

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MODERNÍ METODY V NEDESTRUKTIVNÍM ZKOUŠENÍ POMOCÍ ULTRAZVUKU

MODERN METHODS IN NONDESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS USING ULTRASOUND

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADEK ŠIMEČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN JULIŠ, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Radek Šimeček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní metody v nedestruktivním zkoušení materiálů pomocí ultrazvuku

v anglickém jazyce:

Modern methods in nondestructive testing of materials using ultrasound

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zkoušení a kontrola součástí pomocí nedestruktivních metod je stále více žádaným oborem. Pro detekci vnitřních vad lze kromě prozařovacích metod použít pouze zkoušení pomocí ultrazvuku. Složitost konstrukcí a součástí však velmi často konvenční ultrazvukové postupy velmi omezuje či zcela znemožňuje jejich použití. Bakalářská práce bude zaměřena na literární přehled nedestruktivních metod zkoušení materiálů pomocí ultrazvuku s důrazem na moderní postupy TOFD a Phased Array.

Cíle bakalářské práce:

Cílem této práce je nastudování dané problematiky a vypracování literární rešerše.

Seznam odborné literatury:

[1] B.Kopec: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, CERM, Brno 2009, ISBN 978-80-7204-591-4

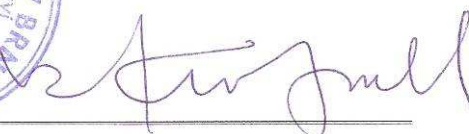
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Juliš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 11.1.2011



prof. Ing. Ivó Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tématem této bakalářské práce je nedestruktivní zkoušení materiálů moderními ultrazvukovými technikami. V první části jsou zmíněny vady strojních součástí, jež lze detekovat právě pomocí ultrazvuku. Následuje popis konvenční ultrazvukové techniky, včetně výčtu hlavních nevýhod a omezení. V druhé části jsou následně rozebrány moderní ultrazvukové metody TOFD a Phased Array. Popsána je nejen podstata těchto technik, ale jsou také uvedeny praktické příklady jejich aplikace.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Nedestruktivní zkoušení, ultrazvuk, technika TOFD, technika Phased Array

ABSTRACT

Theme of this bachelor thesis is nondestructive testing of materials by modern ultrasound methods. In the first part are mentioned defects of mechanical components, which can be detected by ultrasound. This is followed by a description of conventional ultrasound technique, including a list of the major disadvantages and limits. In the second part are analyzed the modern ultrasonic methods TOFD and Phased Array. It describes not only the principle of these techniques, but there are also provided practical examples of their application.

KEY WORDS:

Nondestructive testing, ultrasound, TOFD technique, Phased Array technique

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠIMEČEK, R. *Moderní metody v nedestruktivním zkoušení materiálů pomocí ultrazvuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Já, Radek Šimeček, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, s využitím uvedených podkladů a literatury, na základě konzultací s mým vedoucím práce.

V Brně dne 20.5.2011

Podpis: 

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval panu Ing. Martinovi Julišovi Ph.D. za cenné rady a odborné vedení při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při tvorbě bakalářské práce a po celou dobu studia.

CÍLE PRÁCE

Bakalářská práce bude zaměřena na literární přehled nedestruktivních metod zkoušení materiálů pomocí ultrazvuku s důrazem na moderní postupy TOFD a phased Array.

Obsah:

Úvod.....	11
1. Vady materiálů a součástí	12
1.1. Vady	12
2. Konvenční ultrazvuková defektoskopie	15
2.1. Základní typy ultrazvukových vln.....	16
2.2. Ultrazvukové zařízení pro konvenční techniky.....	17
2.3. Metody konvenční ultrazvukové defektoskopie.....	18
2.4. Faktory ovlivňující zkoušku.....	19
2.5. Způsoby zobrazení signálu v konvenčním ultrazvuku.....	20
2.6. Základní typy konvenčních ultrazvukových sond.....	22
2.7. Měrky a kalibrace	24
2.8. Zhodnocení konvenční ultrazvukové metody	24
3. Moderní ultrazvukové metody	24
3.1 Metoda TOFD	24
3.1.1 Uspořádání zkoušky	24
3.1.2. Metody zkoušení technikou TOFD.....	26
3.1.3. Zobrazení signálu v metodice TOFD.....	27
3.1.4. Sondy pro techniku TOFD.....	28
3.1.5. Měrky a kalibrace zařízení TOFD	29
3.1.6. Příklady aplikací metody TOFD v technické praxi	30
3.1.6.1. Zkoušení obvodového svaru čpavkové tlakové nádoby metodou TOFD	30
3.1.6.2. Využití techniky TOFD při zkoušení dlouhodobě provozovaných tlakových nádob.....	31
3.1.6.3 Zkoušení heterogenních a austenitických svarů metodou TOFD	32
3.1.7. Zhodnocení použitelnosti a vhodných aplikací metody TOFD	33
3.2. Metoda phased array	34
3.2.1. Konstrukce phased array sondy	33
3.2.2. Druhy phased array sond	35
3.2.3. Princip sondy phased array – modifikace vlny	35
3.2.4. Zobrazení signálu v technice phased array	36
3.2.5. Metody skenování technikou phased array.....	37
3.2.6. Měrky pro phased array	38
3.2.7. Praktické příklady využití metody phased array.....	39
3.2.7.1. Využití techniky phased array při zkoušení dlouhodobě provozovaných tlakových nádob.....	39
3.2.7.2. Přednosti a využití zobrazení S, B a C při zkoušení silnostěnných výkovek ultrazvukem	41
3.2.7.3. Zkoušení zámků lopatek turbín	43
3.2.7.4. Kontrola potahu křídla letadel řady Airbus A318-A321	44
3.2.8. Hodnocení metody phased array.....	45
4. Závěr.....	46
5. Použité zdroje.....	47
6. Seznam použitých zkratk a symbolů	49

ÚVOD

Příští rok uplyne 100 let od patentu prvního zařízení, které využívá ultrazvuku k předcházení haváriím a ochraně lidských životů. Dnešní moderní ultrazvukové metody zlepšují výrobní postupy a jsou nepostradatelnou součástí nedestruktivního zkoušení materiálů a konstrukcí. V této práci je věnována pozornost jednak konvenční ultrazvukové metodě a dále především metodám, které se začaly používat relativně nedávno a znamenají velký pokrok v moderní ultrazvukové defektoskopii – metodě TOFD a Phased array.

Již od roku 1794 jsou známy zvukové vlny neslyšitelné lidským uchem. Jejich existenci předpokládal italský vědec Lazzaro Spallanzani, který si vysvětlil schopnost netopýrů létat v naprosté tmě tím, že musí existovat nějaký druh vibrací, které lidé nevnímají. Jeho teorie se potvrdila až v r. 1942. Významným rokem pro rozvoj ultrazvuku je rok 1880, ve kterém bratři Pierre a Jacques Curieovi objevili, že při mechanické deformaci některých krystalů vzniká na jejich povrchu elektrický náboj (piezoelektrický jev). O rok později zjistili tzv. nepřímý piezoelektrický jev, při němž se krystal deformuje po přivedení elektrického proudu. Oba objevy položily základ pro konstrukci zařízení, které by bylo schopno vysílat a zpětně registrovat vysoké frekvence vlnění[1].

V souvislosti s katastrofou zaoceánské lodi Titanik v roce 1912 patentoval Richardson zařízení, které pomocí ultrazvukového vlnění umožňovalo registrovat v moři ledovce. V průběhu 1. světové války byl ultrazvuk využit například k detekci německých ponorek. Později v meziválečném období bylo ultrazvuku využito při konstrukci hloubkoměru, detektoru tahu ryb i různých námořních bezpečnostních a dorozumívacích zařízení známých jako SONAR[1].

První ultrazvukový defektoskop pro použití v praxi byl sestaven v roce 1940 Američanem Firestonem. Používání ultrazvukového zkoušení v průmyslu začalo ve třech zemích najednou v USA (Firestone), Velké Británii (Sproule) a Německu (Trost). V roce 1945 zakládají bratři Josef a Herbert Krautkrämerovi laboratoř a pracují spolu na ultrazvukovém defektoskopu, který předvádějí v r. 1949 na jednání Asociace německých hutníků. Jejich přístroj má vysokou citlivost, je přenosný při hmotnosti 20 kg, má vysokou rozlišovací schopnost, opakovací frekvenci do 1000 Hz a zobrazuje trhliny až o velikosti 1 mm v hloubce menší než 10 mm, čímž předurčuje směr vývoje dalších ultrazvukových zřízení. Firma Krautkrämer patří dodnes mezi přední výrobce zařízení pro ultrazvukové zkoušení. Velkým pokrokem pro zlepšení citlivosti a výkonu měničů byl v r. 1955 objev Jaffeho, který vyrobil umělý piezoelektrický materiál a nahradil tak přírodní krystaly používané do této doby. Další vývoj v defektoskopii umožnily pokroky v elektronice, digitalizaci a rozvoj počítačů a to až po nejnovější metody TOFD či phased array, které v sobě spojují miniaturizaci s moderním softwarem [1].

1. Vady materiálů a součástí

1.1. Vady

Vada (necelistvost, nehomogenita, diskontinuita, apod.) výrobku je odchylka provedení výrobku od vlastností předepsaných v technických normách nebo v jiných technických dokumentech, podle nichž je výrobek zkoušen a prodáván[1]. Třídění vad se může řídit různými hledisky – např. dle příčin vzniku, druhu vady, atd. Vady mohou pocházet přímo z výroby, nebo mohou vzniknout při provozu součásti. Zkouškám, které odhalují přítomnost vad, by se měla věnovat velká pozornost, protože včasné odstranění vady ve výrobku zabrání haváriím, které by mohly ohrozit lidské životy. Právě odhalováním vad se zabývá nedestruktivní zkoušení (NDT), jedním z jeho odvětví je zkoušení pomocí ultrazvuku. Vady, které se dají detekovat ultrazvukovými zkouškami, lze rozdělit do několika skupin. Přehled rozdělení vad je v tabulce 1.

Tabulka 1 Třídění vad [1]

skupina vad		všeobecná charakteristika
číslo	název	
1	vady rozměrů	Nedodržení požadavků na předepsané jmenovité rozměry výrobku a jejich mezní úchyly
	vady tvaru a polohy	Nedodržení požadavku na vzdálenosti vyjadřující polohu posuzované plochy, osy nebo roviny vzhledem k její jmenovité poloze.
2	vady povrchu	Nedodržení požadavku na předepsané provedení povrchu
3	necelistvosti	Necelistvost hmoty výrobku
4	vady zjišťované zvláštními laboratorními zkouškami	Nedodržení požadavků na předepsané hodnoty mechanických, technologických a fyzikálních vlastností výrobku, nedodržení předepsané makrostruktura, mikrostruktury, apod.

Staženiny

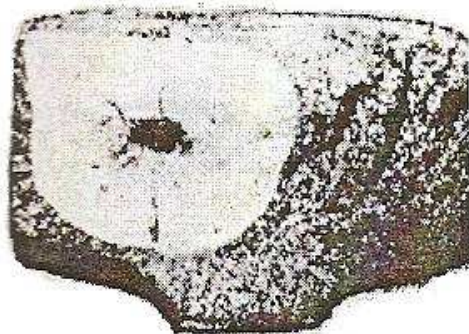
Mají vzhled rozsáhlé necelistvosti, nepravidelných dutin, trhlin, nebo rozdvojení u plechů. Vznikají při tuhnutí roztaveného kovu, jako následek objemových změn při tuhnutí oceli. Zpravidla jsou orientovány v podélné ose výrobku. Dá se jim předcházet vhodným tvarováním odlitků, zvolením vhodné lící teploty a rychlosti ochlazování, nebo umístěním tzv. nálitku (zásobníku tekutého kovu). Pokud se staženiny neodstraní, mohou se při dynamickém zatěžování nebo ohybu zvětšovat a způsobit deformace a následně i lom. Na obrázku níže můžeme pozorovat staženinu v ocelovém ingotu, prostor ve staženině může být vyplněn struskou nebo plyny [1].



Obr. 1.1 Soustředná staženina v ocelovém ingotu [1]

Vločkové trhliny

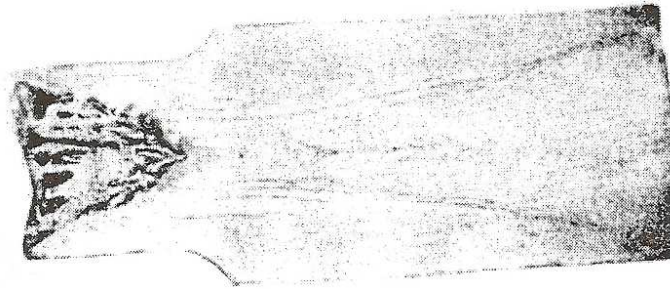
Jsou to vnitřní plošné nečelistvosti (na metalografickém výbrusu se jeví jako křivolaké trhliny) široké jen několik desetitisícin milimetru, které se někdy dle vzhledu nazývají také vločky. Vyskytují se u ocelí s vyšší pevností (600 MPa a více) a větších průřezů. Jejich příčinou je uvolňování vodíku při chladnutí oceli a následné mikro a makroskopické vnitřní pnutí. Vzniku vločkových trhlin se dá zabránit vakuováním tekuté oceli nebo několikahodinovou výdrží pod teplotou přeměny při řízeném ochlazování. Přítomnost vloček působí na výsledné vlastnosti materiálu jako přítomnost vnitřního vrubu. Nejhůře se vločky projevují, pokud jsou orientovány napříč směru při cyklickém namáhání. Na obrázku 1.2 je hlava kolejnice s vločkovou trhlinou. Kolem vločky můžeme pozorovat únavovou trhlinu, která se zvětšovala až do úplného lomu kolejnice [1].



Obr. 1.2 Vločková trhlina v hlavě kolejnice [1]

Vycezeniny:

Jsou to makroskopické oblasti se zvýšeným obsahem vměstků (fosforu, síry, uhlíku, aj.), vyvolané vlivem segregačních dějů při tuhnutí oceli. Jsou v různé míře přítomny ve všech ocelích. Za vadu se považují, když překročí rozsah stanovený normami nebo když se jejich charakter a velikost výrazně odlišuje od zvolené technologie výroby. Jejich přítomnost zhoršuje svařitelnost a také tvářitelnost zatepla. Při tváření zastudena mají vliv především na tvorbu trhlin. Obrázek ocelového ingotu běžné kvality (obr. 1.3) ukazuje, jak mohou být vycezeniny orientovány ve výšce ingotu [1].



Obr. 1.3 Rozložení V-vycezenin v ocelovém ingotu [1]

Makroskopické kovové vměstky:

Jsou to cizorodé nekovové částice v podobě shluků, žil nebo řetězců, viditelných pouhým okem. Někdy jsou to také nedokonale rozpuštěné legovací přísady, popř. i vyjímečně úlomky z vyzdívky pece. Vyskytují se nahodile v průřezu jednotlivě i hromadně. Hlavním zdrojem vměstků v oceli jsou žáruvzdorné hmoty, s nimiž přichází ocel do styku během výroby. Makroskopické kovové vměstky způsobují problémy při kování, tváření zastudena a při třískovém obrábění snižují životnost nástrojů [1].

Podélné trhliny:

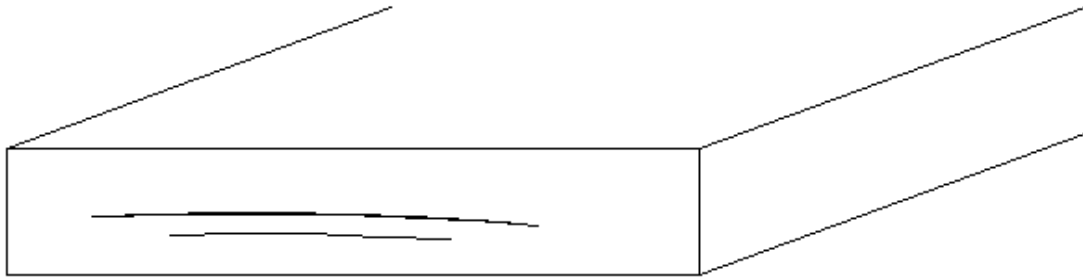
Nejčastější vady válcované oceli, mohou mít různý směr a velikost. Podélné trhliny mají často původ ve vadách ingotu, jindy jsou příčinou podpovrchové bubliny u uklidněných ocelí. Přítomnost trhlín zhoršuje tvářitelnost materiálu. Trhliny také mohou způsobovat následné vibrace soustružnického nože při třískovém obrábění. Povrchové trhliny se kalením dále zvětšují. Trhliny mohou vést ke vzniku únavových lomů [1]. Na obr. 1.4 je možné vidět podélnou trhlinu v hutním polotovaru – viz červená šipka.



