

Application of Time-Of-Flight Diffraction for Weld Inspections

A „Time-Of-Flight Diffraction” (TOFD) ultrahangos anyagvizsgálati módszer alkalmazása hegesztési varratok vizsgálatára

Michael Moles

Keywords: Time-Of-Flight Diffraction, TOFD, defect size measurement

Kulcsszavak: Ultrahang nyaláb elhajlása, TOFD módszer, hibaméret mérése

Abstract

Time-Of-Flight Diffraction (TOFD) is becoming widely used for weld inspections in the petrochemical and other industries. This unique ultrasonic technique has big advantages in speed, detection of midwall defects and is the most accurate defect sizing technique in general use. However, TOFD images require skilled interpretation, and TOFD has significant dead zones on the outside and inside surfaces. In general, it is most reliable in conjunction with standard pulse echo techniques. This presentation will describe the TOFD technique, its advantages and limitations, and give some examples. The latest news on TOFD codes, guidelines and interpretation manuals will be provided.

Introduction

TOFD (Time-Of-Flight Diffraction) was developed by the UKAEA Harwell (now AEA Technologies) in the late 1970's by Maurice Silk and associates [1]. Harwell developed an early automated ultrasonic system called Zipscan, which used signal averaging to improve the signal-to-noise ratio. TOFD came to the fore during the nuclear PISC II¹ and DDT² trials [2, 3], where it showed not only good detection (especially in the midwall regions), but also significantly better sizing than conventional UT (see Figure 1).

Since the early 1980's, TOFD has become standard practice in the nuclear industry. In the last few years, TOFD has also penetrated the petrochemical and other industries.

Olympus NDT

PISC II¹ Programs for Inspection of Steel Components

DDT² Program for Defect Detection Trials

JOURNAL Canada's National NDT Magazine, Vol. 27, 2006, No. 6. p. 6-13 megjelent publikáció Szerző által megküldött változata

Kivonat

A Time-Of-Flight Diffraction (TOFD) ultrahangos vizsgálati technika egyre szélesebb körben elterjedő módszer az olajiparban és más iparágakban. Ennek a különleges technikának a segítségével gyorsan és pontosan lehet a belső zónákban a hibákat kimutatni, illetve ezek méretét meghatározni. A TOFD képek értelmezése szakértelmet igényel, és a külső és belső felület közeli zónákban holttere van. Általánosságban elmondható, hogy a hagyományos impulzus-visszhang módszerrel együtt alkalmazva a vizsgálatok megbízhatóságát jelentősen javítja. Az alábbiakban ismertetjük a TOFD módszert, az előnyeit és korlátait, bemutatva néhány alkalmazási példát is. Ismertetjük a legfrissebb, a módszerhez kapcsolódó szabványokat és ajánlásokat, bemutatjuk a vizsgálatok által szolgáltatott adatok értelmezését.

Bevezetés

A TOFD technikát az UKAEA Harwell (jelenleg AEA Technologies) –nél dolgozó Maurice Silk és kollégái [1] kezdték kifejleszteni az 1970-es évek második felében. Megalkottak egy Zipscan névre keresztelt automata ultrahangos vizsgálóeszközt, amely a jelek amplitúdójának átlagolásával javította a jel/zaj viszonyát. A TOFD előretörésére a nukleáris iparhoz kapcsolódóan a PISC II és a DDT [2,3] próbálkozásai során került sor. Itt nemcsak a jó detektálási (különösen a vizsgált anyag középső tartományában), de a hagyományos ultrahangos technikáknál jobb reflektor-méret meghatározási képessége is megmutatkozott (1. ábra).

A 80-as évek elejétől kezdve a TOFD az atomenergia-ipar egyik standard módszerévé kezdett válni. Az utóbbi néhány évben a TOFD az olajiparban és egyéb iparágakba is betört.

What is TOFD?

Diffraction is a general phenomenon in ultrasonics, as normal in wave physics. The tips of internal defects will diffract an ultrasound beam; this diffracted beam can then be detected and the arrival time accurately measured. The "standard" TOFD set-up is shown in Figure 2.

TOFD normally uses a pitch-catch arrangement with the probes symmetrically spaced across the weld. The wedges are angled to generate wide-angle, longitudinal waves (or L-waves), since these arrive first and don't confuse the interpretation. (Shear waves are also generated, and can be viewed if required by extending the gate). Four types of signals are detected:

Mi is a TOFD?

A diffrakció (elhajlás) jelensége az ultrahang technikában ugyanaz, mint a hullám fizikában. Az anyag belsejében elhelyezkedő hiba csúcsain elhajlanak ultrahang hullámok, melyet aztán a vevő fejjel érzékeltünk, pontosan megmérjük a futási időt. A 2. ábra mutatja egy szokásos TOFD vizsgálat elrendezését.

Normál esetben a TOFD vizsgálat a varrat két oldalán szimmetrikusan elhelyezkedő adó-vevő fejpárból áll. Az előtét-plexik kialakítása olyan, hogy a besugárzás széles szögtartományban, longitudinális hullámokkal történjen. A longitudinális (L) hullám a transzverzális (T) hullámnál nagyobb sebessége folytán elsőként érkezik meg a vevőre, és így az nem zavarja a kiértékelést (a T hullámok szintén jelen vannak, detektálásukhoz a futásidő-kaput növelni kell). A vizsgálat során négyféle hullámtípust detektálunk:

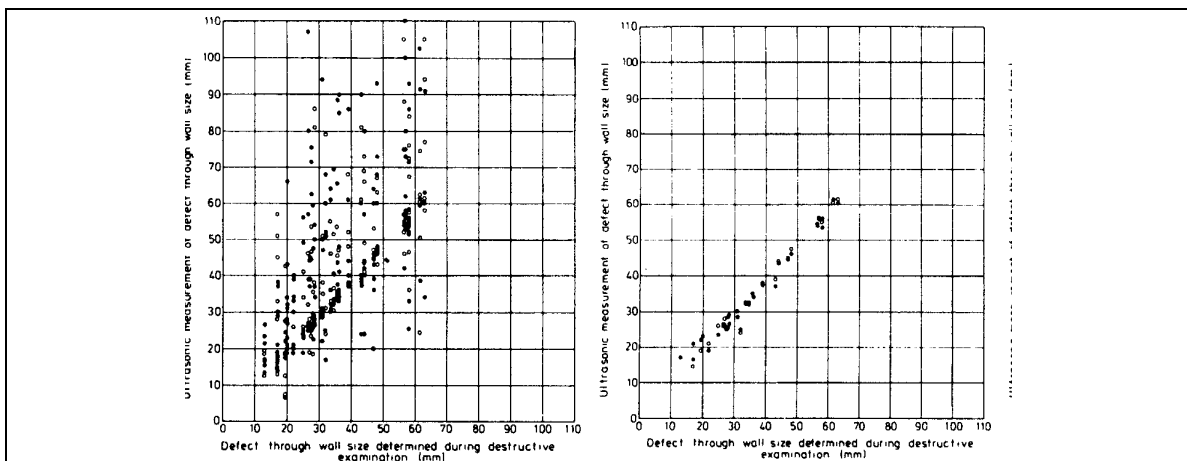


Figure 1: Left, defect sizing in DDT Trial plate 1 using all UT techniques; right, defect sizing using TOFD alone

1. ábra. Hibaméret-meghatározás a DDT próbetestén többféle UT technika alkalmazásával (balra), és ugyanez csak TOFD vizsgálat eredményeivel (jobbra)

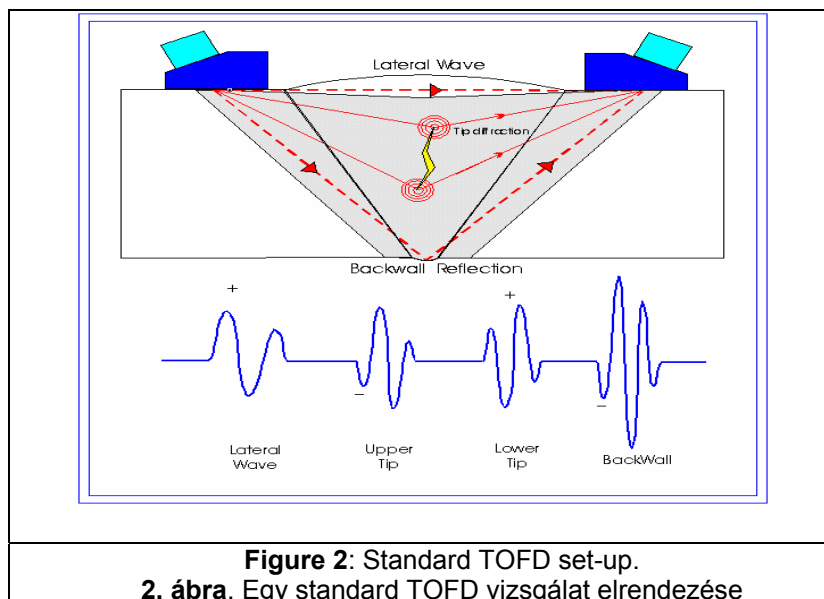


Figure 2: Standard TOFD set-up.
2. ábra. Egy standard TOFD vizsgálat elrendezése

- The **Lateral wave**: A sub-near-surface longitudinal wave generated from the wide beam of the transducer.
- The **Backwall reflection**: A longitudinal wave reflected from the back wall
- The **Reflected wave**: A longitudinal wave reflected by a lamellar planar defect
- The **Tip Diffracted wave**: A circular longitudinal (or L-wave) diffracted by the edge of a defect.

The lateral, backwall and tip-diffracted waves are visible in Figure 2.

Advantages of TOFD

TOFD is a very powerful technique, and allows:

1. Good midwall defect detection.
2. Accurate sizing of defects using the times of arrival of diffracted signals.
3. Defect detection even if defects are mis-oriented or located away from the weld centreline.
4. Rapid linear scanning (raster scanning not required)
5. Non-amplitude scanning and detection.
6. Set-up independent of weld configuration.

