

ПРИЛОЖЕНИЕ НА УЛТРАЗВУКОВ ВРЕМЕ-ДИФРАКЦИОНЕН МЕТОД (TOFD) ВЪРХУ ОБЕКТИ ОТ СТОМАНА С ДЕБЕЛИНА НА СТЕНАТА ОТ 10mm

ULTRASONIC TOFD METHOD APPLICATION FOR STEEL COMPONENTS OF 10MM WALL THICKNESS

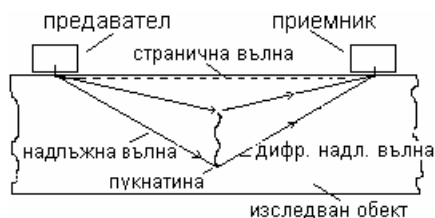
Радостин Касъров, ЛУКОЙЛ НЕФТОХИМ БУРГАС
Божана Табакова, ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

Abstract – Pressure Vessels inspection is carried out using complex of NDT techniques. A relatively recent technique ultrasonic NDT, is the Time-of-Flight Diffraction (TOFD) method as an effective method for detection and sizing of flaws. One of the way inspection heavy duty steel elements and welds is to use manual TOFD technique with longitudinal waves at refracted angles of 45 to 70 degrees. Typically inspections using this method have been on steel elements and welds varying from 15 mm to 300 mm wall thickness. In this paper is presented examples of using the TOFD techniques for 10mm wall thickness using USM 35XS and probes of 2,25MHz, 5MHz and 10MHz frequency.

KEYWORDS: ULTRASONIC TESTING, TOFD, PROBE FREQUENCY, LATERAL WAVE, LONGITUDINAL WAVE

1. ВЪВЕДЕНИЕ

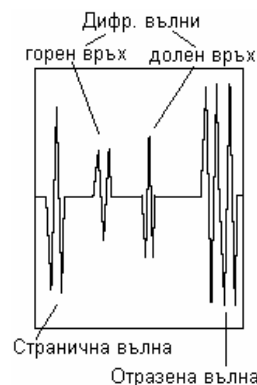
Нефтохимическото оборудване е сред най-отговорните и натоварени съоръжения с висока производствена цена, скъпа реконструкция и големи междуремонтни периоди. Изтичащите експлоатационни ресурси и високите изисквания за техническа безопасност, налагат по-чести инспекционни дейности с последваща оценка на реалното техническо състояние на това оборудване. Във връзка с необходимостта от точни и достоверни резултати, в световен мащаб усилено се разработват и прилагат нови методи за безразрушаващ контрол. Отчитайки научно-техническите постижения в “ЛУКОЙЛ НЕФТОХИМ БУРГАС”, през изминалите години непрекъснато са се извършвали изследвания, свързани с повишаване качеството на безразрушаващия контрол на нефтохимическото оборудване. Следствие от това са създадените методики и технологии с доказани положителни резултати. Продължават изследванията за приложение на съвременния и перспективен време-дифракционен метод (TOFD-Time of Flight Diffraction) в “ЛУКОЙЛ НЕФТОХИМ БУРГАС”, като част от актуалната задача за оценка на реалното техническо състояние на нефтохимическото оборудване [1]. Основното предимство на този метод е, че се основава на приемането на ултразвуковите вълни (еха), възникнали в резултат на дифракция от върховете на островърхи нецялостности (пукнатини, подрези и др.). При това измереното време на пристигане на отделните еха, независимо от тяхната амплитуда, дава по-точна представа за разположението и размерите на нецялостността в изследвания обект (фиг.1 и фиг.2).



Фиг. 1

Събраната информация до момента показва, че приложението на метода е все още ограничено поради липсата на достатъчно теория и експеримент, и най-вече при относително малки дебелини на изследваните обекти. От направения анализ на съществуващата литература и публикации става ясно, че са налице определени различия между подходите на отделните автори и експериментални екипи при решаване на задачи свързани с изследването на обекти с дебелини под 15mm.

