ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270014 – Materiálové inženýrství a výrobní technologie

Studijní specializace: Materiálové inženýrství a výrobní technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

NDT – zkoušení potrubí pomocí neharmonizovaných postupů UT – Phased array

Autor: Bc. Vít ROUŠAR

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr BENEŠ Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Vít ROUŠAR**
Osobní číslo:	**S21N0048P**
Studijní program:	**N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce:	**NDT – zkoušení potrubí pomocí neharmonizovaných postupů UT – Phased array**
Zadávající katedra:	**Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Nedestruktivní testování materiálů a konstrukcí
2. Ultrazvukové zkoušení
3. Nové metody ultrazvukového zkoušení
4. Metodika provádění standardizovaného ultrazvukového zkoušení
5. Tvorba databáze svarových spojů
6. Ověření postupu zkoušení
7. Tvorba detailních návodek postupu zkoušení
8. Diskuze výsledků
9. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-70 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV). Brno: Akademické nakladatelství CERM, ISBN 978-80-7204-591-4, 2008.

ASM Handbook Volume 17. ISBN: 978-1-62708-152-8.

Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, Fourth printing 2017, ISBN 0-9735933-0-X.

REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie. Praha: BEN – technická literatura, 2013. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-466-8.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Štěpán Havela**
Doosan Škoda Power s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
vedoucí katedry

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** Roušar	**Jméno** Vít	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** doc. Ing. Beneš, Ph.D.	**Jméno** Petr	
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KMM		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	NDT – zkoušení potrubí pomocí neharmonizovaných postupů UT – Phased array		

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KMM		**ROK ODEVZD.**	2023

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	86		**TEXTOVÁ ČÁST**	78		**GRAFICKÁ ČÁST**	8

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Tato diplomová práce se zabývá možnou náhradou radiografické zkoušky zkouškou ultrazvukovou v rámci řady ocelí uhlíkových a korozivzdorných. Aby to bylo možné, je třeba záměnu dostatečně ověřit, což je také cílem. Experimentální část tedy popisuje řadu různých vzorků, umělých vad a parametrů, které jsou vyzkoušeny a následně vyhodnoceny. Součástí diplomové práce jsou také časové a ekonomické úspory, kterých záměnou lze docílit v rámci reálného projektu.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	časové úspory, ekonomické úspory, energetický průmysl, Phased array, nedestruktivní testování, svarové spoje, svarové vady, ultrazvuk

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	**Surname** Roušar	**Name** Vít	
STUDY PROGRAMME	N0715A270014 Materials Science and Manufacturing Technology		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** doc. Ing. Beneš, Ph.D.	**Name** Petr	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	~~**BACHELOR**~~	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	NDT – pipeline testing using non-harmonized procedures UT – Phased Array		

FACULTY	Mechanical Engineering	**DEPARTMENT**	KMM	**SUBMITTED IN**	2023

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	86	**TEXT PART**	78	**GRAPHICAL PART**	8

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	This diploma thesis explores the possible replacement of the radiographic test with an ultrasonic test within a range of carbon and corrosion-resistant steels. To do this, the confusion needs to be sufficiently verified, which is also the of the thesis. The experimental part therefore describes several different samples, artificial defects and parameters that are tested and subsequently evaluated. The thesis also includes time and economic savings, which can be achieved in a real project.
KEY WORDS	time savings, economic savings, energy industry, Phased array, non-destructive testing, weld joints, weld defects, ultrasound

Poděkování

Touto cestou bych rád velmi poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D, za cenné rady a za velmi ochotnou pomoc při řešení problémů v rámci mé diplomové práce. Stejnou vahou bych chtěl poděkovat Štěpánu Havelovi, Vítu Kalaši a celé společnosti Doosan Škoda Power s.r.o.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, přítelkyni a kamarádům za neustálou a velmi významnou podporu při psaní této diplomové práce, ale také během celého svého studia.

Obsah

1 Úvod 12
2 Nedestruktivní testování 13
2.1 Povrchové vady 13
2.1.1 Vizuální zkouška 13
2.1.2 Kapilární (penetrační) zkouška 14
2.1.3 Magnetická prášková zkouška 15
2.2 Vnitřní vady 15
2.2.1 Radiografická zkouška 16
2.2.2 Zkouška vířivými proudy 17
2.2.3 Zkouška akustickou emisí 17
2.2.4 Zkouška těsnosti 18
2.2.5 Tenzometrická zkouška 19
2.2.6 Infračervená termografie 20
3 Ultrazvuková zkouška 21
3.1 Základní princip a fyzikální podstata 21
3.1.1 Kmitání a podstata vlny 21
3.1.2 Pásma zvuku na základě frekvence 22
3.2 Vlnění a typy vln 22
3.2.1 Podélná vlna 23
3.2.2 Příčná vlna 23
3.2.3 Rayleighova (povrchová) vlna 23
3.2.4 Lambova (desková) vlna 23
3.3 Akustický tlak 23
3.4 Zákony odrazu, lomu 24
3.4.1 Zákon odrazu a dopadu 24
3.4.2 Šikmý dopad na rozhraní dvou prostředí 24
3.4.3 Kolmý dopad na rozhraní dvou prostředí 25
3.4.4 Snellův zákon 26
3.5 Typy sond 26
3.5.1 Přímá sonda 27
3.5.2 Dvojitá sonda 27
3.5.3 Úhlová sonda 27
3.5.4 Fokusující imersní sonda 28

3.5.5 Sonda Phased array ... 28
3.5.6 Odvalovací sonda pro suchou vazbu ... 28
3.6 Typy zobrazení ... 28
3.7 Využívané ultrazvukové metody ... 29
3.7.1 Metoda Phased array ... 29
3.7.2 Total Focusing Method (TFM)/Full Matrix Capture (FMC) ... 30
3.7.3 Time-of-flight diffraction (TOFD) ... 31
4 Testované materiály ... 32
4.1 Odlitky ... 32
4.2 Plechy (trubky) ... 33
4.2.1 Korozivzdorné oceli ... 33
4.2.2 Nízkolegované oceli ... 34
4.2.3 Uhlíkové oceli ... 35
4.3 Výkovky ... 35
4.3.1 Materiály na výrobu lopatek ... 35
4.3.2 Materiály na výrobu rotorů ... 36
5 Svarové vady ... 38
5.1 Trhliny (100) ... 38
5.2 Dutiny (200) ... 39
5.2.1 Plynové dutiny (póry) (201) ... 39
5.2.2 Staženiny (202) ... 41
5.2.3 Mikrostaženiny (203) ... 41
5.3 Studené spoje a neprůvary (400) ... 41
5.4 Vady tvaru (500) ... 43
6 Svařovací metoda TIG a tepelně ovlivněná zóna (TOZ) ... 44
6.1 Svařovací metoda TIG ... 44
6.2 Tepelně ovlivněná zóna (TOZ) ... 44
6.3 Vliv tepelně ovlivněné zóny (TOZ) ... 45
7 Ekonomický a časový pohled ... 46
8 Experimentální část ... 47
8.1 Postup měření ... 47
8.1.1 Úvod ... 47
8.1.2 Kvalifikace pracovníků ... 48
8.1.3 Zkušební zařízení ... 48
8.1.4 Zkušební podmínky ... 49

8.1.5 Kalibrace 50
8.1.6 Průběh zkušebního procesu 51
8.1.7 Hodnocení 52
8.1.8 Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení 53
8.1.9 Stupně přípustnosti pro jednostranné zkoušení 56
8.2 Ověření metody Phased array 58
8.2.1 1. fáze – Oboustranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami) 59
8.2.2 2. fáze – Jednostranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami) 60
8.2.3 3. fáze – Jednostranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami dle normy) 61
8.3 Výstup zkoušení 65
8.4 Metalografie 65
8.5 Časový a ekonomický pohled 67
9 Diskuze výsledků 70
10 Závěr 71
11 Použitá literatura 72
PŘÍLOHA č. 1 i
PŘÍLOHA č. 2 v

Použité zkratky a jednotky

Zkratky

atp. – a tak podobně,
CEV – uhlíkový ekvivalent,
ČSN – česká technická norma,
EN – evropská norma,
ISO – mezinárodní norma,
min. – minimálně,
max. – maximální,
NDT – „Non-Destructive Testing“ = nedestruktivní testování,
NW – „Number of Welder“ = číslo svářeče,
PA – Phased array,
RT– radiografická zkouška,
s.r.o. – společnost s ručením omezeným,
TOFD – „Time-of-Flight Diffraction“ = difrakční metoda ultrazvukového zkoušení,
TOZ – tepelně ovlivněná zóna,
UT – ultrazvuková zkouška,
UZ – ultrazvuk,
WPS – „Welding Procedure Specification“ = svařovací postup.

Jednotky

° – stupeň,
°C – stupeň Celsia,
dB – decibel,
Kč – Česká koruna,
kg – kilogram,
MHz – megahertz,
MPa – megapascal,
m – metr,
mm – milimetr,
Pa – pascal.
s – sekunda,
t – tuna.

1 Úvod

Nedestruktivní testování (NDT) je dnes velmi obvyklý způsob testování materiálů. Ačkoliv přináší celou řadu výhod, jako je především použitelnost testovaného dílu i po zkoušení, má také celou řadu úskalí.

Vždy je nutné vědět jakou metodu v jakém případě využít, případně jaké vady jsou použitou metodou nedetekovatelné. Každá technologie má svůj fyzikální princip a pokud nejsou podmínky technologie naplněny, mohou být výstupem zkoušky žádné nebo značně zkreslené výsledky. Každou záměnu technologie nedestruktivního testování za jinou je vždy třeba řádně prověřit na základě experimentu a zhodnocení jeho časové a ekonomické podstaty.

Diplomová práce je zpracována na základě spolupráce se společností Doosan Škoda Power s.r.o., která chce zhodnotit záměnu klasické radiografické zkoušky za vhodnější metodu, a to inovativní ultrazvukovou metodu Phased array. Ačkoliv je tato metoda zavedena již delší dobu, našla své uplatnění převážně pří zkoušení materiálů o větší tloušťce a rozměrech. V zájmu zmíněné společnosti je ověřit možnost jejího využití v případě materiálů značně rozměrově menších.

Experimentální část diplomové práce se věnuje právě ověření možnosti záměny těchto metod na základě testování různorodých materiálů. Případný úspěch či neúspěch je doplněn metalografickým rozborem proč tomu tak je.

V případě použitelnosti metody Phased array je stanoven ekonomický a časový pohled na výhodnost její aplikace v případě reálného projektu.

2 Nedestruktivní testování

Kvalita každého výrobku je stanovena kvalitou jeho nejslabšího článku. Tyto články, neboli konstrukční materiály, jsou ovlivňovány celým jejich výrobním procesem. Žádný materiál není ale takřka nikdy bez vad a čím menší obsah těchto vad v materiálu je, tím se jeho využití prodraží.

Jak již předchozí odstavec napovídá, není možné využívat ke každé myslitelné konstrukci takřka bezvadný materiál. Cena konstrukce by tím zbytečně výrazně vzrostla, což je samozřejmě z pohledu výrobce nemyslitelné. Zda je materiál použitelný nebo ne, stanovuje charakteristika jejich vad. Vadou výrobku a obecně materiálu lze chápat každou odchylku od konečného rozměru, tvaru, hmotnosti až po nepřesnosti v mikrostruktuře. Tyto vady definují příslušné státní, evropské a světové normy. Normy nebo dohodnuté technické přejímací podmínky také upřesňují, jaké vady jsou přípustné a nepřípustné.

Značná řada zkoušek materiálu je typu destruktivního, narušují tedy stav výrobku a není vždy příliš vhodné ji z ekonomických nebo časových důvodů uskutečnit. V těchto případech je naprosto ideální volbou nedestruktivní testování materiálu (NDT) známé také pod pojmem defektoskopie. Dle schopnosti identifikace vad lze zkoušky rozdělit na:

- Povrchové vady,
  - vizuální zkouška,
  - kapilární (penetrační) zkouška,
  - magnetická prášková zkouška (povrchové i částečně vnitřní vady).
- Vnitřní vady,
  - radiografická zkouška,
  - zkouška vířivými proudy,
  - zkouška akustickou emisí
  - zkouška těsnosti,
  - tenzometrická zkouška,
  - termografická zkouška,
  - ultrazvuková zkouška.

Všeobecným úskalím defektoskopie je, že takřka nikdy není možné použít pouze jednu metodu. Je vyžadována kombinace alespoň dvou nebo více metod. Žádnou jednotnou metodou totiž nelze univerzálně stanovit všechny vady, které se ve výrobku mohou vyskytovat. Stejně tak je na rozdíl od destruktivních zkoušek vyžadována určitá kvalifikace na vyhodnocování výsledků. V každém případě je vyžadována znalost a omezení dané metody, stejně tak specifika zkoumaného materiálu. [1, 2]

2.1 Povrchové vady

Tato kapitola popisuje nedestruktivní metody testování, které odhalují vady výrobku pouze na jeho povrchu.

2.1.1 Vizuální zkouška

Jedná se o nejjednodušší metodu nedestruktivního testování. Může být zařazena jako součást vstupní, mezioperační nebo výstupní prohlídky. Indikuje povrchové vady výrobku, jako jsou viditelné trhliny, vnější staženiny, řediny, praskliny nebo koroze.

Je vyžadována značná zraková schopnost obsluhy, stejně tak je nutná vhodná úprava zkoumaného materiálu, jako je jeho očištění případně další úpravy. Značnou roli hraje také správné osvětlení.

Jak již název napovídá, metoda je založena na prostém pozorování povrchu. Lidské oko však zdaleka není dokonalé. Proto je možné využít značného množství pomůcek případně zařízení umožňujících vizuální přenos z jinak nepřístupných míst. Vizuální metoda se tedy na základě těchto pomůcek dělí na:

- Přímá,
  - oční kontrola, případně využití pomocné lupy.
- Nepřímá,
  - optické přístroje a zařízení (endoskopy, periskopy nebo videokamery). [1]

2.1.2 Kapilární (penetrační) zkouška

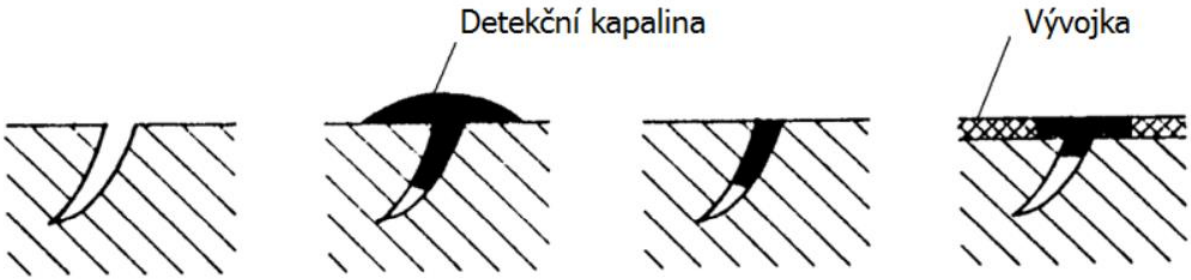
Další povrchovou nedestruktivní zkouškou je zkouška kapilární, neboli penetrační. Její využitelnost spočívá ve zjišťování otevřených povrchových vad jako jsou povrchové trhliny nebo póry.

Kapilární zkouška využívá především jevů fyzikálních jako je například povrchové napětí, krajový úhel, kapilární elevace, kapilární tlak a v neposlední řadě viskozita. Pomocí této metody lze zkoušet:

- Materiály kovové,
  - austenitické oceli, slitiny, lehké kovy, barevné kovy.
- Materiály nekovové,
  - glazovaná keramika, sklo, plastické hmoty.

Následný proces je poměrně jednoduchý a funguje na bázi optického zvětšení vady tak, aby byla pozorovatelná pouhým okem. Kapalina, která má kapilárně aktivní vlastnosti je nanesena na povrch výrobku. Proniká do vady materiálu a odstranění jejího přebytku na povrchu dochází ke vzlínání této kapaliny za pomocí vývojky. Tím se vady stanou lépe identifikovatelnými, celý tento proces je znázorněn na obrázku *Obr. 1*. V praxi se využívá vícero druhů identifikačních kapalin:

- Zkoušky s použitím detekční kapaliny chemicky pasivní,
  - zkouška barevnou kapalinou,
  - zkouška fluorescenční kapalinou,
  - ostatní (olej, petrolej).
- Zkoušky s použitím kapaliny chemicky aktivní,
  - zkouška leptací. [1, 2]

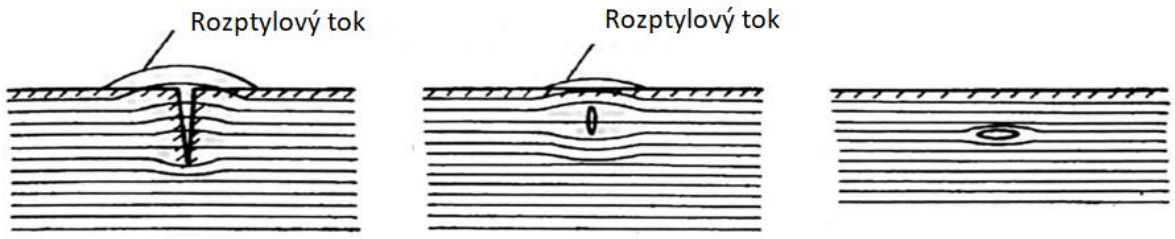


Obr. 1: Proces kapilární (penetrační) zkoušky [3]

2.1.3 Magnetická prášková zkouška

Metoda je založená na jednoduchém principu feromagnetických vlastností zkoušeného materiálu. Pomocí prášku lze zjistit přítomnost povrchových trhlin, nebo trhlin blízko pod povrchem materiálu. Jedná se tedy o metodu zkoušení jak povrchových, tak částečně vnitřních vad. Indikace přítomnost trhlin je umožněna díky vytvoření magnetického rozptylového toku, který z materiálu vystupuje až na jeho povrch. Na povrchu následně dochází k rozptylu již zmíněného prášku případně je možné součást analyzovat za pomocí sond. Důležité charakteristiky zkoušení jsou, že magnetický tok musí být za prvé dostatečně intenzivní, abych odchylku bylo možné v případě vady zaznamenat.

Druhá podstatná skutečnost je orientace samotné trhliny. Je důležité si uvědomit, že pokud trhlina není na rozptylový tok přímo kolmá, může být její velikost značně zkreslená nebo dokonce nemusí být ani zaznamenána. V případě, že je trhlina s tokem rovnoběžná případně úhel mezi tokem a trhlinou je menší než 45°, je magnetický prášek rozptylovaný pouze šíří trhliny, nikoliv její délkou viz *Obr. 2*. Je tedy vysoce pravděpodobné, že dojde k přehlednutí trhliny, případně ji nebude věnována dostatečná pozornost. [1, 2]



Obr. 2: Rozptylový tok v případě různé orientace vad [1]

Aby bylo možné zkoušku správně provést, je nutné testovaný materiál magnetovat nejlépe pomocí několika způsobů. Značnou výhodou při zkoušení je, pokud je teoreticky odhadnutelná orientace těchto trhlin například pomocí známého směru namáhání případně již za pomocí odhalených trhlin. Pokud je orientace trhlin naprosto neznámá je nutné využít různé kombinace těchto magnetovacích způsobů. Způsoby magnetování se rozdělují na:

- Pólová magnetizace,
  - magnetické pole prochází jak kontrolovaným předmětem, tak kolem něj, typickým prvkem pólové magnetizace je vznikání magnetických pólů v místě vstupu a výstupu magnetických čar, předmět se po zmagnetování sám vyznačuje svým magnetickým polem,
  - za pomocí: cívky, magnetizačního jha.
- Cirkulární magnetizace,
  - uzavření magnetického toku pouze ve zkoušeném předmětu, magnetické póly nevznikají i přes zmagnetování zkoušeného předmětu, bez výraznějších projevů vnitřního magnetického pole navenek,
  - za pomocí: vodiče, indukcí proudu v testovaném předmětu. [2]

2.2 Vnitřní vady

Další kapitola se věnuje metodám, které zkoumají materiál pod povrchem, tedy uvnitř. Uvnitř materiálu je další řada nebezpečných prvků, které představují značné riziko.

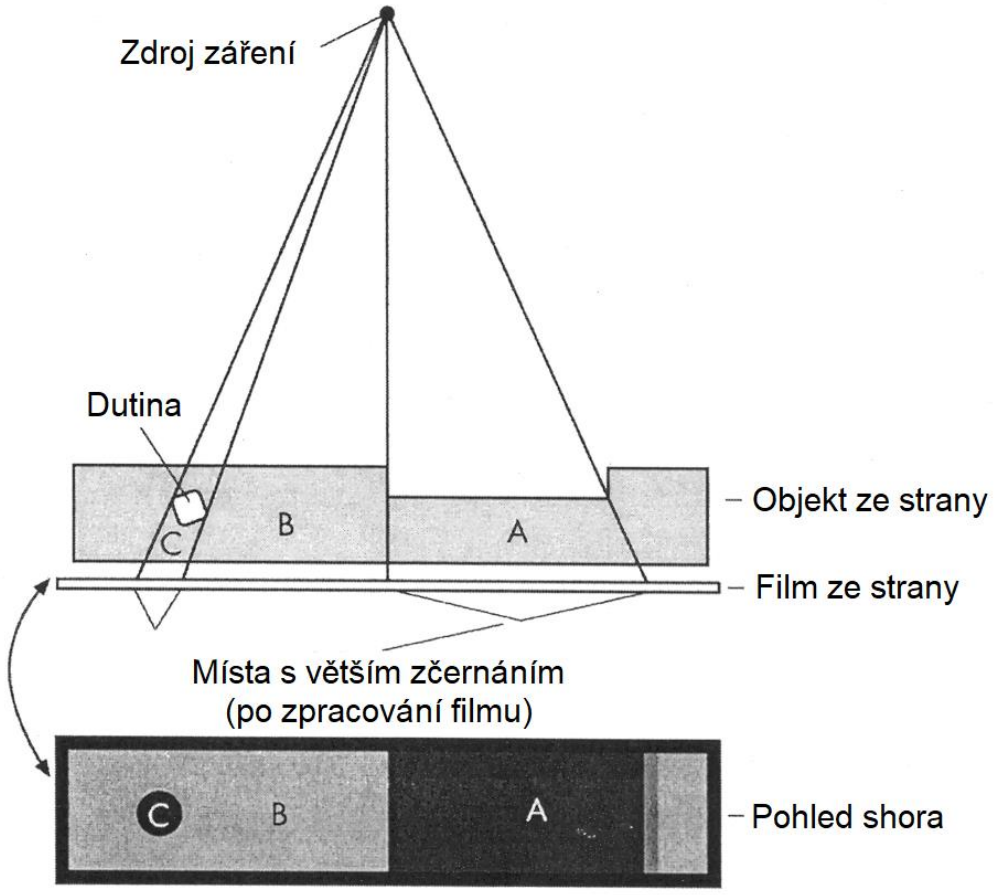
2.2.1 Radiografická zkouška

Radiografická zkouška neboli prozařování je hojně využívaná metoda pro zkoušení především svarů a odlitků. Je založena na prozařování zářením rentgenovým, gama zářením nebo zářením neutronovým. Samotné záření je definovatelné jako šíření energie prostorem. Na základě samotného přenosu se dělí záření na:

- Elektromagnetické vlnění – rentgenové a gama záření,
  - dochází k šíření energie vlněním, kdy nositelem energie nejsou hmotné částice.
- Korpuskulární (částicové) vedení – elektrony, neutrony, alfa částice,
  - nositelem této energie jsou hmotné částice. [1, 2]

Principem této zkoušky je schopnost těchto typů záření pronikat skrze pevný materiál. Jelikož ale stejně materiál částečně průchodu záření brání, projde zkoušeným předmětem menší množství záření, než které na něj dopadá. Je tedy jasné, že úbytek průchozího záření závisí na skutečné tloušťce zkoušeného předmětu. Vnitřní vadu materiálu však lze v tomto případě uvažovat jako místní snížení tloušťky materiálu. V místě vady tedy projde větší množství záření než v místě bez vadném.

