

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Porovnání NDT odezvy od různých typů umělých i provozních vad

Autor: **Tomáš VÁCA**

Vedoucí práce: **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš VÁCA**
Osobní číslo: **S15N0109P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Porovnání NDT odezvy od různých typů umělých
i provozních vad**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Osnova diplomové práce:

1. Popis technologií nedestruktivního zkoušení
2. Srovnání jednotlivých technologií NDT, jejich výhody a nevýhody
3. Význam kalibračních a zkušebních těles
4. Návrh experimentů, definování cílů
5. Experimentální měření na vzorcích různými metodami
6. Diskuze výsledků
7. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 50 - 70 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

KEMPPAINEN, M., VIRKKUNEN, I. *Comparison of Realistic Artificial Cracks and In-Service Cracks* <http://www.ndt.net/article/eendt02/401/401.htm>, 2002, NDT.net
REGAZZO, R. REGAZZOVÁ, M. *Základy ultrazvuku - skriptá pro ultrazvukové kurzy UT1, UT2, UT3 a studium základů ultrazvuku BEN - Technická literatura, 2013*

Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Application Olympus NDT 2004

Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Application Olympus NDT 2007

ČECH, J. *Vady a kontrola odlitků 2. vyd* Brno: VUT Brno, 1991

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Hodač

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Ostatní konzultanti:

Ing. Pavel Mareš

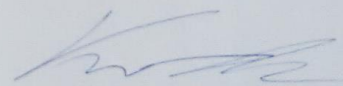
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: 19. září 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 2. června 2017



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Váca	Jméno Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Porovnání NDT odezvy od různých typů umělých i provozních vad		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	67	TEXTOVÁ ČÁST	37	GRAFICKÁ ČÁST	30
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem této práce je uvést základy jednotlivých používaných NDT metod, jejich možnosti využití, výhody a nevýhody. Obsahuje také srovnání těchto metod a zmiňují se zde kalibrační a zkušební tělesa. Obsahem experimentální části je testování rozličných druhů vad pomocí různých NDT metod. Ideou je přiblížit odezvu uměle vytvořených vad odezvě reálných vad.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>NDT, nedestruktivní testování, vizuální kontrola, kapilární metoda, magnetická prášková metoda, rentgen, radiografická metoda, ultrazvuková metoda, Phased array, metoda vířivých proudů, umělé vady, provozní vady, as real vady</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Váca	Name Tomáš	
FIELD OF STUDY	3911T016 Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Comparative analysis of NDT results for various types of artificial and operational flaws		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	67	TEXT PART	37	GRAPHICAL PART	30
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The focus of this work is to state the basics of the individual NDT methods used, their possibilities of use, advantages and disadvantages. It also contains a comparison of these methods and refers to calibration and test samples. The experimental part consists of testing various types of defects using different NDT methods. The idea is to bring the response of artificially created flaws closer to response operational flaws.</p>
KEY WORDS	<p>NDT, Nondestructive testing, Liquid Penetrant Inspection, Magnetic Particle Inspection, Radiographic Inspection, Ultrasonic Inspection, Phased array, Eddy Current Inspection, Artificial flaws, Operational flaws, As real flaws</p>

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za podporu, vedení a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat mým konzultantům, Ing. Jiřímu Hodačovi a Ing. Pavlovi Marešovi, za jejich pomoc, ochotu a cenné rady. V neposlední řadě chci poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu.

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	3
Úvod.....	4
1. Popis technologií nedestruktivního zkoušení	5
1.1. Ultrazvuk.....	5
1.1.1. Výhody a nevýhody.....	5
1.1.2. Teoretické základy.....	6
1.1.3. Měření pomocí ultrazvuku	10
1.1.4. Přístrojové vybavení.....	13
1.2. Phased array.....	14
1.2.1. Principy fungování.....	15
1.2.2. Metody skenování.....	16
1.2.3. Zobrazení dat.....	18
1.3. Zkoušení pomocí prozařování.....	20
1.4. Vizuální zkoušení.....	22
1.5. Kapilární zkoušení.....	22
1.6. Magnetická prášková metoda.....	22
1.7. Metoda vířivých proudů.....	24
2. Srovnání jednotlivých technologií NDT, jejich výhody a nevýhody... ..	26
2.1. Ultrazvukové metody a Phased array	26
2.2. Ultrazvukové metody a prozařovací metody	27
2.3. Magnetické metody	27
2.4. Vizuální a kapilární zkoušení	28
3. Význam kalibračních a zkušebních těles	29
3.1. Tělesa pro ultrazvukové zkoušení	29
3.2. Kalibrační měrky používané při měření	30
4. Návrh experimentů, definování cílů	32
5. Experimentální měření na vzorcích různými metodami	33
5.1. Experimentální vzorky.....	33
5.1.1. Vzorek č. 1.....	33

5.1.2. Vzorek č. 2.....	34
5.1.3. Vzorok s licími vadami	34
5.1.4. Vzorok s vadami ve svaru	36
5.1.5. Vzorok bez svarů	38
5.2. Zkoušení pomocí kapilární zkoušky	40
5.2.1. Vzorek č. 1.....	40
5.2.2. Vzorek č. 4.....	40
5.2.3. Vzorok se svary	41
5.1.4. Vzorok s AR vadami	42
5.3. Zkoušení pomocí magnetické polévací zkoušky	43
5.4. Ultrazvukové zkoušení.....	44
5.4.1. Zkoušení přímou sondou.....	45
5.4.2. Zkoušení úhlovou sondou.....	46
5.4.3. AR vady.....	48
5.5. Phased array zkoušení.....	49
5.5.1. Vzorok s výrobními vadami	49
5.5.2. Vzorok se svary.....	50
5.5.3. Vzorok s AR vadami	53
5.6. Zkoušení pomocí vířivých proudů	54
5.6.1. Vzorok s výrobními vadami	55
5.6.2. Vzorok se svary.....	56
5.6.3. Vzorok s AR vadami	58
5.7. Rentgenové zkoušení.....	59
6. Diskuze výsledků.....	61
6.1. Porovnání výhodnosti a použitelnosti metod	61
6.2. Porovnání zjistitelnosti různých typů vad	63
6.3. Zhodnocení použitých AR vad	65
7. Závěr.....	66
Seznam použitých zdrojů.....	67

Přehled použitých zkratk a symbolů

NDT	Nedestruktivní testování
PT	Kapilární metoda
VT	Vizuální zkoušení
MT	Magnetická prášková metoda
ET	Zkoušení pomocí vířivých proudů
UT	Ultrazvuková metoda
PA	Phased array metoda
RT	Prozařovací zkoušení
AR	„as real“ vada
Obr.	Obrázek

Úvod

Základem tohoto projektu je NDT – nedestruktivní testování materiálu. Pod tímto pojmem je sdruženo velké množství technologií a metod určených pro široký záběr použití. Hlavním cílem používaných NDT metod je nalezení a vyhodnocení chyb a vad v materiálu. Nicméně každá metoda a technologie je specifická, je vhodná pro konkrétní aplikace a různé druhy vad a materiálů. I když použití pouze jedné metody většinou nepřinese dostatečné množství informací, jednotlivé metody se dají kombinovat. To vede k získání komplexnějšího obrazu situace a další použitá technologie může odhalit věci, které zůstaly té první skryty.

Cílem NDT metod je tedy nalezení a vyhodnocení vad. Ty jsou přítomné v každém materiálu, ale ne všechny jsou nepřijatelné. Důležitou součástí je tedy jejich srovnání s přijatelnými parametry, nebo tolerančními limity. Může se tedy jednat například o velikost vady a orientaci nebo umístění ve výrobku. Proto je velice důležité také nalezenou vadu správně určit a vyhodnotit.

1 Popis technologií nedestruktivního zkoušení

Technologií nedestruktivního zkoušení materiálů je velké množství. Hlavní část metod, na které bude tato část zaměřena, slouží k odhalení a vyhodnocení chyb v materiálu. Jiné metody, které jsou primárně zaměřené například na vyhodnocování těsnosti, zjišťování struktury, fyzikálních či mechanických vlastností, vyhodnocování napjatosti nebo třeba zjištění chemického složení, zde nebudou uvažovány. Dále bude největší pozornost věnována metodám používaným v rámci experimentu.

Většina těchto technik může být rozdělena do dvou velkých skupin podle toho, jakou část materiálu prozkoumávají. Na jedné straně jsou povrchové a podpovrchové metody, které jsou schopny odhalit vady právě jen v povrchu (tedy přístupné okolí), či jen do velmi malé hloubky. Na druhé straně jsou metody objemové (volumetrické), které se specializují na vyhledávání vad uvnitř objemu materiálu.

1.1 Ultrazvuk [5],[6],[8],[11]

Testování materiálu pomocí ultrazvuku je jedna z nejrozšířenějších metod pro nedestruktivní zkoumání. Hlavním cílem je detekce a vyhodnocení povrchových i vnitřních vad materiálů. Kromě toho lze tuto metodu použít například i na měření tloušťky materiálu nebo pro měření koroze.

Nedestruktivní zkoušení materiálu pomocí této metody je založeno na vysílání vysokofrekvenčních ultrazvukových impulzů do kontrolovaného předmětu a následném vyhodnocení změn těchto signálů. Tyto změny jsou vyvolány interakcí ultrazvukových impulzů s materiálovými rozhraními a s nehomogenitami a vadami uvnitř materiálu.

Přístroje tedy monitorují odraz signálu od rozhraní, které znamená, že impulz se odrazil od rozhraní materiálů nebo na nespojitosti v daném materiálu. Dále se měří čas impulzu od jeho vyslání až po jeho zpětné zachycení. Možností je také měřit útlum impulzu, který vzniká jeho rozptylem nebo absorbováním při průchodu materiálem.

Ultrazvukové testování kovových materiálů je tedy postavené hlavně na detekci nespojitostí v materiálu. Tato metoda může být použita pro detekci všech možných typů vad ve většině používaných kovů a slitin i v jejich spojích. Často se používá při kontrole kvality a určování použitelnosti materiálu jak během výroby a po jejím ukončení, tak pro kontrolní testy už používaných součástí. Tato metoda se uplatní ve všech odvětvích, z nichž jsou nejznámějšími oblastmi energetiky, letectví a automobilového a dopravního průmyslu.

1.1.1 Výhody a nevýhody

Zde jsou jednoduše shrnuty obecné výhody a následně i nevýhody ultrazvukové metody oproti ostatním NDT metodám.

Vysokofrekvenční ultrazvukové impulzy mají velkou pronikavost do materiálu, což umožňuje detekci vad ve velkých hloubkách. Velikost měřeného prostoru může být v jednotkách metrů. Ultrazvukové vlny se šíří v celém objemu materiálu, lze tedy najednou zkoumat celý objem materiálu. K tomu je potřeba mít přístup pouze k jedné jeho povrchové ploše.

Vzhledem k malé vlnové délce vysílaných ultrazvukových vln jdou v materiálu detekovat i velmi malé vady. Detekční hranice pro velikost vad by se měla pohybovat kolem 0,5 mm. Dále je umožněna poměrně vysoká přesnost při určování místa, charakteru a tvaru vady.

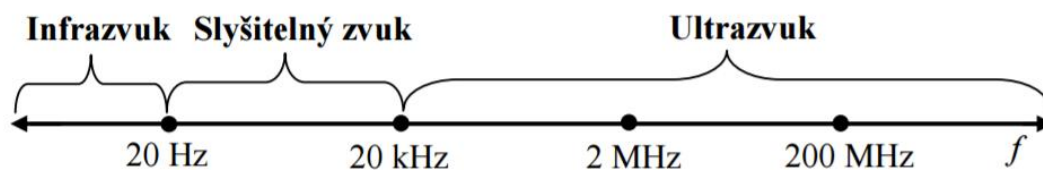
Tato metoda je rychlá, operátor ihned vidí odezvu a možné indikace vad. Je také operativní, což je dáno malou velikostí a nenáročností na další vybavení. Je tedy možné provádět měření přímo na konkrétních místech, například na konstrukcích a velkých objektech. Metoda je i bezpečná pro použití, a to jak pro operátora a okolní pracovníky, tak pro zkoumaný materiál.

Hlavní nevýhodou je potřeba zaškoleného pracovníka pro správné vyhodnocování materiálů a pro návrh správných postupů měření. Také pro kalibraci přístrojů a pro správné vyhodnocení vad je potřeba používat speciální etalony.

Tato metoda je nevhodná pro použití na některé objekty. Může se jednat o moc malé, tenké nebo členité objekty, nebo o nehomogenní materiály, nebo materiály s příliš hrubou strukturou. Těsně pod povrchem může existovat „mrtvá zóna“, ve které nejsme schopni detekovat vady.

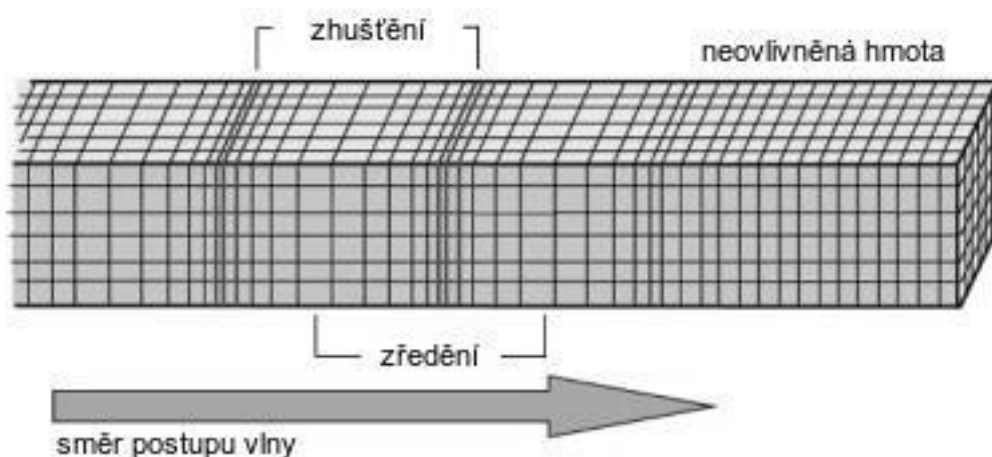
1.1.2 Teoretické základy

Základem této metody jsou ultrazvukové vlny, mechanické vlnění o minimální frekvenci 20 kHz. Praktický rozsah používaných frekvencí je mezi 0,1 a 25 MHz s tím, že v průmyslové praxi jsou nejčastější frekvence mezi 1 a 15 MHz. Tyto vlny se šíří materiálem rychlostí zvuku a mají vlnovou délku λ v řádu jednotek mm.



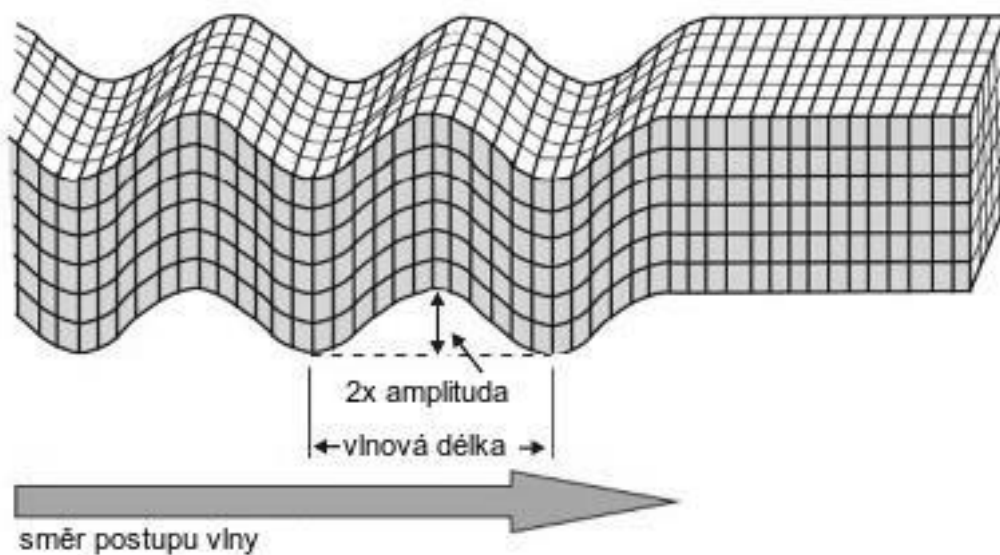
Obr. 1 - Rozdělení mechanického vlnění [8]

Ultrazvukové vlny se dají dělit dvěma způsoby. První způsob dělení je podle tvaru vlnoplochy na rovinné, kulové a válcové vlnění. Druhým, důležitějším dělením, je dělení podle směru kmitání částic prostředí vzhledem ke směru šíření vlny – podélné, povrchové, příčné a deskové vlnění. Při podélném vlnění (longitudinálním) částice kmitají ve směru pohybu vlny, prostředí se střídavě zhušťuje a zředňuje. Tento typ vlnění má nejvyšší rychlost šíření a může se šířit v jakémkoli prostředí (pevné, kapalné, plynné).

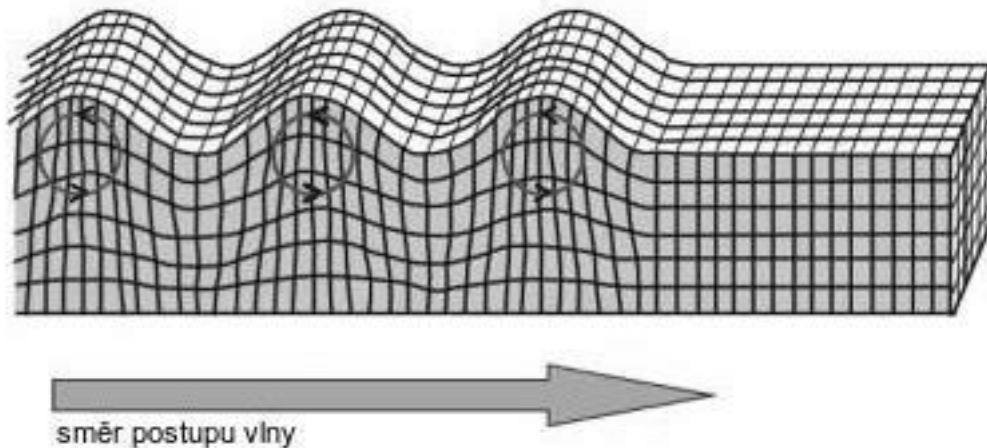


Obr. 2 - Podélné vlnění [7]

Druhým typem vlnění je příčné (transverzální) vlnění, kde částice kmitají kolmo na směr šíření vlny. Tento typ vlnění je možný pouze v pevných látkách. V oceli je rychlost příčného vlnění přibližně poloviční ve srovnání s rychlostí podélného vlnění. Pokud se vlnění střetne s povrchem, tak od určitého úhlu vnikají povrchové (Raleyghovo) vlny. Ty se šíří jen po povrchu a lze je využít k detekci povrchových vad. Šíří se pomaleji než objemové vlny. U oceli je to konkrétně 92,5 % rychlosti příčného vlnění.



Obr. 3 - Příčné vlnění [7]



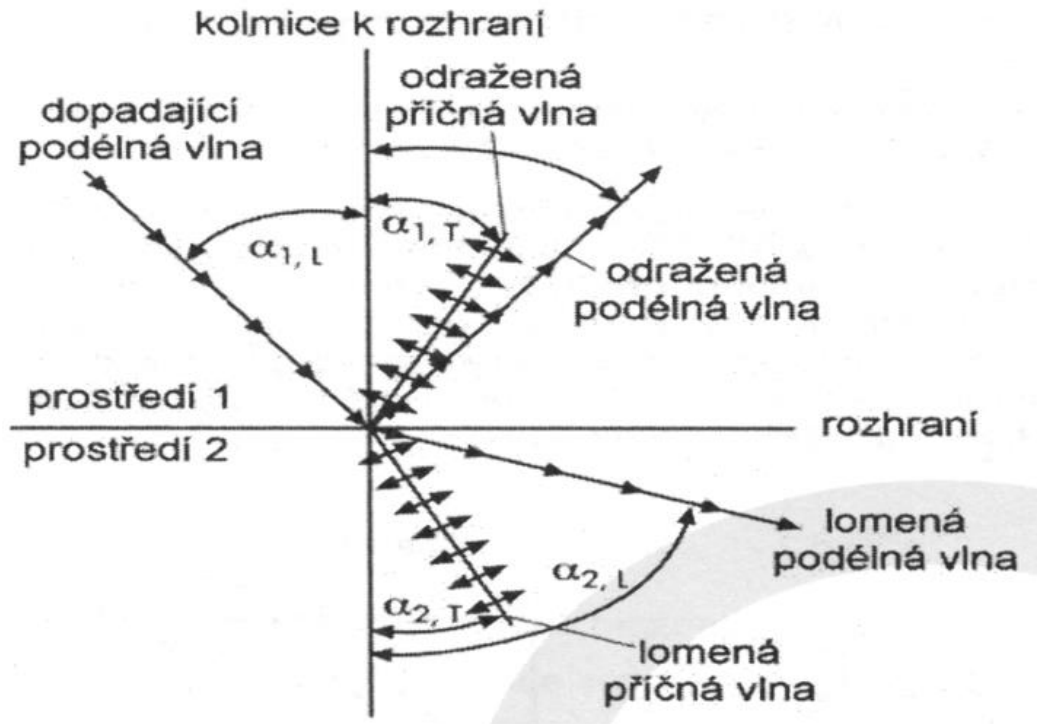
Obr. 4 - Povrchové (Raleyghovo) vlnění [7]

Posledním typem jsou deskové (Lambovo) vlny. Ty se šíří jen v prostředích, jejichž jeden nebo dva rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou vlny. Používají se tedy ke zkoušení desek, plechů a drátů.

Charakteristickou veličinou je zde vlnová délka λ . Ta určuje nejmenší vzdálenost mezi dvěma body, které mohou být od sebe rozlišeny. Na tom dále závisí detekční možnosti ultrazvukové metody. Vlnová délka je určena poměrem rychlosti šíření podélných vln a frekvence tohoto vlnění.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Pro šíření ultrazvukových vln v materiálu platí zákony odrazu a lomu. V materiálu bez vnitřních rozhraní nemění ultrazvukové vlny směr ani svoji intenzitu. V případě kontaktu s rozhraním pak mění vlna své vlastnosti skokově. Šíření vln je ovlivněno jakýmkoliv rozhraním, které může být tvořeno přirozeným zakončením materiálu, vadou v materiálu nebo přechodem mezi dvěma materiály. Vlnění pak buď pokračuje průchodem do dalšího prostředí, odrazí se zpět, nebo se použijí obě tyto možnosti najednou. Jsou-li vlnové délky řádově stejné s rozměry překážek, je prošlá vlna doprovázena ještě ohybem.



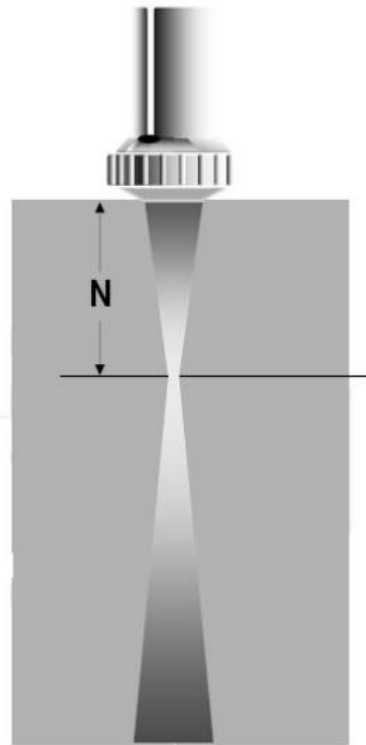
Obr. 5 - Odraz a lom ultrazvuku na rozhraní [11]

Na rozhraní pevné látky a plynu dochází k téměř úplnému odrazu. To znamená, že tato metoda dokáže nalézt i velmi malé nečistosti, pokud jsou vyplněny plynem.

Útlum vlnění vzniká působením dvou mechanismů, pohlcování a rozptylu. Pohlcování (absorpce) převládá při nízkých frekvencích vlnění. Je důsledkem vnitřních jevů (tření kmitajících částic, plastického tečení, relaxačních a tepelných jevů), které mění mechanickou energii kmitání na tepelnou. Rozptyl pak převládá u vyšších frekvencí odchylováním částí ultrazvukových vln od původního směru šíření. Tím snižuje intenzitu vlnění, a zmenšuje tak velikost indikací. Navíc přispívá k tvorbě šumu na pozadí. Na rozptyl mají vliv vlnová délka použitého ultrazvuku a typ a hrubozrnnost zkoumaného materiálu. Pro hrubozrnné materiály s velkým útlumem je tedy potřeba používat nižší frekvence vlnění.

Svazek ultrazvukových vln se šíří od zdroje ve formě pole. Z počátku má tvar válce (o velikosti vyzářovací plochy). V této oblasti může vzniknout mrtvá zóna, ve které nejsme schopni detekovat žádné vady. Pak následuje blízké pole, které se kuželovitě zmenšuje. Na jeho konci je oblast fokusu, kde je ultrazvuk nejvíce koncentrován. Poté pokračuje vzdálené pole, které se kuželovitě rozšiřuje. Délka blízkého pole N jde vypočítat pomocí rychlosti pohybu vlny, její frekvence a průměru vysílajícího měniče.

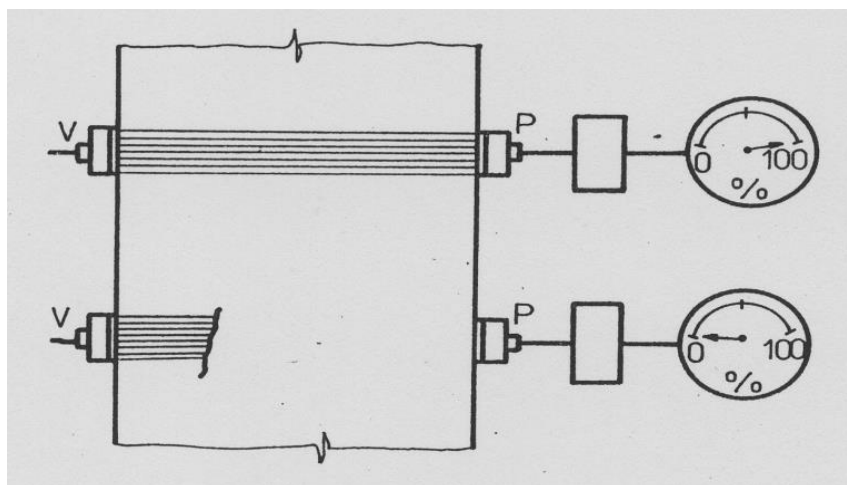
$$N = \frac{D^2 * f}{4 * C}$$



Obr. 6 - Zvukové pole sondy [11]

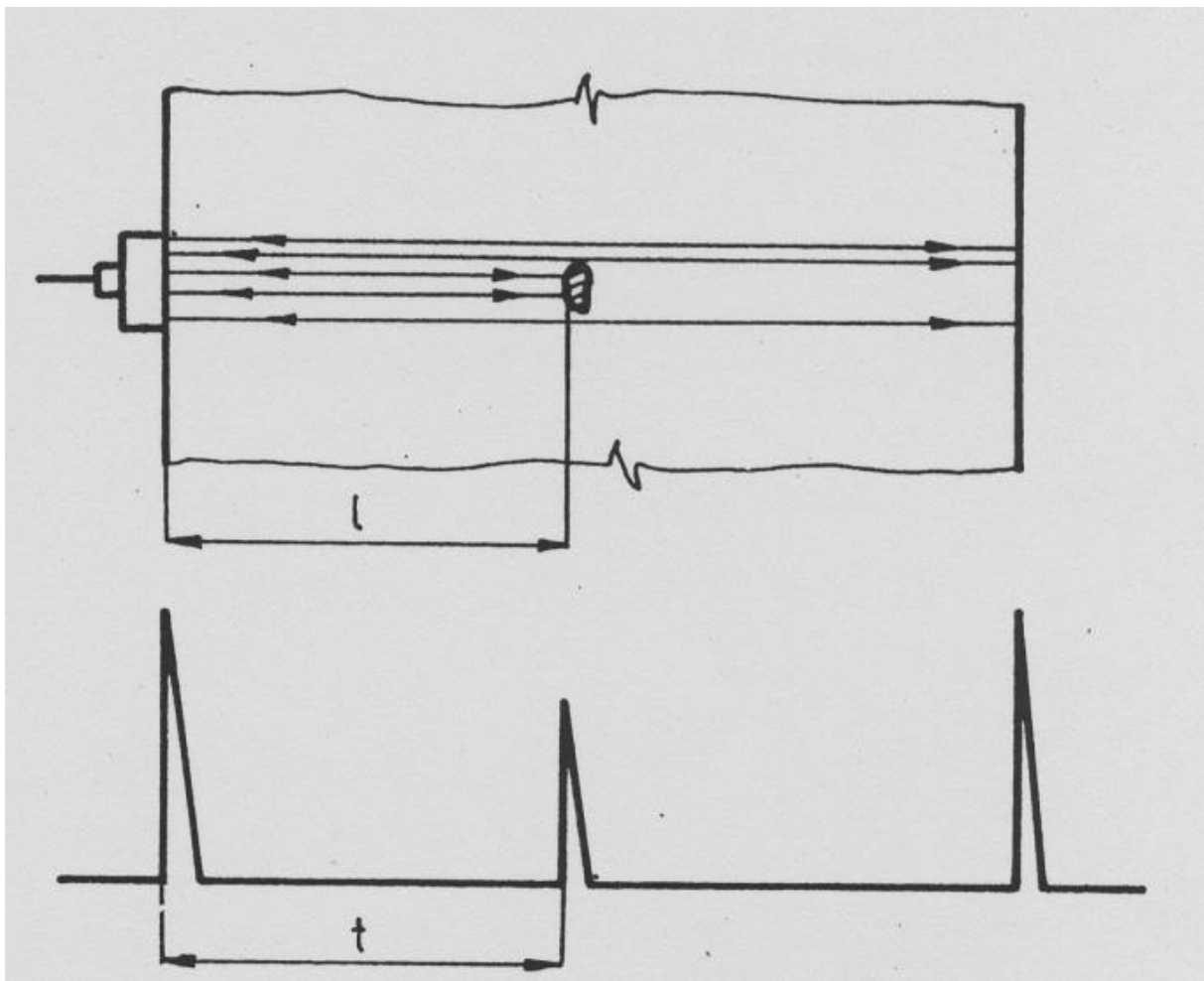
1.1.3 Měření pomocí ultrazvuku

Existuje několik základních metod pro práci s ultrazvukem. Rozdělujeme je na metody průchodové a odrazové. Průchodová metoda měří hodnoty energie ultrazvuku, které prošly daným materiálem. To znamená, že nezjistíme umístění vady, pouze její existenci. Jsou tedy potřeba dvě sondy, jedna vysílací a na opačné straně druhá přijímací. To vyžaduje volný přístup k oběma stranám, přesné umístění sond a rovnoběžnost těchto povrchů. Výhodou této metody je například možnost zkoušení materiálů o velkém rozsahu a o velkém útlumu. Mezi odrazové metody se řadí metody rezonanční a impulsová. Rezonanční metoda je starší a společně s průchodovou metodou jsou v současné době vytlačeny metodou impulsovou.