Obr. 1.4 Podélná trhlina v hutním polotovaru

Zdvojeniny

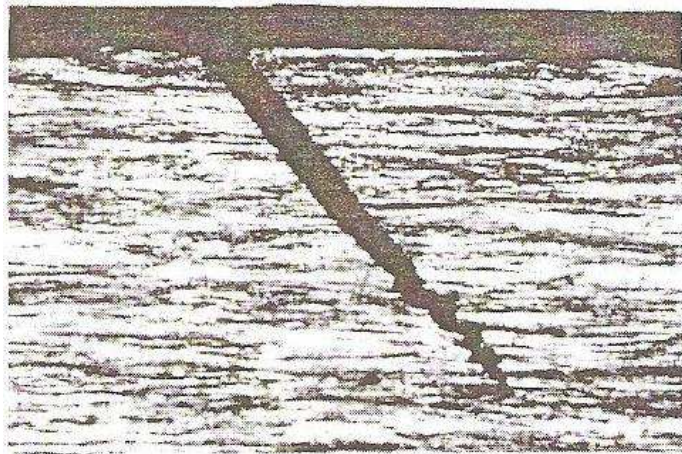
Vyskytují se ve tvářených výrobcích většinou u plechů a pásů. Jsou to nehomogenity, vzniklé z různých příčin. Vznikají v důsledku nesprávné válcovací teploty, naplynění materiálu nebo nahromaděním většího množství vměstků. Při válcování se roztáhnou po ploše plechu [2]. Obrázek 1.5 ukazuje typickou orientaci zdvojeniny.



Obr. 1.5 Zdvojenina u plechu

Příčné trhliny:

Jsou to trhliny orientované kolmo ke směru tváření. Vznikají v prvním období tváření, při dalším tváření se dále zvětšují. Vznikají v důsledku snížené tvářitelnosti za tepla. Na obr. 1.6 je zachycen typický vzhled příčné trhliny [1].



Obr. 1.6 Příčná trhlina v pružinovém drátě [1]

2. Konvenční ultrazvuková defektoskopie

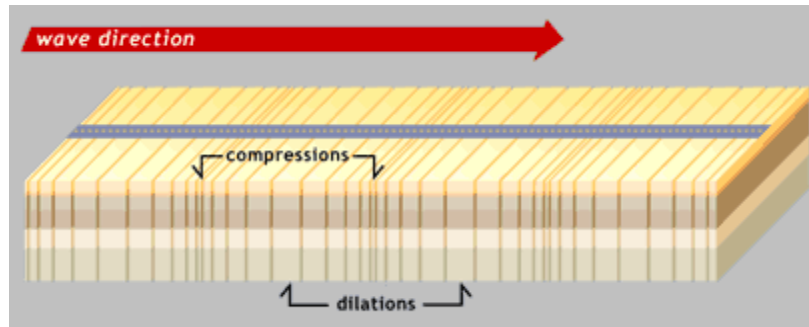
Ultrazvuk lze popsat jako šíření zvukové vlny v elastickém prostředí s frekvencí vyšší než je hladina slyšitelnosti (nad 20 kHz). Vlnou se nazývá kmitání pevných částic okolo jejich rovnovážné polohy. Při nedestruktivním zkoušení se toto vlnění vysílá do materiálu a detekcí odražených vln, nebo měřením útlumu se zjišťuje, jestli materiál neobsahuje vady. V nedestruktivním zkoušení se pro hledání vnitřních vad začal ultrazvuk využívat tam, kde nebyla možná zkouška prozařováním. Pro zjišťování vad se používají ultrazvukové vlny o frekvenci 0,5 až 25 MHz.

Konvenční ultrazvuková metoda se nejčastěji používá pro zjišťování vad ležících pod povrchem součástí, dále pak také pro měření tloušťky materiálu. Podle interakcí ultrazvuku s defekty v materiálu lze určit, o jaký typ vady se přibližně jedná (objemová či plošná vada, pórovitost, atd.). Pomocí znalosti rychlosti šíření ultrazvuku v daném materiálu lze také určit některé jeho fyzikální vlastnosti (např. modul pružnosti) [1].

2.1. Základní typy ultrazvukových vln

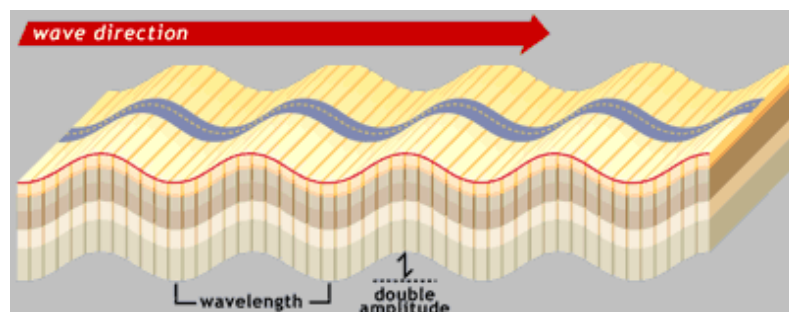
Pro hledání vad pomocí ultrazvuku se při konvenčních postupech nejčastěji používají dva typy vln - podélná a příčná vlna.

Podélná vlna (viz obr. 2.1) znamená, že částice v této vlně kmitají ve směru šíření, tzn. že se k sobě přibližují a oddalují (dochází tím ke zhušťování a zředování prostředí). Podélná vlna se může šířit v pevném, kapalném i plynném prostředí [1].



Obr. 2.1 Podélná vlna [3]
wave direction- směr vlny
compressions- komprese
dilations- dilatace

Příčná vlna (viz obr. 2.2) – částice kmitají ve směru kolmém na směr postupu vlny. Příčná vlna se může šířit jen v prostředí, které je schopno přenášet smykové síly. Rychlost šíření příčné vlny je přibližně poloviční než vlny podélné.



Obr. 2.2 Příčná vlna [3]
wave direction- směr vlny
wavelength- délka vlny
double amplitude- dvojitá amplituda (rozkmit)

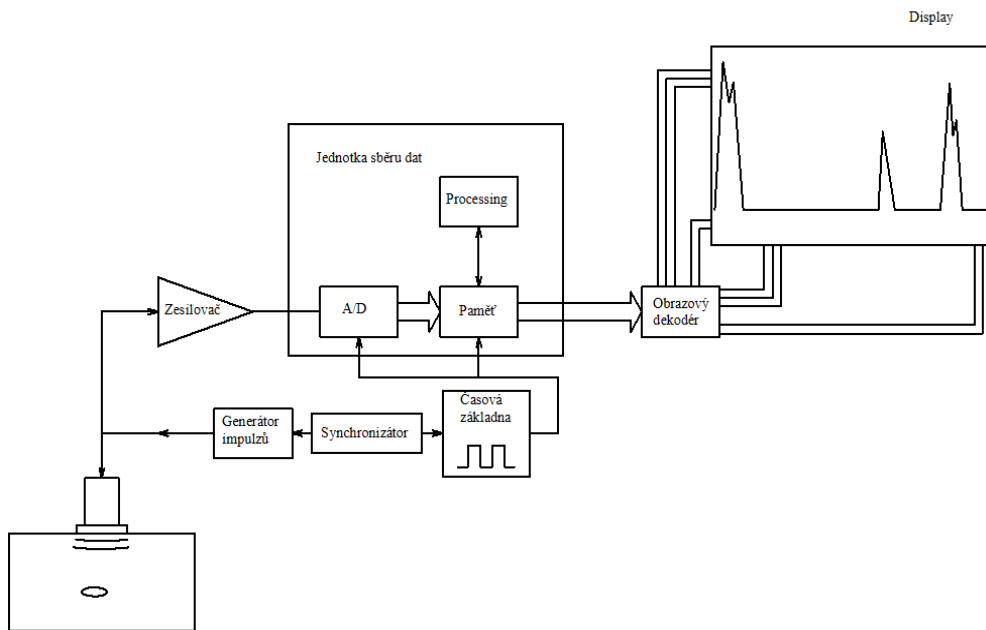
Existují však ještě další typy vln. Povrchové (Rayleighovo) vlnění se může šířit asi do hloubky jedné vlnové délky. Částice při něm kmitají v rovině kolmé na směr šíření a v ní opisují elipsu. V materiálech, které mají tloušťku srovnatelnou s délkou vlny, mohou vznikat tzv. deskové vlny. Při nich částice na povrchu materiálu kmitají jako u povrchového vlnění, ale částice ve středu materiálu kmitají buď jako u podélné, nebo příčné vlny. Rychlost šíření ultrazvuku v tuhých látkách závisí obecně na modulu pružnosti, měrné hmotnosti a Poissonově čísle [1]. Příklady rychlosti šíření podélné a příčné vlny pro vybrané materiály jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Rychlosti šíření vln [1]

Látka	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	Poissonovo číslo	Rychlost podélné vlny [m.s ⁻¹]	Rychlost příčné vlny [m.s ⁻¹]
kovy				
hliník	2700	0,34	6320	3130
měď	8900	0,35	4700	2260
ocel feritická	7800	0,28	5920	3250
ocel austenitická	8030	0,27	5200-5800	3000-3150
titan	4540	-	6100	3120
platina	21400	0,39	3960	1670
hořčík	1730	0,3	5780	3050
litina	7200	0,18-0,26	3500-5600	2200-3200
nekovy				
sklo křemičité	2600	-	5570	3515
plexisklo	1180	0,17	2680-2740	1390
porcelán	2400	0,13	5300-5500	3500-3700
PVC	1400	-	2395	1060
polystyrén	1055	0,32	2340	-

2.2. Ultrazvukové zařízení pro konvenční techniky

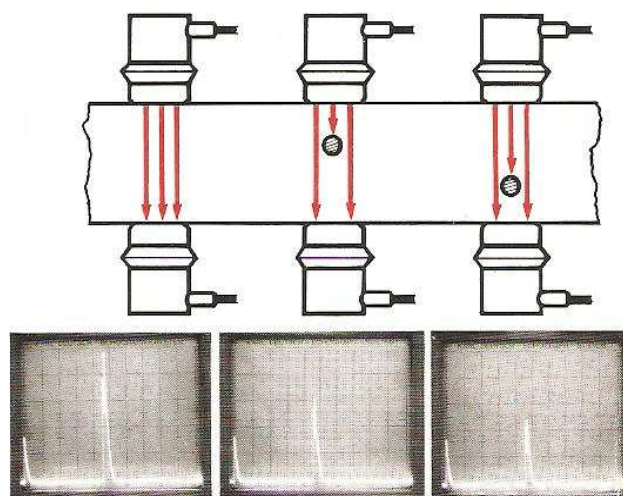
Ultrazvukové defektoskopické zařízení se skládá z různých prvků, které zajišťují generování ultrazvukových vln, zachycování jejich odrazů a jejich zobrazování. Schéma uspořádání ultrazvukového zařízení je uvedeno na obr. 2.3. Na sondu se z generátoru přivádějí vysílací impulzy, které jsou pomocí piezoelektrického měniče transformovány na ultrazvukové impulzy a ty jsou vysílány do zkoušeného materiálu. Odražené vlny mají velmi malou amplitudu, a proto se musí následně zesílit zesilovačem. Aby se signál ze zesilovače mohl zobrazit na obrazovce, musí se zpracovat v analogově-číslicovém převodníku. Ten rozděljuje signál na velmi krátké úseky a převádí jej do číslicové podoby. Musí pracovat na vysoké vzorkovací frekvenci (100 MHz a více). Před zobrazením jsou ještě zařazeny obvody pro usměrnění signálu, aby bylo lépe využito místo na obrazovce. Signál je skoro symetrický a proto není obvykle nutno zobrazovat jeho kladnou a zápornou půlvlnu současně. Obvod synchronizátoru zajišťuje, aby bylo vysílání impulzů do materiálu, spouštění časové základny a start A-D převodu navzájem sladěné. To nám zaručí, že nulový bod na ose časové základny odpovídající vstupu ultrazvukové vlny do materiálu bude stále na stejném místě obrazovky [1].



Obr. 2.3 Schéma ultrazvukového zařízení [1]

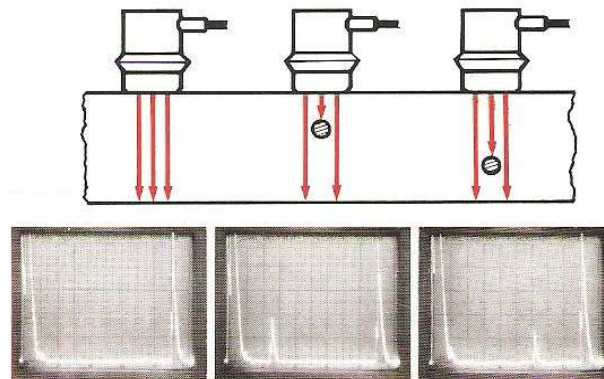
2.3. Metody konvenční ultrazvukové defektoskopie

V konvenční ultrazvukové defektoskopii existují dvě základní metody zjišťování vnitřních vad materiálu. První technika (průchodová) využívá zeslabení ultrazvuku při průchodu materiálem v místě s chybou. Při této metodě se používají dvě sondy umístěné proti sobě. Jedna sonda pouze vysílá a druhá přijímá ultrazvukový signál, který projde materiálem. Na obrázku 2.4 lze vidět uspořádání zkoušky a také to, jak budou vypadat echa na obrazovce přístroje. Tuto techniku však lze použít pouze tam, kde je přístup k oběma protilehlým povrchům. Tato metoda má velkou nevýhodu také v tom, že musí být zajištěna dokonalá osová souměrnost použitých sond [1].



Obr. 2.4 Průchodová metoda [4]

Druhá metoda (odrazová) využívá odrazu ultrazvukové vlny od defektů a nehomogenit uvnitř materiálu. Pro příjem odražené vlny se používá stejný měnič, který vlnu vyslal. Na zkoušení materiálu a součástí tedy stačí pouze jeden přístupný povrch. Z doby, která uplyne mezi vysláním impulsu a příjmem signálu zpět do sondy se určuje vzdálenost chyby od měniče a velikost amplitudy echa napovídá o náhradní velikosti (tvaru) zjištěné vady. Obrázek 2.5 ukazuje, jak bude vypadat echo ve vzorku bez vady a s vadou. Nevýhodou této metody je, že ultrazvuk překonává dvojnásobnou dráhu než je vzdálenost chyby (projevuje se zde negativně útlum materiálu) a také je omezena minimální vzdáleností od měniče, kterou musí vada mít, aby byla odlišitelná od vysílacího impulsu [1].



Obr. 2.5 Odrazová metoda [4]

2.4. Faktory ovlivňující zkoušku

Akustická vazba:

Pro přenos akustického tlaku ze sondy je třeba zajistit, aby na rozhraní mezi zkoušeným materiálem a sondou nebyl vzduch, neboť by na tomto rozhraní nastal tzv. totální odraz, tj. odraz signálu zpět do sondy. Do materiálu by se tak přenesla jen velmi malá část původní energie ultrazvukového signálu. Při ultrazvukové kontrole se proto nanáší na povrch zkoušeného materiálu vazební prostředek nejčastěji v podobě různých gelů. V případě imerzního zkoušení se jako vazební prostředek často používá i obyčejná voda [1].

Povrch zkoušeného materiálu:

Kvalita povrchu velmi ovlivňuje přesnost hodnocení chyb. Pokud je povrch velmi drsný, s okujemi nebo je na něj nanesen nátěr, který nepřiléhá dokonale, pak dochází ke ztrátám akustického tlaku při vstupu ultrazvuku do materiálu. Povrch by měl být proto před zkouškou zbaven nečistot, rzi a popř. i barvy [1].

Zkoušený materiál:

Většina kovových materiálů, u kterých se provádí zkoušení ultrazvukem, prochází výrobními procesy, které orientují zrna v jednom směru. Materiál je pak anizotropní tzn., že jeho vlastnosti jsou v jednom směru výrazně jiné než v jiném. Tyto materiály jsou pak nezděnkově prozvučitelné jen v určitém směru. Značný vliv má také velikost a tvar zrna [1]. Např. při zkoušení litiny nastává na lamelárním grafitu velký rozptyl ultrazvukových vln.

