

## Ultrazuková technika TOFD p i ur ení hloubkových rozm r vad

Ing. Miloš Ková ik, Ing. Pavol Ku ík – Slovcert s.r.o., Bratislava, Slovensko

**Principy metodiky TOFD (Time of flight diffraction technique) • Výpo et rozm ru a hloubky vady • P íklady a interpretace m ení TOFD na svarových spojích • Vhodnost a výhody použití metodiky TOFD •**

Už v po átcích ultrazukového zkoušení se vyvíjelo zna né úsilí p i hledání takové techniky zkoušení, která by poskytovala názorný obraz nález ve zkoušené ásti a vysokou míru reprodukovatelnosti. Vzorem byla do zna né míry radiografie a o ekávalo se, že ultrazukem je v zásad možno získat obraz skute ných vad materiálu, pokud jsou dost velké. Z fyzikálního hlediska šlo vlastn o zlepšení rozlišovací schopnosti. Tento cíl se poda ilo do zna né míry splnit ultrazukovou tomografií. Principiáln však nem žeme o ekávat kvalitu zobrazení porovnatelnou s radiografií. V porovnání s radiografií je rozlišovací schopnost a citlivost dosažená ultrazukem ádov horší, což vyplývá z vlnové povahy ultrazuku. Tento nedostatek na druhé stran vyvážila možnost získání obrazu vad u tlustost ných materiál v oblasti limitu prozá itelnosti, kde radiografie už neposkytovala dostate n kontrastní snímky.

Základním nedostatkem ultrazukové techniky však bylo, že hodnocení rozm r malých vad bylo odvozeno od amplitudy ech a vyjad ovalo se tzv. náhradní velikostí, která m la velmi málo spole ného se skute nými rozm ry vad. Snaha extrahovat z echogramu parametru souvisící se skute nými rozm ry vad vedla nakonec ke vzniku další perspektivní techniky nazvané TOFD (Time of flight diffraction technique).



Obr.1 Skenování obvodových svar tlakové nádoby pomocí skeneru a TOFD snímací hlavy UT systému

P esto, že princip techniky TOFD byl znám už delší dobu, její praktické uplatn ní umožnil až rozvoj a zavedení výpo etní techniky. V sou asnosti n kte í výrobci NDT techniky poskytují sestavy sestávající se krom ultrazukového defektoskopu zabudovaného do p enosného po íta e i sníma pozice sond a metoda zpracování je závislá od výb ru požadovaného programového vybavení a volby sond.

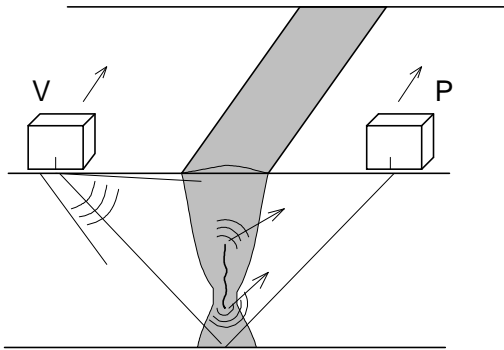
Používání klasického zp sobu vyhodnocování ultrazukových nález , které je založeno na hypotéze, že poruchová echa s v tší amplitudou jsou významn jší, t.j. zp sobena v tšími vadami než echa menší se v pr b hu praxe neosv d ilo u všech druh vad. P edevším selhávalo u trhlin, které jsou z hlediska životnosti a pevnosti konstrukce rozhodující. Krom toho má hodnocení na základ amplitudy nevýhodu v tom, že kolísání akustické vazby p ímo ovliv uje amplitudu signálu a tedy i výsledek zkoušky. Míra reprodukovatelnosti ultrazukových zkoušek nebyla dostate ná, a to hlavn v p ípadech, kdy se zkouška provád la vícekrát v pr b hu životnosti konstrukce s cílem sledovat r st vad v kritických místech. Proto se hledali jiné zkušební techniky s lepší reprodukovatelností, které by poskytly reáln jší obraz o velikosti vad. Hlavn v oblasti zkoušení svar tlakových nádob se v posledních letech prosadila technika TOFD.