Další důležitou část této zkoušky tvoří radiografický film, který je umístěn těsně za zkoušeným tělesem. Tento film zachytí průchozí záření a umožňuje pozorovat místní vnitřní vady, které materiál obsahuje. Tato místa jsou na filmu zobrazena výrazně tmavěji než místa, kde se vady nevyskytují. Velmi často se dnes také využívají přímé detektory. [4]

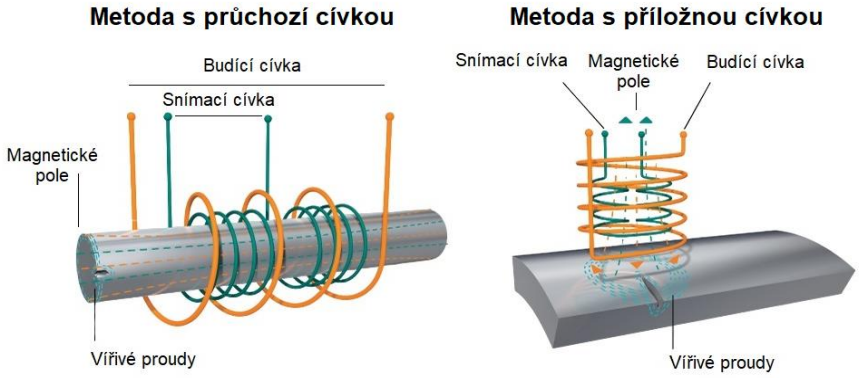


Obr. 3: Princip radiografické zkoušky [4]

2.2.2 Zkouška vířivými proudy

Tato zkouška využívá fyzikálních změn na základě střídavého magnetického pole. Vířivé proudy jsou výsledkem indukce elektromagnetické síly, která v tělese vzniká při průchodu střídavého magnetického toku. Na jejich hustotu a rozložení mají vliv fyzikální vlastnosti samotného tělesa, jako je elektrická vodivost, permeabilita a jeho geometrie. Zkouška vířivými proudy napomáhá zjišťování existujících vad, ale také posuzuje změny a záměny struktury materiálu. Zkoušet je možné různá tělesa, polotovary. Naměřené hodnoty jsou snímány za pomocí snímačů, které využívají obvyklých fyzikálních veličin. Stejně jako u dalších metod je velmi důležité zvolit správnou citlivost. Stejně tak jsou důležité značné znalosti obsluhy, pro správné vyhodnocení tohoto typu zkoušky. Obecný konstrukční základ přístroje tvoří budící a snímací cívky. Napětí je možné upravovat případně zesilovat za účelem kompenzace rušivých vlivů. Výstup měření může být buď analogový, digitální nebo číslicový. U zkoušky lze rozlišit dva typy metod na základě upořádání snímacích cívek:

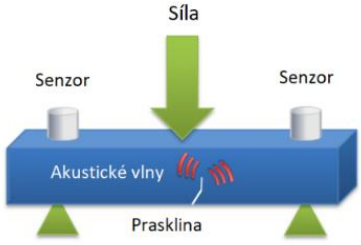
- Metoda s průchozí cívkou,
  - materiál je v tomto případě ovinut magnetizační a snímací cívkou, využívá se pro kontrolu výrobků tyčovitého tvaru (šrouby, čepy, dráty).
- Metoda s příložnou cívkou,
  - Metoda určená pro výrobky větších rozměrů, cívka je v tomto případě přiložena radiálně k povrchu zkoušeného výrobku. [1, 2]



Obr. 4: Princip zkoušky vířivými proudy [5]

2.2.3 Zkouška akustickou emisí

Skutečnost, že materiál při plastické deformaci vydává zvuk, je všeobecně známý fakt. Valná většina materiálů vydává charakteristické zvuky praskání nebo lámání. Typicky známým materiálem je cín a jev známý pod pojmem „pláč cínu“, ke kterému dochází při jeho ohybu. Za pomocí analýzy tohoto zvuku neboli akustické emise, lze získat další podstatné informace o zkoušeném materiálu.



Obr. 5: Princip zkoušky akustickou emisí [8]

Akustickou emisi lze vnímat jako soubor elastických napěťových vln, k jejichž vzniku dochází dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř tělesa, případně pak jako reakce materiálu na působení vnějších sil. Ke vzniku zvuku může docházet při jakémkoliv posunu dislokace nebo náhlém vzniku mikrotrhliny. Jednotlivé typy vln jsou podrobněji popsány v kapitole *3.2 Vlnění a typy vln*. Ne každý zvuk je ale slyšitelný lidským uchem a je třeba využívat speciální přístrojové vybavení určené pro zkoušku akustickou emisí.

V současné době se analýzy akustické emise nevyužívá pouze k detekci plastické deformace, ale také například při vyhledávání úniků plynu nebo kapaliny z uzavřených konstrukcí pod tlakem, případně při tření, obrábění nebo svařování. Proces akustické metody akustické emise lze popsat v několika bodech:

1. Vznik akustické emise, dochází k analyzované události.
2. Napěťové vlny se šíří materiálem až k místu snímače.
3. Snímač na povrchu materiálu detekuje vlny, následně dochází k převodu akustické emise na elektrický signál.
4. Elektrický signál je analogicky zpracován a veden k měřícímu systému.
5. Za pomocí měřícího systému je signál emise vyhodnocen. [2, 6]

2.2.4 Zkouška těsnosti

Těsnost výrobku je poměrně obtížné definovat. Jedná se o schopnost zamezit průniku tekutin nebo plynů skrze stěny případně spoje. Pokud dané místo vlastnost těsnění ztratilo, nebo byla jeho úroveň snížena, je tento jev nazýván jako netěsnost. Materiál je však vždy alespoň trochu propustný, a proto ne každá propustnost je vadou. Je tedy nutné před zkouškou definovat úroveň, jaká je již v rámci netěsnosti nepřístupná. Stejně tak každou netěsnosti tvoří pouze jedna komunikace, ale může být tvořena také shlukem několika dalších. Úroveň propustnosti je nejčastěji definována za pomocí intenzity průtoku, tedy množství uniklého plynu nebo kapaliny za určitý čas. Na základě důvodu prováděné zkoušky se buď upřednostňuje měření netěsnosti, kdy se pouze zjišťuje velikost netěsnosti a informace o lokalitě vady je zanedbána. V případě druhém se naopak upřednostňuje nalézt místo vady. Na základě toho je vybrána metoda, pouze některé metody umožňují zjištění velikosti netěsnosti i její polohu. Mezi nejpoužívanější metody patří:

- Akustická metoda,
  - hledání netěsností na základě akustického vlnění vznikajícího při úniku.
- Penetrační metoda,
  - vzlínání penetrantu po jeho aplikaci utváří viditelné barevné skvrny ve vývojce.
- Kolorimetrická metoda,
  - chemická reakce uniklého amoniaku a barviva se projeví viditelnými skvrnami tmavšího charakteru na bílém podkladu.
- Bublinková metoda,
  - zviditelnění místa úniku vznikajícími bublinkami na základě vody, oleje případně pěnivého roztoku.
- Metoda měření změn,
  - početní metoda množství uniklého média vztaženého k času, nelze lokalizovat místo úniku.
- Metody s aplikací zkušebního plynu,
  - za pomocí vhodného plynu a k němu stanovenému detektoru lze prokázat místo úniku, detektor umožní regulovat citlivost. [2, 7]

2.2.5 Tenzometrická zkouška

Tato zkouška je založena na vlastnostech tenzometru. Jedná se o součást sloužící jako senzor, který se deformuje v reakci na zatížení. Na základě deformace mění svůj odpor a tím lze analyzovat napětí v měřeném materiálu. Využití tenzometru je poměrně obsáhlé. Lze jej využít pro měření zbytkových pnutí, talků, síly, ale také pro dlouhodobý monitoring stavu. Využití pro kontrolní měření ve výrobním procesu také není ojedinělé.

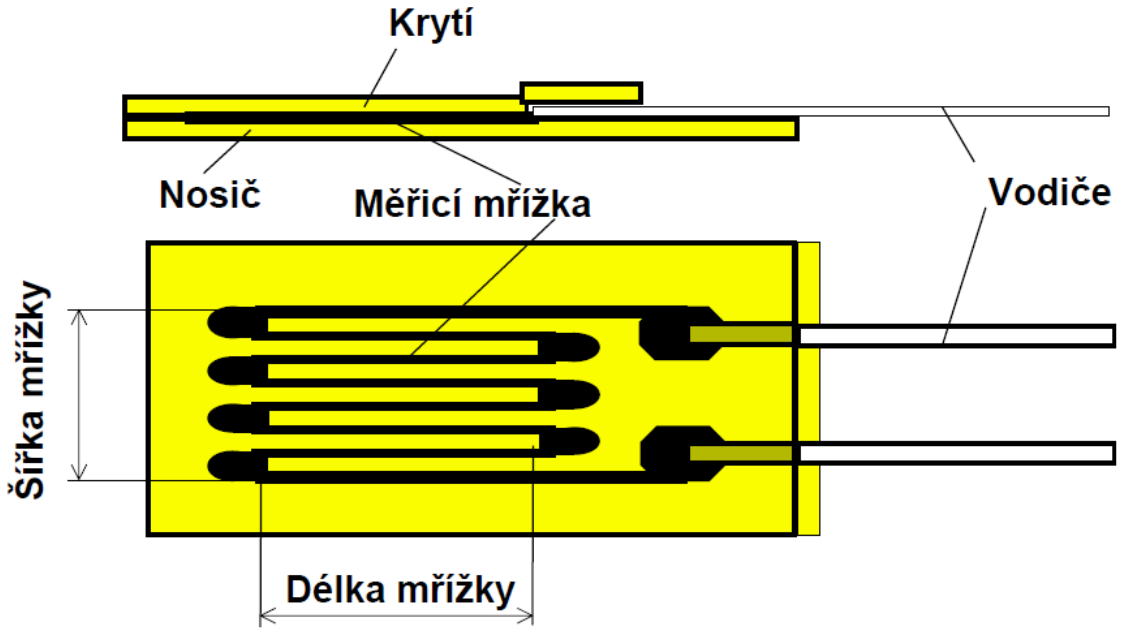
V praxi se využívá celá řada tenzometrů, které se dle svého určení rozdělují na základních pět kategorií dle materiálu svého nosiče, pokrytí a mřížky:

- C – nosič a krytí: polyamid, mřížka: slitina Cr-Ni.
- Y – nosič a krytí: polyamid, mřížka: Konstantan (slitina Cu-Ni).
- G – nosič a krytí: fenolová pryskyřice vyztužená skelným vláknem, mřížka: Konstantan (slitina Cu-Ni).
- K – nosič a krytí: fenolová pryskyřice vyztužená skelným vláknem, mřížka: Konstantan (slitina Cu-Ni).
- V – nosič a krytí: polyamid, mřížka: Konstantan (slitina Cu-Ni).

Další kritéria, která je třeba před aplikací vzít v potaz, jsou geometrie součásti, délka, provozní teplota a její proměnnost. U tenzometrů je třeba kompenzovat vliv teploty, v případě dlouhodobého využití také tečení, neboli creep materiálu. V případě dlouhodobější aplikace tenzometru je vhodné využití tenzometrů z kategorií K a V, které dokáží creep kompenzovat, případně jsou lépe uzpůsobeny na dlouhodobější provoz pomocí izolace. [9]

Velmi důležitá je v případě tenzometru i samotná aplikace. Je třeba dodržet určité podmínky, aby odpovídaly naměřené hodnoty skutečnosti:

1. čistění povrchu – mechanické,
2. čištění povrchu – chemické,
3. instalace tenzometru nalepením,
4. instalace krytí za pomocí krycích prostředků. [9]



Obr. 6: Schéma tenzometru [9]

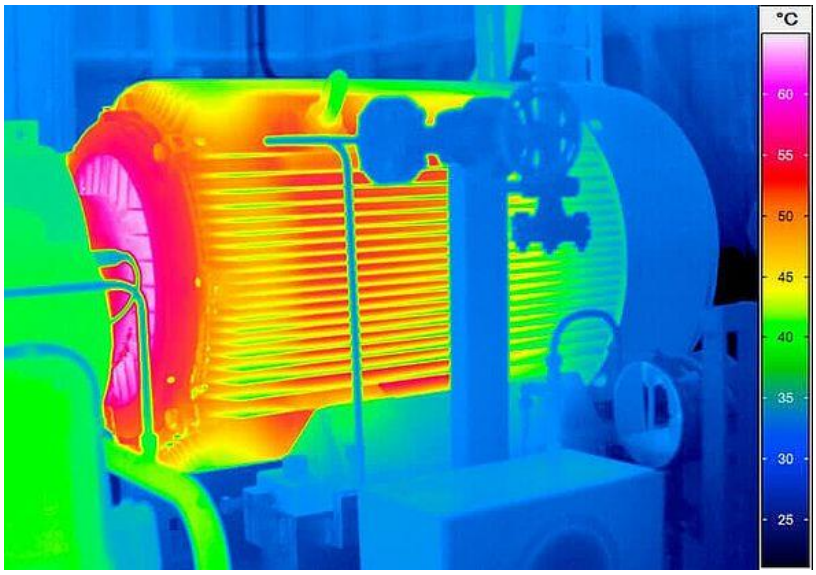
2.2.6 Infračervená termografie

Termografická zkouška, neboli infračervená termografická zkouška je v dnešní době hojně využívaná nedestruktivní metoda zkoušení. Pomocí této metody lze odhalit vady materiálu, detekovat vady spojů, místa zhoršené izolace nebo další potenciální nebezpečí. Je možné zamezit zbytečným ztrátám, jako jsou nadbytečné energetické náklady, ale také katastrofálním selháním, která mohou mít za následek i životy. Ačkoliv je využitelnost termografické zkoušky velmi bohatá, primární aplikace v reálném provozu jsou následující:

- Monitorování provozu ložisek,
  - na základě vystupujícího tepla z funkčních ložisek lze vysledovat nedostatečné mazání, které může vést k zadření, případně jejich opotřebení, které vede k často nákladným opravám a časové odstávce stroje.
- Monitorování rozvodů a izolace,
  - při degradaci izolace elektrických zařízení dochází ke zvyšování elektrického odporu, který má za následek generující teplo, které je možné termografickou zkouškou zachytit a předejít tak zbytečným provozním komplikacím.
- Detekování průsaků a netěsností,
  - vznik průsaků a netěsností má často souvislost s dalšími fyzikálními změnami, jednou z těchto změn je také teplota, kterou lze detekovat a odhalit tak vzniklé průsaky a netěsnosti.
- Analýza procesní teploty,
  - provozní teplotu lze analyzovat i z dlouhodobého hlediska a detekovat tak výkyvy teploty, které nejsou ideální a symbolizují nějaký problém z hlediska již dlouhodobého.

Základním principem je infračervený vizuální sken. Pomocí této technologie je možné pozorovat okem neviditelné tepelné stopy. Tyto stopy jsou pomocí zařízení převedeny na viditelná spektra a lze jej tím pádem identifikovat. Spektra jsou odlišená viditelnou proměnnou barvou, která charakterizuje vážnost dané tepelné anomálie.

Největší výhoda této zkoušky spočívá v její poměrně snadné proveditelnosti často i za provozu zkoušených strojů a zařízení. Zároveň pomocí ní lze odhalit často značné nedostatky a vady, které mohou ušetřit značné finanční i časové náklady. [10, 11]



Obr. 7: Využití infračervené termografické zkoušky v energetice [12]

3 Ultrazvuková zkouška

Další z metod vnitřního nedestruktivního zkoušení je ultrazvuková zkouška. Jedná se o metodu založenou na principu ultrazvuku, tedy mechanickém vlnění o frekvenci nad 20 kHz, a jeho průchodem prostředí na základě elastických vlastností. [2]

3.1 Základní princip a fyzikální podstata

V případě ultrazvuku je využíváno schopnosti odrážení, lámání, ohýbání a absorpci mechanických vln. Při takto vysokých hodnotách frekvence dochází k tak výraznému tlumení kmitání, že ani nedochází k průchodu kmitání vzduchem. Jejich průnik ale umožňují kapaliny nebo pevné materiály, jako jsou například kovy nebo lidská tkáň. Těchto jevů se využívá nejen v nedestruktivním testování, ale také v lékařství, při čištění nebo svařování.

Značnou výhodou ultrazvukových zkoušek je možnost testování rozměrných výrobků, jelikož zařízení je poměrně snadno přenosné. Na základní metody je potřeba pouze zobrazovací ultrazvukové zařízení a odpovídající sondy. Ultrazvukové zařízení vysílá, přijímá a zpracovává impulsy krátkého trvání o vysoké hodnotě napětí.

Toto napětí následně v měniči sondy vybudí mechanické kmity o dané frekvenci v rozmezí použitelného ultrazvukového pásma, tedy přibližně 0,5 MHz až 10 MHz. Šířící se zvuková vlna, která byla sondou do materiálu vyslána se v rozhraní různých prostředí odráží. Za změnu prostředí lze uvažovat jak konec zkoušeného materiálu (koncové echo), tak vnitřní vadu (echo od vady).

Zvukové vlny mohou být opět sondou přijaty a převedeny v ultrazvukovém přístroji na formu zobrazených ech. Základním principem analýzy materiálu je kontrola vysílacího impulsu a koncového echa, případně existenci další vrácených ech, která mohou být odrazem od vad. Pokud je přístroj správně zkalibrován na testovaný materiál a rozměry výrobky, je z naměřených výsledků možné stanovit lokalitu a velikost vady. Veškeré způsoby vyhodnocení, ale také průchodu a kalibrace jsou závislé na použité metodě. [2, 13]

3.1.1 Kmitání a podstata vlny

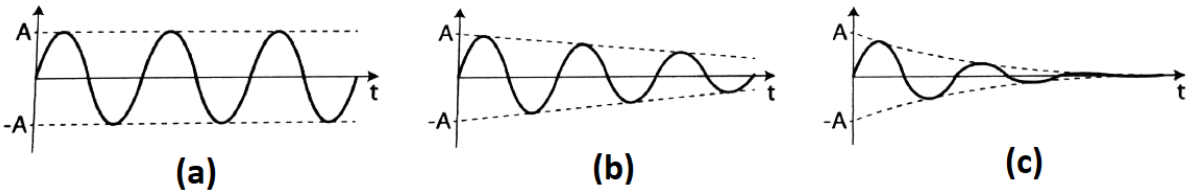
Mechanická vlna je charakterizována svým kmitáním, což je pohyb objektu kolem své rovnovážné polohy. Kmitání lze definovat za pomocí několika veličin:

- Amplituda – A [m],
  - maximální dosažená výchylka od rovnovážné polohy.
- Perioda – τ [s],
  - doba trvání průběhu celého jednoho kmitu.
- Frekvence – f [Hz],
  - převrácená hodnota periody, počet celých kmitů v rámci jedné sekundy.

Samotné kmitání může být na základě jeho útlumu, způsobeného nejčastěji působením prostředí nebo vnějších sil, na netlumené a tlumené.

Na kmitání netlumené nepůsobí žádné vnější síly, které by kmitání, jakkoliv uklidňovalo, případně je průběh kmitů stále dorovnáván na stejnou hodnotu. Lze tedy uvažovat, že netlumené kmitání dosahuje v každém kmitu amplitudy, tedy nejvyšší výchylky od rovnovážné polohy. Jedná se o ideální, ne vždy proveditelný případ kmitání.

Druhým typem kmitání je kmitání tlumené. V tomto případě je objekt ovlivňován působením sil, jako je například gravitace nebo působení vnějšího prostředí. Amplitudy je dosaženo pouze na počátku kmitání, hodnota s každým kmitem klesá. Tento typ lze na netlumené kmitání převézt pomocí energetických kompenzátorů. [13]



Obr. 8: Kmitání: (a) netlumené, (b) středně tlumené, (c) silně tlumené [13]

Každá vlna je definována svou rovnicí, z toho plyne název vlnová rovnice. V základním tvaru po matematických úpravách lze vlnovou rovnici uvádět ve tvaru:

$$a(t) = A_0 \times \sin \omega \times (t - \frac{x}{c}) \quad (1)$$

kde:

a(t) – výchylka částice [m],

A_0 – amplituda = maximální hodnota výchylky [m],

ω – úhlová rychlost [s^{-1}],

t – čas [s],

x – vzdálenost od počátečního bodu [m],

c – rychlost šíření vlny [m/s]. [2]

3.1.2 Pásma zvuku na základě frekvence

Na základě hodnoty frekvenci lze rozdělit zvuk na určité kategorie. Pro lidské ucho není dobré pohybovat se v pásmu nad ani pod slyšitelným zvukem z důvodu značných zdravotních komplikací. [13]

Tab. 1: Pásma zvuku na základě frekvence [14]

Pásmo zvuku	Frekvence
Infrazvuk	< 20 Hz
Slyšitelný zvuk	20 Hz–20 kHz
Ultrazvuk	> 20 kHz
Hyperzvuk	> 100 MHz

3.2 Vlnění a typy vln

Kmitání samotné se skládá z mechanického vlnění, neboli vln. Každé těleso je tvořeno částicemi, které mohou konat kmitavý pohyb kolem své rovnoběžné polohy. Jelikož mezi nimi působí vzájemné vazebné síly, dochází během kmitů k přenosu energie mezi těmito částicemi. Právě jejich pohyb a vliv na částice okolí umožňuje průchod vlny tělesem aniž by docházelo k pohybu tělesa samotného. V případě ultrazvuku se využívá především čtyř druhů vln. [14]

3.2.1 Podélná vlna

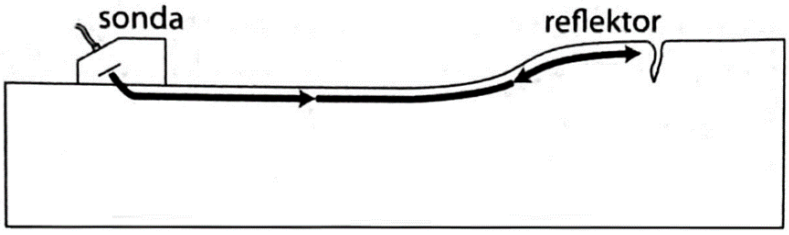
Kmitání částic kolem své rovnoběžné polohy ve směru působení vlny, dochází k objemovým změnám prostředí, neboli smršťování a roztahování během pohybu částic. Je nejpoužívanějším typem vlny. [13, 14]

3.2.2 Příčná vlna

V případě příčných vln dochází k pohybu částic ve směru kolmém na směr působení vlny, dochází k příčnému pohybu částic a je zde možné přenášet pouze smykové zatížení mezi částicemi. Z tohoto důvodu příčné vlny lze využít pouze z pevných látek a u kapalných látek s vysokou viskozitou, touto vlnou je možné zjistit menší vady než u vlny podélné za stejné frekvence z důvodu takřka poloviční vlnové délky a rychlosti zvuku. [13, 14]

3.2.3 Rayleighova (povrchová) vlna

Jakmile dochází ke zvětšení dopadového úhlu, mění se vlna příčná na vlnu povrchovou. Hloubka jejího šíření je naprosto minimální, maximálně v hloubce vlnové délky. Jak již samotný název vlny a její místo působení, využívá se především pro zjišťování trhlin na povrchu zkoušeného tělesa. Častým místem výskytu povrchové vlny je rozhraní tuhého a kapalného prostředí. Negativum spočívá ve výraznému tlumení vlny, a tedy jejímu rychlému zániku. [13, 14]



Obr. 9: Detekce defektu povrchovou vlnou [13]

3.2.4 Lambova (desková) vlna

Vlna schopná šířit se dvojím způsobem, symetrickým (dilatačním) a asymetrickým (ohybovým), v závislosti na frekvenci a úhlu dopadu, ale také tloušťce samotného materiálu. Tato vlna se šíří v prostředích srovnatelných s délkou vlny, šíří se celým průřezem a její výhoda spočívá ve vysoké citlivosti. Slouží ke zkoušení slabých desek případně drátů. [13, 14]

3.3 Akustický tlak

O akustickém tlaku lze mluvit v případě rozkmitávání bodů krystalografické mřížky kolem svých rovnovážných poloh. Tyty kmity utváří v důsledků postupných, tedy zpožděných, kmitů tlakové rozdíly. Jeho hodnota spočívá v následující rovnici:

$$P = v \times Z \tag{2}$$

kde:

P – akustický tlak [Pa],

v – akustická rychlost (hodnota rychlosti pohybujících se bodů) [m/s],

Z – akustický vlnový odpor [kg/m^{2}s]. [13]

Od chvíle vstupu ultrazvukového paprsku ze sondy do testovaného materiálu začíná docházet k jeho postupnému tlumení, což způsobuje postupné ztráty akustického tlaku.

