

ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ АКУСТИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОЛНАМИ

Приведены результаты исследований зависимости скорости распространения акустической поверхностной волны от температуры, напряженно-деформированного состояния, шероховатости поверхности и механических свойств металла изделия. Показано применение разработанной методики оценки напряженно-деформированного состояния металла на объектах газовой промышленности.

Одной из актуальных проблем современной техники остается контроль напряженно-деформированного состояния металла оборудования и конструкций. Поиск новых, более совершенных способов контроля дефектов и напряженного состояния металла конструкций привел к разработке неразрушающих методов, основанных на использовании акустических поверхностных волн.

Одним из параметров, характеризующих состояние материала изделия, является изменение механических свойств металла в процессе эксплуатации. Акустические методы контроля, направленные на выявление внутренних дефектов и нарушений сплошности металлов, постепенно проникают в такие области металловедения, как определение свойств, структуры, качества металла. Особый интерес представляют поверхностные акустические волны Рэлея, которые имеют особенность выявления не только поверхностных, но и подповерхностных дефектов, расположенных на глубине, равной удвоенной длине волны /1/. Работа ультразвуковых дефектоскопов основана на эхолокации сплошности металла объекта и позволяет выявлять дефекты в виде изменения амплитуды отраженного ультразвукового сигнала от дефекта. Однако изменение напряженно-деформированного состояния металла изделия не влияет на амплитуду отраженного ультразвукового сигнала и не фиксируется ультразвуковыми дефектоскопами.

В работах /2, 3/ представлены методы и приборы для оценки изменения структурно-механических характеристик металла по параметрам акустического импульса, прошедшего через контролируемое изделие, при этом в большинстве случаев возникают затруднения точного отсчета момента подачи ультразвукового импульса на поверхность контролируемого объекта, а также разброс экспериментальных данных, связанных с установкой и усилием прижатия датчика (качеством акустического контакта) и влиянием температуры. Применение метода автоциркулирующих ультразвуковых импульсов (АУЗИ) позволяет решить проблему отсчета момента подачи ультразвукового импульса, т. к. при известной частоте АУЗИ и базе между пьезопреобразователями исключается необходимость определения момента подачи начального ультразвукового импульса в контролируемое изделие.

Основной задачей данных исследований являлось установление зависимости скорости акустических поверхностных волн от степени пластических деформаций металла.

Исследования проводили с помощью прибора ИСП-11 (испытатель структурных превращений) производства Новосибирской академии железнодорожного транспорта. Данный прибор использовался разработчиками в качестве акустического импульсного твердомера /3/. Работа прибора основана на методе АУЗИ, при этом начальный ультразвуковой импульс, проходя через контролируемое изделие, после усиления вновь подается на передающий пьезопреобразователь. За счет обратной связи происходит самонастройка генератора на данную структуру металла и возникает устойчивый процесс АУЗИ. Резонансная частота полученной последовательности импульсов прямо пропорциональна скорости распространения акустических поверхностных волн и служит определяющей характеристикой при оценке механических свойств металлов.

На скорость распространения акустических поверхностных волн влияют различные внешние и внутренние параметры контролируемого изделия, такие как температура, шероховатость поверхности исследуемого объекта, величина пластических деформаций металла.

По результатам проведенных экспериментов, обработанных с помощью программы CurveExpert 1.3, получена линейная зависимость $(\Delta\tau/t_{имп}^0)=934,6-20,6T$ изменения времени распространения акустических поверхностных волн $(\Delta\tau/t_{имп}^0)$ 100% в зависимости от температуры $T^{\circ}\text{C}$ стальных образцов (рисунок 1). Здесь $t_{имп}^0$ – период акустического импульса при температуре металла 40°C (оптимальный температурный интервал работы ультразвуковых приборов: $+10\dots+40^{\circ}\text{C}$), $t_{имп}$ – период акустического импульса на исследуемых образцах с разными величинами температур, $\Delta\tau=t_{имп}-t_{имп}^0$. Полученные данные свидетельствуют о необходимости учета влияния температуры контролируемого объекта при определении скорости акустических поверхностных волн.