Разчитането на сложната картина от еха, която се получава върху екрана на дефектоскопа в тези случаи, изисква дълбоко познаване на вълновите процеси и разработването на точен геометрично-вълнов модел. Статистиката показва, че методът се прилага най-вече при обекти с дебелини над 25mm, където липсата на експеримент и добра теоретична основа заедно с допълнителни субективни фактори влияят с по-малка степен на получените резултати. В края на 90 те години няколко фирми (Force Institute – Дания, Sonovation-Холандия и др.), базирайки се на собствения си опит започват да произвеждат в ограничени количества апаратура и приспособления като основния акцент е върху автоматизацията и последващата компютърна обработка на получените резултати. Това е и причината в публикациите, свързани с прилагането на TOFD метода да се наблюдава най-вече на икономическия ефект – резултат от по-краткото време за събиране на информацията за изследвания обект в сравнение с други безразрушаващи методи. Широко рекламираните предимства на метода не дават отговор на много въпроси, свързани с теорията и приложението му, което предизвиква продължаващия интерес, изразен и чрез постоянни дискусии в Интернет-пространството.

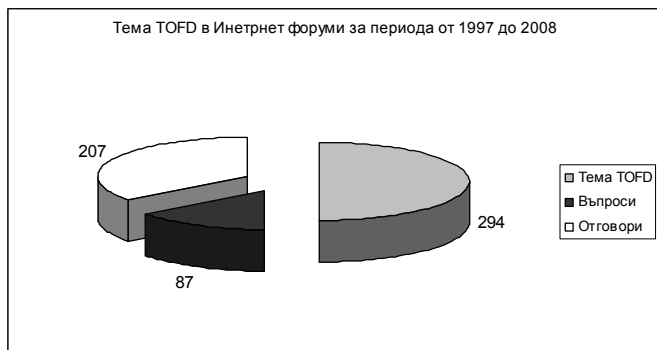


Фиг. 2

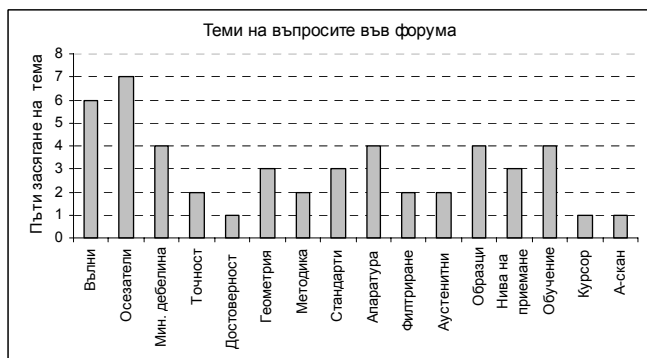
Така например в най-големия интернет-форум [5], свързан с Безразрушаващите изпитвания, темата “TOFD” е присъствала 294 пъти в периода от 1998г. до началото на 2008г., като са поставени 87 въпроса(фиг. 3). Съвсем общо може да се отбележи, че на същия брой въпроси са дадени 207 отговора, т.е. на някои от въпросите, касаещи конкретни проблеми е имало два и повече различни отговора. Най-често дискутираните теми са показани на фиг. 4. Те са свързани с вълновите процеси, избора на осезатели, минимални дебелини на изследваните обектите, геометричен модел, методики,

апаратура, образци за настройки и обучение. Ако се приеме, че последните девет теми (фиг. 4) са от чисто технически, практически и организационен характер, то съществуват и определени области в теорията и практиката на метода, в които ефекта от неговото прилагане не е напълно доказан. Издаваните през годините различни публикации и нормативни документи [6], [7], [8] очертават една обща рамка, като същевременно не се ангажират с универсалност при решаване на конкретните задачи. Това е и причината от 1997г. до настоящия момент да се разработват международни проекти, свързани с TOFD метода като резултатите от техните изследвания допълват информацията по неговото приложение. От анализа на познатата литература може да се направи извода, че основното приложение на TOFD метода е при дебелини на изследваните обекти между 25 и 250mm. Причина за това са все още нерешените или отчасти решени задачи относно пригодността по предназначение на метода при дебелини на изследваните обекти под 25mm. Факт е, че долната границата за приложение на метода за дебелина на изследвания обект от 12,5mm, определена в [6] се основава на известен натрупан опит, докато стойността от 6mm за същата граница в [7] и [8] не е доказана, а е приета по-скоро хипотетично. Това налага идеята да се потвърди или отхвърли пригодността по предназначение на метода при обекти с дебелина на стената под 12,5mm (които условно могат да бъдат приети за тънкостенни) като причините за това са следните:

