

УДК 620.179.16

А.А. Хлыбов, В.А. Скуднов

ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Акустическими методами исследуется влияние внешних воздействий (циклических, термических и радиационных) на структуру конструкционных металлических материалов. Рассматриваются примеры практического использования полученных результатов в задачах обеспечения безопасной эксплуатации ответственных элементов конструкций.

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

Введение

Одной из основных задач развития современного машиностроения является обеспечение безопасной эксплуатации конструкций, как в целом, так и отдельных ее элементов. По причине выработки ранее назначенного ресурса актуальной является задача продления срока службы конструкций. Предельные состояния материала машин и сооружений становятся зависимыми от искажения структуры, накопления повреждений в процессе эксплуатации. Длительный срок службы приводит к проявлению в разные периоды эксплуатации различных механизмов деградации материала, инкубационные периоды которых протекают скрытно. Постепенно развивающиеся неконтролируемые процессы деградации приводят к зарождению и развитию микроскопических трещин, к внезапным отказам и разрушению конструкции. Поэтому, для обеспечения безопасной и безаварийной эксплуатации, необходима надежная оценка текущего состояния материала конструкций, как на этапе проектирования и изготовления, так и в процессе ее эксплуатации.

Особую роль в задачах оценки степени поврежденности структуры, обеспечения безопасной эксплуатации конструкций играет диагностика, ключевым элементом которой являются методы неразрушающего контроля, в основе которых лежит использование физических полей различной природы: электромагнитные, упругие. 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 синтеза различных научных подходов, применяемых в металловедении, механике деформируемого твердого тела, механике разрушения и методов неразрушающего контроля. Надежная оценка технического состояния возможна только при наличии хорошей корреляционной связи между оцениваемыми параметрами материала конструкции и измеряемыми характеристиками используемого физического поля. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля следует признать акустический метод. Это вполне естественно, так как параметры упругих волн зависят от характеристик исследуемой среды: плотности, модулей упругости, размера и геометрии структурных неоднородностей и т.д.

Целью настоящей работы является исследование накопления повреждений в конструкционных металлических материалах акустическими методами, а также разработка и внедрение методик оценки состояния материала для обеспечения безопасной эксплуатации ответственных элементов конструкций.

Объекты контроля (материалы) и условия их эксплуатации

Исследования проводились на материалах, используемых при строительстве: корпусов экранопланов, корпусов реактора ВВЭР-440, 1000, элементов трубопроводов (ДУ-300) атомных электростанций, корпуса колонны синтеза пентакарбонила железа. Материалы указанных объектов подвергаются воздействию статических, переменных (мало- и многоцикловая усталость), термомеханических нагрузок и радиационному облучению. Исследовались также изделия ножевой продукции и гребных валов, технологический процесс которых включает термическую обработку. Для изготовления указанных объектов используются стали: коррозионно-стойкие хромоникелевые аустенитного класса (12X18H10T, 08X18H10T), свариваемые теплоустойчивые феррито-перлитного класса: (15X2МФА, 15X2МФА-А, 15X2НМФА, 15X2НМФА-А), конструкционные легированные 6ХС, 15ХСНД, 09Г2С, 5ХНВС, 30ХГС, Ст35, а также титановые ВТ3-1 и алюминиевые АМГ61 сплавы.

Материалы и методика эксперимента

Исследования проводились на образцах и элементах конструкций из материалов, используемых при строительстве рассмотренных ранее объектов с различной исходной структурой (в состоянии поставки), характерной для реальных конструкций, а также после различных видов воздействия. Режимы нагружения образцов соответствуют реальным условиям эксплуатации.

Для экспериментальных исследований использовались приборы и средства: оптической микроскопии (макро- и микроанализ), рентгеноструктурного анализа, контроля твердости, измерения плотности, прецизионных акустических измерений. Акустические исследования проводились с использованием измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН», который предназначен для прецизионных измерений амплитудных, временных и частотных характеристик упругих волн. В основу работы аппаратной части ИВК «АСТРОН» положен способ подробной регистрации всей серии отраженных акустических импульсов для ее последующей обработки средствами программной части системы. «АСТРОН» позволяет проводить измерения задержек (времени распространения продольных, сдвиговых, поверхностных и головных волн) с точностью 10^{-9} с, затухания (погрешность измерения 5%) в диапазоне частот 1-50 МГц.