TOFD is very fast and economical; one transducer pair covers up to 50 mm (2") of wall thickness using high speed scanning. For thicker sections, more TOFD pairs are required. Alternatively, multiple TOFD transducer pairs can be used on sections less than 50 mm thick to provide increased Probability of Detection and/or improved defect positioning.

Limitations of TOFD

The limitations of TOFD can be summarized below:

1. Dead zone at top surface (OD).
2. Dead zone at bottom surface (ID).
3. Sensitive to very small defects with a risk of false calls if not combined with pulse echo.
4. Analysis can be difficult.
5. Specialist interpretation required.
6. Some sizing errors possible from lateral position of defect.
7. Low signal-to-noise ratio.

- **Felületi (laterális) hullám**: Közvetlen a felszín alatt terjedő longitudinális hullám. A nagy szögteremtő besugárzás következményeként alakul ki.
- **Hátfal-jel**: A hátfalról visszaverődő longitudinális hullám.
- **Refleksiós jel**: Réteges vagy sík hibáról visszaverődő longitudinális hullám.
- **Elhajló jel**: Egy hiba csúcsáról elhajló koncentrikusan terjedő hullám.

Felületi, hátfal, és a hiba csúcsán elhajló jelek a 2. ábrán láthatóak.

A TOFD előnyei

A TOFD technika hatékony az alábbiakban:

Az anyag közepén lévő hibák kimutatása. Az elhajló jelek futásidő-különbségéből a reflektorok pontos méret-meghatározásához.

Detektálni még varrat hosszengelyétől eltérő orientációjú, vagy a varraton kívül eső hibákat is.

Gyors lineáris szkennelés (raszteres szkennelés nem szükséges).

A visszhang-amplitúdótól függetlenül kimutatni és jellemezni a hibákat.

A hegesztési varrat konfigurációjától független a rendszer beállítása.

A TOFD gyors, gazdaságos vizsgálati módszer. Egy vizsgálófej-páros akár 50 mm (2") falvastagságot is képes lefedni, nagy sebességű szkennelés mellett. Nagyobb falvastagságokhoz több TOFD vizsgálófej-pár alkalmazására van szükség. 50 mm-nél kisebb falvastagságnál több, különböző mélységi zónára konfigurált fejpár alkalmazása növeli a detektálás megbízhatóságát és/vagy javítja a lokalizálást.

A TOFD korlátai

A TOFD módszer korlátai az alábbiak szerint foglalható össze:

1. Holttér a külső felületi zónában
2. Holttér a belső felületnél zónában
3. Nagyon érzékeny a kisméretű hibákra, és téves detektálást eredményez, ha nem kombináljuk a hagyományos impulzus-visszhang módszerrel.
4. A jelek kiértékelése bonyolult,
5. Speciális interpretáció szükség.
6. A reflektorok oldal irányú elhelyezkedése miatt méret-meghatározási hibák adódhatnak.
7. Alacsony jel/zaj viszony.

The main TOFD limitation is the dead zones. TOFD has two dead zones (ID and OD) where defects are typically not detected. These two dead zones are located near the Lateral Wave and near the Backwall reflection. The depth of these two dead zones depends on the TOFD configuration, frequency and damping. For example, at 7.5 MHz, the lateral wave (OD) dead zone is around 3 mm, while the backwall (ID) dead zone is ~1 mm. Lower frequencies and less transducer damping will generate bigger dead zones, while higher frequencies and increased damping produce smaller dead zones. TOFD frequencies are normally a few MHz higher than pulse echo frequencies; for example, AUT on pipelines may use 7.5 MHz for (shear wave) pulse-echo, while 10 MHz can be used for (longitudinal wave) TOFD.

To get full 100 % coverage, TOFD should be combined with the Pulse Echo technique. Pulse-echo has high defect detection rates for surface-breaking and near surface defects, but is poor on midwall defect detection. Conveniently, TOFD and PE are complementary; the strong features of pulse-echo are the weak points of TOFD, and vice versa. Combined TOFD and pulse-echo are used for pipelines and general weld inspections, with the advantages of both.

Alternative Diffraction Set-ups

Diffraction is a general ultrasonic phenomenon, and occurs under much broader conditions than just longitudinal-longitudinal diffraction as used in standard TOFD. This paper only refers to standard TOFD set-ups, i.e. longitudinal-longitudinal diffraction using separated transducers on either side of the weld on a plate, pipe or curved vessel. Other possibilities include:

- Shear-shear diffraction
- Longitudinal-shear diffraction
- Single transducer diffraction (called "back diffraction" or the "tip echo method" in Japan)
- Twin transducer TOFD with both transducers on the same side of the defect/weld.
- Complex inspections, e.g. nozzles.

Typical Images

TOFD images look like vertical through-sections of the weld. The lateral wave is essentially the OD; the backwall is essentially the ID; and any defects show as tip diffracted signals between these two. Figure 3 shows a typical example.

A fő korlátozó tényezőt a holtterek jelentik. A TOFD-nél két helyen jelentkezik holttér. A külső-és belső felület-közeli zónákban. Az itt elhelyezkedő hibákat általában nem sikerül kimutatni. Ezek a tartományok a TOFD képen a felületi hullám és a hátfal-jel közelébe eső területek. Kiterjedésük függ a vizsgálófejek konfigurációjától, frekvenciájától és csillapításától. Például egy 7,5 MHz-es kristályú fejpáros esetén a felületi zóna holtterének mélysége 3 mm, még a hátfal-zóna holttere kb. 1 mm. Alacsonyabb frekvenciánál kisebb csillapítású vizsgálófejekkel nagyobb, magasabb frekvencia és növelt csillapítás mellett kisebb holtteret érhetünk el. A TOFD vizsgálófejek frekvenciája általában néhány MHz-zel magasabb, mint az impulzus-visszhang technikánál használtaké. Pl. ahol csővezetékek hagyományos vizsgálatánál 7,5 MHz T hullámú fejet használhatunk, ugyanott a TOFD vizsgálófejek 10MHz L hullámúak.

A vizsgálandó tartomány 100% lefedettségéhez a TOFD-t a hagyományos impulzus-visszhang módszerrel kell társítani. Az impulzus-visszhang technika erőssége a hátfal-közeli és arra kifutó repedések detektálása, de gyengébb a közbenső zóna vonatkozásában. Ennek okán a két módszer erőssége éppen kiegészíti egymást. És ezért gyakran alkalmazzák őket együttesen csővezetékek vizsgálatánál és általában varratvizsgálatoknál.

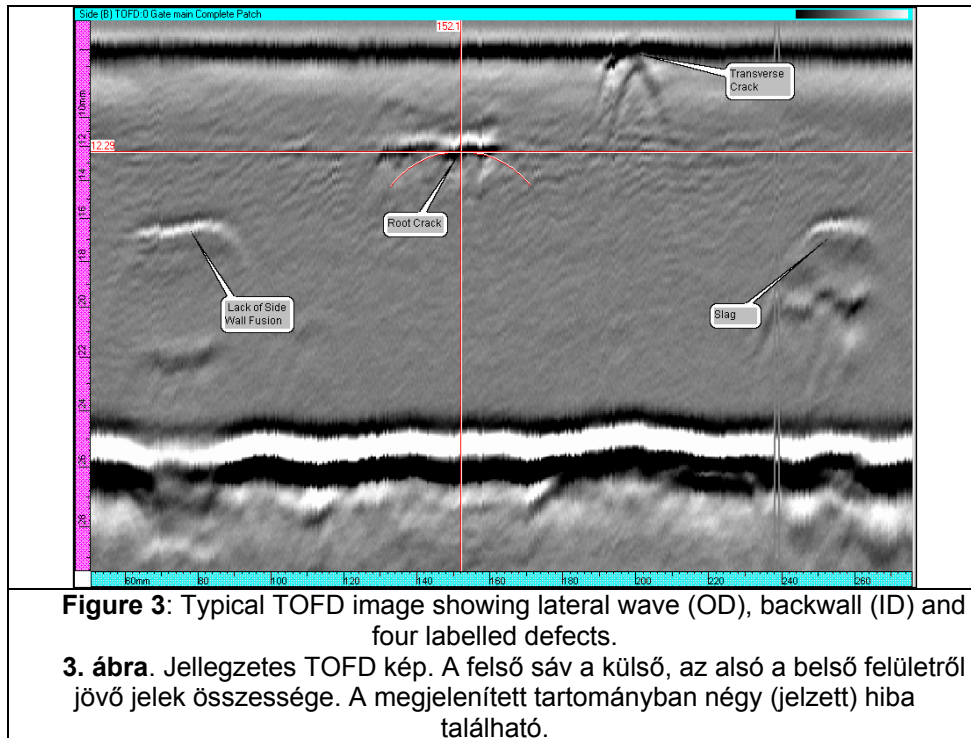
Alternatív beállítások elhajló hullámokra

A hanghullámok lehasadása általános ultrahangos jelenség, és nem korlátozódik csak a standard TOFD vizsgálatok longitudinális-longitudinális elhajló hullámaira. Ez az ismertető csak a standard TOFD konfigurációval foglalkozik, azaz a 2. ábra szerinti elrendezésben a L-L hullámok detektálására beállított TOFD vizsgálattal, csővezetékek és tartályok varratainál. Egyéb lehetőségek a TOFD alkalmazására:

- Transzverzális-transzverzális elhajló jelek detektálása
- Longitudinális-transzverzális elhajló jelek detektálása
- Egyedülálló vizsgálófej elhajló jelek detektálására („elhajló visszhang” vagy japánban „csúcsjel-módszer”-nek hívják)
- Páros TOFD vizsgálófejek alkalmazása, ahol is mindkét fej a hibahely/varrat azonos oldalán helyezkedik el
- Komplex vizsgálatok, pl. becsatlakozó csőcsonkoknál.

Jellegzetes TOFD képek

A TOFD képek a hegesztési varrat függőleges irányú szeletei egymás mellé sorakoztatva. A felületi hullám a külső felületet jelképezi, a hátfaljel a vizsgálófejek letapogatási felületével ellentétes belső felületet. Minden, e két jel közé eső indikáció egy elhajló jel. A 3. ábra egy jellegzetes TOFD képet mutat.