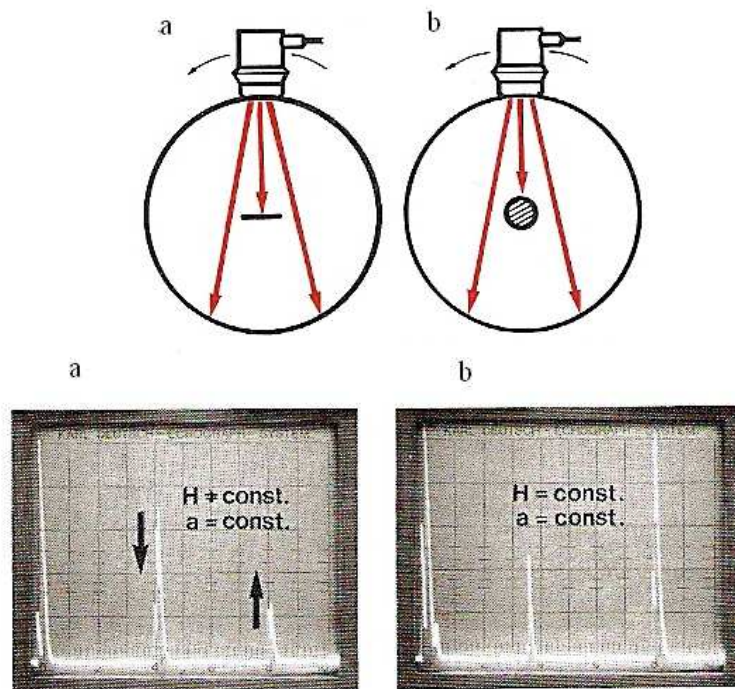
Tvar zkoušené součásti:

Tvar součásti může způsobit echa, která nejsou způsobena vadami v materiálu. To může velmi ztěžovat správné vyhodnocení ultrazukové zkoušky, pokud je použita konvenční sonda, proto se s výhodou využívají jiné další techniky (např. phased array) [1].

2.5. Způsoby zobrazení signálu v konvenčním ultrazvuku

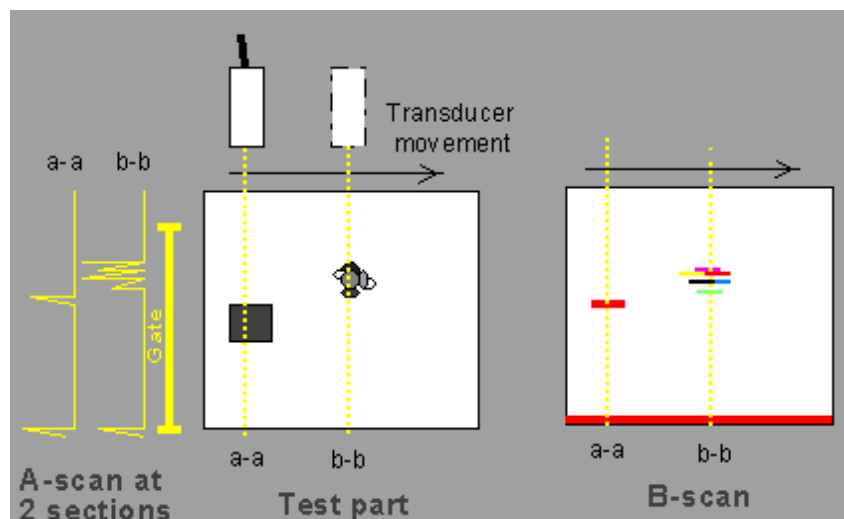
A – zobrazení - na ose X je zobrazována dráha ultrazvuku (časová základna kalibrovaná dříve v μs dnes výhradně v mm) a na ose Y je amplituda signálu (velikost odraženého signálu zpět do sondy) [1].

Charakteristiku tohoto zobrazení můžeme popsat pomocí obr. 2.6. V prvním případě (obr. 2.6 a) se při pohybu sondy mění výška koncového i vadového echa, neboť se jedná o odraz ultrazvuku na vadě plošného charakteru, kdy množství zpětně odraženého signálu závisí na úhlu dopadu na defekt. Za určitých podmínek (směr prozvučování paralelně s defektem) může dokonce dojít k úplnému vymizení vadového echa, neboť odrazná plocha je v tomto případě velmi malá a odražený signál zanikne vlivem útlumu či šumu v materiálu. V druhém případě (obr. 2.6 b) nebude výška echa záviset na pohybu sondy, protože odrazová plocha je stále stejná.



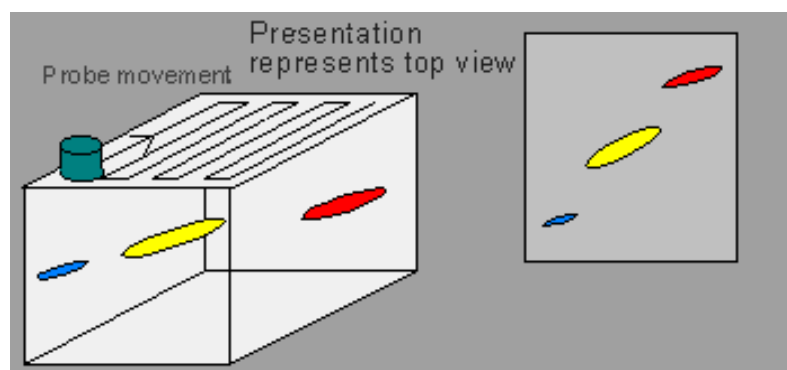
Obr. 2.6 „A – zobrazení“ [4]

B – zobrazení - ukazuje rozložení chyb v průřezu materiálu. Jde o dvourozměrné zobrazení, kde osa X reprezentuje dráhu sondy a na ose Y se zobrazuje hloubka zkoušeného materiálu. Amplituda echa se může zobrazovat dvěma způsoby. První způsob zobrazí vadu, pokud amplituda echa překročí nastavenou úroveň (obr. 2.7 B – scan vlevo), v našem případě červenou barvou. Při druhém způsobu se vada zobrazí v barevné paletě nebo v odstínech šedé (obr. 2.7 B – scan vpravo), barva zobrazení závisí na velikosti amplitudy [5].



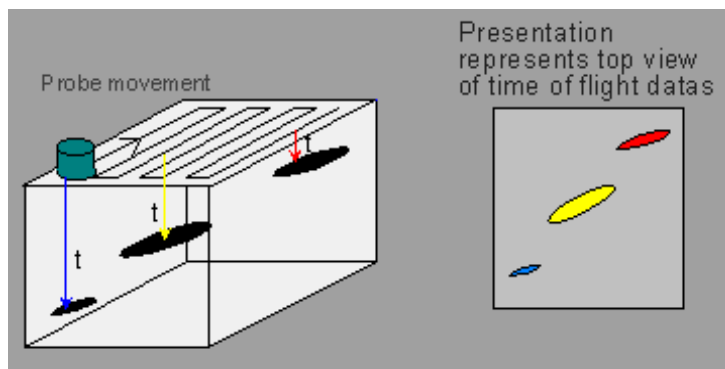
Obr. 2.7 „B - zobrazení“ [5]
 gate – brána (pomůcka při zobrazování)
 transducer movement – pohyb převodníku
 A-scan – A-zobrazení
 test part – zkoušená součást
 B-scan – B-zobrazení

C – zobrazení - zobrazuje rozložení chyb po ploše povrchu. Je to horní pohled na zkoušenou plochu (půdorysné rozložení vad v materiálu) [5]. Na obrázku 2.8 lze vidět příklad „půdorysného“ průmětu vad.



Obr. 2.8 „C - zobrazení“ [5]
 probe movement – pohyb sondy
 presentation represents top view – ukázka horního pohledu

D – zobrazení - podobně jako zobrazení „C“ ukazuje rozložení vad na ploše povrchu, ale ještě navíc dává informace o hloubce vady a to buď barevně, nebo stupnicí šedé. Na obr. 2.9 je naznačen princip D – zobrazení. Každá hloubka vady má přiřazenu barvu (odstín šedé) ve které se pak vada zobrazí [5].



Obr. 2.9 „D - zobrazení“ [5]

probe movement – pohyb sondy

presentation represents top view of time of flight datas – ukázka horního pohledu s odlišením doby průchodu

2.6. Základní typy konvenčních ultrazvukových sond

Ultrazvuková sonda je prvek ultrazvukového zařízení, který vysílá vlnění do zkoušeného materiálu a zachycuje echa od chyb. Vysílání a příjem ultrazvuku se uskutečňuje pomocí piezoelektrického měniče. Měnič je destička nejčastěji vyrobená z piezokeramiky, která reaguje na příchozí elektrický signál změnou své velikosti. Touto změnou se mění signál elektrický na mechanický.

Přímá sonda

Obsahuje měnič chráněný tvrdou otěruvzdornou vrstvou, tlumící tělísko a přizpůsobovací cívku (viz obr. 2.10). Sonda bývá uzavřena v kovovém pouzdře s konektorem, přičemž na kovový obal bývá vyveden jeden z elektrických kontaktů měniče. Tloušťka ochranné vrstvy se volí $1/4$ vlnové délky, aby nedošlo ke zkreslení či fázovému posunutí signálu. Tlumící tělísko je z materiálu s vysokým útlumem a jeho úlohou je mechanicky tlumit měnič tak, aby se dosáhlo co nejkratších impulzů. Sondy se vyrábějí s různými stupni tlumení a citlivostí. Přímé sondy se využívají tam, kde je přístupný jeden povrch a hledané vady jsou orientovány rovnoběžně s povrchem. Pomocí přímé sondy se nedají hledat vady typu trhliny, které jsou situované kolmo k povrchu [1].



Obr. 2.10 Přímá sonda [6, 7]

case – pouzdro, epoxy potting – epoxidové těsnění, backing material – tlumící materiál, electrodes – elektrody, piezoelectric element – piezoelektrický element, coaxial cable connector – konektor koaxiálního kabelu, signal wire – signální vodič, ground wire – zemnicí vodič, wear plate – otěruvzdorná vrstva

Úhlová sonda

Její základní princip je podobný přímé sondě, ale před měničem je plexisklový klín (obr. 2.11) a piezokrystal je u úhlových sond nakloněný o určitý úhel vzhledem k základně sondy. Při průchodu podélné vlny z plexiskla do zkoušeného materiálu nastává lom, ultrazvukový signál je tedy do materiálu vyslán pod určitým úhlem a podélná vlna se pak na rozhraní transformuje na příčnou. Úhel, pod kterým vlna vstupuje do materiálu, závisí na tvaru klínu a typu materiálu. Sonden jsou nejčastěji konstruovány pro úhly šíření příčné vlny v oceli 35°, 45°, 60° a 70°. Někdy se tvar plexisklového klínu upravuje podle tvaru zkoušeného povrchu [1].



Obr. 2.11 Úhlová sonda [8, 9]

Dvojitá sonda

U dvojité sondy jeden měnič pouze vysílá signál do materiálu a druhý měnič naopak jen přijímá odražený signál. Oba měniče jsou v jednom tělese, ale jsou odděleny akustickým těsněním, jak lze vidět na obrázku 2.12. Toto uspořádání se využívá k měření tloušťky materiálu a na zjišťování chyb ležících blízko pod povrchem [1].



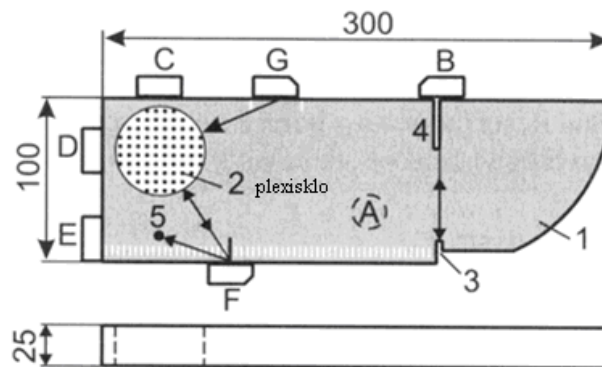
Obr. 2.12 Dvojitá sonda [10, 11]

external housing – vnější pouzdro, transmitting element – vysílací element, acoustic barrier – akustické těsnění, receiving element – přijímací element, connector – konektor
delay material – tlumící tělísko

2.7. Měrky a kalibrace

Aby byla ultrazvuková zkouška provedena správně je třeba přístroj před začátkem měření nejprve správně nastavit (kalibrovat jej). Kalibrace se provádí pomocí kalibračních měrek, které mají definovanou velikost, jakost povrchu a materiál. Pro kalibraci se často používá měrka K1 (ČSN EN 12223), která je na obrázku 2.13. Základní rozměry měrky K1 jsou: 300 x 100 x 25 mm, rádius R100, boční vývrty $\varnothing 50$ a $\varnothing 1,5$ mm [12].

Pomocí měrky K1 se dají pro přímé sondy provádět tyto úkony: kalibrace časové základny, kontrola a nastavení citlivosti, určení maximálního dosahu, určení hloubkové rozlišovací schopnosti, odhad délky mrtvého pásma. Pro úhlové sondy lze navíc určit bod výstupu svazku a úhel lomu [12].



Obr. 2.13 Měrka K1 [12]

2.8. Zhodnocení konvenční ultrazvukové metody

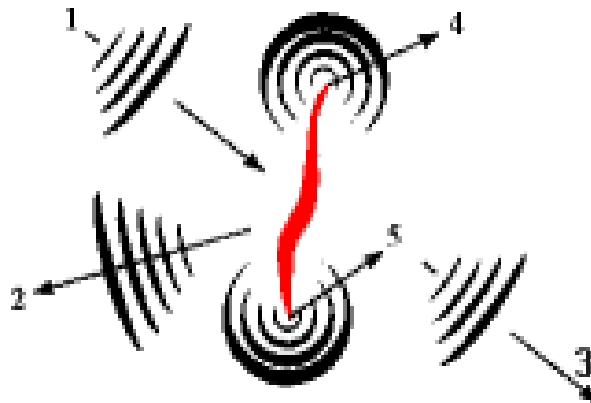
Konvenční ultrazvuková metoda má nedestruktivnímu zkoušení jistě stále co nabídnout. Jde o metodu, která lze poměrně jednoduše realizovat a není třeba velkých přístrojů. Pro některé aplikace je výbornou metodou zjišťování vad. Omezení této metody spočívá v tom, že aby bylo možné vady detekovat, musí mít defekt správnou orientaci a tvar. Další úskalí konvenční metody tkví ve vyhodnocení výsledků zkoušky. Existují sice metody které stanovují náhradní velikost vady, kdy se k echu od reálné vady přiřadí echo odpovídající plochému vývrtnu zhotoveném v etalonu, ale to na dostatečně přesné stanovení velikosti mnohdy nestačí. Také zkoušení součástí se složitou geometrií není jednoduché. Některé tyto nedostatky řeší modernější metody zkoušení ultrazvukem.

3. Moderní ultrazvukové metody

3.1 Metoda TOFD

Metoda TOFD (Time of Flight Diffraction) se překládá do češtiny jako difrakční technika měření doby průchodu a používá se téměř výhradně pro zkoušení svarů. Byla vyvinuta v r. 1985 v Harwelově centru (Velká Británie) pro zjišťování velikosti trhlin ve svarech jaderného reaktoru. Metoda TOFD je založena na interakci ultrazvukových vln s okraji vad a odražená vlna zde nehraje žádnou roli. Okraj vady při interakci s ultrazvukovou vlnou emituje difrakční vlny, jejichž tvar je na obrázku obr. 3.1.1. Z doby průchodu difrakčního signálu se pak určuje velikost vady. Na rozdíl od konvenční ultrazvukové metody se při hodnocení velikosti vady technikou TOFD nepoužívá velikost (amplituda) detekovaného signálu. Proto není tak závislá na změně kvality akustické vazby [1]. Difrakce

ultrazvukových vln je málo závislá na orientaci vady tudíž se mohou používat sondy se širokým úhlem rozevření svazku [11].