Нагружение образцов осуществлялось на серийных испытательных машинах, специально изготовленных стендах. При оценке деградации материала конструкции использовались экспериментальные данные, полученные на натурных 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 «АСТРОНА».

Обсуждение результатов

Хромоникелевая коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса типа 18-10 после охлаждения (1050 - 1100°C) имеет структуру аустенит (γ), феррит (α) [1]. Ферритная фаза располагается по границам зерен аустенита. При быстром охлаждении аустенит фиксируется в пересыщенном и неустойчивом состоянии. Эта неустойчивость может проявиться, когда сталь подвергается пластической деформации, усталостному нагружению, нагреву при температурах 550 - 850°C. Часть аустенита может превращаться в мартенсит $\gamma > \alpha$. Кроме мартенсита охлаждения, различают мартенсит напряжения и деформации, для каждого из которых существует своя точка начала превращения соответственно M_n , M_d и M_σ . Положение мартенситных точек зависит от химического состава, степени и скорости деформации. Например, для стали 1X18H9T, точка M_n находится около -190°C, а точка M_d порядка 600°C

(при деформации кручением). При распаде твердого раствора образуются карбиды, нитриды титана. Вследствие изоморфности кристаллических решеток и близости их параметров карбиды и нитриды способны взаимно растворяться. Соединения подобного рода принято называть карбонитридами титана $Ti(C,N)$. При механическом воздействии они не испытывают пластической деформации (по минералогической шкале их твердость около 9, а твердость нитрида титана соответствует 8). Места, где наблюдается скопление нитридов, часто служат очагами хрупкого разрушения.

Корпуса атомных энергетических установок работают при температурах 270-325°C в условиях радиационного облучения. Для их изготовления используются теплоустойчивые стали типа 12X1МФ, 15X2МФА, 15X2НМФА. Основной составляющей фазой является α -фаза, которая представляет собой твердый раствор на основе железа, имеющего ОЦК решетку: внедрения (углерода, азота и др.) и замещения (хрома, молибдена, ванадия). Основной карбидной фазой является легированный цементит M_3C сложного карбида $M_{23}C_6$ и следы M_3C_7 , VC . Крупные карбиды $M_{23}C_6$ формируются в основном в виде цепочек или отдельных карбидов по границам зёрен, при этом средний размер этих карбидов составляет 0,6 - 1,5 мкм, размеры мелкодисперсных карбидов ванадия, расположенных в ферритных зёрнах, – 0,06 - 0,08 мкм. Для создания такой структуры стали подвергаются нормализации и высокому отпуску при температурах 650 - 750°C. Для ответственных элементов энергетического оборудования допустимым является размер зерна от 5-го до 3-го балла. После двойной закалки и высокого отпуска в центре образца (15X2МФА-А с 0,6-0,8% Ni), толщиной 420 мм, мелкозернистая бейнитно-мартенситная структура обеспечивает высокие значения прочности и вязкости.

Для защиты материала корпуса реактора от коррозионных повреждений используется антикоррозионная наплавка, выполненная аустенитными хромоникелевыми сварочными материалами (сварочная лента марки (Св-07X25Н13)). Толщина плакирующего антикоррозионного покрытия корпусов реакторов ВВЭР-210 равна 16-22 мм, ВВЭР-440, ВВЭР-1000 выполняется в два слоя суммарной толщиной 9 ± 2 мм.

Из литературных данных следует, что поврежденность, возникающая при силовом воздействии (усталость), физически интерпретируется как непрерывный процесс образования, роста и взаимодействия микродефектов различного уровня от атомного до структурного, определяемого размером зерна. Существуют 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, равной 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.