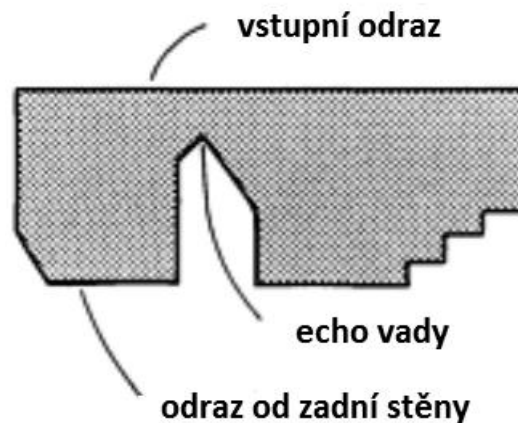
Obr. 7 - Schéma průchodové metody [11]

Odrazová impulsová metoda je nyní nejpoužívanější a nejrozšířenější ultrazvukovou metodou. Přístroj při ní měří dobu průchodu materiálem a akustický tlak odraženého ultrazvukového impulsu. Ve chvíli, kdy ultrazvukový impuls narazí na vadu či nespojitost, je odražen zpět a poté zachycen a zpracován. Pro používání stačí jedna sonda, která funguje jako vysílač i přijímač. Touto metodou lze určit i umístění vady.



Obr. 8 - Schéma impulzové metody a odpovídající A-scan [11]

Odrazová metoda nabízí několik možností zobrazení získávaných dat, A-scan, B-scan a C-scan. Nejčastěji je používán A-scan, který zobrazuje amplitudy signálů získaných v jednom bodě v závislosti na čase, a tedy hloubce v materiálu. B-scan se používá hlavně pro zjišťování velikosti a lokace a případně i tvaru vady. Ukazuje čas a vzdálenost, síla signálu je měřena relativním rozdílem síly ech. Vizually připomíná virtuální řez materiálem.



Obr. 9 - Zobrazení pomocí B-scanu [6]

C-scan zobrazuje informace nasbírané po oblasti zkoušeného materiálu pohybem sondy, a dobře tak ukazuje pozici a tvar vad. Ze zaznamenaných časových dat lze získat informace o hloubkách vad.



x-y souřadnicový systém

Obr. 10 - Zobrazení pomocí C-scanu [6]

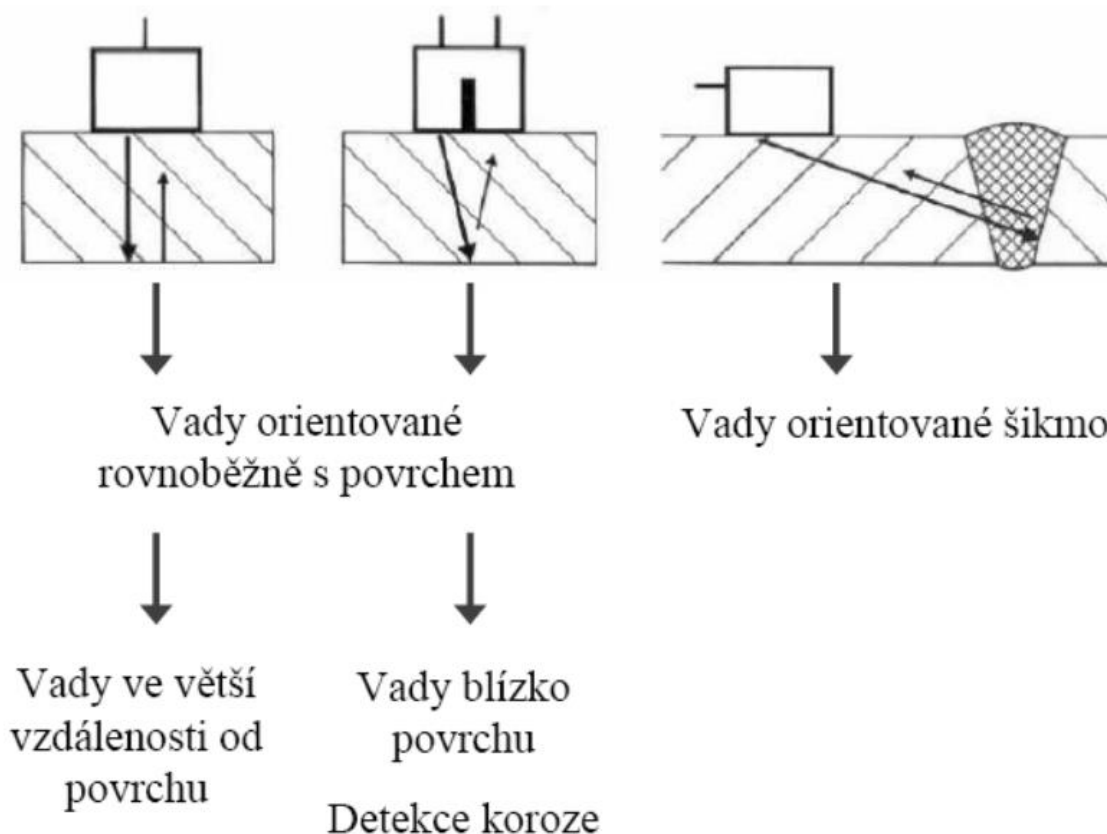
Hodně používaným je A-scan, pomocí něj je možné zjistit velikost vady, její typ i umístění. Na A-scanu by mělo být vidět počáteční a koncové echo. Počáteční vzniká při vstupu do materiálu a koncové odrazem od jeho konce. Indikace případné vady se tedy objeví mezi těmito dvěma echy. Hloubka vady v materiálu odpovídá času průchodu ultrazvuku. Jsou časté případy, kdy se koncové echo neobjeví. To je způsobeno zánikem signálu, jeho odraz od konce materiálu nedoputoval zpět do přijímače. Druhou možností je, že vada díky své velikosti odrazila celý ultrazvukový svazek zpět a dál už žádný signál nepokračoval.

Důležitou součástí procesu je správné vyhodnocení vady. Zde se vyhodnocení provádí podle tvaru a velikosti získaného echa. To je ovlivňováno tvarem, orientací a odrazovými vlastnostmi vady. Rozhraní mezi materiálem a vzduchem (plynem) vytváří ostré špičaté echo v případě, že je rovnoběžné s povrchem a má hladký povrch. Pokud je rozhraní zakřivené nebo s hrubým povrchem, echo je širší. Dále je třeba správně vyfiltrovat okolní rušení, ve kterém by malé indikace vad zanikly. Rušení vyvolá například i materiál s hrubou strukturou, ve kterém se ultrazvukové vlny odrážejí od hranic zrn.

1.1.4 Přístrojové vybavení

Existuje více možností vytváření ultrazvuku, např. mechanické a elektromechanické způsoby. Mezi elektromechanické způsoby patří magnetostrikční, elektroindukční a pro ultrazvukové testování nejdůležitější piezoelektrické. K tomu slouží piezoelektrické měniče, využívající piezoelektrický jev. Jedná se o převod deformace krystalu na elektrickou energii nebo opačně. Na krystal se tedy v tomto případě přivádí elektrická energie a on vibrací vysílá ultrazvukové vlnění. Měníč vytváří ve směru své tloušťky stojatou podélnou ultrazvukovou vlnu.

Tyto měniče jsou základní součástí ultrazvukových sond. Ty se dělí podle směru vysílaného ultrazvukového svazku na přímé, úhlové a povrchové. Nejčastěji používané jsou sondy přímé, ty jsou nejvýkonnější a pomocí jednoho měniče vysílají a přijímají ultrazvukové impulzy kolmé na plochu styku s materiálem. Nejlépe se s nimi objevují vady kolmé k povrchu a vady ve větších hloubkách. Složitější verzí přímých sond jsou sondy dvojité. Tyto sondy mají jeden měnič pro vysílání a druhý, akusticky od prvního izolovaný, pro přijímání. Proti jednoduchým přímým sondám tyto sondy objeví i vady blízko povrchu.



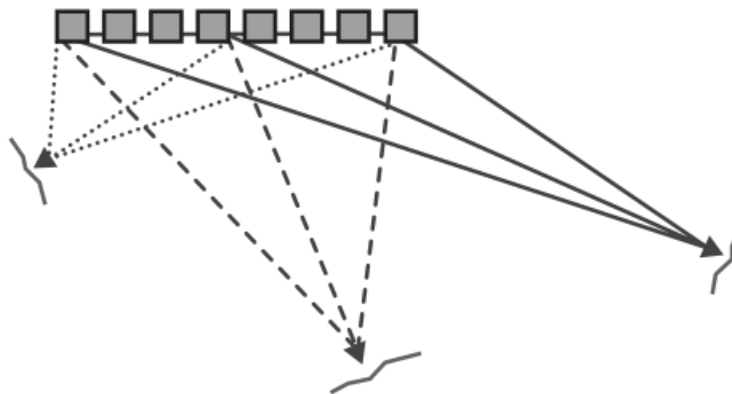
Obr. 11 - Typy ultrazvukových sond, zleva jednoduchá přímá, dvojitá a úhlová [11]

Úhlové sondy, tj. sondy, které vysílají ultrazvukový svazek do materiálu pod určitým úhlem, se používají pro objevování vad orientovaných šikmo k povrchu a pro vady v oblastech nedostupných pro přímé sondy. Orientace k povrchu je dosaženo předsádkou, která může být pevná, nebo kombinace přímé sondy s výměnnou předsádkou. Nejčastější používané úhly jsou 45°, 60° a 70°. Použitím určitých speciálních úhlů je možné vyvolat pouze povrchové (Raleyghovo) vlny.

Poslední součástí je samotný přístroj. Ten je potřeba pro komunikaci se sondou a zprostředkování získaných dat operátorovi.

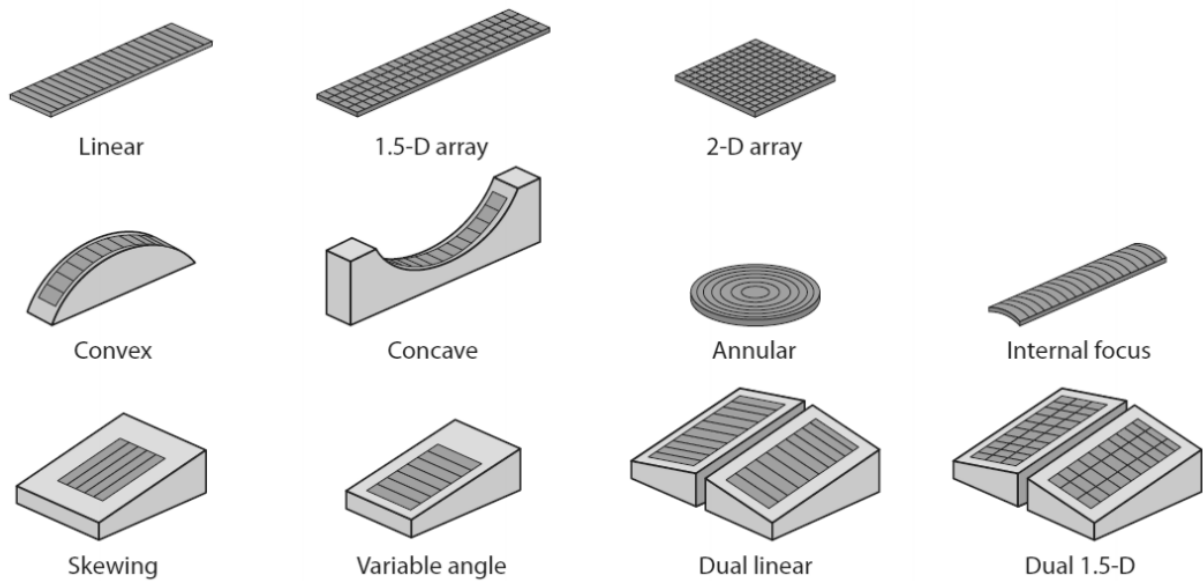
1.2 Phased array [3],[4],[11]

Metoda Phased array je speciální formou ultrazvukového zkoušení. Původně byla používána ve zdravotnictví, postupně se začala využívat i v průmyslu. Zde se ze začátku její používání zaměřovalo na kontroly v jaderné energetice, na součástky turbínových systémů a na velké kované hřídele. K jejímu zavedení vedla potřeba několika požadavků, které používané technologie nenabízely. Prvním požadavkem bylo pomocí jedné sondy měřením z jednoho místa nalézt náhodně orientované trhliny v různých hloubkách v materiálu a dále pak zlepšit vyhledávání malých trhlin u objektů složitých tvarů, jako jsou například právě turbínové komponenty. Součástí těchto inspekcí je i kontrola míst, do kterých je špatný přístup. Dalším požadavkem na zlepšení pak bylo použití pro práci s heterogenními svary a svary nerezových ocelí. Důležitá jsou i obecná vylepšení jako zlepšení spolehlivosti, zvýšení přesnosti vyhodnocování a zkrácení doby inspekce.



Obr. 12 - Jednoduché schéma zachycení vad metodou Phased array [3]

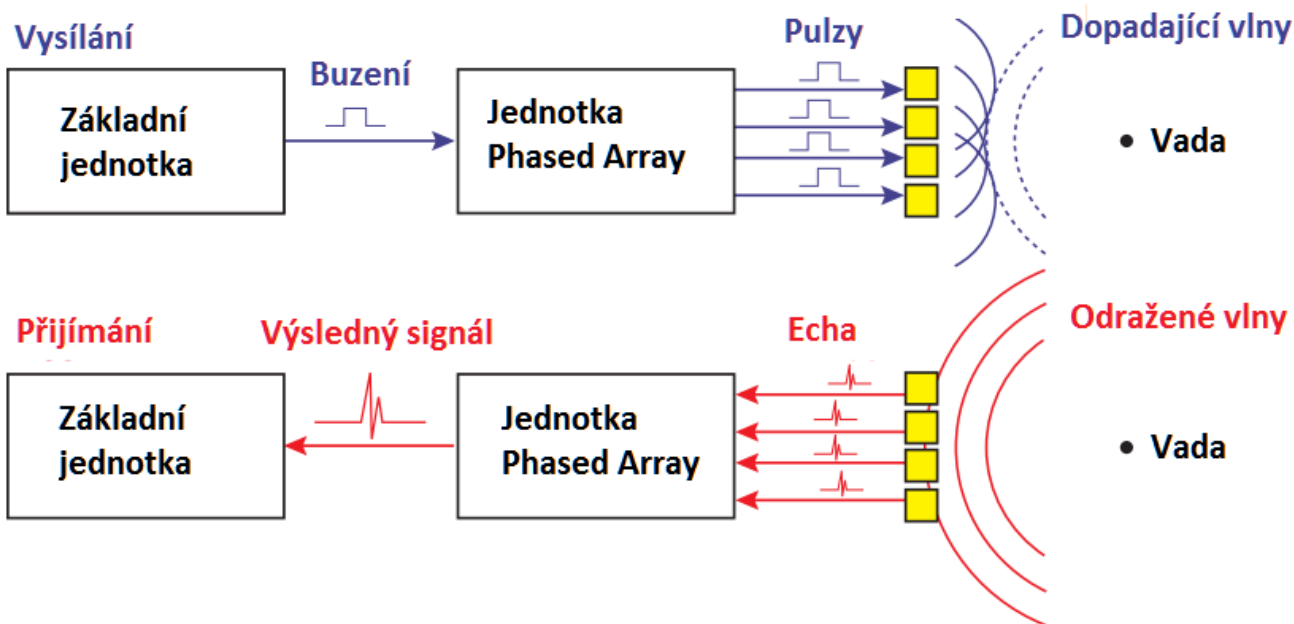
Základem této metody je sonda tvořena více měniči, kde každý z nich je buzen vlastním generátorem a má vlastní přijímač signálu. Tyto jednotlivé sondy mohou být umístěny ve více uspořádáních, nejčastěji se používá lineární uspořádání. Každý měnič vysílá pouze úzký svazek ultrazvuku, všechny dohromady pak vytvářejí vlnu. Výhodou této techniky je možnost nasměrování vlny pod určitým úhlem, nebo fokusace této vlny na určité místo. Toho se dosahuje vzájemným časovým zpožděním jednotlivých impulzů.



Obr. 13 - Různé způsoby uspořádání Phased array sond [3]

1.2.1 Principy fungování

Vzhledem k tomu, že metoda Phased array je metodou ultrazvukovou a vychází z konvenčních ultrazvukových metod, jsou obecné principy víceméně totožné. Opět se používá vlnění s frekvencí 0,5 až 15 MHz a zpracovávají se signály odražené od vad. Paprsek Phased array sondy je ale zaměřený (fokusovaný) a multi-úhlový. Aktivní elementy této sondy pulzují v lehce odlišných časech. To znamená, že signál echa se vrátí zpátky se spočítatelnými časovými posuvy a je poté složen dohromady. Výsledkem je A-scan, který zvýrazňuje informace z požadovaného fokusovaného místa a obsahuje utlumené signály z jiných částí materiálu.

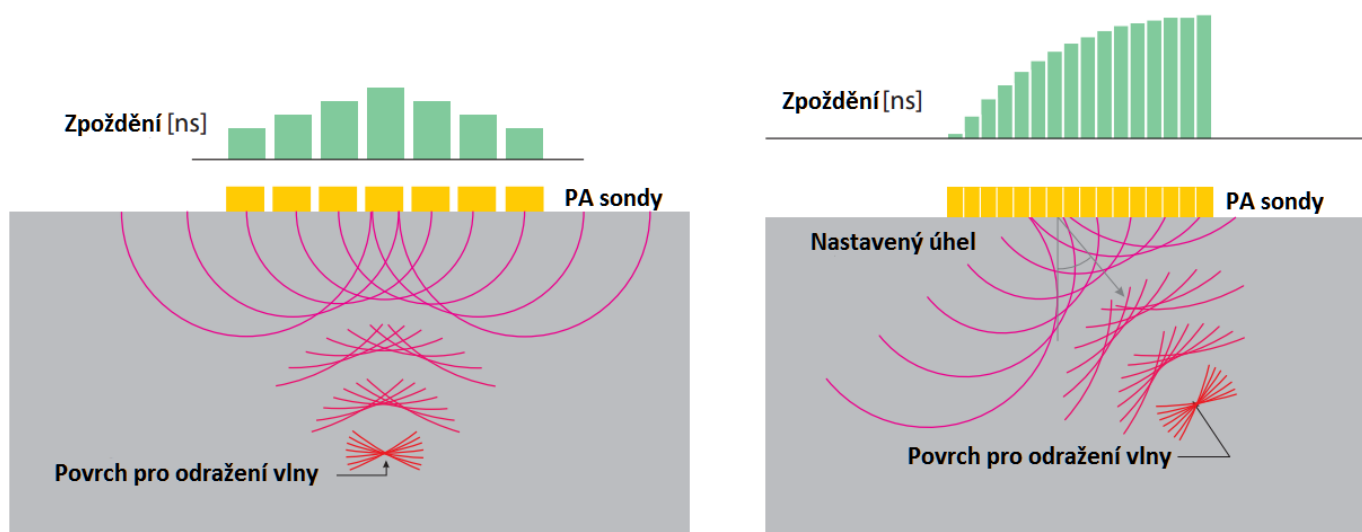


Obr. 14 - Princip tvoření signálů a znázornění zpoždování [3]

Vytvoření ultrazvukového signálu začíná vysláním budicího signálu do Phased array jednotky, která pak vyše každé sondě jeden impuls. Ten má předem naprogramovanou vlnovou délku a časové zpoždění. Sondy poté dohromady vytvoří vlnu vyslanou pod konkrétním úhlem a zaměřenou do konkrétní hloubky. Pokud tato vlna narazí na vadu, odrazí se zpátky. Její jednotlivé pulzy jsou poté zaznamenány, časově posunuty a spojeny dohromady. Výsledkem je jediný ultrazvukový pulz.

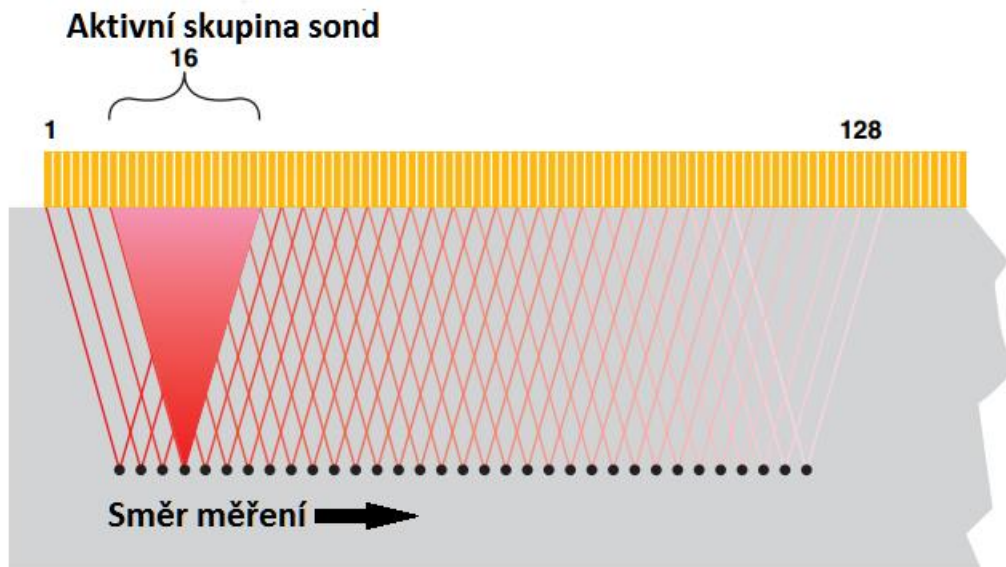
Zpoždění jednotlivých impulsů se nastavuje podle sondy, typu vlnění, nastaveného úhlu a fokusované hloubky.

1.2.2 Metody skenování

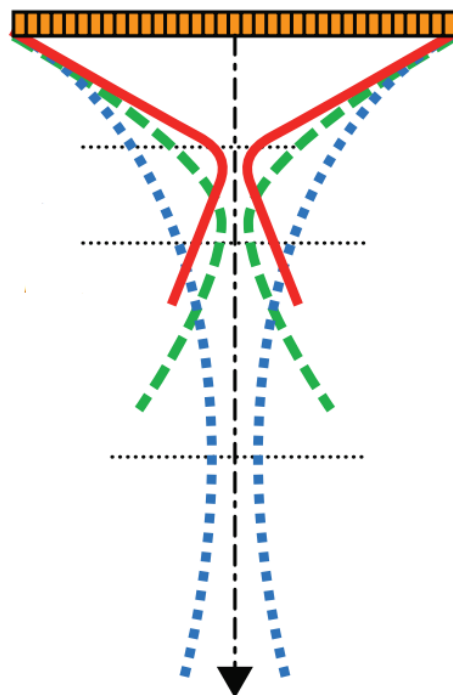


Obr. 15 - Nastavení zpoždění pulzů podle nastaveného úhlu [3]

Existují tři základní principy počítačem kontrolovaného skenování. Prvním je elektronické skenování. Úhel a zpoždění se nastavuje stejně u všech sond zrovna aktivní skupiny a tato skupina se postupně pohybuje po délce uspořádaných sond. Jedná se o ekvivalent konvenční ultrazvukové sondy, která by prováděla rastrovací snímání na dané ploše.



Obr. 16 - Elektronické skenování pomocí PA se 128 sondami a aktivní skupinou 16 sond [3]

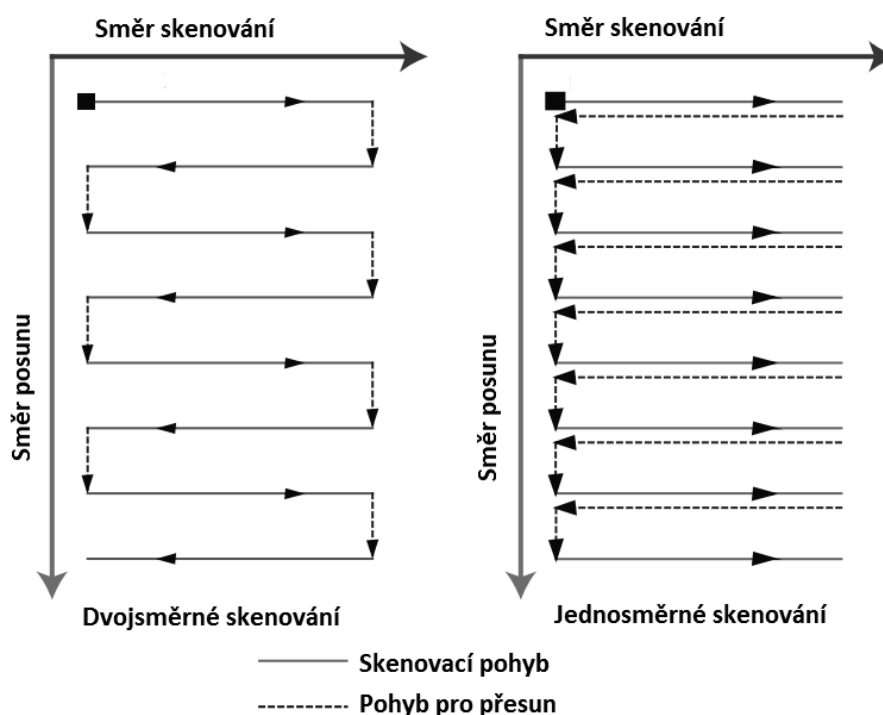


Obr.17 Zaostření na tři různé hloubky pomocí DDF [3]

Druhým způsobem je Dynamic depth focusing (DDF) – metoda, která využívá proměnné nastavení hloubky zaostření. Používá se jeden zaostřený impuls pro nastavenou hloubku a postupně se zaostří na každou z nastavených hloubek.

Třetí metodou je sektorové (úhlové, azimutální) skenování. Fokusevaná hloubka je pevně nastavena a jednotlivé elementy postupně provedou skenování v různých zadaných úhlech.

Existují také různé možnosti skenovacích vzorů – pohybů sondy při skenování. Můžeme je podle způsobu ovládnání rozčlenit na automatizované, semi-automatizované a manuální. Zde lze použít tři rastrovací způsoby. Jednosměrný způsob má aktivní sondy pouze v jednom směru, je tedy nutné ho po skončení jedné dráhy ustavit zpět na začátek materiálu. Dvojsměrné skenování umožňuje skenování při obou těchto pohybech. Třetím je zkosené skenování, které je zvláštní formou dvojsměrného způsobu, ale směr skenování je pod úhlem k mechanickým osám materiálu.



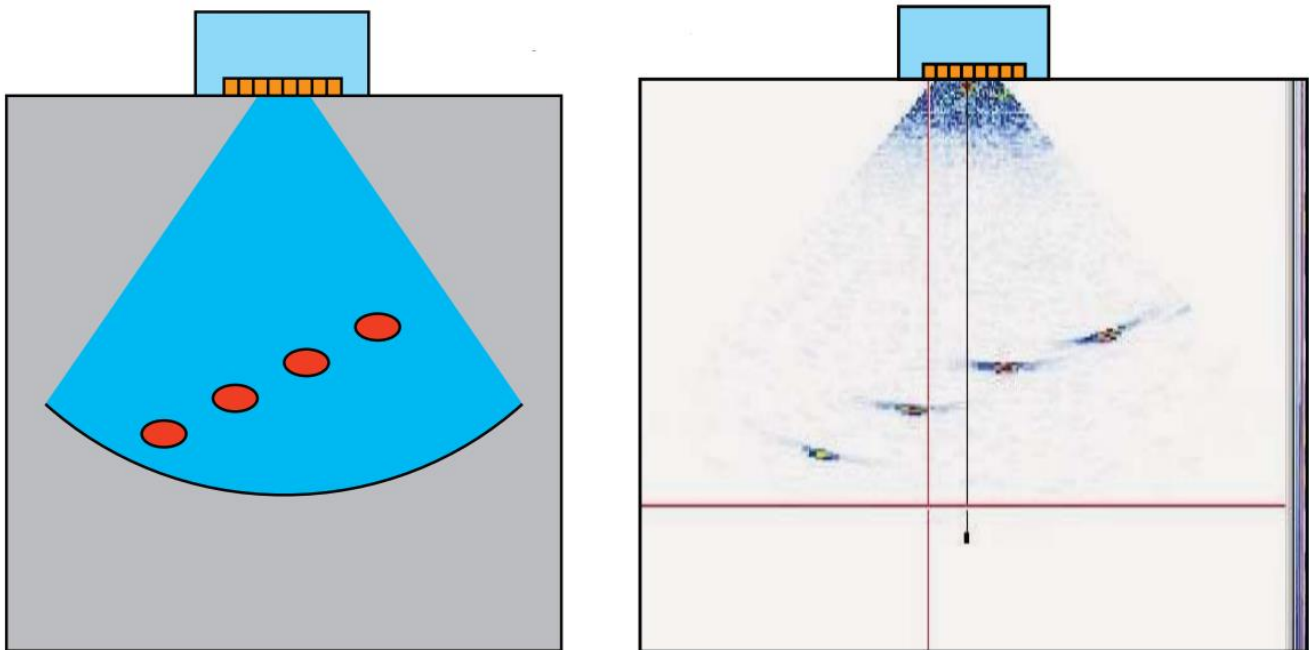
Obr. 18 - Schéma jednosměrného a dvojsměrného skenování [3]

Dále existují tři používané jednosměrné nerastrovací možnosti pohybu. Jejich cílem je kontrola celého materiálu při pohybu sondy po jediné nepřerušené trase. Prvním je lineární sken, který kontroluje materiál při pohybu sondy po jediné lineární trase. V kombinaci s elektronickým skenem se jedná o zdatelně rychlejší metodu, než jsou rastrovací metody. Druhým je Helical scan – skenování určené pro válcový povrch. Sonda se po něm pohybuje po jediné trase ve tvaru šroubovice. Posledním způsobem je spirálovité skenování, které je určené pro povrchy kruhovitého tvaru. Mimo tyto zmíněné způsoby pak ještě existují další možnosti pro specifické případy

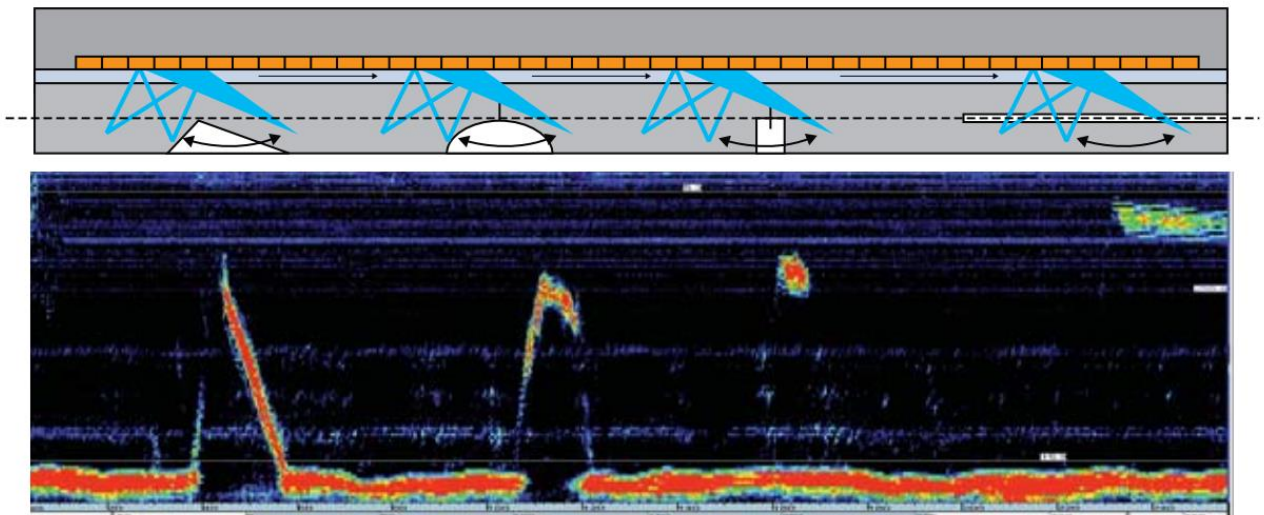
1.2.3 Zobrazení dat

Existuje několik způsobů, pomocí kterých můžeme zobrazit získaná data pro jejich další zpracování. Nejčastěji se používá více složených A-scanů získaných z různých úhlů, dob pohybu a časových zpoždění. Takto vzniklý výsledný obraz se nazývá dohromady B-scan. Informace ze skupiny A-scanů získaných z jedné pozice sondy jsou zobrazovány v reálném čase v sektorovém skenu (S-scan) nebo v C-scanu. Oba tyto způsoby zobrazují rychle obecný

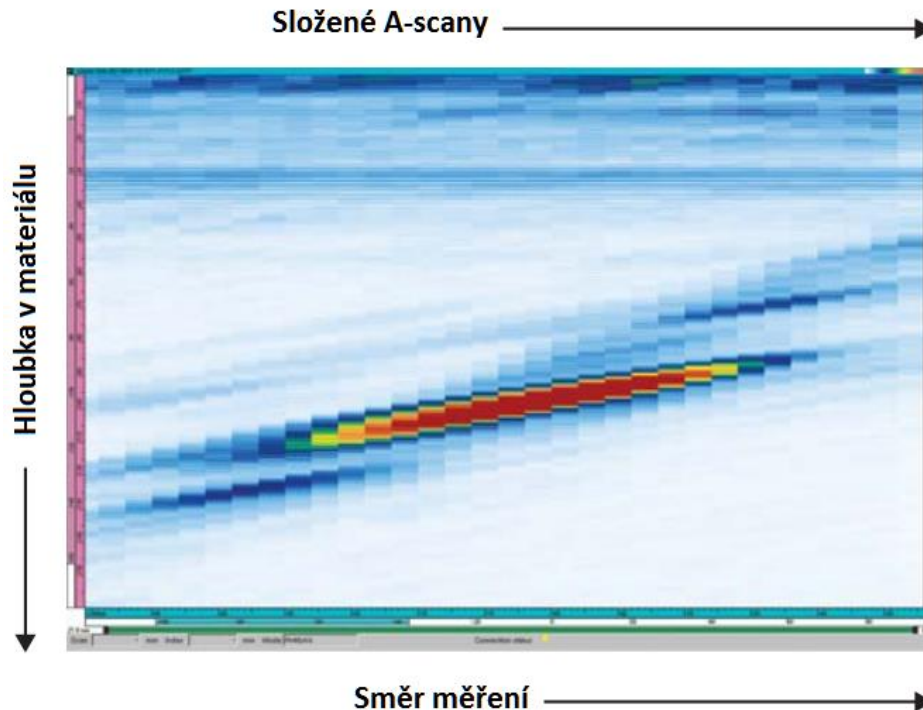
pohled a informace o možných vadách zachycených v dosahu ultrazvuku ve všech úhlech a pozicích.