TOFD images always use grey scale presentations and full RF waveforms to capture the phase information. As shown in Figure 2, signals are identifiable by their phase. The OD and ID have a phase reversal, as do the top and bottom of defects.

Defect Depth Measurement

While defects can be detected by signals on the screen, or perturbations of the lateral and backwall, sizing is more complicated. If the defects are small (i.e. less than the ringing of the signal or ~3 mm), then it is not possible to detect the top and bottom signals. If the top and bottom diffracted signals can be reliably detected, then sizing requires cursors to measure the time of arrivals, and standard math formulae to calculate depth (see Figure 4). Figure 5 shows a standard approach for setting cursor positions for sizing.

A TOFD képek általában szürkeárnyaltos módon jelenítik meg a teljes RF hullámalakot. A hullámfázisra vonatkozó információt a sötétebb-világosabb árnyalatok hordozzák. Amint az a 2. ábrán látható, a hullámalakok fázisa is azonosítható, illetve a reflektorok csúcsai is azonosíthatóak a hullámok fázisa által. A felületi és a hátfaljel, valamint a hiba alsó-és felső csúcsának elhajló jelei is ellentétes fázisban vannak.

Hibamélység-mérés

Míg az anyagban lévő hibák jelenléte a képernyőn megjelenő hullámforma zavaraiból tisztán megállapítható, addig ezek kiterjedésének megállapítása már nehezebb feladat. Ha egy reflektor nagyon kicsi (az adóimpulzus lecsengési távolságánál kisebb ~ <3mm), nem vehető ki a felső és alsó csúcsáról elhajló jel. Ha ezeket el tudjuk különíteni egymástól, a köztük lévő távolságot, vagyis a futásidők különbségét a kurzorok segítségével mérni tudjuk, és egy egyszerű képlettel kiszámíthatjuk az adott hiba mélységét (4. ábra). Az 5. ábra egy sematikus vázlatja ennek a TOFD képen történő megvalósítására.

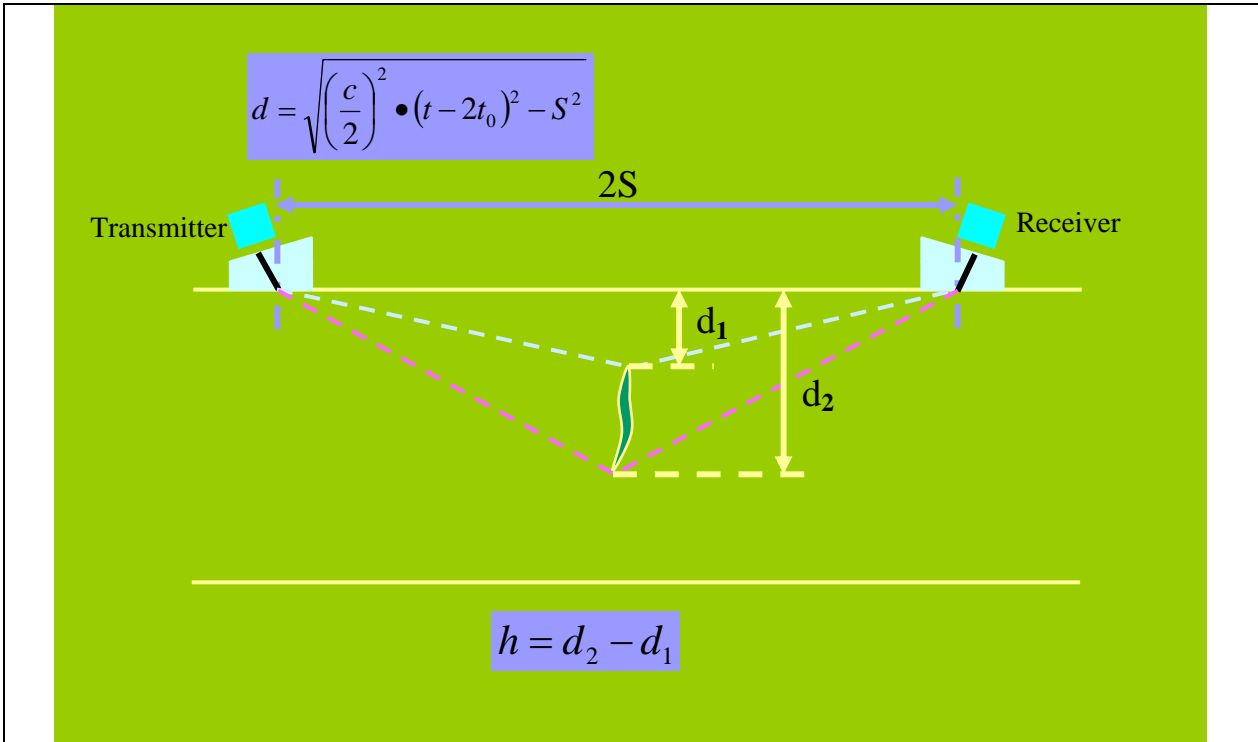


Figure 4: Standard geometric analysis of defects using TOFD
4. ábra. A hibamélység-meghatározás geometriai vázlatja

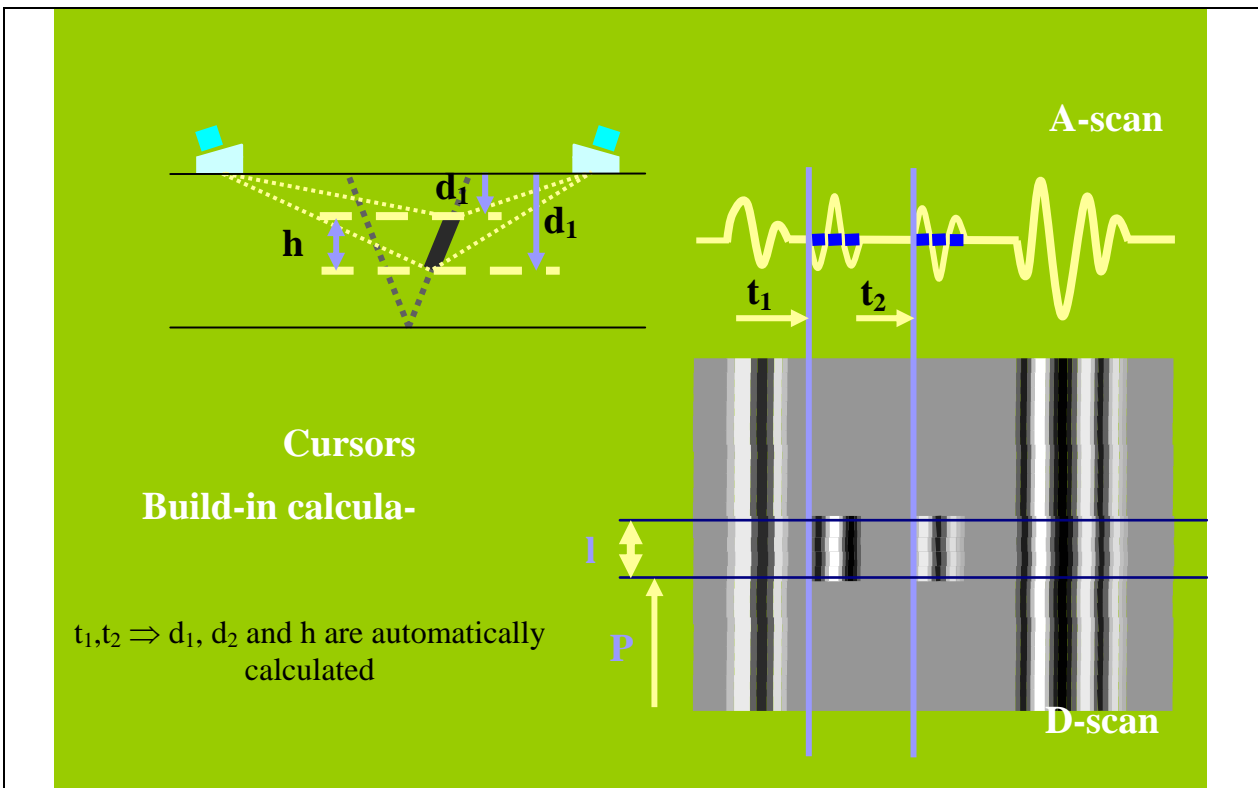


Figure 5: Cursor positions for defect analysis.
5. ábra. A kurzorok beállítása a hibamélység meghatározásához

Codes

At the time of writing, the ASTM TOFD ASTM E-2373-04 has been published.

ASME has a draft TOFD code, which is currently undergoing committee review.

There are two European "guides", BS7709 and EN583_6 [4, 5]. These are quasi-codes in the sense that they give considerable detail and direction, but are labelled "guides". Therefore, they do not have the force of law.

Lastly, ASME has approved a TOFD Interpretation Manual [6], Nonmandatory Appendix N. Many of the images shown here come from this Interpretation Manual.

Lack of suitable codes is one of the main limitations in the adoption of TOFD, and is being corrected. In practice, this means companies can specify TOFD, but typically cannot make legal decisions using TOFD.

To complicate this issue, ASME Code Case 2235 [7] permits TOFD, and gives acceptance criteria. This is the only AUT code in the world to date that implicitly accepts TOFD.

Some TOFD Examples

Inside Surface Breaking Defect:

This type of defect (see Figure 6) shows no interruption of the lateral wave, a signal near the backwall, and a related interruption or break of the backwall (depending on defect size). Defect depth can be measured using the formula above, or by using an OD-ID calibration technique.

Near Surface-Breaking Defect:

Near surface-breaking defects show perturbations in the lateral wave. The defect breaks the lateral wave, so TOFD can be used to determine if the defect is surface breaking or not. The lower signal can then be used to measure the defect depth. If the defect is not surface-breaking, i.e. just sub-surface, the lateral wave will not be broken. If the defect is near sub-surface and shallow (i.e. less than the ringing of the lateral wave or a few millimeters deep), then the defect will probably be invisible to TOFD. Fortunately, near sub-surface defects are usually reliably detected by pulse-echo.

The TOFD image in Figure 7 also shows a number of signals from point defects.

Szabványok

E cikk megírásának idején az ASTM TOFD ASTM E-2373-04 szabvány van érvényben.

