зерна) процесс накопления повреждений протекает более ускоренно по сравнению с объемом.

Для описания поврежденности поликристаллических материалов разработаны различные модели. Среди прочих значительный интерес представляют структурные модели, в которых, с одной стороны, явным образом описывают явления, происходящие в структуре материала, с другой – используют достаточно удобный и простой формальный математический аппарат.

Основополагающими являются работы Л. М. Качанова и Ю. Н. Работнова [17], в которых используется понятие функции поврежденности Ψ (поврежденность). Физический смысл Ψ зависит от используемой модели. Например, в качестве Ψ может быть использована критическая плотность дислокаций, концентрация микродефектов и уровень пластической деформации [18]. В качестве поврежденности рассматриваются поры, микротрещины, включения. Названные повреждения приводят к изменению модулей упругости, появлению анизотропии физико-механических свойств первоначально изотропных материалов. Эффективные модули упругости (Юнга, сдвига) описываются как

$$E = E_0(1 - \Psi); \quad (1)$$

$$G = G_0(1 - \Psi), \quad (2)$$

где индексу 0 соответствует неповрежденный материал.

Функция поврежденности Ψ определяется в виде

$$\Psi \approx -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{v_\omega N_\omega}{\rho_0}, \quad (3)$$

где N_ω , v_ω , $\Delta\rho$, ρ_0 – концентрация микропор (микротрещин), средний объем поры, изменение плотности, плотность материала без повреждений соответственно. В неповрежденном материале $\Psi = 0$; в момент достижения предельного состояния, соответствующего зарождению магистральной трещины, $\Psi = 1$.

Известно, что скорость упругих волн и модули упругости связаны следующими соотношениями:

$$E = \frac{\rho C_i^2 (3C_l^2 - 4C_t^2)}{C_l^2 - C_t^2}; \quad (4)$$

$$G = \rho C_t^2; \quad (5)$$

$$v = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2C_l^2 - 3C_t^2}, \quad (6)$$

где C_t – скорость сдвиговой волны; C_l – скорость продольной волны; ρ – плотность.

Упругие волны реагируют на все происходящие в контролируемой среде процессы, выполняют функции универсального датчика, поставляющего сведения о контролируемой среде. Следует подчеркнуть, что для оценки механических характеристик среды с повреждениями и моделирования распространения упругих волн в этой среде используется один и тот же математический аппарат. Выводы работ, посвященных распространению упругих волн в среде с повреждениями, могут служить основой для построения комплексного акустического метода определения физико-механических характеристик реальных поврежденных конструкционных материалов.

В задачах практического использования упругих волн наибольшую стабильность и наименьшую погрешность обеспечивает измерение скорости упругих волн. В работе приняты следующие условия для распространения упругих волн:

- продольная волна распространяется вдоль оси z (перпендикулярно поверхности материала);
- сдвиговая (поперечная) волна распространяется вдоль оси z , вектор поляризации – вдоль осей x, y ;
- поверхностная волна (Рэлея) распространяется в направлении оси x .

При экспериментах и расчетах нагрузка приложена вдоль оси x (рис. 1).

Учитывая зависимость скорости упругих волн от модулей упругости и плотности, можно также определить скорость упругих волн с учетом поврежденности среды:

$$C_i = C_0(1 - k\Psi). \quad (7)$$

Аналогичное выражение можно получить, если рассматривать распространение упругих волн в среде с повреждениями. Соотношение (7) показывает, что с точностью до некоторого коэффициента k , определяемого экспериментально, может быть определена величина Ψ , если известно изменение скоростей.

Скорость C_i ($i = 1, 2, 3$) упругой волны при распространении через исследуемый образец определяется по формуле (прием и излучение упругих волн осуществляется одним датчиком)

$$C_i = 2L/t_i, \quad (8)$$

где L – толщина образца, м. Так как работы производились в режиме излучения и приема, то в формуле (8) путь принимался равным $2L$.