Одним из основных внешних параметров является шероховатость поверхности исследуемого объекта. Для оценки влияния данного параметра на скорость акустических поверхностных волн проведены исследования на стальном образце, имеющем несколько участков (ступеней). Каждая ступень имела различную шероховатость, которая достигалась обработкой при разных режимах резания проходным резцом.

После определения шероховатости каждой ступени профилографом-профиломером по ГОСТ 19300 (диапазон измерения $Ra=0,02\dots 100$ мкм) проводили замеры скорости распространения акустической поверхностной волны. На каждой ступени образца делали не ме-

нее десяти замеров и определяли среднеарифметическую величину скорости распространения акустической поверхностной волны.

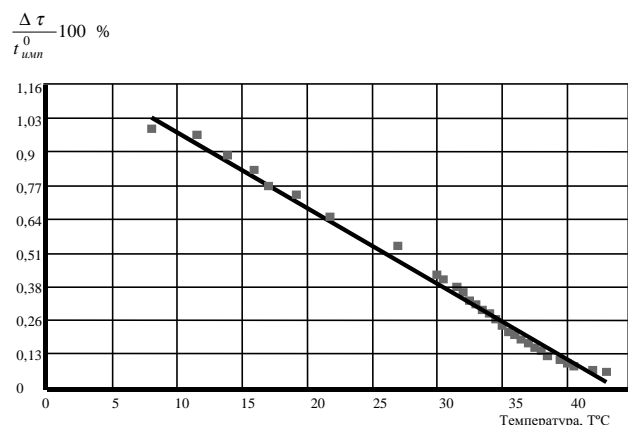


Рисунок 1. Зависимость изменения скорости распространения акустических поверхностных волн от температуры металла

По результатам проведенных экспериментов получена зависимость изменения скорости распространения акустической поверхностной волны по поверхностной зоне исследуемого металла ($\Delta\tau/t_{имп}^0$) 100% от шероховатости поверхности, приведенная на рисунке 2. Зависимость близка по своим характеристикам к экспоненциальной ($\Delta\tau/t_{имп}^0 = 1,1e^{-0,8Ra}$). Здесь $t_{имп}^0$ – период акустического импульса при измерении изделия с эталонной поверхностью (эталон – поверхность с наименьшей величиной шероховатости, равной 2 мкм), $t_{имп}$ – период акустического импульса на исследуемых поверхностях с разными величинами шероховатости, $\Delta\tau = t_{имп} - t_{имп}^0$.

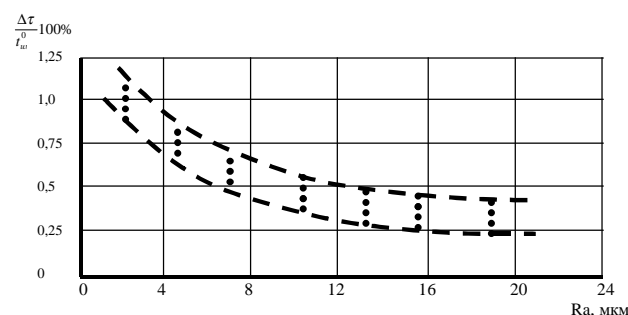


Рисунок 2. Зависимость изменения скорости распространения акустической поверхностной волны от шероховатости поверхности металла

Анализ результатов позволяет заключить, что для достижения наиболее точных и достоверных результатов разница в шероховатости различных контролируемых поверхностей (эталона и контролируемой поверхности) не должна превышать 3–4 мкм при шероховатости поверхности в пределах $10 \text{ мкм} < Ra < 20 \text{ мкм}$ и 2–3 мкм при шероховатости поверхности $Ra < 10 \text{ мкм}$.