Hlavní vliv mají ztráty rozbíháním ultrazvukového paprsku, ztráty vzniklé přechodem ze sondy do testovaného materiálu a ztráty útlumové, které jsou způsobeny zeslabováním tlaku vlivem rozptylu a absorpce materiálu. [13]

3.4 Zákony odrazu, lomu

Základní úvaha ultrazvuku spočívá ve vyvolání impulzu, jeho průchodu materiálem a následně očekávaným výstupem z materiálu zpět.

Ke zpětnému odrazu dochází na rozhraní dvou prostředí, jako je samotný konec zkoušeného materiálu nebo detekovaná vada. Je tedy nutné uvažovat několik dalších skutečností, které tento jev doprovází. [13]

3.4.1 Zákon odrazu a dopadu

Základní myšlenkou je rovnost mezi úhlem odrazu a úhlem dopadu. Každý zkoušený materiál je třeba nejprve analyzovat, aby byla použita vhodná metoda. Základní typy odrazu lze dělit na:

- Šikmý odraz,
  - obecný případ odrazu, je definován úhlem dopadu a jeho využití spočívá v kontrole zadních povrchů zkoušené součásti.
- Kolmý odraz,
  - speciální případ, kdy je úhel dopadu α = 0°, vhodný pro kontrolu vad kolmých nebo šikmo orientovaných k povrchu.

$$\alpha = \alpha' \tag{3}$$

kde:

α – úhel dopadu [°],

α‘ – úhel odrazu [°]. [13]

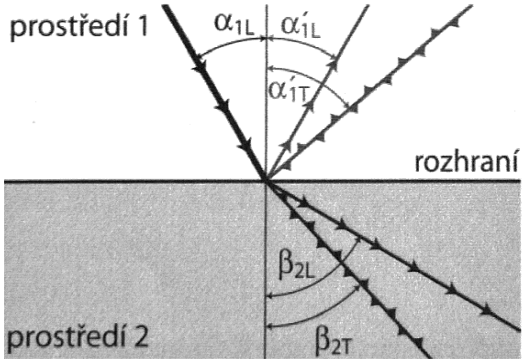
Tato platnost je však zjednodušení skutečného jevu a ne vždy dochází k této naprosté rovnosti dopadového úhlu a odrazového úhlu.

Při některých dopadových úhlech dochází k tzv. transformaci vlnění a odrazový úhel se tedy dopadovému úhlu nerovná. [13]

3.4.2 Šikmý dopad na rozhraní dvou prostředí

V případě, že dojde k dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí, mohou vzniknout až čtyři složky, které se dále šíří pod různými úhly. Tyto úhlové vztahy jsou následně řízeny tzv. Snellovým zákonem.

Princip vlnové transformace spočívá ve vzniku jiného typu odrazové vlny než vlny dopadové. Dopadová vlna může být rozdělena do prvního i druhého prostředí. Jedná se tedy o částečný odraz a částečný lom vlny. [13]



Obr. 10: Schéma šikmého dopadu na rozhraní dvou prostředí [13]

3.4.3 Kolmý dopad na rozhraní dvou prostředí

Pokud dojde k dopadu vlny kolo na rozhraní dvou prostředí, nastává rozdělení akustického tlaku vlny P_E na vznik vlny odražené o akustickém tlaku P_R a vlny prošlé P_D. Tento jev je zobrazen na obrázku Obr. 13. Tento poměr akustického tlaku vlny prošlé a odražené lze vypočítat na základě několika vztahů při znalostech vlastností obou prostředí. Právě součin hustoty prostředí a rychlost samotného šíření vlny je charakteristikou prostředí z pohledu odporu.

$$Z = \rho \times c \tag{4}$$

kde:

Z – akustický vlnový odpor [kg/m^{2}s],

ρ – hustota [kg/m^3],

c – rychlost vlnění [m/s]. [13]

Za pomocí dalších vztahů lze stanovit faktor odrazu R a faktor průchodu D. Tyto hodnoty závisí na akustickém vlnové odporu daných prostředí.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{5}$$

kde:

R – faktor odrazu [–],

Z_1 – akustický vlnový odpor 1. prostředí [kg/m^{2}s],

Z_2 – akustický vlnový odpor 2. prostředí [kg/m^{2}s]. [13]

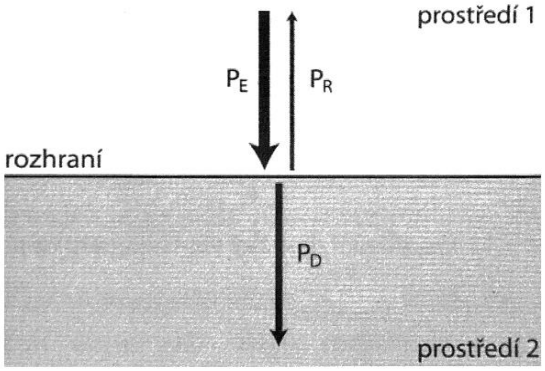
$$D = 1 + R = \frac{2 \times Z_2}{Z_2 + Z_1} \tag{6}$$

kde:

D – faktor průchodu [–],

Z_1 – akustický vlnový odpor 1. prostředí [kg/m^{2}s],

Z_2 – akustický vlnový odpor 2. prostředí [kg/m^{2}s]. [13]



Obr. 11: Schéma kolmého dopadu na rozhraní dvou prostředí [13]

3.4.4 Snellův zákon

Zákon určující vztah lomu vlny na dvou prostředích. Na jeho základě je možné určit složky podélné a příčné.

Poměr rychlosti v prvním a druhém prostředí stanovuje index lomu rozhraní. Index lomu se využívá při konstrukci úhlových sond.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_2} \tag{7}$$

kde:

n_1 – index lomu 1. prostředí [–],

n_2 – index lomu 2. prostředí [–],

c_1 – rychlost šíření ultrazvukových vln v 1. prostředí [m/s],

c_2 – rychlost šíření ultrazvukových vln v 2. prostředí [m/s],

α_1 – úhel šíření vlnění v 1. prostředí vůči normále k jejich rozhraní [°],

α_2 – úhel šíření vlnění v 2. prostředí vůči normále k jejich rozhraní [°]. [13, 15]

3.5 Typy sond

Na základě použití a svého tvaru lze rozdělit sondy na několik typů. Každá sonda musí být dostatečně mechanicky odolná, aby bylo její použití umožněno v provozu. Zároveň však musí splňovat důležité podmínky, na jejichž principu zkouška funguje.

Jednou z podmínek je schopnost sondy generovat impulzy o velké amplitudě, aby došlo k prozvučení dostatečné hloubky materiálu a zároveň nebyl celý proces ovlivněn výrazným šumem, především pak v případě materiálů o vysokých tlumících účincích. V těchto případech by nemuselo dojít ke správné detekci vad a zkouška by mohla být výrazně negativně ovlivněna.

Další nezbytnou vlastností je, že impulz musí být co nejkratší, aby byla zaručena dobrá hloubková rozlišovací schopnost. To je důležité především z důvodu, aby bylo možné odlišit blízké vady a nebylo vícero vad uvažováno jako jedna. [2, 13]

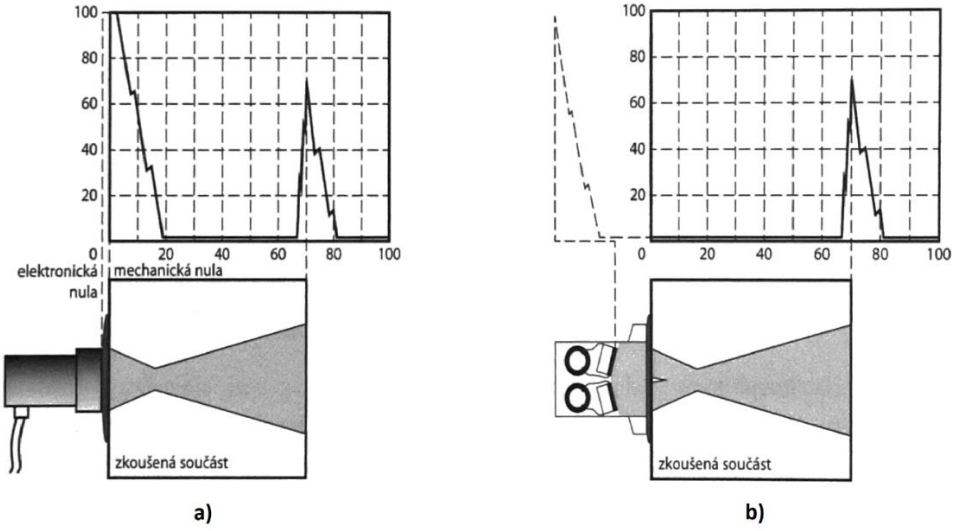
3.5.1 Přímá sonda

Jedná se o nejvýkonnější a nejčastěji používaný typ ultrazvukových sod, jejíž princip spočívá v průchodu svazku podélných vln skrze testovaný materiál v kolmém směru. Často je doplněna předsádkou, neboli nástavcem, který slouží ke zlepšení rozlišení.

Základní části přímé sondy tvoří měnič, ladící cívka, tlumící tělísko, konektor, kryt sondy a samozřejmě také nezbytná ochranná vrstva. [13, 14]

3.5.2 Dvojitá sonda

Na rozdíl o sondy přímé, kdy jeden měnič zaujímá funkci vysílací i přijímací, dvojitá sonda má dva akusticky oddělené měniče, kdy jeden slouží jako vysilač impulzu a druhý jako přijímač. Značnou výhodou a častým důvodem využitím dvojité sondy je vyřešení problému spočívajícího v takzvaném mrtvém pásmu. Toto pásmo je výsledkem echa přímé sondy přímé v blízkosti povrchu zkoušeného materiálu. To má za následek takřka úplné zamezení detekce vad v malé hloubce pod povrchem. U dvojité sondy mrtvé pásmo nevzniká právě z důvodu pouze jedné funkcionality každého z měničů. [2, 13, 14]



Obr. 12: Zobrazení signálů: a) přímá sonda, b) dvojitá sonda [13]

3.5.3 Úhlová sonda

K prozvučení materiálu pod úhlem se využívá úhlových sond. Za pomocí nich dochází při průchodu k transformaci vstupních podílných vln na vlny příčné. Ty vstupují do materiálu pod určitým lomem, který vychází z pravidel Snellova zákona, který již byl blíže představen v kapitole *2.4.4 Snellův zákon*. Úhlové sondy se dělí na základě typu vlnění:

- úhlové sondy s příčným typem vlnění,
- úhlové sondy s podélným typem vlnění. [13, 14]

Ačkoliv je úhel sody obvykle konstrukčně daný, speciální úhlová sonda s plynule měnitelným úhlem umožňuje regulaci úhlu sklonu za pomocí vestavěné páčky. Další typ úhlové sondy s vyměnitelnými plexy-klíny zase umožňuje změnu úhlu za pomocí výměny klínu. Nevýhoda jeho využití však spočívá v utvoření dalšího rozhraní a tím obtížnější kalibraci sondy. [13]

3.5.4 Fokusující imersní sonda

Využití imersní sondy umožňuje za pomocí čoček utvořit fokusovaný, úzký a koncentrovaný svazek. Ten se projevuje výrazně zvýšenou citlivost v oblasti ohniska. Toho se využívá především v případě zkoušení lepených a pájených spojů. Nevýhoda naopak spočívá v nízké hloubce prozvučení. [13]

3.5.5 Sonda Phased array

Sonda operující s velkým množstvím měničů, které umožňují načasování budících impulzů. Tyto elementy jsou složeny do mozaikového seskupení do tvaru přímky, kruhu případně dalších obrazců. Metodě Phased array se dále věnuje kapitola *2.7.1 Phased array*. [13]

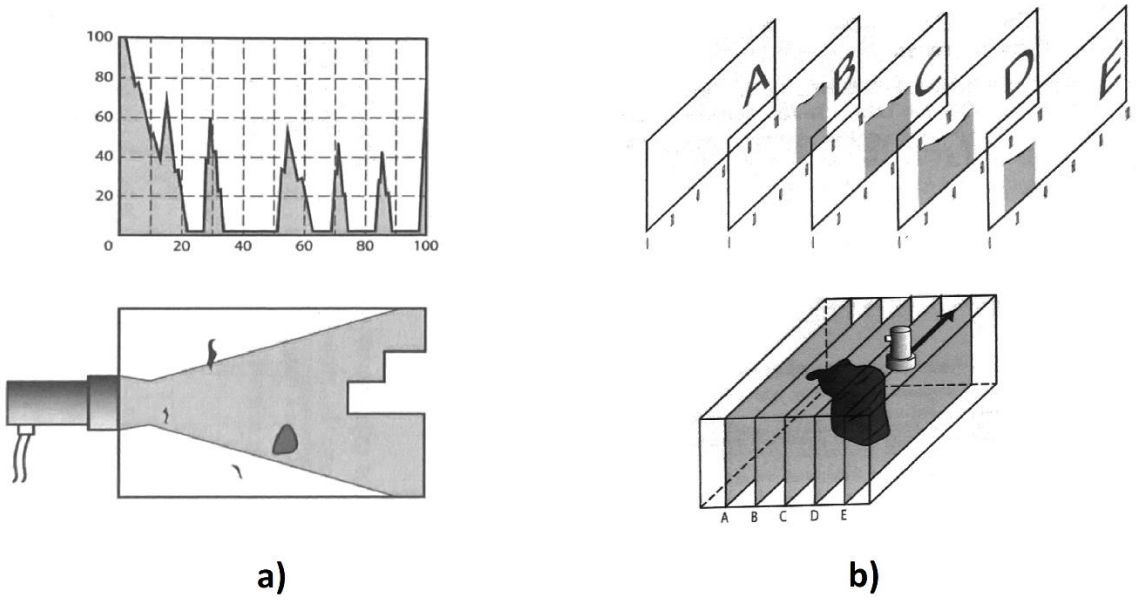
3.5.6 Odvalovací sonda pro suchou vazbu

Sonda využívající akustické vazby se zkoušeným materiálem umožňuje prozvučení. Sonda je uchycena v pryžovém prstenci, který je plněn vodou. Závěs sondy umožňuje buzení podélné nebo příčné vlny. [13]

3.6 Typy zobrazení

Digitální přístroj, který zobrazí výstup z ultrazvukové zkoušky umožňuje modifikovat původní typ zobrazení A na jiné typy, přičemž každý má svůj specifický účel. Používané typy zobrazení jsou:

- A – zobrazení
  - je základní typ zobrazení na horizontální ose uvádí dobu průchodu signálu, na ose vertikální výšku signálu, tedy amplitudu, ztráta přijatého signálu je zachycena poklesem amplitudy.
- B – zobrazení
  - ukazuje podobu řezu součástí na základě zobrazení jednotlivých sond v linii, jedna souřadnice uvádí dobu průchodu, druhá právě polohu již zmíněných sond.
- C – zobrazení
  - zachycuje barevné půdorysné rozmístění vad nebo jiných odlišností v součásti na základě intenzity odrazu vlny, osy definují polohu v rovině x a y, nikoliv však vzdálenost od čela sondy.
- D – zobrazení
  - řez oblasti kolmý k povrchu zkoušeného materiálu a zároveň kolmý k soustavě sond, nejčastěji využívané zobrazení pro metodu TOFD, které je věnována kapitola *2.7.3 TOFD*.
- L – zobrazení
  - skupina zobrazení typu A pod sondou převedena do barevné stupnice.
- P – zobrazení
  - neboli zobrazení projekční, výstupem je průmět několika obrazů zobrazení typu B nebo C.
- S – zobrazení
  - sekční zobrazení, typické zobrazení metody phased array, je skupina zobrazení typu A při proměnlivém úhlu do barevné stupnice, je obdobou L – zobrazení.
- T – zobrazení
  - mapuje tloušťku zkoušeného materiálu za pomocí půdorysného a bokorysného zobrazení, slouží k detekci koroze. [13, 16]



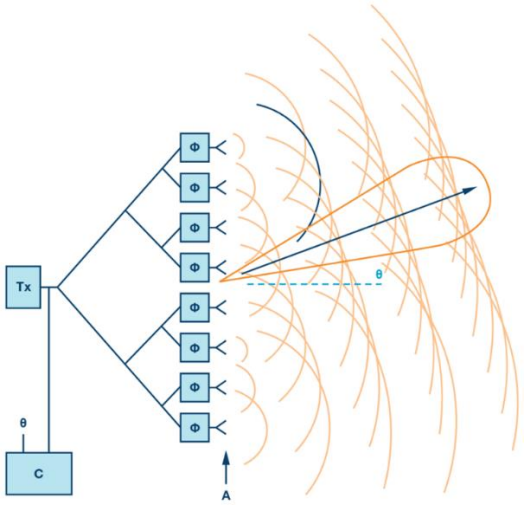
Obr. 13: Schéma zobrazovacích metod: a) A – zobrazení, b) B – zobrazení [13]

3.7 Využívané ultrazvukové metody

Kromě běžných metod ultrazvukové zkoušky rozdělených především na základě typu sondy se hojně využívá také celá řada speciálních technik.

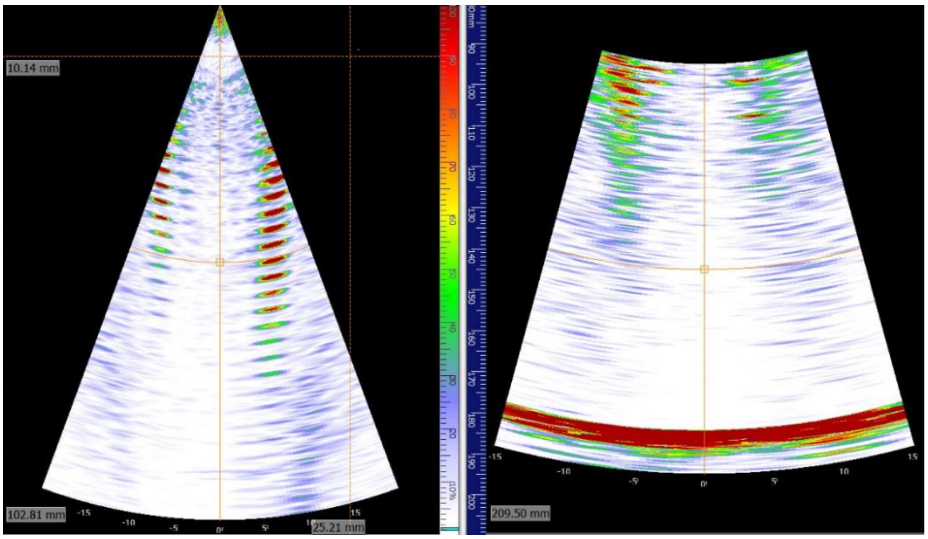
3.7.1 Metoda Phased array

Jedná se o metodu spočívající ve skupinovém uspořádání měničů. Na rozdíl od standartních metod využívajících jedné sondy ať už přímé nebo úhlové, v případě Phased array se používá sond s celou řadou na sobě nezávislých měničů. Každý měnič je zvlášť izolován a je každý z nich zvlášť propojen drátem s vysílačem. Na základě vzájemné naprosté nezávislosti jednotlivých měničů je možné jej umístit do různých vhodných tvarů zalitých skupinově do epoxidové pryskyřice na základě žádaného tvaru. Další využívanou vlastností phased array je možnost časového zpoždění jednotlivých měničů. Tím lze ovlivnit jak úhel prozvučení tak fokusaci do určité hloubky zkoušeného materiálu.



Obr. 14: Schéma teoretického základu metody Phased array zobrazující časové zpoždění jednotlivých měničů [17]

Výstupem zkoušky je S-sken na barevně odlišeném sekční zobrazení, které umožňuje dostatečné prozvučení i geometricky komplikovaných tvarů jako jsou například lopatky turbín. Zároveň je umožněno detekovat různé orientované trhliny v různých hloubkách z pouze jednoho místa, což také značně uspoří čas nutné zkoušce věnovat. Výsledky jsou také mnohem snazší následně interpretovat než u konvenčních metod. [2, 13, 14]



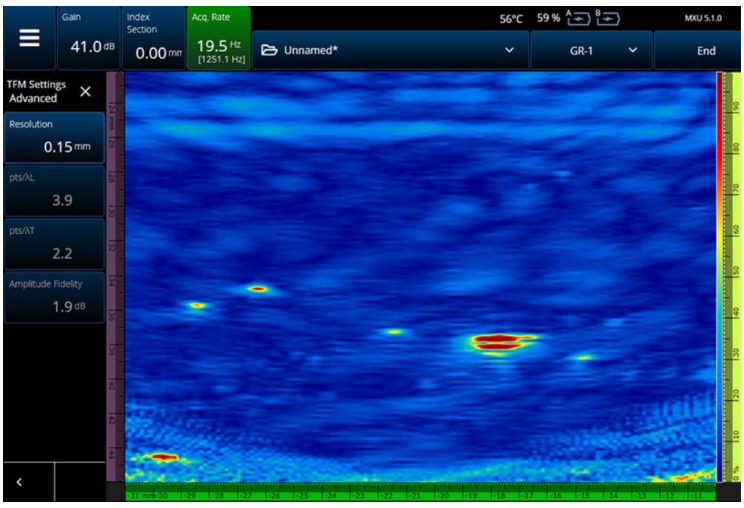
Obr. 15: Výstup z ultrazvukové zkoušky metodou Phased array, S-sken [18]

3.7.2 Total Focusing Method (TFM)/Full Matrix Capture (FMC)

Metoda TFM, neboli totální zaostřovací metoda spočívá v zaostřování fázového pole v kontrolované a žádané oblasti. Oblast zájmu je rozdělená do mřížek (pixelů), přičemž na každý jeden pixel je aplikováno tvarování paprsku s fázovým polem. Obrovskou výhodou metody je dostatečné zaostření v každé hloubce materiálu.

Metoda FMC vychází z možnosti úplného zachycení matrice. Což znamená zachycení všech jednotlivých A-skenů mezi všemi jednotlivými páry vysílače a přijímače. Jejich počet je přímo závislý na počtu jednotlivých měničů, které sonda obsahuje.

Důvodem využití těchto dvou speciálních metod je především velké usnadnění následné interpretace naměřených výsledků a také značná časová a ekonomická úspora. [19, 20]



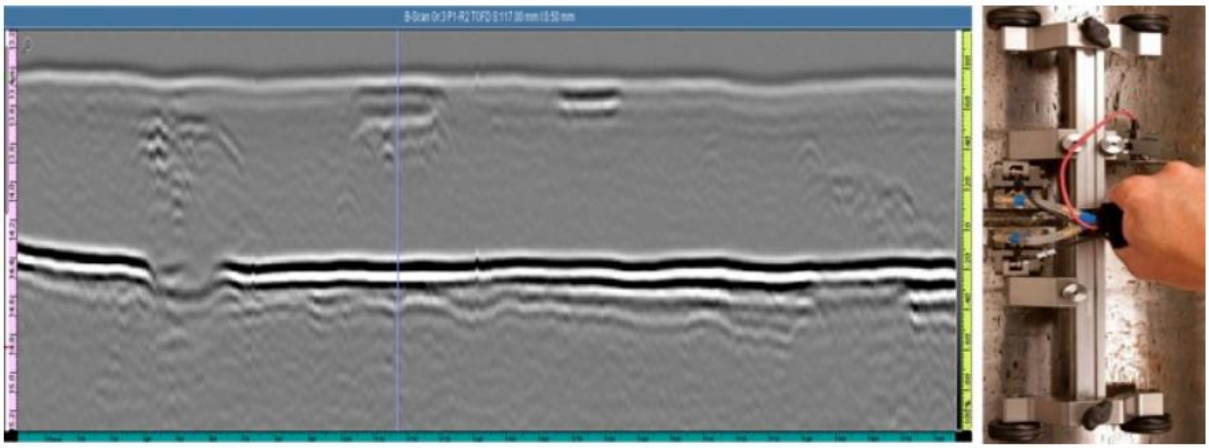
Obr. 16: Výstup z ultrazvukové zkoušky metodou TFM, S-sken [21]

3.7.3 Time-of-flight diffraction (TOFD)

Tato metoda využívá ohybu ultrazvuku na okrajích detekovaných vad, které jsou následně i změřitelné. Její využití spočívá především ve zkoušení svarů.