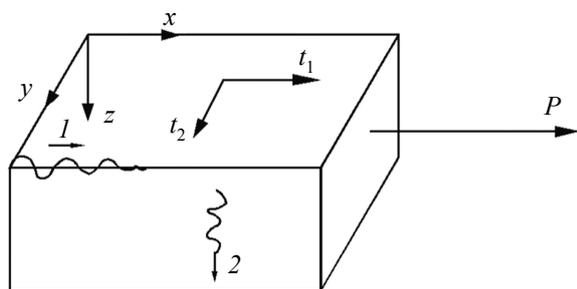


Рис. 1. Направления распространения волн в материале: 1 – направление распространения поверхностной волны; 2 – направление распространения продольной и сдвиговой волн; t_1 – сдвиговая волна (параллельная поляризация); t_2 – сдвиговая волна (перпендикулярная поляризация)

Fig. 1. Directions of wave propagation in the material: 1 - direction of surface wave propagation; 2 - direction of longitudinal and shear wave propagation; t_1 - shear wave (parallel polarization); t_2 - shear wave (perpendicular polarization)

В работе приняты следующие обозначения: индекс 1, 2 – сдвиговая волна, вектор поляризации которой направлен во взаимно перпендикулярных направлениях. Индекс 3 обозначает продольную волну. Согласно этим обозначениям $t_{1,2}$ – задержка (время распространения) сдвиговых волн, с; t_3 – задержка продольных волн, с.

Как правило, для реального технического объекта контроля измерить толщину с высокой точностью не представляется возможным. Это связано с отсутствием доступа к конструкции, низкой точностью применяемого измерительного инструмента (штангенциркуль, микрометр и др.). Изменения скорости упругих волн в материале, связанные с процессами накопления повреждений, не превышают единиц процентов. Поэтому при анализе результатов экспериментов трудноопределяемая толщина материала была исключена введением безразмерных параметров $A, D1, D2$:

$$A = \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right); \quad (9)$$

$$D1 = \left(\frac{t_1}{t_3} - 1 \right); \quad (10)$$

$$D2 = \left(\frac{t_2}{t_3} - 1 \right), \quad (11)$$

где A – акустическая анизотропия материала.

При использовании поверхностных волн для оценки поврежденности Ψ можно использовать задержки (время распространения) рэлеевских импульсов, соответственно, вдоль и перпендикулярно линии действия нагрузки. Введенная функция повреждений Ψ_A через акустические параметры (параметры $D1, D2, A$, а также задержка поверхностных волн) является структурно чувствительной характеристикой. За величину измеряемого критерия поврежденности материала принято

$$\Psi_A = a_D \frac{D_t - D_0}{D^* - D_0} + a_R \frac{t_R^t - t_R^0}{t_R^* - t_R^0} + a_A \frac{A_t - A_0}{A^* - A_0}, \quad (12)$$

где индексы $t, 0, *$ соответствуют текущему (в момент измерения), начальному и критическому (предельному) состоянию соответственно; коэффициент D_t принимает значения $D_t = D1_t + D2_t$, определенные в выражениях (10) и (11); a_D, a_R, a_A – некоторые весовые коэффициенты, зависящие от вида, количества используемых упругих волн и материала контролируемого объекта. Физический смысл критерия Ψ_A заключается в соотношении текущих акустических параметров с абсолютным диапазоном изменения этих параметров.

Максимальное значение накопленных повреждений $\Psi_A = 1$, что соответствует выработке ресурса. В результате анализа проведенных экспериментов, а также с учетом коэффициентов безопасности и разброса экспериментальных данных максимальное значение Ψ_A следует принимать равным 0,8. При таком значении Ψ_A металл достигает предельного состояния. Для реальной конструкции при достижении максимального значения накопленных повреждений ($\Psi_A = 0,8$) необходимо ставить вопрос о проведении дополнительных исследований, расчетов, прекращении эксплуатации контролируемого узла и его дальнейшей замене.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Влияние малоциклового усталости на параметры упругих волн

На образцах из стали 08X18H10T с диаметром рабочей части 12 мм исследованы закономерности накопления повреждений при малоциклового усталости на стадии накопления рассеянных микроповреждений (до появления трещины менее 1 мм.). Условия проведения испытаний: симметричный цикл, жесткое изотермическое нагружение с постоянной амплитудой пластической деформации, база испытаний (количество циклов) $5 \cdot 10^2 - 10^5$, ам-

плитуды пластических деформаций: $\Delta\varepsilon = 0,3$; $0,2$; $0,1$ %.