Анализ данных по влиянию радиационного облучения показывает, что при температуре ниже $0,5 T_{пл}$, энергии нейтронов $> 0,5$ МэВ и флюенсе нейтронов более 10^{23} нейтронов/м² для углеродистых и нержавеющей сталей наблюдается радиационное охрупчивание – повышение температуры вязкохрупкого перехода и снижение относительного удлинения, поперечного сужения, ударной вязкости, снижение пластичности, повышение предела текучести, предела прочности. За 40 лет эксплуатации реактора суммарный флюенс может достигать величины $5,7 \cdot 10^{23}$ нейтронов/м² (для внутренней стенки корпуса реактора ВВЭР-1000). Радиационное охрупчивание связано с образованием радиационных дефектов, мелкодисперсных фосфидов и карбидов, сегрегаций фосфора на межфазных границах, а также перераспределением исходной дислокационной структуры. С увеличением дозы нейтронного облучения феррито-перлитные стали становятся весьма пересыщенными фосфором, происходит его миграция к поверхностям раздела и границам зерен. Легирование стали никелем усиливает влияние фосфора на радиационное охрупчивание, соответственно его содержания в стали не превышает 2%. Наблюдаются также выделения карбидов ванадия, распухание металла (увеличение объема). Эти эффекты приводят к изменению химического состава матрицы и, как следствие, к изменению механи-

ческих свойств материала. Опасность низкотемпературного радиационного охрупчивания заключается в том, что повышается вероятность разрушения.

Для описания поликристаллических материалов, среды с повреждениями разработаны различные модели. Среди моделей значительный интерес представляют структурные модели, в которых, с одной стороны, явным образом описывают явления, происходящие в структуре материала, а с другой - используют достаточно удобный и простой формальный математический аппарат. Основополагающими являются работы Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова, в которых используется понятие функции повреждений (поврежденность) Ψ . Физический смысл Ψ зависит от используемой модели. Например, в качестве Ψ может быть использована критическая плотность дислокаций, концентрация микродефектов и уровень пластической деформации. В качестве поврежденности рассматриваются поры, микротрещины, включения. Названные повреждения приводят, например, к изменению модулей упругости, анизотропии физико-механических свойств первоначально изотропных материалов. Эффективные модули упругости (Юнга, сдвига) описываются [4, 5]:

$$E = E_0(1 - \Psi), \quad G = G_0(1 - \Psi), \quad (1)$$

где индексу 0 соответствует неповрежденный материал, функция поврежденности Ψ определяется в виде:

$$\Psi \approx -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = v_\omega N_\omega / \rho_0. \quad (2)$$

Здесь N_ω , v_ω , $\Delta\rho$, ρ_0 - концентрация микропор (микротрещин), средний объем поры, изменение плотности, плотность материала в отсутствие повреждений соответственно.

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

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

$$v = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2C_l^2 - 3C_t^2}$$

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 данной среде. Следует подчеркнуть, 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, наименьшую погрешность измерения обеспечивает измерение скорости упругих волн.

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

$$C_i = C_{i0}(1 - k\Psi). \quad (4)$$

Аналогичное выражение можно получить, если рассматривать распространение упругих волн в среде с повреждениями. Соотношение (4) показывает, что с точностью до некоторой функции k , определяемой экспериментально, может быть определена величина Ψ , если известно изменение скоростей. Скорость C_i , $i = 1, 2, 3$ упругой волны при распространении через исследуемый образец определяли по формуле (прием и излучение упругих волн осуществляется одним датчиком):

$$C_i = 2L/t_i, \quad (5)$$

где L – толщина образца, м.

Так как работы производились в режиме излучения и приема, то в формуле (1) путь принимался равным $2L$.

В работе приняты следующие обозначения: индексы 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.

Для реального объекта контроля измерить толщину с высокой точностью не представляется возможным. Это связано с отсутствием доступа к конструкции, низкой точностью применяемого измерительного инструмента (штангенциркуля, микрометра и т.д.). Изменения скорости упругих в материале, связанные с процессами накопления повреждений, не превышают единиц процентов. Кроме того, измерительная техника позволяет проводить измерения времени распространения упругих волн. Скорость можно получить после соответствующего пересчета по формуле (5). Учитывая также тот факт, что среда с повреждениями оказывает различное влияние на разные типы упругих волн. Поэтому при анализе результатов экспериментов трудно определяемая толщина материала была исключена введением следующих безразмерных параметров $A, D1, D2$:

$$A = \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right), \quad D1 = \left(\frac{t_1}{t_3} - 1 \right), \quad D2 = \left(\frac{t_2}{t_3} - 1 \right). \quad (6)$$

Параметр A принято называть *акустической анизотропией материала*.