### Základní principy metodiky TOFD

TOFD byla poprvé aplikována v r .1985 v Harwelovom Centre (Velká Británie) jako odezva na požadavek zjistit rozm ry trhlin ve svarech jaderného reaktoru. Tato po íta em podporovaná technika je založena na difrakci ultrazukových vln na hrotech necelistvostí materiálu, místo geometrie odrazu. Z rozdílu doby p íchodu difrak ní vlny emitované horním okrajem a difrak ní vlny emitované spodním okrajem trhliny se dá vypo ítat vertikální rozm r trhliny. Tento princip nespo ívající na m ení amplitudy d lá metodu TOFD málo závislou na zm nách

kvality akustické vazby. TOFD proto dosahuje lepší reprodukovatelnost zkoušek než ostatní ultrazukové techniky.

Základní uspořádání sond u metody TOFD je znázorněno na obr.1

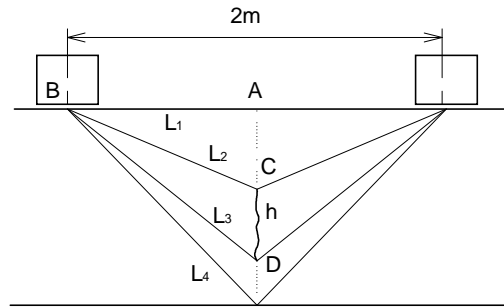


Obr.2 Princip metody TOFD

Jedna ze sond pracuje jako vysílač, druhá jako přijímač. Do materiálu se vysílá podélná vlna. Sondy mají poměrně malý rozměr, aby se dosáhlo široce rozevřeného svazku zasahujícího velkou část zkoušeného přezvu. Frekvence se volí 5 - 10 MHz, impulz krátký - silně ztlumený. Při zkoušení se sondy pohybují podél svaru a měří se A - skeny nepřetržitě a hlouběji do povrchu, kde příslušný program vytváří z nasnímaných A - skenů a polohy sond období B - zobrazení/ tzv. D-scan/.

Na vytvoření obrazu při skenování svaru se podílejí následující typy vln obr. 2:

1. podélná vlna generovaná vysílačím sondou, jejíž část se při dopadu na hrot nečelistivosti transformuje na difrakční kulovou vlnu.
2. laterální vlna šířící se ve směru nejkratší spojnice vysílačím a přijímačím sondy.
3. podélná vlna odražená pod úhlem od protilehlého povrchu.
4. příčné vlny vzniklé transformací dopadající podélné vlny.



Obr.3 Dráhy pro jednotlivé druhy ultrazukových vln při TOFD

Výpočet rozměru a tloušky vady je následující:

Předpokládáme, že vada je orientována kolmo na zkušební povrch a leží uprostřed mezi přijímačem a vysílačem. Potom můžeme na základě Pythagorovy věty vypočítat její hloubkový rozměr „h“.

Jako první přijde do přijímače laterální vlna. Pro dobu jejího příchodu platí:

$$t_{L1} = \frac{2m}{c},$$

kde  $2m$  je vzájemná vzdálenost sond na povrchu a  $c$  je rychlost šíření podélné vlny

Druhá vlna přijde vlna emitovaná horním okrajem vady:

$$t_{L2} = \frac{2 \cdot BC}{c} = \frac{2 \cdot \sqrt{BA^2 + AC^2}}{c} = \frac{\sqrt{(2m)^2 + 4 \cdot d^2}}{c}$$

kde  $d = AC$  je hloubka horního okraje vady

Potom přijde vlna emitovaná spodním okrajem vady:

$$t_{L3} = \frac{2 \cdot BD}{c} = \frac{2 \cdot \sqrt{BA^2 + AD^2}}{c} = \frac{\sqrt{(2m)^2 + 4 \cdot (d+h)^2}}{c}$$