В процессе испытаний наблюдается деградация структуры, образуются нитриды и карбонитриды, концентрация которых в поверхностном слое выше. В поверхностном слое наблюдаем образование микротрещин (рис. 2).



Рис. 2. Поверхность образца из стали 08X18H10T $\Delta\varepsilon = 0,3$, $N^* = 845$ циклов ($\times 135$)

Fig. 2. The surface of the sample made of 08Cr18Ni10Ti steel $\Delta\varepsilon = 0,3$, $N^* = 845$ cycles ($\times 135$)

Результаты гидростатического взвешивания показывают, что плотность стали в неповрежденном состоянии составляет 7920 кг/м^3 , а в зоне разрушения уменьшается до 7730 кг/м^3 , что говорит о ее понижении на $2,4$ % (рис. 3).

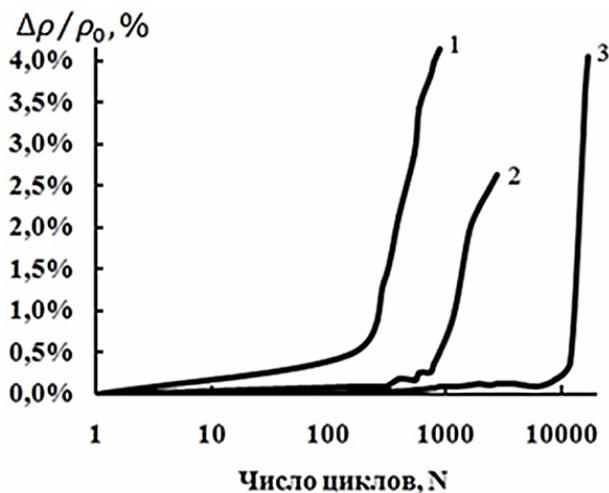
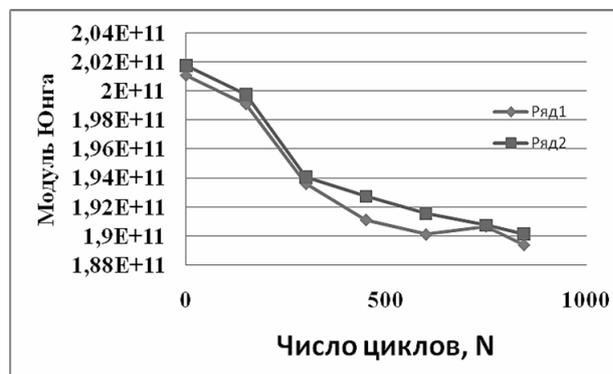


Рис. 3. Изменение плотности образца в процессе малоциклового усталости: 1 – $\Delta\varepsilon = 0,3$ %; 2 – $\Delta\varepsilon = 0,2$ %; 3 – $\Delta\varepsilon = 0,1$ %

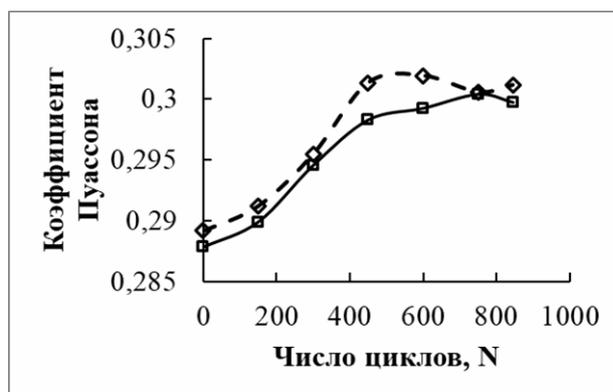
Fig. 3. Change in sample density during low-cycle fatigue: 1 – $\Delta\varepsilon = 0,3$ %; 2 – $\Delta\varepsilon = 0,2$ %; 3 – $\Delta\varepsilon = 0,1$ %

Наблюдается упрочнение материала. Амплитуда напряжения увеличивается от 200 до 770 МПа для $\Delta\varepsilon = 0,3$ %.

