



Application of Subsurface Waves in Ultrasound Control of Materials and Installations

Nikolay P. RAZYGRAEV¹, Anton N. RAZYGRAEV¹, Mitko M. MIHOVSKI²,
Yordan N. MIRCHEV², Vasil Ts. NICHEV³, Pavel Hr. CHUKACHEV³

¹ CNIITMASH, Moscow, Russia

² Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
e-mails: mirchev@imbm.bas.bg, nntdd@abv.bg.

³ Bulgarian Society for Non-destructive Testing, Sofia, Bulgaria

Abstract

The article presents a comprehensive approach for describing the propagation of a subsurface wave and the waves accompanying its propagation, in the excitation and reception sensors, as well as in the controlled material. Some applications of subsurface waves in the development of new control methods, as well as in the control of products and welded joints are presented.

Keywords: subsurface waves, time of diffraction method, non-standard ultrasonic thickness equipment, control of welded joints

Приложение на подповърхностни вълни в ултразвуковия контрол на материали и изделия

Николай РАЗИГРАЕВ, Антон РАЗИГРАЕВ, Митко МИХОВСКИ,
Йордан МИРЧЕВ, Васил НИЧЕВ, Павел ЧУКАЧЕВ

1. Особенности на възбуждането, разпространението и приемането на подповърхностни вълни

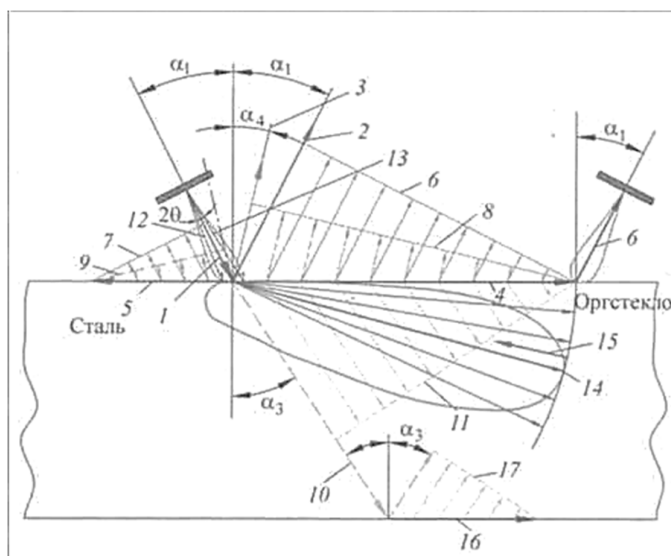
В периода 1972–75 години творчески колектив в състав В.Г. Щербински, И.Н. Ермолов и Н.П. Разыграев от НПО „ЦНИИТМАШ“ Москва установяват наличието на разпространяващи се под повърхността на материала вълни със скорост близка до тази на надлъжните вълни, които значително затихват с разстоянието от източника. Приемат тези вълни да се наричат „головные“ (челни), по аналогия с вълните, които се разпространяват при земетресение [1-3]. Наред с теоретичните и експериментални изследвания, колективът подготвя защита на изследванията си със серия от авторски свидетелства [4,5]. За реализацията им са разработени и съответните специализирани ъглови осезатели. По-късно в световната литература се появяват и термините пълзящи (creeping) вълни. Все още има дискусия за точното наименование. В България е приет термина подповърхностна вълна.

Проведените изследвания позволяват да се формулират следните свойства на тези вълни:

- оптимален ъгъл на възбуждане и приемане е първият критичен ъгъл на границата осезател – контролирана среда. При контакт на плексигласова призма на осезателя – стомана ъгълът е $27^{\circ}30'$;

- вълните се разпространяват на честоти 1–5 MHz на разстояние 200–300 mm, като затихват пропорционално на разстоянието от източника;
- на повърхността на материала при разпространение на вълната механичните напрежения са близки до нула;
- ъгълът, под който се разпространява вълната спрямо контролираната повърхност, е от порядъка на 12° ;
- оптималното възбуждане и приемане на вълните се постига с използване на два осезателя – излъчвач и приемач;
- ефективно специализираните осезатели работят при висока степен на отношението сигнал – шум в стомани при откриване на нецялостности на разстояние до 70 mm;
- амплитудата на регистриране на повърхностни нецялостности е пропорционална на отразяващата повърхност на нецялостностите.