- не е еднозначно определена и доказана минимална дебелина на изследвания обект, за която методът е приложим;
- не са изследвани достатъчно вълновите процеси, възникващи при тънкостенни обекти;
- не са определени еднозначно характеристиките на осезателите, необходими за изследване на тънкостенни обекти;
- липсва разработен пълен геометрично-вълнов модел на метода;
- не се използва допълнителната информация от регистрираните еха за допълване на характеристиката откриваемост;
- липсва методика за приложение на метода при обекти с минимална дебелина;



Фиг. 3



Фиг. 4

2. ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО И ЕКСПЕРИМЕНТ

2.1. Цел на изследването

Във връзка с описаните в изложението проблеми целта на настоящата работа е чрез експеримент да се получат нови резултати и допълнителна информация, с които да се докаже пригодността по предназначение на метода при тънкостенни обекти. Ако се приеме хипотезата, че методът е приложим при тънкостенни обекти, то най-важните характеристики в случая са неговата чувствителност и разделителна способност. Имайки в предвид, че при тези обекти възникващите вълнови процеси са със сложен характер, то под чувствителност би трябвало да се разбира не най-малката открита стойност, а тази която е пригодна за практическото приложение на метода. Тя може да бъде определена и като достоверност или вероятност за откриване. Втората важна характеристика, влияеща се от вълновите процеси в тънкостенните обекти е разделителната способност, при която сигналите, получени върху екрана на дефектоскопа, могат да бъдат отделени един от друг. За постигане целите на експеримента е необходимо да се осъществят т.н. слепи тестове, с които да се докажат описаните по-горе характеристики и се получи допълнителна информация относно:

- границата на приложение на TOFD метода, при която с достатъчна достоверност могат да се регистрират нецялостности в тънкостенни обекти;
- вероятността за откриване на нецялостности с различни дълбочини при същата граница на приложение;
- характеристиките на осезателите, като основен фактор, влияещ върху разделителната способност при същата граница на приложение;

2.2. Същност на метода и описание на експеримента

TOFD метода се осъществява с помощта на два еднакви ъглови осезателя за надлъжни или напречни вълни [2], [3], разположени по схемата, показана на фиг. 1.

За целите на експеримента в изследвания обем се излъчва ултразвукова надлъжна вълна от единичен осезател, която се трансформира в няколко типа вълни които се регистрират от приемника:

- Lat – странична вълна (в Русия определяна като главна вълна [4]);
- LL – отразена от дъното надлъжна вълна;
- LS – трансформирана от надлъжна в напречна вълна;
- SL – трансформирана от напречна в надлъжна вълна;
- S – директна напречна вълна;
- R – Релеева вълна;
- SS – отразена от дъното напречна вълна;

При наличието на плоскостна вертикално-ориентирана островърха нецялостност в обема на изследвания обект възникват дифракционни вълни, които се регистрират върху скалите X/Y на екрана на дефектоскопа (фиг.2). По скалата Y се измерва тяхната амплитудата, а по скалата X се изобразяват времената им на пристигане. Разликата във времето за приемане на тези еха по скалата X е еквивалентна на размера на нецялостността.

За доказване на основните характеристики като чувствителност и разделителна способност при определена дебелина на обекта, беше необходимо да се изследва зависимостта на получените резултати от диаграмата на насоченост на осезателя и дълбочината на съответния прорез. За целта бяха формирани диаграми на насоченост от осезатели с различни честоти върху образци с наличие или без наличие на нецялостности при един и същ геометрично-вълнов модел. Използваната при експеримента опитна постановка е показана на фиг.6. При нея двата осезателя са разположени върху повърхнината на изследвания образец чрез раздвижна стойка, така че прорезът

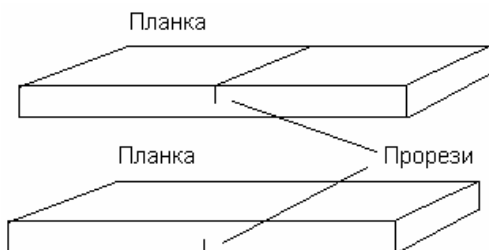
да се намира точно по средата между тях. Получените сигнали се регистрират от ултразвуковия дефектоскоп като данните се запаметяват от персонален компютър за последваща обработка чрез програмния софтуер за комуникация "ULTRA DOC" на фирма "Krautkramer". Разстоянието между акустичните центрове на осезателите е 38mm и отговаря на теоретично изчисленото за съответния геометрично-вълнов модел [10]. Последователно се извършиха експерименти с прорези, разположени откъм страната, противоположна на осезателите (дънна повърхнина) и с прорези разположени от страната на осезателите (фиг.7а и б).