Obr. 19 - Schéma a reálné zobrazení čtyř z boku vyvrtaných otvorů pomocí S-scanu [3]



Obr. 20 - Schéma a reálné zobrazení pomocí C-scanu [3]



Obr. 21 - Zobrazení pomocí B-scanu složením více A-scanů [3]

Složitějšího zobrazení lze dosáhnout kombinací lineárního a sektorového skenování pomocí skenování při více různých úhlech při pohybu sondy. Kombinace S-scanu a různých zobrazení vede k lepšímu zobrazení a rozpoznání vad. Zde lze také pro lepší zobrazení použít kombinace podélného a příčného vlnění bez nutnosti pohybu sondy.

1.3 Zkoušení pomocí prozařování [6],[10],[11]

Základem této technologie je vlastnost rentgenových paprsků pronikat materiálem. Toto záření se cestou skrz materiál zeslabuje podle jeho tloušťky. Pokud se v materiálu nachází dutiny nebo vady, je tím zmenšený reálný průřez materiálu a dojde k menšímu zeslabení pronikajících paprsků. Výsledek měření vychází právě z místních rozdílů intenzity prošlého záření.

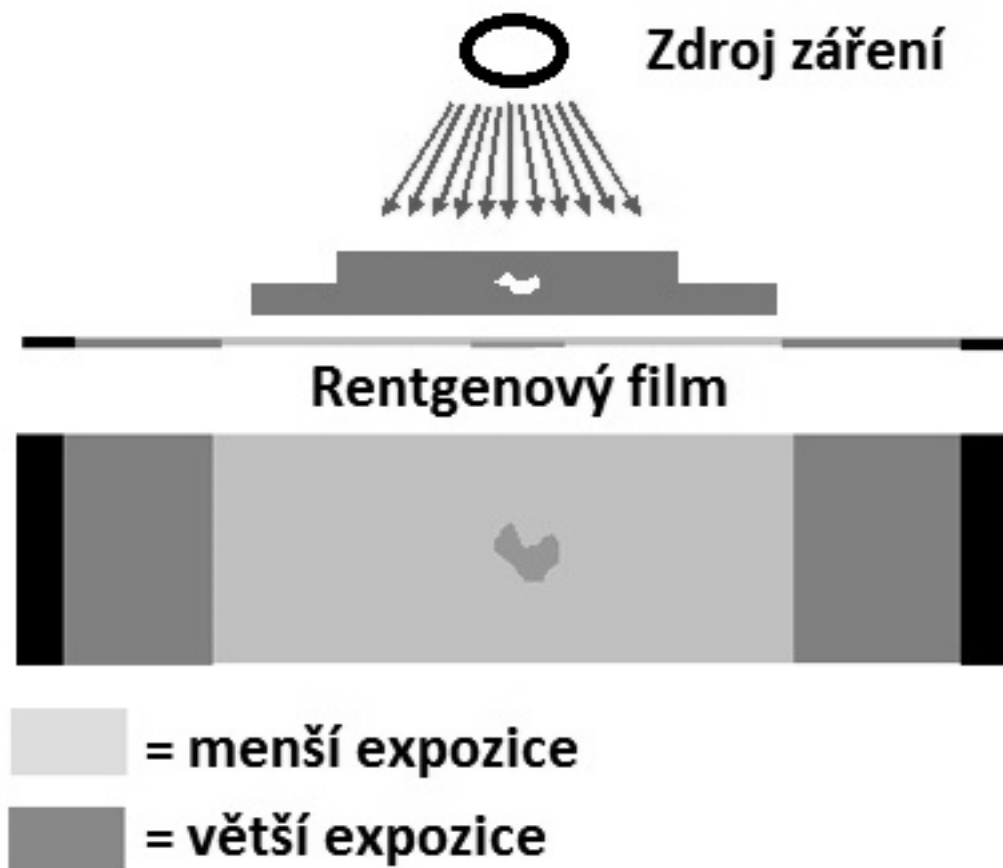
Existují dva druhy technologie využívající rtg. záření. Prvním je radiografie, ve které je prošlé záření zachytáváno na film těsně za prozařovaným objektem. Druhým je radioskopie, v rámci které je výsledné rtg. záření převáděno na viditelné světlo, se kterým se pracuje pod zvětšením.

Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění o krátké vlnové délce, a tudíž vysoké energii. Je emitováno nejčastěji pomocí rentgenky. Ta funguje na principu emitace elektronů, jejich následného urychlení (směrem od katody k anodě) a poté jejich nárazů na terčík, který emituje rentgenové záření.

Pokud potřebujeme vyšší urychlovací napětí, než umožňují rentgenky, je možné použít lineární urychlovač nebo betatron.

Záření Gama se od rentgenového liší jen původem, vzniká rozpadem jader (má ale zpravidla vyšší energii). K vysílání záření se používají gama zářiče, využívající radioaktivní izotopy prvků. Oproti rtg. zářičům nevyžadují elektrickou energii, mají nižší pořizovací cenu a lépe prozařují duté profily. Energií jejich záření ale nelze měnit, záření nelze přerušit a mají horší kontrast radiogramů.

K detekci (zaznamenání) těchto záření se používá interakce fotonů s detekční látkou. Hlavní používané metody se podle principu zobrazení dělí na ionizační – rentgenový film a luminiscenční – fluorescenční fólie. Dnes je běžné používání digitalizace obrazu. V případě kontroly materiálů z lehkých kovů lze použít kontinuální pozorování bez nutnosti jednotlivého snímkování. To se v praxi používá hlavně u hliníkových dílů.



Obr. 22 - Schéma rentgenové prozařovací metody [9]

Existuje několik způsobů prozařování, které se rozdělují podle toho, zda se prozařuje jediná stěna objektu, dvě stěny, ze kterých se vyhodnocuje pouze jediná, nebo dvě stěny, které se vyhodnocují obě. Můžeme je také rozlišovat podle umístění zářiče. Ten může být umístěný uvnitř objektu (a pak se rozlišuje, jestli centricky nebo excentricky), nebo vně. V druhém případě rozlišujeme, jestli prozařujeme jednu, nebo dvě stěny (tedy kde jsou umístěny filmy, nebo folie).

1.4 Vizualní zkoušení [6],[11]

Nejjednodušší technikou nedestruktivního zkoušení je právě to vizualní. Využívá se zde lidského oka a zjišťují se a přímo pozorují určité znaky. Vizualně lze pozorovat vady materiálu, jakost povrchu a odchylky rozměrů. Pro lepší účinnost této metody se využívá umělého osvětlení a optických pomůcek a někdy je pro správné vyhodnocení nutné použít měřicí pomůcky. Zaznamenání vady je možné díky kontrastu vady a okolního materiálu. Kontrast vzniká buď rozdíly jasu, rozdíly barvy nebo vrženým stínem.

Hlavní rozdělení této metody je na přímé a nepřímé vizualní zkoušení. Přímé znamená, že není přerušena optická dráha mezi okem a pozorovanou plochou. Pozoruje se tedy povrch přímo pohledem, nebo pomocí optických přístrojů (například pro špatně přístupná místa a vnitřní prostory). Obvykle se provádí jako místní kontrola a pro zjišťování detailů. Při nepřímém pozorování se získaná obrazová informace přeměňuje na jiný typ energie. Tím vzniká možnost přidat mezi zaznamenání obrazu a jeho vyhodnocení další kroky – jako různé zpracování či zvětšování obrazu. Dále to umožňuje oddělit práci operátora a vyhodnocovatele.

Další možností je všeobecné zkoušení, které se dá zařadit jako přímé lokální vizualní zkoušení. Jedná se o rychlé zhodnocení stavu materiálu krátkou prohlídkou nebo vnější obhlídkou. Jeho hlavním cílem je posoudit, jestli je nutné další podrobné prozkoumávání. Vzdálenost od zkoumaného povrchu nesmí být více než 600 mm, úhel pozorování nesmí být menší než 30° a musí být dostatečně silné osvětlení.

1.5 Kapilární zkoušení [6],[11]

Jedná se o povrchovou metodu, dokáže tedy odhalit pouze vady související s povrchem a na povrch otevřené. Tato metoda může být použita pro kontrolu většiny kovových a nekovových materiálů. Nelze kontrolovat materiály více pórovité a takové, které by byly narušeny použitými činidly. Metoda zvládá nejlépe detekovat plošné vady, naopak problémová je detekce mělkých a prostorových vad.

Základním principem této metody je využití vzlínivosti a smáčivosti penetrantů. Ty se nanášejí na zkoumaný povrch a nechají se vzlínat. Po následném odstranění penetrantu z povrchu zůstává jeho část zachycená v povrchových vadách. Na povrch je poté nanášena vývojka, která zvýrazní penetrant zachycený ve vadách. To se děje pomocí vzlínání penetrantu do nanášené vývojky. Indikace vady je postavena na kontrastu vývojky (která bývá bílá) a penetrantu. Penetranty mohou být buď barevné, nebo fluorescenční (viditelné pod UV světlem).

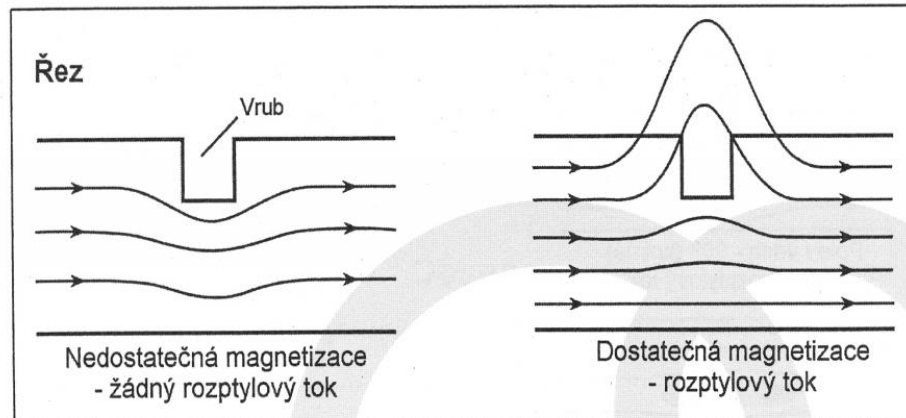
1.6 Magnetická prášková metoda [6],[11]

Tato metoda využívá specifických vlastností magnetických polí. Jedná se o metodu zjišťování rozptylových polí. Je určena pro odhalení povrchových a podpovrchových vad, vady umístěné ve větších hloubkách jsou touto metodou nedetekovatelné. Vzhledem k nutnosti magnetizace předmětu lze kontrolovat pouze feromagnetické materiály.

Základním principem této metody je zachycení rozptylových polí, která vzniknou nad povrchem součástí v oblastech s nespojitostmi v materiálu. Přítomnost těchto polí, a tedy i

přítomnost vad je detekována pomocí naneseného feromagnetického prášku, jehož některé částice jsou těmito poli zachyceny.

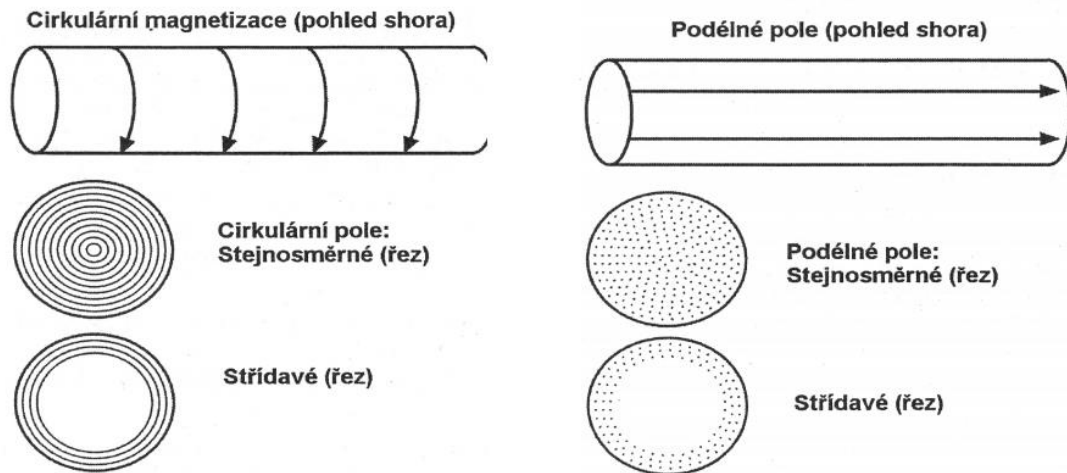
Magnetické siločáry nemohou být přerušeny, takže v případě, že v cestě stojí nespojitost, dochází k deformaci magnetického pole. V případě nízké magnetizace materiálu, nebo výskytu vady ve větší hloubce v materiálu dochází k takovému vychýlení magnetického pole, které není tato metoda schopna zaznamenat. Pokud je ale těleso dostatečně zmagnetováno a vada se nachází v povrchu nebo blízko povrchu materiálu, pak vystoupí siločáry z magnetovaného předmětu nad jeho povrch, vlivem magnetické vodivosti vzduchu vadu překlenou a za vadou se opět šíří předmětem dále.



Obr. 23 - Schéma vzniku rozptylového toku na vrubu [11]

Existuje více možností magnetizace, v zásadě se jedná o metody pólové (podélné) magnetizace, cirkulární (příčné) magnetizace a metody, které se kombinují. U magnetizace pólové se v předmětu vytvoří magnetické pole, jehož magnetický tok prochází předmětem i mimo něj. V místech vstupu a výstupu siločár z předmětu se tak vytvoří magnetické póly. Této magnetizace se dosahuje pomocí cívky, permanentního magnetu nebo magnetizačního jha.

Při cirkulární magnetizaci je magnetický tok uzavřen uvnitř předmětu a vnitřní magnetické pole se tak nijak neprojevuje na venek. Tato magnetizace vzniká přímým průchodem proudem tělesem, pomocí pomocného vodiče, příložených elektrod nebo indukci proudem. Dále se liší magnetizace pomocí jednosměrného a střídavého proudem. Zatímco u jednosměrného se magnetizuje celý objem materiálu, při použití střídavého proudem je magnetizována jen tenká povrchová vrstva, která závisí na frekvenci proudem.



Obr. 24 - Porovnání možností magnetizace [11]

Postup pro provedení magnetické práškové metody začíná vyčištěním zkoušeného povrchu. Následuje nanášení zkušebního prášku a magnetizace. Jedná se o magneticky měkký prášek, který je buď barevný nebo fluorescenční. Nanášení může být provedeno poléváním nebo ponořením do tekuté suspenze, nebo nanášením suchého prášku pomocí stlačeného plynu. Nanášení se provádí v průběhu magnetizace, po jeho ukončení většinou magnetizace pokračuje dalších několik vteřin. Poté je nutné vyhodnotit vzniklé indikace.

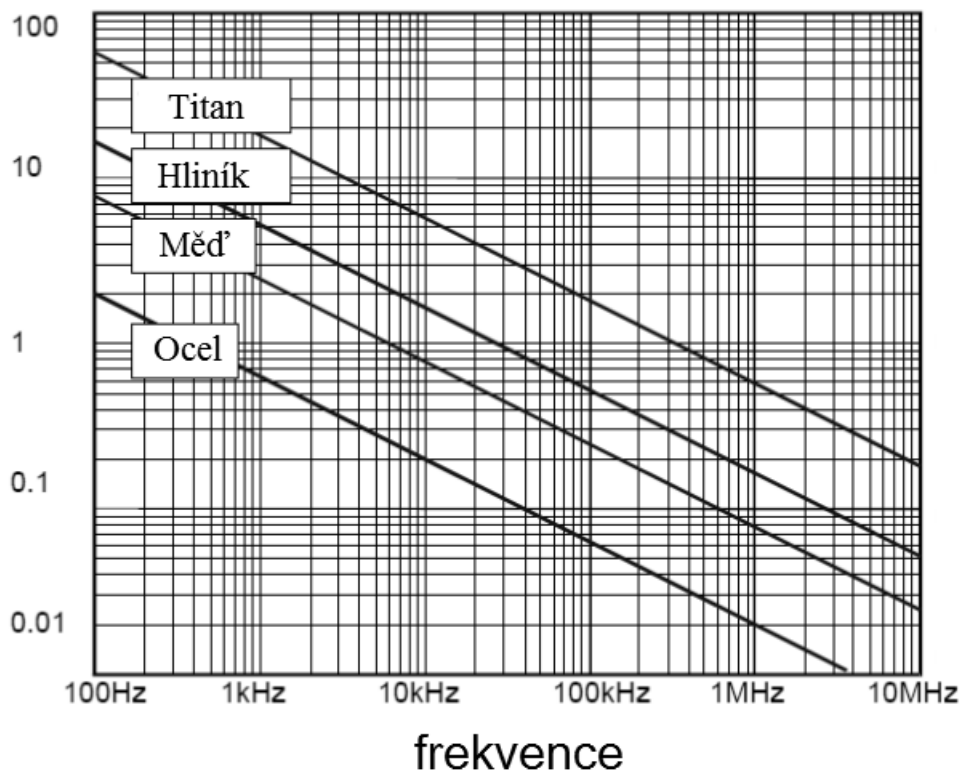
1.7 Metoda vířivých proudů [6],[11]

Jedná se o bezdotykovou měřicí metodu pro povrchové a podpovrchové vady, při které se ve zkoušeném předmětu zjišťují změny fyzikálních vlastností pomocí magnetického střídavého pole.

Základem je generace magnetického pole pomocí sondy nebo více sond (například pro metodu Eddy Current Array). Když se tato sonda přiblíží do blízkosti elektricky vodivého materiálu, její magnetické pole začne uvnitř materiálu indukovat vířivé proudy. Tyto vířivé proudy tvoří uzavřené smyčky kolmé k magnetickému toku a indukují vlastní sekundární magnetické pole. To působí proti původnímu magnetickému poli sondy. Přítomnost nečistot a vad ve zkoumaném materiálu vede k narušení smyček vířivých proudů, a projeví se tak na změně velikosti zachycovaného sekundárního proudu.

Hloubka vniku vířivých proudů, a tím i hloubka detekce vad závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu a na frekvenci použitého elektrického proudu. Volbou frekvence tak dosáhneme požadovaného rozložení magnetického pole.

hloubka vniku [mm]



Obr. 25 - Hloubka vniku v závislosti na frekvenci [11]

K samotnému snímání se používá několik druhů sond a způsobů měření. Absolutní sondy mají pouze jedno cívkové vinutí, které tím pádem funguje jako vysílač i přijímač dohromady. Reflexní sondy používají vinutí dvě, jedno na buzení a druhé na snímání. Toto uspořádání umožňuje vyšší přesnost snímání. Diferenční sondy obsahují dvě vinutí, která jsou proti sobě v proti-fázi. U nich je vyhodnocován rozdíl mezi impedancemi obou vinutí.

Používají se sondy velkého množství tvarů a velikostí, které mohou být specializované pro různé tvary měřených předmětů a způsobů měření. Používají se metody s průchozí cívkou, kde měřený předmět prochází cívkou, metody s příložnou sondou, nebo třeba sondy určené pro kontrolu vnitřků otvorů. Dalšími metodami jsou Eddy Current Array, které používají větší množství sond, nebo zkoušení vzdáleným polem.

Kromě detekce vad se dají metody používající vířivé proudy použít i ke kontrole tepelného zpracování, ke kontrole záměny materiálu nebo k měření tloušťek materiálů a vrstev.

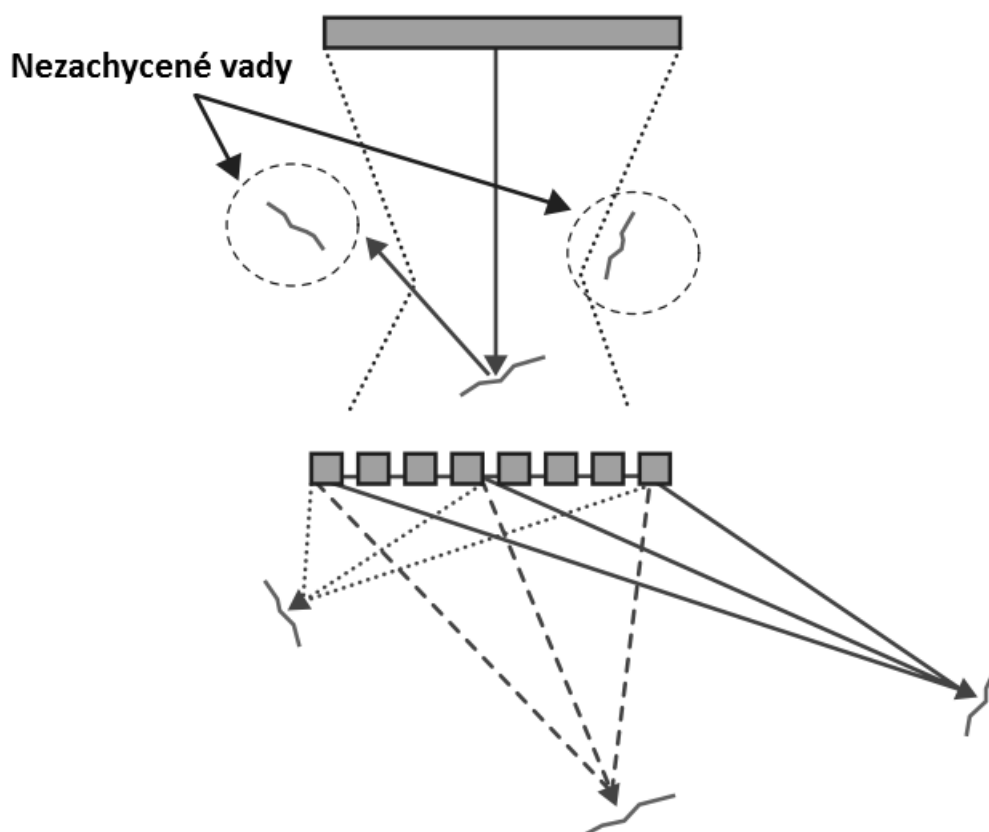
2 Srovnání jednotlivých technologií NDT, jejich výhody a nevýhody

Tato část se věnuje hlavně porovnávání jednotlivých podobných metod a technologií mezi sebou, tak zdůrazňuje i jejich výhody.

2.1 Ultrazukové metody a Phased array [3],[4],[6],[11]

Srovnání konvenčních ultrazukových metod a z nich vycházející metody Phased array není složité. Vývoj Phased array metody probíhal s cílem vytvořit techniku, která by doplnila konvenční metody v oblastech, ve kterých mělo jejich použití nevýhody.

Mezi hlavní výhody Phased array patří jeho rychlost, která je u lineárního měření až řádově vyšší než u metod, které vyžadují pro kontrolu celé plochy rastrovací skenování. Další výhodou je všestrannost používaných sond. Na rozdíl od specializovaných a úzce zaměřených sond používaných při konvenčních ultrazukových měřeních zvládne jedna Phased array širokou variabilitu aplikací. S tím také souvisí malé rozměry sond. Phased array sonda tedy může zároveň s menší velikostí předat více informací než několik konvenčních sond.



Obr. 23 - Rozdíly zachycení vad konvenční odrazovou metodou (nahore) a metodou Phased array (dole) [3]

Velkým rozdílem těchto metod je zobrazení získaných informací uživateli, a tím pádem i vyhodnocování těchto získaných dat. U konvenčních ultrazvukových metod je interpretace složitější, a to hlavně pro nejpoužívanější zobrazení pomocí A-scanu. Vyhodnocování dat získaných pomocí Phased array je intuitivnější, zobrazená vizualizace více odpovídá reálné situaci v materiálu.

Obecnou výhodou Phased array metody je také její elektronizace, propojení s počítačem. To umožňuje jednoduché nahrávání programů a možnost předpřipravit nastavení přístroje a měření. S tím souvisí i zásadní výhoda oproti konvenčním metodám, a to ovládání jednotlivých impulzů, jejich amplitudy vlnění a jejich vzájemné zpoždování, které umožňuje širší možnosti měření.

2.2 Ultrazvukové metody a prozařovací metody [3],[4],[6],[10],[11]

Metody využívající ultrazvuku i krátkovlnného elektromagnetického vlnění patří obojí k objemovým metodám. Používají se tedy ke hledání vad uvnitř objemu materiálu a zároveň mají oba druhy metod nevýhody při hledání vad na povrchu materiálu.

Největší rozdíl těchto technik vychází ze způsobu zachycování signálu. Nejvíce používaná ultrazvuková odrazová metoda a metoda Phased array využívají a zpracovávají signál odražený od vady, zatímco prozařovací metody zachytávají signál prošlý celým objemem materiálu. V případě ultrazvukových metod je tedy hlavním kritériem pro zaznamenání vady její velikost, a to konkrétně průřez ve směru dopadu paprsku. Síla signálu tedy nevyovídá tolik o hloubce vady, ale spíše o její odrazné ploše. Odrazový způsob má proti prozařovacím jednu hlavní výhodu - je možné přesně zjistit hloubku umístění vady v objemu materiálu. Prozařovací metody zpracovávají prošlé záření a vady jsou identifikované díky rozdílu prošlé intenzity, díky kontrastu při zobrazení. Tudíž u vady je pro její zaznamenání nutná co největší hloubka ve směru šíření paprsků. Ultrazvukové metody jsou tedy lepší v odhalování vad rovnoběžných s povrchem, a naopak prozařovací pro odhalování těch kolmých.

Dalším rozdílem je jejich přístrojové vybavení, obsluha a bezpečnost pro obsluhu. Vybavení pro ultrazvukové zkoušení je menší a lépe se s ním manipuluje. Díky tomu bývá přenosné a využívá se toho při kontrolách rozměrných objektů a objektů v činném provozu. Ultrazvukové vlnění je také na rozdíl od elektromagnetických záření bezpečné pro obsluhu. Vybavení pro prozařovací zkoušky bývá nepřenosné a kvůli své nebezpečnosti vyžaduje stínění v místě kontrolovaného materiálu.

2.3 Magnetické metody

Magnetická prášková zkouška a měření pomocí vířivých proudů využívají magnetismus. Zatímco magnetická prášková metoda vyžaduje, aby byl materiál feromagnetický, měření pomocí vířivých proudů může být provedeno na širším spektru materiálů. U feromagnetických materiálů navíc ale vznikají magnetické efekty, které mohou zastínit efekty indukované pomocí vířivých proudů. Lze tedy předpokládat, že se skupiny materiálů testovaných těmito dvěma metodami budou lišit.

2.4 Vizuelní a kapilární zkoušení

Obě tyto metody fungují na přímém pozorování povrchových vad. Vizuelní zkoušení nepoužívá žádné přípravky na zvýšení kontrastu a jedním z hlavních požadavků je předepsané osvětlení. Naproti tomu kapilární metoda využívá prostředků pro zvýšení kontrastu vady a jejího okolí. Může se jednat o barevnou nebo fluorescenční indikaci, obě tyto možnosti ale zdatelně zvyšují detekční hranici velikosti objevených vad oproti vizuelnímu zkoušení.

3 Význam kalibračních a zkušebních těles [3],[6],[11]

Určité metody vyžadují použití speciálních těles. Může se jednat buď o kalibrační tělesa a etalony, pomocí kterých se přístroje a techniky nastavují, nebo o referenční tělesa. Ty obsahují přesně určenou vadu, a tedy by při použití dané metody měly vyvolat stejnou odezvu. Pomáhají tedy při určování a vyhodnocování vad.