Jako poslední přijde vlna odražená od protilehlého povrchu:

$$t_{L4} = \frac{\sqrt{(2m)^2 + 4 \cdot w^2}}{c}$$

kde  $w$  je tloušťka zkoušeného materiálu

Z uvedených rovnic můžeme při známých rozměrech  $t_{L1}$  až  $t_{L4}$  vypočítat hloubku  $d$ :

$$d = \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 \cdot (t - 2t_0)^2 - m^2}$$

kde pro  $t_0$  platí:

$$2t_0 = t_{L4} - 2 \frac{\sqrt{(2m)^2 + w^2}}{c}$$

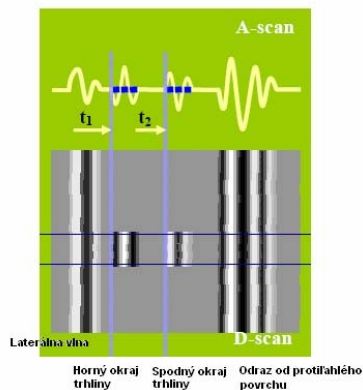
nebo

$$2t_0 = t_{L1} - \frac{2m}{c}$$

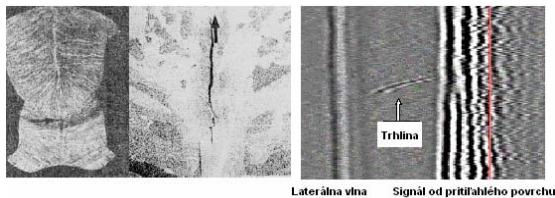
i hloubkový rozměr  $h$  vady:

$$h = d_2/AD - d_1/AC/$$

Příklad zobrazení vad s metodou TOFD je na Obr.4 a Obr.5.



Obr.4 Zobrazení TOFD - rozložení jednotlivých ultrazvukových vln při měření.

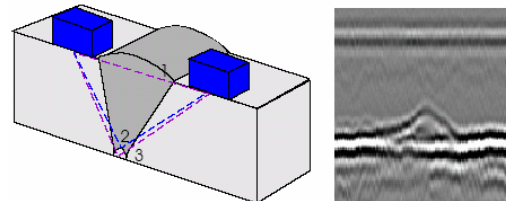


Obr. 5 Metalografický výbrus, detail a porovnání záznamu TOFD na vnitřní trhlince ve svaru.

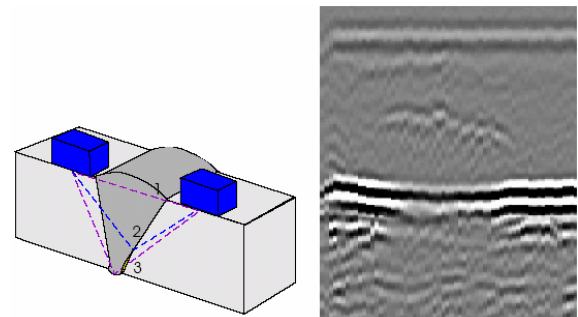
TOFD je bez problémů při zkoušení feritických materiálů. U austenitických materiálů nejsou výsledky tak jednoznačné. Litá ocel je pro TOFD neprozetitelná i když se použijí sondy generující krátký silný impuls (tzv. shock-waves).

### Příklady a interpretace měření

Z hlediska interpretace signálů jsou problematické oblasti těsně u zkušební nebo protilehlé povrchu, kde se těžko odlišuje signál vady od laterální vlny resp. vlny odražené od protilehlé povrchu. Pokud je ale vada výrazná, její interpretace je bezproblémová.

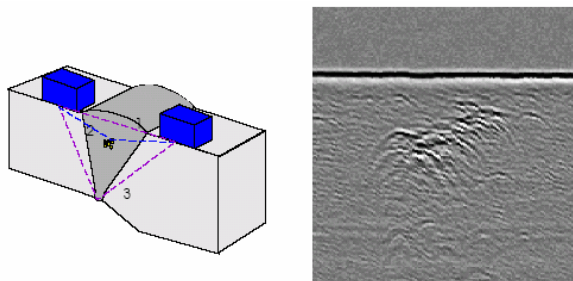


Obr.6 Zobrazení vady neprozetitelného konce při zkoušení tupého svaru technikou TOFD.



Obr.7 Zobrazení vady studeného spoje v oblasti konce při zkoušení tupého svaru technikou TOFD.