Упругие характеристики исследуемых материалов зависят от числа циклов нагружения (рис. 4). Данные результаты позволяют отслеживать характеристики материала в процессе эксплуатации, вносить полученные данные в расчеты ресурсных характеристик.



a



b

Рис. 4. Влияние циклического нагружения на величину модуля Юнга (a) и коэффициент Пуассона (б) стали 08X18H10T ($\Delta\varepsilon = 0,3$ %)

Fig. 4. The effect of cyclic loading on the value of Young's modulus (a) and Poisson's ratio (b) of 08Cr18Ni10Ti steel ($\Delta\varepsilon = 0,3$ %)

На рисунке 5 показан характер изменения регистрируемых характеристик в зависимости от наработки (N / N^*).

Результаты экспериментов показали:

- параметр поврежденности на основе задержки поверхностной волны (поведение кривой «задержка ПАВ» на рис. 5) меняется быстрее, достигает максимального значения, равного 1, при наработке N / N^* , равной $0,5$; это позволяет выбрать в качестве диагностического параметра поверхностную волну для ранней диагностики исследуемого образца;

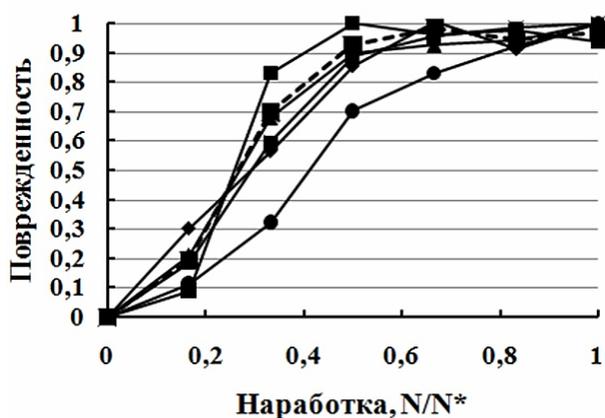
- параметр поврежденности на основе объемных волн (кривая D1) достигает своего мак-

симального значения при наработке N/N^* около 80 % до разрушения образца и тем самым позволяет уточнить ресурс контролируемого узла;

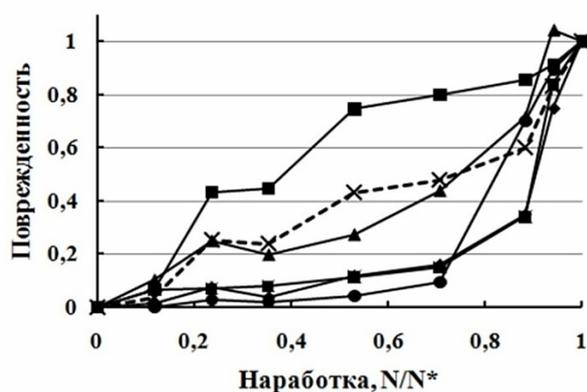
• акустические параметры $D1$ и $D2$ линейно зависят от значения предела текучести, изменяющегося в процессе усталостных испытаний:

$$\sigma_{0,2} = 1,188 \cdot D1 - 10398,$$

Величина достоверной аппроксимации $R^2 = 0,99$.



a



b

—◆— — $D1$; —■— — задержка ПАВ; —■— — напряжение; —●— — объем; —▲— — модуль Юнга; —×— — сумма

Рис. 5. Зависимость поврежденности образца из стали 08X18H10T от наработки: a — $\Delta\varepsilon = 0,3\%$; b — $\Delta\varepsilon = 0,1\%$

Fig. 5. Dependence of the damage of the 08Cr18Ni10Ti steel sample on the operating time: a — $\Delta\varepsilon = 0,3\%$; b — $\Delta\varepsilon = 0,1\%$

Нарботка образца — число циклов, воздействующих на конструкцию, — с учетом текущего значения поврежденности может быть определена как

$$N = 5365 \left(2,53 \cdot 10^{-5} \cdot D2 - 0,209 \right)^{-1,913},$$

Расхождение данных определения числа циклов до разрушения, полученных по результатам акустических измерений, и числом циклов до разрушения, полученном в результате экспериментов, не превышало 20 %.