Klasické ultrazvuková zkouška vyhodnocuje amplitudu a odraz, často však selhává v určení skutečné velikosti defektu. Naopak metoda TOFD je metoda měřící rozdílnou dobu průchodu difrakční vlny mezi horním a spodním okrajem trhliny, rozměr trhliny je tedy výrazně snazší vyhodnotit.

Sestava TOFD se skládá z odděleného vysílače a přijímače. Signál prochází od vysílače k přijímači po povrchu materiálu, signál druhý vzniká následně odrazen od spodní části testovaného materiálu. Výstupem metody je D-sken. [2, 13]



Obr. 17: Výstup z ultrazvukové zkoušky metodou TOFD, D-sken [22]

4 Testované materiály

V experimentální části se NDT metoda Phased array praktikovala na testování materiálů užívaných společností Doosan Škoda Power s.r.o., proto zde bude uveden jejich stručný popis.

4.1 Odlitky

Odlévání je stále hojně využívanou technologií výroby v energetice. K tomu společnost využívá celou řadu materiálů:

- oceli na odlitky,
  - 1.7357, 1.7706, P91.

Litá ocel 1.7357

Další ekvivalentní značení: ČSN 42 2742, G17CrMo5-5.

Pevnost v tahu: R_m = 490–690 MPa (+QT – kalené a temperované).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 315 MPa (+QT – kalené a temperované). [23]

Tab. 2: Chemické složení lité oceli 1.7357 v hm. % [23]

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	Cu
min.	0,15	–	0,5	–	–	–	1,0	0,45	–	–
max.	0,20	0,6	1,0	0,4	0,02	0,02	1,5	0,65	0,05	0,3

Litá ocel 1.7706

Další ekvivalentní značení: ČSN 42 2747, G17CrMoV5-10.

Pevnost v tahu: R_m = 590–780 MPa (+QT – kalené a temperované).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 440 MPa (+QT – kalené a temperované). [24]

Tab. 3: Chemické složení lité oceli 1.7706 v hm. % [24]

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	Cu	Sn
min.	0,15	–	0,5	–	–	–	1,2	0,9	0,2	–	–
max.	0,20	0,6	0,9	0,4	0,02	0,015	1,5	1,1	0,3	0,3	0,025

Feritická ocel P91

Další ekvivalentní značení: ASTM A335.

Pevnost v tahu: R_m = min. 585 MPa (v závislosti na TZ).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = min. 415 MPa (v závislosti na TZ). [25]

Tab. 4: Chemické složení feritické oceli P91 v hm. % [25]

	C	P	Si	Cr	V	N	Ti	Mn	S	Ni	Mo
min.	0,08	–	0,20	8,00	0,18	0,03	–	0,30	–	–	0,85
max.	0,12	0,020	0,50	9,50	0,25	0,07	0,01	0,60	0,010	0,40	1,05

	Nb	Al	Zr
min.	0,06	–	–
max.	0,10	0,02	0,01

4.2 Plechy (trubky)

Potrubí v energetice je značně namáháno, stejně jako samotný materiál je důležitá jeho provozní kontrola. To je však často nutné provádět bez možnosti odstavení. K výrobě plechů na potrubí se používá celá řada materiálů:

- korozivzdorné oceli,
  - 1.4301, 1.4541, 1.4571,
- nízkolegované oceli,
  - 1.5415, 1.7335, 1.7380, 1.7715, P91,
- uhlíkové oceli,
  - 1.0045, 1.0345.

4.2.1 Korozivzdorné oceli

Austenitická korozivzdorná ocel 1.4301

Další ekvivalentní značení: X5CrNi18-10.

Pevnost v tahu: R_m = 500–750 MPa (+A – žíhané na měkko).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 190–235 MPa (+A – žíhané na měkko). [26]

Tab. 5: Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli 1.4301 v hm. % [26]

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	N
min.	–	–	–	8,0	–	–	17,5	–
max.	0,07	1,0	2,0	10,5	0,045	0,015	19,5	0,11

Austenitická korozivzdorná ocel 1.4541

Další ekvivalentní značení: X6CrNiTi18-10.

Pevnost v tahu: R_m = 500–720 MPa (+A – žíhané na měkko).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 190–225 MPa (+A – žíhané na měkko). [27]

Tab. 6: Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 v hm. % [27]

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Ti
min.	–	–	–	9,0	–	–	17,0	–
max.	0,08	1,0	2,0	12,0	0,045	0,015	19,0	0,7

Austenitická korozivzdorná ocel 1.4571

Další ekvivalentní značení: X6CrNiMoTi17-12-2.

Pevnost v tahu: R_m = 500–700 MPa (+A – žíhané na měkko).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 200–240 MPa (+A – žíhané na měkko). [28]

Tab. 7: Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli 1.4571 v hm. % [28]

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	Ti
min.	–	–	–	10,5	–	–	16,5	2,0	–
max.	0,08	1,0	2,0	13,5	0,045	0,015	18,5	2,5	0,7

4.2.2 Nízkolegované oceli

Nízkolegovaná ocel 1.5415

Další ekvivalentní značení: 16Mo3.

Pevnost v tahu: R_m = 410–590 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 210–275 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu). [29]

Tab. 8: Chemické složení nízkolegované oceli 1.5415 v hm. % [29]

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	N	Cu
min.	0,12	–	0,4	–	–	–	–	0,25	–	–
max.	0,20	0,35	0,9	0,3	0,025	0,01	0,3	0,35	0,012	0,3

Nízkolegovaná ocel 1.7335

Další ekvivalentní značení: 13CrMo4-5.

Pevnost v tahu: R_m = 420–600 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu).

Mez kluzu: R_{eH} = 245–300 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu). [30]

Tab. 9: Chemické složení nízkolegované oceli 1.7335 v hm. % [30]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	Cu
min.	0,08	–	0,4	–	–	0,70	0,4	–	–
max.	0,18	0,35	1,0	0,025	0,01	1,15	0,6	0,012	0,3

Nízkolegovaná ocel 1.7380

Další ekvivalentní značení: 10CrMo9-10.

Pevnost v tahu: R_m = 450–630 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu).

Mez kluzu: R_{eH} = 250–310 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu). [31]

Tab. 10: Chemické složení nízkolegované oceli 1.7380 v hm. % [31]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	Cu
min.	0,08	–	0,4	–	–	2,0	0,9	–	–
max.	0,14	0,5	0,8	0,02	0,01	2,5	1,1	0,012	0,3

Nízkolegovaná ocel 1.7715

Další ekvivalentní značení: 14MoV6-3.

Pevnost v tahu: R_m = 460–610 MPa (+QT/+NT – kaleno a temperováno, norm. žíháno).

Mez kluzu: R_{eH} = 300–320 MPa (+QT/+NT – kaleno a temperováno, norm. žíháno). [32]

Tab. 11: Chemické složení nízkolegované oceli 1.7715 v hm. % [32]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al	Sn
min.	0,10	–	0,4	–	–	0,3	0,5	0,22	–	–
max.	0,18	0,4	0,7	0,025	0,015	0,6	0,7	0,28	0,02	0,025

Feritická ocel P91 (viz kapitola *4.1 Odlitky*)

4.2.3 Uhlíkové oceli

Uhlíková ocel 1.0045

Další ekvivalentní značení: S355JR.

Pevnost v tahu: R_m = 450–680 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu).

Mez kluzu: R_{eH} = 275–355 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu). [33]

Tab. 12: Chemické složení uhlíkové oceli 1.0045 v hm. % [33]

	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	CEV
min.	–	–	–	–	–	–	–	–
max.	0,24	0,55	1,6	0,04	0,04	0,012	0,55	0,47

Uhlíková ocel 1.0345

Další ekvivalentní značení: P235GH.

Pevnost v tahu: R_m = 340–480 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu).

Mez kluzu: R_{eH} = 170–235 MPa (v závislosti na tloušťce materiálu). [34]

Tab. 13: Chemické složení uhlíkové oceli 1.0345 v hm. % [34]

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	N	Nb
min.	–	–	0,6	–	–	–	–	–	–	–	–
max.	0,16	0,35	1,2	0,3	0,025	0,015	0,3	0,08	0,02	0,012	0,02

	Ti	Al	Cu	Cr + Cu + Mo + Ni
min.	–	–	–	–
max.	0,03	0,02	0,3	0,7

4.3 Výkovky

Výkovky jsou dalším typem materiálů, které je žádoucí ultrazvukovou metodou testovat. Materiálů používaných kováním na výrobu lopatek a rotorů je opět více:

- materiály na výrobu lopatek,
  - 1.4000, 1.4923,
- materiály na výrobu rotorů,
  - 1.4902, 1.6957, 1.6985, 1.8070.

4.3.1 Materiály na výrobu lopatek

Feritická korozivzdorná ocel 1.4000

Další ekvivalentní značení: X6Cr13.

Pevnost v tahu: R_m = 400–600 MPa (+A – žíhané na měkko).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 220–240 MPa (+A – žíhané na měkko). [35]

Tab. 14: Chemické složení feritické oceli 1.4000 v hm. % [35]

	C	Si	Mn	P	S	Cr
min.	–	–	–	–	–	12,0
max.	0,08	1,0	1,0	0,04	0,015	14,0

Martenzitická ocel 1.4923

Další ekvivalentní značení: X22CrMoV12-1.

Pevnost v tahu: R_m = 800–950 MPa (+QT – kaleno a temperováno).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 600 MPa (+QT – kaleno a temperováno). [36]

Tab. 15: Chemické složení martenzitické oceli 1.4923 v hm. % [36]

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V
min.	0,18	–	0,4	0,3	–	–	11,0	0,8	0,25
max.	0,24	0,5	0,9	0,8	0,025	0,015	12,5	1,2	0,35

4.3.2 Materiály na výrobu rotorů

Ocel 1.4902

Další ekvivalentní značení: X14CrMoVNbN10-1.

Pevnost v tahu: R_m = 700–950 MPa (+QT – kaleno a temperováno).

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 555–625 MPa ((+QT – kaleno a temperováno). [37]

Tab. 16: Chemické složení oceli 1.4902 v hm. % [37]

	C	Si	Ni	Cr	V	N	Mn	S	P	Mo	Nb
min.	0,11	–	0,04	10,0	0,15	0,04	0,4	–	–	1,4	0,04
max.	0,16	0,1	0,06	11,0	0,25	0,06	0,6	0,007	0,02	1,6	0,06

Ocel 1.6957

Další ekvivalentní značení: 27NiCrMoV15-6.

Pevnost v tahu: R_m = min. 814 MPa.

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = min. 264 MPa. [38]

Tab. 17: Chemické složení oceli 1.6957 v hm. % [38]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
min.	0,22	–	0,15	–	–	1,20	0,25	3,4	0,05
max.	0,32	0,15	0,40	0,01	0,007	1,80	0,45	4,0	0,15

Ocel 1.6985

Další ekvivalentní značení: ČSN 16236, 28CrMoNiV4-9.

Pevnost v tahu: R_m = min. 576 MPa.

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = min. 353. [39]

Tab. 18: Chemické složení oceli 1.6985 v hm. % [39]

	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	V
min.	0,25	1,1	0,3	0,8	0,50	–	–	–	0,25
max.	0,30	1,4	0,8	1,0	0,75	0,015	0,018	0,30	0,35

Jako náhrada bývá použita ocel 1.6946 (30CrMoNiV5-11), s podobným složením.

Ocel 1.8070

Další ekvivalentní značení: 21CrMoV5-11.

Pevnost v tahu: R_m = 690–830 MPa.

Mez kluzu: $R_{p0,2}$ = 540 MPa. [40]

Tab. 19: Chemické složení oceli 1.8070 v hm. % [40]

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
min.	0,21	0,45	0,45	1,35	1,10	–	0,30
max.						0,30	

5 Svarové vady

Jelikož je tato diplomová práce zaměřená na detekci vad ultrazvukovou metodou, je vhodné upřesnit, jaké vady lze předpokládat. V následující části budou charakterizovány vady, které se vyskytují zdaleka nejčastěji.

Vyhodnocení detekovaných vad nedestruktivní metodu se blíže věnuje norma ČSN EN 11666 (Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Stupně přípustnosti). [41]

Obecným vadám ve svarech se věnuje norma ČSN EN 5817 (Svařování – Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (mimo elektronového a laserového svařování) – Určování stupňů jakosti). Právě na základě této normy jsou jednotlivé vady blíže specifikovány a je přiblížen důvod jejich vzniku. Mezi nejčastější vady svarů detekovaných ultrazvukovou metodou patří objemové vady:

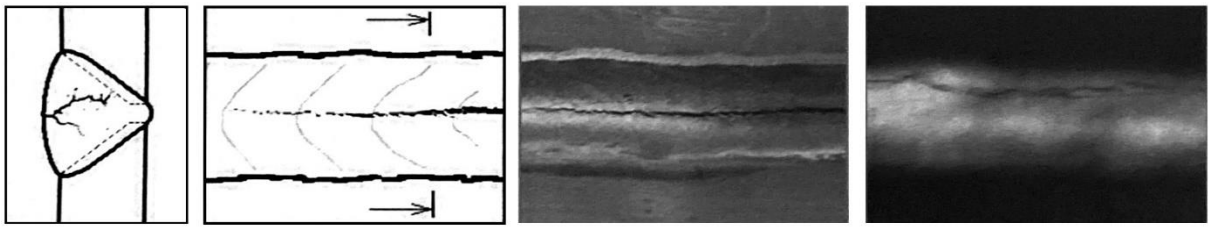
- trhliny (100),
- dutiny (200) (častý výskyt),
- studené spoje a neprůvary (400) (častý výskyt),
- vady tvaru (500). [13, 42]

5.1 Trhliny (100)

Tvar trhlin je ovlivněn metodou a způsobem svařování. Stejně tak je velmi ovlivněn daným chemickým složením svařovaného materiálu.

101 – Podélná trhlina

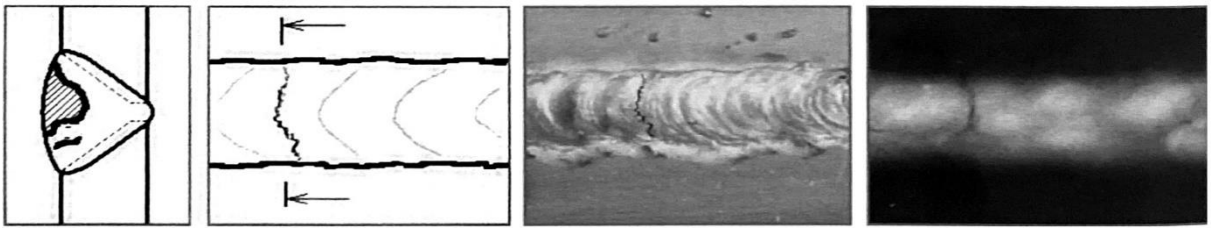
Jedná se o typ povrchové i podpovrchové vady. Vyskytuje se ve svarovém kovu, na hranici natavení v tepelně ovlivněné zóny (TOZ) a v oblasti již základního materiálu. [13]



Obr. 18: Schéma, skutečný obraz a rentgenogram podélné trhliny [13]

102 – Příčná trhlina

Obdoba podélné trhliny, která se může vyskytovat v podobě povrchové i podpovrchové. Rozdíl spočívá v orientaci kolmé na osu svaru. Na rozdíl od podélné se nevyskytuje na hranici natavení. [13]



Obr. 19: Schéma, skutečný obraz a rentgenogram příčné trhliny [13]

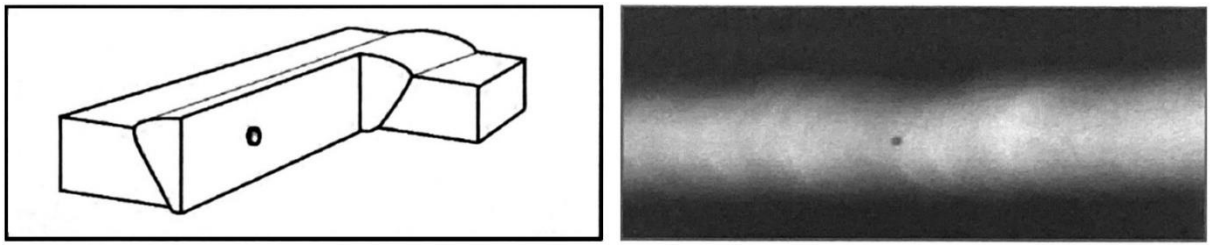
5.2 Dutiny (200)

Základní rozdělení dutin je dle normy na plynové dutiny (201), staženiny (202) a mikrostaženiny (203). Výskyt dutin je velmi častý. [13]

5.2.1 Plynové dutiny (póry) (201)

2011 – Pór

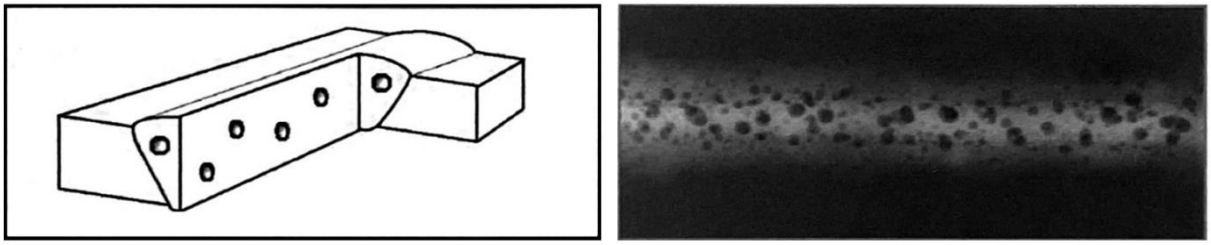
Typickým zástupcem podpovrchové vady svaru je póru. Jde o plynovou dutinu převážně kulovitého tvaru (vnitřní vada). [13]



Obr. 20: Schéma a rentgenogram póru [13]

2012 – Rovnoměrná pórovitost

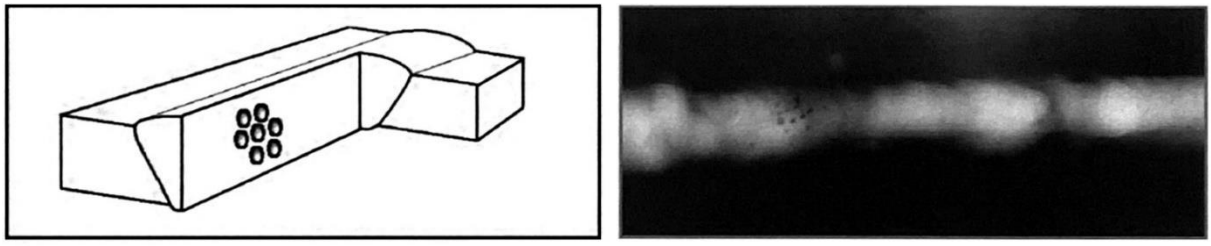
Vada spočívající ve větším počtu pórů, které jsou v rámci materiálu rovnoměrně nebo nahodile rozmístěné (vnitřní vada). [13]



Obr. 21: Schéma a rentgenogram rovnoměrné pórovitosti [13]

2013 – Shluk pórů

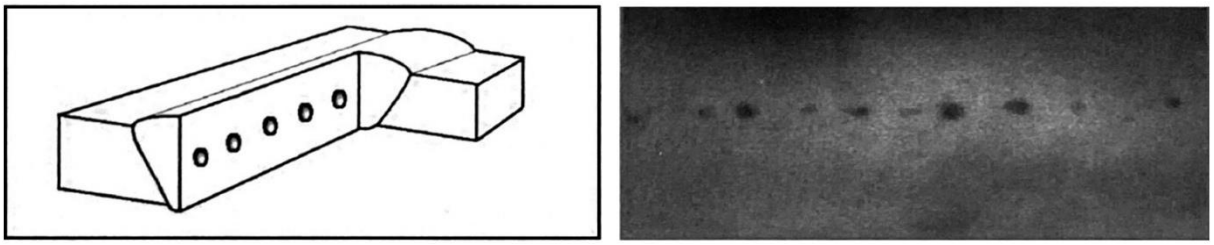
V tomto případě se jedná o vadu ohraničeného shluku pórů. Při detekci ultrazvukovou nedestruktivní metodou hrozí, že vada bude viditelná pouze jako jeden rozměrný pór. Proto je lepší vadu zkoumat vícero způsoby (změna polohy, úhlu) (vnitřní vada). [13]



Obr. 22: Schéma a rentgenogram shluku pórů [13]

2014 – Řádek pórů

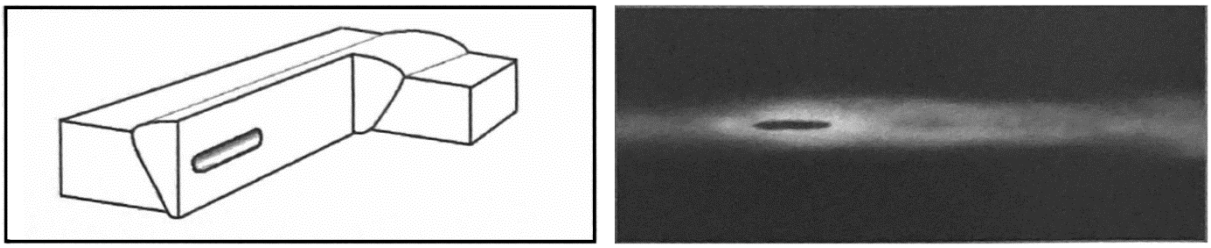
V případě řádku pórů je charakteristické jejich rozmístění podél osy. Opět je zde určité riziko detekce několika pólů, která se jeví jako pouhá jedna vada (vnitřní vada). [13]



Obr. 23: Schéma a rentgenogram řádku pórů [13]

2015 – Protáhlý pór

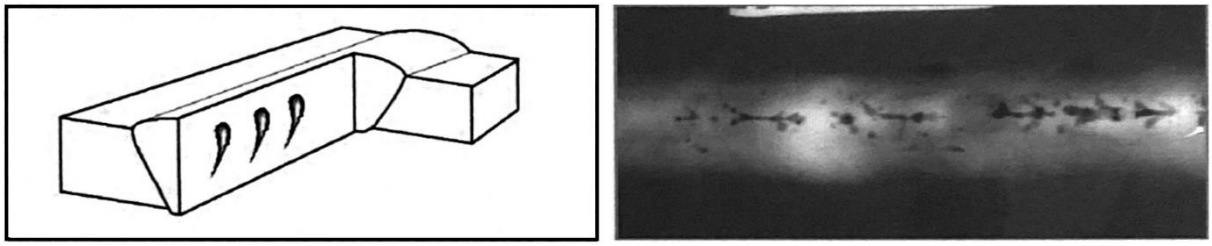
Obdoba póru, která se vyskytuje v protáhlém tvaru, nikoliv kulovém. Protažení je přibližně rovnoběžné s osou svaru. Vada může být často zaměněna s rovnoměrnou pórovitostí, případně shlukem pórů. (vnitřní vada) [13]



Obr. 24: Schéma a rentgenogram protáhlého póru [13]

2016 – Červovitý pór

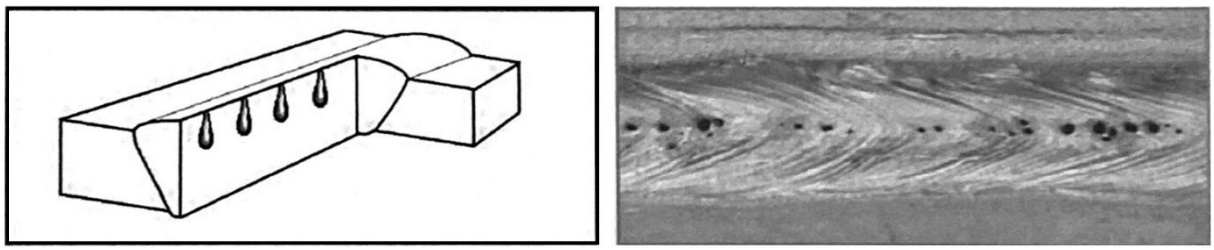
Vada, která se jeví jako trubičková dutina, je přímo způsobena uvolňováním plynu. Pór postupně prostupuje na povrch materiálu. (vnitřní nebo povrchová vada). [13]