Применение метода АУЗИ при оценке степени пластической деформации металла контролируемого изделия позволяет по изменению скорости распространения акустической поверхностной волны получать количе-

ственную характеристику изменения напряженно-деформированного состояния металла. При известном расстоянии между пьезопреобразователями и установленной частоте АУЗИ на контролируемом объекте значение скорости акустической поверхностной волны определяется по формуле:

$$C_R = S \cdot f, \quad (1)$$

где C_R – скорость акустической поверхностной волны, м/с;

S – фиксированное базовое расстояние между передающим и приемным пьезопреобразователями, м;

f – частота АУЗИ, с⁻¹;

Для определения зависимости изменения скорости распространения акустической поверхностной волны от изменения напряженно-деформированного состояния, происходящего при деформации металла, проведены исследования с растяжением плоских образцов из стали 20 толщиной 2 мм по ГОСТ 1497-84. Образцы нагружали на разрывной машине ИР 5057-50 со скоростью 0,5 мм/мин.

По результатам экспериментов получена зависимость ($\Delta\tau/t_{имп}^0$)=0,05ε изменения скорости распространения акустической поверхностной волны, относительно времени ее распространения в эталонном образце ($\Delta\tau/t_{имп}^0$) 100%, от степени деформации металла, которая приведена на рисунке 3. Здесь $t_{имп}^0$ – период акустического импульса в бездефектной зоне (эталон), $t_{имп}$ – период акустического импульса в зоне пластических деформаций, $\Delta\tau = t_{имп} - t_{имп}^0$.

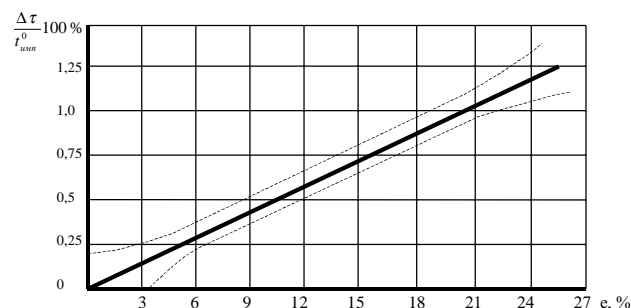


Рисунок 3. Зависимость изменения скорости распространения акустической поверхностной волны от величины пластической деформации металла

Замер частоты АУЗИ и удлинения образцов проводили после каждой ступени нагружения образцов с шагом 0,2 от предела текучести металла образца.

Изменение скорости распространения акустической поверхностной волны от величины пластической деформации металла имеет линейную зависимость при одном напряженном состоянии и может быть принято для оценки степени деформации металла конструкции.

Полученную зависимость скорости распространения акустической поверхностной волны от величины пластической деформации металла применили при исследовании вырезки из поврежденного в процессе эксплуатации трубопровода Ø 377x16 мм. На вырезке находился участок с механическим повреждением – вмя-

тиной. Глубина вмятины – 16 мм, продольная длина – 300 мм, поперечная длина – 280 мм (рисунок 4).

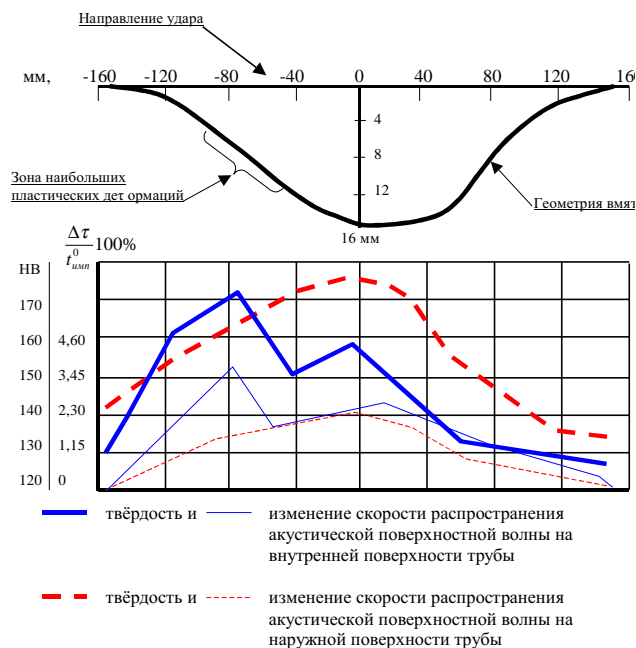


Рисунок 4. Сопоставление результатов измерений изменения скорости распространения акустической поверхностной волны на внутренней и наружной поверхности трубы и твердости по длине вмятины

Ультразвуковой контроль сплошности металла дефектного участка прибором USN-52 по ГОСТ 22727-88 недопустимых дефектов не выявил. Измеренная прибором DMS по ГОСТ 28702-90 толщина основного металла в дефектном участке колеблется в пределах 14,8...16,2 мм.