Результаты практического применения

Контроль технического состояния колонны

В ходе работы был исследован корпус разрушенной колонны деформированного стакана синтеза пентакарбонила железа. Колонна изготовлена из стали 12X18H10T. На заводе (г. Дзержинск) была проведена замена поврежденной колонны.



Рис. 6. Вид деформированного стакана снаружи

Fig. 6. View of the deformed glass from the outside

Необходимо было оценить техническое состояние оставшихся колонн. Результаты испытаний разрушенной колонны показали, что произошло охрупчивание материала, наблюдалась анизотропия его свойств. На основании полученных данных был сформулирован акустический критерий предельного состояния K_d :

$$K_d = \frac{E_d - E_0}{E_p - E_0},$$

где E_d , E_0 , E_p — значения модуля Юнга в момент диагностики, в состоянии поставки и в момент хрупкого разрушения соответственно. При $K_d > 0,7$ металл находится в состоянии, близком к хрупкому разрушению и достигает предельного состояния.

По результатам исследований было принято решение эксплуатировать остальные колонны (14 колонн) по техническому состоянию, т. е. проводя периодическое освидетельствование состояния материала колонн.

Выводы

1. В статье рассмотрена актуальная научно-техническая проблема оценки фактической поврежденности конструкционных металлических материалов акустическим методом для различ-

ных внешних механических (усталостное и статическое нагружение), термических и радиационных воздействий.

2. Показано, что в структуре конструкционных металлических материалов происходят необратимые процессы, приводящие к изменению физико-механических характеристик.

3. Показано, что параметры упругих волн зависят от характеристик исследуемой среды. Результаты исследований влияния среды на параметры упругих волн служат основой для построения комплексного акустического метода определения физико-механических характеристик конструкционных материалов.

4. Предложена структурная модель, описывающая процесс накопления рассеянных микрповреждений в материале, параметры которой могут быть измерены акустическим методом.

5. Показано, что состояние поверхностного слоя может быть использовано в задачах более ранней оценки выработанного ресурса материала конструкций. Предложена модель, учитывающая влияние процессов деградации поверхностного слоя на параметры поверхностных волн. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие предложенную модель.

6. Предложены методики для определения механических характеристик материала – модуля упругости, предела текучести, вязкости разрушения, внутренних напряжений, размера зерна и др. – на элементах конструкций без нарушения их прочностных характеристик.

Библиографические ссылки

1. *Трефилова Т. А., Бирюкова Г. А.* Меры по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий // Проблемы качества и надежности, сертификация, стандартизация. 2020. № 4. С. 41–44.

2. *Терентьев В. Ф., Терентьев В. Ф., Кораблева С. А.* Усталость металлов / Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. М.: Наука, 2015. 484 с.

3. *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.

4. Электромагнитные методы неразрушающего контроля: методики, аппаратура, практическое применение / А. Н. Разыграев, Н. П. Разыграев, В. В. Примаков, М. Н. Дегтярев, В. В. Панков, Д. С. Померанцев // Тяжелое машиностроение. 2020. № 3. С. 35–39.

5. *Муравьев В. В., Тапков К. А., Ленъков С. В.* Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием ме-

тода акустоупругости // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 10–16.

6. Обзор статистических методов оценки вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле / В. Ю. Чертищев, М. А. Далин, А. С. Бойчук, И. С. Краснов // В мире неразрушающего контроля. 2021. Т. 24, № 2 (92). С. 4–14.

7. *Иванов А. Д., Минаев В. Л., Вишняков Г. Н.* Неразрушающий контроль изделий, изготовленных с использованием аддитивного производства, оптическими методами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 10. С. 76–82.

8. *Валиев А. С., Кузеев И. Р.* Оценка степени повреждения образцов из стали 09Г2С, подверженных малоцикловой усталости акустико-эмиссионным способом контроля // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 3. С. 142–152.