Подповърхностната вълна е комплексна вълна, която се разпространява от излъчвателя в контролирания метал и достига до приемника. В този комплекс участват вълните, които са показани на фиг. 1.



Фиг.1. Вълни, участващи в подповърхностната вълна.

В процеса на излъчване:

1) Класическа надлъжна вълна в призмата на ъгловия осезател, насочена под първия критичен ъгъл към границата осезател – контролиран материал.

В процеса на възбуждане от надлъжната вълна:

- 2) Отражена надлъжна вълна в осезателя под първи критичен ъгъл;
- 3) Отражена, трансформирана под четвърти критичен ъгъл, класическа напречна вълна в осезателя;
- 4) Нееднородна надлъжна подповърхностна вълна, разпространяваща се в контролирания материал под ъгъл на пречупване 90° ;
- 5) Обратно насочена нееднородна надлъжна подповърхностна вълна с ъгъл на разпространение -90° ;
- 6) Странична надлъжна вълна, разпространяваща се в осезателя под първи критичен ъгъл, свързана с разпространение на вълна 4, като фронтът на вълната е свързан с фронта на вълни 2 и 4;

7) Обратна странична надлъжна вълна, разпространяваща се в осезателя от точката на възбуждане над първи критичен ъгъл, свързана с разпространение на вълна 5;

8) Странична напречна вълна, разпространяваща се в осезателя под четвърти критичен ъгъл, свързана с разпространение на вълна 4, като фронтът на вълната е свързан с фронта на вълна 3 и 4;

9) Обратна трансформирана странична напречна вълна, разпространяваща се в осезателя под четвърти критичен ъгъл, свързан с фронта на вълна 5;

10) Трансформирана вълна, разпространяваща се в материала под трети критичен ъгъл;

11) Напречната странична вълна, разпространяваща се в материала под трети критичен ъгъл, свързана с разпространение на вълна 4.

Описаните по-горе вълни (от 1 до 11) са в лъчево приближение. В реални условия излъчвания сноп надлъжни вълни под първи критичен ъгъл в осезателя има диаграма на насоченост с ъгъл на разпространение около 20° . В тези реални условия в процеса на излъчване на граничната повърхност съществуват следните вълни:

12) Надлъжни вълни с ъгъл на падане по-големи от първия критичен ъгъл;

13) Надлъжни вълни с ъгъл на падане по-малък от първия критичен ъгъл.

В процеса на възбуждане:

14) Надлъжните вълни 13 образуват в контролирания материал подповърхностна вълна 14 и в обратната посока при ехо метод вълна 15;

15) Надлъжната вълна 12 образуват нееднородни подповърхностни вълни, с които е свързан ефекта на огледално отражение.

В процеса на приемане:

Излъченият и преминал през контролираната среда импулс 1 на надлъжната вълна и нееднократна подповърхностна вълна 4 достига като странична надлъжна вълна 6 до пиезоелемента на осезателя – приемник, разположен под ъгъл на първия критичен ъгъл и се регистрира като информационен сигнал. Практически това е т.нар. подповърхностна вълна в лъчево приближение. В реални условия, когато се използва ултразвуков сигнал във вид на сноп от реален пиезоелемент на осезателя, то подповърхностната вълна се формира от вълни $(1 + 13) + (4 + 14) + (6 + 15)$ при протичане на процесите на възбуждане, разпространение и регистрация.