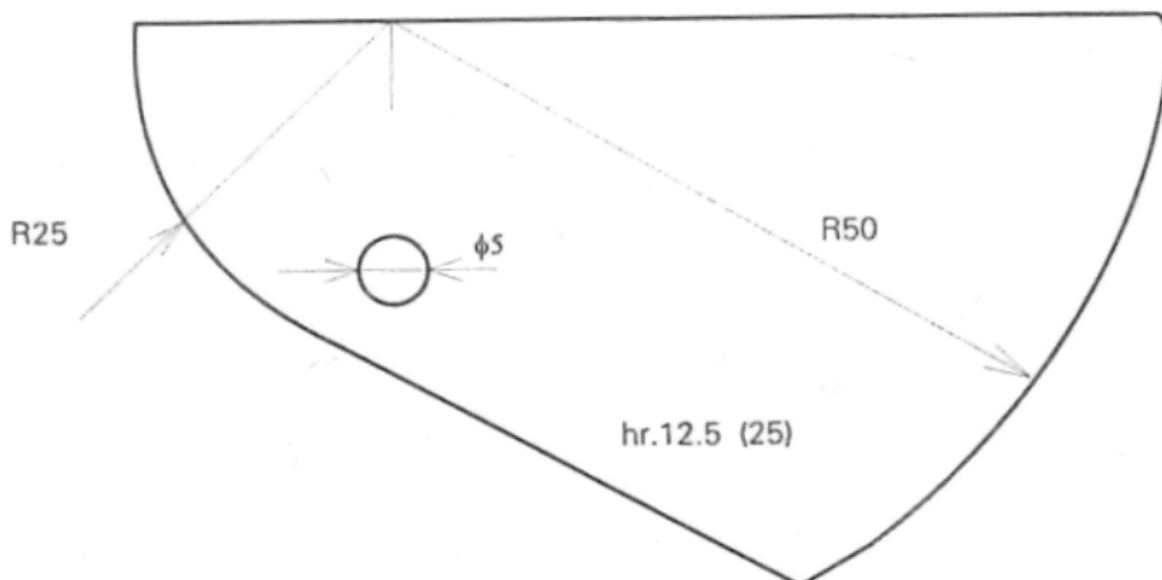
Pro potřeby výzkumu je možné vyrobit a používat široké možnosti zkušebních těles. Takovými tělesy jsou i připravené vzorky pro experiment.

3.1 Tělesa pro ultrazvukové zkoušení

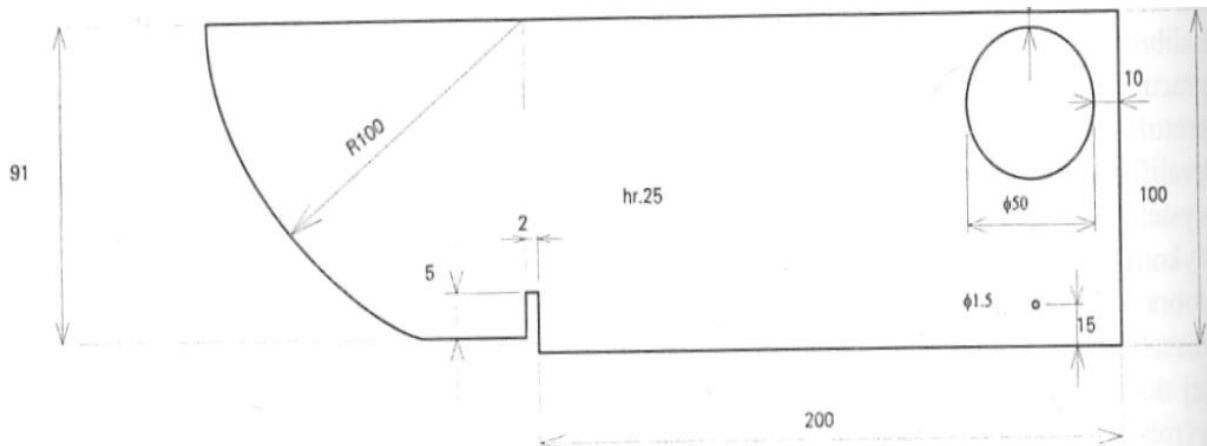
Pro ultrazvukové přístroje je potřeba kalibrovat vzdálenost a citlivost. Kalibrace citlivosti se provádí nastavením přístroje podle intenzity odezvy. Pro kalibraci délky je potřeba použít předmět ze stejného materiálu, jako je zkoušený objekt, u kterého navíc známe jeho přesnou tloušťku.

Existují tři typy kalibračních měrek. První je kalibrace přes zkoušený objekt, kde se využívá stejný objekt jako je zkoušený. Druhé jsou referenční měrky, které jsou tvarem, rozměrem, materiálem a tepelným zpracováním velmi blízké kontrolovanému objektu. Takováto kalibrace se velmi blíží reálným podmínkám, ale pro vysokou cenu se využívá hlavně v sériové výrobě.

Poslední možností jsou kalibrační měrky, které nemají vazbu na konkrétní výrobek. Ty mají několik známých rozměrů pro kalibraci délky i její kontrolu. Dále obsahují válcové plochy pro kalibrace úhlových sond. Používá se univerzální měrka K1, která obsahuje několik umělých vad a dále menší a lehčí měrka K2.



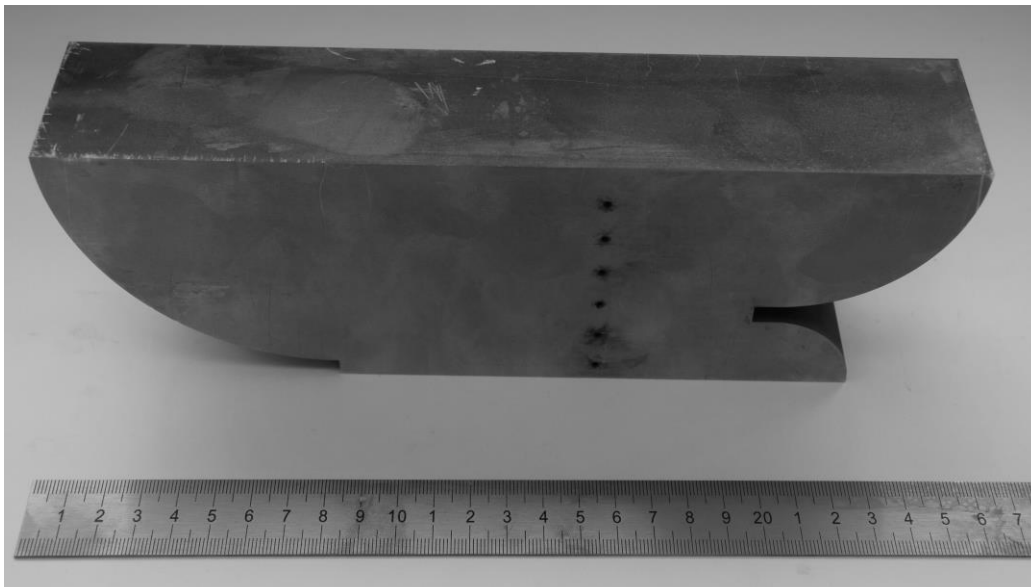
Obr. 24 - Měrka K2 [11]

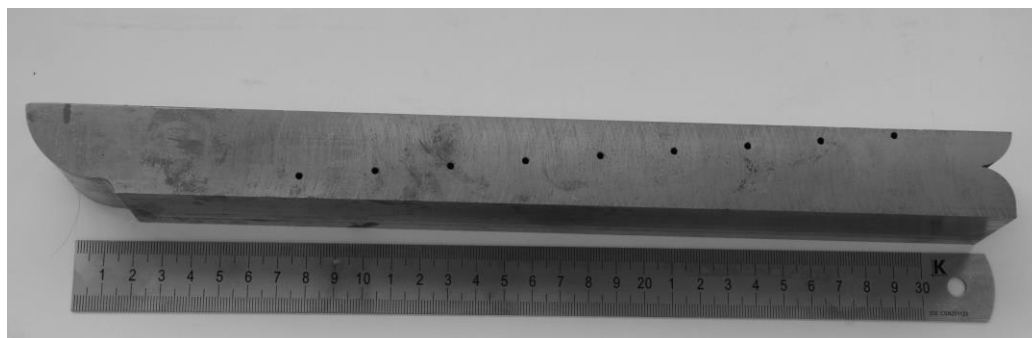


Obr. 25 - Měrka K1 [11]

3.2 Kalibrační měrky používané při měření

Tyto kalibrační měrky jsou ze známého materiálu a obsahují řadu vyvrtaných otvorů v různé vzdálenosti od povrchu.





Obr. 26 a 27 - Používané měrky

4 Návrh experimentů, definování cílů

Hlavním zaměřením experimentu je porovnávat indikace a signály získané od provozních vad s indikacemi a signály získanými z vad uměle vytvořených. Tyto uměle vytvořené vady se dají dělit na jednoduše vytvořené umělé vady a na vady vytvořené tak, aby odezvou co nejvíce odpovídaly reálným vadám. Tyto vady jsou označovány anglickou frází „as real“ a v této práci se označují zkratkou AR.

Ideou je přiblížit se odezvou získanou z umělé vady co nejvíce k odezvě stejné reálné vady. Návrhem by mohla být opatření a postupy pro výrobu umělých vad, které budou sloužit pro lepší identifikaci a vyhodnocení dané vady. Výstupem této části práce je tedy zhodnocení zkoušených AR vad a jejich porovnání s reálnými vadami. Součástí je i porovnání AR vad s umělými i reálnými vadami a porovnání umělých a reálných vad.

Cílem této práce je také porovnávání jednotlivých zkušebních metod a jejich možností. Každá metoda má jiné předpoklady a oblasti pro své použití, svoje výhody a nevýhody. Jejich srovnáváním se na takové rozdíly upozorní.

5 Experimentální měření na vzorcích různými metodami

V průběhu experimentu byla provedena měření pomocí co největší škály NDT metod na širokém rozmezí vzorků a vad. Všechny testované vzorky jsou z ocelí uhlíkových nebo austenitických. Z povrchových a podpovrchových metod bylo použito kapilární zkoušení, magnetická prášková metoda a testování pomocí vířivých proudů. Z objemových metod bylo použito ultrazvukové testování, ultrazvuková metoda Phased array a prozařovací zkoušení.

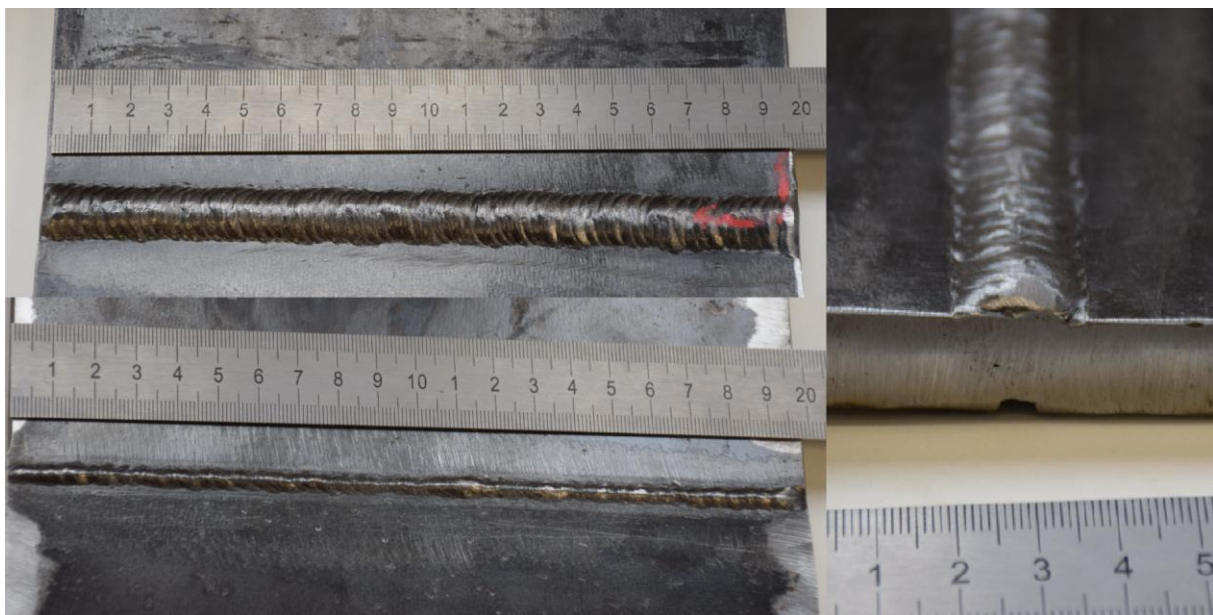
5.1 Experimentální vzorky

Použité vzorky obsahují tělesa z austenitických i neaustenitických materiálů s vadami v objemu materiálu nebo v oblasti svarů. Jedná se o tělesa s vadami z reálného provozu, vadami připravenými uměle i s vadami připravenými se snahou se co nejvíce přiblížit realitě. Výběr reálných vzorků byl proveden tak, aby byly získány výsledky z měření nejčastějších výrobních a provozních vad. Vzorky, které byly vyrobeny uměle, jsou připraveny takovým způsobem, aby se přiblížily těm reálným.

Všechny vzorky byly před zkoumáním dalšími NDT metodami podrobeny vizuální kontrole a zároveň byly zdokumentovány vzorky i jejich viditelné vady.

5.1.1 Vzorek č. 1

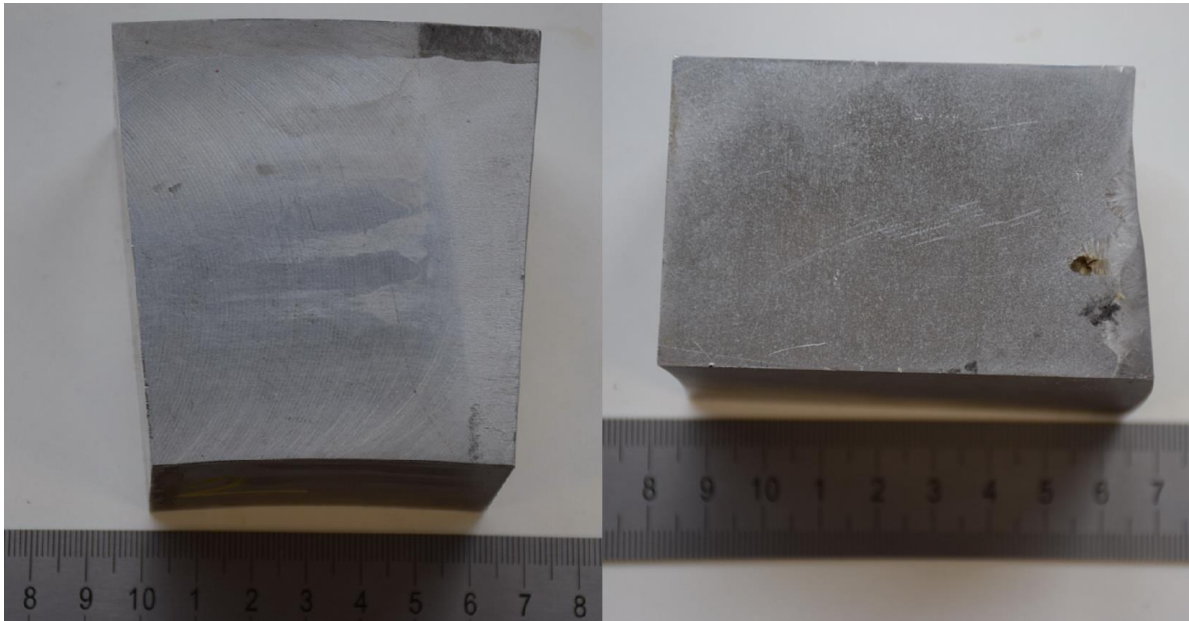
Vzorek číslo jedna tvoří dvě desky svařené dohromady tupým svarem. Práce při svařování byla záměrně provedena špatně tak, aby se zvýšil počet vad ve svaru. Očekával se zde nález bublin a zavařených strusky. Jedná se o AR vady, nelze ale předem určit jejich velikost a rozmístění.



Obr. 28 - Svar na vzorku č. 1

5.1.2 Vzorek č. 2

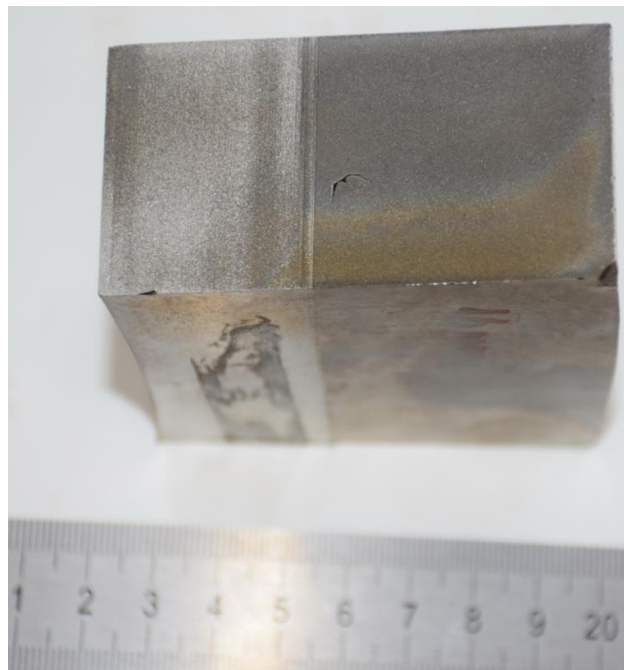
Jedná se o vzorek z trubky parogenerátoru. V návarové ploše byla objevena bublina, jedná se tedy o reálnou vadu.



Obr. 29 - Čelní a boční pohled na vzorek č. 2

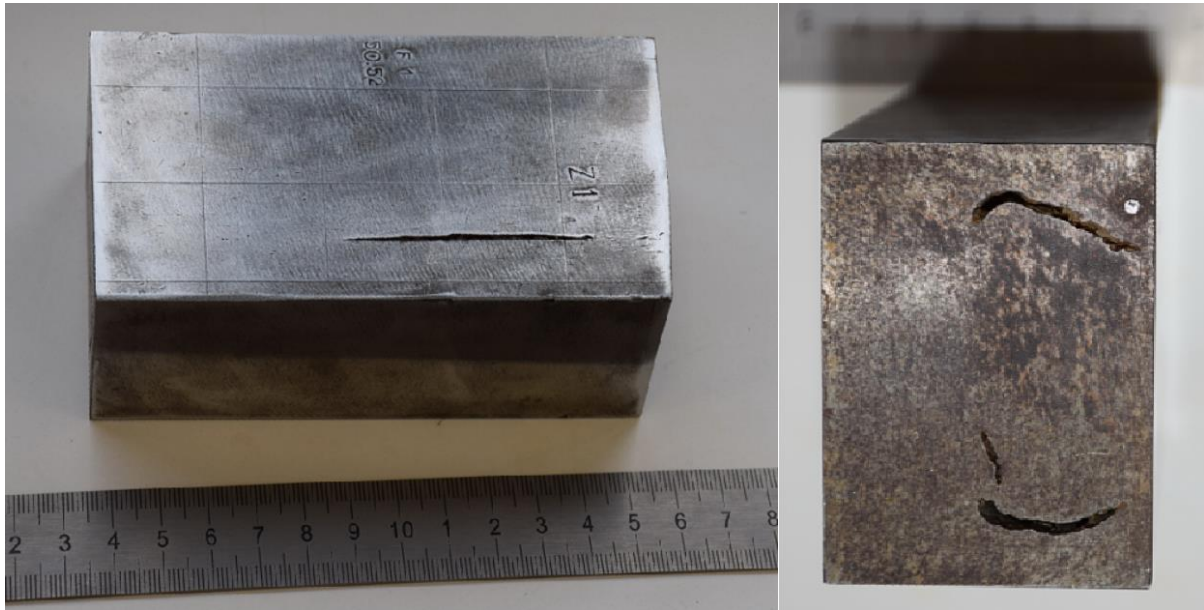
5.1.3 Vzorčky s licími vadami

Jedná se o trojici provozních vzorků, ve kterých byly objeveny licí vady. Vzorek č. 3 je opět výřez z parogenerátorové trubky. V objemu materiálu byla objevena malá vada.



Obr. 30 - Boční pohled na vzorek č. 3

Vzorky 4 a 5 obsahují lící vady ve velkém objemu materiálu. Ve vzorku č. 4 vystupuje vada i na povrch, na řezu je poté vidět velký rozsah vad.



Obr. 31 - Vzorek č. 4 v celkovém pohledu a v řezu

Podobný je i vzorek č. 5, kde na jeho spodní ploše jsou jasně vidět vady vystupující na povrch.

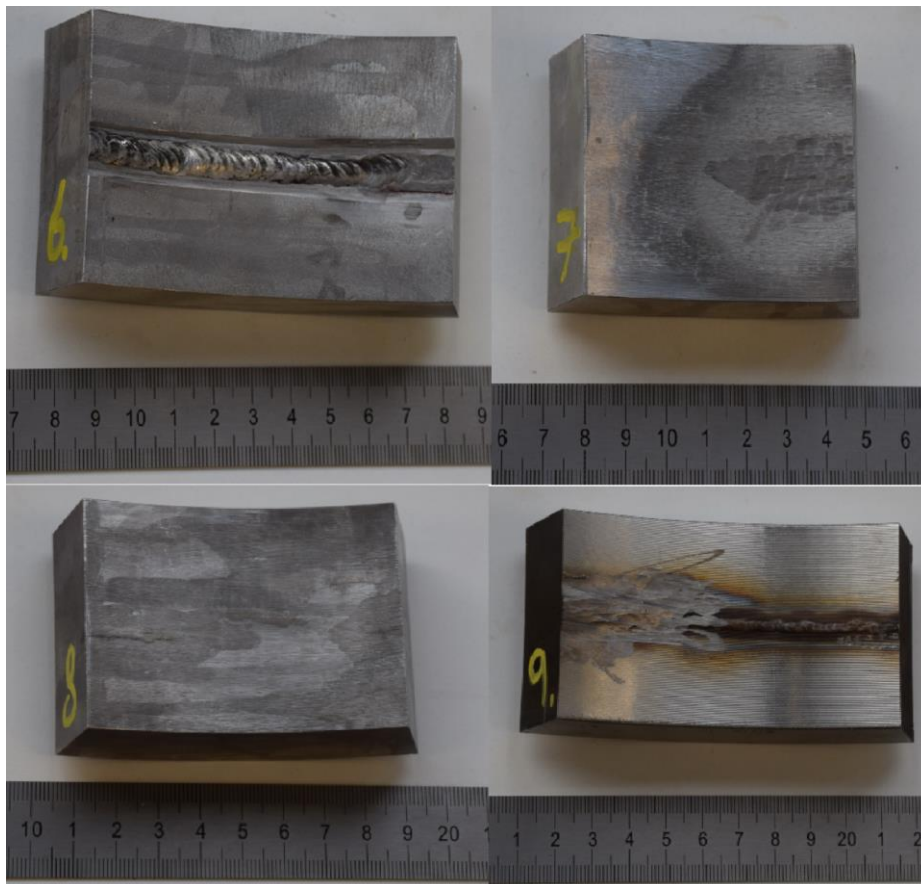


Obr. 32 - Pohled shora a detail spodní plochy vzorku č. 5

5.1.4 Vzorky s vadami ve svaru

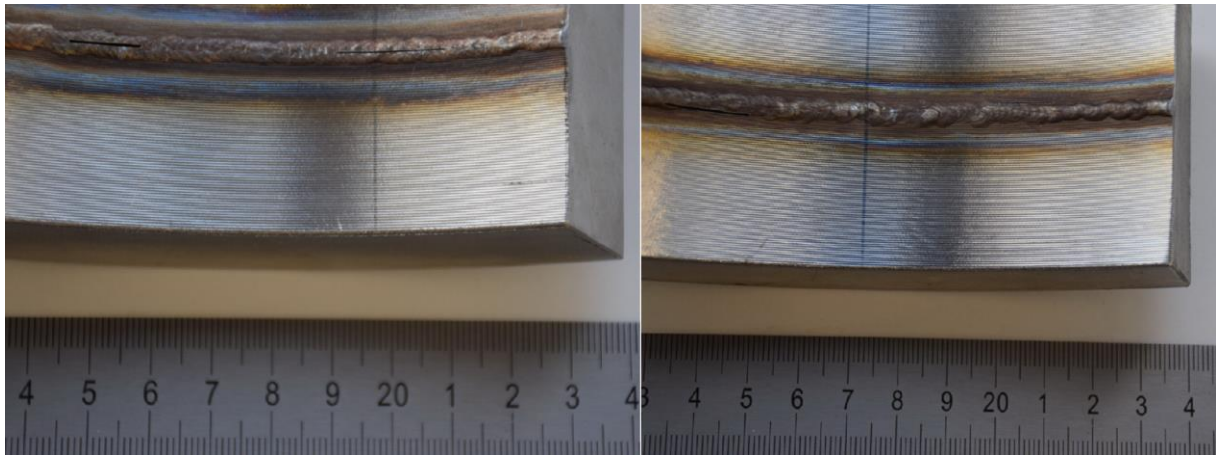
Tuto skupinu tvoří sedm vzorků se svary, šest vzorků z trubkových těles a jeden vzorek z plochého tělesa. Vzorky s čísly 6 až 9 spadají do skupiny provozních vad, ve zbylých byly připraveny umělé vady. Z těchto tří byl u vzorku č. 10 kladen důraz na vytvoření AR vady.

Čtveřice vzorků s čísly 6 až 9 jsou vyrobeny z austenitické oceli a ve všech byly nalezeny trhliny ve svarech. Vzorek 8 má tyto trhliny dvě, ostatní vzorky jednu. Řez byl při výrobě vzorků veden v místě trhliny.



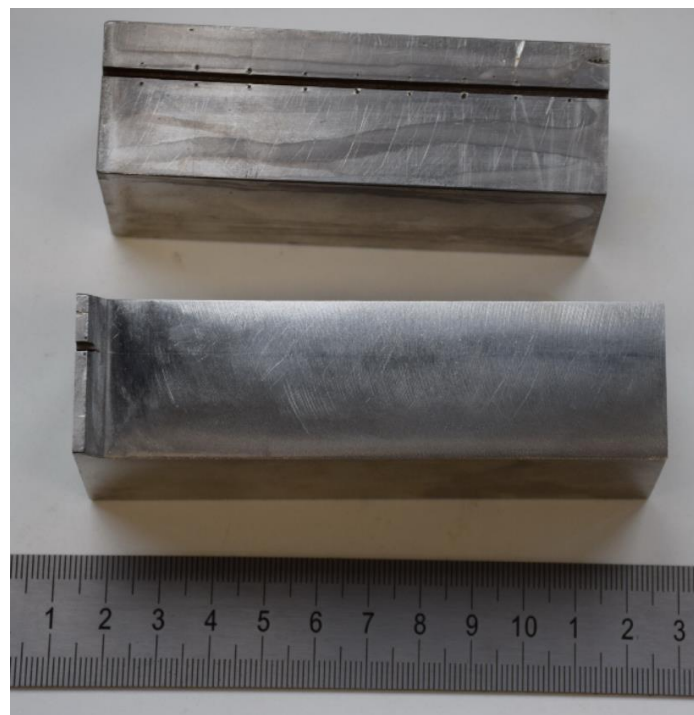
Obr. 33 - Vzorky s trhlínami ve svaru

Dvojici tvoří vzorky č. 12 a 13. Opět se jedná o austenitické vzorky se svarem, v tomto případě ale byly vady vytvořeny uměle. Přímou do oblasti svaru byly vyjiskřeny drážky. Ve vzorku č. 12 jsou vyjiskřeny dvě drážky lišící se v šířce. Tyto drážky jsou vyjiskřeny ve směru kolmém k povrchu a umístěné uprostřed svaru. Vzorek č. 13 byl připraven stejným způsobem, hlavní rozdíl je ten, že obě vyjiskřené drážky jsou skloněné o 45° k povrchu vzorku a jsou lehce posunuté od středu svaru. V důsledku toho vytvořené drážky procházejí podél svaru.



Obr. 34 - Vyjiskřené drážky ve svarech

Posledním z této skupiny je vzorek č. 10, ve kterém byla vytvořena umělá AR trhlina. Do povrchu polotovaru byla v podélném směru uměle připravena drážka. Ta byla poté použita jako koncentrátor napětí a při cyklickém namáhání byla vytvořena únavová trhlina vycházející z tohoto vrubu. Drážka byla následně odbroušena a povrch vzorku upraven. Takto připravená trhlina byla i přes povědomí o jejím umístění vizuální kontrolou jen obtížně zjistitelná.



Obr. 35 - Vzorek č. 10 a nad ním polotovar s vrubem



Obr. 36 - Detail svaru na polotovaru pro vzorek č. 10

5.1.5 Vzorky bez svarů

V této skupině se nacházejí tři vzorky. Vzorek č. 15 je homogenní a obsahuje uměle vytvořenou vadu – do jeho povrchu byla vyjiskřena drážka.



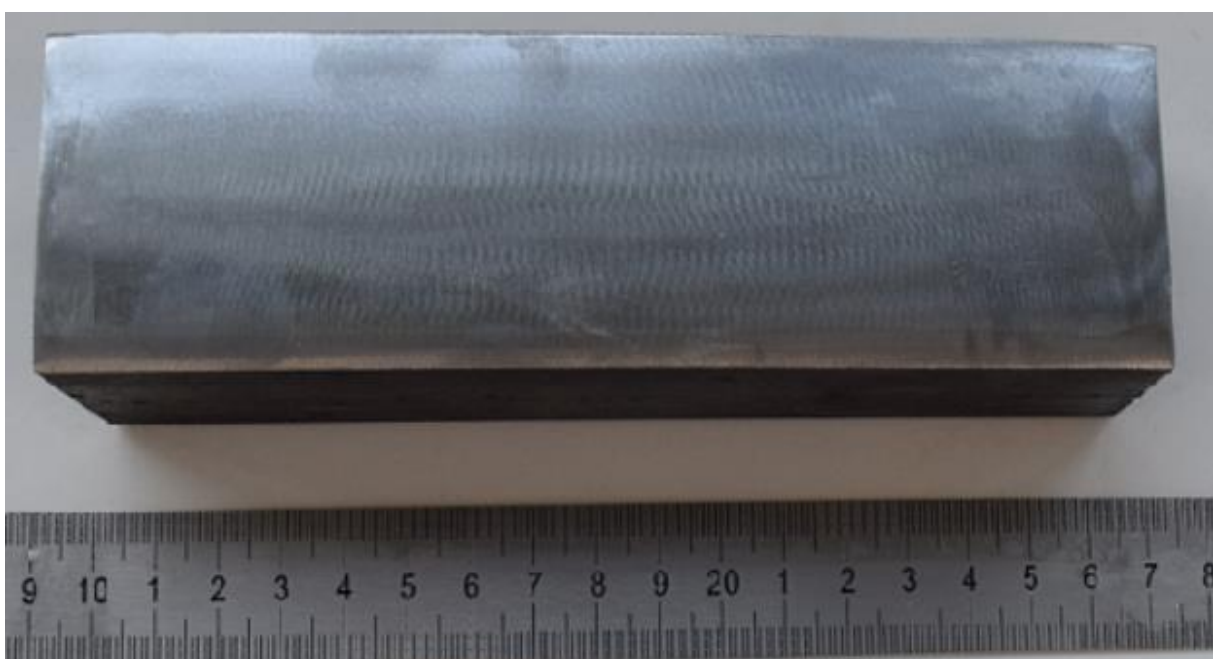
Obr. 37 - Vzorek č. 15 s vyjiskřenou drážkou

U zbylých dvou vzorků č. 11 a 14 byl kladen důraz na vytvoření AR vad. Vzorky byly vytvořeny stejnou metodou a jsou na první pohled mezi sebou zaměnitelné.