В хода на експеримента се следеше зависимостта на получените сигнали в интервала между Lat и LL- вълна от дълбочината на съответния прорез. Анализира се картината на регистрираните сигнали след LL-вълната, като допълнителен информационен признак за наличие на прорез. От получените в експеримента резултати са направени конкретни изводи.

2.3. Използвани образци и апаратура

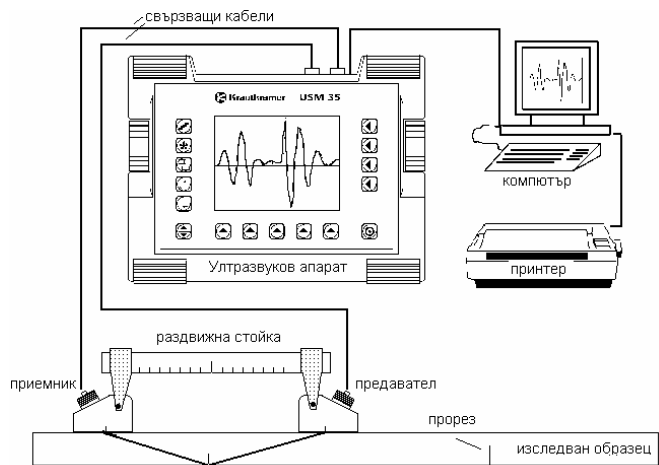
(а) Образци

За постигане на целите на експеримента бяха използвани сравнителни образци с изкуствени нецялостности, тъй като създаването на реални пукнатини с определени характеристики и доказването им е изключително труден, а в някои случаи и невъзможен процес. Образците представляваха плоскопаралелни пластини с дебелина 9,7-9,8mm от Ст 092Г2С, като в тях бяха изработени прорези с дълбочина $h = 1, 2, 4, 8\text{mm}$ и широчина 0,4mm (фиг.5) за имитатори на вертикално-ориентирана плоскостна нецялостност. Върховете на прорезите допълнително се обработиха, за да добият форма, близка до островърха. Образците бяха предварително подложени на ултразуково, радиографично и магнитно-прахово изследване.



Фиг. 5

Дебелината на образците близка до 10mm бе избрана от авторите като гранична върху база от предшестващи експерименти, в които се доказа, че при дебелини от 6, 7, 8 и 9mm сложните вълнови процеси, препятстват извличането на обективна информация с което се обезсмисля приложението на метода.



Фиг. 6

(б) Ултразвуков апарат

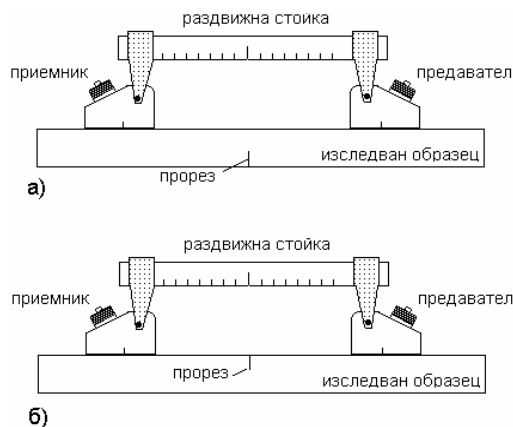
Експериментите се извършиха с универсален цифров ултразвуков дефектоскоп USM 35XS на фирма "Krautkramer" при честотни диапазони – 0,8 – 8 MHz и 2 – 20MHz, звукова скорост – 5920m/s, високо демпфиране и режим на изображение –RF;

(в) Ултразвукови осезатели

За формирането на различни диаграми на насоченост се използваха три двойки осезатели с еднакъв диаметър от 6mm, работещи на различни честоти - 2,25, 5MHz и 10MHz. Призмите от полистирен, въвеждаха надлъжните ултразвукови вълни в образците под ъгъл – 63° - 65° през контактна течност ZG на фирма "Krautkramer".