При использовании поверхностных волн в качестве характеристики поврежденности Ψ можно использовать задержки (время распространения) рэлеевских импульсов соответственно вдоль и перпендикулярно линии действия нагрузки.

Для оценки напряженного состояния элементов конструкций используются уравнения акустоупругости, связывающие главные напряжения с акустическими задержками импульсов упругих объемных волн [2]:

$$\sigma_1 = k_1 \left(\frac{d_1^0}{d_1} - 1 \right) - k_2 \left(\frac{d_2^0}{d_2} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\sigma_2 = k_3 \left(\frac{d_2^0}{d_2} - 1 \right) - k_4 \left(\frac{d_1^0}{d_1} - 1 \right) \quad (8)$$

где $d_1 = \frac{t_1}{t_3}$, $d_2 = \frac{t_2}{t_3}$, $d_1^0 = \frac{t_1^0}{t_3^0}$, $d_2^0 = \frac{t_2^0}{t_3^0}$,

здесь t_1^0, t_2^0, t_3^0 – соответствующие значения задержек для ненапряженного материала трубопровода

Величины k_1, k_2, k_3, k_4 определяются в ходе тарировочных экспериментов на образцах из контролируемого материала.

Результаты экспериментов

На образцах из стали 08X18H10T диаметром рабочей части 12 мм исследованы закономерности накопления поврежденностей 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) $5 \cdot 10^2 - 10^5$, амплитуды пластических деформаций: 0,3%; 0,2%; 0,1% .

В процессе испытаний наблюдается образование мартенсита, а также было обнаружено появление магнитных свойств, образуются нитриды, концентрация которых в поверхностном слое выше, в нем же имеются микротрещины (рис. 1). Результаты гидростатического взвешивания: плотность стали в неповрежденном состоянии 7920 кг/м^3 , в зоне разрушения уменьшается до 7730 кг/м^3 , что составляет 2,4%. Наблюдается упрочнение материала. Амплитуда напряжения увеличивается от 200 до 770 МПа для ($\Delta\varepsilon = 0,3$).

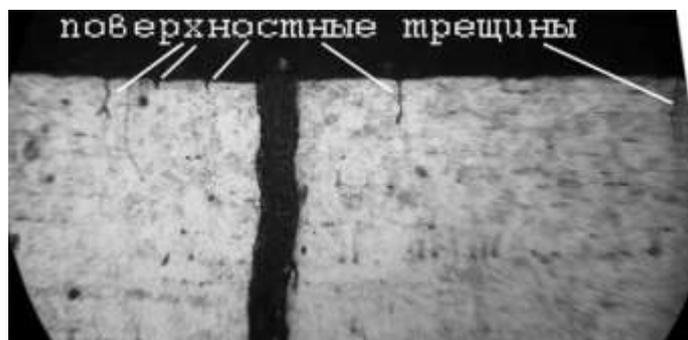


Рис. 1. Сталь 08X18H10T $\Delta\varepsilon = 0,3$, $N^* = 845$ циклов, $\times 135$ (поверхность образца)

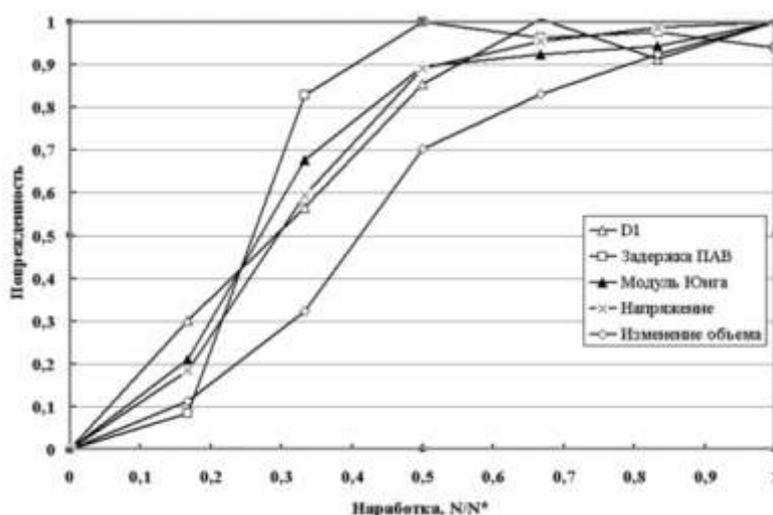


Рис. 2. Накопление поврежденности в образце от наработки: $\Delta\varepsilon = 0,3$