В нашите изследвания се използва възможността за регистриране на странични надлъжни вълни в осезателя при ъгли, близки до първия критичен ъгъл. Важно е и използването на други вълни от описаните по-горе, както това е показано в литературата.

Вълнови явления на дънната повърхност на контролираното изделие (фиг.1):

Разпространяващата се странична напречна вълна в контролирания материал е свързана с нееднородна подповърхностна вълна, която се разпространява под трети критичен ъгъл при падане на дънната повърхност. По-долу са представени вълните в контролирания материал:

16) Нееднородна подповърхностна вълна, аналогична на вълна 4;

17) Вълна 16 във всяка точка на долната повърхност възбужда странична напречна вълна, като се разпространява под трети критичен ъгъл.

Тези вълни създават клъстер от информационни сигнали и са сложни за анализ.

Под четвърти критичен ъгъл се разбира ъгъл, под който се разпространява в осезател напречна вълна в условията на съществуване на нееднородни подповърхностна вълна.

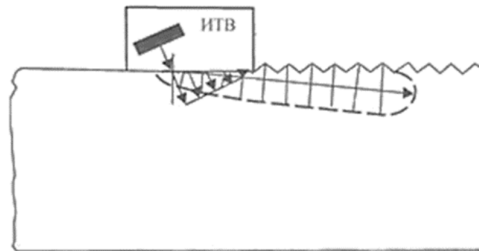
2. Приложение на подповърхностни вълни в практиката на ултразвуковия контрол.

2.1. Контрол на материали които имат общи контактни повърхности

Към този тип съединения се отнасят резбовите съединения.

Изследванията показват, че подповърхностната вълна се разпространява под ъгъл 37° в контролирания материал. Тази вълна е нечувствителна към неравностите на повърхността (грапавост, вълнистост). Реагира на нецялостности, които се намират в повърхностния слой и на нецялостности с излаз на повърхността. Амплитудата на вълната намалява с разстоянието r по закон r^{-1} .

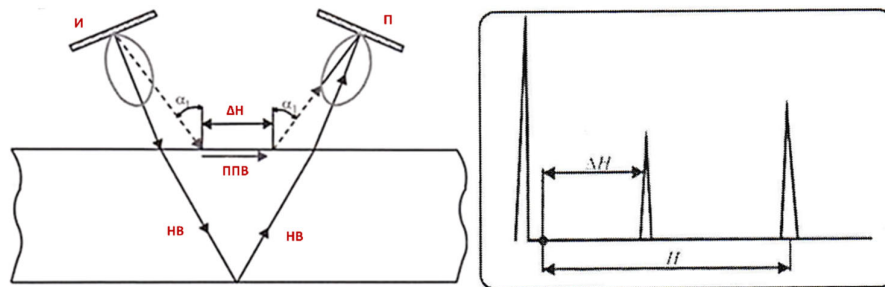
На фиг. 2 е представена една възможност за откриване на нецялостности при работата на резбово съединение. Вълната се разпространява под профила на резбата.



Фиг. 2 Разпространение на подповърхностна вълна в зоната под резбата, ИТВ – осезател за възбуждане на подповърхностна вълна

В този случай има наличие на промени в повърхността на изделието. Разпространението на подповърхностната вълна се променя в сравнение с гладка повърхност. При достигане до неравностите от повърхността подповърхностните и надлъжните повърхностни вълни се разпространяват под резбата. След достигане на първата неравност се образува обемна надлъжна вълна, с която може да се регистрират нецялостности в резбата под нея. Отсъствието на странична вълна позволява обемната вълна да се разпространява на по-голямо разстояние в сравнение с вълните, които се разпространяват при гладка повърхност. По-този начин се получава ефект на усилване. Сравняването на амплитудата на сигнали, получени от нецялостности под гладката повърхност и под резба, показва по-високи амплитуди за последните.

2.2. Използване на подповърхностна вълна при безконтактен ултразвуков контрол на дебелини.