При измерении твердости деформированных участков вырезки твердомером фирмы «Krautkramer» разность между твердостью основного металла и дефектных участков достигала 50 ± 5 НВ (рисунок 4). Сопоставляя изменения твердости с результатами, полученными методом АУЗИ, установили, что характер зависимостей идентичен, при этом разброс в результатах, полученных методом АУЗИ, в 4 раза меньше, чем при измерении твердости.

При измерении скорости распространения акустических поверхностных волн разность значений между зоной наибольших пластических деформаций и основным металлом соответствует возможной потере пластичности металла до 50% (рисунки 3, 5).

Графически отображённое изменение твердости повторяет геометрию графика изменения скорости распространения акустических поверхностных волн, это свидетельствует о сопоставимости результатов с другими методами оценки величины пластического деформирования металла.

Практический интерес при эксплуатации конструкций представляет оценка изменения механических свойств металлов при накоплении повреждений, связанных с малоцикловою усталостью при пластической де-

формации /4/. В связи с этим нами были проведены экспериментальные исследования зависимости изменения скорости распространения акустических поверхностных волн от накопления повреждений в структуре металла при малоцикловою усталости.

Испытания на малоцикловою усталость проводили изгибом плоских образцов толщиной 2 мм из стали 20. Образцы гнули через оправку радиусом 16 мм на угол 150° согласно рекомендуемой ВСН 006-89 методике аттестации сварщиков. Затем образцы выпрямляли до плоского исходного состояния.

Величину пластических деформаций в растянутых волокнах образца определяли по формуле:

$$\epsilon_{пл} = (y/\rho) - (\sigma_b/E), \quad (2)$$

где $\epsilon_{пл}$ – пластическая деформация на поверхности образца, %;

y – расстояние от нейтрального слоя до внешних волокон, мм;

ρ – радиус кривизны нейтрального слоя, мм;

σ_b – предел прочности, МПа;

E – модуль упругости, МПа.

В соответствии с формулой 2 при каждом последующем изгибе упругопластическая деформация металла образца составила 5%.

В ходе проведения эксперимента была получена зависимость изменения скорости распространения акустической поверхностной волны от механических свойств металла в условиях деформирования плоского образца при повторно-статической нагрузке, представленная на рисунке 5. Зависимость представляет собой полиномиальную функцию

$$(\Delta \tau / \tau_0)_{имп} = a + bn + cn^2 + dn^3, \text{ где коэффициенты: } a=0,022; b=0,354; c=-0,043; d=0,002.$$

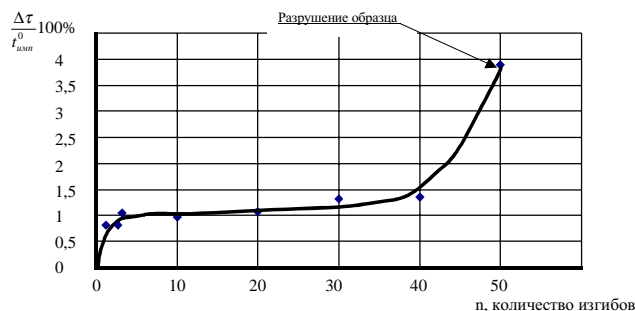


Рисунок 5. Зависимость изменения скорости распространения акустической поверхностной волны от количества изгибов образца

Как правило, большинство отказов нефтегазового оборудования обусловлено развитием дефектов металла в виде микротрещин. Преимуществом метода АУЗИ является его свойство интегрировать, накапливать эффект снижения скорости акустической поверхностной волны по мере распространения в поврежденном металле /4/.

При испытании образцов на растяжение и изгиб деформации возникают в одном направлении. Но в реальных условиях редко встречаются случаи, когда ме-

талл конструкции подвергается деформации только в одном направлении. При эксплуатации трубопроводов разрушение происходит по образующей в условиях двухосного напряженно-деформированного состояния.