Az ASME jelenleg egy TOFD szabvány vázlatot tartalmaz, mely éppen kodifikálási stádiumban van.

Két európai irányelv létezik, a BS7709 és az EN583-6 [4,5]. Ezek a kvázi-szabványok részletes útmutatást adnak a TOFD-vel kapcsolatban, de nem kötelező érvénnyel.

Az ASME elfogadott egy TOFD Interpretation Manual [6] iránymutató függelék (Nonmandatory Appendix N). Ebben a cikkben bemutatott ábrák is ebből a függelékből származnak.

A TOFD alkalmazásának egyik korlátja a megfelelő szabványok hiánya. Ezen hiányosság kiküszöbölése jelenleg is folyamatban van. Az anyagvizsgálattal foglalkozó cégek a TOFD ajánlásokat alkalmazzák, de jogi fennhatóság nélkül.

Jelenleg az egyetlen, általános érvénnyel, de nem hivatalosan elfogadott előírás az ASME 2235 [7] irányelve, melyet a világban a TOFD szabványaként elismernek.

TOFD példák

Belső felületre kifutó repedés

Ez a fajta hiba [6] a felületi hullám terjedését nem akadályozza. A hátfaljel folytonossága azonban a kérdéses helyen, a hiba hosszirányú kiterjedésével arányos szakaszon megszakad. Ekkor a hiba mélységét már a fent említett képlettel, vagy az anyagvastagságra való hitelesítéssel számíthatjuk.

Külső felületre kifutó repedés

Ez a hibatípus a felületi hullám terjedését gátolja. A TOFD képen látható a felületi hullám jelének megszakadása. Ez segít annak az eldöntésében, hogy a kérdéses repedés felületre kifutó repedés-e (ha a felületi hullám nem törik meg, és a repedés csak felület-közeli, de nem kifutó). A törési pontok közti hullámszakasz és a felületi hullám közti távolság arányos a repedés mélységével. Egy repedés, akár kifut a felületre, akár közvetlen a felszín alatt helyezkedik el, de kis mélységű (1-2 mm), akkor a TOFD jelek számára láthatatlan marad. Szerencsére az ilyen, felületközeli hibák a hagyományos ultrahangos technikával általában jól kimutathatóak.

A 7. ábrán egy ilyen fent vázolt hiba TOFD vizsgálata látható.

Midwall Defects:

Midwall defects show complete lateral and backwall signals, plus diffraction signals from the top and bottom of the defect (see Figure 8). The defect tip echoes give a very good profile of the actual defect, as many studies have shown. Defect sizes can be readily measured from these two signals. Note the phase inversion: top echo is white-black-white, while the lower echo is black-white-black.

Also note the hyperbolic curve easily visible at the left end of the top echo; this is similar to the effect from a point defect, and permits accurate length measurement of defects.

If the midwall defect is shallow, i.e. less than the transducer pulse ring-down (a few millimeters), the top and bottom signals cannot be separated. The TOFD B-scan will look like the interpass lack of fusion in Figure 15. When it is not possible to differentiate the top and bottom of the defect, the inspector can only say that the defect is less than the ring-down distance (which depends on frequency, damping etc.) Nonetheless, TOFD can definitively confirm the presence of the defect.

TOFD is very suitable for detecting and sizing midwall cracks, such as centerline cracking in long seam welds shown in Figure 9.

Lack of Root Penetration:

Lack of root penetration is similar to the inside surface breaking defect above. This defect gives a strong diffracted signal (or perhaps more correctly, a reflected signal) with a phase inversion from the backwall (see Figure 10). Note that whether signals are diffracted or reflected is not important for TOFD characterization: the analysis and sizing is the same. This root cracking and burnthrough can be sized using the same technique.

Concave root defects are similar to lack of root penetration (see Figure 11). The top of the defect is visible in the TOFD image, as well as the general shape. The backwall signal shows some perturbation as expected.

Sidewall Lack of Fusion:

The TOFD image of sidewall lack of fusion in Figure 12 is similar to the midwall defect above, with two differences. First, the defect is angled along the fusion line; TOFD is effectively independent of mis-orientation, so this is not a problem for TOFD. Second, the upper defect signal is partly buried in the lateral wave for this particular defect. In this instance, the upper tip signal is detectable since the lateral wave signal amplitude is noticeably increased. However, if this were not the case, then the inspector would be unable to accurately measure the defect depth.

Középső zónában elhelyezkedő hibák

Az anyag középső tartományában elhelyezkedő hibák esetén a felületi és a hátfal jelek sértetlenül megjelennek a képernyőn (8. ábra). Ezek a jelek nagyon jól kirajzolják a kérdéses hiba profilját. A mélységi méretét közvetlenül a csúcsokról elhajló jelek közti távolság mérésével megkapjuk. A felső csúcs mindig fehér-fekete-fehér, az alsó mindig fekete-fehér-fekete sávként rajzolódik ki.

A TOFD képen a repedés csúcсарól kapott (felső) sáv bal szélénél látható egy hiperbolikus görbe jellegű hullámsáv. Ez hasonló a pontszerű hibákról kapott indikációhoz, és lehetővé teszi a hiba hosszának pontos meghatározását.

Ha a belső hiba orientációja hasonlatos a 15. ábrán láthatóhoz, és/vagy mélység irányú kiterjedése kicsi (kisebb mint az ultrahangos impulzus lecsengésének hangútja, néhány mm), a felső és alsó csúcsokról jövő jelek nem különíthetők el egymástól. A TOFD kép ilyenkor összeolvadási hiány képét mutatja. A méretet ebben az esetben nem lehet meghatározni. Az értékelést végző személy ilyenkor azt tudja csak mondani, hogy a hiba kisebb, mint az adóimpulzus lecsengési távolsága (ami a frekvencia, csillapítás, stb. függvénye).

Az ilyen típusú (9. ábra) hosszú varratoknál a TOFD igen hatékony technika a belső zónában elhelyezkedő hibák detektálásához és méretének meghatározásához.

Gyök-összeolvadási hiány

A TOFD szempontjából ez a fajta hiba hasonló a fentebb említett belső felületre kifutó repedéshez. A hiányos gyök erős elhajló (vagy pontosabban fogalmazva visszaverődő) jelet kelt. Ennek a jelnek a fázisa ellentétes a hátfaljelhez képest (10. ábra). Hogy ez a jel elhajló, vagy visszaverődő, annak a TOFD jellemzés szempontjából nincs jelentősége, a vizsgálat és méret szempontjából az eredmény azonos.

A konkáv felületű gyökhibák (gyök-beszívódás) a gyök-összeolvadási hiánnyal hasonló képet adnak (11. ábra). A hiba csúcса és az általános képe megjelenik a TOFD képen. A hátfaljelen kisebb zavarok látszanak – amint az várható is.

Összeolvadási hiány az összeolvadási zónában

A varrat összeolvadási hiba (12. ábra) hasonló TOFD képet mutat a közepén elhelyezkedő hibákhoz két eltéréssel. Az első, hogy a hiba az alapfém hegesztési élkiképzésnek megfelelő orientációjú. E hiba ferde síkja a TOFD számára nem jelent akadályt. A második, hogy a hiba felső csúcсарól kapott jelrészlegesen beleolvadhat a felületi hullám jelébe, mint az ábrázolt esetben is. Ennél a példánál a felső hibacsúcs jele kivehető, mert a felületi hullám-jel amplitúdójára szuperponálódik, megnövelve azt. Ha nem így lenne, a kiértékelő nem lenne képes a hiba-mélység meghatározására.