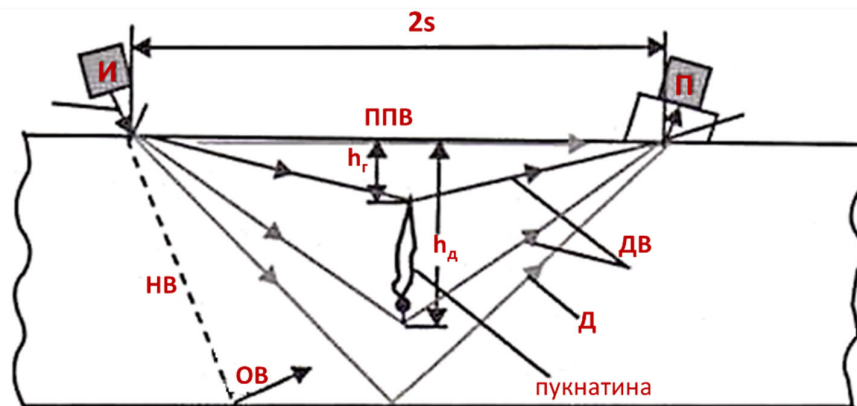
Фиг. 3 Възбуждане и разпространение на подповърхностни вълни за случая плексиглас – стомана

На фиг. 3 е дадена схемата на реализация на метода като са използвани следните означения: И – излъчвател, П – приемник, $2s$ – разстояние, изминато между осезателите от подповърхностната вълна, НВ – надлъжна вълна, преминала през контролирания материал, ППВ – подповърхностна вълна.

При този метод се предполага, че скоростта на разпространение на надлъжната вълна в контролирания материал е равна на скоростта на подповърхностната вълна.

Практически еталонната скорост на дебеломера се задава от разположени на определено разстояние осезатели. Ъгълът на падане и на приемане са равни на първия критичен ъгъл за подповърхностна вълна. Надлъжните вълни в стоманата се разпространяват в материали под ъгъл по-малък от първия критичен ъгъл.

2.3. Използване на подповърхностни вълни за реализиране на времево-дифракционен TOFD метод.



Фиг. 4 Реализация на времево-дифракционен метод:

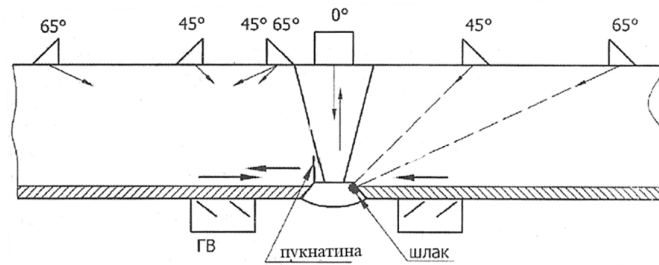
И – излъчвател, П – приемник, $2s$ – разстоянието между осезателите, ППВ – подповърхностна вълна, НВ – напречна вълна, ОВ – отразена вълна, ДВ – дифракционна вълна, Д – вълна, отразена от дънната повърхност, t_1 – време на разпространение на подповърхностни вълни, t_2 – време на разпространение на ДВ от горния край на пукнатината, t_3 – време на разпространение на ДВ от долния край на пукнатината, t_4 – време на разпространение на отразената от дънната повърхност вълна.

Схемата на метода е представена на фиг. 4.

От анализа на представените по-горе резултати се вижда, че основните идеи на използване на подповърхностни вълни, заложи в безеталонните дебеломери, са намерили своето приложение и при реализиране на TOFD метода.

2.4. Приложение на подповърхностни вълни при контрол на антикорозионни покрития в елементи на АЕЦ

Обектът на изследване са тръбопроводи от първи кръг на АЕЦ „Козлодуй“, които са изработени от стомана от перлитен клас с аустенитно покритие с дебелина 4–13 mm. Задачата на контрола на биметалните структури е регистриране на пукнатини в покритието и под него в перлитния материал. На фиг. 5 е показана областта на контрола, типичните нецялостности, възможностите за контрол с използване на нормални (0°), ъглови (45° , 65°) осезатели за контрол с използване на подповърхностни вълни.