На рис. 2 показан характер изменения регистрируемых характеристик в зависимости от наработки N/N^* . Результаты экспериментов показали:

- что параметр поврежденности на основе задержки поверхностной волны (поведение кривой «задержка ПАВ» на рис. 2) 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 максимального значения при наработке N/N^* около 80% до разрушения образца и тем самым позволяет уточнить ресурс контролируемого узла.

Акустический параметр $D1$ (так же, как $D2$) линейно зависит от значения предела текучести, изменяющегося в процессе усталостных испытаний:

$$\sigma_{02} = 1,188 \cdot D1 - 10398. \quad (9)$$

Величина достоверной аппроксимации $R^2 = 0,9892$.

Уравнение Коффина-Мэнсона для стали 08Х18Н10Т имеет вид:

$$N^* = 5365 \cdot (\Delta W_{\text{ц}})^{-1,913} \quad (10)$$

где $\Delta W_{\text{ц}}$ – работа напряжений за цикл нагружения, площадь петли гистерезиса МДж/м³. Расхождение данных определения числа циклов до разрушения, полученных по результатам акустических измерений и числом циклов до разрушения, не превышает 20%.

Введенная функция повреждений через акустические параметры (параметры $D1, D2, A$, а также задержка поверхностных волн) является структурно чувствительной характеристикой. По величине изменения акустических параметров можно оценить структурную поврежденность металла. За величину измеряемого критерия поврежденности материала принято:

$$\Psi_A = \alpha_D \frac{D_t - D_0}{D^* - D_0} + \alpha_R \frac{t_R^t - t_R^0}{t_R^* - t_R^0} + \alpha_A \frac{A_t - A_0}{A^* - A_0}, \quad (11)$$

где индекс $t, 0, *$ – соответствует текущему (в момент измерения), начальному и критическому (предельному) состоянию соответственно; коэффициент D_t принимает следующие значения: $D_t = D1_t + D2_t$, определенные в выражении (6); $\alpha_D, \alpha_R, \alpha_A$ – некоторые весовые коэффициенты, зависящие от вида, количества используемых упругих волн, материала контролируемого элемента. Физический смысл критерия заключается в соотношении текущих акустических параметров с абсолютным диапазоном изменения этих параметров.

Максимальное значение накопленных повреждений $\Psi=1$, что соответствует выработке ресурса. В результате анализа проведенных экспериментов, а также с учетом коэффициентов безопасности, разброса экспериментальных данных максимальное значение Ψ следует принимать равным 0.8 ($\Psi=0,8$). При таком значении металл достигает предельного состояния. Для реальной конструкции при достижении максимального значения накопленных повреждений необходимо ставить вопрос о проведении дополнительных исследований, проведении расчетов, прекращении эксплуатации контролируемого узла и его дальнейшей замене.

Проведены [2, 6] исследования влияния радиационного облучения на структуру и физико-механические свойства корпусной стали, сварных соединений и коррозионно-стойкой наплавки. Исследования выполнялись на образцах – темплетях (образцы мини Шарпи размерами $5 \times 5 \times 27,5$ мм), вырезанных с внутренней поверхности корпуса реактора ВВЭР-440 (сталь 15Х2МФА): из сварного шва, основного металла и зоны термического влияния. Образцы вырезались из разных атомных станций, имеющих различное значение флюенса. Влияние флюенса и температуры вязкохрупкого перехода на акустические характеристики показано на рис. 3.