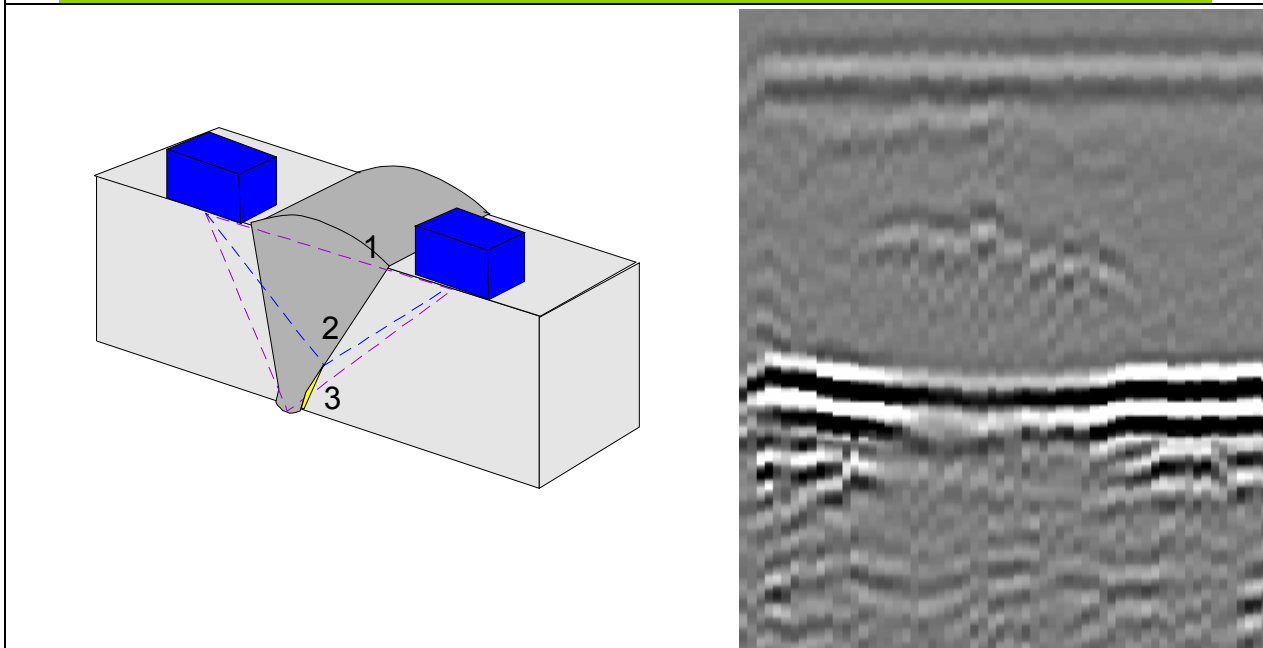
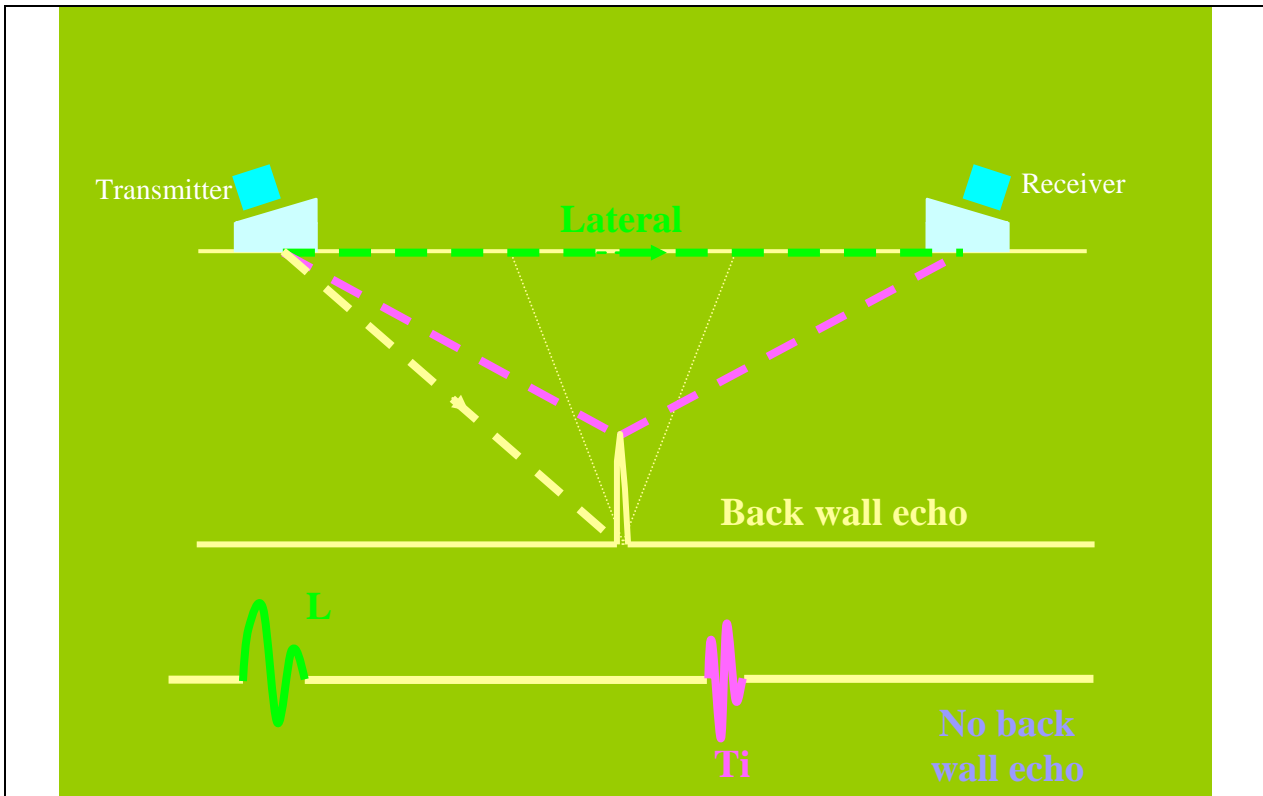
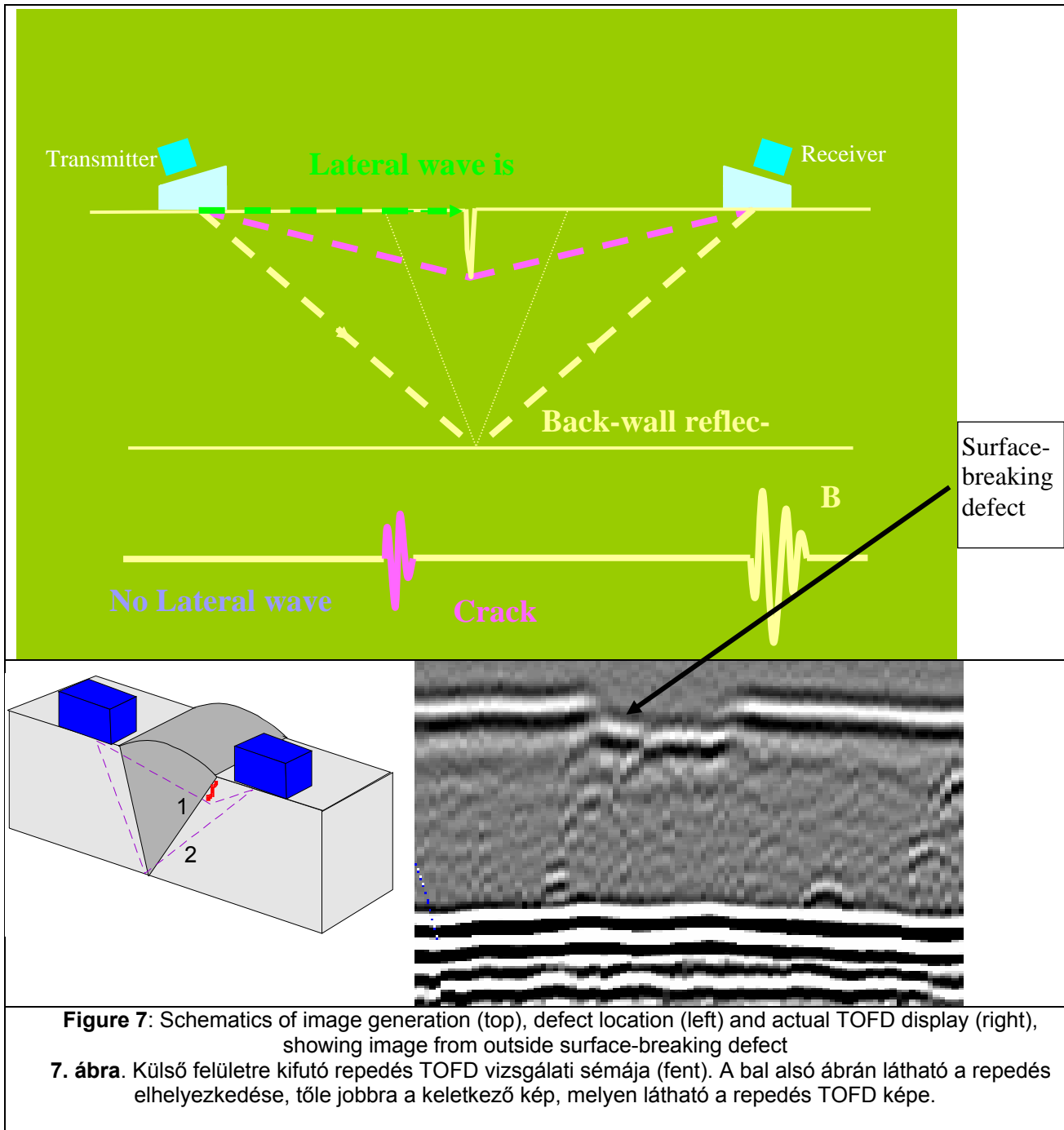


Figure 6: Schematics of image generation, defect location and actual TOFD display, showing image from inside surface-breaking defect.

6. ábra. A TOFD képalkotás vázlatja, és egy belső felületre kifutó hiba által okozott eltérés a TOFD képen.



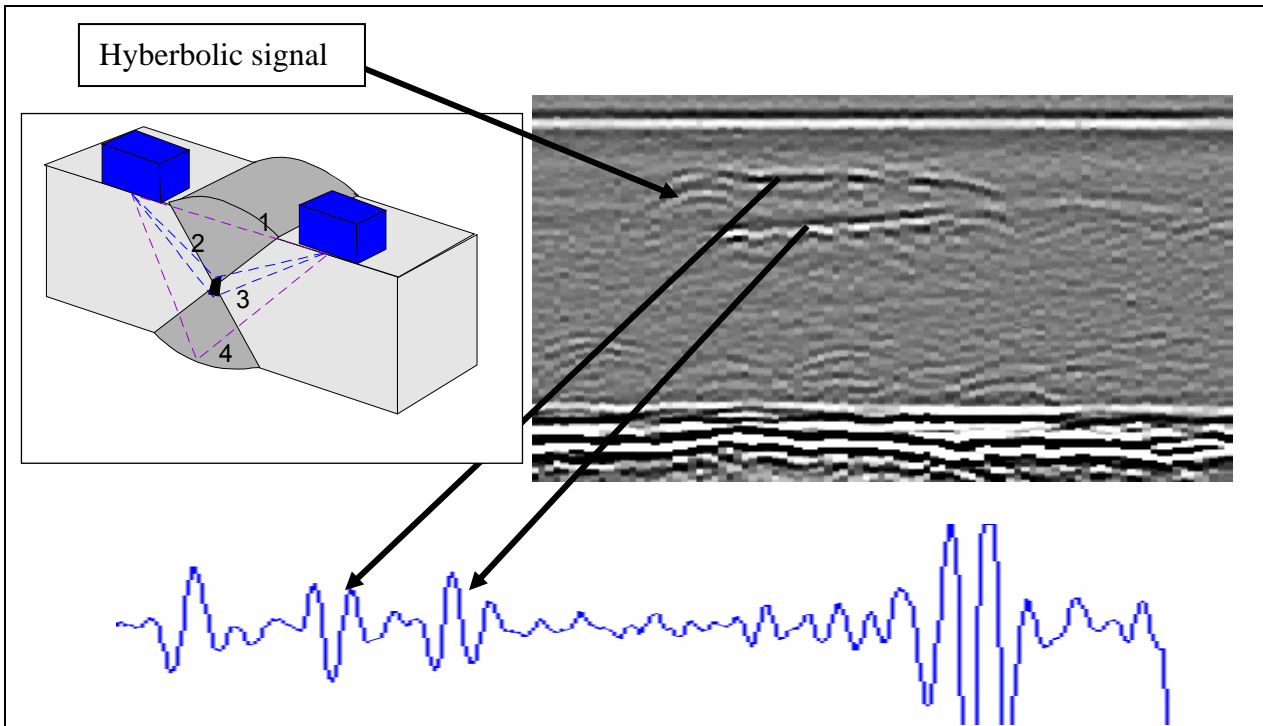


Figure 8: Schematics of defect location (left), signals and actual TOFD display (right), showing image from midwall defect and hyperbolic signal.