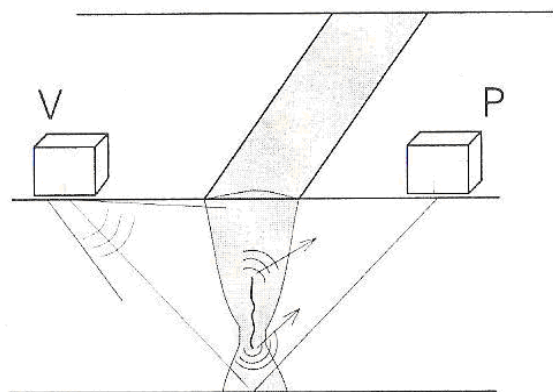


Obr. 3.1.1 Chování vlny při interakci s trhlinou [5]

- 1- vysílaná vlna
- 2- odražená vlna
- 3- vlna, která prošla vadou
- 4- difrakční vlna na horním okraji vady
- 5- difrakční vlna na dolním okraji vady

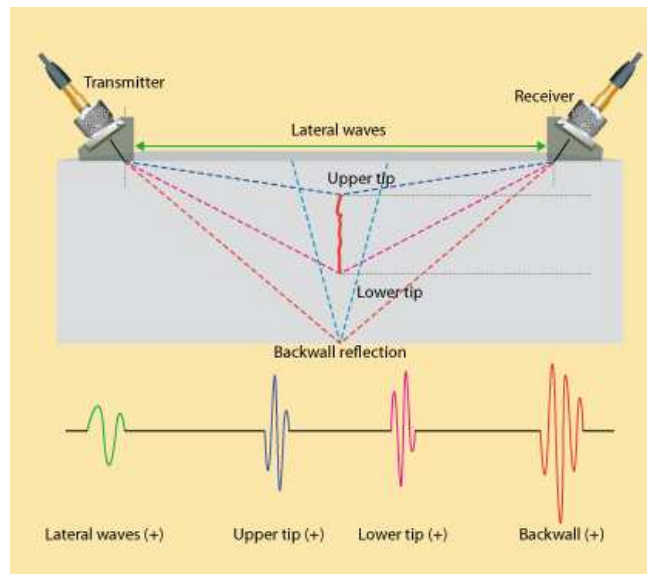
3.1.1 Uspořádání zkoušky

Při kontrole metodou TOFD se používá speciální držák sond (scanner), ve kterém je upevněna vždy jedna sonda jako vysílač a druhá jako přijímač. Schematické uspořádání je na obrázku 3.1.2. Sondy jsou pevně spojeny, aby mezi nimi byla konstantní vzdálenost a byla zachována také jejich sousost.



Obr. 3.1.2 Princip metody TOFD V – vysílač, P - přijímač[1]

Sonda do materiálu vysílá podélné ultrazvukové vlny. TOFD sondy obsahují poměrně malý měnič, aby se dosáhlo široce rozevřeného svazku a byl tak prozkoušen co největší objem materiálu. Frekvence zkoušení se obvykle volí v rozmezí 5 – 10 MHz a impuls krátký a silně ztlumený. Směr vysílaných a difrakčních vln je zobrazen na obr. 3.1.3. Pokud je ve zkoušeném materiálu vada, vzniká difrakční vlna a ta je detekována přijímačem. Jako první dorazí do sondy povrchová vlna, o něco později pak difrakční vlna od horního okraje vady, poté vlna od dolního okraje vady a nakonec vlna odražená od protilehlého povrchu. Z doby příchodu jednotlivých vln do snímače se posléze spočítá hloubka a příčný rozměr vady [12].

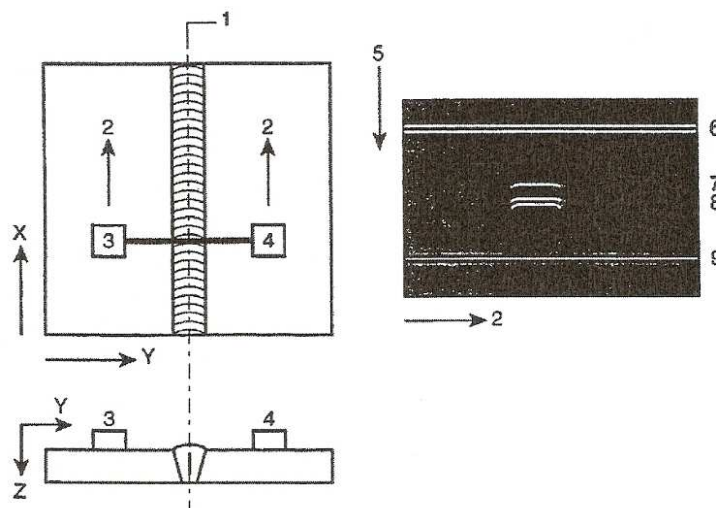


Obr. 3.1.3 Dráhy vln [13]

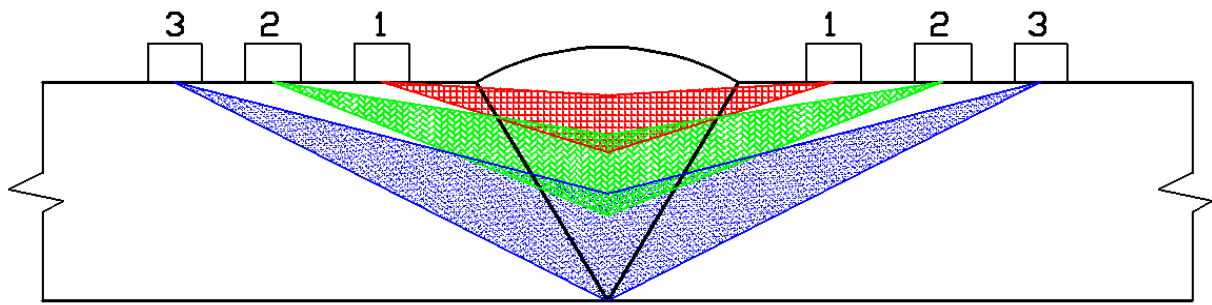
lateral waves - laterální vlny, transmitter – vysílač
 receiver – přijímač, upper tip – horní špička
 lower tip – dolní špička, backwall reflection – odraz od protilehlé stěny

3.1.2. Metody zkoušení technikou TOFD

Při zkoušení svarů pomocí techniky TOFD se používají dvě metody skenování. Při nerovnoběžném skenování se sondy pohybují podél svaru a vzdálenost sond od svaru se nemění. Na levé straně obr. 3.1.4 je znázorněn posuv sondy a na pravé pak typické „B – zobrazení“ vady (viz kap. 2.5). Tento způsob skenování informuje o délce, výšce a hloubce vad, které jsou v rovině mezi sondami, ale vady se mohou vyskytovat kdekoli v této výšce. Proto se také používá rovnoběžné skenování, které tento problém řeší [11]. Pokud je výška svarového spoje natolik velká, že celý jeho objem nelze prozvučit na jeden průchod sond, používá se více průchodů s rozdílně nastavenou vzdáleností sond a objem se pak hodnotí v několika sektorech (např. typické rozdělení na jednotlivé třetiny výšky svarového spoje je na obrázku 3.1.5).

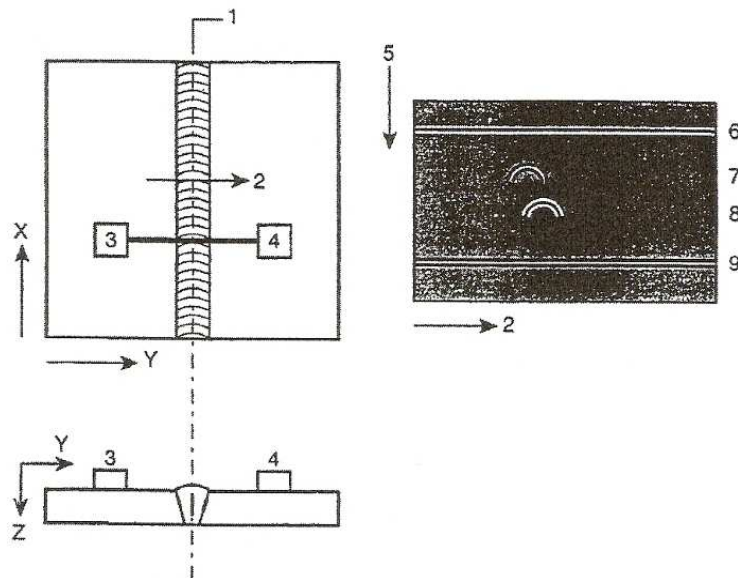


Obr. 3.1.4 Nerovnoběžné skenování. 1- referenční linie (svar), 2 – směr posuvu sondy (x-směr), 3 – vysílač, 4 – přijímač, 5 – doba průchodu (ve směru hloubky), 6 – signál povrchové vlny, 7 – signál od horního vrcholu vady, 8 – signál od spodního vrcholu vady, 9 – odraz od protilehlé stěny (koncové echo) [11]



Obr. 3.1.5 Skenování na více průchoďů. 1, 2, 3 – pořadí průchoďu dvojice vysílač přijímač

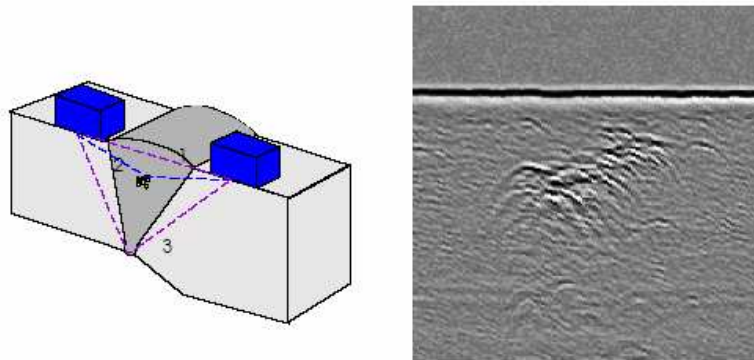
Druhou metodou je rovnoběžné skenování, při němž se sondy pohybují kolmo na svar, přičemž vzdálenost sond od svaru se mění. Obrázek 3.1.6 schematicky ukazuje tuto metodu a typické zobrazení vady. Jak bylo řečeno výše, tato metoda zpřesňuje odhad polohy vady. Při pohybu kolmo na svar indikace vady stoupají, až když je dosaženo nejmenší vzdálenosti od povrchu, potom by měla vada být symetricky mezi sondami a odhad hloubky vady by měl být nejpřesnější [11].



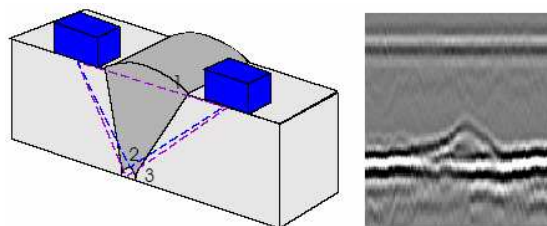
Obr. 3.1.6 Rovnoběžné skenování. 1- referenční linie (svar), 2 – směr posuvu sondy (y-směr), 3 – vysílač, 4 – přijímač, 5 – doba průchoďu (ve směru hloubky), 6 – signál povrchové vlny, 7 – signál od horního vrcholu vady, 8 – signál od spodního vrcholu vady, 9 – odraz od protilehlé stěny (koncové echo) [11]

3.1.3. Zobrazení signálu v metodice TOFD

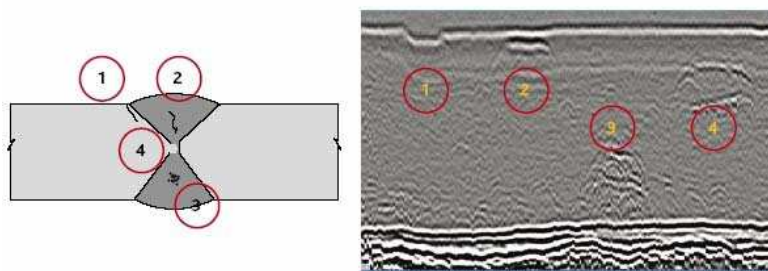
Technika TOFD využívá obdobu „B – zobrazení“ (viz kap. 2.5). Vnitřní vady se zobrazují jako paraboly a z rozdílu výšek se dá odhadnout výška defektu. Na obrázku 3.1.7 vpravo vidíme mnoho různých parabol, z toho se dá usuzovat, že je v materiálu více difrakčních vln a vada nemá ostré okraje. Pokud je vada spojená s horním povrchem, potom jsou indikace od spodního vrcholu doprovázeny snížením nebo přerušením laterální vlny (viz obr. 3.3). Podobně platí, že pokud jsou indikace od horního vrcholu vady doprovázeny posunem echa od protilehlého povrchu směrem k delší době průchoďu, nebo jsou přerušeny, jak lze vidět na obrázku 3.1.8, pak je vada spojena s protilehlým povrchem [11]. Na obrázku 3.1.9 je ukázka jak se mohou zobrazovat některé vady.



Obr 3.1.7 „B – zobrazení“ pórovitosti technikou TOFD
1 – laterální vlna 2 – indikace naznačující přítomnost vady [12]



Obr 3.1.8 Zobrazení vady spojené s protilehlým povrchem.
1- laterální vlna, 2 – echo od horního okraje vady, 3 – echo od protilehlého povrchu [12]



Obr 3.1.9 Zobrazení vady v průřezu materiálu.
1- povrchová trhlina, 2 – šikmá trhlina v centrální části, 3 – pórovitost,
4 – nevyplněný kořen [12]

3.1.4. Sondy pro techniku TOFD

Technika TOFD používá sondy vysílající výhradně podélné vlny, příčné vlny se používají jen ve speciálních případech. Obvykle se používají sondy se střední frekvencí od 5 do 10 MHz a obě sondy musí mít stejnou střední frekvenci (povolená odchylka je 20%). Konstrukce sond pro metodu TOFD je stejná jako u konvenčních úhlových sond s tím rozdílem, že sondy pro metodu TOFD mají úchyty kterými je lze připojit k držáku (scanneru). Pro kontrolu se používají úhly od 45° do 70°. Na obrázku 3.1.10 je několik těchto sond, přičemž u prostřední sondy lze vidět dva šrouby umožňující přívod vazebního prostředku [11]. Obrázek 3.1.11 ukazuje, jak může vypadat přístroj pro ruční zkoušení metodou TOFD. Dvě sondy jsou uchyceny v rámu a pomocí zařízení na pravém rameni (kodéru) se zaznamenává poloha přístroje. Skener může být i automatický, pak je jeho pohyb zajištěn servomotory.



Obr. 3.1.10 TOFD sondy [13].



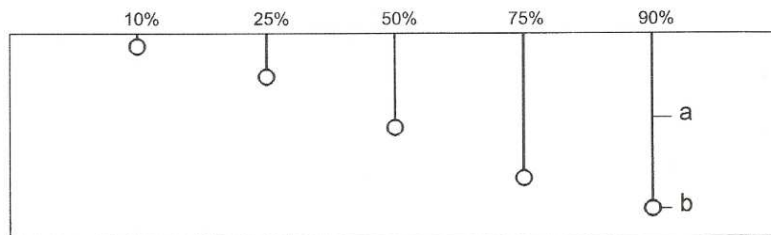
Obr 3.1.11 TOFD skener pro ruční zkoušení [12].

3.1.5. Měrky a kalibrace zařízení TOFD

Účelem měrky je správné nastavení citlivosti a získání vhodného pokrytí objemu. Na obrázku 3.1.12 je náčrt možného provedení měrky pro kalibraci zařízení pro techniku TOFD.

Na měrky jsou kladeny následující požadavky:

- doporučuje se vyrábět je ze stejného materiálu jako zkoušený objekt
- tloušťka stěny musí být stejná nebo větší než je jmenovitá tloušťka objektu
- šířka a délka skenované plochy musí být dostatečná pro pohyb sondy
- doporučuje se, aby referenční difraktory (umělé vady) byly k dispozici v přibližně 10%, 25%, 50%, 75% a 90% jmenovité tloušťky zkoušeného objektu.
- Referenční difraktory jsou buď drážky otevřené k povrchu, nebo boční vývrty s průměrem minimálně dvojnásobným než je vlnová délka použité sondy [11]



Obr. 3.1.12 Nákres měřky využívající boční vývrty jako referenční difraktory [11]

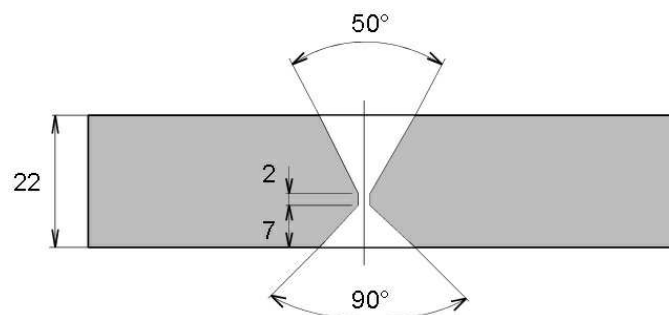
3.1.6. Příklady aplikací metody TOFD v technické praxi

3.1.6.1. Zkoušení obvodového svaru čpavkové tlakové nádoby metodou TOFD

Cílem zkoušky bylo předvést možnosti techniky TOFD na reálných vadách vyskytujících se u svarových spojů tlakových nádob a poskytnout materiál pro porovnání zjištěných ultrazvukových nálezů s výsledky zkoušky prozařováním a metodou Phased Array [14].