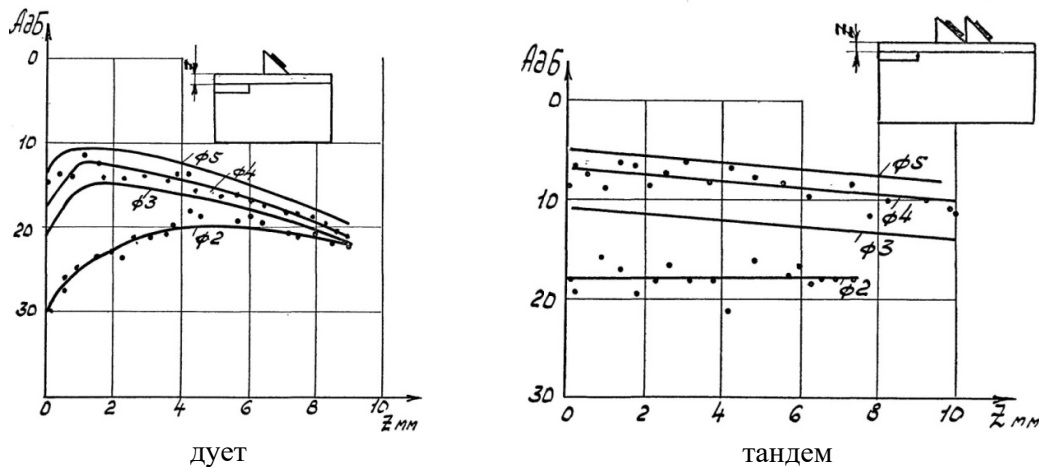


Фиг. 5 Заварени съединения от ГЦТДу850 с антикорозионно покритие и схеми на прозвучаване, от страна на покритието и от външната повърхност на тръбопровода.

Практическото използване на ъглови осезатели показва, че те не са достатъчно ефективни. Получаваните отразени сигнали от пукнатини са с малка амплитуда, сравнима с шумовете от сложните структури на съединението.

Апробирано бе използването на подповърхностни вълни, които се възбуждат с разработените в ЦНИИТМАШ – Москва осезатели ИЦ70 и ИЦ61 за работа на честота 1.8 MHz по схеми на прозвучаване дует и тандем.

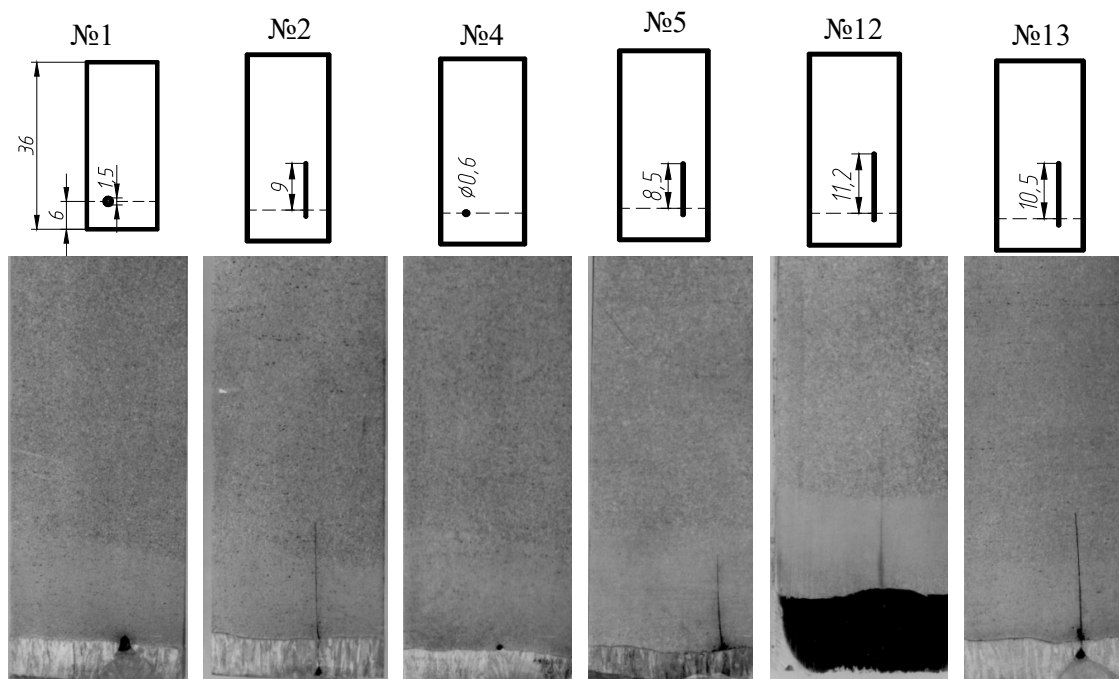
На специално подготвени сравнителни образци бяха подготвени различен тип АРД за различни дебелини на покритието. Тези зависимости са представени на фиг. 6.