8. ábra. A hiba elhelyezkedése az X varrat gyökzónájában az anyag belsejében (balra), és annak TOFD képe (jobbra).

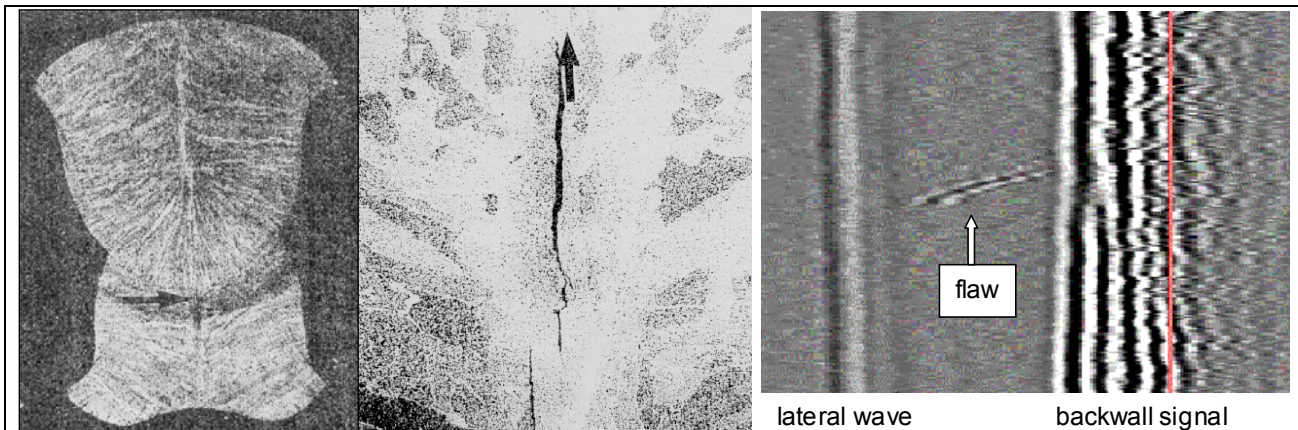


Figure 9: Metallographs and TOFD image from midwall defect.

9. ábra. Egy X varrat keresztmetszetének csiszolata és annak középső zónájában elhelyezkedő hiba TOFD képe.

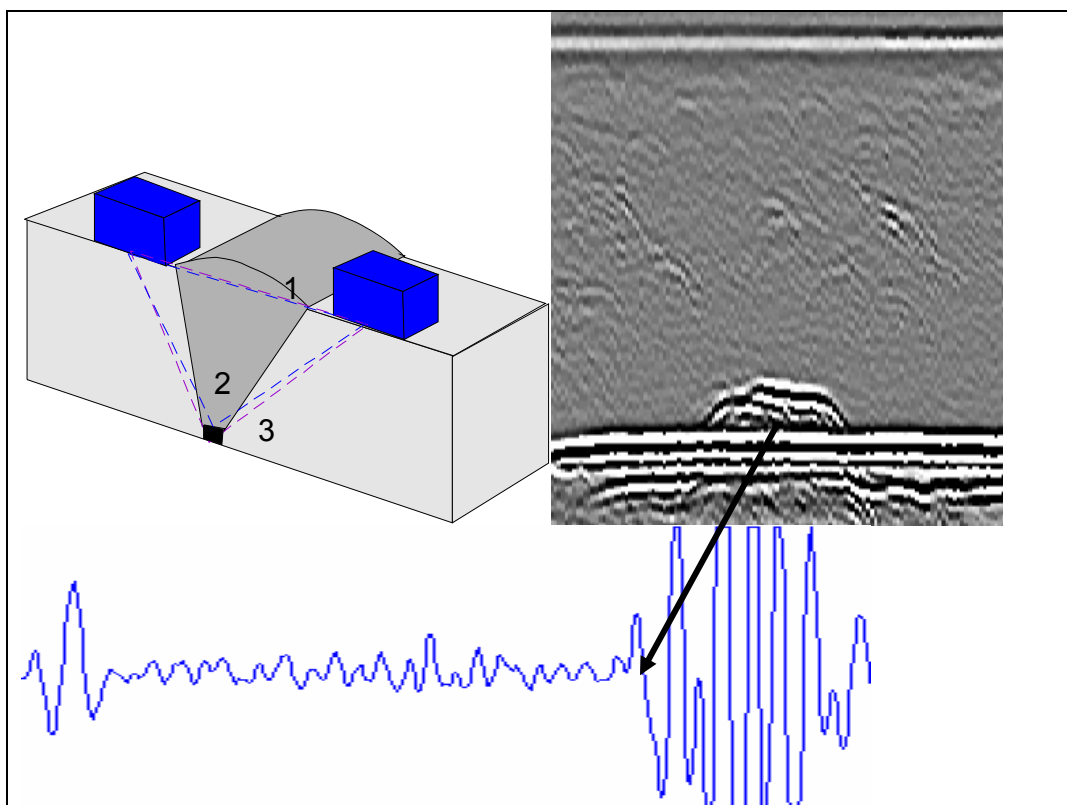


Figure 10: Defect location and TOFD scan of lack of root penetration.
10. ábra. Gyök-összeolvadási hiány elhelyezkedése az anyagban és annak TOFD képe.

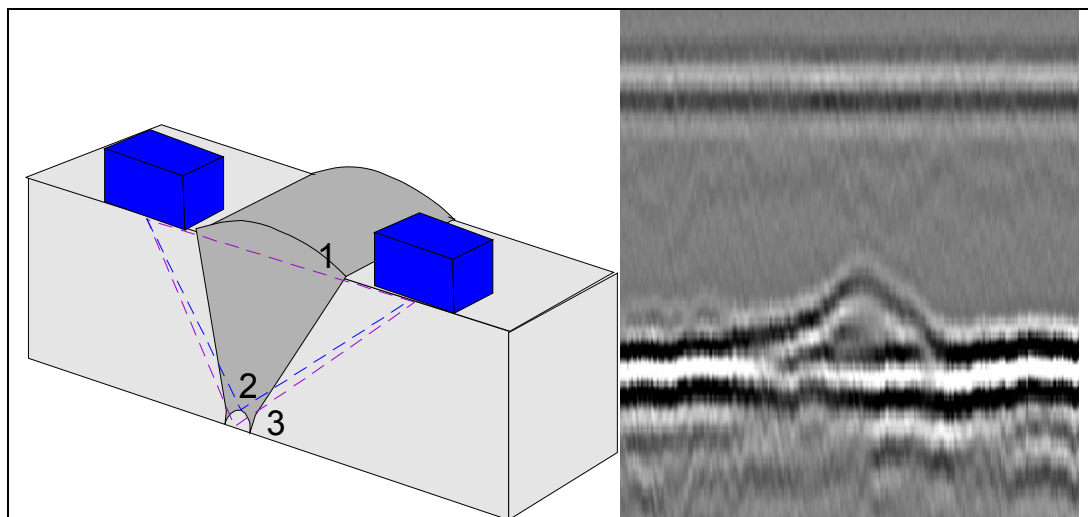


Figure 11: Defect location and TOFD image of concave root defect
11. ábra. Gyök beszívódás egy V varratnál és annak TOFD képe.

Porosity:

Porosity shows as a series of hyperbolic curves of varying amplitudes (see Figure 13), similar to point defects. The TOFD hyperbolic curves are superimposed since the porosity is close. This does not permit accurate analysis, but the unique nature of the image permits characterization of the signals as "multiple small point defects", i.e. porosity.

Transverse Cracks:

Transverse cracks are uncommon, and not detected by standard pulse-echo techniques using scanning parallel to the weld. (Transverse cracks can be detected using transverse imaging in pulse-echo.) The TOFD image in Figure 14 shows a known transverse crack, which is similar to a point defect in the image. The TOFD B-scan shows a typical hyperbola. Normally, it would not be possible to differentiate transverse cracks from near-surface porosity using TOFD; further inspection would be needed.

Interpass Lack of Fusion:

Interpass lack of fusion is essentially undetectable with shear wave pulse-echo since it is parallel to the surface. TOFD shows interpass lack of fusion as a single, high amplitude signal in the mid-wall region (see Figures 15 a and b). If there is length to the signal, it is easily differentiated from porosity or point defects. It is not possible to distinguish the top and bottom, as these don't exist as such. Note the expected phase change from the lateral wave. Interpass lack of fusion signals are typically strong.

Interpass lack of fusion is generally a benign defect. It can be readily detected by normal beam pulse echo if the weld crown is removed.

Typical Problems with TOFD Scans

As with all NDE techniques, "things can go wrong". The following is a sample list of problems.

- Incorrect gain levels (to high or too low)
- Incorrect gate positions
- Incorrect transducer separation
- Poor coupling
- Noise interference

Porozitás

A porozitás sorozatos hiperbolikus jellegű, változó amplitúdójú görbék formájában mutatkozik meg a TOFD képen (13. ábra), hasonlóan a pontszerű hibákhoz. A porózus anyag közelálló, kisméretű légbuborékainak jelei összeadódnak. Ez az egyes pontszerű hibák jellemezhetőséget rontja, de a porozitás jellegét egyértelművé teszi.

Keresztirányú hibák

A varrat hossz tengelyére (közel) merőleges síkban elhelyezkedő hibák nem igazán jellemzőek a hosszvarratokra. Hagyományos ultrahangos módszerrel, a varratra merőleges besugárzási irányú letapogatással nem is igazán lehet őket kimutatni. A 14. ábra TOFD képen látható az ábrázolt keresztirányú repedés tipikus megjelenési formája. Ez a pontszerű hibához hasonló karakterisztikát mutat hiperbolikus jellegű karakterisztikát mutat. E kép alapján nem lehet megkülönböztetni egy keresztirányú repedést és egy felületközeli porozitást. Ennek megállapításához további, kiegészítő vizsgálatok szükségesek.