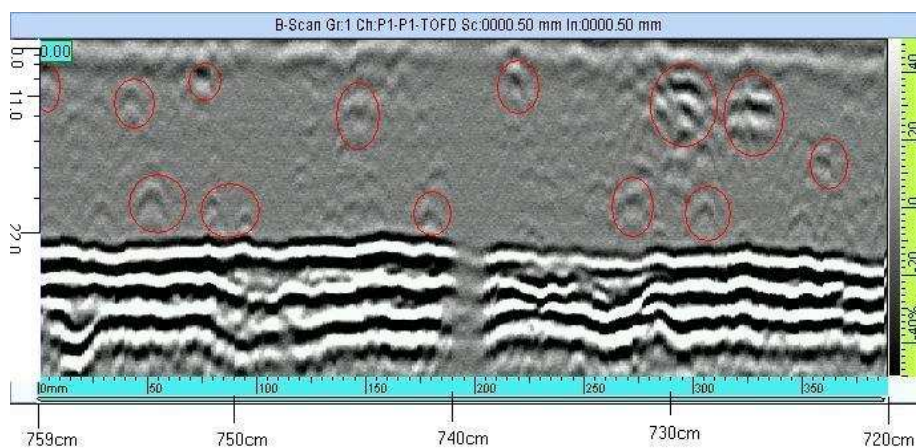
Popis kontrolovaného objektu:

Nádoba byla horizontální tlaková nádoba na čpavek. Měla průměr 2800 mm, se svařovaným pláštěm o tloušťce stěny 22 mm. Obvodové svary byly typu X a jejich náčrt je uveden na obrázku 3.1.13. Nádoba byla vyrobena z materiálu 11418.1. Zkouška byla požadována na vybraném úseku obvodového svaru [14].



Obr. 3.1.13 Tvar svarového spoje [14].

Při zkoušce byly použity sondy o průměru 6 mm, frekvencí 5MHz, krátkým impulzem a s 60° klínem. Sondy byly vzdáleny 80 mm. Záznam ze zkoušky je na obrázku 3.1.14



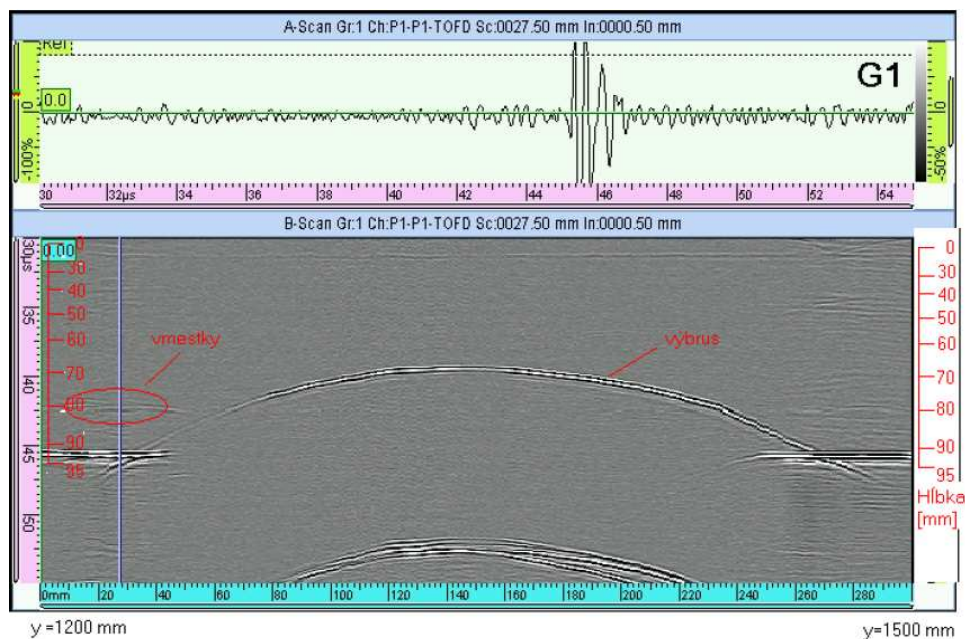
Obr. 3.1.14 vybraný úsek obvodového svaru [14]

Z výsledků zkoušky se zjistilo, že nejvíce přítomných vad ve svarovém spoji zachytila metoda TOFD, pak Phased array, následně prozařování přes jednu stranu, dále klasický ultrazvuk a nakonec prozařování přes dvě strany [14].

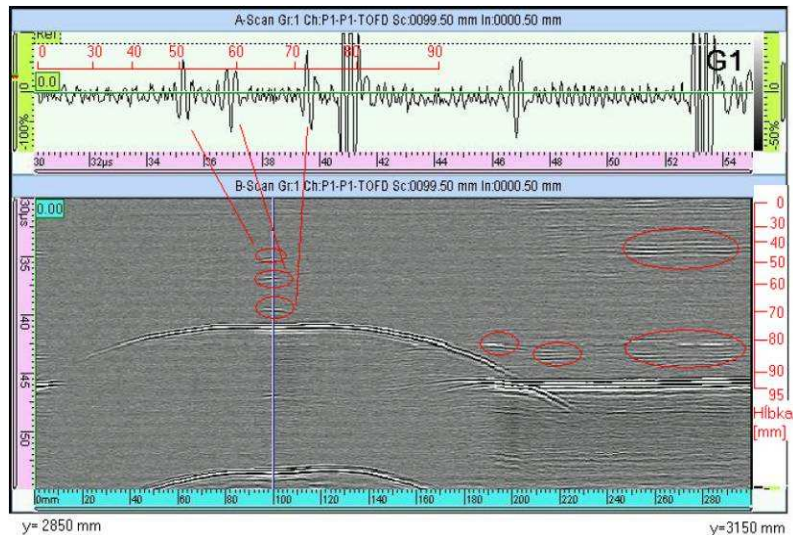
3.1.6.2. Využití techniky TOFD při zkoušení dlouhodobě provozovaných tlakových nádob

Při zkoušení dlouhodobě provozovaných tlakových zařízení se po NDT metodách požaduje, aby byly schopny včas zjistit rozvoj defektů ve svarových spojkách a zkontrolovat ta místa, kde byly vady odstraněny. Nejběžnější způsob opravy je vybroušení chyby s plynulým přechodem do okolního materiálu. Místo opravy se pak musí pravidelně kontrolovat, nedochází-li k šíření defektu. Pokud oprava vybroušením změní původní geometrii nádoby, vznikají při zkoušení konvenční ultrazvukovou metodou tvarová echa s velkou amplitudou. Tyto echa pak ztěžují hodnocení zkoušky, protože klasická metoda nepracuje s difrakčními vlnami [15]. Proto se metoda TOFD, která s difrakčním jevem pracuje, jeví jako výborný prostředek pro tento případ.

Tlaková nádoba s tloušťkou stěny 92 mm byla provozována více než 25 let. Při odstávce byla pravidelně kontrolována klasickou ultrazvukovou metodou a jednou za 4 roky se prováděla magnetická prášková kontrola. Ta zjistila nepřijatelné vady, které byly odstraněny vybroušením. Z provozních důvodů ale nebylo možné nádobu otevřít každý rok, a proto se místa výbrusů následující roky zkoušely znova konvenční ultrazvukovou metodou. Prováděla se zkouška s vyhodnocováním metodou AVG (echo od reálné vady se porovnává s echem od uměle vytvořené vady a z výsledků se odhadne velikost skutečné vady[1]). Při poslední kontrole svaru byla kromě klasické metody použita také metoda TOFD. Na obrázcích 3.1.15 a 3.1.16 je porovnání dvou záznamů ze zkoušky na výbruse. Na obr. 3.1.15 je výbrus bez vad, ale na druhém obr. lze vidět krátké indikace. Při zkoušení stejných míst klasickou metodou byly pouze vidět silná tvarová echa od dna a stěn nádoby [15].



Obr. 3.1.15 Záznam zkoušky výbrusu bez vad [15].

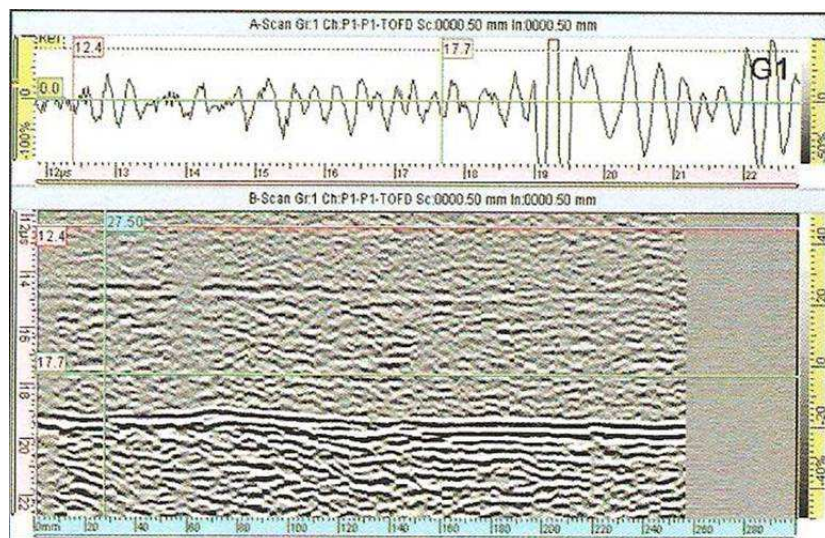


Obr. 3.1.16 Záznam zkoušky výbrusu s vadami v hloubce kolem 50, 60 a 70 mm [15].

3.1.6.3 Zkoušení heterogenních a austenitických svarů metodou TOFD

V jaderné energetice a těžkých chemických provozech se můžeme setkat s požadavky na zkoušení heterogenních svarů, které spojují feritické a austenitické komponenty a také s problémem zkoušení austenitických svarů. V tomto případě šlo o testovací svary simulující svary potrubí s průměrem 351 mm a tloušťkou stěny 36 mm. Ve svarech byly uměle vytvořené vady a také přirozené vady, které by se mohly v reálném svaru vyskytovat [16].

Při zkoušce metodou TOFD byly použity sondy o průměru 5 mm, frekvence 5 MHz a s klíny pro podélnou vlnu 45°. Vzdálenost sond byla 80 mm. Při zkoušce se zjistilo, že není možné odlišit difrakční echa od nečistostí od šumu na pozadí, který je způsoben hrubozrnnou lící strukturou. V důsledku útlumu ultrazvukové vlny nebyla zkouška průkazná jak při zkoušení heterogenních tak austenitických svarů. Záznam zkoušky je na obrázku 3.1.17 a jak je vidět obraz je neprůkazný [16].



Obr. 3.1.17 Záznam zkoušky heterogenního svaru [16].

Tento případ dokazuje, že ani technika TOFD není neomezeně aplikovatelná a má i svá omezení.

3.1.7. Zhodnocení použitelnosti a vhodných aplikací metody TOFD

Hlavní význam metody TOFD je určování hloubkových rozměrů vad. Jednoduchost koncepce umožňuje aplikovat tuto metodu na různých komponentách a není omezena jejich tvarovou složitostí. Metoda má však i několik omezení, například jako všechny ultrazvukové metody je i tato omezena velikostí zrna zkoušeného materiálu. Na nedestruktivní zkoušení svarů se často také používá metoda prozařováním. V tabulkách č. 3 a č. 4 je porovnání citlivosti a náročnosti těchto dvou metod.

Tab. 3 Porovnání citlivosti metod TOFD a prozařování [12]

Typ chyby	UT TOFD	Radiografie
Povrchová/ podpovrchová trhлина	Délková i hloubková rozlišitelnost	Délková rozlišitelnost
Šikmé trhliny v centrální části	Délková i hloubková rozlišitelnost	Nedetekovatelné když nejsou kolmo
Pórovitost	Délková rozlišitelnost	Délková rozlišitelnost
Nevyplněný kořen	Délková i hloubková rozlišitelnost	Délková rozlišitelnost

Tab. 4 Porovnání metod TOFD a prozařování na rtg. filmy [12]

	UT TOFD	Radiografie
Ochranná opatření	Ne	Ano
Inspekční čas	Krátký	Dlouhý
Výsledky v reálném čase	Ano	Ne
Spotřeba materiálu	Nízká/sondy	Vysoká/filmy
Energetické nároky	Bateriový provoz	Nutnost připojení na zdroj
Archivace údajů	Digitální	Fyzická

Rozdíly od konvenčního ultrazvuku:

- Metoda je téměř nezávislá na orientaci vady.
- Určení hloubkového rozměru vady nezávisí na amplitudě přijímaného signálu.

Výhody:

- Přesnost určení rozměrů vad.
- Kolísání akustické vazby nemá velký vliv na hodnocení velikosti vady.
- Efektivní detekce různě orientovaných vad.
- Digitální záznam dat zkoušky (záznam průřezu s vadami).

Nevýhody:

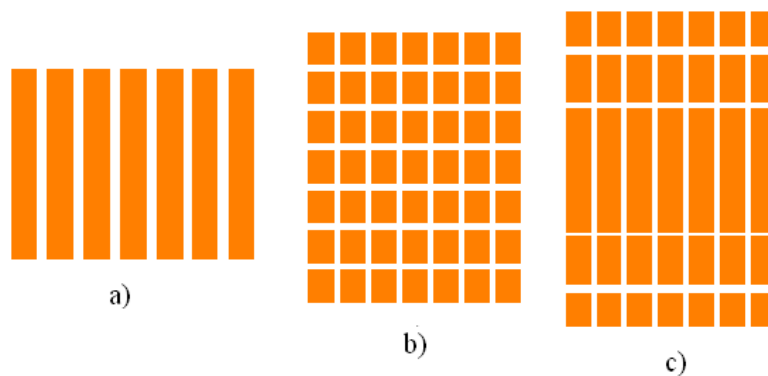
- Není snadné určit hranici, za kterou je vada považována za významnou (nároky na obsluhu).
- Všechna data ze zkoušky musí být vizuálně kontrolována.
- Nehodí se na určování defektů blízko povrchu, protože echo od vady může být skryto echem od laterální vlny a přesnost při určování velikosti vady rapidně klesá s blízkostí zkoušeného povrchu [17].

3.2. Metoda phased array

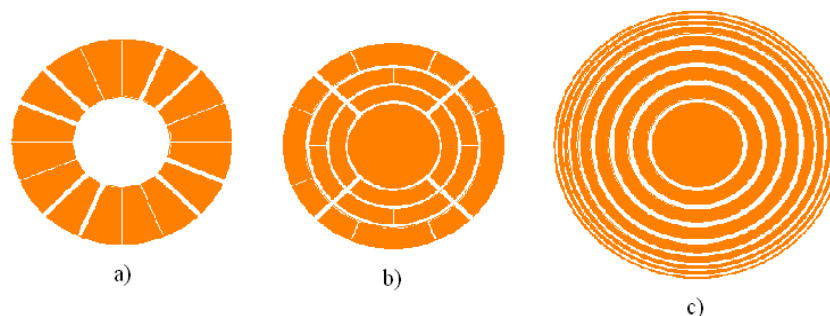
Princip metody phased array je znám již dlouho, ale její rozšíření umožnil až vývoj ve výrobě piezokomponentů ultrazvukových sond v 90. letech 20. století, kdy do ultrazvukové defektoskopie postupně pronikl tento princip z medicíny. Metoda phased array vznikla, protože klasická metoda nesplňovala požadavky, které na ni kladly zkoušky v jaderné energetice, např. zlepšit rozlišitelnost při zkoušení heterogenních svarů, možnost detekovat malé trhliny v geometricky složitých součástech, zvýšit přesnost při určování velikosti vady, možnost detekovat náhodně orientované vady jednou sondou z jedné pozice, aj. [1].