Jejich výroba probíhala tak, že v připraveném tělese byly vytvořeny tři drážky, z nichž prostřední působila jako vrub a iniciační místo trhliny. Zbylé dvě byly určeny pro uchycení čelistí. Následně probíhalo cyklické zatěžování vzorků pomocí čelistí, což vyústilo ve vznik únavové trhliny šířící se od připraveného vrubu. Následně byl vrchní povrch odbroušen a upraven. Takto připravené trhliny nejsou vizuálním přezkoumáním zjištělné.



Obr. 38 - Detail připravených drážek na polotovaru pro vzorky č. 11 a 14



Obr. 39 - Vzorek č. 14

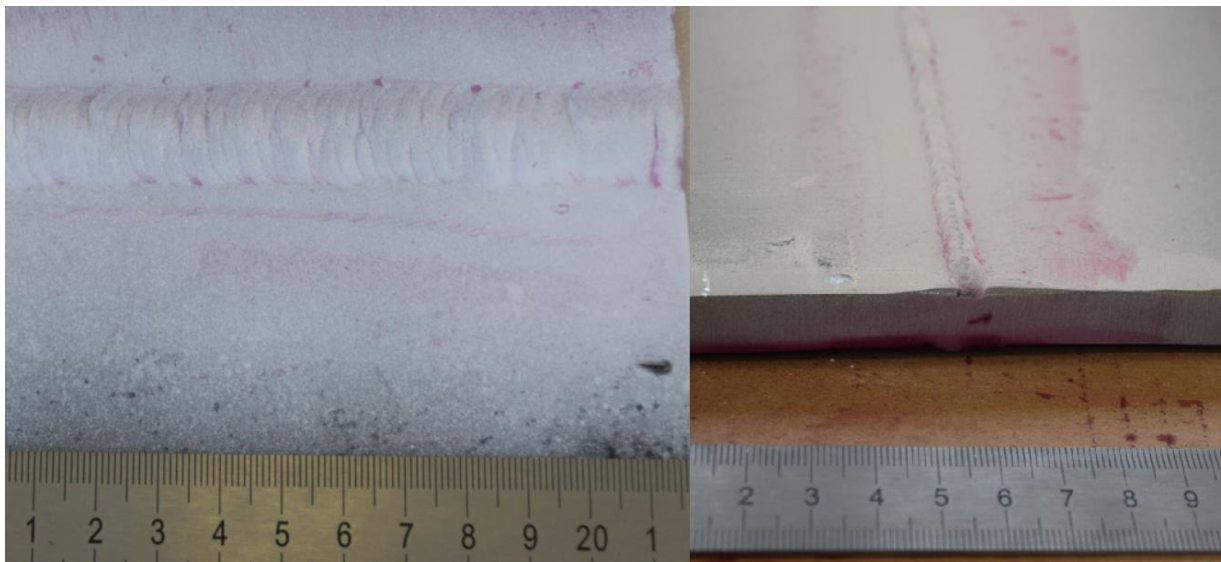
5.2 Zkoušení pomocí kapilární zkoušky

Pro zkoušení pomocí kapilární zkoušky (PT) byly vybrány jen některé vzorky. U vzorků č. 2 až 5 nebylo zkoušení provedeno, protože mají jasné indikace pomocí vizuálního zkoušení. U vzorků č. 8, 9 a 13 nebylo zkoušení provedeno, protože se předpokládala vysoká podobnost se vzorky ze stejných skupin.

Pro aplikaci byla použita jedna ze základních metod, a to nanesení penetrantu sprejem. Jako penetrační činidlo byl použit barevný indikátor Helling NORD-TEST U88, jako vývojka byla použita směs křídly v těkavé kapalině s označením Helling NORD-TEST U89. Povrch vzorků byl očištěn pomocí čističe Helling NORD-TEST U87 před nanesením barvy, další čištění probíhalo v rámci postupu zkoušení. Tato zkouška je normována podle ČSN EN ISO 3452-1.

5.2.1 Vzorek č. 1

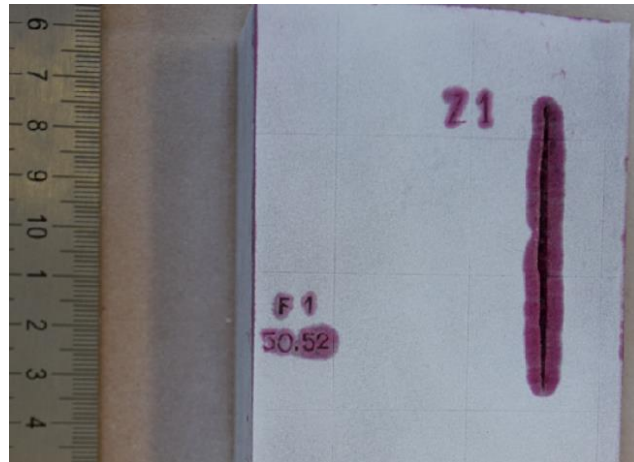
U svařovaných plechů vzorku č. 1 je předpokládán výskyt vad uvnitř svaru. Provedená kapilární zkouška neukázala žádnou indikaci vady, což je očekávaný výsledek.



Obr. 40 – Kapilární indikace u vzorku č. 1

5.2.2 Vzorek č.4

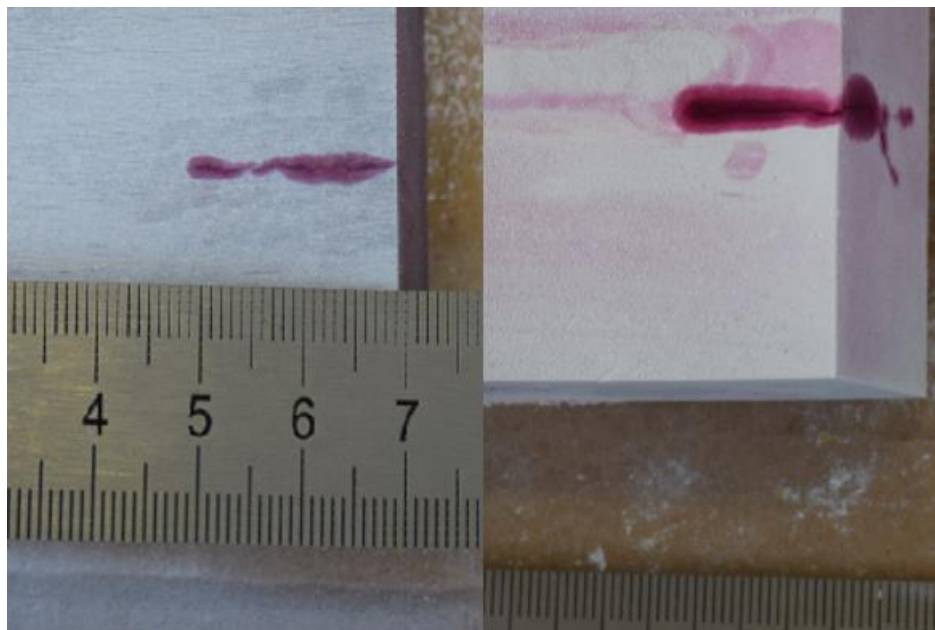
Velikost vad vystupujících u vzorku 4 na povrch je viditelná na první pohled, výsledná indikace kapilární zkoušky tomu také odpovídá. Zajímavostí je vytvoření „falešných“ indikací v oblasti označení zkoušeného objektu.



Obr. 41 – Kapilární indikace u vzorku č. 4

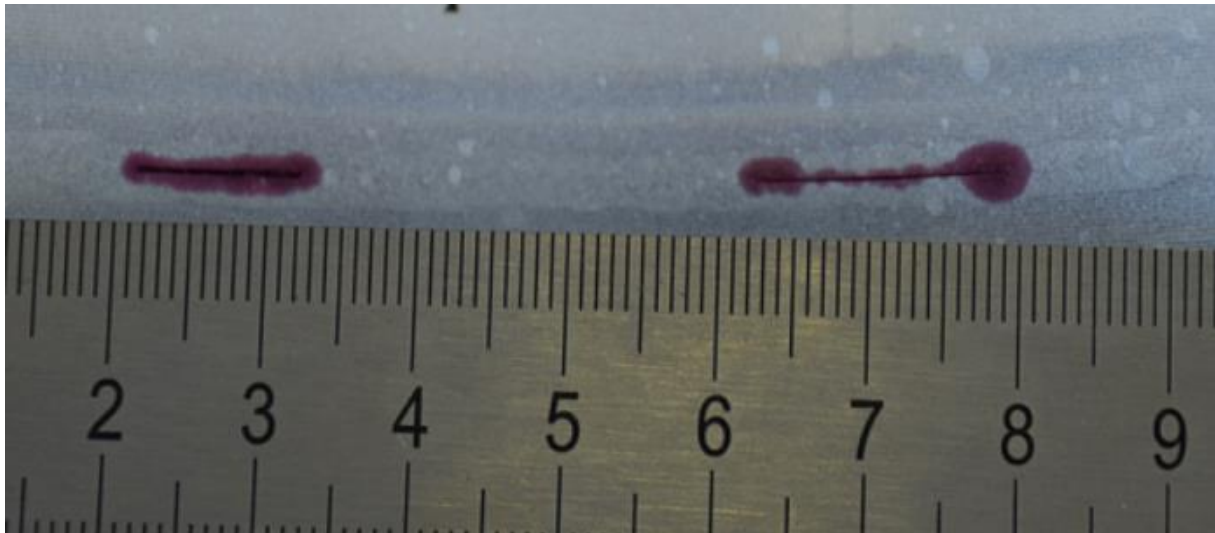
5.2.3 Vzorky se svary

V této skupině byla PT provedena u dvou vzorků s reálnými trhlinami ve svaru a jednoho vzorku s vyjiskřenými drážkami ve svaru. Na obr. 42 lze vidět indikace u reálných trhlín a lze pozorovat rozdíl velikosti indikace, který značí lišící se tvar trhlín.



Obr. 42 - Kapilární indikace u vzorků zleva č. 6 a 7

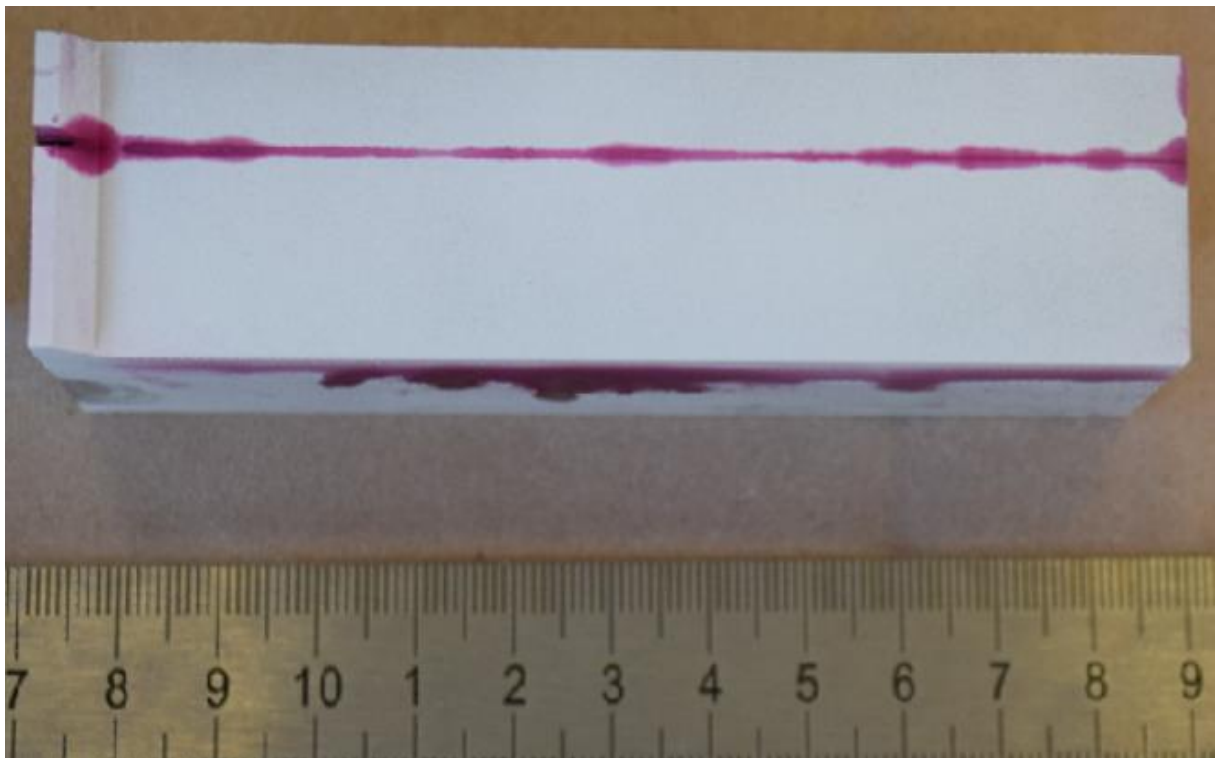
Na dalším obrázku lze pozorovat indikace u dvou uměle připravených drážek. Lze vidět, jak šířka trhliny ovlivňuje velikost indikace, a zároveň lze pozorovat určitou rovnoměrnost indikace. Levá drážka byla připravena s větší šířkou než drážka vpravo.



Obr. 43 - Detail kapilární indikace u vzorku č. 13

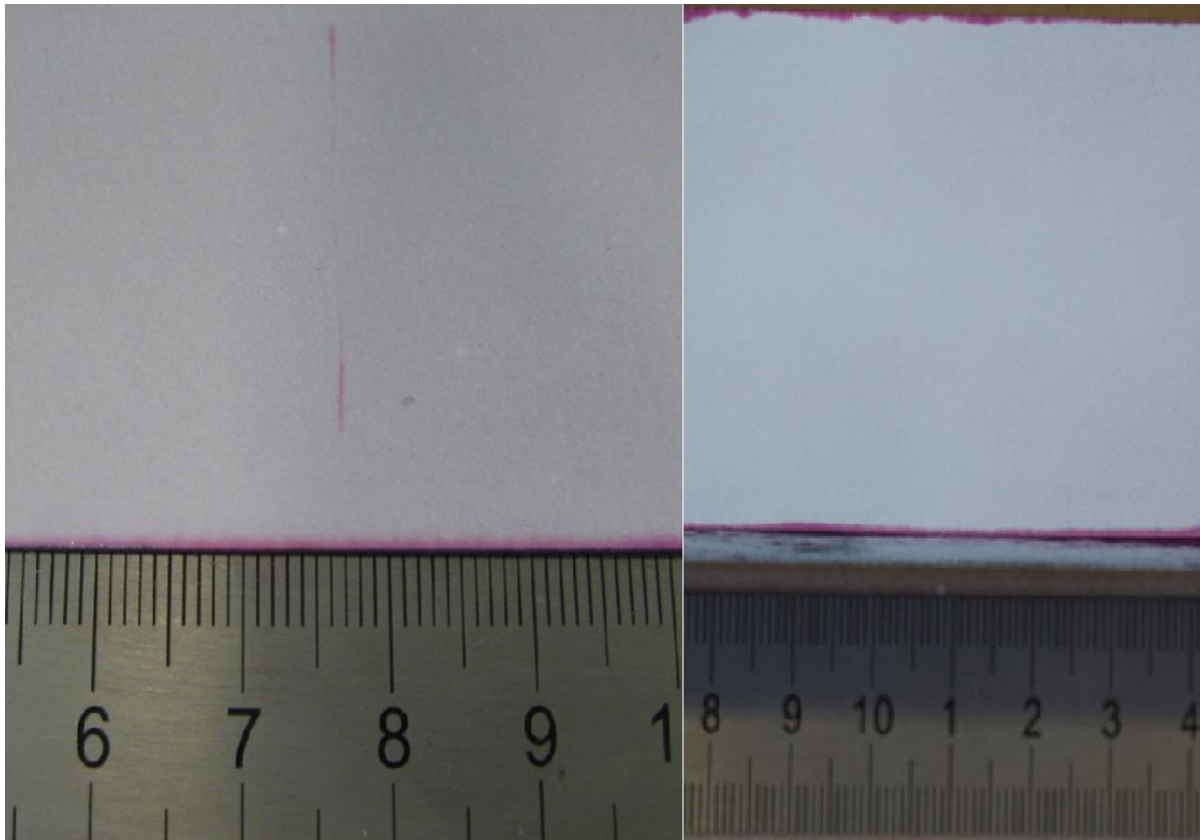
5.2.4 Vzorky s AR vadami

V této části můžeme porovnat indikace z kapilární zkoušky mezi vzorky s AR vadami i s předcházejícími vzorky. První testovaným je vzorek č. 10. Podle barevné indikace lze pozorovat několik důležitých bodů. Vytvořená trhlina má měnící se šířku indikace, což značí rozdílnou hloubku vytvořené trhliny. To značí přiblížení k reálným vadám a zároveň připomíná, že přesné parametry vytvořené vady nejsou známe. Vzhledem k charakteru drážky je vytvořená trhlina velice rovná.



Obr. 44 - Kapilární indikace u vzorku č. 10

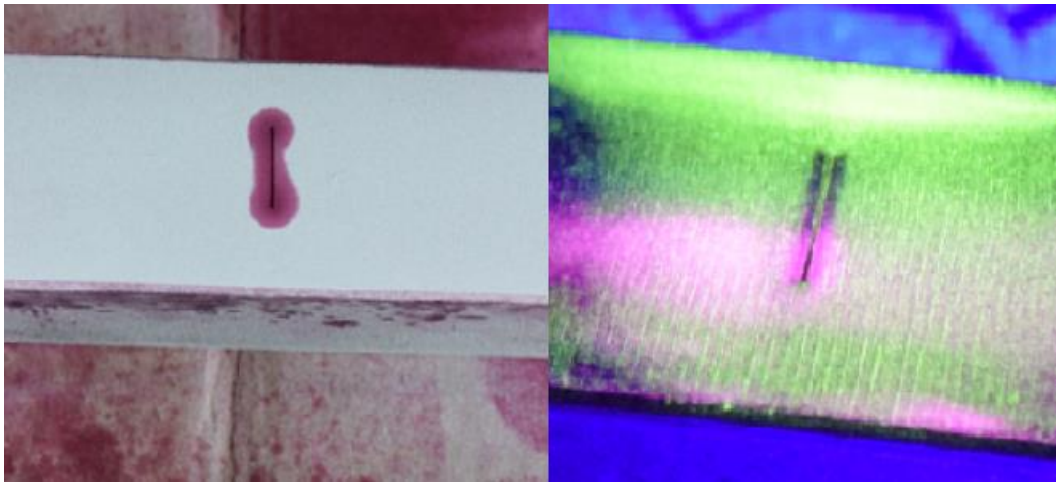
Další měření bylo provedeno na dvojici vzorků připravených ze stejného polotovaru a se stejnými parametry. Navzdory tomu se výsledky liší a můžeme usuzovat, že vytvořené trhliny nejsou stejné. Srovnatelné jsou přibližně šířky trhlín, obě se pohybují kolem hranice detekovatelnosti pomocí této metody. U prvního vzorku (č. 11) nebylo možné ani po opakovaném zkoušení jednoznačně detekovat trhlinu. U druhého vzorku (č. 14) byla tato detekce viditelná, přesto se jedná o nejméně znatelnou indikaci ze všech vzorků s pozitivním nálezem.



Obr. 45 - Detail slabé indikace u vzorku č. 14 vlevo a nulové indikace u vzorku č. 11 vpravo

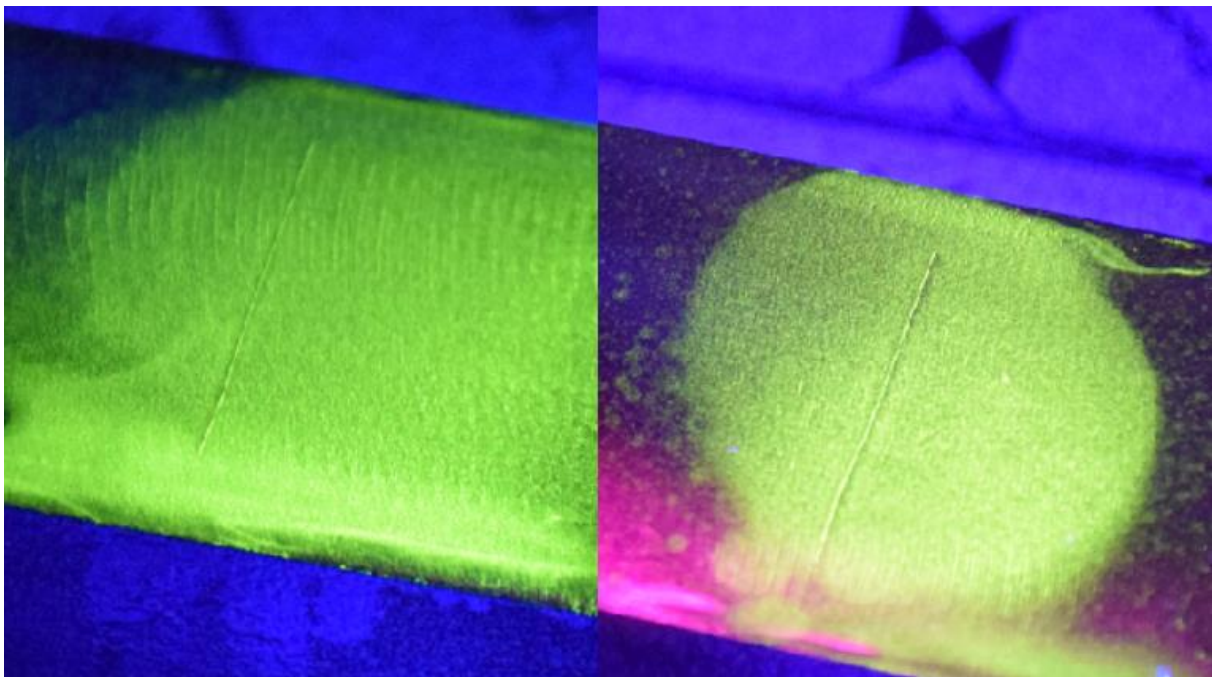
5.3 Zkoušení pomocí magnetické polévací zkoušky

Použití této měřicí metody podléhá normě ČSN EN ISO 9934-1. Vzhledem k nutné podmínce magnetičnosti materiálu nemohla být magnetická polévací metoda (MT) použita pro kontrolu vzorků z austenitické oceli. Hlavním zaměřením této metody se tak stala detekce velmi tenkých AR trhlín na vzorcích 11 a 14. Dále bylo součástí porovnávací přezkoušení vzorku č. 15. Na obr. 46 lze vidět porovnání detekce vyjiskřené drážky na tomto vzorku dvěma metodami.



Obr. 46 - Porovnání PT a MT u vzorku č. 15

Pro detekci připravených velmi tenkých AR trhlin se ukázala tato metoda jako mnohem vhodnější než kapilární zkoušení. Na obr. 47 lze vidět detekci obou trhlin v celé jejich délce. Navzdory stejné metodě přípravy lze pozorovat drobné rozdíly ve tvaru obou těchto trhlin.



Obr. 47 - MT u vzorků č. 11 (vlevo) a 14

5.4 Ultrazvukové zkoušení

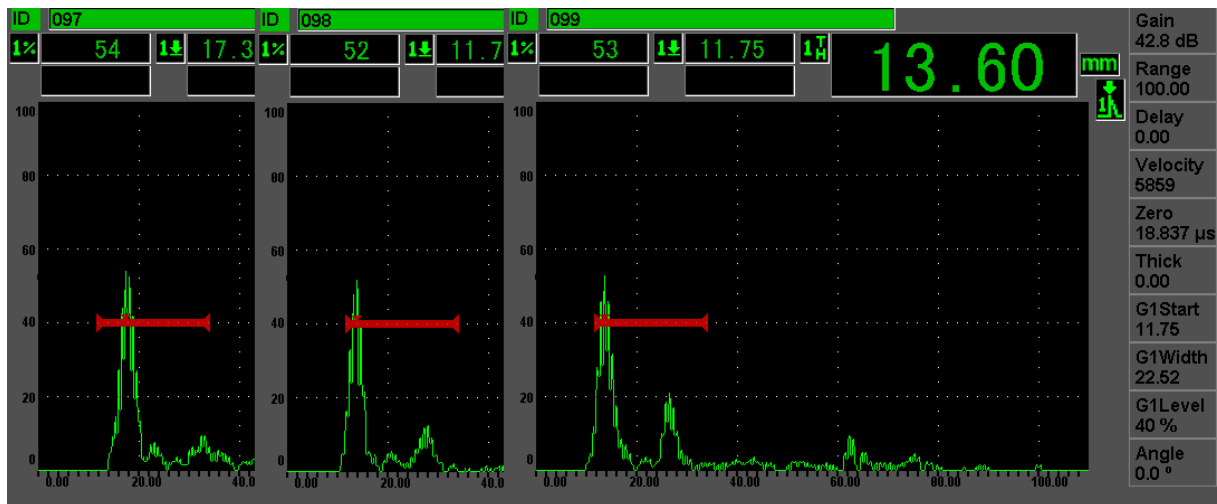
Metoda ultrazvukového zkoušení (UT) byla použita pro kontrolu všech zkoumaných vzorků. Tato metoda se řídí normou ČSN EN ISO 16810.

Podle předpokládaného druhu vady a možnosti měření byly vzorky zkoumány pomocí přímé sondy DL2R-7x18 2MHz a dále pomocí úhlové sondy (45°) s příčným vlněním AM2S-8X9-45 Olympus 2 MHz. Pro vzorek č. 1 byly kvůli jeho nízké výšce použity i předsádky pro 60° a 70°. Použitý přístroj byl Olympus Epoch 600.

5.4.1 Zkoušení přímou sondou

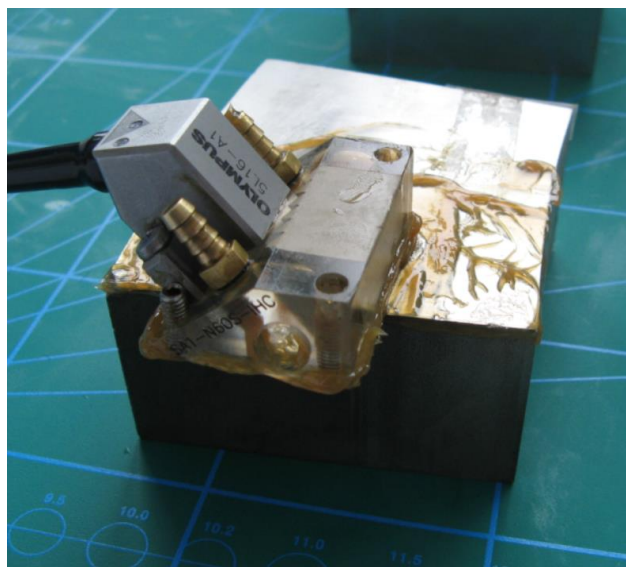
Do této skupiny spadají vzorky s licími vadami a z parogenerátorových trubek. Dále pak vzorek č. 10 s AR trhlinou.

Zatímco licí vady u vzorku č. 4 vykazovaly znatelné echo při měření na celém povrchu vzorku, vzorek č. 5 neukázal žádný odraz. Byl detekován pouze šum. Předpoklad je takový, že díky hrubé dendritické struktuře nebyl vzorek prozářen.



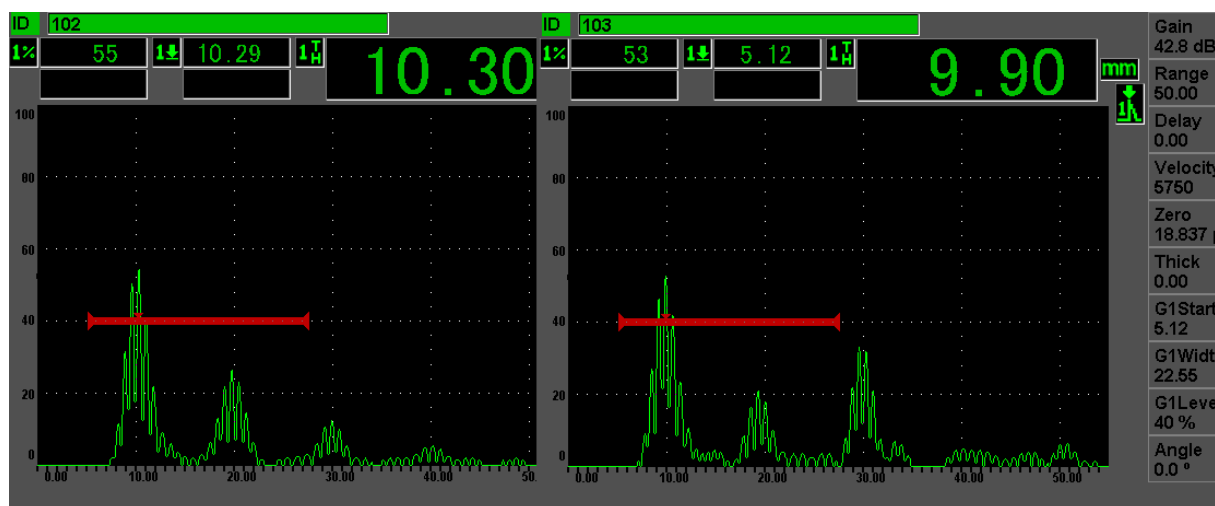
Obr. 48 - Potvrzení rozsáhlosti vnitřních vad z měření na různých místech vzorku č. 4

U vzorků č. 2 a 3 nebyly ultrazvukovou zkouškou nalezeny žádné další vady. Předem nalezené vady, které se u vzorků nacházely v řezu, jsou tedy jediné. U vzorku č. 3 se nepodařilo vadu takto malého rozsahu a takto umístěnou zachytit. U druhého vzorku byla vada zachycena pouze při testování okraje vzorku a při použití úhlové sondy, jak lze vidět na obr. 49. Pokud by tyto vzorky byly ještě součástí většího kusu, tyto vady by byly pravděpodobně snáze detekovatelné.



Obr. 49 - UT měření okraje vzorku č. 2 s úhlovou sondou za hranou vzorku

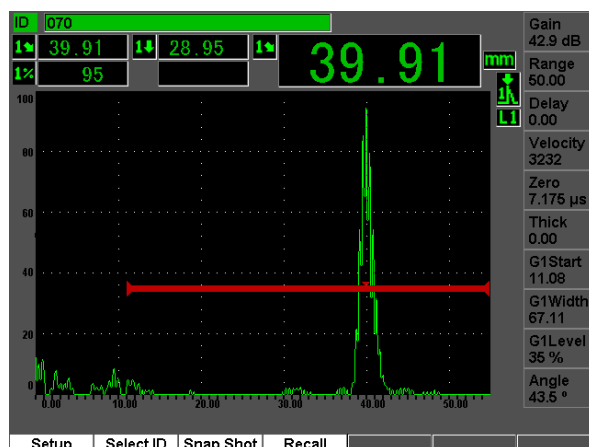
AR vada u vzorku č. 10 vytvořila silné a dobře rozpoznatelné echo. Z měnicího se vadového echa v různých místech vzorku můžeme opět, jako u kapilární zkoušky, usuzovat na měnicí se hloubku trhliny. To je viditelné na obr. 50, kde se nacházejí snímky získané v různých částech vzorku.