Obr. 25: Schéma a rentgenogram červovitého póru [13]

2017 – Povrchový pór

Vada, která se opět jeví jako trubičková dutina, je přímo způsobena uvolňováním plynu. Pór postupně prostupuje na povrch. Na rozdíl od červovitého póru pór vystoupí skutečně až na daný povrch materiálu. (povrchová vada) [13]

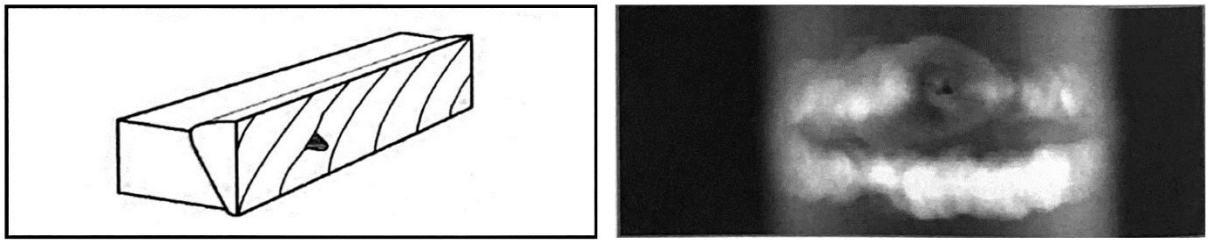


Obr. 26: Schéma a rentgenogram povrchového póru [13]

5.2.2 Staženiny (202)

2024 – Kráterová staženina

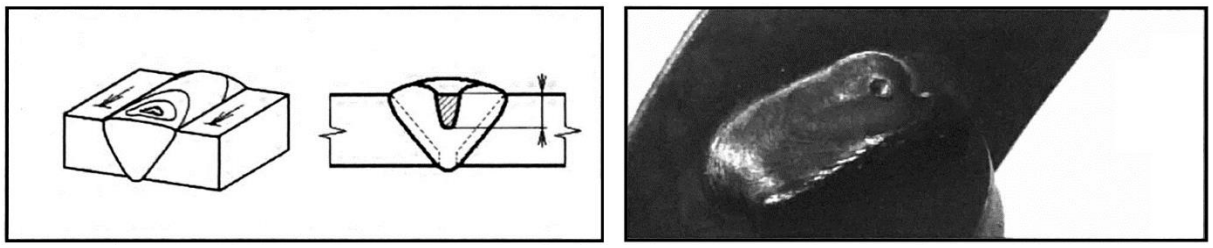
Tento typ staženiny vzniká při překrytí housenky původní další housenkou. Vada vzniká mezi původní a novou svarovou housenkou. [13]



Obr. 27: Schéma a rentgenogram kráterové staženiny [13]

2025 – Koncová kráterová staženina

Charakteristický pro tento typ staženiny je jeho viditelnost na povrchu materiálu. Jeho obvyklým místem výskytu je konec svarové housenky. Častý je také její výskyt v kombinaci s kráterovou staženinou (povrchová vada). [13]



Obr. 28: Schéma a rentgenogram koncové kráterové staženiny [13]

5.2.3 Mikrostaženiny (203)

2031 – Mezidendritická mikrostaženina

Jedná se o defekty převážně v odlitcích, jejich detekce NDT metodami je velmi obtížná, ne-li často dokonce nereálná. [13]

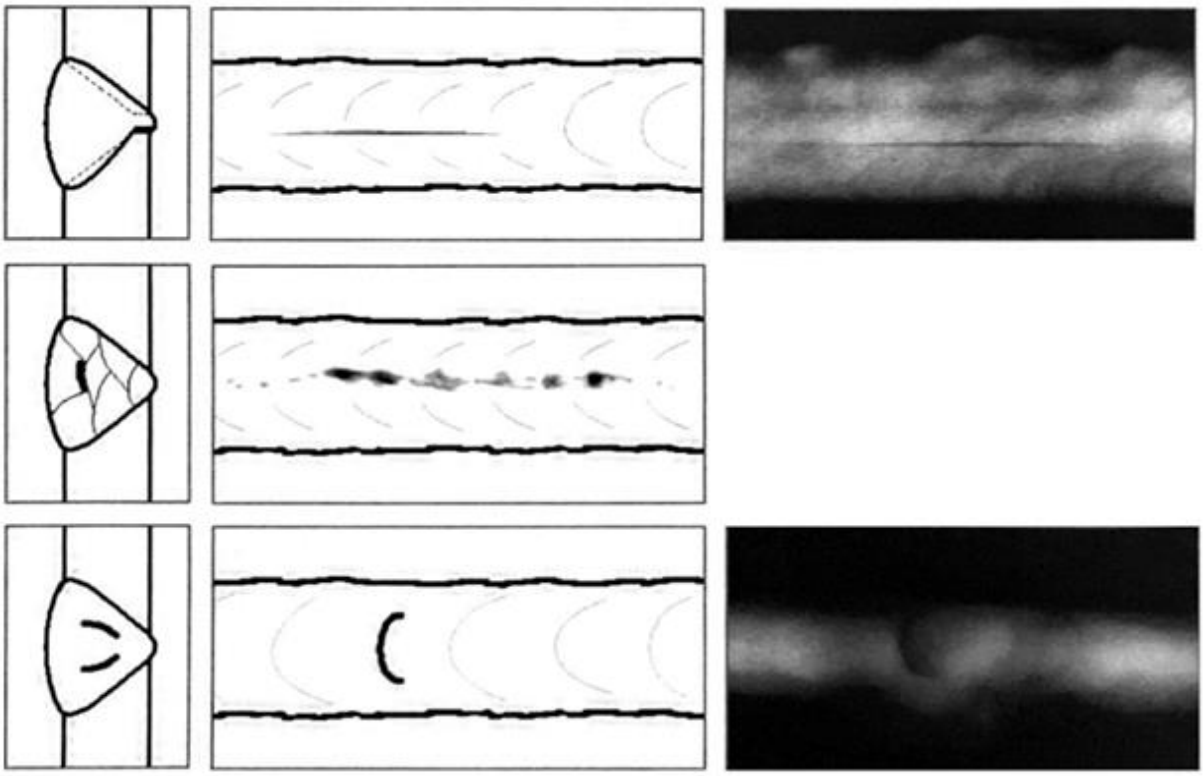
5.3 Studené spoje a neprůvary (400)

Patří mezi nebezpečné vady, které představují značné provozní riziko. Tyto vady je nutné detekovat co nejpřesněji. Ačkoliv je každá vada značně nebezpečná, v tomto případě hrozí selhání celého svarového spoje. [13]

401 – Studené spoje

Jedná se o nedostatečné spojení/netavení mezi svarovým kovem a okolním materiálem nebo nedostatečné spojení jednotlivých vrstev svarového kovu. Vada není viditelná z povrchu materiálu. Na základě polohy lze rozlišit další typy:

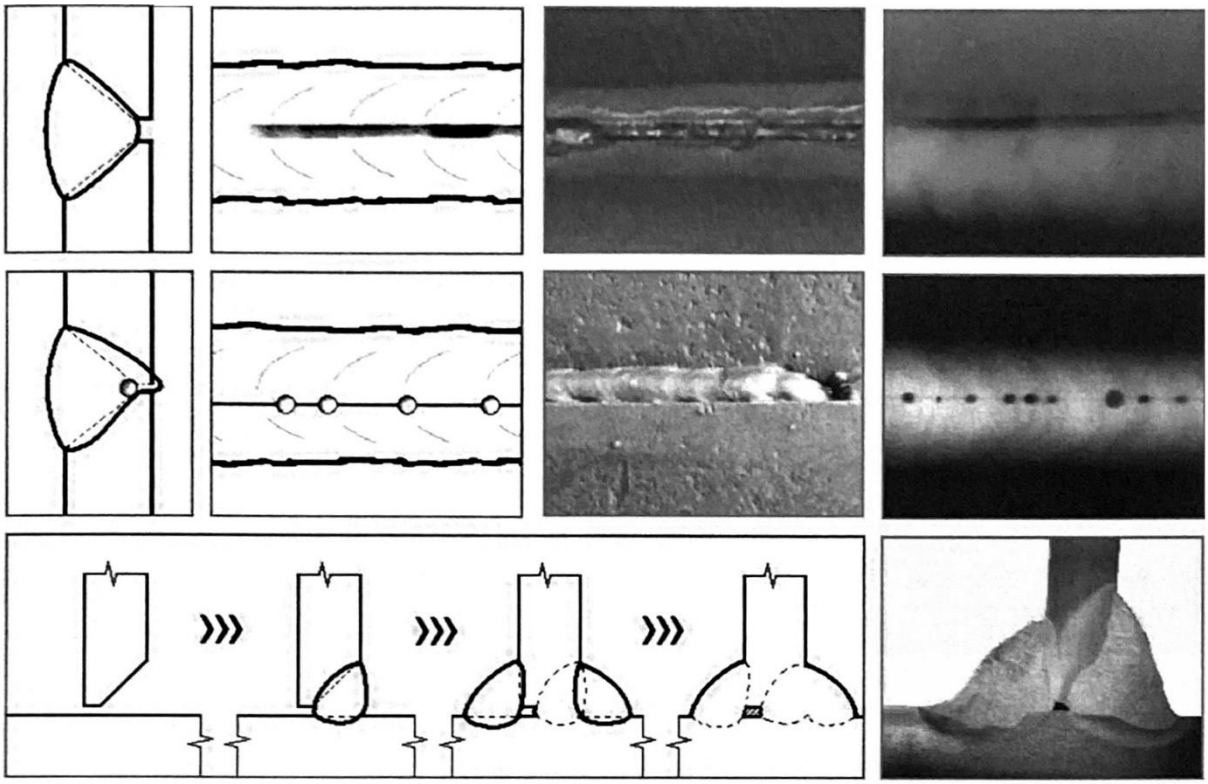
- **4011 – studený spoj na svarové ploše,**
- **4012 – studený spoj mezi housenkami,**
- **4013 – studený spoj v kořeni.**



Obr. 29: Schémata a rentgenogramy typů studeného spoje [13]

4021 – Neprovařený kořen

K této vadě dochází z důvodu nedostatečného natavení svarových ploch v místě otupení kořene. V případě oboustranných svarů se jedná o varu vnitřní (povrchová, vnitřní) [13]

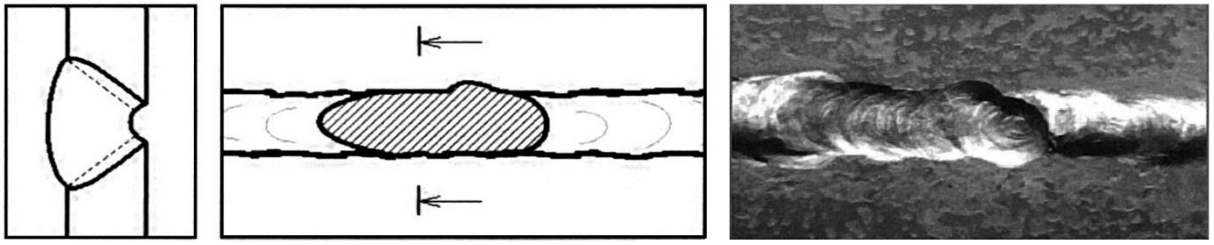


Obr. 30: Schémata, skutečné obrazy a rentgenogramy typů neprovařeného kořene [13]

5.4 Vady tvaru (500)

515 – Hubený kořen

Při chladnutí svaru může nastat vada typu hubený svar. Ten vzniká při smršťování kovu. Charakteristické je natavení svarových úkosů. [13]



Obr. 31: Schéma a rentgenogram hubeného kořene [13]

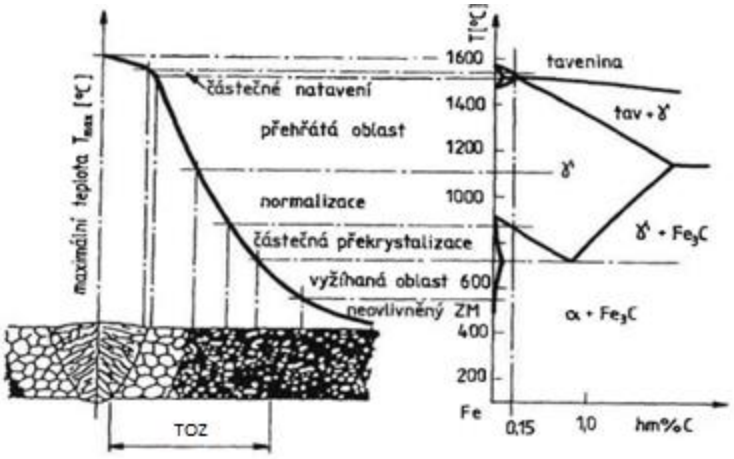
6 Svařovací metoda TIG a tepelně ovlivněná zóna (TOZ)

6.1 Svařovací metoda TIG

Jedná se o hojně využívanou metodu svařování. Pod zkratkou TIG (případně WIG, 141) se skrývá svařování plynovým wolframovým obloukem. Základem této metody je využití netavící se wolframové elektrody dodávající do svařovacího oblouku proud. Inertní plyn, povětšinou argon, slouží jako ochrana wolframu a svarové lázně. Využívá se velmi často pro svařování trubek a materiálů o malých tloušťkách z důvodu nízkého přívodu tepla a malého vlivu na mikrostrukturu materiálu. Právě tyto výhody jsou při svařování tenkých profilů velmi důležité pro zachování materiálových vlastností. [43]

6.2 Tepelně ovlivněná zóna (TOZ)

Svařovací proces má stejně jako proces řezání přes svou spoustu výhod také řadu úskalí. Jedním z nich je tepelně ovlivněná zóna (TOZ). Jedná se o neroztavenou oblast materiálu, která ale z důvodu působení tepla prošla mechanickými a také mikrostrukturálními změnami. Její celková velikost a velikost jednotlivých oblastí je ovlivněna typem použitých materiálů a množstvím tepelného příkonu. Jelikož v rámci diplomové práce bude zkoušena oblast svarového spoje, jedná se v případě TOZ o poměrně důležitý faktor. [44]



Obr. 32: Schéma tepelně ovlivněné zóny (TOZ) [44]

Oblast částečného natavení

Oblast v těsné blízkosti svarového spoje. Je velmi silně zasažena tepelným tokem, z toho důvodu dojde k prudkému nárůstu a následně prudkému snížení teploty. [46]

Oblast přehřátá

Vysoká teplota podporuje růst zrn, proto je oblast poměrně hrubozrnného charakteru, který nevhodně ovlivňuje křehkost svaru. [46]

Oblast normalizace

V případě diagramu Fe-Fe_3C se jedná o oblast nad teplotou A_3. Zde dochází z důvodu překrystalizace ke vzniku struktury jemnozrnné. Čím je teplota nižší, tím je zrno menšího charakteru. [45, 46]

Oblast částečné překrystalizace

Jak již název oblasti napovídá, dochází zde pouze k překrystalizaci částečné. Teplota oblasti se nachází mezi A_1 a A_3. [45, 46]

Oblast vyžíhaná

V oblasti pod teplotou A_1. Dochází ke změnám v rámci tuhého roztoku F, často však také ke změnám, substrukturním. [45, 46]

Oblast základního materiálu

Tato oblast již není ovlivněna tepelným působením. Stav mikrostruktury a velikost zrna je původního charakteru. Může docházet ke stárnutí oceli při teplotě cca 250 °C. [45, 46]

6.3 Vliv tepelně ovlivněné zóny (TOZ)

Tyto oblasti mohou každá nedestruktivní testování velmi výrazně ovlivnit právě svými specifiky, jako je velikost zrna nebo struktura. Tyto parametry mají celou řadu dalších účinků, které jsou povětšinou negativem. Proto je snaha o to, co nejmenší TOZ. [44, 48]

Metalurgické a chemické změny

Velmi vysoký nárůst teploty a následné rychlé ochlazení může velmi výrazně ovlivnit mikrostrukturu oblasti. K tomu dochází především při řezání, kdy je navíc využívána chladící kapalina. Kromě mikrostruktury může docházet také velmi často ke vzniku deformací vlivem nerovnoměrného roztahování a smršťování tělesa. Chemické změny jsou charakterizovány vytvářenými fázemi, kde z důvodu tepelného působení dochází k nerovnoměrné difuzi. [48]

Oxidace

Když dochází k ohřevu materiálu během svařovacího procesu na vyšší teploty, může docházet k oxidaci povrchu. Což je pozorovatelné charakteristickými zbarvenými pruhy v TOZ. [48]

Koroze korozivzdorných ocelí

Vysoká teplota může způsobit segregaci karbidů chromu na hranicích zrn. To způsobí pokles jeho obsahu pod 10,5 % a tím může korodovat i korozivzdorná ocel. [48]

Povrchová nitridace

Během svařování nebo řezání může docházet k povrchové nitridaci, což zvyšuje tvrdost, ale naopak nepříznivě ovlivňuje svařitelnost v oblasti svařování. [48]

Vodíková koroze

Vysoké teploty mohou vést k možnému vodíkovém zkřehnutí materiálu. Jde o difúzi vodíku do kovové mřížky a následnému snížení tažnosti a houževnatosti kovu. [48, 49]

Změna fáze

Velký pozor je třeba dát na možnou změnu fáze. Z důvodu vystavení materiálu vysokým teplotám s následným rychlým ochlazením, může dojít k fázově změně. Jako příklad lze uvést změnu austenitické korozivzdorné oceli na tvrdou, ale křehkou ocel martenzitickou. [48]

7 Ekonomický a časový pohled

Experimentální část diplomové práce spočívá v možnosti použít NDT ultrazvukovou zkoušku, přesněji metodu Phased array, jako náhradu zkoušky radiografické. Ačkoliv norma přímo zkoušení svarů potrubí a dalších svařovaných výrobků základními NDT ultrazvukovými zkouškami pod určité rozměry úplně nedovoluje, metoda Phased array by toho měla být přesto schopná.

Pokud by se na vzorcích s uměle vytvořenými vadami zjistilo, že veškeré důležité vady jsou detekovatelné, značně by to usnadnilo celý proces testování. Mezi největší výhody náhrady prozařovací zkoušky ultrazvukovou lze považovat:

- výrazné časové úspory spojené s vyhodnocováním vad,
- mobilitu zařízení umožňujícího provozovat metodu Phased array,
- Phased array umožňuje vyhodnocování výsledků v reálném čase, zatímco v případě radiografické zkoušky je často nutné na vyhodnocení čekat i déle než 24 hodin,
- je možné snímat celý materiál postupně takřka bez přerušení,
- na rozdíl od radiografické zkoušky nemusí být strojovna v okruhu 30 m z důvodu bezpečnosti bez přítomnosti osob,
- s tím souvisí, že metodu lze provozovat za běžného provozu během směny,
- testování lze provozovat dokonce současně s dokončováním montáže.

Jak předchozí body napovídají, náhrada metodou Phased array by značně ulehčila proces jak z pohledu časového, tak samozřejmě z důvodu ekonomického. Ekonomický pohled lze postavit především na úsporách času, jelikož by doba testování mohla částečně kooperovat s dobou montáže. Zároveň tedy čas věnovaný jednomu výrobku by bylo možné rázem výrazně zkrátit.

Norma ČSN EN ISO 17635 udává v případě provádění nedestruktivních zkoušek požadované procento provedených zkoušek všech svarových spojů. S těmito hodnotami je počítáno v experimentální části v kapitole *8.5 Ekonomický pohled*.

8 Experimentální část

Experimentální část této diplomové práce spočívá v ověření použitelnosti ultrazvukové metody namísto zkoušky radiografické, která je doposud na zkoušení tenkostěnných svařovaných materiálů ve společnost Doosan Škoda Power s.r.o. využívána. Aby byla tato náhrada možná, je třeba ji řádně ověřit na používaných materiálech a vyzkoušet její skutečnou detekovatelnost. Použití ve skutečném provozu má řadu úskalí:

- různorodé materiály (korozivzdorné, uhlíkové a další typy ocelí),
- tenkostěnné profily (v rozmezí 2 až 8 mm tloušťky),
- podmínka jednostranné detekce (svar často přístupný pouze jednostranně).

Jelikož konstrukce, pro které je experimentální část řešena je tenkostěnné potrubí, které je často zakončeno kolenem, T profilem atp., je jednostranná detekce podmínkou.

Norma ISO 4761:2022 uvádí využití metody Phased array v praxi právě na kontrolu svarů tenkostěnných materiálů. Norma přesně stanovuje přípustné vady dle jednotlivých úrovní hodnocení 1–3. Pro zkoušení jednostranné jsou v normě uvedeny pouze úrovně 2 a 3. Přestože je v kapitole *4. Testované materiály* uvedena materiálů celá řada, byly vybrány dva referenční materiály zastupující celou skupinu podobných materiálů, ze kterých byly vzorky vyrobeny a později zkoušeny. Bylo k tomu tak přistoupeno z časových, a především finančních důvodů na výrobu přesných a vhodných vzorků. [51]

Součástí experimentální části je také ekonomický pohled skutečné zakázky v rámci projektu elektrárny s přibližným objemem 30 t tohoto typu potrubí. Výpočet bude vztažen na dostupná data skutečně provedených svarů na stavbě, které podléhají nutnosti nedestruktivního zkoušení dle normy ČSN EN ISO 17635. Z těchto dat bude vypočten finanční a časový rozdíl, tedy úspora, které lze záměnou zkušebních metod docílit. [52]

8.1 Postup měření

Postup měření zde uvedený plně vychází ze znění prováděcího předpisu, který byl vytvořen v rámci experimentální části této diplomové práce a který byl během celé fáze zkoušení striktně dodržován.

8.1.1 Úvod

Tento zkušební postup specifikuje techniky a hodnocení pro ruční kontaktní poloautomatické ultrazvukové zkoušení plně provařených homogenních feritických svarů metodou Phased array s tloušťkou pro kategorie 0 od 2 do 8 mm, pro kategorie I–III od 2,9 mm do 8 mm a průměrech od 20 mm. Tento zkušební postup je vytvořen na základě EN ISO 4761 a ČSN EN ISO 20601. [51, 53]

Hlavním účelem ultrazvukového zkoušeni technikou Phased array je detekce předpokládaných necelistvostí, ve svaru a TOZ popsaných v kapitole *8.1.4 Zkušební podmínky*. které by mohli mít negativní dopad na provoz zařízení. Pokud to provozní, konstrukční a stavební podmínky dovolují, provádí se zkoušeni z obou stran svarového spoje. V případech, kdy nebude umožněn přístup ke svaru z obou stran, je možné použít jednostranné zkoušení dle tohoto postupu. Ve zvláštních případech a při neprůkazných výsledcích se doporučuje provést inspekci prozářením.

8.1.2 Kvalifikace pracovníků

Pracovníci NDT musí být pro zkoušení v UT metodě kvalifikováni podle EN ISO 9712 nebo rovnocenné normy. Ultrazvukové zkoušení a interpretaci výsledků mohou provádět pouze pracovníci Level II nebo Level III. Doporučuje se certifikace pro metodu Phased array, nebo zaškolení na metodu a zařízení.

8.1.3 Zkušební zařízení

Přístroje

Zkoušení musí být provedeno ultrazvukovým přístrojem, který pracuje impulzní odrazovou metodou. Přístroj musí být digitální, stejně tak musí být schopen pracovat s alespoň 16 kanály v rozsahu frekvencí nejméně od 5 do 15 MHz. Přístroj musí mít platnou kalibraci.

Sondy

Ultrazvukové sondy musí mít frekvence od 5 MHz do 15 MHz. Doporučuje se použít ultrazvukovou sondu 7,5CCEV35-16 od společnosti Olympus se 16 elementy. Kabel je v tomto případě součástí sondy. Při oboustranné inspekci, lze použít splitter.