На рисунке 6 приведена зависимость изменения скорости распространения акустических поверхностных волн от геометрии деформированной стенки трубы $\varnothing 720 \times 7$ мм в различных поперечных сечениях. Деформация стенки трубы с последующим разрушением вдоль образующей произошла в результате гидравлических испытаний.

Таким образом, получены зависимости изменения скорости распространения акустической поверхностной волны от изменений, происходящих в металле при различном напряженно-деформированном состоянии металла. Установлено, что скорость распространения акустических поверхностных волн обратно пропорциональна степени деформации металла при одноосном растяжении и изменяется по полиномиальной зависимости при малоцикловых нагрузках. Методы, основанные на определении разности скорости акустических поверхностных волн между металлом контролируемого изделия и металлом эталона, не дающие поправки на разность температур между ними, первоначально содержат ошибку, существенно влияющую на экспериментальные данные.

При рациональном применении метода АУЗИ с учетом всех факторов, влияющих на скорость акустической

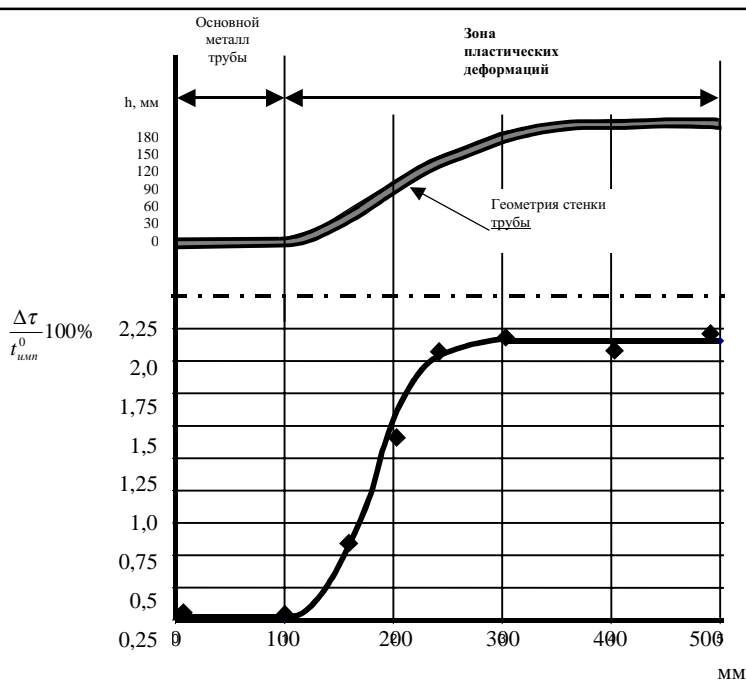


Рисунок 6. Изменение скорости распространения акустической поверхностной волны в дефектной зоне стенки трубы $\varnothing 720 \times 7$ мм.

поверхностной волны (шероховатость, температура, кризисна поверхности и т.д.), появляется возможность выявления стадии предразрушения металла конструкции, работающего в условиях плоского напряженно-деформированного состояния. Применение акустических поверхностных волн позволит проводить оперативный неразрушающий контроль изменения физико-механических свойств металла в процессе эксплуатации изделий.

Список использованной литературы:

1. Анисимов В.А., Бобренко В.М., Куценко А.М., Шереметиков А.С. Расчетные соотношения акустической тензометрии для поверхностных волн Рэлея, Дефектоскопия, 1993, №1, с. 59-64;
2. Лебедев А.А., Шарко А.В. Акустический контроль механических свойств стальных изделий поверхностными волнами Рэлея // Дефектоскопия, 1990, №10, с. 14-19;
3. Шарко А.В., Муравьев В.В., Каркешко Е.В. Ультразвуковой контроль механических свойств труб пароперегревателей тепловых электростанций // Дефектоскопия, 1991, №12, с. 10-17.
4. Родюшкин В.М. Об ультразвуковом методе выявления микротрещин // Дефектоскопия, 1999, №8, с. 54-58;