Obr. 50 - Měnicí se odezva ultrazvukového měření na vzorku č. 10

5.4.2 Zkoušení úhlovou sondou

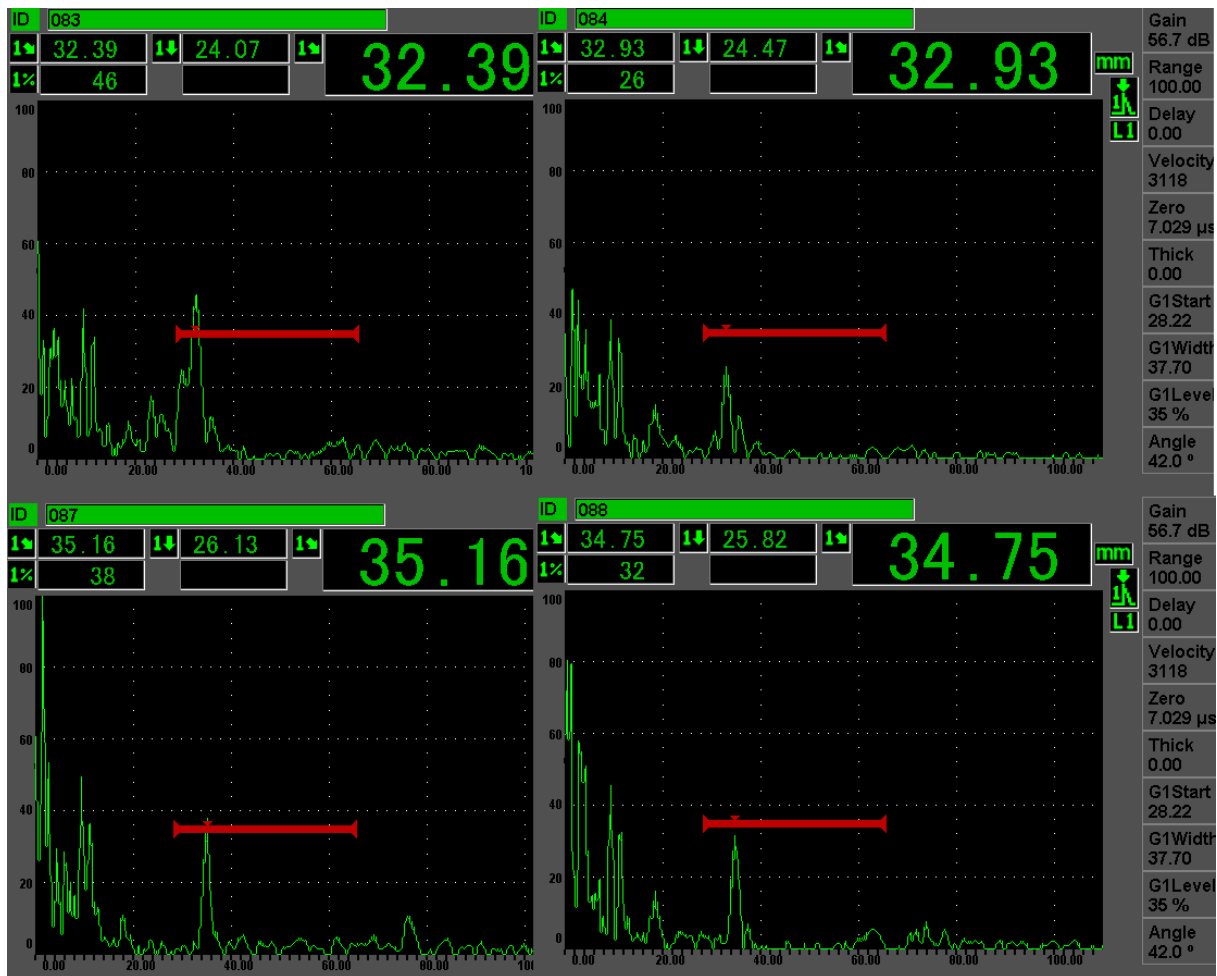
V této skupině byla hlavním bodem detekce vad ve svarech. Porovnávaly se zde odezvy z 5 reálných trhlin a 4 vyjiskřených drážek na celkem 6 vzorcích. Dále byl zkoumán vzorek č. 15, na kterém jeho vyjiskřená drážka odezvou působí jak etalon. Echo této vady je velké a zřetelné.



Obr. 51 – Vadové echo UT vzorku č. 15

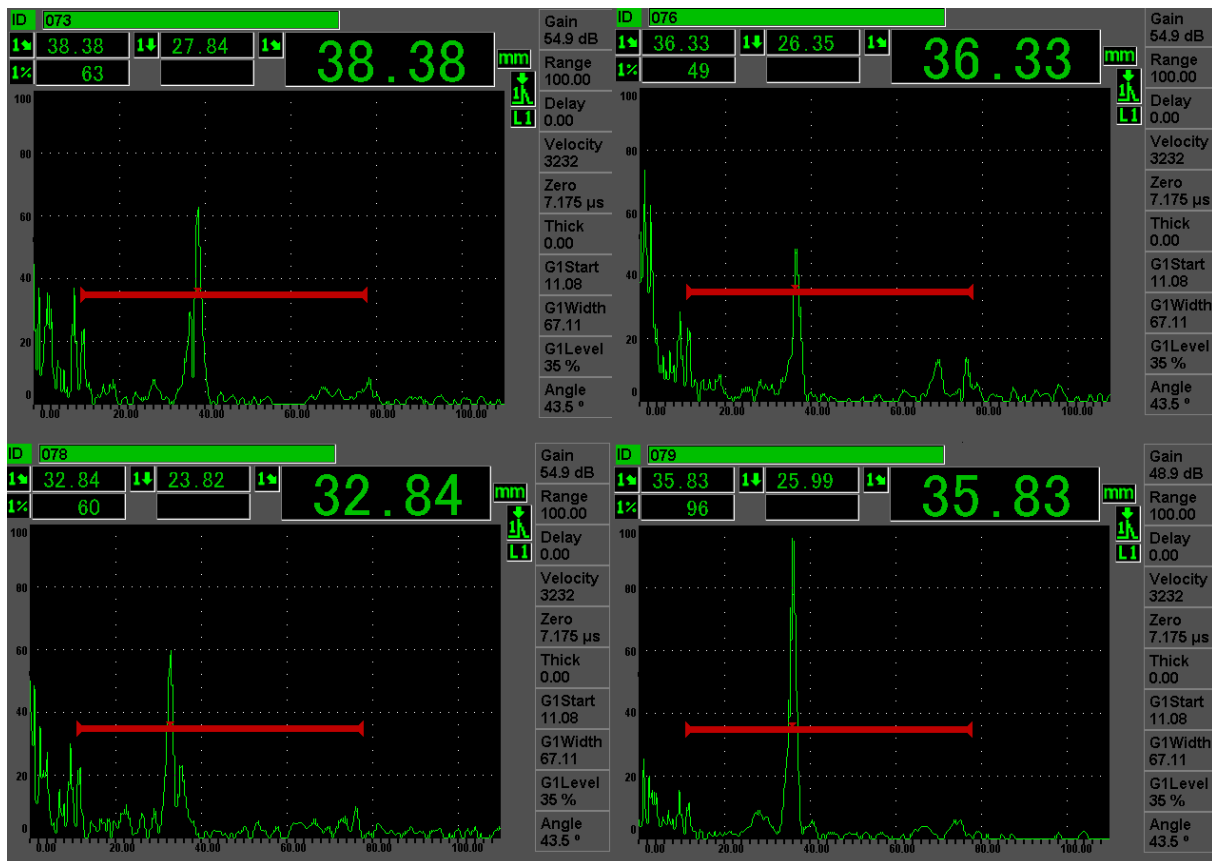
U dalších vzorků se jako velice důležitý ukázal směr a místo měření. Stejná vada tak může být z různých míst rozdílně zachycená, případně i nenalezená. Čím je komplikovanější tvar trhliny, tím hraje vlastní snímání větší roli.

V případě těchto trhlin byla provedena zkoušení vzorku z obou stran trhliny. Na obr. 52 je nahoře ukázán příklad největšího rozdílu výsledků při změně strany měření (vzorek č. 7), nejpodobnější výsledky pak jsou na obrázku dole (vzorek 8, vada B).



Obr. 52 - Rozdíly UT při změně strany měření

U vzorků s drážkami vyjiskřenými do svaru je situace podobná. Výsledky měření na vzorku č. 12 jsou při kontrole z obou stran vady znatelně podobnější než u skloněných drážek vzorku č. 13. Toto porovnání lze vidět na obrázku 53, kde se nahoře nachází výsledky získané z užší drážky vzorku 12 a dole výsledky z širší drážky vzorku 13. Ze získaných dat je patrné, že použití drážek vedoucích od povrchu pod úhlem se více přibližuje nepravidelnostem reálných vad a provoznímu zkoušení materiálu.

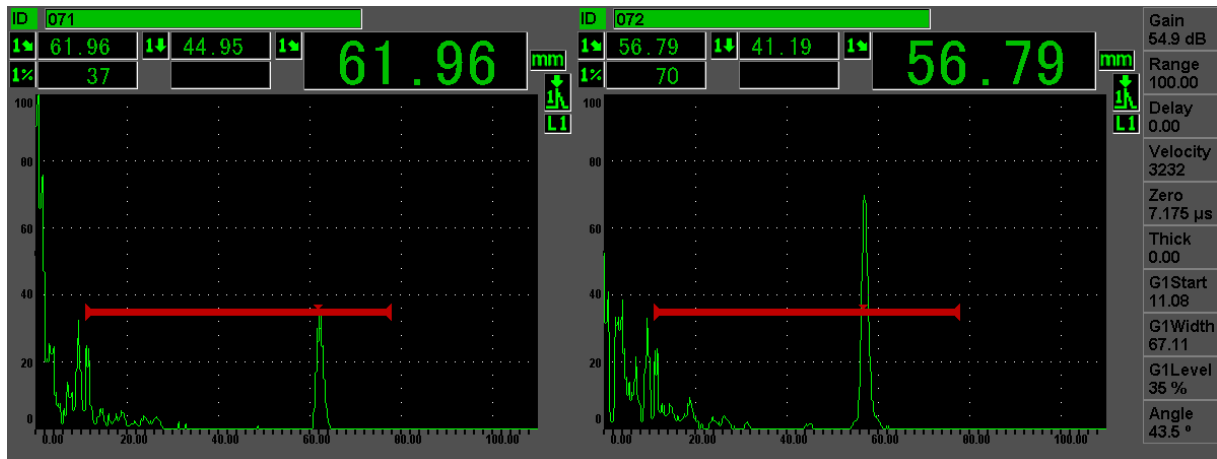


Obr. 53 - Rozdíly UT rovné a šikmé drážky

5.4.3 AR vady

Na začátku můžeme porovnávat odezvy získané ze vzorků č. 11 a 14. Vzhledem k rozdílné velikosti echa můžeme potvrdit domněnku, že tyto vyrobené trhliny nemají stejné rozměry. Charakter odezvy je jasný a odpovídá jedné rovné trhlíně. Jejich porovnání se nachází na obrázku č. 54.

Na vzorku č. 1 se ukázalo kvůli vícečetnému odrazu zkoušení pomocí 45° sondy jako nevhodné. Při použití 60° předsádky se nepodařilo zachytit vady. Použitelné výsledky přineslo použití předsádky 70°. S její pomocí se povedlo zachytit v celé délce svaru pět vad a několik míst vykazovalo podezření na přítomnost vad dalších.



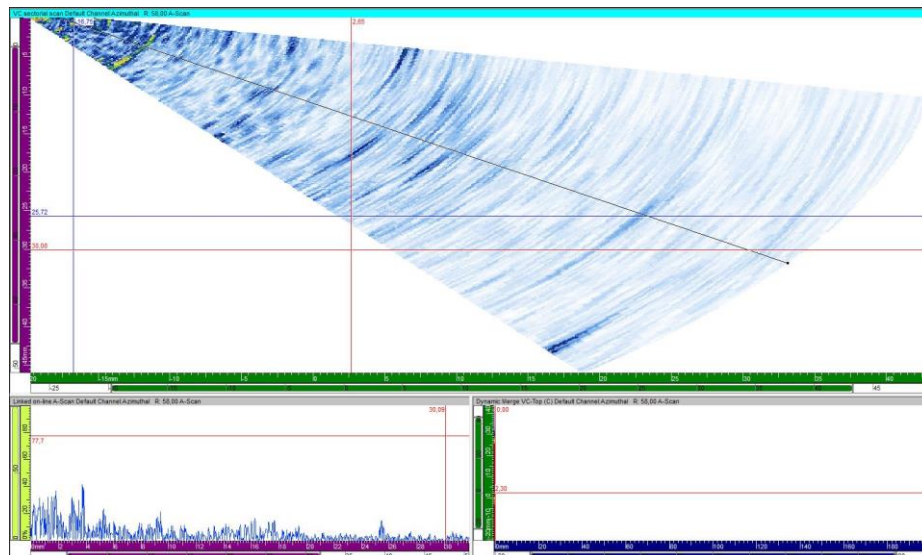
Obr. 54 - Porovnání UT u vzorků č. 11 a 14

5.5 Phased array zkoušení

Na měření pomocí Phased array (PA) metody byla použita 5 MHz sonda Olympus 5L16-A1 s předsádkou 5A1-N60S-IHC s přístrojem Zetec Dynaray a softwarem Ultravision 3. U některých vzorků bylo poté provedeno kontrolní měření s 4 MHz sondou. Stejně jako u uhlového UT zkoušení bylo měření vad prováděno z obou stran vzorků.

5.5.1 Vzorky s výrobními vadami

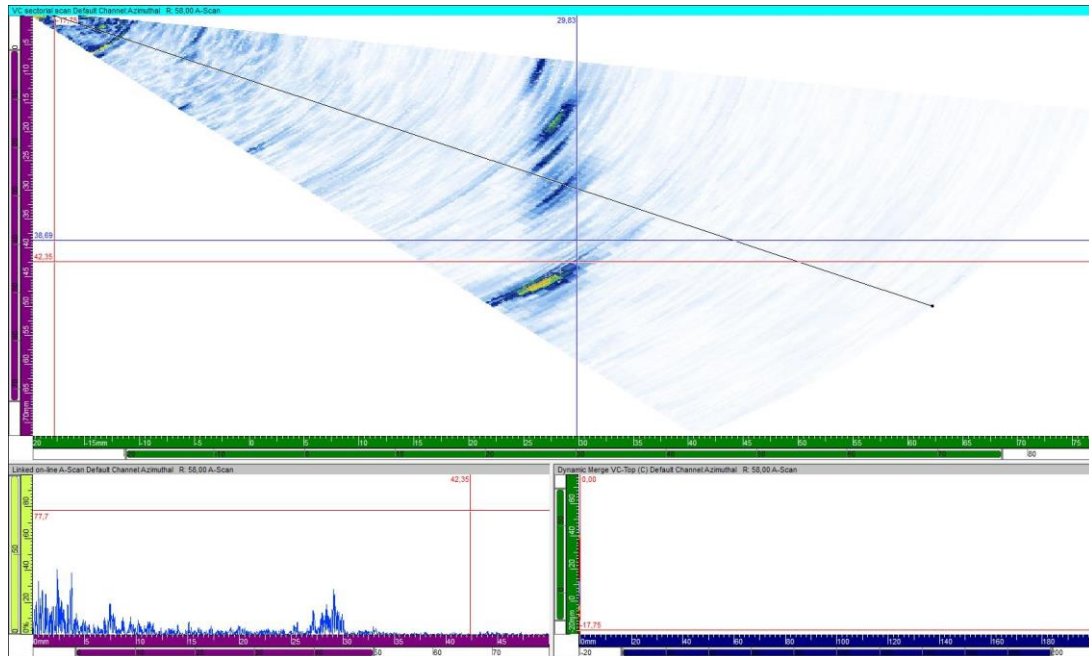
Co se týče obou vzorků z parogenerátorových trubek, vady byly nalezeny, ale pouze se slabou odezvou. Obě tyto vady jsou malého rozsahu a nebyly nalezeny žádné další vady.



Obr. 55 - Slabé zachycení vady ve vzorku č. 2

U vzorku č. 4 a 5 se opakuje stejná situace jako ultrazvukového zkoušení. Výsledky pro vzorek č. 4 ukazují zřetelně na velkou vadu procházející celou stěnou. Na zdokumentování rozsahu této vady u UT zkoušení bylo potřeba měřit na více místech vzorku, v případě PA měření je rozsáhlost vady zachycena už při jednom měření. Tato vada je viditelná na obrázku

č. 56. Pro vzorek č. 5 nebylo při použití dané předsádky možné získat vazbu, a tedy ani hledat vady. Pro měření by bylo potřeba zhotovit předsádku s poloměrem odpovídajícím stěnám tohoto vzorku.

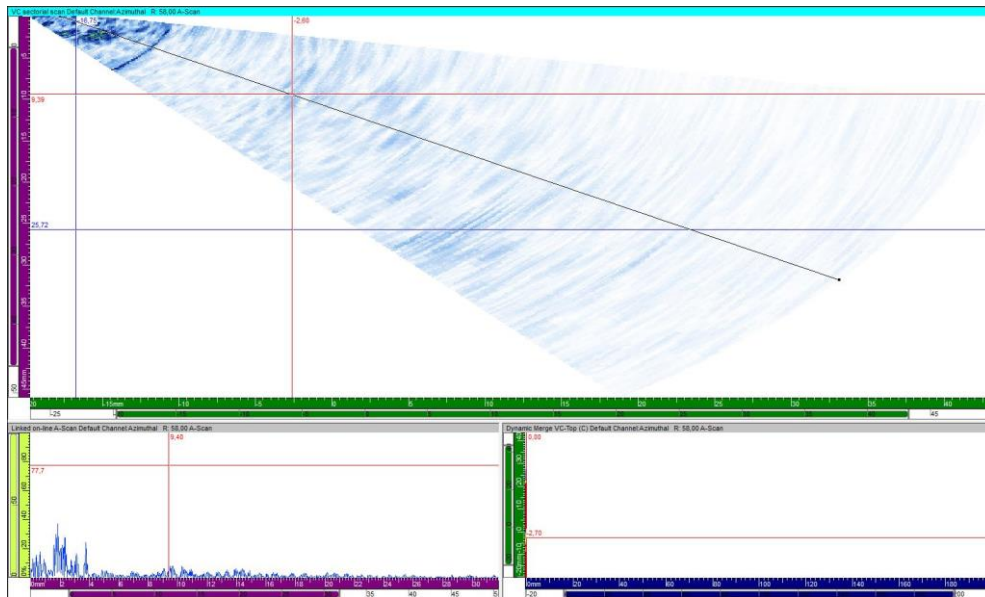


Obr. 56 - Zřetelný profil vady ve vzorku č. 4

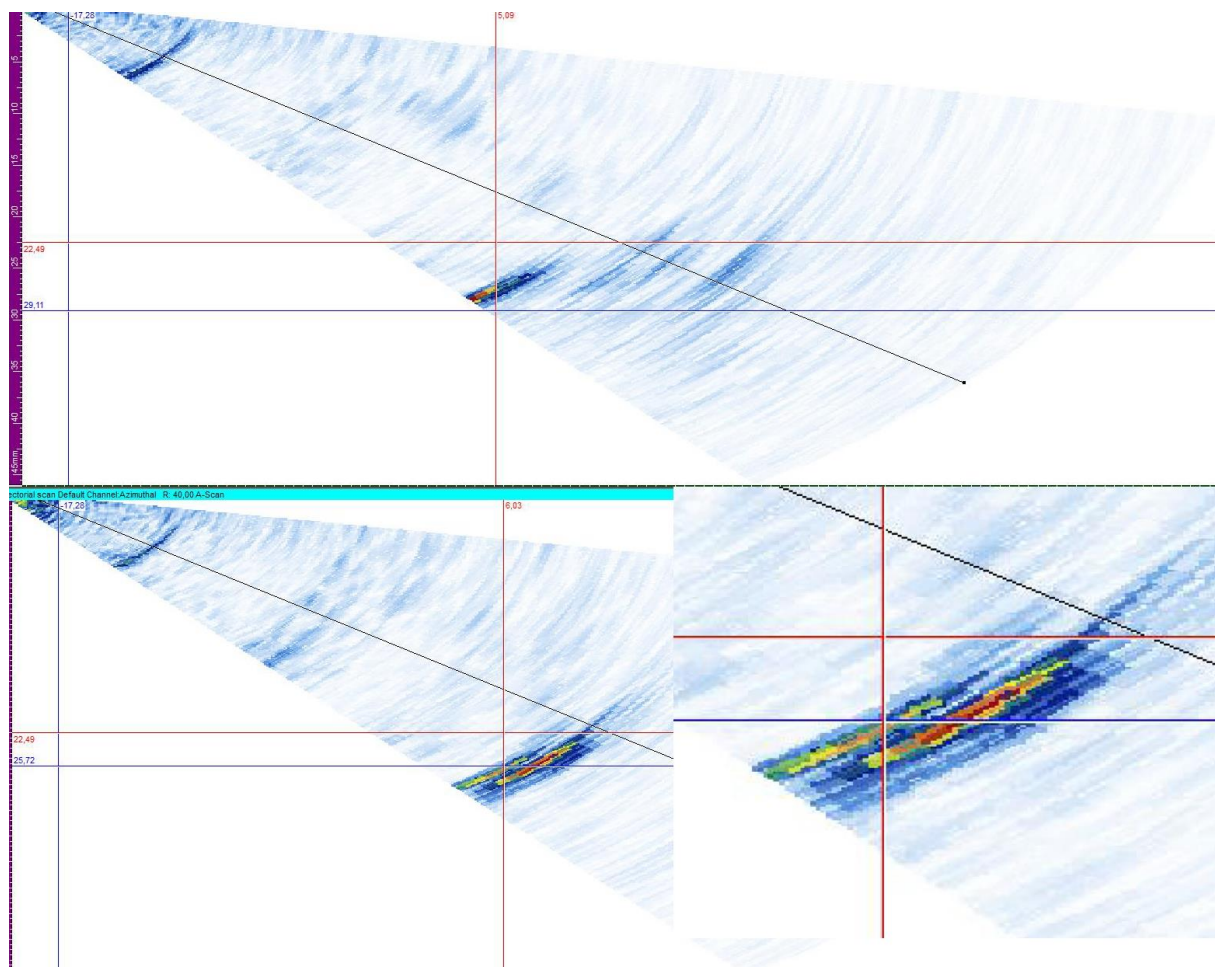
5.5.2 Vzorky se svary

Některé vzorky z této skupiny se ukázaly PA metodou jako obtížně nebo neprůkazně změřitelné. Většina vzorků, které obsahovaly svary, vykazovaly vysokou úroveň šumu, který mohl odezvu vad menšího charakteru zakrýt.

U vzorků s reálnými trhlinami č. 8 a 9 je výsledné měření neprůkazné. U vzorku č. 6 byla původně zachycena geometrie svaru, při dalším měření bylo odhaleno splývání ech vady a geometrie. Na obrázku č. 58 lze vidět porovnání echa získaného z jedné strany (nahore) a poté dvojitě echo získané při měření z druhé strany i s jeho detailem (dole).

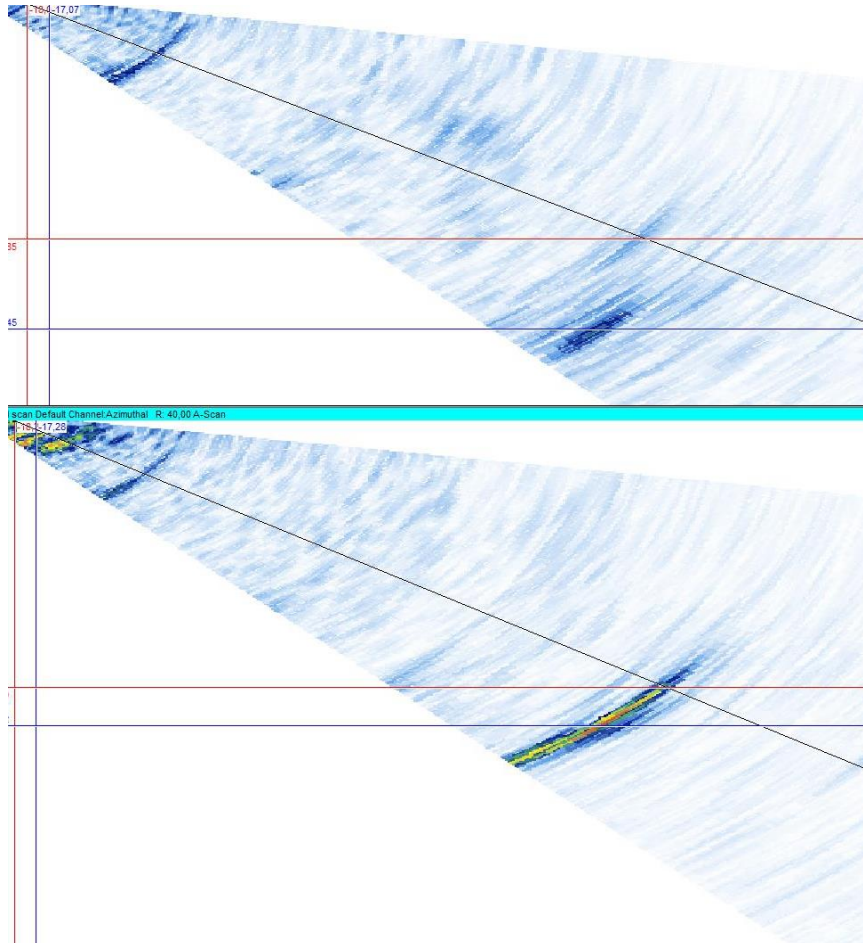


Obr. 57 - Šum při PA měření vzorku č. 8

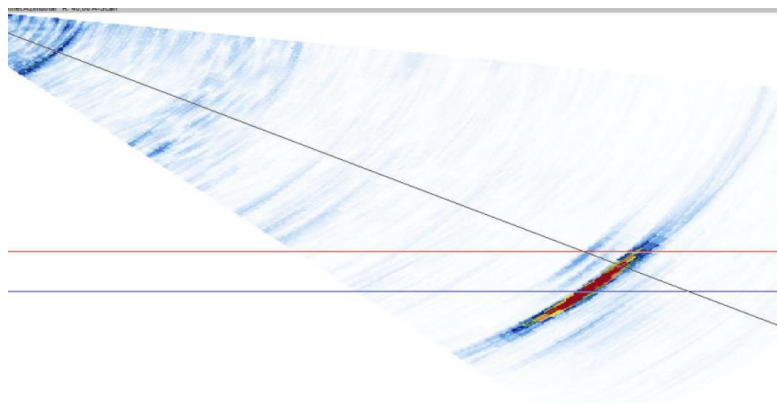


Obr. 58 - PA měření vzorku č. 6

Dále zde byla zkoušena dvojice s vyjiskřenými drážkami. Vady u nich byly nalezeny rychle a jejich odezva byla jasná. Odezvy jednotlivých drážek se od sebe nelišily tolik, jako odezvy reálných vad. U vzorku č. 12 se od sebe výsledky při měření z obou stran lišily znatelně méně než u vzorku č. 13. Odlišné odezvy při měření z jednotlivých stran tak u vzorku č. 13 více připomínají odezvy reálných trhlin. Na obrázku 59 lze porovnat odezvu širší skloněné drážky tohoto vzorku při měření z obou stran. Pro porovnání je zde na obrázku 60 vidět odezva vyjiskřené drážky na vzorku č. 15. Ta je snadno naležitelná, ale vzhledem ke svojí velikosti málo zřetelná.



Obr. 59 - PA měření širší drážky vzorku č. 13 z opačných stran

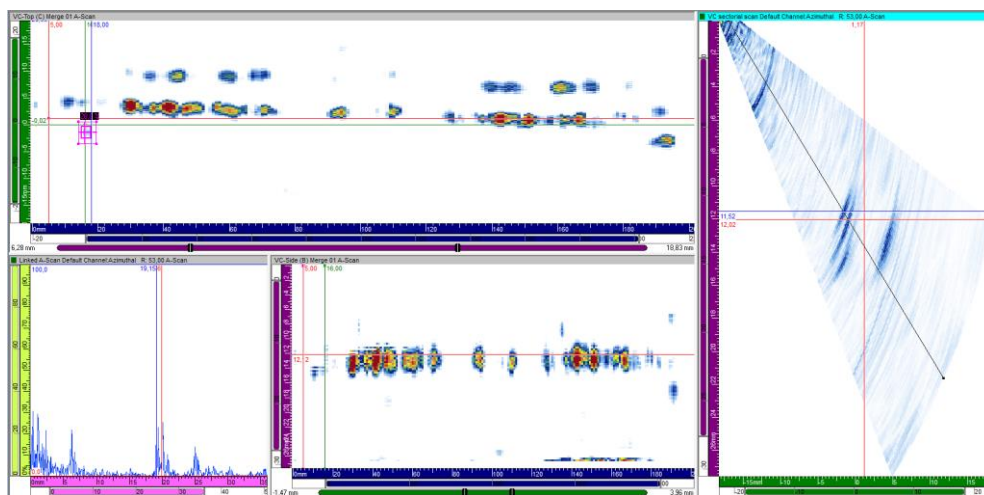


Obr. 60- PA měření vzorku č. 15

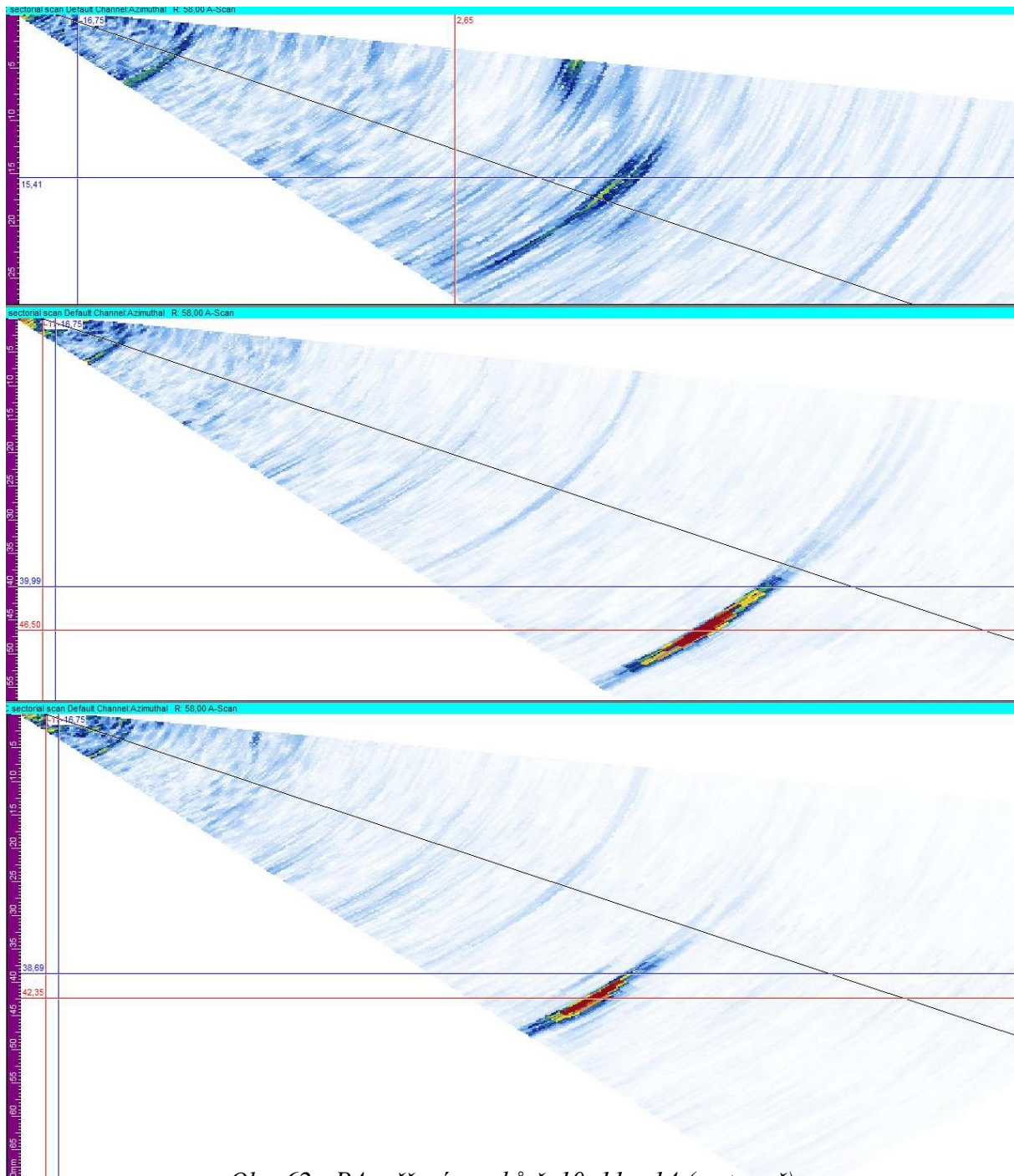
5.5.3 Vzorky s AR vadami

Detekce AR vad pomocí PA se ukázalo jako snazší než detekce reálných vad. Uměle vyrobené trhliny u vzorků č. 10, 11 a 14 byly nalezeny díky jasné odezvě těchto vad. Výsledky těchto tří vzorků jsou vidět na obrázku č. 61. Odezvy u vzorků 11 a 14 se opět lehce liší. Na obou je jasně detekovaný spodek trhliny, u vzorku č. 14 se podařilo zachytit i její vršek.