3.2.1. Konstrukce phased array sondy

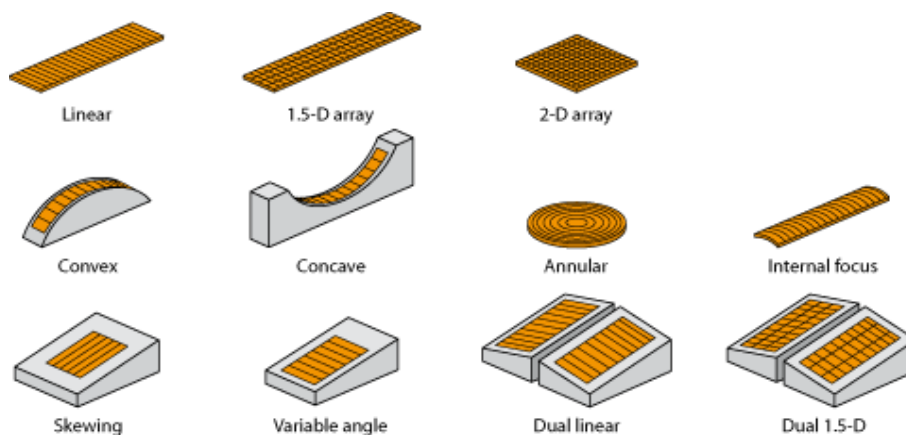
Hlavní rozdíl mezi sondou pro phased array a klasickou konvenční sondou je v tom, že klasická sonda má pouze jeden element pro změnu elektrického signálu na mechanickou vlnu, zatímco sonda pro phased array se skládá z mnoha elementů, které pracují nezávisle na sobě. Každý z měničů přijímá svůj vlastní vysílací impulz a také každý měnič funguje jako přijímač. V sondě mohou být tyto měniče různě uspořádány. Nejčastěji se používá lineární uspořádání (Obr. 4.1 *a*), protože je lze jednoduše vyrobit a realizovat, ale umožňuje fokusaci jen v jedné ose. Další typy uspořádání jsou na obrázku 3.2.1 – *b* (2D čtvercové) a 3.2.1 *c* (1,5D čtvercové). Měniče mohou být také uspořádány do prstence (obr 3.2.2 *a*, *b*, *c*), pak se dá paprsek velice dobře fokusovat do hloubky a dají se tak rozlišit i drobné vady. Obr. 3.2.3 pak ukazuje různé plošné zakřivení měničů. Phased array sonda má také jako konvenční úhlové sondy plexisklovou předsádku [18].



Obr. 3.2.1 Různé způsoby uspořádání měničů *a*) 1D lineární, *b*) 2D čtvercové, *c*) 1,5D čtvercové [18].



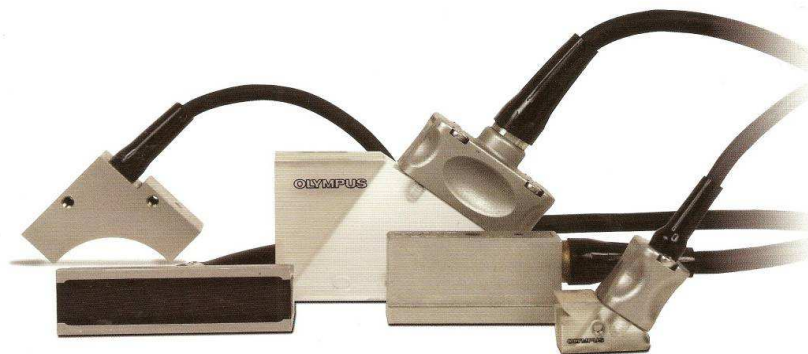
Obr. 3.2.2 Uspořádání měničů *a*) kruhové, *b*) 2D prstencové, *c*) 1D prstencové [18]



Obr. 3.2.3 Různé tvary a uspořádání měničů [18]. linear – lineární, 1,5-D array – 1,5-D čtvercové, 2D array – 2D čtvercové, convex – konvexní, concave – konkávní, annular – prstencové, internal focus – vnitřně fokusované, skewing – zkosené, variable angle – s proměnným úhlem, dual linear – dvojité lineární, dual 1,5-D – dvojité 1,5-D

3.2.2. Druhy phased array sond

Sondy phased array se dají podle účelu nebo vlastností rozdělit do několika skupin, jsou to: pro všeobecné použití, pro hluboký průnik, inspekci svarů, pro zkoušky tenkých stěn, imerzní sondy, s integrovaným klínem a zakřivené sondy. Několik typických představitelů jednotlivých skupin je na obrázku 3.2.8 [19].

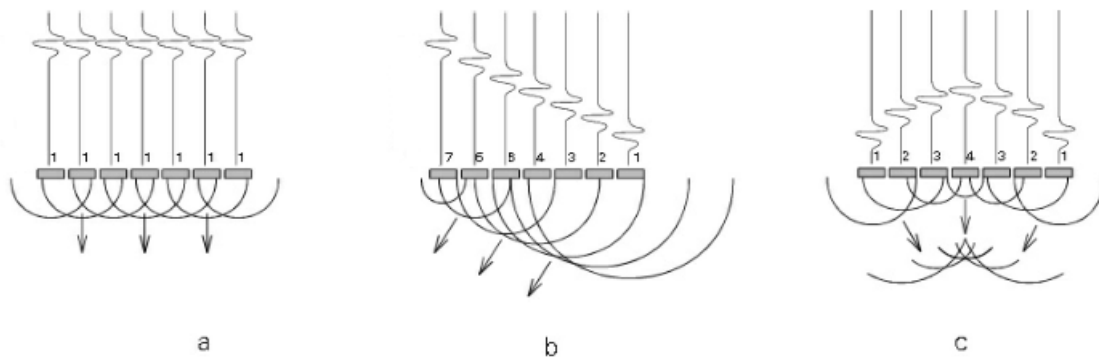


Obr. 3.2.4 Provedení sond phased array. zleva: zakřivená sonda, sondy pro všeobecné použití bez a s klínem, sonda pro imerzní zkoušení a malá sonda s klínem [19]

3.2.3. Princip sondy phased array - modifikace vlny

Podle Huygensova principu platí, že z každého bodu zdroje vlnění se šíří elementární kulová vlna. Obálka těchto elementárních vln vytváří výslednou vlnoplochu a každý bod vlnoplochy se následně stává bodovým zdrojem vlnění, které se pak do okolí šíří do všech stran [1]. Tohoto mechanismu se pak využívá při modifikaci ultrazvukového paprsku v technice phased array.

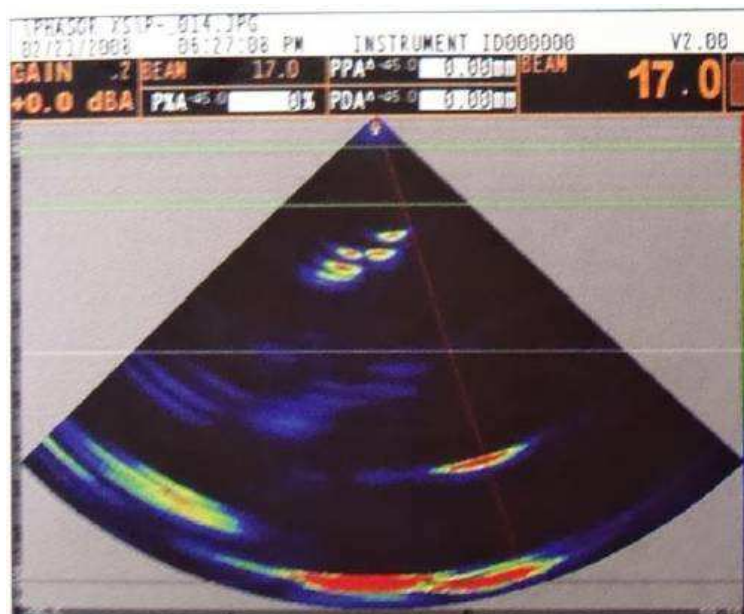
Pokud do phased array sondy přijde signál současně do všech měničů, pak výsledná vlna směřuje přímo pod sondu (obr. 3.2.5a) a funguje stejně jako u klasické metody. Různou změnou času příchodu signálu do jednotlivých elementů se dá výsledná vlna různě modifikovat, jak lze vidět na obrázku 3.2.4b a 3.2.5c. Řízením jednotlivých elementů lze: optimalizovat velikost měniče, naklápět svazek, soustředit svazek a simulovat pohyb sondy [1].



Obr 3.2.5 Různé modifikace vlny, čísla vyjadřují, kdy přijde signál do měniče. a) sonda bez modifikace b) naklápění svazku c) zaměření do jednoho místa [15]

3.2.4. Zobrazení signálu v technice phased array

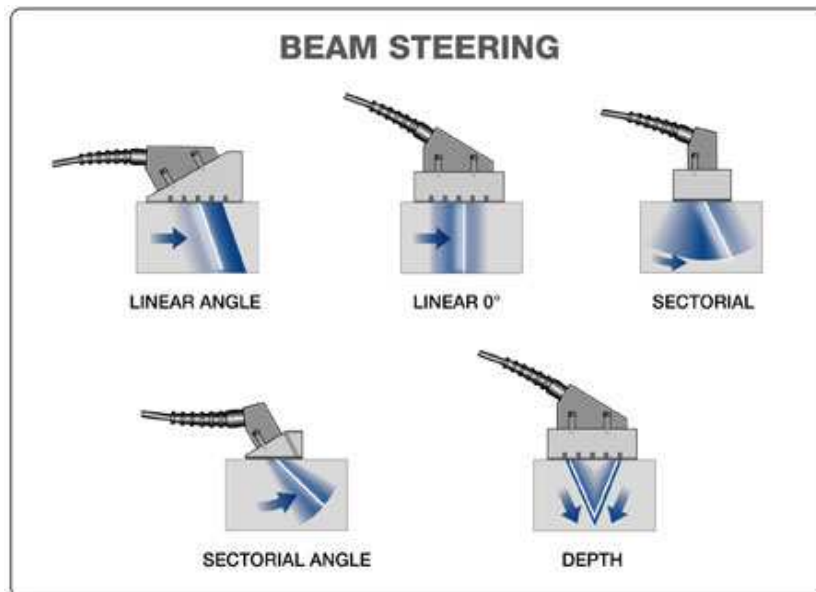
Sonda phased array v sobě slučuje přímou a úhlovou sondu konvenční ultrazvukové metody. Z jedné pozice sondy je možno skenovat prostor pod ní v různých úhlech, výsledné zobrazení se nazývá S – zobrazení (S – scan). Lze si jej představit jako mnoho A – zobrazení poskládaných vedle sebe (viz obr. 3.2.6), kde je amplituda zvýrazněna barevně [5]. Software pro vyhodnocování techniky phased array lze nastavit tak, že do S – zobrazení promítá obrysy zkoušené součásti, pak si lze udělat lepší představu o umístění vad S - zobrazení se už mnoho let používá v medicíně při vyšetření ultrazvukem.



Obr. 3.2.6 „S – zobrazení“ v technikou Phased array [20]

3.2.5. Metody skenování technikou phased array

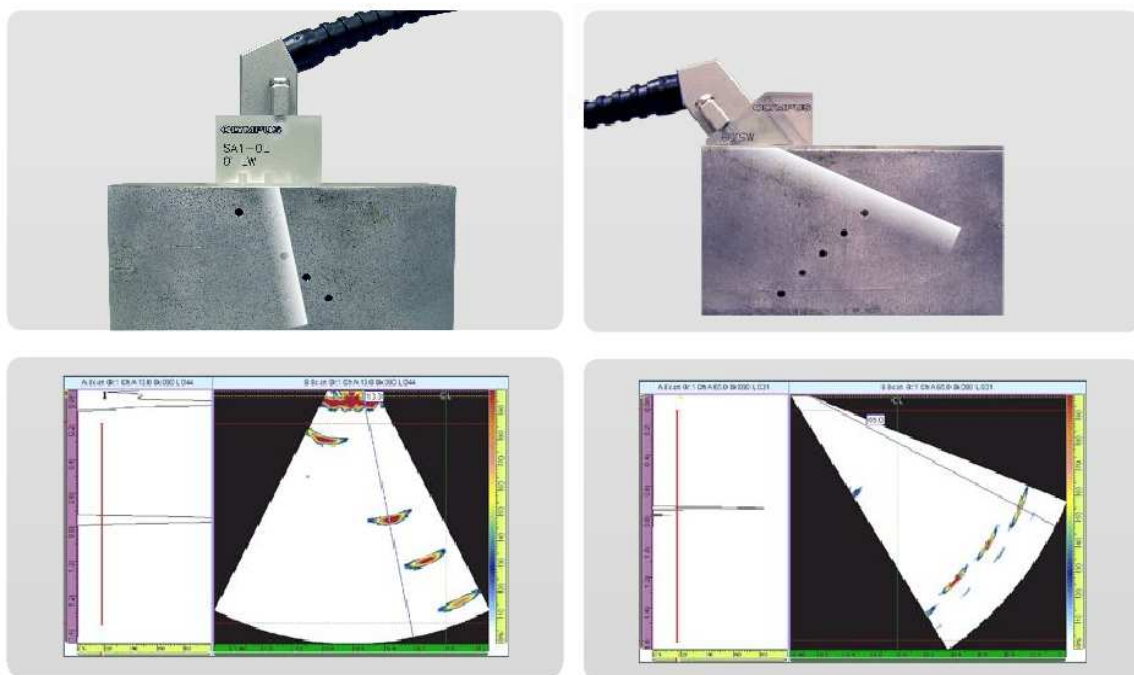
Sonda phased array umožňuje několik možností řízení ultrazvukového paprsku, obrázek 3.2.7 ukazuje přehled různých metod skenování.



Obr. 3.2.7 Ukázka řízení paprsku. beam steering – řízení paprsku, lineag angle – lineární pod úhlem, linear 0° - lineární, sectorial – sektorové, sectorial angle – sektorové pod úhlem, depth – do hloubky [18]

Při lineárním skenování vysílá vlnu jen jedna skupina měničů. Signál směřuje buď přímo pod sondu, nebo je mírně skloněn (asi do 10°). Nastavením doby příchodu signálu na skupinu měničů je možno ultrazvukový paprsek soustředit do určité hloubky materiálu a vytvořit tak vlnu s takovou amplitudou, kterou by nebylo možno dosáhnout klasickou metodou. Odražené echo je pak snímáno jednotlivými elementy nebo skupinami elementů. Při zkoušení klasickou metodou s jedním měničem se zaznamenává „průměrná“ amplituda odražené vlny, ale metoda phased array umožňuje, aby každý jednotlivý element zaznamenal dobu příchodu a amplitudu odraženého echa nezávisle na ostatních. Záznam takového množství informací klade vysoké nároky na software, který je zpracovává, ale po zpracování dostáváme přesnější prostorové zobrazení vady a můžeme snadněji rozlišovat echa od vad a tvarové indikace. Přesnost zobrazení vady závisí na počtu elementů, které přijímají signál, přičemž platí, že čím více elementů přijímá odražené echo, tím je obraz ostřejší [18].

Sektorové skenování je jedinečné pro metodu phased array, jeho podstata je v tom, že ultrazvukový paprsek je vysílán do materiálu postupně v různých úhlech. Také při této metodě se využívá toho, že lze paprsek soustředit do relativně úzkého svazku. Provádí se to seřízením doby příchodu signálu do jednotlivých měničů. Čím více má sonda elementů tím lépe, ale s množstvím elementů roste její cena. Při této metodě se mohou používat sondy s plexisklovým klínem, aby se dosáhlo požadovaného úhlu skenování. Na obrázku 3.2.8 vlevo nahoře probíhá skenování v rozmezí -30° do +30° a vpravo nahoře lze vidět, že skenování probíhá v rozmezí od +30° do +70° [18].