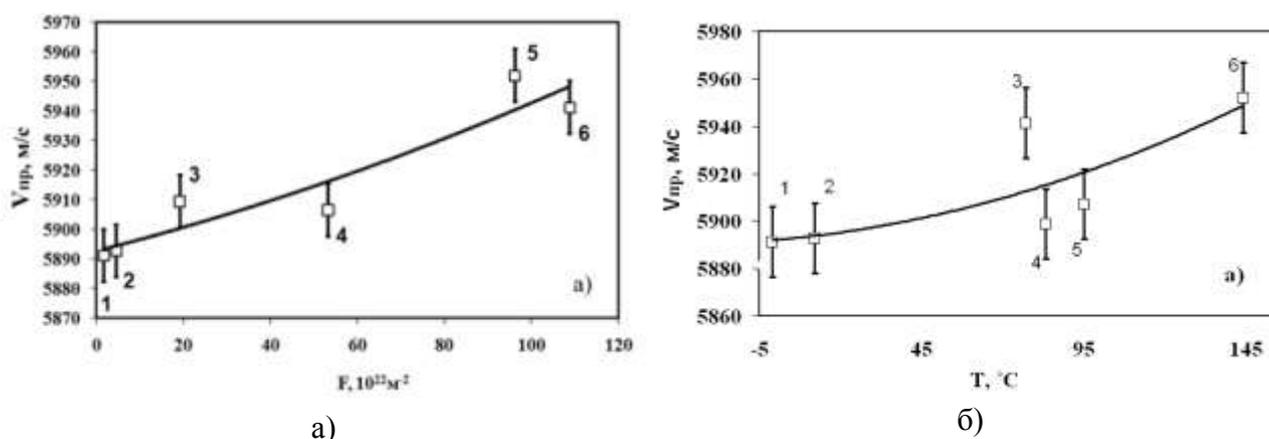


Рис. 3. Зависимость скорости продольной волны:
 а – от флюенса; б – критической температуры хрупкости (сталь 15Х2МФА)

На рис. 3 точки 1, 2 соответствуют образцам-темплетам, вырезанным с Хмельницкой АЭС (выгрузка 3), точка 3 - Кольской АЭС первый блок, точка 4 - второй блок, точка 5 - Нововоронежской АЭС третий блок, точка 6 - четвертый блок.

Влияние радиационного облучения на механические свойства стали 08X18H10T проводились на образцах (типа Шарпи) из основного металла (ОМ) и сварного шва (МСШ) в горячей камере ФГУП «Прометей», Санкт-Петербург. Повреждающие дозы облучения и механические свойства, результаты акустических измерений для образцов приведены в табл. 1 (основной металл и металл сварного шва). В табл. 2 приводятся уравнения, связывающие пределы прочности, текучести с акустическими. В качестве функции накопленных повреждений может быть использовано выражение (11). Предельное значение Ψ определяется исходя из поврежденности при максимально полученном значении флюенса.

Таблица 1

Повреждающая доза, сна	ОМ	МСШ	ОМ	МСШ	ОМ	МСШ
	0		5-7		40	
σ_{02} , МПа	295	460	890	970	1030	1025
σ_{ϵ} , МПа	570	615	955	1050	1110	1095
J_C , кН/м	305 - 463	450	93 - 141	115-120	30 - 50	35-40
t_R , нс	5273	5240	5341	5374	5387	5408

Таблица 2

Уравнения линейной аппроксимации	
Основной металл	Металл сварного шва
$\sigma_{02} = 6,99t_R - 36559$, $R^2 = 0,947$	$\sigma_{02} = 3,53t_R - 18013$, $R^2 = 0,9892$
$\sigma_{\epsilon} = 4,89t_R - 25203$, $R^2 = 0,9832$	$\sigma_{\epsilon} = 3,00t_R - 15113$, $R^2 = 0,9885$
$J_C = 17303 - 3,21t_R$, $R^2 = 0,9614$	$J_C = 13310 - 2,46t_R$, $R^2 = 0,9999$

Результаты практического применения

1. Был исследован корпус разрушенной колонны деформированного стакана синтеза пентакарбонила железа. Колонна построена из стали 12X18H10T [3]. На заводе (г. Дзержинск) была проведена замена поврежденной колонны. Необходимо было оценить техническое состояние оставшихся колонн. Результаты испытаний разрушенной колонны показали, что произошло охрупчивание материала, наблюдается анизотропия свойств. На основании полученных данных был сформулирован акустический критерий предельного состояния K_{δ} :

$$K_{\delta} = \frac{E_{\delta} - E_0}{E_p - E_0}, \quad (12)$$

где E_{δ} , E_0 , E_p - значение модуля Юнга в момент диагностики, в состоянии поставки и в момент хрупкого разрушения соответственно.