Speciální případ je vzorek č. 1. Díky UT bylo v jeho svaru detekováno 5 jednoznačných vad, při použití PA jich bylo detekováno 14. Vytvořit vady se tedy povedlo, jejich konkrétní určení je složitější. Podrobný rozbor byl zpracován přímo společností CV Řež. Ilustrační obrázek z protokolu je vidět na obrázku č. 62.



Obr. 61 - Výřez z protokolu ke vzorku č. 1



Obr. 62 - PA měření vzorků č. 10, 11 a 14 (sestupně)

5.6 Zkoušení pomocí vířivých proudů

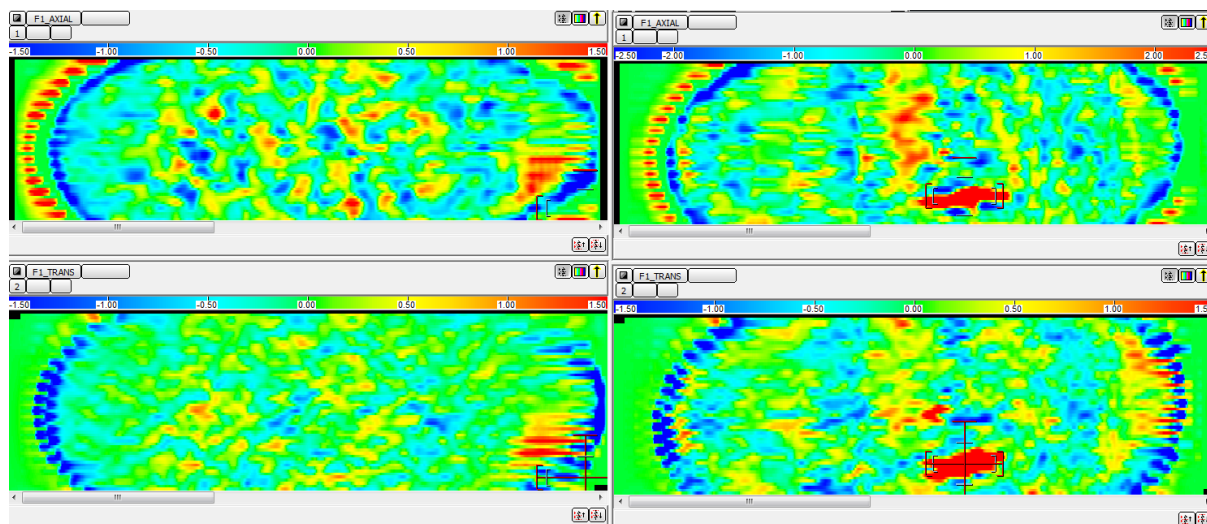
Pomocí metody detekce vířivých proudů (ET) byly prozkoumány všechny vzorky. Ne všechny vady byly pomocí této metody zachyceny. Ukázalo se také, že je velmi důležitý směr snímání sondy. V některých případech nebyla vada zachycena, pokud se sonda pohybovala přesně po její délce. Tato situace je ale při praktickém použití nepravděpodobná, navíc většina vad nebývá takto rovná. Metoda ET je také velmi závislá na geometrii a členitosti povrchu.

Tato metoda podléhá normě ČSN EN ISO 15549. Zkoušení bylo provedeno metodou Eddy Current Array, při které se podobně jako u ultrazvukového PA měření používá sonda s větším

množstvím aktivních prvků. Pro měření byl použit přístroj Eddyfi Ectane 2 s flexibilní ECA sondou. Na výsledcích z měření jsou nalezené vady označeny záměrným křížem.

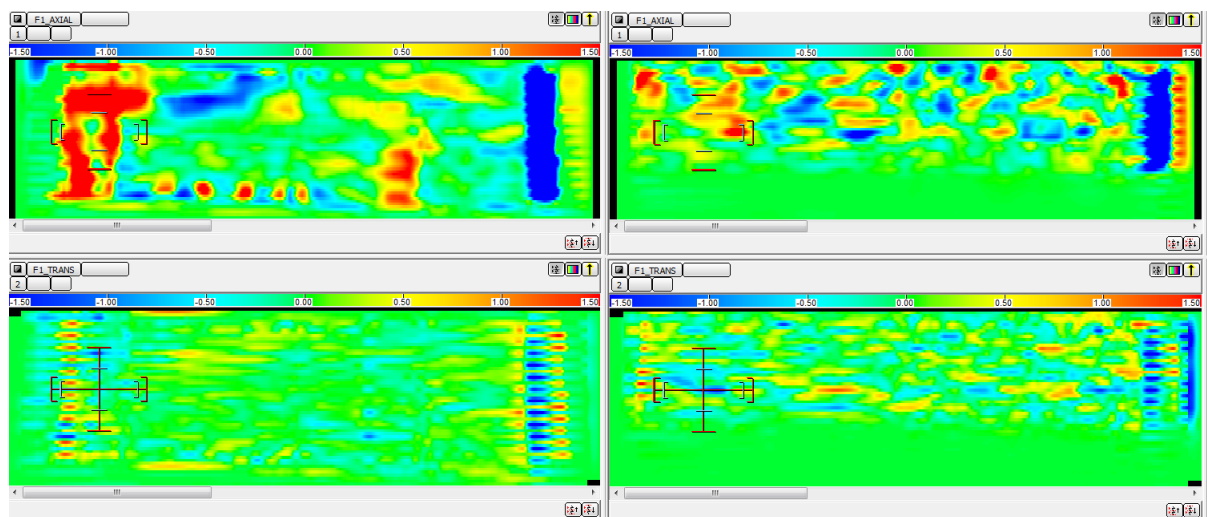
5.6.1 Vzorky s výrobními vadami

U vzorku č. 4 byly lící vady vystupující na povrch zachyceny jednoduše a zřetelně. Na měření horní strany vzorku č. 5 je jasné vidět kruhový tvar vzorku a také jeho hrubá struktura. Při měření spodní strany jsou, podobně jako u vzorku č. 4, vidět vady vycházející na povrch. Na obrázku 63 se nachází měření horní strany na obrázcích vlevo a měření spodní strany na obrázcích vpravo.



Obr. 63 - ET vzorku č. 5

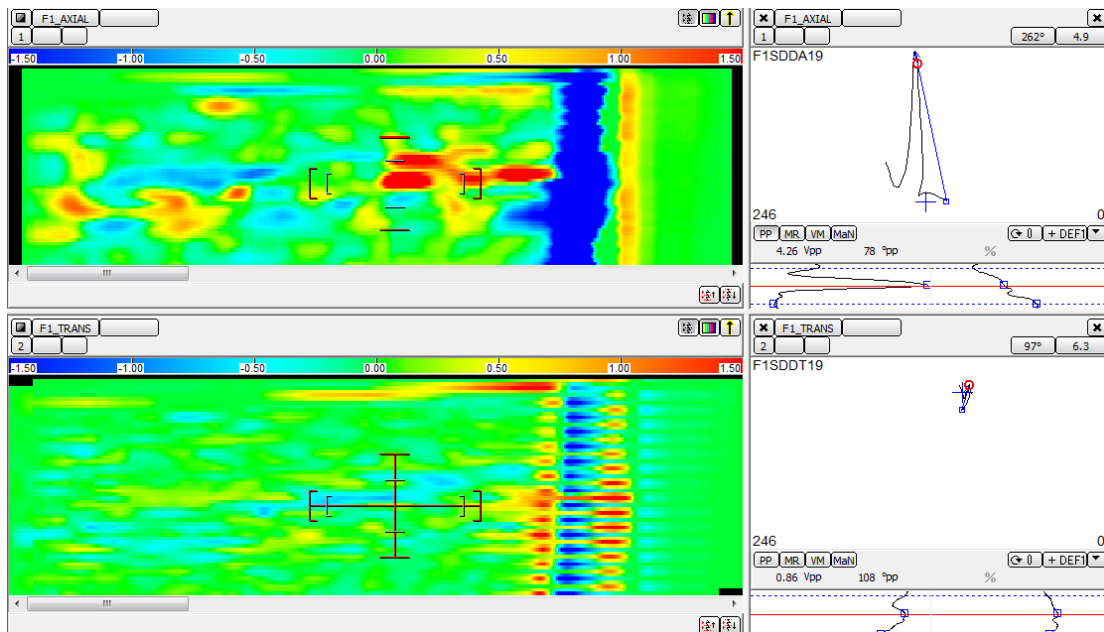
U obou vzorků z parogenerátorových trubek jsou výsledky detekce vad horší. Na vzorku č. 2 byly touto metodou zachyceny pouze důlky a označení na povrchu. Vzorek č. 3 vykazoval pravděpodobně špatné magnetické vlastnosti a výsledkem je jenom šum. Tyto měření jsou tedy neprůkazné. Obojí lze pozorovat na obrázku 64.



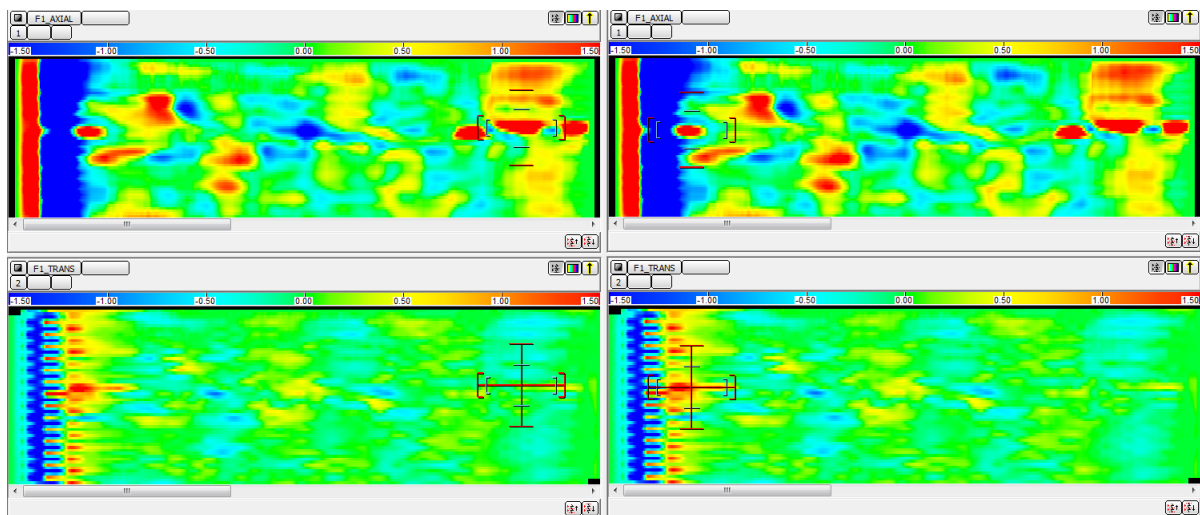
Obr. 64 - ET vzorků č. 2 (vlevo) a 3 (vpravo)

5.6.2 Vzorky se svary

U vzorku č. 6 kvůli výrazné geometrii svaru a vzorku č. 9 kvůli komplikovanému tvaru povrchu nebyly trhliny nalezeny. U vzorku č. 7 lze vidět svar a v něm nalezenou vadu. Na vzorku č. 8 byly nalezeny obě vady, jejich zaměření je vidět na obrázku 66.

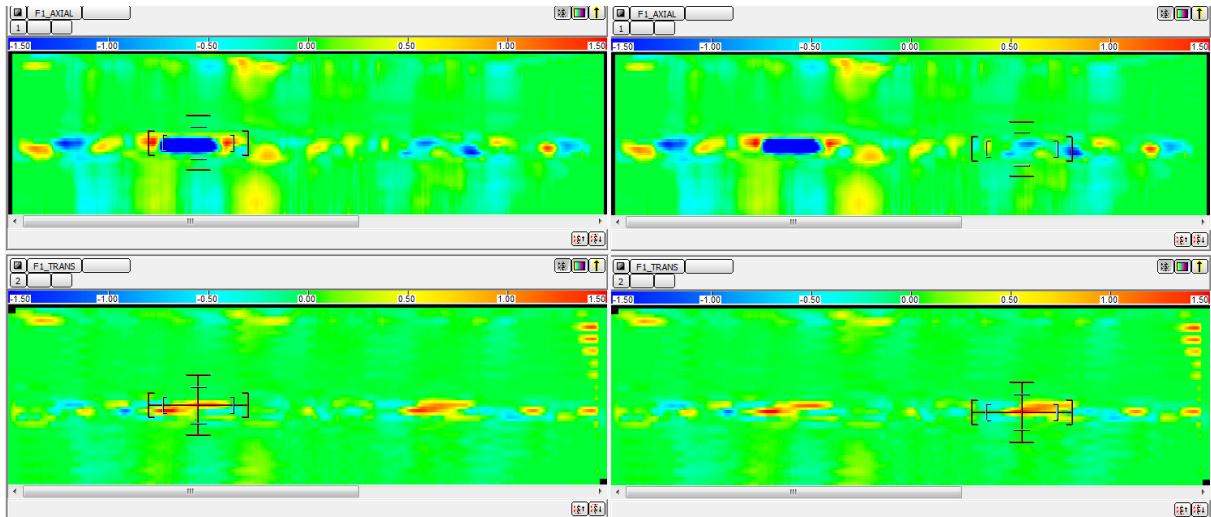


Obr. 65 - ET vzorku č. 7 s viditelným svarem a vadou

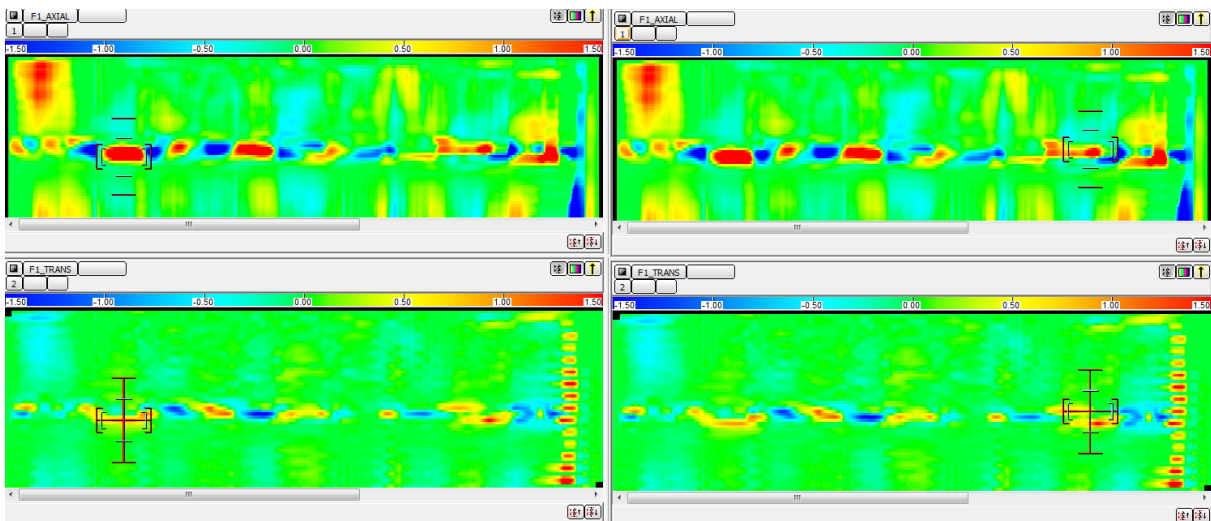


Obr. 66 - ET vzorku č. 8 se zaměřením obou trhlin

Vyjiskřené vady u vzorku č. 12 bylo možné nalézt snáze než u reálných trhlin. Tyto vady se vyznačují větším kontrastem. U vzorku č. 13 je silnější vliv svaru, vady jsou nalezitelné díky jejich vychýlení od osy svaru, identifikace je ale obtížná. U obou obrázků se nachází širší vada vlevo a užší vpravo.

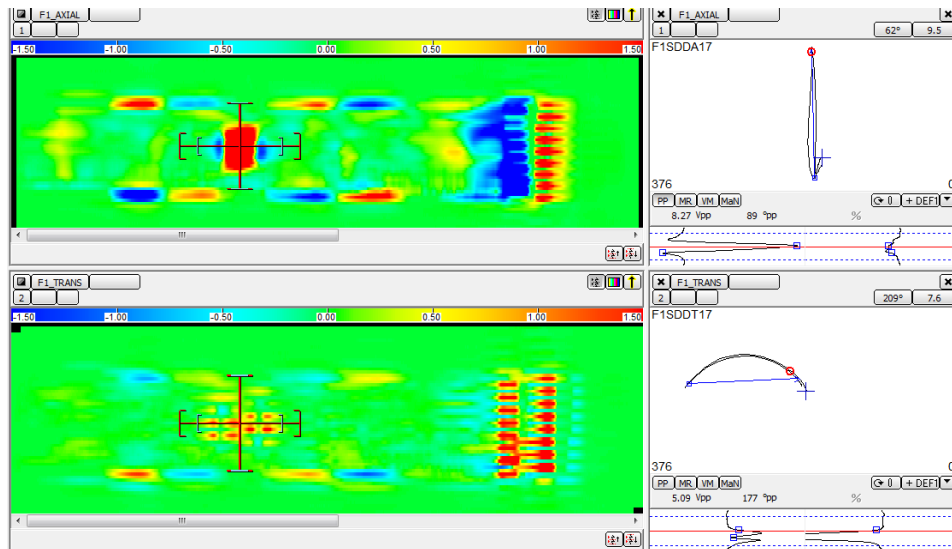


Obr. 67 - ET vzorku č. 12 se zaměřením obou drážek



Obr. 68 - ET vzorku č. 13 se zaměřením obou drážek

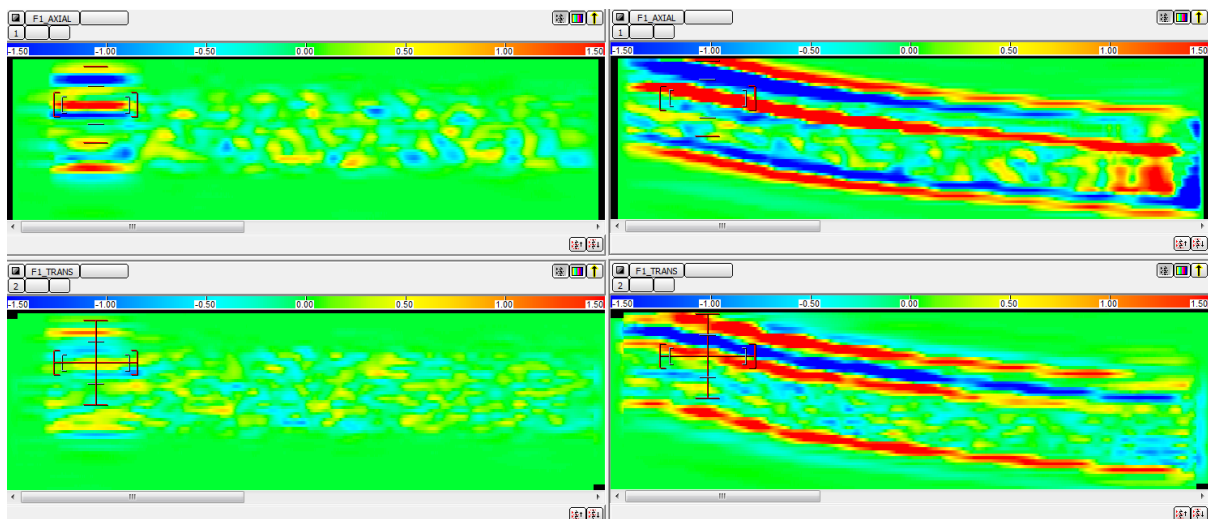
Pro porovnání je zde navíc uveden vzorek č. 15, u kterého je jeho vyjiskřená drážka, které není skrytá ve svaru, velmi výrazná. Výraznost této vady odpovídá etalonu.



Obr. 69 - ET vzorku č. 15 s vyjiskřenou drážkou

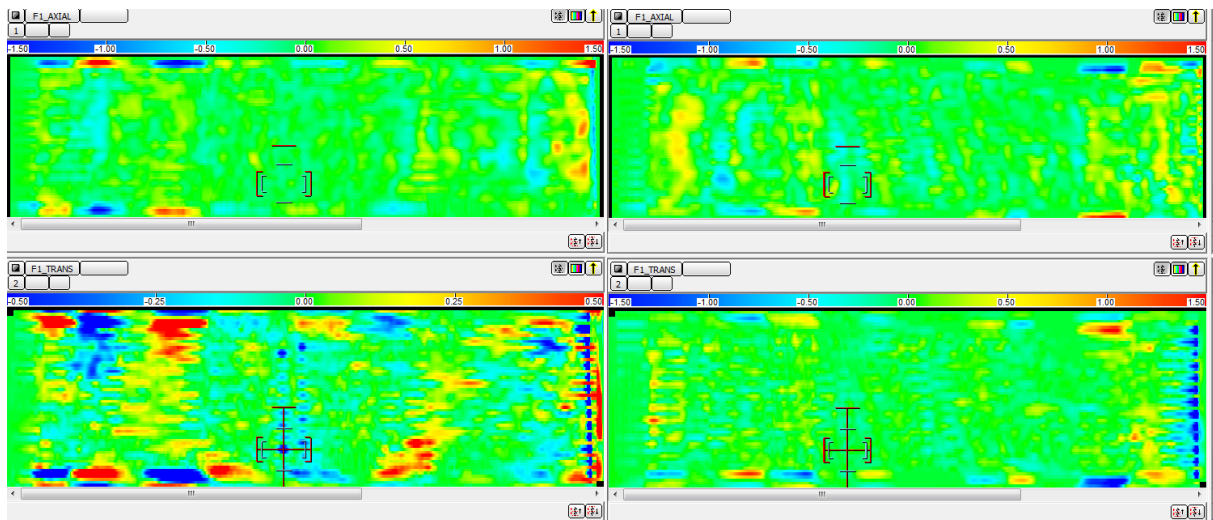
5.6.3 Vzorky s AR vadami

Vzorek č. 10 obsahuje velmi rovnou trhlinu. Při směru skenování sondou přímo ve směru délky této trhliny se tato trhlinu nezobrazí. Při skenování pod úhlem je pak ale velmi lehce zjištělná. Výsledky těchto dvou měření jsou vidět na obrázku 70. Na pravém obrázku je vada zřetelně nalezena a její odezva je prostřední červená linka.



Obr. 70 - výsledky vzorku č. 10 při měření podélně s vadou (vlevo) a šikmo (vpravo)

Dvojice vzorků č. 11 a 14 opět ukázala své rozdíly. Zatímco u vzorku č. 11 byla trhlinu nalezena, u vzorku č. 14 se to nepovedlo. Pro tyto trhliny tedy zase platí, že jsou úzké a těžko zachytitelné. Jejich porovnání je vidět na obrázku č. 71, odezva vady na vzorku č. 11 je v podobě svislých modrých teček.



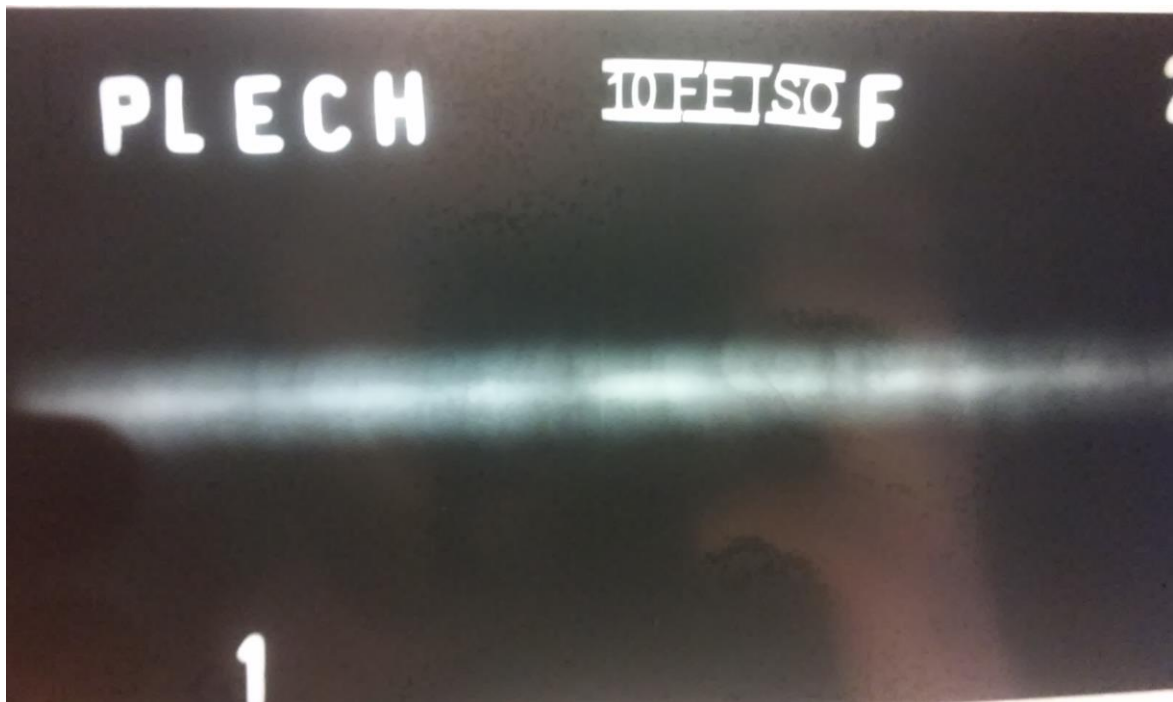
Obr. 71 - ET vzorků č. 11 (vlevo) a 14 (vpravo)

Testování vzorku č. 1 ukázalo pouze velmi jasný svar a jeho geometrii, žádné vady se objevit nepodařilo.

5.7 Rentgenové zkoušení

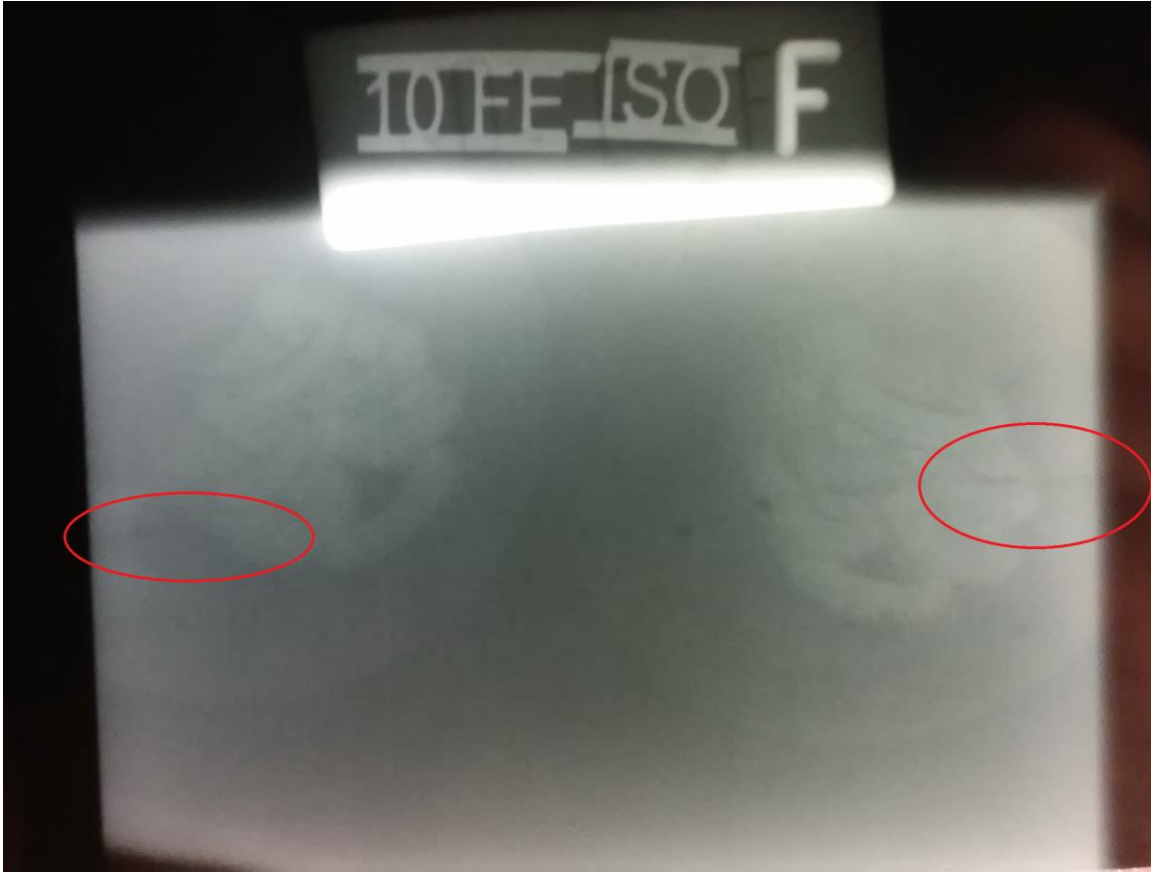
Rentgenová kontrola proběhla na vybraném spektru vzorků, které byly vybrány jako nejvhodnější. Zkoušení prozařováním je normováno podle ČSN EN ISO 3452-1.