9. *Uglov A.L., Khlybov A.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N.* An acoustic method for estimating the thermal-pulsation-induced damage in austenitic steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, is. 2, pp. 53–59. DOI: 10.1134/S106183091602008X.

10. *Murav'eva O., Murav'ev V., Volkova L., Kazantseva N., Nichipuruk A., Stashkov A.* Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 51 (102635). DOI: 10.1016/j.addma.2022.102635.

11. *Khlybov A.A.* Studying the Effect of Microscopic Medium Inhomogeneity on the Propagation of Surface Waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, 54 (6), pp. 385–393. DOI: 10.1134/S1061830918060049.

12. Разработка акустического метода определения степени наводороживания в конструкциях из титановых сплавов / А. А. Хлыбов, Д. А. Рябов, С. Н. Пичков, Д. Н. Шишулин, Д. А. Захаров // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 8–14.

13. Оценка поврежденности конструкционных материалов элементов оборудования ядерных энергетических установок при термопульсациях акустическим методом / А. В. Мамаев, Р. Р. Рязанов, А. Е. Соборнов, А. В. Котин, Е. В. Пликин, Е. С. Кречетов, Л. Н. Храпунова // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 5. С. 106–108.

14. *Аскаргов Р. М., Исламов И. М.* Оценка напряжений магистральных трубопроводов на пересечениях с геодинамическими зонами методами внутритрубной дефектоскопии // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15, № 4. С. 118–124.

15. Определение параметров математической модели накопления повреждений в конструкционных материалах оборудования ЯЭУ / А. В. Козин, Д. А. Лапшин, В. А. Панов, В. А. Пахомов, М. А. Легчанов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 63–74.

16. *Максимов А. Б., Ерохина И. С.* Неразрушающий контроль качества стальных изделий в машиностроении // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 4 (37). С. 30–35.

17. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 753 с.

18. Skudnov V.A., Khlybov A.A., Kharitonov S.V., Oshurina L.A. Structure and phase transformations in an elinvar alloy after various regimes of heat treatment. *Physics of metals and metallography*, 2011, vol. 112, is. 3, pp. 283-289. DOI: 10.1134/S0031918X11030276.

References

1. Trefilova T.A., Biryukova G.A. [Measures to ensure reliability at the stages of design, production and operation of products]. *Obespecheniye kachestva i nadezhnosti, sertifikatsiya, standartizatsiya*, 2020, vol. 4, pp. 41-44 (in Russ).

2. Terent'yev V.F., Korableva S.A. [Fatigue of metals]. Moscow, Nauka Publ., 2015, 484 p. (in Russ).

3. 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.

4. Razygrayev A.N., Razygrayev N.P., Primakov V.V., Degtyarev M.N., Pankov V.V., Pomerantsev D.S. [Electromagnetic methods of non-destructive testing: methods, equipment, practical application]. *Tyazheloje mashinostroyeniye*, 2020, vol. 3, pp. 35-39 (in Russ).

5. Murav'yev V.V., Tapkov K.A., Len'kov S.V. [Non-destructive testing of internal stresses in rails during manufacture using the acoustoelasticity method]. *Defektoskopiya*, 2019, vol. 1, pp. 10-16 (in Russ).

6. Chertishchev V.Yu., Dalin M.A., Boychuk A.S., Krasnov I.S. [Review of statistical methods for assessing the probability of detecting defects in non-destructive testing]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2021, vol. 24, no. 2 (92), pp. 4-14 (in Russ).

7. Ivanov A.D., Minayev V.L., Vishnyakov G.N. [Non-destructive testing of products manufactured using additive manufacturing by optical methods]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85 (10), pp. 76-82 (in Russ).

8. Valiyev A.S., Kuzeyev I.R. [Assessment of the degree of damage to samples of steel 09G2S subject to low-cycle fatigue by the acoustic emission method of control]. *Neftegazovoye delo*, 2022, vol. 20 (3), pp. 142-152 (in Russ).

9. Uglov A.L., Khlybov A.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N. An acoustic method for estimating the thermal-pulsation-induced damage in austenitic steel. *Russian*

Journal of Nondestructive Testing, 2016, vol. 52, is. 2, pp. 53-59. DOI: 10.1134/S106183091602008X.