(г) Програмен продукт ULTRA 7 TOFD

Необходимостта от голям брой изчисления, анализиране и избор на оптимален геометрично-вълнов модел наложи използването на компютърната програма ULTRA 7 TOFD за предварителни разчети и последваща обработка на резултатите от експеримента [9].



Фиг. 7

2.4. Резултати

В хода на експеримента се установи, че резултатите, получени чрез двойката осезатели с честота 2,25MHz, са неудовлетворителни и не могат да послужат за решаване на конкретната задача. Формирането на широка диаграма на насоченост води до невъзможност за разделяне на сигналите от Lat и LL-вълните и неприложимост на метода при образци с дебелина на стената от 10mm при тази честота.

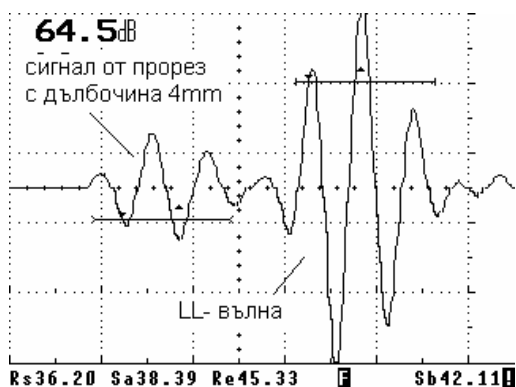
За формираните диаграми на насоченост от осезателите с честоти 5 и 10MHz се констатира, че прорез с дълбочина 1mm, не бе регистриран от апарата, за разлика от прореза с дълбочина 2mm, който не бе открит в интервала между Lat и LL-вълната само при позиция на осезателите, показана на фиг.7.б.

За всички останали прорези се регистрираха изменения на картината от сигнали в зависимост от тяхното местоположение спрямо осезателите (фиг.7.а. или фиг. 7.б.). Беше извършено измерване на местоположението на отделните сигнали по скалата X на дефектоскопа като получените резултати се обработваха със софтуера ULTRA 7 TOFD. На фиг. 8 са представени разликите между действителните дълбочини на прорезите и измерените стойности. От резултатите се вижда, че отчетените дълбочини при осезатели с честота 5MHz се приближават повече до действителните в сравнение с тези при честота 10MHz. Това е следствие от по-широката диаграма на насоченост, която формира по-добра чувствителност при същите осезатели. От друга страна, по-тясната диаграма на насоченост при честота 10MHz води до увеличаване на разделителната способност, но и до възникването на допълнителни смущаващи еха.

В хода на експеримента се установи, че прорез с дълбочина 4mm може да бъде регистриран и измерен (с грешка от около 1mm), ако е разположен откъм страната на осезателите при честота на осезателя от 5MHz. При това сигналът от него се припокрива с този от Lat-вълна (фиг.9).



Фиг.8

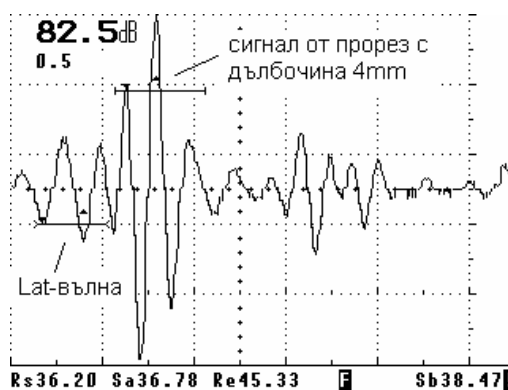


Фиг.9

При разположение на същия прорез, показано на фиг. 7.а., сигналът, получен от него, трудно може да бъде локализиран поради припокриването му от следващите го по време помощни сигнали. В този случай, увеличаване честотата на 10MHz води до значително по-добри резултати, показани на фиг.10.