Prvním kontrolovaným vzorkem je vzorek č. 1, svařený plech. Na snímku je vidět zřetelný svar a jeho nerovnoměrnost. Tato nerovnoměrnost může indikovat existenci vad. Rozlišit jednotlivé vady by bylo ale obtížné.



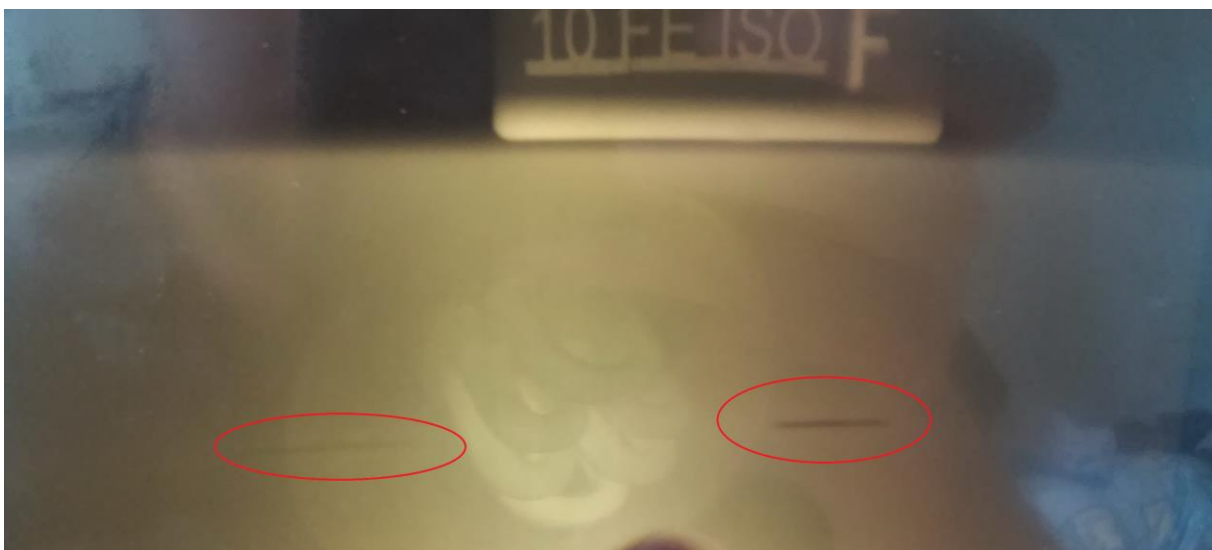
Obr. 72 - RT vzorku č. 1

Dalším testovaným vzorkem je č. 8. U toho lze na snímku nalézt obě trhliny ve svaru. Na obrázku 73 lze nalézt snímek se zvýrazněnými vadami, na fyzickém filmu jsou vidět výrazněji.



Obr. 73 - RT vzorku č. 8

Na vzorku č. 12 jsou obě vyjiskřené drážky snadno viditelné. Na obrázku č. 74 je vlevo vidět tenčí drážka a vpravo širší, která je znatelně výraznější. Posledním vzorkem byl vzorek č. 10 s AR trhlinou. Ta se na snímku nijak neprojevila a nebyla detekována.



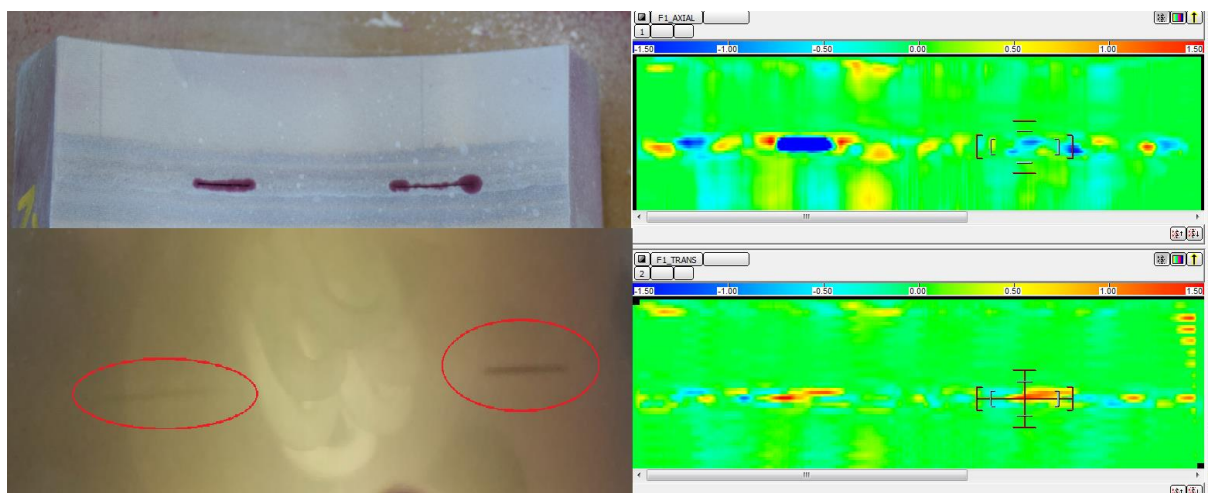
Obr. 74 - RT vzorku č. 12

6 Diskuze výsledků

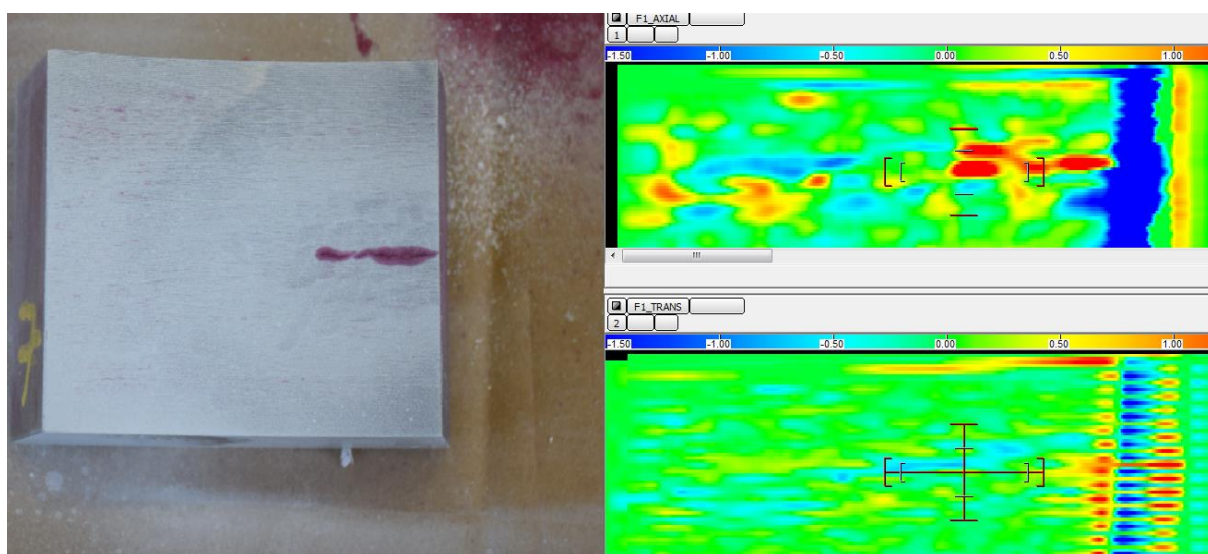
Díky velké šíři vzorků a použitých metod měření bylo získáno velké množství informací a výsledků. Jednak je nutné porovnat použité metody mezi sebou, v druhé pak chceme porovnat získané výsledky pro různé vzorky a vady a také vyhodnotit detekci AR vad oproti ostatním.

6.1 Porovnání výhodnosti a použitelnosti metod

Porovnávání těchto použitých metod víceméně odpovídá teoretickým předpokladům. V oblasti povrchových a podpovrchových metod zde jsou srovnání kapilární zkoušky, magnetické polévací zkoušky a zkoušky pomocí vířivých proudů. Výhodou všech těchto zkoušek je jejich názornost. V případě PT a MT jsou indikace viditelné přesně v místě vady, u ET jsou indikace vidět na poměrně přesném znázornění zkoumaného povrchu. Podobně to platí i u rentgenových snímků, u kterých je vidět přesné umístění vady na materiálu (bez informace o hloubce umístění vady). Příklad je vidět na obr. 75, kde jsou vedle sebe výsledky tří metod použitých na vyjiskřené drážky, a na obr. 76 s příkladem pro reálnou trhlinu.



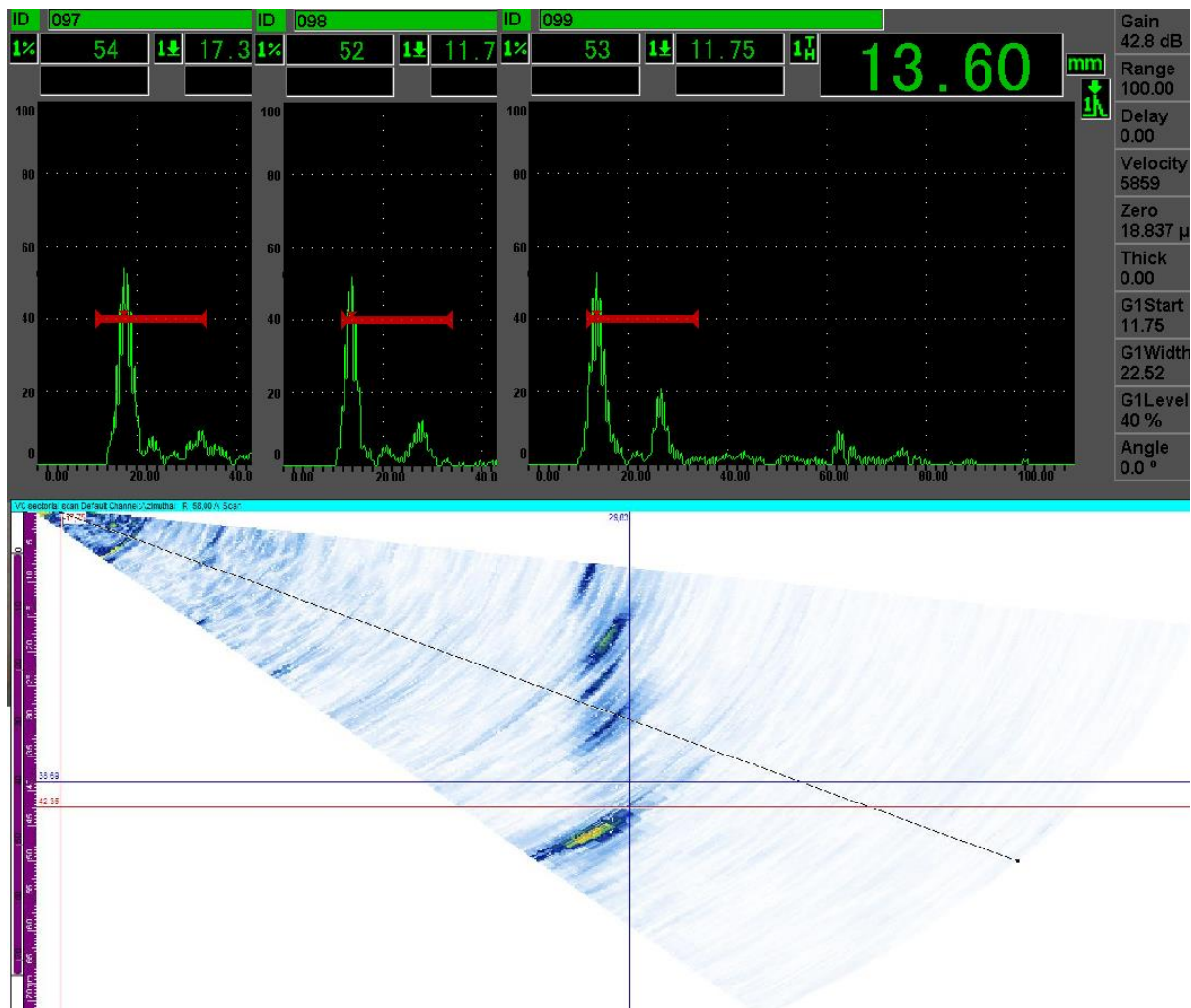
Obr. 75 - MT, RT a ET vzorku č. 10



Obr. 76 - MT a ET vzorku č. 7

Kromě jejich společné nevýhody, že jsou schopny detekovat pouze povrchové a podpovrchové vady, je tu ještě několik dalších nevýhod. Kapilární a magnetická polévací zkouška mají nevýhodu v obtížnější přípravě a nutnosti manipulace s chemikáliemi. V obou případech se jedná o očištění materiálu před začátkem a po skončení zkoumání. MT a ET jsou metody rychlé, ihned vidíme jejich výsledek. Obě jsou ale závislé na druhu zkoumaného materiálu. U MT je potřeba dodržovat delší technologické časy při zkoumání. Také není závislá na fyzikálních vlastnostech materiálu, je tedy použitelná pro širší výběr materiálů.

Pro objemové metody zkoumání materiálu platí ještě větší rozdíly. Každá ze zde používaných tří metod (UT, PA, RT) ukazuje výsledky měření v jiném formátu a je obtížnější je porovnávat. Jak už bylo řečeno, rentgenové testování má názorné výsledky a indikace vady je viditelná přesně v místě vady. Obě ultrazvukové metody tak názorné nejsou. Je zde potřeba větší zkušenost vyhodnocovatele a také se využívá porovnávání výsledků. Z těchto dvou je Phased array metoda více názorná, umožňuje snazší identifikaci podle získaného obrazu. Je ale výhodnější pro testování většího množství objemu materiálu a umožňuje mít větší přehled. Na obrázku 77 je vidět detekce stejné vady nejprve pomocí několika měření pomocí ultrazvuku a poté pomocí jednoho měření pomocí Phased array.



Obr. 77 - UT a PA vzorku č. 4

Ve výsledku se může opakovat teoretická poučka, že každá metoda je jiná a hodí se na jiné věci. V praxi tedy bude záležet i na dostupném technologickém vybavení, proškoleném personálu a akceptovatelné ceně. Větší jistoty samozřejmě přinese kombinace více metod, které se tak mohou vzájemně doplňovat. V případě dostupnosti je tedy lepší použít doplňující se metody pro zvýšení jistoty měření.

Jako nejuniverzálnější metoda vychází měření ultrazvukem, pomocí kterého bylo zachyceno nejpřesněji nejvíce vad. Je to ale také metoda s pravděpodobně nejtěžší interpretací. U ultrazvukových metod je tedy nezbytné mít kvalitně proškolený personál a realistické kalibrační měřky.

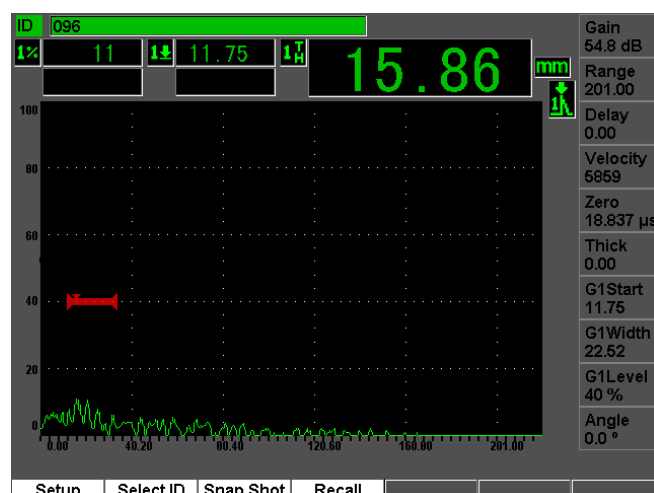
6.2 Porovnání zjistitelnosti různých typů vad

Použité vzorky obsahovaly velké množství druhů vad. Byly testovány lící a výrobní vady, vady svarů, provozní i umělé trhliny a vyjiskřené drážky.

V první skupině jsou vzorky č. 2 až 5 s výrobními vadami. Vady ve vzorcích č. 2 a 3 byly předem detekované a vzorky byly připravené s ohledem na kontroly těchto vad. V případě dalších měření tak byly ale tyto vady přesně na okrajové části materiálu což ztěžovalo jejich detekci. Lze prohlásit, že v tomto případě hrála největší roli geometrie vzorku. Obě tyto vady byly velmi malého rozsahu a v materiálu se nepodařilo najít žádné další vady.

Vzorek č. 4 obsahuje rozsáhlé vnitřní strukturní vady. Díky tomu, že tyto vady vystupují na povrch, byla jejich detekce provedena objemovými, podpovrchovými i povrchovými metodami. Porovnání různé detekce je ukázáno na obrázku č. 77. Vzorek č. 5 sice také obsahuje rozsáhlé vnitřní vady, avšak jeho velikost a předpokládaná hrubozrnná struktura znemožnila jejich detekci většinou metod. Pozitivní detekce bylo dosaženo pouze v případě zkoumání spodní strany vzorku, kde vada vystupuje v řezu na povrch. Měření z jiného místa nebylo úspěšné. Nejlepší porovnání je vidět na obrázku č. 63, podobné neprozáření materiálu je vidět i na obrázku č. 78.

Lze tedy konstatovat, že i rozsáhlé vady mohou být schovány, pokud je obklopuje dostatečné množství materiálu, nebo má materiál vlastnosti ztěžující detekci.

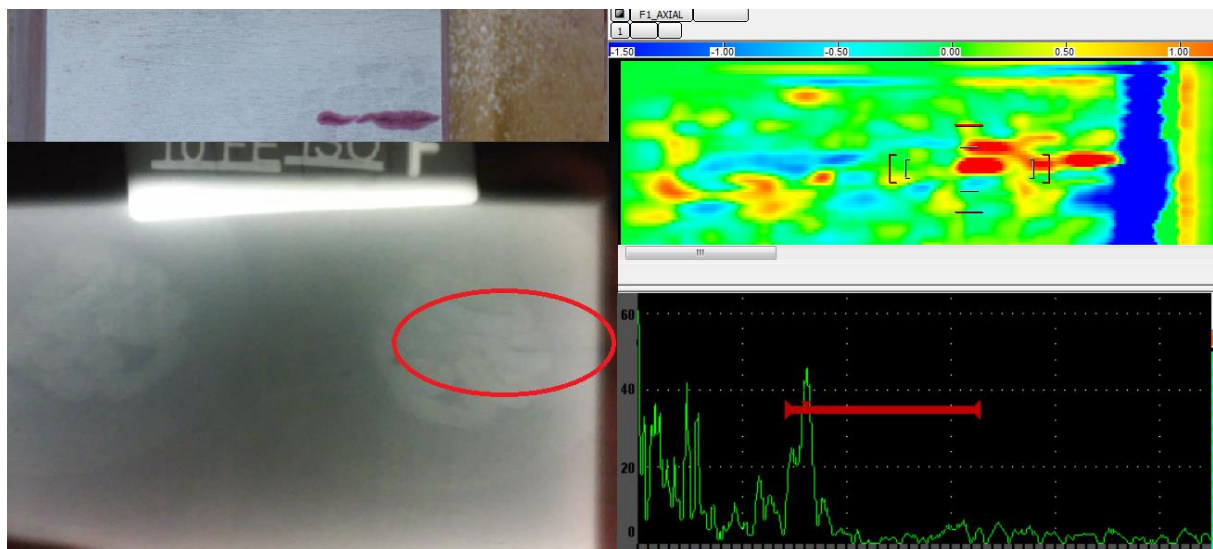


Obr. 78 - Neúspěšné UT měření vzorku č. 5

Druhou skupinou jsou vyjiskřené drážky, které, ať ve svaru nebo ve volném materiálu, měly nejjasněji čitelné indikace a byly nejsnáze zjistitelné. Drážka ve vzorku č. 10 byla snadno

zjistitelná u všech použitých metod. Drážky ve zbylých dvou vzorcích byly díky umístění ve svaru oproti ní hůře identifikovatelné. Při porovnání vzorků č. 12 a 13 lze vidět, že rozdíly ve velikosti drážek jsou viditelné. Tyto rozdíly ale vy výsledku neměly vliv na nalezení vady. Zajímavější je vliv sklonění drážek, díky kterému se více liší odezvy mezi různými měřeními a přibližuje to tak tyto drážky odezvou blíže k reálným vadám. Zde může být odkázáno na obrázky č. 53 a 59.

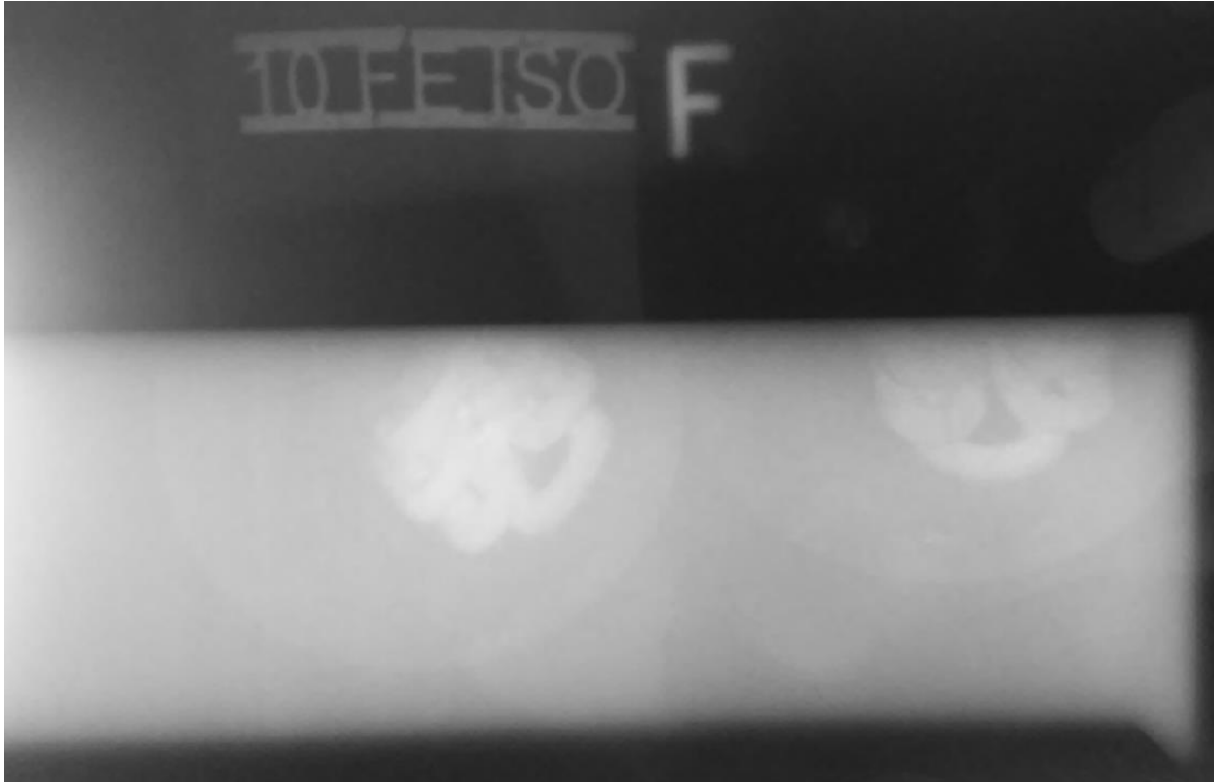
Ve třetí skupině jsou provozní vady, trhliny ve svarech. Většinou nebyl problém detekovat tyto trhliny, největší překážkou byly odezvy vzniklé ze samotného svaru a jeho geometrie. Na tyto vady se ukázalo nejvhodnější použití kapilárního nebo ultrazvukového zkoušení. V případě jednodušší geometrie je vhodná i metoda měření vířivých proudů a od určité velikosti trhlin i rentgenové snímkování. Na obrázku č. 79 je vidět ilustrační srovnání výstupů pro reálné trhliny.



Obr. 79 - Různé odezvy pro trhliny ve svarech

Poslední skupinou jsou vzorky s připravenými AR vadami. Prvním je svařovaný vzorek č. 1, ve kterém bylo objeveno větší množství vad. Tyto vady byly detekovány pouze pomocí objemových metod a podle výsledků odpovídají odezvami reálným vadám. Tato měření však odhalila nedokonalosti ve svaru a pravděpodobně by ho správně označila za vadný. Problém je ale příprava tohoto svaru, při které nelze plně kontrolovat vznik vad s přesnými parametry a v předem známém počtu.

Prozkoumána byla trojice vzorků s nacyklovanými trhlínami. Vzniklé vady jsou úzké a rovné. V případě kapilárního zkoušení se šířka trhlin u dvou vzorků č. 11 a 14 pohybovala kolem detekční hranice. Přezkoušení pomocí magnetické polévací metody je detekovalo bez problémů. Podobný problém mělo i zkoušení pomocí vířivých proudů. Stejně jako u kapilárního zkoušení byla jedna z vad slabě zachycena a druhá nebyla zachycena vůbec. Rentgenové snímkování tyto vady nezaznamenalo. Metody, které fungovaly u všech těchto vad, jsou ultrazvukové (UT a PA). Lze to vidět například na obrázcích č. 54 a 62.



Obr. 80 - Neúspěšné prozařovací měření vzorku č. 10

Zhodnocení možností detekce různých typů vad není úplně jednoznačné, neboť existuje velké množství parametrů. Záleží na množství a vlastnostech materiálu, geometrii vzorku i na použité metodě, vybavení a obsluze. Doporučení vhodné metody bude tedy záležet více na konkrétních podmínkách, kontrolovaných vzorcích a předpokládaných vadách

6.3 Zhodnocení použitých AR vad

Obecnou snahou je u AR vad přiblížit se odezvou co nejbližší odezvám reálných vad. Už snaha u skloněných vyjiskřených drážek vzorku č. 13 se blíží definici AR vady. Umístění pod úhlem podél svaru přidává oproti rovné drážce rozdílné odezvy získané při měření z různých směrů. Toto připodobnění může být dobrým přiblížením k odezvám odpovídajícím trhlinám ve svarech.

Svar u vzorku č. 1 byl záměrně vyroben s vadami. Je u něj ale problém ve výrobě vad v daných parametrech. U takto vyrobeného kusu není předem známo, jaké jsou uvnitř přesně vady a kde se nacházejí. Odezvy těchto vad ale plně odpovídají vadám reálně se ve vzorku vyskytujícím.

U únavových trhlin vycházejících z připraveného vrubu velmi záleží na parametrech přípravy. Nelze jednoduše nastavit šířku trhliny. Dobrou vytváření trhliny lze ale nastavit její hloubku. Pak je také důležité, kolik materiálu je z povrchu odebráno, a tím i jaká část trhliny zůstane ve vzorku. Takto připravené trhliny jsou pro použité metody ve většině případů hůře objevitelné než u vyjiskřených drážek.

Lze konstatovat, že zde testované AR vady se přibližují odezvami k reálným vadám.

7 Závěr

Tato práce zpracovává přehled metod nedestruktivního zkoušení materiálu se zaměřením na metody, které se v největší míře využívají v rámci reálného experimentálního programu. Jedná se o objemové i povrchové metody založených na různých principech.

První část se věnuje teoretickým a praktickým základům těchto metod. Pro každou ze sedmi popisovaných NDT metod jsou zde informace umožňující pochopení principů fungování a používání testovacích metod.

Práce dále pokračuje rozbořem rozdílů a výhod a nevýhod jednotlivých metod a skupin metod. K této problematice se práce opět vrací ještě v diskuzi výsledků experimentální části. Poté následuje úvod do problematiky zkušebních a kalibračních nástrojů.

Druhou částí práce je experiment, který měl za úkol prakticky srovnávat jednotlivé NDT metody, možnosti jejich použití a získané výsledky. Jeho druhým úkolem bylo zhodnocení použití umělých vad a as real vad, které by se měly co nejvíce svou indikací blížit k reálným vadám.

Součástí této části je nejprve podrobné seznámení se zkušebními vzorky a jejich vadami. Poté následují kapitoly věnované zkoušení pomocí jednotlivých metod a končí se diskuzí získaných výsledků. Tato diskuze je rozdělena do tří částí, začíná porovnáním výhodnosti a použitelnosti metod, pokračuje porovnáním zjistitelnosti různých typů vad a končí rozbořem výsledků týkajících se as real vad.

Každá NDT metoda má své výhody a doporučené oblasti použití. Při výběru metod je potřeba zohlednit přístrojové vybavení a dostupnost kvalifikované obsluhy, typ a množství kontrolovaných kusů, materiál, vlastnosti a geometrii vzorků, předpokládané vady a v neposlední řadě také ekonomickou náročnost. Je vhodné se při výběru metod kontroly a při přípravě plánů podrobně informovat.

Je faktem, že různé typy vad vykazují různou obtížnost jejich nalezení. Dobrá volba použité metody zkoušení je pro jejich nalezení zásadní.

Co se týče zkoumaných AR vad, jejich odezvy se pro dané použití a metody daří přiblížit odezvám získávaným z reálných vad. Podrobnější zhodnocení zkoumaných AR vad se nachází v kapitole 6.3. Pro každou oblast použití a typ vady je potřeba navrhnout a připravit postup výroby odpovídajících vzorků s AR vadami

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Mika Kempainen, Iika Virkkunen, Comparison of realistic artificial cracks and in-service cracks, <http://www.ndt.net/article/ecndt02/401/401.htm>, 2002, NDT.net, vid. 26. 11. 2016
- [2] Regazzo R. Regazzová M. Základy ultrazvuku – skripta pro ultrazvukové kurzy UT01, UT2, UT3 a studium základů ultrazvuku, BEN – Technická literatura, 2013
- [3] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Application, Olympus NDT 2004
- [4] Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Application, Olympus NDT 2007
- [5] Jaroslav Čech, Vady a kontrola odlitků, 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1991
- [6] ASM Handbook Volume 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control, 1997 ASM International
- [7] Zemětřesení – Seismické vlny, https://sites.google.com/site/zemetreseni01/seismicke_vlny, vid. 26. 11. 2016
- [8] Tomáš Vaňkát, Určování směru příchodu ultrazvukového signálu v prostředí s odrazy, diplomová práce, Univerzita Pardubice, 2012, vedoucí Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
- [9] <http://www.energyworkforce.net/>, vid. 5. 12. 2016
- [10] Jan Smolek, Nedeštruktivní defektoskopie, Zkoušky prozařováním – Radiodefektoskopie
- [11] Přednášky předmětu Defektoskopie a provozní diagnostika, Ing. Petr Beneš, Ph.D., ZČU FST 2016
- [12] <http://www.ndt.net>, vid 1.5.2017
- [13] <http://www.cndt.cz/>, vid 1.5.2017
- [13] <http://www.cws-anb.cz>, normy pro NDT testování, vid 27.5.2017