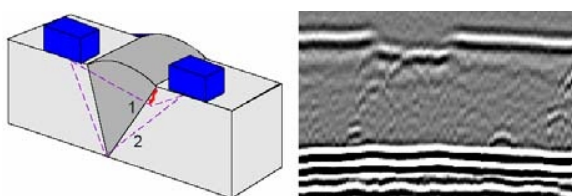
Při objemových vadách typu např. pórů a pod. se projevují signály vad v záznamech TOFD jako malé paraboly mezi laterální vlnou a odrazem od protilehlé strany. Jejich interpretace vad je spolehlivá.



Obr.8 Zobrazení vad typu pór p i zkoušení tupého svaru technikou TOFD.



Obr.12 Detail ru ního skeneru pro kontrolu svaru metodikou TOFD



Obr.9 Zobrazení vady studeného spoje v blízkosti povrchu p i zkoušení tupého svaru technikou TOFD.

### Vhodnost použití metodiky TOFD.

V p iložené tabulce je porovnání citlivosti ultrazvukové metodiky TOFD proti proza ovací metod p i kontrolách svarových spoj a n kterých typ vad.

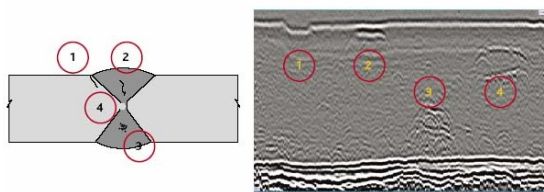
	Typ chyby	UT TOFD	Radiografie
1	Povrchová/ podpovrchová trhлина	Délková i hloubková rozlišitelnost	Délková rozlišitelnost
2	Šikmé trhliny v centrální ásti	Délková i hloubková rozlišitelnost	Nedetekovatelné když nejsou kolmo
3	Pórovitost	Délková rozlišitelnost	Délková rozlišitelnost
4	Nevypln ný ko en	Délková i hloubková rozlišitelnost	Délková rozlišitelnost



Obr.10 P enosný p ístroj Omniscan s ru ní skenerem pro kontrolu svaru metodikou TOFD

Porovnávací tabulka výhod metodik zkoušení UT TOFD a proza ování na rtg filmy:

	UT TOFD	Radiografie
Ochranná opat ení	Ne	Ano
Inspek ní as	Krátký	Dlou
Výsledky v reálném ase	Ano	Ne
Spot eba materiálu	Nizká/ sondy	Vysoká /filmy
Energetické nároky	Nizké/bateriový provoz	Nevyhnuteln á p ípojení na zdroj
Archivace údaj	Digitální	Fyzická



Obr.11 Porovnání jednotlivých typ vad v zobrazení TOFD

### Záv r

Použití TOFD je bezproblémové p i zkoušení feritických materiál . U austenitických materiál nejsou výsledky tak jednozna né. Litá ocel je pro TOFD ásto neprozvukitelná i když se použijí

sondy generující krátký silný impulz (tzv. shock-waves).

Z hlediska interpretace signál jsou problematické oblasti t sn p i zkušebním nebo protilehlém povrchu, kde se t žce odlišuje signál defektu od laterální vlny resp. Vlny odražené od protilehlého povrchu.

V sou asnosti je technika TOFD stále p edm tem diskuzí a po po áte ních úsp ších, které n kdy vedly ke snaze nahradit touto technikou klasickou radiografii se prosazuje konzervativn jší názor, podle kterého je hlavní význam TOFD v možnosti ur ení hloubkového rozm ru vad, když radiografický obraz poskytuje p esn jší informace o délce a plošném rozsahu vad.

### Literatura

1. ASME VIII Code Case 2235 (2000 Edition)
2. ASME Section V, Article 4
3. S 7706 Guide to calibration and setting-up of the ultrasonic time-of-flight diffraction (TOFD) technique for detection, location, and sizing of flaws. British Standards Institute, 1993.
4. EN583-6 Nondestructive testing-ultrasonic examination -Part 6: Time-of-flight diffraction technique as a method for defect detection and sizing, 1995
5. Moles M.: Application of Time of flight Diffraction for Weld Inspection, R/D Tech interný materiál, 2003
6. Charlesworth, J.P. a Temple, J.A.G.: Ultrasonic time of flight diffraction, výskumná štúdia, 1989