Като качествен признак за наличието на прорези се анализираха и сигналите, получени по скалата X на дефектоскопа до 50mm след изминатия от Lat-вълна път. На фиг.11 е представено изчисленото чрез ULTRA 7 TOFD разположение на сигналите за обект с дебелина 9,7mm и ъгъл на осезателите 63-65°. Основа за това изчисление е геометрично-вълновия модел, според който вълните по скалата X се представят в следния ред - Lat-, LL-, SL-, LS-, S-, R- и SS . По ординатната ос (скала Y) на фиг.11 стойностите са постоянни, тъй като на предварително изчисление подлежи само времето за регистриране на отделните еха. На фиг. 12 до фиг.18 по скалата Y е представено и отчетеното в експеримента усилване на дефектоскопа. Целта е да се получи допълнителна информация относно амплитудите на регистрираните еха. Отчитането на стойностите по скалата X е извършено по фронта на сигнала при ниво 80% от скалата Y. На фиг. 12 и фиг.13 са представени експерименталните резултати, получени от образец с дебелина 9,7mm от Ст09Г2С без прорези за честотите 5MHz и 10MHz. Видима е разликата в броя и разположението на ехата между изчислените теоретично стойности (фиг.11) и експерименталните резултати (фиг.12 и фиг.13). Факт е, че в интервала между LL и SL вълна се регистрират и допълнителни вълни вследствие на трансформация. Факт е, че при честота 5 MHz, разликите между теоретичните стойности и получените в експеримента резултати се по-малки. Регистрираните вълни при осезатели с 10MHz, са значителни повече на брой като амплитудата им е средно 5-10dB по-ниска, което изисква по-високи възможности за филтриране и селекция от апаратурата. В допълнение към това се появява и смущаващо ехо в основния информационен интервал между Lat и LL-вълната.

На фиг. 14, 15, 16, 17 и 18 са показани част от експерименталните резултати, носещи допълнителна полезна информация върху разширената скала X на дефектоскопа при образци с наличие на прорези. Тези резултати ще бъдат подробно разгледани в следваща работа, като тук са показани като още една възможност за доказване на чувствителността на метода при тънкостенни обекти. На същите фигури се вижда, че в интервал от 50mm след Lat-вълна, регистрираният брой вълни пряко зависи от дълбочината на съответния прорез, разположението и диаграмата на насоченост на осезателите.



Фиг.10

Това потвърждава хипотезата, че при тази дебелина на образца теоретично могат да бъдат предвидени само част вълновите процеси, което доказано от експеримента не би трябвало да се приема като ограничение в приложимостта на метода за тази дебелина. Регистрираните от дефектоскопа сигнали при честота 5 и 10MHz са стабилни и възпроизводими, което може да послужи като база за сравнение при изследване на образци със същата дебелина за наличие на нецялостности.