Mezera g mezi zkoušenou plochou a kontaktní plochou sondy nesmí být v žádném případě větší než 0,5 mm. U válcových nebo kulových ploch, kdy je nutné použít vhodnou předsádku, je tento požadavek splněn, pokud je:

$$g = \frac{a^2}{4D} \tag{8}$$

kde:

g – mezera mezi zkoušenou a kontaktní plochou sondy [mm],

a – rozměr kontaktní plochy sondy ve směru zkoušení [mm],

D – průměr zkoušeného objektu [mm]. [53]

Manipulátor

Pro skenování svaru se používá manipulátor, do kterého jsou uchyceny sondy a snímač polohy (encoder), který po obvodu zaznamenává aktuální polohu. Doporučuje se použít manipulátor s encoderem (převodníkem) CIRC-IT – Dual Probe Weld Scanner. [54]

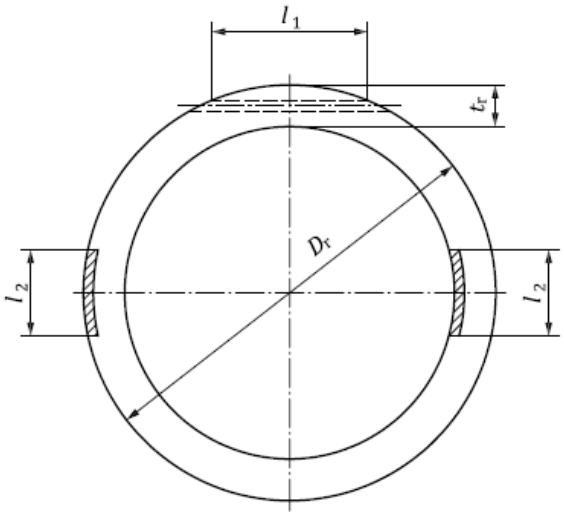
Měrky

Pro kalibraci zařízení (časové základny, rychlosti a zpoždění v klínu) je možné použít jakoukoliv certifikovanou měrku pro UT, pro nastavení základního zesílení se použije měrka s umělými vadami (referenční měrka) dle náčrtku a specifikace:

Rozměry referenční měrky ve vztahu ke zkoušenému objektu:

- délka zkoušeného objektu: ≥ 150 mm,
- tloušťka stěny zkoušeného objektu v rozmezí 0,8 t_r až 1,2 t_r,
- průměr zkoušeného objektu od 0,8 D_r do 1,2 D_r.

U svarů o průměru větší nebo rovné 300 mm, lze použít plochý referenční blok.



Obr. 33: Náčrt referenční měrky včetně charakteristických rozměrů [53]

Referenční měrky musí být vyrobeny ze stejné skupiny materiálů, hlavně s ohledem na rychlost zvuku, strukturu zrn a stav povrchu. Zkušební blok musí obsahovat svar podle stejného postupu svařování, vyrobený ze stejného materiálu a s podobnou geometrií (svaru) jako zkušební objekt. [53]

Rozměry a charakteristika umělých vad pro tloušťky 2,9–8 mm, tolerance ±10 %:

- musí být použity alespoň 3 reflektory: 2 drážky a boční vývrt uprostřed tloušťky:
  - vnější drážka o výšce 0,75 mm a délce 10 mm,
  - vnitřní drážka o výšce 0,75 mm a délce 10 mm,
  - boční vývrt o průměru 1 mm v polovině tloušťky a délce ≥ 15mm. [53]

Vazební prostředek

Jako vazební prostředek se preferuje voda, kterou lze pomocí tlakové nádoby aplikovat přímo pod předsádky. Je možné použít i jiný vhodný prostředek (např. gel, olej, vazelína apod.). Pro zkoušení i kalibraci musí být použit stejný vazební prostředek.

8.1.4 Zkušební podmínky

Stav povrchu

Zkušební povrch musí být po celé své délce rovný, do vzdálenosti nejméně zkušebního kroku (resp. šířky zóny pro zkoušení) bez rozstřiku svarového kovu, špíny, rzi, volných okují, zbytků barvy a jiných nepravidelností, které by průběh ultrazvukového zkoušení nějak omezovaly.

V případech, kdy bude svarový spoj přesazený, budou rozdílné tloušťky stěn či velká úhlová deformace, může dojít k situaci, kdy nebude možné provést kontrolu touto metodou. [51, 53]

Teplota

Teplota povrchu zkoušeného objektu musí být v rozmezí 10–40 °C. Ve zvláštních případech je možné pracovat mimo tento teplotní rozsah se schválením operátora UT Level III. Teplotní rozdíl při nastavování rozsahu a citlivosti a při zkoušení musí být v rozsahu ±15 °C.

Rušivé vlivy

Při zkoušení může docházet k rušivým vlivům, například od svařování, indukčního žíhání, broušení a podobně. Pokud nelze těmto vlivům zamezit, je nutné přerušit zkoušení.

Po ukončení ultrazvukového zkoušení se do protokolu zaznamenají oblasti, kde nebylo z různých příčin možné toto zkoušení provést, a uvedou se jejich omezující důvody. (podpěry, štítky apod.)

Rozsah a předpokládané vady

Vzhledem k tomu, že zkoušení je zaměřeno na svarové spoje ve výrobě a na stavbě, očekává se přítomnost vad vznikajících především během svařování, jako jsou např. studené spoje, póry, vměstky, neprovařeny kořen atd. ve svaru a TOZ

Dokumentace

Před každým PA zkoušením je nutné, aby provozovatel zařízení poskytl všechny dostupné dokumenty týkající se daného svarového spoje (výrobní výkresy a dokumentace, výsledky předchozích kontrol apod.).

8.1.5 Kalibrace

Úvod

Rozsah úhlů ultrazvukového svazku se nastaví na 40° a 80°, možno použít i jiný rozsah, aby došlo k plnému pokrytí oblasti zájmu. Nastavení elementů sondy dle geometrických podmínek.

Rozsah a pokrytí zkoušeného objemu kontrolujeme modelací pomocí k tomuto účelu určeného softwaru, například v PC nebo samotném přístroji, kde lze načrtnout i reálný tvar svaru, který nám určí i fixní vzdálenost sondy od osy svaru.

Pro kalibraci, nastavování parametrů, ověřování a snímání dat se vhodně využije zobrazení S-skenu.

Kalibrace časové základny

Na certifikované měrce provedeme kalibraci rychlosti a zpoždění v předsádce. Následně nastavení časové základny, tak aby s mírnou rezervou pokryla celou oblast zájmu.

Obr. 34: Kalibrace – vlevo: modelace reálného tvaru svaru; vpravo: certifikovaná měrka (vlastní zdroje)

Základní zesílení

Nastavení zesílení se provede tak, že se sonda položí na zkušební povrch tak, aby UZ svazek směřoval do základního materiálu na straně, ze které se provádí zkoušení. Na přístroji se nastaví A-sken na nominální úhel předsádky.

Pomocí zesílení se nastaví amplituda průměrné hladiny šumu na 8–12 % výšky obrazovky. Ověření nastavení citlivosti se provede na referenčních měrkách dle kapitoly *8.1.3 Zkušební zařízení*.

Amplituda v případě umělých vad certifikované měrky by měla dosahovat hodnoty alespoň 10 dB odstupu signál/šum. V průběhu měření by měl operátor provádějící zkoušku kontrolovat sběr dat v A a C zobrazení. Pokud zaznamená, že citlivost skenování není vhodně nastavená (příliš vysoká nebo nízká), skenování by mělo být zastaveno a zesílení vhodně přenastaveno. Poté se provede nové skenování. [51, 53]

Referenční zesílení

Pro zpracování dat a vyhodnocení výsledků zkoušky ultrazvukem se určuje registrační úroveň, tj. práh detekce indikací necelistvostí.

Tato registrační úroveň odpovídá výšce nejmenší spolehlivě detekované umělé necelistvosti v konkrétní srovnávací měrce. Každá detekovaná indikace necelistvosti, která přesahuje registrační úroveň, je jednotlivé zaznamenána a také jsou určeny její pravděpodobné rozměry. [51, 53]

Přírůstek skenování

Přírůstek jednoho kroku skenování podél celého zkoušeného svaru nesmí být větší než 0,5 mm.

Kontrola nastavení parametrů zařízení

Kontrola nastavení zkušební aparatury se provede na příslušných kalibračních měrkách v těchto případech:

- před začátkem ultrazvukového zkoušení,
- v případě výpadku napájení,
- v případě rozpojení kabeláže,
- po každých 4 hodinách nepřetržité práce,
- v případě podezření vzniku jakékoliv odchylky od nastavených hodnot,
- po výměně jakékoli součásti zkušebního systému,
- v případě pádu snímače,
- po ukončení ultrazvukového zkoušení.

8.1.6 Průběh zkušebního procesu

Počáteční bod a souřadnice

Sondu přikládáme co nejblíže svaru, tak aby bylo možné svar prozkoušet, pokud to vzhledem ke geometrii není možné, namodelujeme jinou vhodnou pozici v softwaru PC, či přístroje.

Na vodorovném potrubí je tato referenční pozice umístěna na ose svarového spoje na vrcholu potrubí (na 12. hodině).

Na svislém potrubí je nutné tuto referenční pozici vhodně zvolit, např. směrem k vnitřnímu rádiusu kolena či ohybu, či směrem k nějakému významnému prvku v okolí (zábradlí, stěna, armatura apod.) a vždy tak, aby bylo, pokud možno na tuto pozici dobře vidět a daly se k ní dobře nastavit ultrazvukové sondy.

Souřadnice X (axiální směr) narůstá kolmo k podélné ose svarového spoje ve směru proudění provozního média od středu koruny svaru. Tam, kde není proudění provozního média jasné, se zvolí narůstání osy X směrem k nějakému významnému prvku na potrubí (např. armatura, zúžení, rozšíření apod.) nebo k výraznému stavebnímu prvku v okolí potrubí.

Souřadnice Y (obvodový směr) narůstá pravotočivě při pohledu směrem k narůstání souřadnice X (proudění provozního média či zvolený směr).

Souřadnice Z (tloušťka stěny potrubí) narůstá ve směru vnějšího povrchu kolmo k vnitřnímu povrchu potrubí. Popsaný souřadnicový systém se použije jak k definici pohybů ultrazvukových sond při snímání dat, tak pro vyhodnocování polohy nalezených vadových necelistvostí v jednotkách mm.

Provádění ultrazvukového zkoušení

Nejprve se nastaví parametry ultrazvukových sond pro daný materiál a tloušťku potrubí v souladu s kapitolou *8.1.5 Kalibrace* a poté se namontují proti sobě do ručního manipulátoru LPS-01 přizpůsobeného na daný vnější průměr potrubí tak, aby ultrazvukové svazky směřovaly k obvodové ose svarového spoje tak, aby byla každá sonda na jedné straně svarového spoje. V případě že to konstrukční uspořádání nedovoluje, použije se jednostranné zkoušení, sonda směřuje kolmo na svar.

Sondy/a se nastaví do výchozí polohy (viz předchozí bod) a po aktivaci ultrazvukového PA defektoskopu a spuštění zkoušení se ruční manipulátor rukou otočí kolem potrubí o 360°. V případech, kdy není možné odzkoušet najednou celý obvod, je třeba označit a zdůvodnit úseky které nelze kontrolovat, případně zvolit rozdělení na úseky.

Ukládání dat

Dokončené skeny svarů ukládáme na paměťovou kartu přístroje v původním formátu a bez úprav. Je tak z důvodu zachování dat bez dalších zásahů, které mohou výstup zkoušky nevhodnými úpravami znehodnotit.

8.1.7 Hodnocení

Vyhodnocují se všechny relevantní indikace. Data se hodnotí off-line. Indikace, jejichž amplituda je vyšší než úroveň vyhodnocení (referenční úroveň -12 dB), se vyhodnotí podle stanovené úrovně přijatelnosti pomocí délky indikace a maximální amplitudy.

Pro oboustranné zkoušky se použije kapitola *8.1.8* Pro jednostranné zkoušky se použije kapitola *8.1.9*. Délka indikace se určí měřením délky podél svaru metodou poklesu o 6 dB. Pouze u neostrých zvukových svazků v bočním směru lze použít korekci délky.

8.1.8 Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení

Obecně

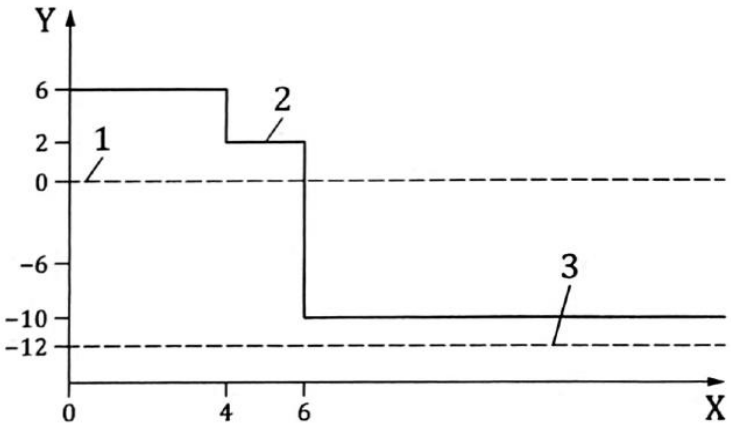
Pokud to prostorové podmínky dovolují, potom se ultrazvukové zkoušení provádí z obou stran. Když jsou detekovány indikace, musí být jejich délka a maximální amplituda určeny v souladu s touto instrukcí. Indikace musí být vyhodnoceny podle stupně přípustnosti v této kapitole. Všechny indikace, které mají amplitudou větší než referenční úroveň -12 dB musí být vyhodnoceny podle kritérií hodnocení uvedených v následujících odstavcích. [51]

Podélné indikace

Přípustnost oboustranného zkoušení – stupeň 1

Tab. 20: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 1) [51]

Délka indikace [mm]	Úroveň hodnocení [dB]	Max. příp. amplituda [dB]
$l \leq 4$	-12	+6
$4 < l \leq 6$	-12	+2
$l > 6$	-12	-10



Obr. 35: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 1) [51]

kde:

X – délka indikace [mm],

Y – amplituda Y [dB],

1 – referenční úroveň [–],

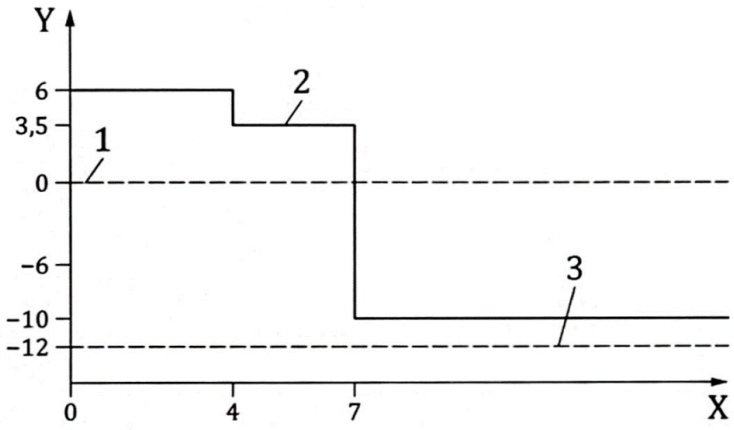
2 – úroveň přípustnosti 1 [–],

3 – hodnotící úroveň [–]. [51]

Přípustnost oboustranného zkoušení – stupeň 2

Tab. 21: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 2) [51]

Délka indikace [mm]	Úroveň hodnocení [dB]	Max. příp. amplituda [dB]
$l \leq 4$	-12	+6
$4 < l \leq 7$	-12	+3,5
$l > 7$	-12	-10



Obr. 36: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 2) [51]

kde:

X – délka indikace [mm],

Y – amplituda Y [dB],

1 – referenční úroveň [–],

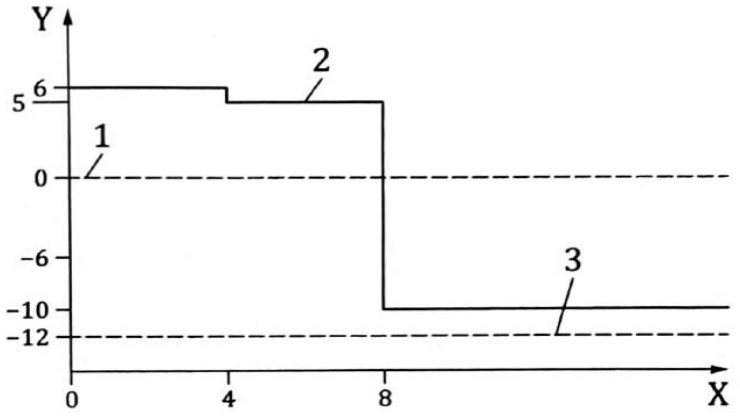
2 – úroveň přípustnosti 1 [–],

3 – hodnotící úroveň [–]. [51]

Přípustnost oboustranného zkoušení – stupeň 3

Tab. 22: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 3) [51]

Délka indikace [mm]	Úroveň hodnocení [dB]	Max. příp. amplituda [dB]
$l \leq 4$	-12	+6
$4 < l \leq 8$	-12	+35
$l > 8$	-12	-10



Obr. 37: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 3) [51]

kde:

X – délka indikace [mm],

Y – amplituda Y [dB],

1 – referenční úroveň [–],

2 – úroveň přípustnosti 1 [–],

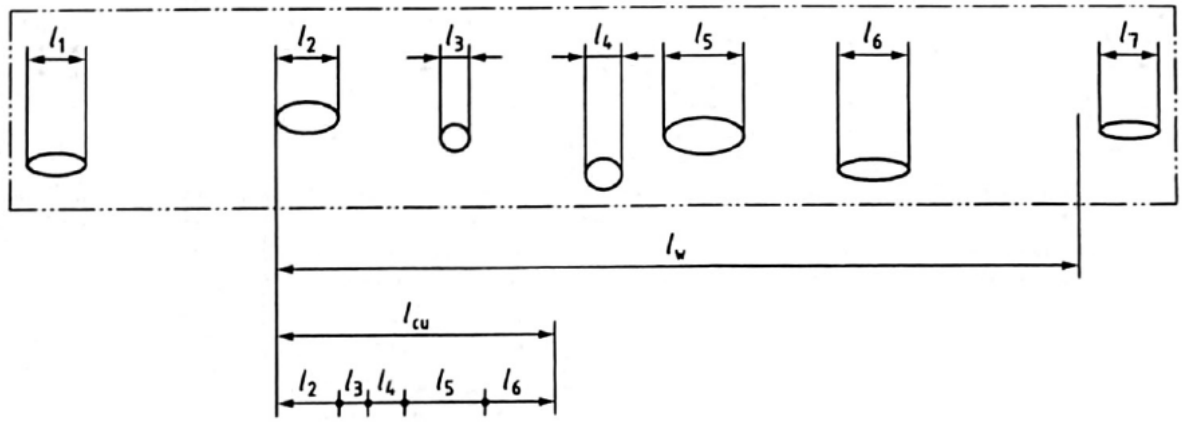
3 – hodnotící úroveň [–]. [51]

Příčné indikace

Když je specifikována detekce příčných indikací, jsou tyto indikace přijatelné pouze tehdy, pokud lze určit amplitudu a délku a splňují úrovně přijatelnosti uvedené v této kapitole.

Kumulativní indikace

Kumulativní délka jednotlivě přijatelných indikací nad úrovní hodnocení se vypočte jako součet délek jednotlivých a lineárně zarovnaných indikací, viz obrázek *Obr. 38*.



Obr. 38: Kumulativní délka indikací [51]

$$l_{cu} = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 \tag{9}$$

kde:

l_{cu} – kumulativní délka [mm],

l_w – délka svaru [mm],

l_n (l_1, l_2, …) – délka jednotlivých indikací [mm].

Pro tloušťku stěny t, bude součet délek indikací naměřených podél svaru na délce 12 t:

a) ≤ 3,5 t – pro stupeň přípustnosti 1,

b) ≤ 4,0 t – pro stupeň přípustnosti 2,

c) ≤ 4,5 t – pro stupeň přípustnosti 3. [51]

8.1.9 Stupně přípustnosti pro jednostranné zkoušení

Obecně

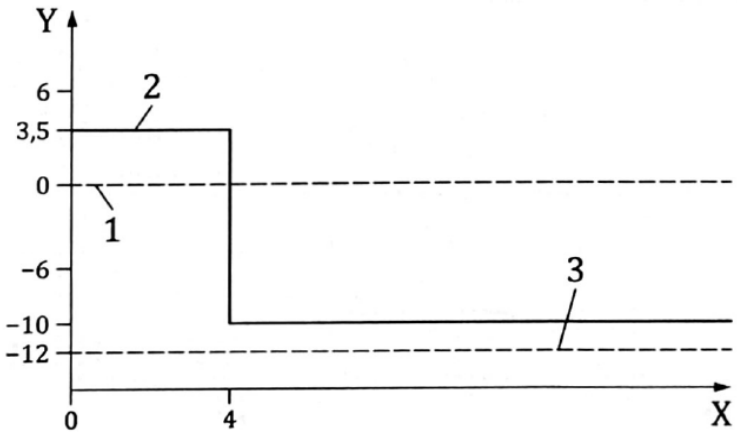
Pokud to prostorové podmínky dovolují, potom se ultrazvukové zkoušení provádí z obou stran. Když jsou detekovány indikace, musí být jejich délka a maximální amplituda určeny v souladu s touto instrukcí. Indikace musí být vyhodnoceny podle stupně přípustnosti v této kapitole. Všechny indikace, které mají amplitudou větší než referenční úroveň -12 dB musí být vyhodnoceny podle kritérií hodnocení uvedených v následujících odstavcích. Pro jednostranné zkoušení nejsou přípustná kritéria definovaná pro 1. stupeň přípustnosti. [51]

Podélné indikace

Přípustnost jednostranného zkoušení – stupeň 2

Tab. 23: Kritéria přípustnosti pro jednostranné zkoušení (stupeň 2) [51]

Délka indikace [mm]	Úroveň hodnocení [dB]	Max. příp. amplituda [dB]
$l \leq 4$	-12	+3,5
$l > 4$	-12	-10



Obr. 39: Kritéria přípustnosti pro jednostranné zkoušení (stupeň 2) [51]

kde:

X – délka indikace [mm],

Y – amplituda Y [dB],

1 – referenční úroveň [–],

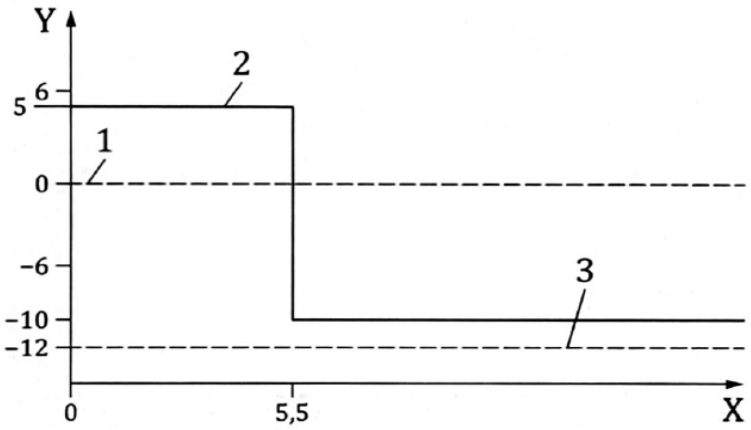
2 – úroveň přípustnosti 1 [–],

3 – hodnotící úroveň [–]. [51]

Přípustnost jednostranného zkoušení – stupeň 3

Tab. 24: Kritéria přípustnosti pro jednostranné zkoušení (stupeň 3) [51]

Délka indikace [mm]	Úroveň hodnocení [dB]	Max. příp. amplituda [dB]
$l \leq 5,5$	-12	+5
$l > 5,5$	-12	-10



Obr. 40: Kritéria přípustnosti pro jednostranné zkoušení (stupeň 3) [51]

kde:

X – délka indikace [mm],

Y – amplituda Y [dB],

1 – referenční úroveň [–],

2 – úroveň přípustnosti 1 [–],

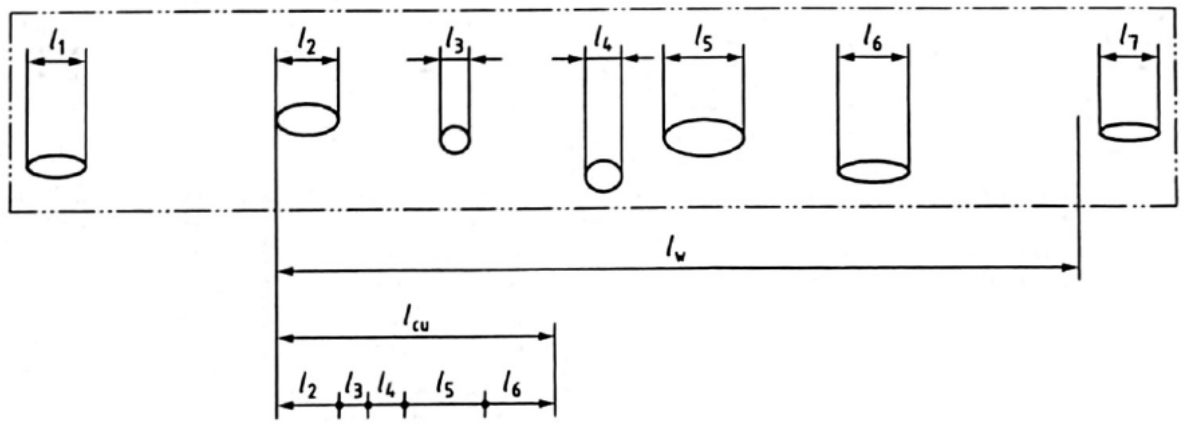
3 – hodnotící úroveň [–]. [51]

Příčné indikace

Když je specifikována detekce příčných indikací, jsou tyto indikace přijatelné pouze tehdy, pokud lze určit amplitudu a délku a splňují úrovně přijatelnosti uvedené v této kapitole.