10. Murav'eva O., Murav'ev V., Volkova L., Kazantseva N., Nichipuruk A., Stashkov A. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 51 (102635). DOI: 10.1016/j.addma.2022.102635.

11. Khlybov A.A. Studying the Effect of Microscopic Medium Inhomogeneity on the Propagation of Surface Waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, 54 (6), pp. 385-393. DOI: 10.1134/S1061830918060049.

12. Khlybov A.A., Ryabov D.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N., Zakharov D.A. [Development of an acoustic method for determining the degree of hydrogenation in structures made of titanium alloys]. *Defektoskopiya*, 2019, vol. 4, pp. 8-14 (in Russ).

13. Mamayev A.V., Ryazapov R.R., Sobornov A.Ye., Kotin A.V., Plikin Ye.V., Krechetov Ye.S., Khrapunova L.N. [Assessment of damage to structural materials of equipment elements of nuclear power plants during thermal pulsations by the acoustic method]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*, 2016, vol. 5, pp. 106-108 (in Russ).

14. Askarov R.M., Islamov I.M. [Stress assessment of main pipelines at intersections with geodynamic zones using in-line flaw detection methods]. *Neftegazovoye delo*, 2017, vol. 15 (4), pp. 118-124 (in Russ).

15. Kozin A.V., Lapshin D.A., Panov V.A., Pakhomov V.A., Legchanov M.A. [Determination of the parameters of the mathematical model of damage accumulation in structural materials of nuclear power plant equipment]. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva*, 2020, vol. 1 (128), pp. 63-74 (in Russ).

16. Maksimov A.B., Yerokhina I.S. [Non-destructive quality control of steel products in mechanical engineering]. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2021, vol. 4 (37), pp. 30-35 (in Russ).

17. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest' elementov konstruktivnykh* [Creep of structural elements]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 753 p. (in Russ).

18. Skudnov V.A., Khlybov A.A., Kharitonov S.V., Oshurina L.A. Structure and phase transformations in an elinvar alloy after various regimes of heat treatment. *Physics of metals and metallography*, 2011, vol. 112, is. 3, pp. 283-289. DOI: 10.1134/S0031918X11030276.

Evaluation of Structural Metal Materials Damage by Acoustic Methods

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

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

D.A. Ryabov, Postgraduate, 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

The purpose of this research is to study the damage of structural metal materials by acoustic method under various external fatigue and thermal influences. A structural model describing the process of accumulation of scattered micro-damages in the material is proposed, the parameters of which can be measured by acoustic method. It is shown that irreversible processes occur in the structure of structural metal materials during cyclic loading, leading to changes in physical and mechanical characteristics. The assessment of changes in a large number of informative parameters of acoustic control in the process of damage accumulation was carried out. It is established that the parameters of elastic waves depend on the characteristics of the medium under study. It is shown that the state of the surface layer can be used in the tasks of earlier assessment of the developed resource of the structural material. A model that takes into account the influence of degradation processes of the surface layer on the parameters of surface waves is proposed. The results of experimental studies confirming the proposed model are presented. Methods for determining material mechanical characteristics are proposed: elastic modulus, yield strength, fracture toughness, internal stresses, grain size, etc. on structural elements, without violating their strength characteristics. The results of studies of medium influence on parameters of elastic waves serve as the basis for constructing a complex acoustic method for determining physical and mechanical characteristics of structural materials. Examples of practical use of the obtained results in the tasks of ensuring the safe operation of critical structural elements are considered.

The data obtained during the study make it possible to assess the damaged state and properties of metal materials under cyclic loading quickly using the parameters of acoustic waves.

Keywords: safe operation, structural changes, fatigue, ultrasonic monitoring.

Получено 01.11.2022

Образец цитирования

Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами / А. А. Хлыбов, А. Л. Углов, Д. А. Рябов, М. С. Аносов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 4. С. 18–26. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-18-26.

For Citation

A.A. Khlybov, A.L. Uglov, D.A. Ryabov, M.S. Anosov. Evaluation of Structural Metal Materials Damage by Acoustic Methods. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 18-26 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-18-26.