Varratsorok közti összeolvadási hiány

Többsoros hegesztési eljárás esetén az egyes varratsorok közt a felülettel párhuzamos síkú összeolvadási hiány alakulhat ki. Ezt a jellegzetes hibát transzverzális hullámú impulzus-visszhang módszerrel nem tudjuk kimutatni. A TOFD képes erre. Ez a hibatípus jellegzetesen egy önálló, nagy amplitúdójú jelként jelentkezik a felületi-és hátfaljel közti tartományban (15. ábra). Ha enne a jelnek a hosszirányú kiterjedése elég nagy, akkor egyértelműen megkülönböztethető a porozitástól, vagy pontszerű hibától. A repedéscsúcsok nem különülnek el egymástól, mivel ezek vertikális irányban közel azonos helyen vannak. A képen megfigyelhető a felületi hullámmal ellentétes hullámfázis is.

Szerencsére ez a hibatípus nem annyira veszélyes, mint a felületre merőleges elhelyezkedésű hibák. Hagyományos, merőleges besugárzással történő impulzus-visszhang módszerrel jól kimutatható, ha a varratkoronát leköszörülték.

Jellegzetes TOFD szkennelési problémák

A többi ultrahangos módszerhez hasonlóan a TOFD szkennelésnél is előfordulhatnak nehézségek. Néhány fő dolog ezek közül:

- Nem megfelelő erősítés (túl kicsi vagy nagy)
- Rossz kapubeállítások
- Nem megfelelő vizsgálófej-szeparáció (az adó-és vevő vej közötti távolság)
- Rossz csatolás
- Erős zaj

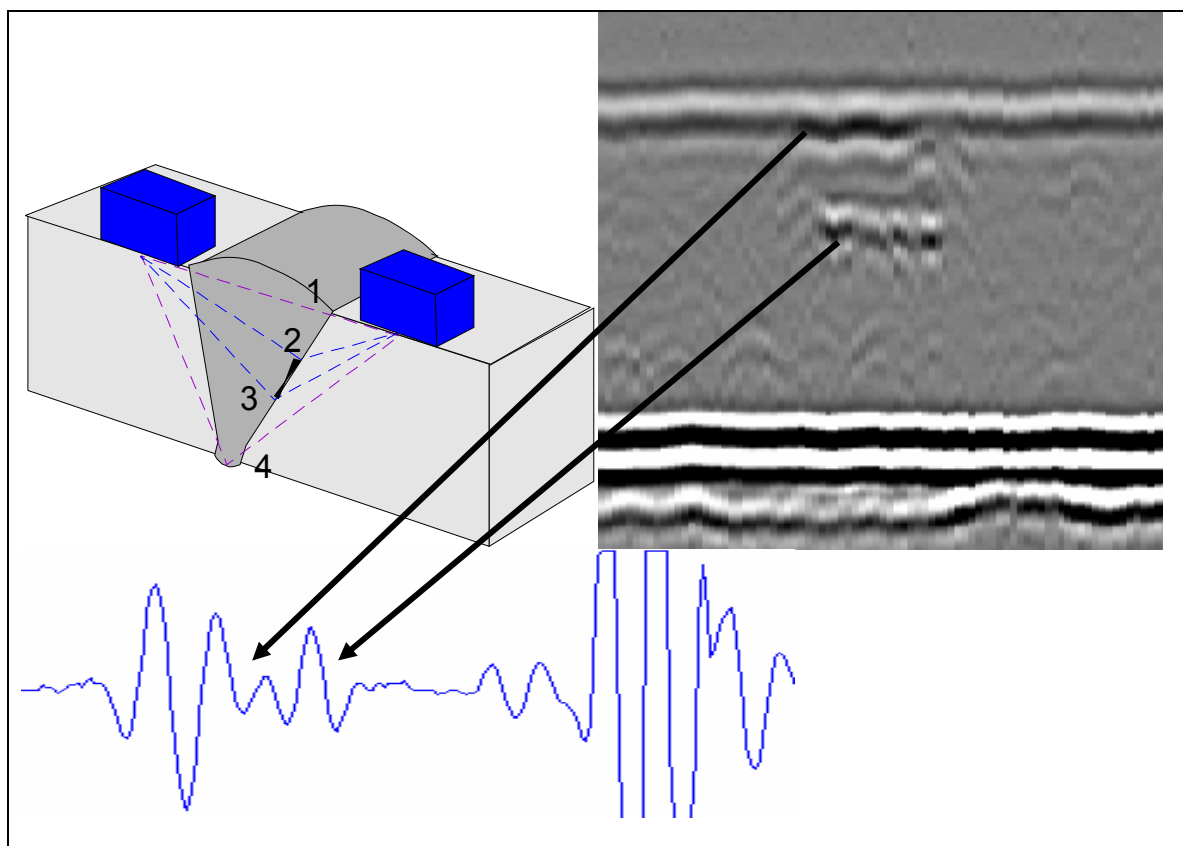


Figure 12: Midwall lack of fusion defect, showing defect location and TOFD image
12. ábra. Az összeolvadási hiány elhelyezkedése az alapfém és a varratanyag között a falvastagság középső tartományában, és ennek TOFD képe.

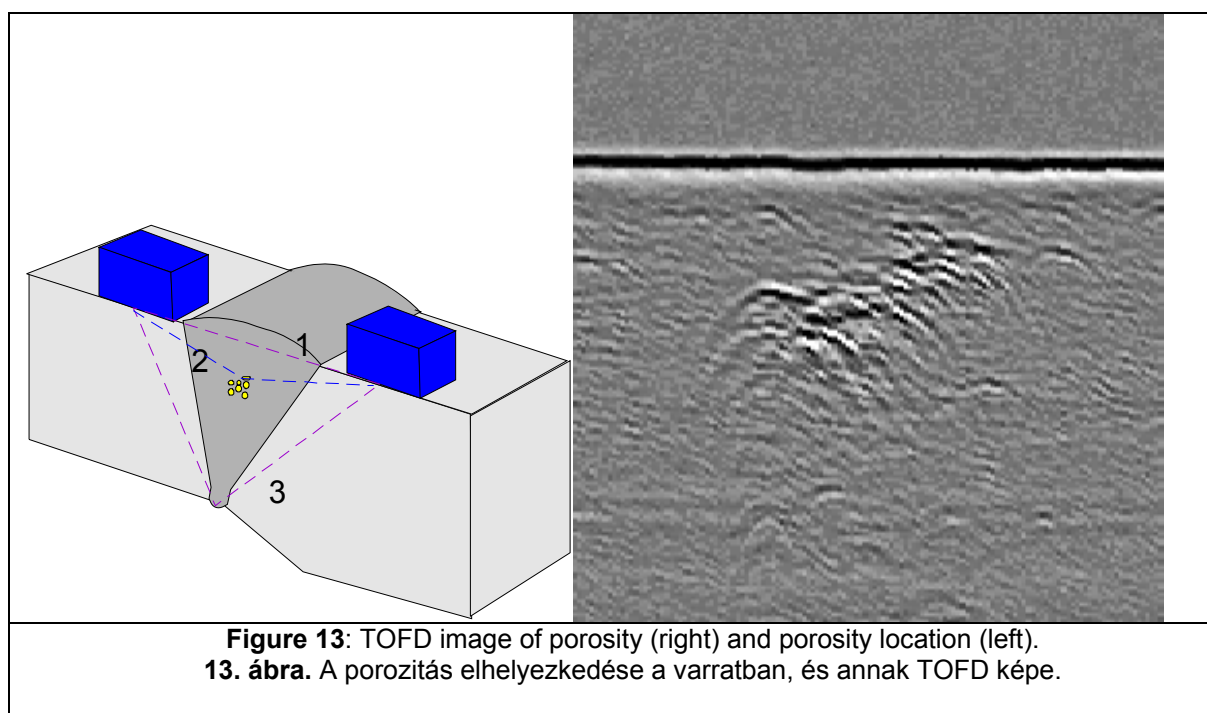


Figure 13: TOFD image of porosity (right) and porosity location (left).
13. ábra. A porozitás elhelyezkedése a varratban, és annak TOFD képe.

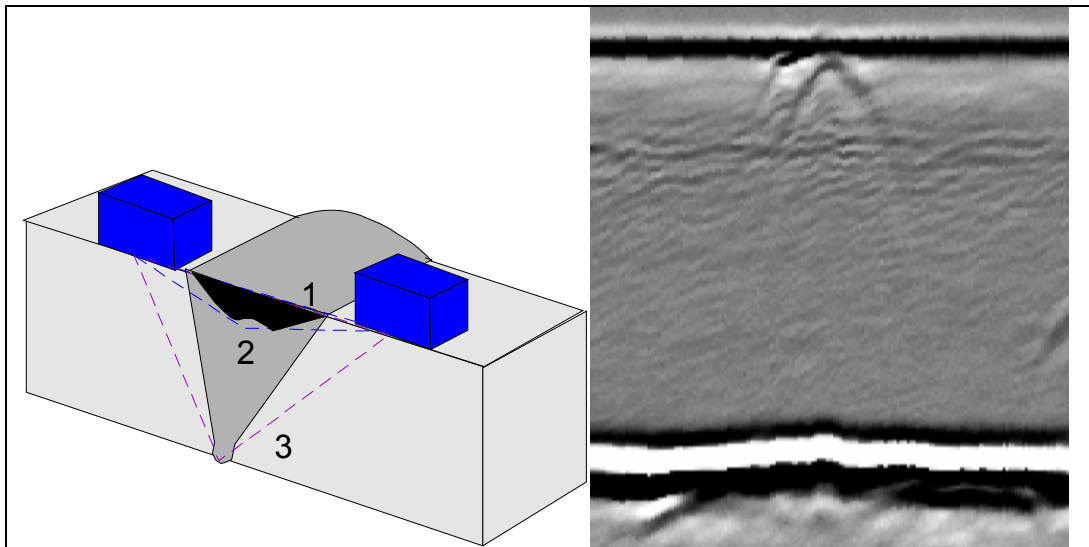


Figure 14: Location of transverse crack and TOFD image.
14. ábra. Egy külső felületre kifutó keresztirányú hiba és TOFD képe.