Kumulativní indikace

Kumulativní délka jednotlivě přijatelných indikací nad úrovní hodnocení se vypočte jako součet délek jednotlivých a lineárně zarovnaných indikací, viz obrázek *Obr. 41*.



Obr. 41: Kumulativní délka indikací [51]

$$l_{cu} = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 \quad (9)$$

kde:

l_{cu} – kumulativní délka [mm],

l_w – délka svaru [mm],

l_n (l_1, l_2, …) – délka jednotlivých indikací [mm].

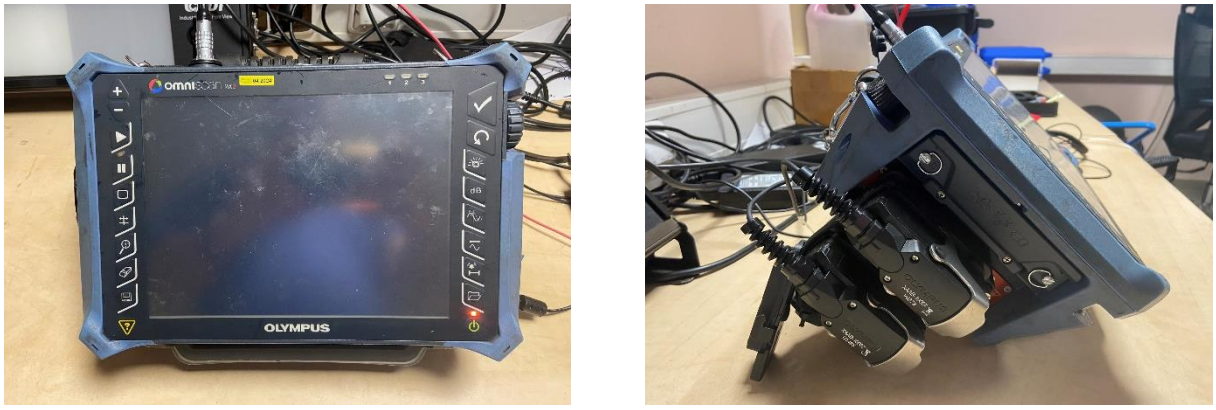
Pro tloušťku stěny t, bude součet délek indikací naměřených podél svaru na délce 12 t:

a) ≤ 4,0 t – pro stupeň přípustnosti 2,

b) ≤ 4,5 t – pro stupeň přípustnosti 3. [51]

8.2 Ověření metody Phased array

Ověření použitelnosti metody Phased array probíhalo v několika krocích. K samotnému zkoušení byl použit defektoskop Olympus OmniScan MX2 společně se dvojicí shodných sond typu 7,5CCEV35-16, jejíž parametry jsou uvedeny v tabulce *Tab. 27*.



Obr. 42: Použitá zařízení – vlevo: defektoskop; vpravo: splitter (vlastní zdroje)

Tab. 25: Parametry použité sondy 7,5CCEV35-16 [55]

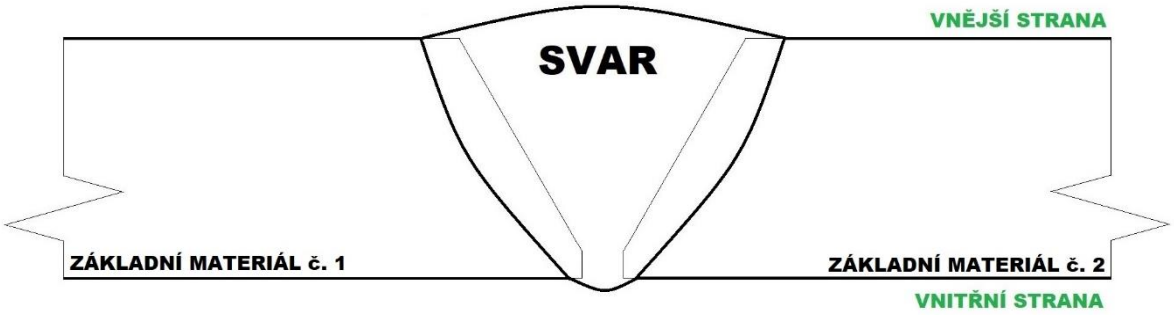
Typ sondy:	COBRA® Scanner	**Aktivní plocha:**	8,0 mm
Název sondy:	7,5CCEV35-16	**Převýšení:**	10,0 mm
Frekvence:	7,5 MHz	**Výška:**	28 mm
Počet elementů:	16	**Šířka:**	22 mm
Rozteč:	0,50 mm	**Délka:**	9,7 mm

Ačkoliv se vždy postupovalo dle výše uvedeného postupu *8.1 Postup měření*, značnou odlišnost tvořila přítomnost svaru, rozměry vzorku a také různé rozměry uměle vytvořených vad v blízkosti svarů, které v 1. a 2. fázi zkoušení neodpovídaly normě ČSN EN ISO 20601.

Jednotlivé fáze ověřování dle rozdělit na základě oboustranného/jednostranného zkoušení, a právě rozměrů uměle vytvořených vad:

- 1. fáze – Oboustranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami),
- 2. fáze – Jednostranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami),
- 3. fáze – Jednostranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami dle normy).

Všechny použité vzorky byly trubkového charaktery s nízkou hodnotou tloušťky stěny. Následující obrázek *Obr. 44*, ukazuje obecnou geometrii zkoušených svarů.



Obr. 43: Schéma geometrie zkoušeného svaru (vlastní zdroje)

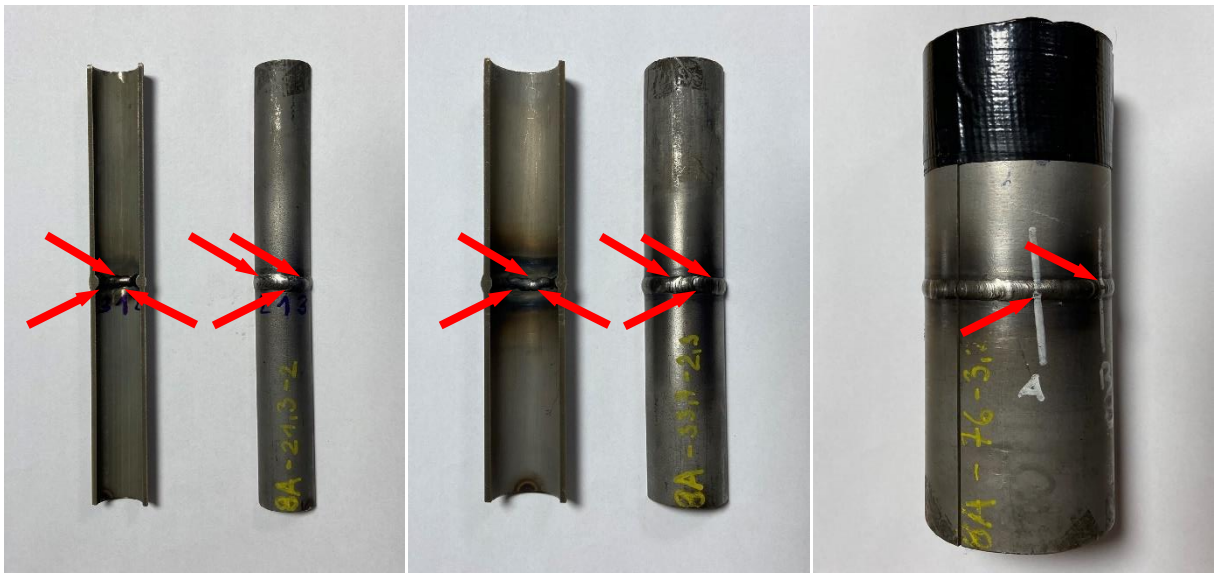
8.2.1 1. fáze – Oboustranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami)

Předpokladem oboustranného zkoušení je dosažení nejlepších výsledků. Usnadnění zkušebního procesu přístupem k vadám z obou stran každého vzorku značně usnadní především možnost úplné ignorace samotného svaru, jehož přítomnost předznamenává komplikace.

Připravené zkušební vzorky z austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 a nízkolegované oceli 1.5415 byly velmi různorodého charakteru, co se průměru, tloušťky materiálu týče. Každý vzorek byl opatřen umělými vadami, které v této fázi nekorespondují s normou ČSN EN ISO 20601. Umělé vady jsou znázorněny na schématu *Obr. 47*.

Dvě vady o hloubkách 0,2 a 0,5 mm jsou vždy vedeny po obvodu v blízkosti svaru po vnější a vnitřní straně. Další vada je charakteristická svým sklonem 45° a hloubkou 0,5 mm.

Vzorky byly následně po výrobě podélně rozříznuty z důvodu lepší manipulace a orientace během samotného procesu ověřování.



Obr. 44: Vzorky s umělými vadami z austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (vlastní zdroje)

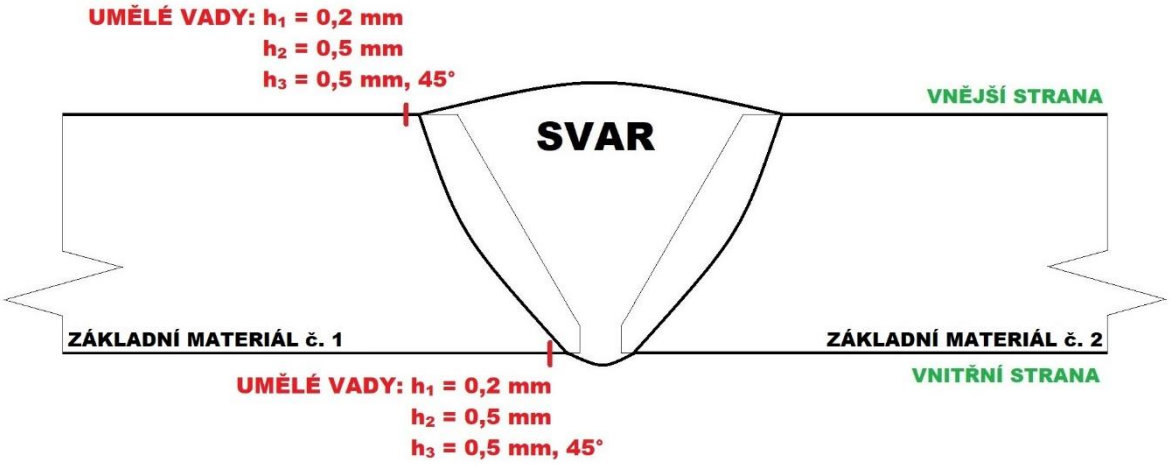
Rozměry jednotlivých vzorků zleva:

- Ø 21,3 mm; t = 2 mm,
- Ø 33,7 mm; t = 2,7 mm,
- Ø 76 mm; t = 3,2 mm.

Obr. 45: Vzorky s umělými vadami z nízkolegované oceli 1.5415 (vlastní zdroje)

Rozměry jednotlivých vzorků zleva:

- Ø 21,3 mm; t = 2 mm,
- Ø 33,7 mm; t = 2,7 mm,
- Ø 48 mm; t = 7,2 mm.



Obr. 46: Schéma geometrie zkoušeného svaru včetně vyznačených vad (vlastní zdroje)

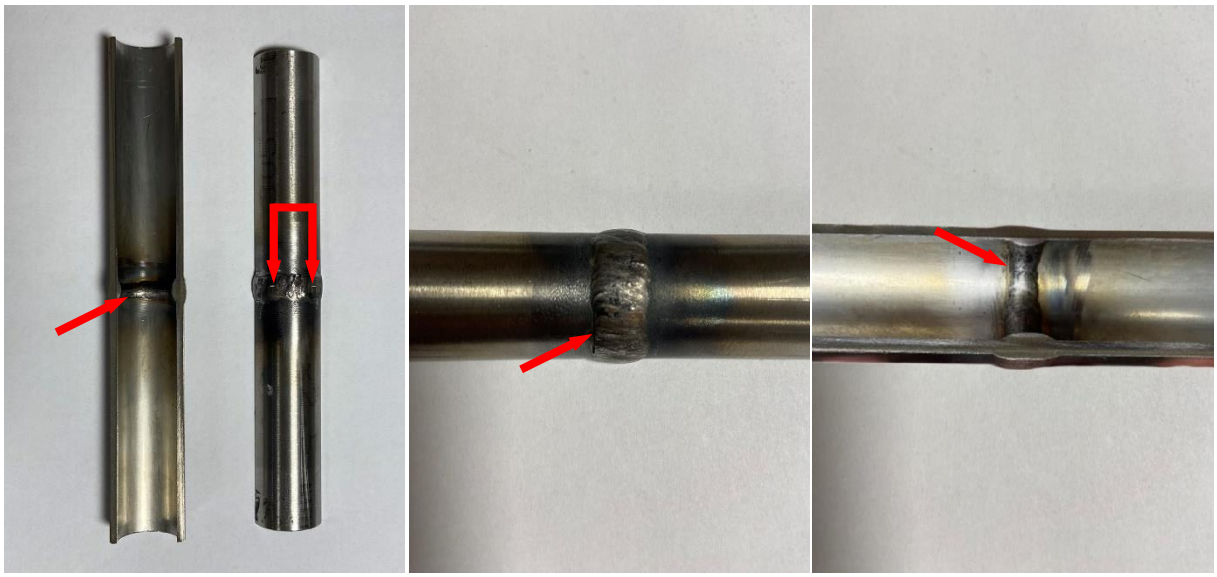
Oboustranné zkoušení oceli 1.4541 vykazuje velmi rozporuplné výsledky, a to již pří umístění sondy ze strany vady. To předznamenává velmi omezené použití metody Phased array pro tento typ oceli obecně. V případě druhého typu oceli (1.5415) jsou výsledky mnohem lepší,

8.2.2 2. fáze – Jednostranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami)

Další fáze vycházela ze stejných podmínek a vzorků jako fáze předchozí. Zkoušení však probíhalo pouze jednostranně. Dle schémata *Obr. 47* lze tedy říci, že sonda byla umístěna ze strany základního materiálu č. 2. V případě druhého materiálu 1.4541, tedy austenitické korozivzdorné oceli, byly výsledky naprosto neakceptovatelné. Nízkolegovaná ocel (1.5415) vykazovala lepší, avšak stále nedostatečné výsledky. Vady nebyly jednoznačně detekovatelné. Především v případě zkoušení vady přes svar ať už na vnější nebo vnitřní straně vzorku.

8.2.3 3. fáze – Jednostranné zkoušení (Vzorky s umělými vadami dle normy)

Jelikož smyslem této diplomové práce je především zkoušení jednostranné, bylo třeba právě tuto fázi co nejlépe zdokonalit. Tomuto kroku tedy předcházela výroba vzorků dle přesných rozměrů udávaných normou ČSN EN ISO 20601. Dodržením dané normy došlo k výraznému zvětšení umělých vad a tím ke zvýšení pravděpodobnosti jejich detekce. Materiály vzorků zůstaly stejné. Umělé vady byly proměřeny za pomocí 3D skenu. Výstupní protokoly skenování jsou přiloženy k této diplomové práci, jako *PŘÍLOHA č. 1* a *PŘÍLOHA č. 2*.



Obr. 47: Vzorek s umělými vadami dle normy z austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (vlastní zdroje)

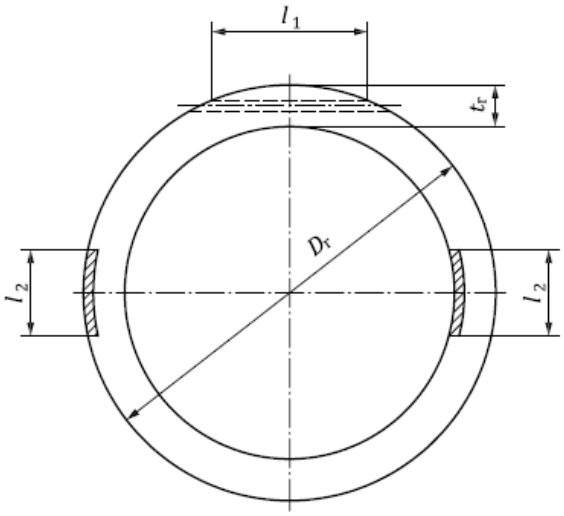
Rozměry vzorku:

- Ø 25 mm; t = 2,5 mm.

Obr. 48: Vzorek s umělými vadami dle normy z nízkolegované oceli 1.5415 (vlastní zdroje)

Rozměry vzorku:

- Ø 34 mm; t = 3,2 mm.



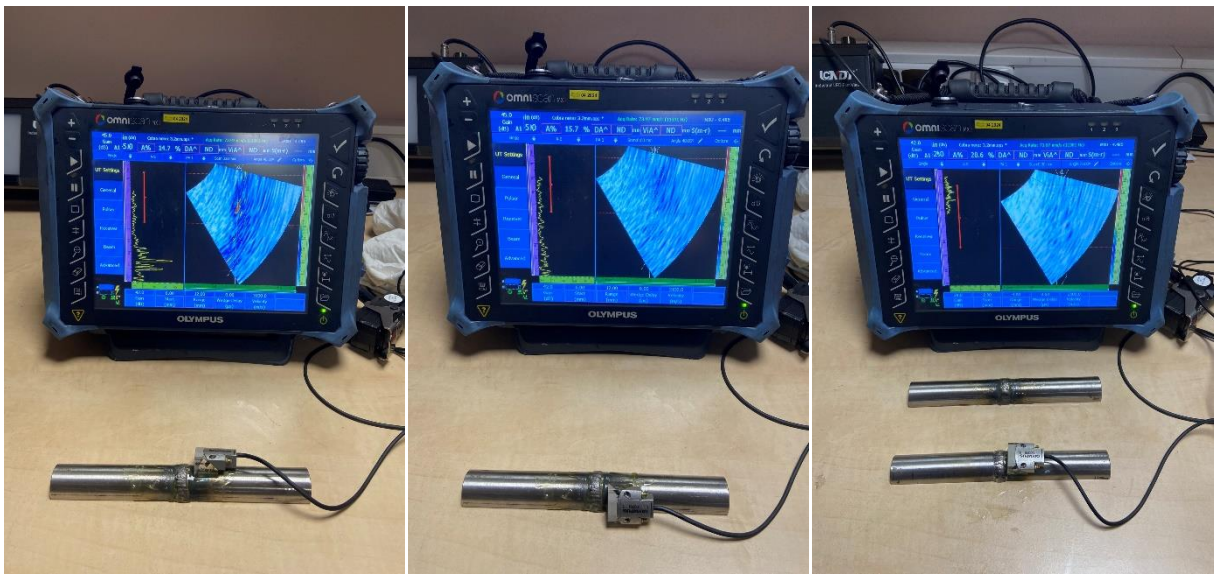
Obr. 49: Schéma řezu vzorkem s vyznačením umělých vad [53]

Rozměry umělých vad:

- vnější drážka o výšce 0,75 mm a délce l_2 = 10 mm,
- vnitřní drážka o výšce 0,75 mm a délce l_2 = 10 mm,
- boční vývrt o průměru 1 mm v polovině tloušťky svaru t_r.

Austenitická korozivzdorná ocel 1.4541

Při zkoušení vykazoval vzorek z austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 stále velmi neuspokojivé výsledky. Výstupy zkoušky nejsou i přes mírnou detekci zcela prokazatelné ani v případě umístění sondy ze strany umělé vady. V případě umístění sondy za svar nebyl patrný ani náznak přítomnosti umělé vady. Detekovat nebylo možné ani vývrt procházející svarem v jeho poloviční tloušťce (viz obrázek *Obr. 51*). Nepomáhalo ani zvyšování hodnoty dB.



Obr. 50: Materiál 1.4541 – vlevo: přímo; uprostřed: přes svar; vpravo: vývrt (vlastní zdroje)

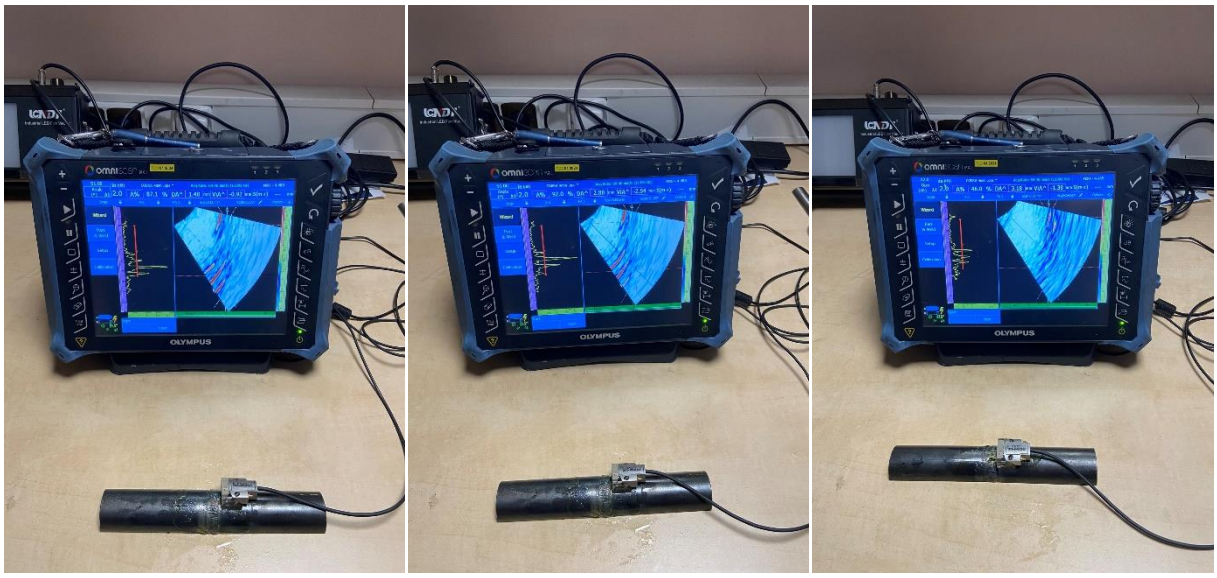
Z důvodu neuspokojivých výsledků bylo rozhodnuto o nepoužitelnosti metody Phased array v případě nedestruktivního zkoušení austenitické korozivzdorné oceli 1.4541. Kapitola *8.4 Metalografie* obsahuje metalografický rozbor této oceli za účelem objasnění neúspěchu.