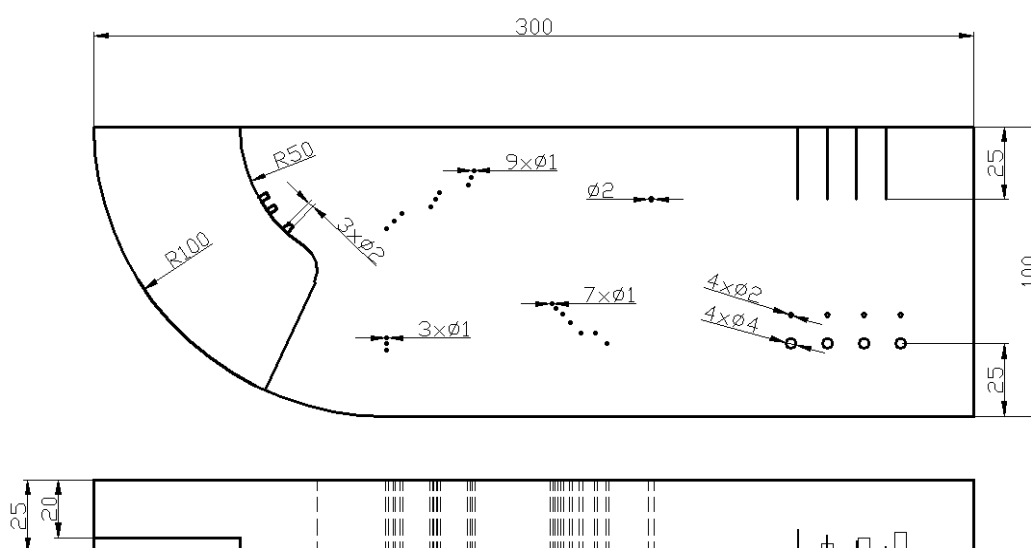


Obr. 3.2.8 Sektorové skenování [18]

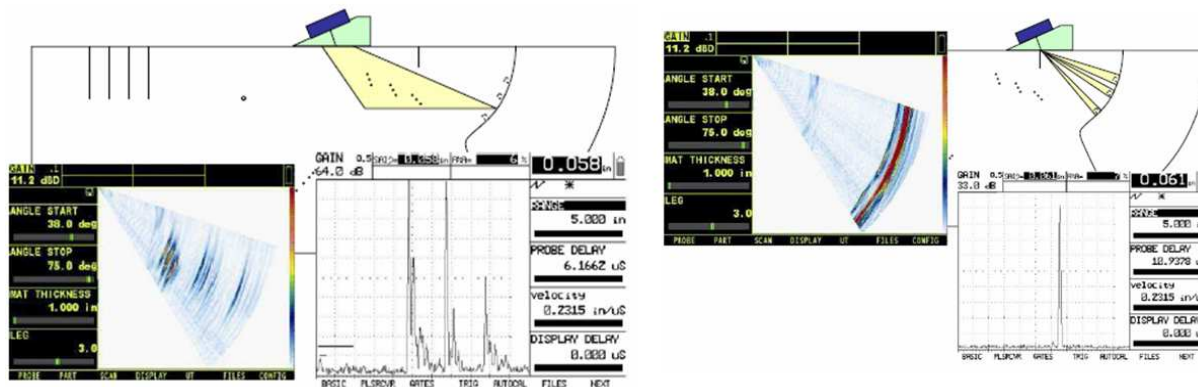
3.2.6. Měrky pro phased array

Kalibrační měrka používaná pro metodu phased array není zatím normalizována. Měrky se v detailech mohou lišit podle výrobce, ale základ je podobný měrce K1, která je navíc opatřena několika vývrty a zářezy. Na obrázku 3.2.9 je jedno z možných provedení.

Vývrty, o průměru 1 mm v levé horní části jsou pod úhly 35° , 45° a 75° a používají se na nastavení rozlišení přístroje (viz obr. 3.2.10 vlevo). Na vývrtech s průměrem 2 mm, které jsou umístěny na zaoblené části, se nastavuje citlivost přístroje tak, aby echa od vývrťů byly rozlišitelné od koncového echa (obr. 3.2.10 vpravo). Skupina sedmi 1 mm vývrťů se používá pro kalibraci rozlišení na několika nesterjně vzdálených vývrtech [21].



Obr. 3.2.9 Phased array měrka [21].

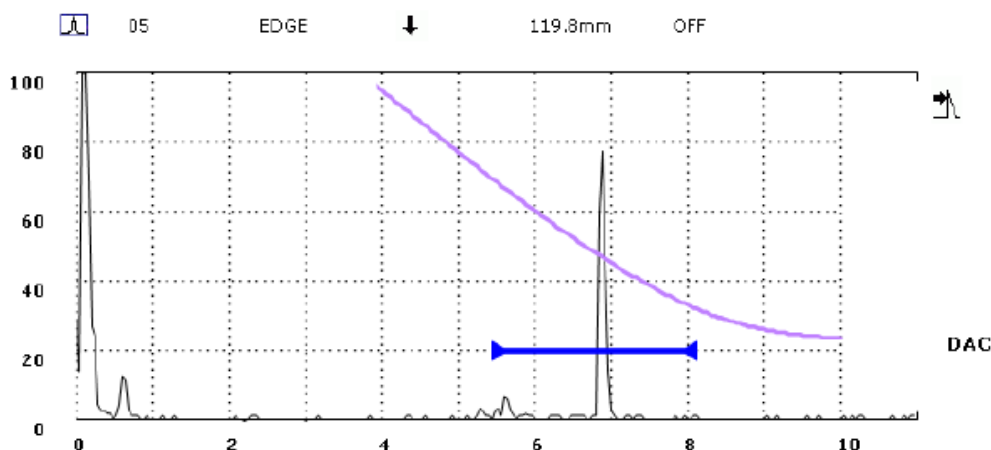


Obr. 3.2.10 Kalibrace sond a její zobrazení [21].

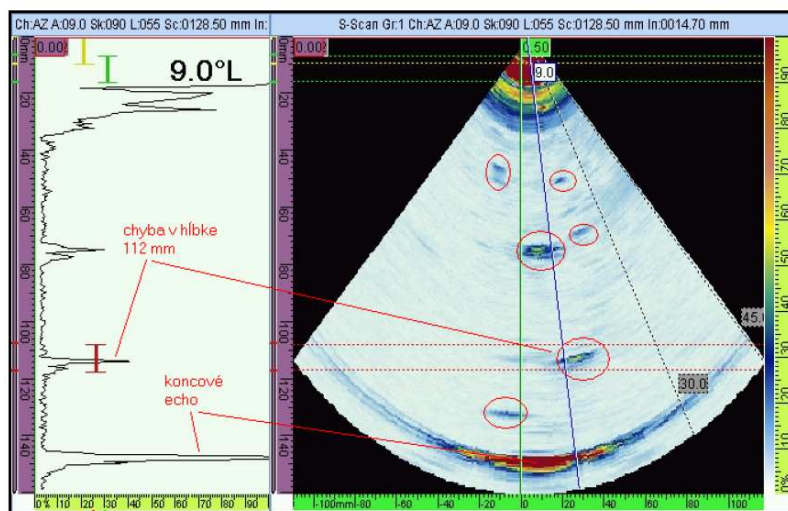
3.2.7. Praktické příklady využití metody phased array

3.2.7.1. Využití techniky phased array při zkoušení dlouhodobě provozovaných tlakových nádob

Tlaková nádoba s tloušťkou stěny 145 mm byla v provozu více než 25 let. Při pravidelných odstávkách byla kontrolována klasickou odrazovou metodou. Už při výstupní kontrole ve výrobě byla zjištěna v jednom místě svaru vada, její velikost však byla těsně pod hranicí přípustnosti. Muselo se kontrolovat, jestli nedochází k rozvoji defektu. V předchozích letech byla kontrola prováděna klasickou metodou, výsledné A – zobrazení je na obrázku 3.2.11. Při kontrole metodou phased array na stejném místě bylo zjištěno, že se nejedná o jednu vadu, jak by se mohlo z A – zobrazení zdát, ale o několik menších defektů, jak lze vidět na obrázku 3.2.12. S- scan dává i více informací o umístění a orientaci vad [15].



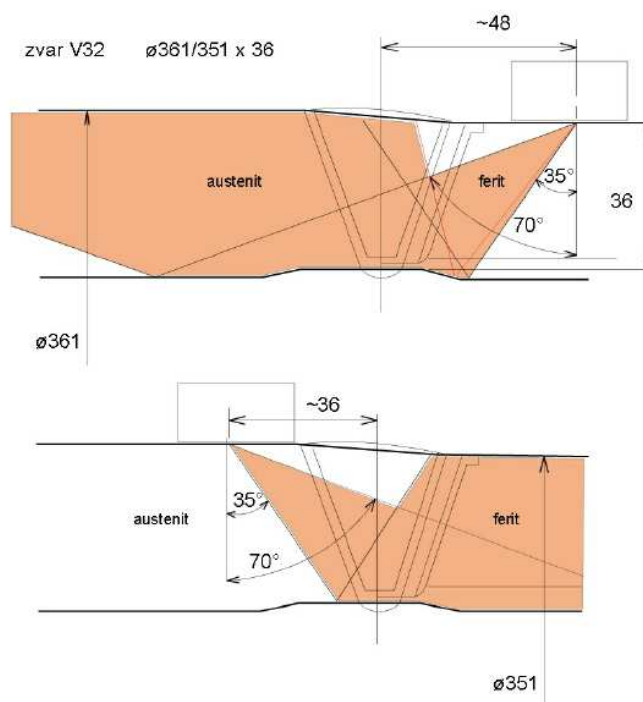
Obr. 3.2.11 A – zobrazení klasické metody s jedním echem [15].



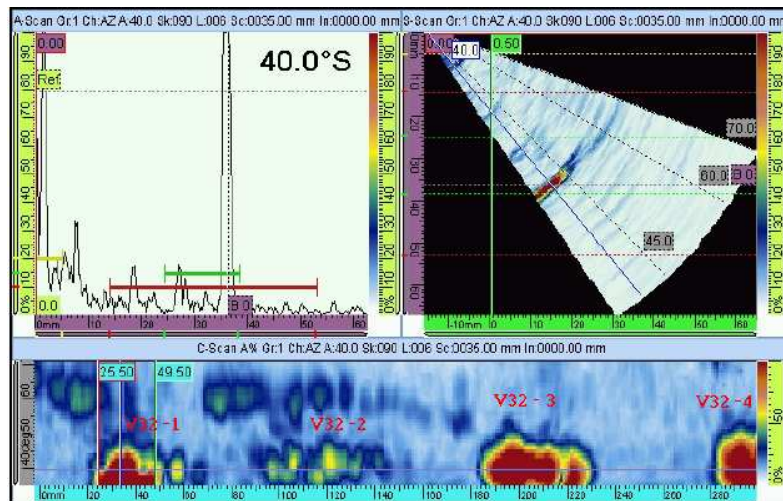
Obr. 3.2.12 Sektorový scan svaru na stejném místě jako u obrázku 3.2.11 [15].

Při zkoušení svarů se mohou kombinovat metody TOFD a phased array. Dvojice phased array sond a TOFD zařízení se upnou na jeden držák a na jeden průchod celého zařízení podél osy svaru se dá zkontrolovat celý průřez svaru. V minulosti se používaly úhlové sondy, ale jedna sonda mohla být zaměřena pouze na určitou část svaru, muselo jich být mnoho, manipulace s nimi byla obtížná a nesnadno se u nich udržovala požadovaná akustická vazba. Kvalitní provedení zkoušky bylo obtížné [22].

Metoda phased array, se také použila na zkoušení svaru popsaného v kapitole 3.1.6.3. Na prozkoušení se zvolilo sektorové zkoušení v rozmezí úhlů od $+35^\circ$ do $+70^\circ$. Sonda se pohybovala podél svaru v takové vzdálenosti, aby byl kořen svaru prozvučen pod úhlem kolem 60° (viz obr. 3.2.13). Pokud svar spojuje austenitickou a feritickou ocel, pak je zkoušení ze strany feritické oceli úspěšnější [16]. Na rozdíl od metody TOFD zkouška phased array byla průkazná a odhalila většinu umělých vad. Na obrázku 3.2.14 lze vidět, že vada je rozlišitelná.



Obr. 3.2.13 Prozvučení heterogenního svaru [16].



Obr. 3.2.14 Ukázka výsledků zkoušky technikou phased array (zkouška ze strany feritické oceli) [16].

3.2.7.2. Přednosti a využití zobrazení S, B a C při zkoušení silnostěnných výkovek ultrazvukem.

NDT kontrola silnostěnných výkovek je prakticky možná pouze pomocí ultrazvuku. Chyby mohou pocházet už z výroby, následkem zatížení v provozu, nebo jako důsledek chemických reakcí v nádobě (vodíkové poškození). Při konvenční metodě se na vyhodnocování velikosti defektů používá metoda AVG, ačkoli se tato metoda vyhodnocování hodí na hodnocení izolovaných malých plošných defektů. Defekty zpravidla nelze vyhodnocovat náhradní velikostí vady, ale je třeba zobrazit jejich rozložení v průřezu materiálu pomocí S, C, a B – zobrazení [23].

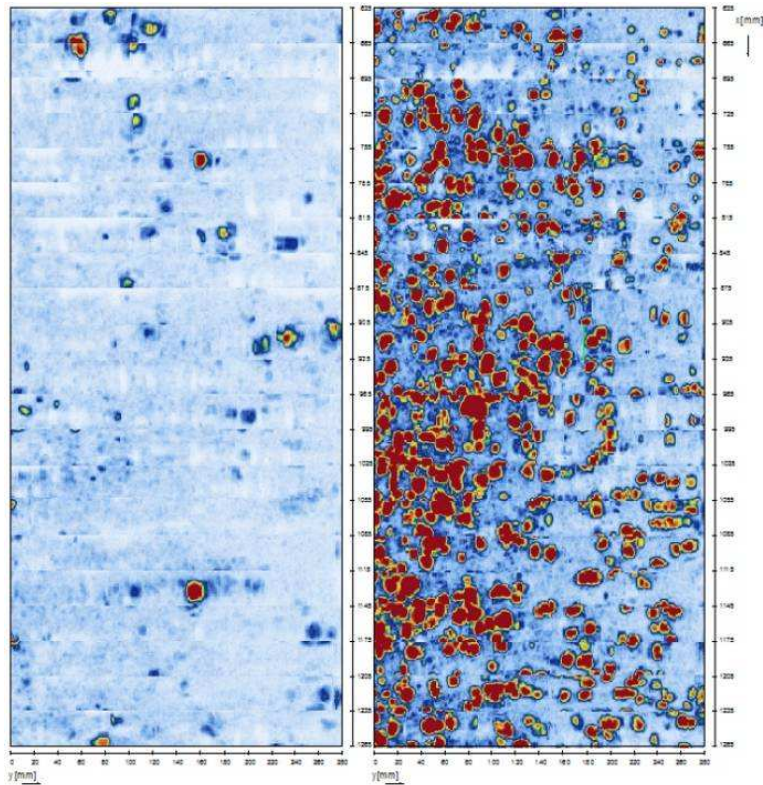
Petrochemický reaktor (viz obr. 3.2.15) na kterém byla provedena zkouška, byl vyroben v roce 1942 a byl v provozu více než 60 let. Reaktor měl průměr kolem 1250 mm a tloušťku stěny 100 – 120 mm. Prozvučení celého objemu by bylo velmi nákladné, a proto se zkouška prováděla jen na několika předpokládaných místech výskytu defektů. Nejprve byla provedena zkouška klasickou metodou, aby se vymezily oblasti s vyšším výskytem defektů [23].



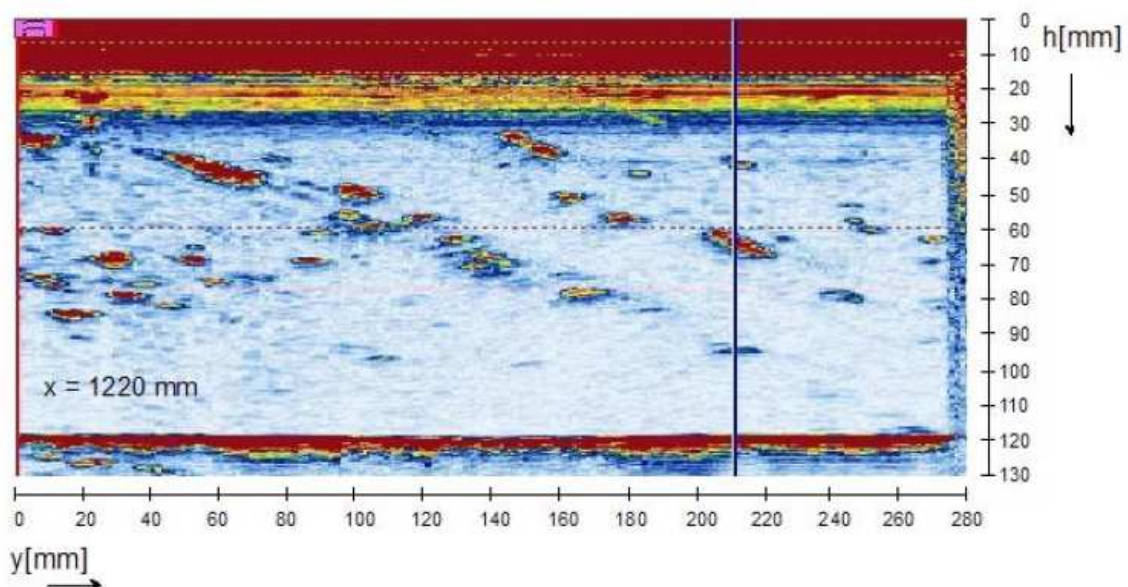
Obr. 3.2.15 Petrochemický reaktor [23]

Zkouška metodou Phased Array byla provedena nejprve sektorovým prozvučováním na několika místech. Defekty se objevovaly v úzkém rozmezí úhlů okolo normály k povrchu, to znamená že vady jsou orientovány rovnoběžně s povrchem. Na základě tohoto zjištění bylo pro podrobné skenování zvoleno lineární prozvučování. Z něj se dá pomocí záznamu polohy

sondy při pohybu zobrazit B a C – scan. V tomto případě byla velikost kroku 1 mm. Ukázka C – zobrazení je na obrázku 3.2.16, zde je možno vidět jak jsou rozloženy vady v různých hloubkách. Vlevo na obrázku je vrstva v hloubce od 100 do 120 mm a vpravo 50 až 70 mm. Ve středu pláště je očividně větší výskyt vad. Na obrázku 3.2.17 je pak „B – zobrazení“ na kterém lze vidět charakteristické poškození vyvolané vodíkem [23].