Summary

TOFD (Time-Of-Flight Diffraction) offers major advantages for inspecting welds and related components. TOFD is a very powerful technique, and allows:

1. Good midwall defect detection.
2. Accurate sizing of defects using the times of arrival of diffracted signals.
3. Defect detection if defects are mis-oriented or located away from the weld centreline.
4. Fast linear scanning.
5. Non-amplitude related inspections.
6. Set-up independent of weld configuration.

TOFD is very fast and economical; one transducer pair covers up to 75 mm (3") of wall thickness using high speed scanning. For thicker sections, more TOFD pairs are needed.

Like all inspection techniques, TOFD has limitations that the inspector should be aware of. The primary concern is the two dead zones (ID and OD) where defects are typically not detected. These two dead zones are located near the Lateral Wave and near the Backwall reflection. The depth of these two dead zones depends on the TOFD configuration, frequency and damping. Lower frequencies and less transducer damping will generate bigger dead zones, while higher frequencies and increased damping produce smaller dead zones. TOFD frequencies are normally a few MHz higher than pulse echo frequencies.

Összefoglalás

A TOFD technika hatékony vizsgálati módszer. A varratok és azok hőhatás övezetének vizsgálatakor a következő fő előnyöket kínálja:

1. Jó hiba-kimutatási képesség az anyag belső zónájában.
2. Pontos hibaméret-meghatározás a elhajló jelek futásidejének különbsége alapján.
3. Jó detektálási képesség a ferdén elhelyezkedő és/vagy a varratközéptől távolabb eső hibák esetén is.
4. Gyors lineáris szkennelés.
5. Amplitúdó-független értékelés.
6. Varratgeometriától független beállítás.

A TOFD technika gyors és gazdaságos, egy vizsgálófej párossal akár 75 mm-es (3") falvastagságot is le lehet fedni. Nagyobb falvastagságú anyagok vizsgálata is lehetséges több vizsgálófej-pár alkalmazásával.

A többi vizsgálati technikához hasonlóan, a TOFD-nek is vannak korlátai, melyekkel a vizsgálatot végzőknek tisztában kell lenniük. Elsődleges korlát a külső-és belső felület közeli tartományokban jelentkező holtter, ahol is a hibák általában nem mutathatóak ki. Ezeknek a holttereknek a tartománya függ a TOFD beállításoktól, frekvenciától, csillapítástól. Alacsonyabb frekvencia és kis csillapítás nagyobb, magasabb frekvencia és nagyobb csillapítás kisebb holtteret eredményez. A TOFD-nél alkalmazott vizsgálófejek frekvenciája általában néhány MHz-zel magasabb, mint a hagyományos technikáknál használatos fejeké.

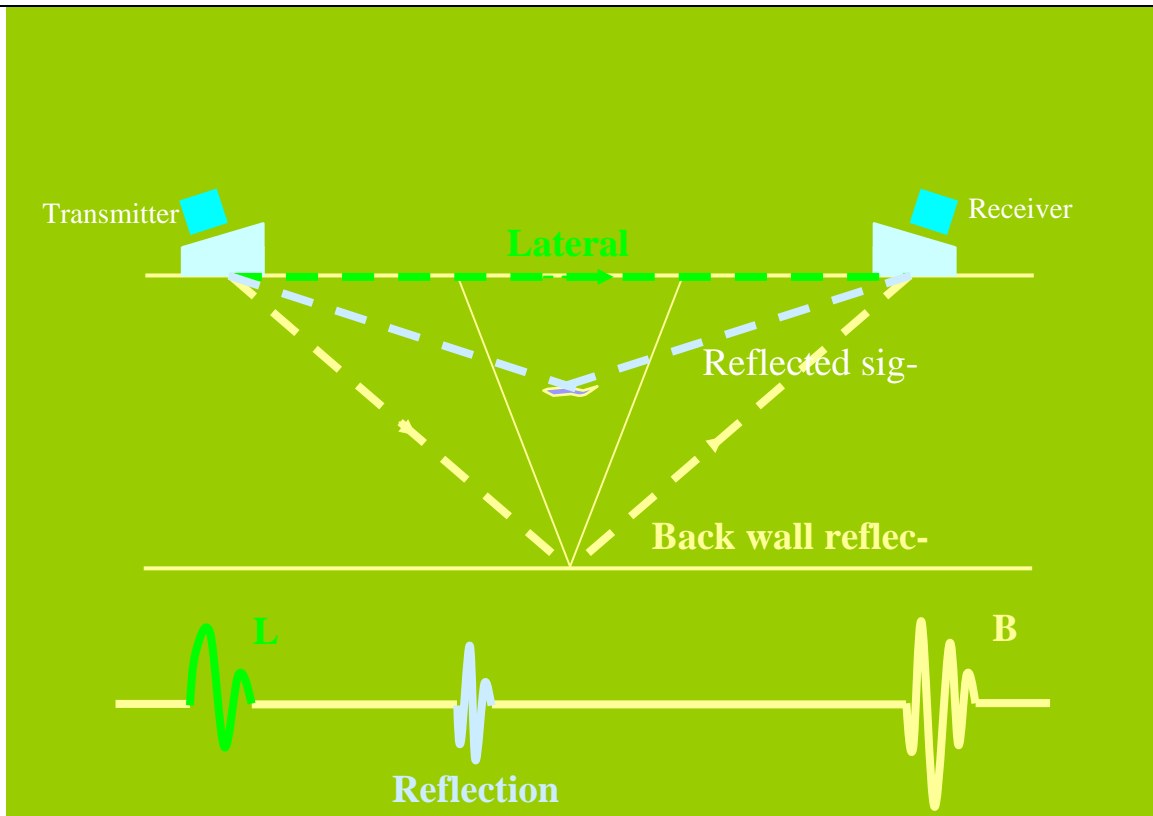


Figure 15a: Schematic showing generation of TOFD signals from interpass lack of fusion
15a. ábra. A varratsorok közti összeolvadási hiányon képződő TOFD jel elvi ábrája

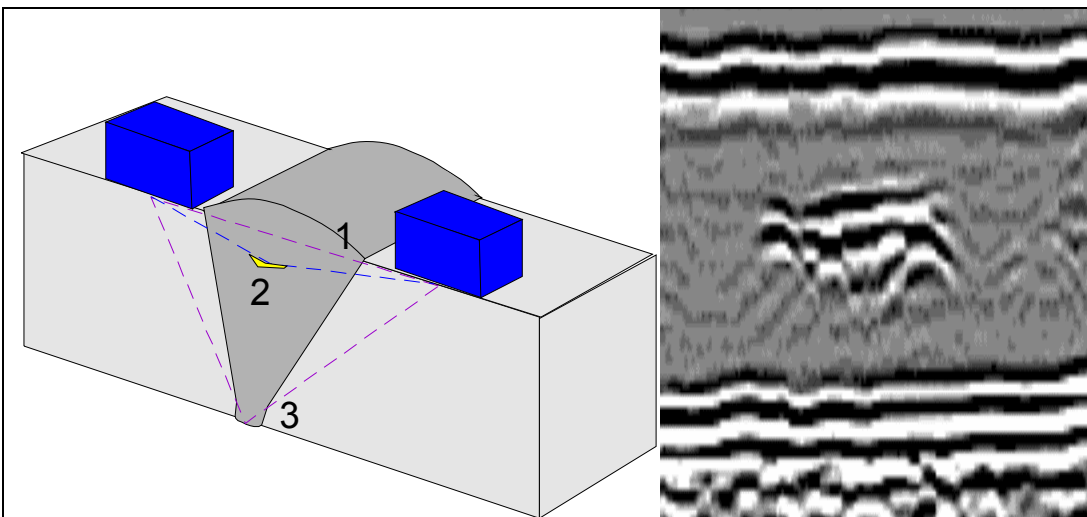


Figure 15b: Location of interpass lack of fusion (left) and appropriate TOFD image (right).
16b. ábra. A varratsorok közti összeolvadási hiány elhelyezkedése és annak tipikus TOFD képe.

The limitations of TOFD can be summarized below:

1. Dead zones near top and bottom surface
2. Sensitive to very small defects with a risk of false calls if not combined with pulse echo
3. Analysis can be difficult
4. Specialist interpretation required
5. Setup requires attention to detail
6. Errors if defect is located away from transducer centreline.

Low signal-to-noise ratio.References

- [1] Silk M.G., 1979, "Defect Sizing using Ultrasonic Diffraction", British Journal of NDT,, p. 12.
- [2] PISC, 1997, Welding Research Council Bulletin 420, Abstracted by S.H. Bush, Ch. 7.
- [3] Charlesworth J.P. and J.A.G. Temple, 1989, "Ultrasonic Time of Flight Diffraction", Research Studies Press.
- [4] BS7706, "Guide to Setting Up and Calibration of the Ultrasonic Time-Of Flight Diffraction (TOFD) Technique for the Detection, Location and Sizing of Flaws", BSI

A korlátozó tényezők összefoglalása:

Holttér a külső-és belső felületközeli zónákban. Nagyon érzékeny a kisméretű hibákra, a téves detektálás elkerüléséhez ajánlatos együtt alkalmazni az impulzus-visszhang módszerrel. A TOFD képek értelmezése bonyolult, szakértelmet igényel.

A beállításokat igen körültekintően kell elvégezni.

A középsíktól távol elhelyezkedő hibák méret-meghatározási pontatlanságot eredményeznek.

Alacsony jel/zaj viszony.

- [5] EN583_6, "Nondestructive testing – Ultrasonic examination - Part 6 : Ultrasonic time-of-flight diffraction technique as a method for defect detection and sizing".
- [6] ASME Version of Article 4 (Draft 2), Nonmandatory Appendix N, "Time-Of Flight Diffraction (TOFD) Interpretation". In progress.
- [7] ASME Code Case 2235-4, "Use of ultrasonic examination in lieu of radiography Section I and section VIII, Divisions 1 and 2", November 30, 2001.