Фиг. 6 Амплитудни зависимости на отразения сигнал на подповърхностни вълни за осезателя ИЦ70 и ИЦ61

За доказване на възможностите на подповърхностни вълни бе изработена специална плоча с покритие, в която бяха инициирани нецялостности под покритието в перлитния материал на основата. При контрола бяха регистрирани уверено подповърхностни вълни сигнали с амплитуда от 3 до 13 dB над нивото, при което бе настроена чувствителността на нецялостности тип плосък дисков отражател с диаметър 4 mm. Определена бе и отразяващата площ на нецялостностите.

На фиг. 7 са представени схеми и металографски сигнали, получени след подходяща проверка на областите с регистрирани нецялостности.



Фиг. 7 Форма и размери и ориентация на нецялостните

- 1-шлаково включване с ϕ 1.5 mm в зоната на усилване
- 2-пукнатина под покритието и шлак в покритието
- 4-шлак с диаметър 0.6 mm в зоната на усилване
- 5-пукнатина под покритието с височина 9 mm и шлак
- 12-пукнатина под покритието с височина 11.2 mm
- 13-пукнатина под покритието с височина 10.5 mm

В таблица 1 са дадени регистрирани амплитуди и отразяваща площ на нецялостности за всеки от регистрираните нецялостности. Амплитудата е дадена в dB, която надвишава стойностите при настройката на осезателя на плоскодънен дисков отражател с диаметър ϕ 4 mm

Таблица 1

| Нецялостност | Амплитуда в dB | Отразяваща площ, S, mm ² |
|--------------|----------------|-------------------------------------|
| 1 | + 3 | 9 |
| 2 | + 9 | 27 |
| 5 | + 13 | 50 |
| 12 | + 7 | 25 |
| 13 | + 13 | 50 |

Съвместен колектив от български и руски специалисти проверяват монтажа на оборудването на блок 5 и блок 6 в АЕЦ „Козлодуй“ по указаните по-горе нормативни документи. Открита е продължителна пукнатина с продължителност 600 mm и височина 2–8 mm, с амплитуда по-голяма от допустимата.

Отразената пукнатина след разкритие е ремонтирана и отново проверена. На останалите участъци нецялостности не са открити.

На основата на получените положителни резултати е разработена Методика за контрол на антикорозионни покрития и технологична инструкция „Ултразвукова дефектоскопия с подповърхностни вълни на заварени съединения на тръбопровод ТЦК Ду Т50 на ВВЕР-1000“.