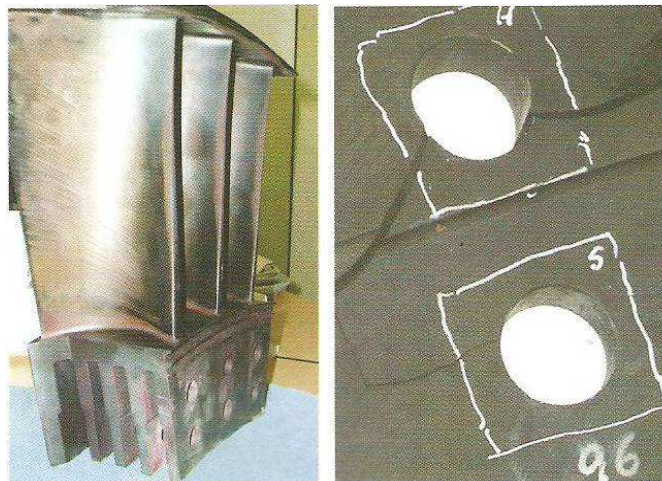
Obr. 3.2.16 „C – zobrazení“ dvou různých hloubkových vrstev [23]



Obr. 3.2.17 „B – zobrazení“ průřezu pláště [23]

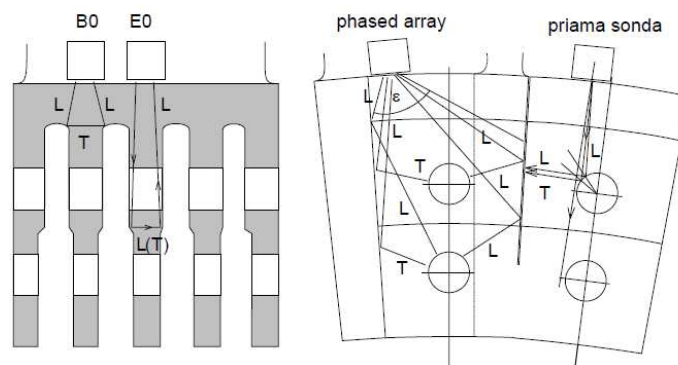
3.2.7.3. Zkoušení zámků lopatek turbín

Pokud se trhliny vyskytují v zámku lopatky turbíny, může ohrozit provoz celé turbíny. Zámek je díl s komplikovanou geometrií a je zpravidla obtížně přístupný jakékoliv povrchové a vizuální metodě nedestruktivního zkoušení. Jedinou možnou metodou zkoušení je ultrazvuková metoda. Ani zkoušení klasickou ultrazvukovou metodou není kvůli složité geometrii a nesnadnému přístupu jednoduché. Na zkoušení se dá prakticky využít pouze prostor mezi lopatkami, na obrázku 3.2.18 vlevo je lopatkový segment se zámekem a vpravo trhliny v otvorech zámku [24].



Obr. 3.2.18 Lopatkový segment (vlevo) a trhliny v otvorech zámku [24].

Dalším úskalím zkoušky je nutnost odlišit tvarová echa od ech indikujících vadu. Konvenční metodou se dá prozvučit jen velmi omezená část zámku, proto se zde s výhodou aplikuje metoda phased array. Na obrázku 3.2.19 je naznačeno jaký objem je možno prozkoušet sondou phased array a jaký klasickou čelní sondou. Z obrázku plyne, že při použití metody phased array bude prozkoušen větší objem, ale výsledné zobrazení bude také obsahovat více tvarových ech [24]. To klade vyšší nároky na vyhodnocení vady.

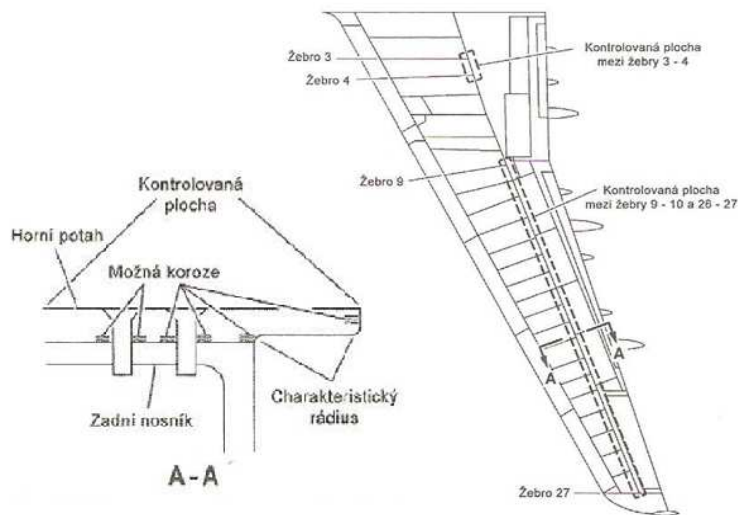


Obr. 3.2.19 Tvarové echa [24]

Díky možnosti elektronického vychýlení ultrazvukového svazku se dá provést kontrola i na místech které nejsou běžnou metodou prozvučitelné. S – zobrazení generované v reálném čase obsahuje mnoho tvarových ech, proto je pro správné vyhodnocení zkoušky nutná zkušená obsluha. Přítomnost vady nemusí nutně signalizovat echo od vady, ale přítomnost vady může také indikovat to, že určité tvarové echo chybí, nebo je má menší amplitudu než je obvyklé. Je to způsobeno tím, že vada zabraňuje průchodu ultrazvukové vlny do spodní části zámku [24].

3.2.7.4. Kontrola potahu křídla letadel řady Airbus A318-A321

Metoda Phased array se začala používat také na kontrolu výskytu koroze na spodní části horního potahu panelu v oblasti zadního nosníku křídla letadel Airbus. Kontrolované oblasti jsou na obrázku 3.2.20 [25].



Obr 3.2.20 Kontrolovaná plocha [25].

Na zkoušení byl použit přístroj Olympus OmniScan MX, Phased Array modul OMNI-P-PA 16:128 a sondou Sonatest PA Rapid Scan Wheel, 5 MHz, 64 elements včetně kodéru (obr. 3.2.21). Před začátkem měření se přístroj kalibruje na referenčním standartu z hliníku o tloušťkách 5, 10 a 15 mm, s uměle vytvořeným úbytkem materiálu 10% a 20 %. Výsledné zobrazení referenční měřky se uloží do paměti přístroje a může se kdykoliv vyvolat pro porovnání s výsledky zkoušky [25].



Obr. 3.2.21 Zařízení pro ruční zkoušení [25]

Pokud barva na potahu těsně přiléhá a netvoří viditelné bubliny, nemusí se odstraňovat. Z povrchu musí být odstraněny všechny potisky. Na zajištění akustické vazby mezi sondou a povrchem byla použita voda.

Koroze na potahu křídla se v minulosti kontrolovala vizuální kontrolou. Aby mohla být vizuální kontrola provedena, musí jí předcházet nákladné demontážní práce. Přestože je metoda phased array náročná na kontrolní vybavení, její provedení je ekonomičtější než vizuální kontrola. Vzhledem k tomu že se během tří a následně každých pět let má po celém světě zkontrolovat 3500 letadel, bude tato metoda jistě stále používanější [25].

3.2.8. Hodnocení metody phased array

Metoda phased array je určitě nejsložitější z ultrazvukových metod. Z toho plyne také její pořizovací cena, tu ale na druhou stranu vyvažují všechny výhody a možnosti, které metoda nabízí.

Výhody oproti konvenční metodě:

- Lepší zobrazení velikosti a orientace vady.
- Z jedné pozice sondy lze prozvučit různé úhly.
- Dají se zkoušet součásti se složitou geometrií.
- Více měničů přijímá odražený signál (přesnější vyhodnocení signálu).
- Větší plocha měničů než u klasické ultrazvukové techniky, tzn. rychlejší prozvučení stejného objemu materiálu.
- Zobrazení zkoušeného prostoru v reálném čase.

Nevýhody:

- Vysoká pořizovací cena (až 4x vyšší než konvenční ultrazvukový přístroj).
- Jako všechny ultrazvukové metody není vhodná na zkoušení austenitických materiálů.
- V současnosti nedostatek kvalifikovaných pracovníků pro tuto metodu.

4. Závěr

Klasická ultrazvuková zkouška má v nedestruktivním zkoušení své nezastupitelné místo. Lze ji aplikovat při zkoušení různých materiálů, od kovů přes keramiku až po plasty. Stále je to nejpoužívanější ultrazvuková technika. Na rozdíl od zkoušky prozařováním nejsou třeba žádná opatření nutná k ochraně pracovníků, ultrazvukový přístroj je snadno přenosný a lze kontrolovat i velká tloušťka materiálu. I při zkouškách modernějšími metodami se vždy nejdříve součást prozkouší klasickou ultrazvukovou metodou.

Z výsledků zkoušek a porovnání různých metod na stejné součásti vyplývá, že nejlepším nástrojem na zkoušení svarů je technika TOFD. Dokáže odhalit mnoho různě orientovaných vad, protože je založena na jiném principu než ostatní metody.

Jako úplně nejlepší a nejuniverzálnější se však ukázala být technika Phased Array. Jejím největším omezením je ale její cena, protože pořízení phased array sond, přístroje, kalibračních měrek atd. vychází přibližně na čtyřnásobek oproti konvenčnímu ultrazvukovému přístroji včetně příslušenství. Ke kontrole se využívá tam, kde by poškození vedlo k výrazným ekonomickým ztrátám. Ale ani cena nemůže omezit její rozšíření, protože jde o techniku, která má opravdu co nabídnout. Ať už jde o zkoušení tvarově složitých součástí, fokusaci ultrazvukového paprsku nebo přesnější vyhodnocování velikosti vady. Technika Phased array bude jistě určovat směr dalšího vývoje v ultrazvukové defektoskopii.

5. Použité zdroje

- [1] KOPEC, B. aj. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství Cerm[®], 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] ČSN 42 0060. Vady hutních předvýrobků a výrobků z neželezných kovů a jejich slitin. Praha: Český normalizační úřad, Zář 1992. 128 s.
- [3] DOHERTY, P. Types of Waves. In: *Scientific Explorations And Adventures* [online]. 1. 9. 2002 [cit. 2011-04-21]. Dostupné z: http://www.exo.net/~pauld/summer_institute/summer_day10waves/wavetypes.html
- [4] DEUTSCH, K. Ultrasonic Testing Principles. *Manual non-destructive testing of materials*. 6 stran.
- [5] *NDT Encyclopedia* [online]. Kirchwald (Německo), 8.7.2007 [cit. 2011-04-16]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/ndtaz/ndtaz.php>
- [6] Characteristics of Piezoelectric Transducers. *NDT Resource Center* [online]. Iowa: 2001 [cit. 2011-04-21]. Dostupné z: <http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/characteristicspt.htm>
- [7] Contact transducers. *OLYMPUS* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/contact-transducers>
- [8] Measuring With Sound. *Quality Digest* [online]. 2001 [cit. 2011-04-16]. Dostupné z: <http://www.qualitydigest.com/nov01/html/ultrasonic.html>
- [9] Angle beam transducers. *OLYMPUS* [online]. 2011 [cit. 2011-05-11]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/contact-transducers>
- [10] Conventional Transducer Construction. *OLYMPUS* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/transducers/construction/>
- [11] Dual beam transducers. *OLYMPUS* [online]. 2011 [cit. 2011-04-16]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/dualelement/>
- [12] Ultrazvukové kalibrační měřky. *UT ultrazvuková defektoskopie* [online]. 28.2.2009 [cit. 2011-04-15]. Dostupné z: http://www.ndt.cz/prilohy/47/uz_merky.pdf
- [11] ČSN EN 586-6. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení ultrazvukem - Část 6: Difrakční technika měření doby průchodu jako metoda pro zjišťování a měření velikosti vad*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Červenec 2009. 24 s.
- [12] KOVÁČIK, M. a P. KUČÍK. Ultrazvuková technika TOFD při určení hlbkových rozmerov chýb. *SlovCert* [online]. 2006 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z: <http://www.slovcert.sk/UserFiles/File/Ultrazvukova%20technika%20TOFD%20pri%20urceni%20hbkovych%20rozmerov%20chyb.pdf>

- [13] TOFD Transducers & wedges. *OLYMPUS* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/tofd/>
- [14] KOVÁČIK, M. a R. HYŽA. Ultrazvuková zkušba časti obvodového zvaru čpavkovej tlakovej nádoby technikami Phased Array a TOFD. *NDT Welding Bulletin*. 1/ 2006, roč. 16, č. 1, s. 13-15. ISSN 1213-3825.
- [15] KOVÁČIK, M. a R. HYŽA. Využitie technik TOFD a phased array pri skúšaní zvarov dlhodobo prevádzkovaných tlakových nádob. *NDT Welding Bulletin*. 3/2005, roč. 15, č. 3, s. 38-41 ISSN 1213-3825.
- [16] KOVÁČIK, M., R. HYŽA a J. KOLÁŘ. Skúšanie heterogenných a austenických zvarov technikou Phased Array a technikou TOFD. *NDT Welding Bulletin*. 3/ 2005, roč. 15, č. 3, s. 75-77. ISSN 1213-3825.
- [17] CARTER, P. Time of flight diffraction course (Level I and II), Lavender International NDT Consultancy Services Ltd, 1999.
- [18] *Phased Array Tutorial* [online]. 2011 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/phased-array/>
- [19] Phased Array Probes and Wedges. *OLYMPUS®*. 24 stran
- [20] SMEJKAL, J. Jak na Phased Array?. *NDT Welding Bulletin*. 4/2008, roč. 18, č. 4, s. 45-47 ISSN 1213-3825.
- [21] KUBÍNYI, M. Návrh a ověření kalibračního standardu pro Phase-Array NDT ultrazvukový systém. *NDT Welding Bulletin*. 1/2009, roč. 19, č. 1, s. 47-49. ISSN 1213-3825.
- [22] KUČÍK, P. Využitie technik TOFD a phased array pri skúšaní zvarov dlhodobo prevádzkovaných tlakových nádob. *SlovCert* [online]. 2006 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z: <http://www.slovcert.sk/UserFiles/File/Ultrazvukova%20kontrola%20obvodovych%20zvarov%20potrubi.pdf>
- [23] KOVÁČIK, M. a R. HYŽA. Prednosti a využitie zobrazeni S, B, a C při skúšaní hrubostenných výkovkoch ultrazvukom. *SlovCert* [online]. 4/2006 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z: <http://www.slovcert.sk/UserFiles/File/Prednosti%20a%20vyuzitie%20zobrazeni%20S,%20B%20a%20C%20pri%20skusani%20hrubostennych%20vykovkov%20ultrazvukom.pdf>
- [24] KOVÁČIK, M. a R. HYŽA. Skúšanie zámkov lopatiek turbín sondami s fázovanou sústavou meničov. *NDT Welding Bulletin*. 2/2005, roč. 15, č. 2, s. 54-56.
- [25] MOJŽÍŠ, F. Kontrola metódou Phased Array potahu křídla letadel řady Airbus A318-A321. *NDT Welding Bulletin*. 4/2009, č. 4, roč. 19 s. 11-13.

6. Seznam použitých zkratek a symbolů

Hz	frekvence
kg.....	hmotnost
m.....	délka
Pa.....	tlak
s	čas
μ	„mi“
λ	vlnová délka [m]
ρ	měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
\emptyset	průměr [m]