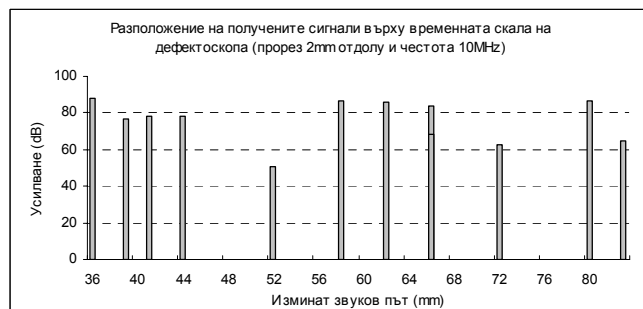
Фиг. 11



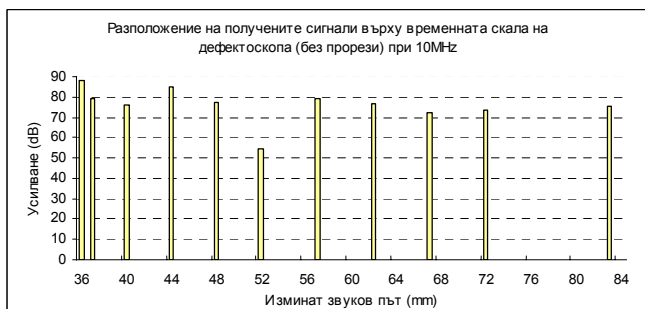
Фиг. 15



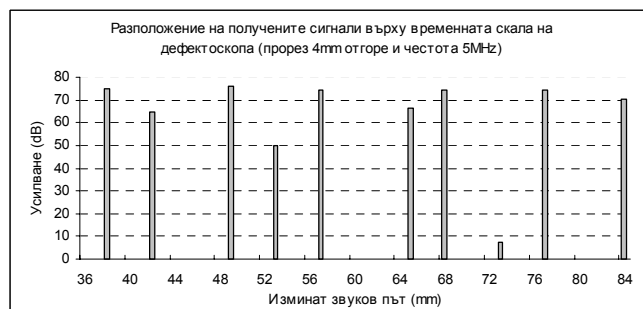
Фиг. 12



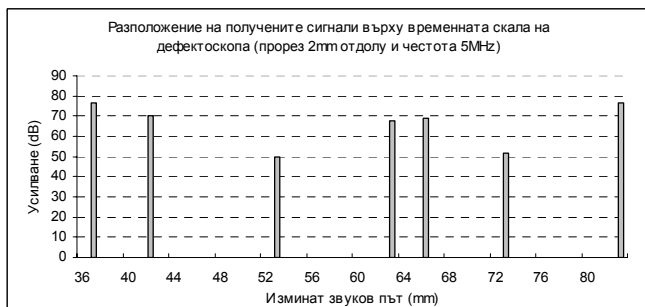
Фиг. 16



Фиг. 13



Фиг. 17



Фиг. 14



Фиг. 18

В хода на експеримента се доказва, че за изследване на обекти с дебелина 10mm е препоръчително да бъдат използвани осезатели с диаметър 6mm, ъгъл 60-70° и честоти 5 и 10MHz.

В заключение може да се приеме, че получените експериментални резултати допълват информационната картина и допринасят за успешно решаване на поставената в експеримента задача.

3. ИЗВОДИ

От получените в експеримента резултати могат да се направят следните изводи:

1. Доказана е пригодността по предназначение на метода при тънкостенни обекти за наличие на вертикално-ориентирани плоскостни нецялостности;
2. Определени са двете важни характеристики, определящи пригодността по предназначение на метода при тънкостенни обекти – чувствителност и разделителна способност;
3. Определени са характеристиките на осезателите, от които зависят чувствителността и разделителната способност;

4. В хода на експеримента се доказва, че за изследване на обекти с дебелина 10mm е препоръчително да бъдат използвани осезатели с диаметър 6mm, ъгъл 60-70° и честоти 5 и 10MHz. като получените резултати са по-близки до теоретичните при по-ниската честота.
5. Доказа се, че при осезатели с честота 10MHz се увеличава разделителната способност на метода, но същевременно се възбуждат допълнителни смущаващи еха;
6. Констатира се изместване на регистрираните сигнали към стойности по скалата X, по-малки от теоретично изчислените за осезатели с честотата 10MHz.
7. Доказа се, че за пригодността по предназначение на метода при тънкостенни обекти могат да бъдат използвани регистрираните след LL-вълната сигнали по скалата X;

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. К. Касъров, *Приложение на дифракционни вълни в ултразвуковия безразрушителен контрол на реактори в нефтохимическата промишленост*, сп. Акустика, год.6, бр.6, 2004 г.,София;
2. А. Х. Вopilкин. *Дифракционните вълни и тяхното приложение в ултразвуковия безразрушаващ контрол*. Дефектоскопия, 1985, No.1, 2;
3. М. В. Григорьев, В. В. Гребенников, А. К. Гурвич, С. В. Семерханов. *Ултразвуков метод за определяне на размерите на пукнатини*. Дефектоскопия, 1979, No.6.
4. Разыграев Н. П., *Некоторые особенности ультразвукового контроля головными волнами*, Дефектоскопия, 1982г, бр.6
5. NDT.net – *Forum – TOFD – discusion*.
6. ASME CODE Case 2235-9 *Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography*, Section I; Section VIII, Divisions 1 and 2; and Section XII
7. EN 583-6 (European standard), *TOFD as a method for defect detection and sizing* - January 1997.
8. CEN/TS 14751 (CEN Technical specification) *Use of TOFD for examination of welds* - November 2004.
9. Р. К. Касъров, *Софтуер за предварителна подготовка и оценка на резултатите от приложение на TOFD метода*. сп. Акустика, год.9, бр.9, 2007 г.,София;
10. Р. К. Касъров, *Геометрично-вълнов модел на TOFD метода*. Акустика - Варна 2005г;
11. Shyamal Mondal, Dr. T. Sattar, *An overview TOFD method and its Mathematical Model*, NDtnet, April 2000, Vol. 5, No. 4.