При апробация на разработената методика в АЕЦ „Козлодуй“ е открита на заварено съединение на Ду 850 пукнатина с дължина 600 mm и с амплитуда под нивото на бракуване. Допълнителните изпитвания с използване на надлъжни вълни и ъглови осезатели от вътрешната страна на тръбопровода потвърждават наличие на тази пукнатина. След проверка тази пукнатина не е открита.

Методът е внедрен в практиката и ОК „Д и К“ на АЕЦ „Козлодуй“.

2.5. Приложение на подповърхностни вълни за оценка на механични напрежения в материали и конструкции.

В литературата има добре разработени методи за оценка на механични напрежения с използване на ултразвукови вълни (надлъжни, напречни, повърхностни) и сравнително малко данни за възможностите за използване на подповърхностни вълни [9].

В [6] е направен теоретичен анализ на разпространението на повърхностни и подповърхностни вълни и са получени зависимости за стойностите и затихването на подповърхностните вълни в материали с различни еластични модули.

Теоретичен модел на разпространение на подповърхностна вълна в среда с действащи механични напрежения е разгледана в работите [6-9].

В [7] е представен случая, в който се разглежда разпространението на подповърхностна вълна със скорост c_n в посока на приложените механични напрежения. Показана е следната зависимост

$$\rho_0 c_n^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1,$$

където ρ е плътността на материала, c_n е скоростта на подповърхностната вълна в посока l и преместване в посока l , λ , μ , ν , m и l са еластични модули съответно, от II и III порядък, $\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$, където α_1 , α_2 и α_3 са компоненти на главните деформации за едноосно напрегнато състояние. За едноосно напрегнато състояние $\alpha_1 = \varepsilon$, $\alpha_2 = \alpha_3 = -\nu \cdot \varepsilon$, където ν е коефициент на Поасон. Окончателно за скоростта на разпространение на подповърхностната вълна се получава

$$\rho_0 c_n^2 = \lambda + 2\mu + \left[4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu \left(1 + \frac{2\lambda}{\mu} \right) \right] \cdot \varepsilon$$

Относителната промяна на скоростта, при промяна на механичното напрежение, се представя със зависимостта

$$\frac{dc_n/c_n}{d\varepsilon} = 2 + \frac{(\mu+2m)+\nu\mu(1+2l/\lambda)}{\lambda+2\mu} = L_n,$$

където λ , μ , ν , m и l са, модули, съответно, от II и III порядък, ε – относителната деформация на материала, L_n – акустикоеластичен коефициент.

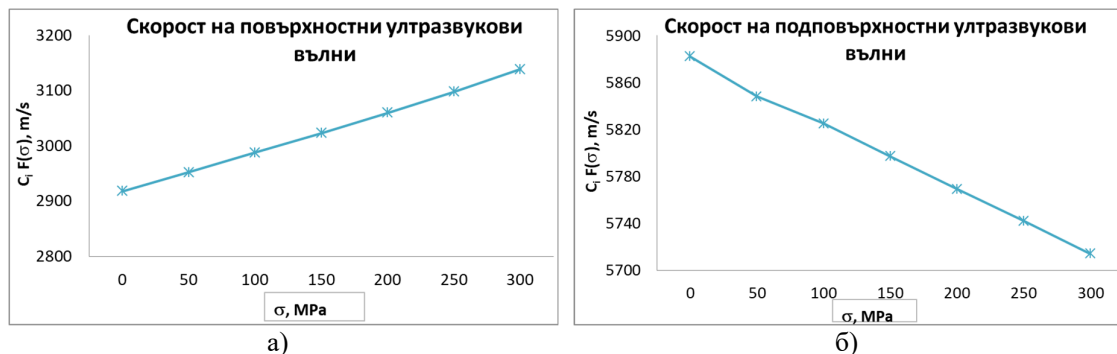
Промяната на механичното напрежение $d\sigma$ се представя със зависимостта

$$d\sigma = \frac{E(dc_n/c_n)}{L_n} = \frac{E}{L_n t_0} dt,$$

където E – модул на еластичност на материала, t_0 – време на разпространение на вълната при $\sigma = 0$, dt – промяна на времето на разпространение на вълната, свързано с промяна на механичното натоварване.