При $K_{\delta} > 0,7$ металл находится в состоянии, близком к хрупкому разрушению, и достигает предельного состояния.

2. На Нижегородском металлургическом заводе [7] проведены исследования ножевой продукции (сталь 6ХС). Структура стали после изотермической закалки – мартенсит и остаточный аустенит. При изготовлении ножей (размером 2150×130×25 мм, 2150×140×45) после термической обработки наблюдается коробление и значительные пластические деформации. При механической правке на гидравлическом прессе возможно разрушение.

На основании данных, полученных на образцах, изделиях ножевой продукции, предложен критерий качества (наличие остаточных напряжений) гильотинных ножей:

$$\sigma_i + \sigma_p < \sigma_B, \quad (13)$$

где σ_i – значение остаточных напряжений в ноже, определяется при акустических измерениях, МПа; σ_p – напряжения, создаваемые при правке на гидропрессе, МПа; σ_B – предел прочности, МПа.

Измерения напряжений осуществлялись акустическим методом по алгоритму, приведенному в формулах (7), (8).

3. Проведены измерения остаточных напряжений [8] на трубопроводах типа ДУ-300 (сталь 08X18Н10Т, $\varnothing 325 \times 16$ мм) в районе сварных швов на атомных станциях: Калининской (блок 3), Смоленской и Курской (блок 3). Измерения проводились в момент остановки энергоблоков. В уравнениях акустоупругости необходима информация об акустических характеристиках в металле трубопровода, в котором отсутствуют напряжения. Для этого использовалось предположение, что на большом расстоянии от шва (более 200 мм) поле механических напряжений равно нулю. При проведении измерений была исключена зона термического влияния (на расстоянии 5 мм от сварного шва температура не превышает 500°C). Распределение напряжений имеет сложный вид. Максимальное значение экспериментальных данных 210 МПа, расчетные данные: 300 МПа.

Выводы

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

Библиографический список

1. **Паршин, А.М.** Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионно-стойких сталей и сплавов / А.М. Паршин. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 656 с.
2. Неразрушающий контроль: справочник / под ред. В.В. Клюева. Т. 4. – М.: Машиностроение, 2004. – 736 с.
3. **Хлыбов, А.А.** Поведение структуры и повреждаемость тонколистовой стали 12X18Н10Т в конструкции колонн при производстве пентакарбонила железа / А.А. Хлыбов, В.А. Скуднов, М.К. Чегуров // Контроль. Диагностика. 2007. № 12. С. 49–53.

4. **Хлыбов, А.А.** Использование упругих волн для определения физико-механических характеристик образцов, подвергаемых радиационному облучению / А.А. Хлыбов, В.Г. Васильев, А.Л. Углов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. №12. С. 46–49.
5. **Хлыбов, А.А.** Акустический метод оценки технического состояния крюков из сплава ВТЗ-1. // Деформация и разрушение материалов. 2008. №8. С. 31–36.
6. **Хлыбов, А.А.** Исследование состояния материала корпусов реакторов ВВЭР подвергаемого нейтронному облучению по параметрам упругих волн / А.А. Хлыбов, В.Г. Васильев, А.Л. Углов // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 1. С. 31–35.
7. **Хлыбов, А.А.** Оценка состояния изделий ножевой продукции, подвергаемых термической обработке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 4. С. 54–57.
8. **Хлыбов, А.А.** Оценка остаточных напряжений в трубопроводах из стали 08X18H10T / А.А. Хлыбов, А.Л. Углов // Контроль. Диагностика. 2009. № 6. С. 32–35.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2010*

A.A. Khlybov, V.A. Skudnov

**ESTIMATION OF STRUCTURAL CHANGES IN CONSTRUCTIONAL
METAL MATERIALS BY ACOUSTIC METHODS TO MAINTENANCE OF SAFE
OPERATION OF TECHNICAL OBJECTS**

The influence of external exposure (cyclic, thermal, radiation) onto structure of constructional metallic materials has been researched by acoustics method in this paper. The Examples practical use of obtained results into problems of maintenance of safe operation of main structural components.

Key words: safe operation, structural changes, fatigue, radiation, ultrasonic check.