По-долу са приведени експериментални данни на зависимостта на скоростите на разпространение на повърхности C_1 подповърхностни вълни от действащи опънови напрежения, за стомана X52N PSL2/L360N. Експериментът е проведен при натоварване на изпитателна машина на образците до границата на пропорционалност на зависимостта $\sigma = F(\varepsilon)$ със стъпка при натоварване σ 50 МПа. Възбуждането на вълните се реализира с

използване на специализирани осезатели. Измерването е проведено по метода на пропускане. За измерване на времената за разпространение и промените на скоростите е използван измервателен комплект.



**Фиг. 8. Скорост на разпространяване на
а) повърхностна C_R и б) подповърхностна C_P ултразвукови вълни.**

Анализът показва, че промени $\Delta C_R/C_R$ и $\Delta C_P/C_P$ са от порядъка от 0 до 0.04, което налага повишени нива на отношенията на гарантиране на висока прецизност на влиянието на контакта, гарантира висока точност при позициониране на осезателите.

Основно предимство на метода с използване на подповърхностни вълни е възможността за изследване на механични напрежения в области под усилването на заваръчния шев.

Методът е апробиран при контрол на механични напрежения на газопровода „Балкански поток“.

Заклучение

Представен е целия клъстер от ултразвукови вълни, които се разпространяват в осезателя-излъчвател, осезателя-приемник, и в контролирания материал при разпространение на подповърхностна вълна. Дадена е оценка на някои основни приложения на подповърхностна вълна при разработване на метода за безеталонни дебеломерия и при време – дифракционния метод. Представен е пример за ефективно приложение на подповърхностни вълни при контрол на резбови съединения и при контрол на антикорозионна наплавка в елементи на АЕЦ. Показана е приложимостта на вълните при оценка на действащи механични напрежения в зоната под усилване на заваръчен шев.

Отбелязана е съвместната работа, с използване на подповърхностни вълни, на български и руски специалисти в АЕЦ „Козлодуй“.

Литература

1. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. О выявлении подповерхностных дефектов ультразвуковым методом / Труды VII Всесоюзной конференции «Не разрушающий контроль материалов изделий...». Киев, 1974.
2. Разыграев Н.П. Экспериментальные исследования продольных подповерхностных волн и применение их для обнаружения подповерхностных дефектов в деталях энергетических установок / Дисс. канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 1979.
3. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Отчет НИР «Исследование боковых ультразвуковых волн, с целью определения возможности контроля подповерхностного слоя деталей энергетических машин (поисковая)» Т-76. М.: ЦНИИТМАШ, 1975.

4. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Способ ультразвуковой дефектоскопии материалов / Авт. свид. № 502311 от 28.12.73. Бюл. изобр. № 5. 1976.
5. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Способ ультразвукового контроля качества материалов / Авт. свид. № 565249 от 20.05.74. Бюл. изобр. № 26. 1977. 8. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Исп
6. Юзонеле Л.В., Упругие поверхностно – продольные волны и их применение для неразрушающего контроля, Дефектоскопия, 1980, 8, 29-38.
7. Javadi Y., S.H.Mosteshary, Evaluation of Welding residual Stress in a Nickel Alloy Pressure Vessel using the Ultrasonic Stress Measurement Technique, Mat.Eval., June 2015, 862-868.
8. Джавади Я. М., М.А.Наджафабади, М.Ахлагли, Оценка остаточных напряжений в сварных соединениях из разнородных компонент с использованием моделирования методом конечных элементов и измерения головной ультразвуковой волной, Дефектоскопия № 9, 2012.
9. Неразрушающий контроль, справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В.Клюева, Том 4, Неразрушающий контроль, Москва, „Машиностроение“ 2004.