Nízkolegovaná ocel 1.5415

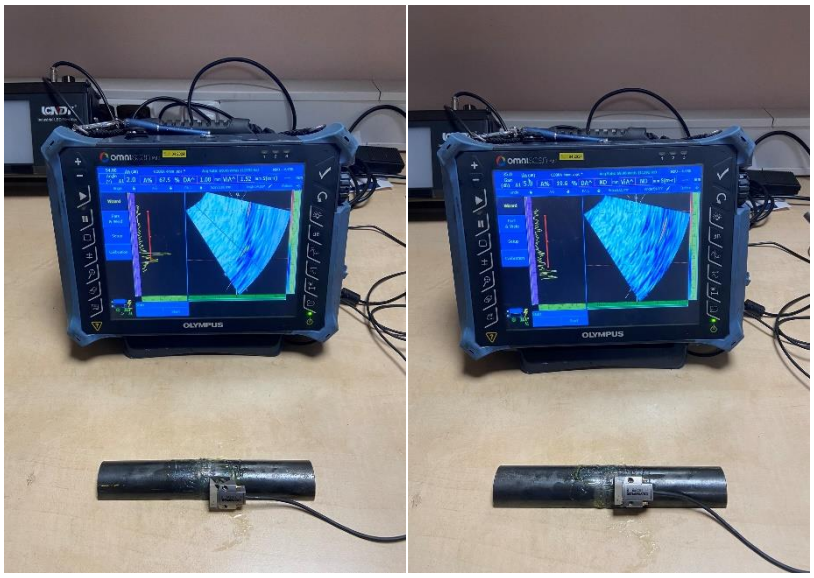
Následně byl zkoušen druhý vzorek vyrobený z nízkolegované oceli 1.5415. Ten při jednotlivých zkouškách vykazoval o poznání lepší výsledky než vzorek z oceli 1.4541. K měření bylo použito nižších hodnot dB (28–32 dB), aby byla detekovatelnost vad vhodně ověřena.

Detekovatelnost byla ověřena:

- přímo (vnější strana) – sonda před svarem, umělá vada na vnější straně (*Obr. 52*),
- přímo (vnitřní strana) – sonda před svarem, umělá vada na vnitřní straně (*Obr. 52*),
- vývrt – v poloviční tloušťce svaru (*Obr. 52*),
- přes svar (vnitřní strana) – sonda přes svar, umělá vada na vnitřní straně (*Obr. 53*),
- přes svar (vnější strana) – sonda přes svar, umělá vada na vnitřní straně (*Obr. 53*).

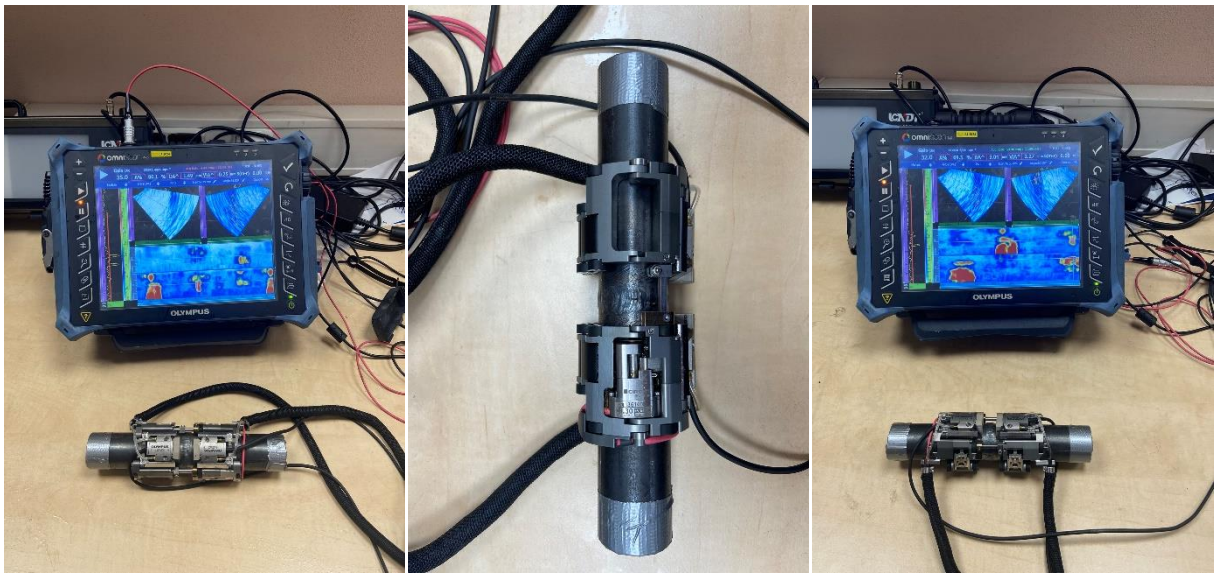


Obr. 51: Materiál 1.5415 – vlevo: přímo (vnější strana); uprostřed: přímo (vnitřní strana); vpravo: vývrt (vlastní zdroje)

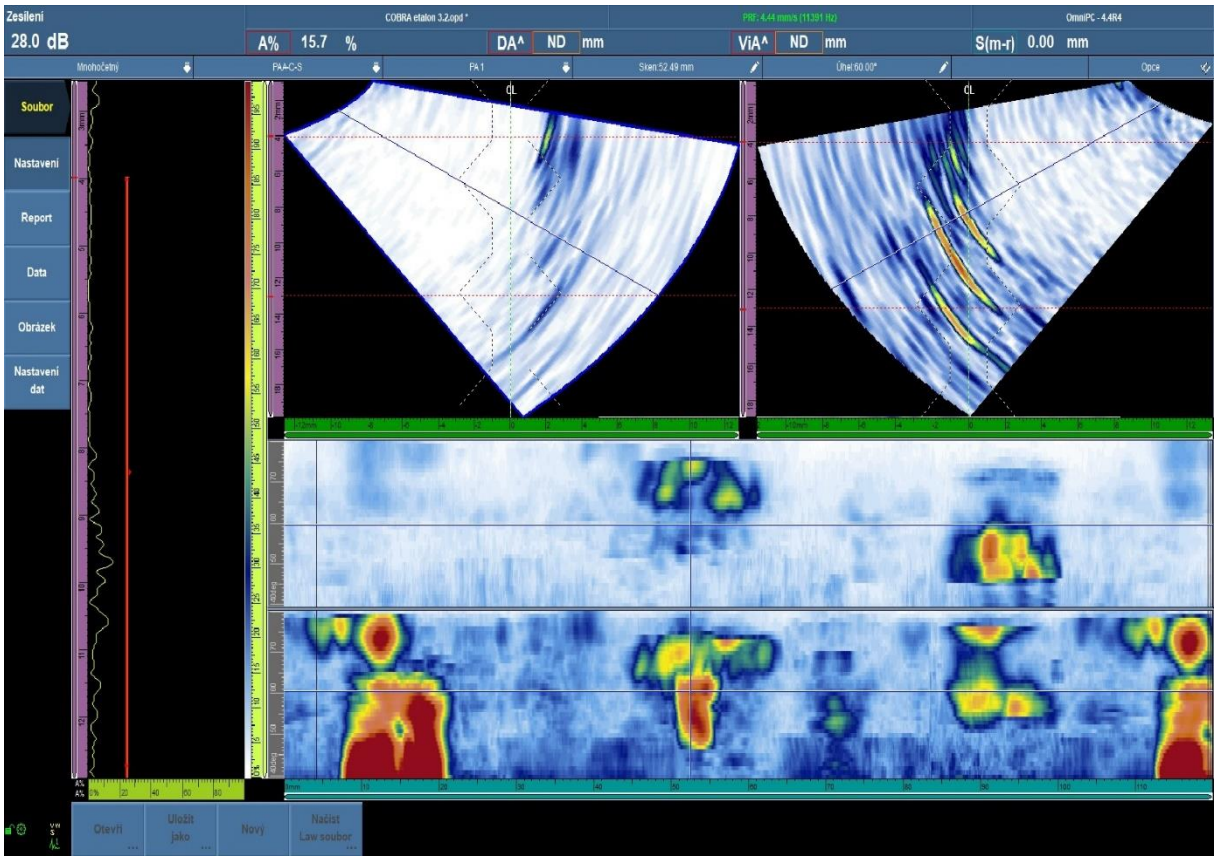


Obr. 52: Materiál 1.5415 – vlevo: přes svar (vnitřní strana); vpravo: přes svar (vnější strana) (vlastní zdroje)

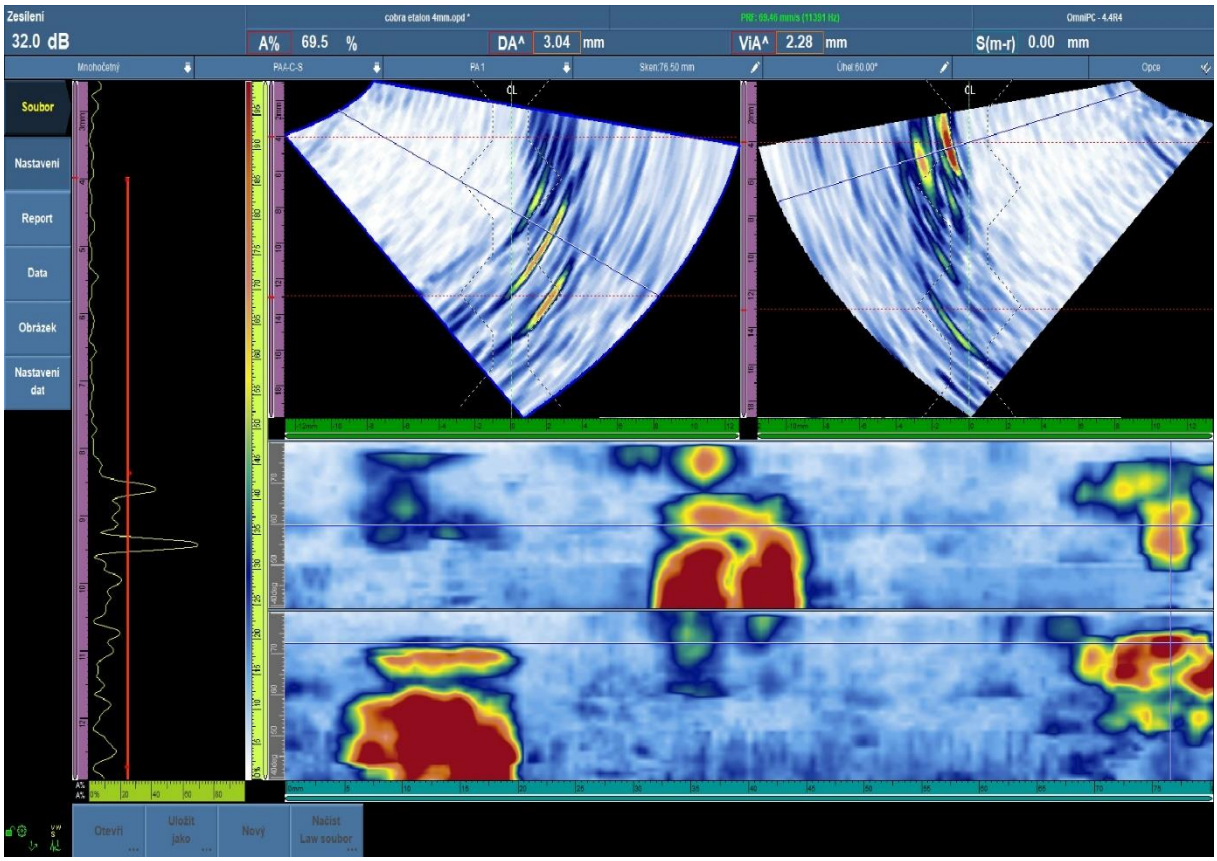
Poslední zkouška spočívala ve využití dvojsondového manipulátoru (skener) s encoderem JIREH CIRC-IT – Dual Probe Weld Scanner, který slouží k zafixování polohy sondy, která je do něj vložena. Trubka se mechanicky obkroužila a celý průběh byl zaznamenáván. Manipulátor lze použít na oboustranné i jednostranné zkoušení, jako vazba byl použit proud vody. Při jednostranném zkoušení je třeba zvýšené pozornosti při odhalování vad na vnější straně přes svar. V kapitole *8.4 Metalografie* je opět proveden metalografický rozbor.



Obr. 53: Materiál 1.5415 – Použití manipulátoru JIREH CIRC-IT – Dual Probe Weld Scanner (vlastní zdroje)



Obr. 54: Materiál 1.5415 – JIREH CIRC-IT – Dual Probe Weld Scanner (28 dB) (vlastní zdroje)



Obr. 55: Materiál 1.5415 – JIREH CIRC-IT – Dual Probe Weld Scanner (32 dB) (vlastní zdroje)

Za účelem lepší detekce byla zvýšena intenzita ultrazvuku z 28 dB (*Obr. 54*) na 32 dB (*Obr. 55*). Výstup byl analyzován za pomocí počítačového softwaru Olympus OmniPC.

8.3 Výstup zkoušení

Na základě předchozího zkoušení lze stanovit použitelnost a nepoužitelnost metody Phased array pro jednotlivé typy materiálů.

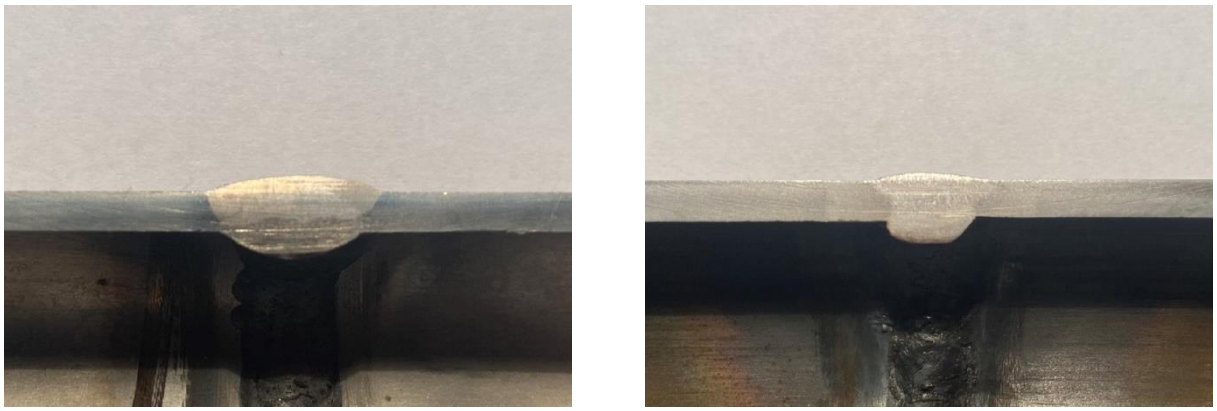
Tab. 26: Tabulka použitelnost metody Phased array

	Ocel 1.4541	Ocel 1.5415
Přímo (vnější strana)	Obtížně detekovatelné	Použitelné
Přímo (vnitřní strana)	Obtížně detekovatelné	Použitelné
Vývrt	Nepoužitelné	Použitelné
Přes svar (vnitřní strana)	Nepoužitelné	Použitelné
Přes svar (vnější strana)	Nepoužitelné	Použitelné

8.4 Metalografie

Z důvodu nákladné výroby vzorků nebylo možné připravit klasický výbrus běžnými metalografickými postupy. Geometrická podoba byla zachována, výbrus byl proveden v místě svaru, což však značně ovlivnilo kvalitu výstupu. Vzorky byly leptány činidlem Vilella-Bain:

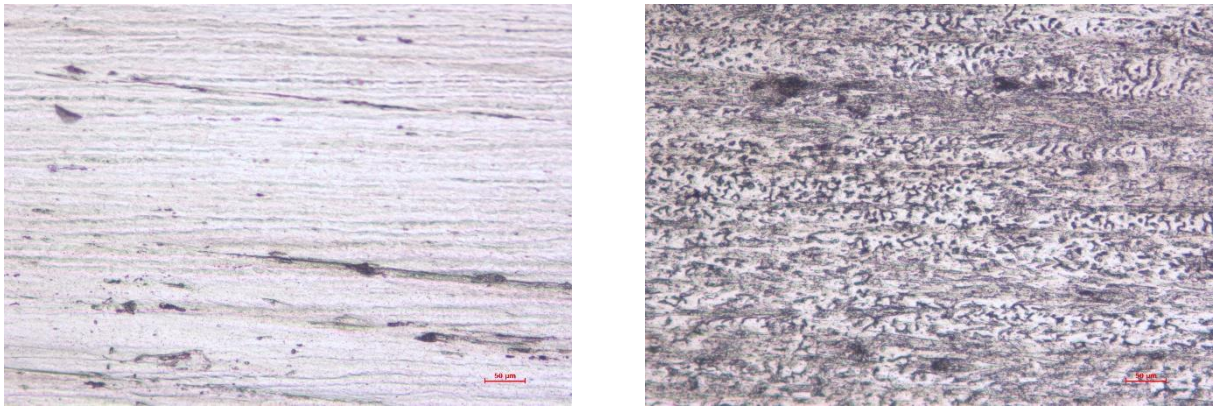
- 10 ml kyseliny chlorovodíkové,
- 2 g kyseliny pikrové,
- 190 ml denaturovaného ethanolu.



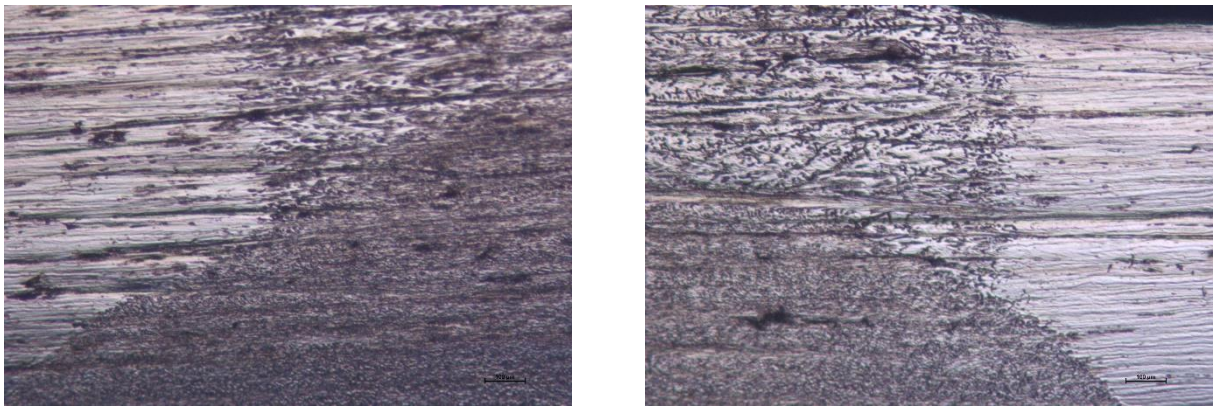
Obr. 56: Detail svaru v leptaném stavu – vlevo: ocel 1.451; vpravo: ocel 1.5415 (vlastní zdroje)

Austenitická korozivzdorná ocel 1.4541

Ultrazvuková zkouška oceli 1.4541 byla stanovena jako neproveditelná. Jak ukazují následující snímky (*Obr. 56* a *Obr. 57)*, v oblasti svaru došlo k vytvoření velmi jemné struktury. Ocel není jen jemnozrnná, ale zrna jsou také orientovaná ve směru tuhnutí svarového spoje, tato orientace ale neodpovídá směru prostupu ultrazvukových vln. V praxi samozřejmě nelze zaručit vhodnou orientaci. Souhrou jemnozrnnosti materiálu a orientace byla prozvučitelnost snížena rozptylem vln na takovou úroveň, že použití této metody bylo znemožněno.



Obr. 57: Vzorek austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (x100) – vlevo: mimo svar; vpravo: oblast svaru (vlastní zdroje)

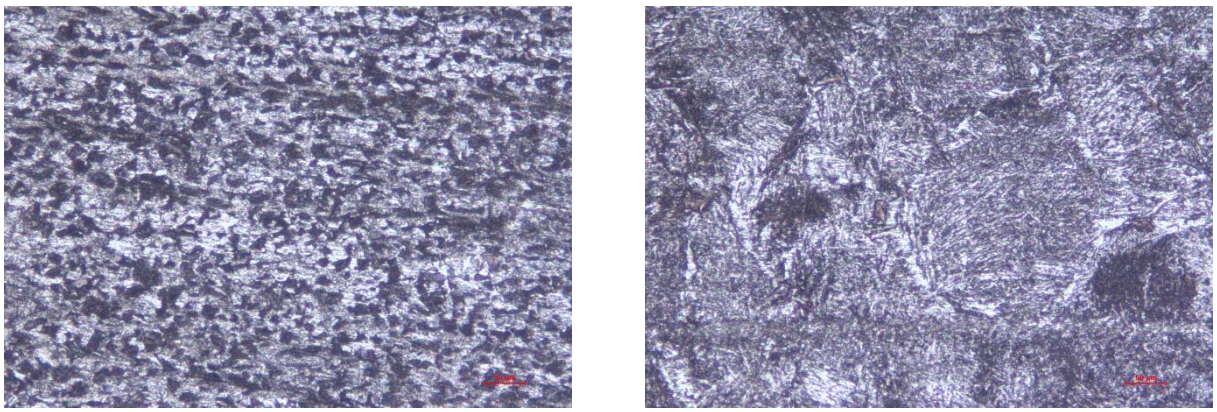


Obr. 58: Vzorek austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (x50) – přechodová oblast (vlastní zdroje)

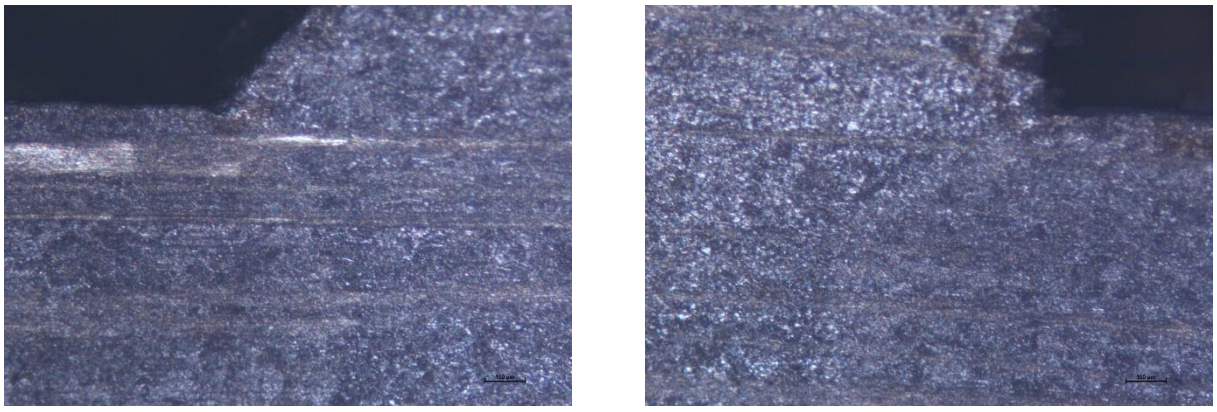
Na snímku *Obr. 57* je dokonce přímo patrná různorodá jemnost zrn v případě dvou svarových housenek. Tento rozdíl je patrný na snímku *Obr. 55* již pouhým okem.

Nízkolegovaná ocel 1.5415

Nízkolegovaná ocel 1.5415 vykazovala o poznání lepší výsledky zkoušení ultrazvukem. Tato NDT metoda tedy byla pro tento typ oceli stanovena jako možná. Jak je z následujících snímků (*Obr. 58* a *Obr. 59*) patrné, v oblasti svaru také k menší změně struktury došlo. Ačkoliv zrno materiálu zhrublo, nedošlo k nárustu zrna do takové úrovně, aby došlo k znemožnění průchodu ultrazvukové vlny.



Obr. 59: Vzorek nízkolegované oceli 1.5415 (x100) – vlevo: mimo svar; vpravo: oblast svaru (vlastní zdroje)



Obr. 60: Vzorek nízkolegované oceli 1.5415 (x50) – přechodová oblast (vlastní zdroje)

Původní myšlenka, proč svarovou oblast nelze prozvučit, spočívala právě ve výrazném zhrubnutí zrna. To nebylo v předchozím případě (oceli 1.4541) prokázáno. V případě oceli nízkolegované (1.5415) sice ke zhrubnutí zrna došlo, ne však v takovém měřítku, aby byl znemožněn průchod ultrazvukových vln.

8.5 Časový a ekonomický pohled

Vzhledem k vysokým finančním i časovým nákladům provádění NDT radiografických zkoušek, lze dopočítat na zmíněném projektu také jejich snížení využitím metody Phased array. Jelikož byla její použitelnost prokázána jen v případě vzorku z nízkolegované oceli 1.5415, bude výpočet vztažen pouze na potrubí tohoto typu materiálů.

Již zmíněná norma ČSN EN ISO 17635 uvádí nutné procento zkoušení svařovaných součástí dle jedné WPS jedním svářečem. Hodnoty této tabulky jsou ve vyňaté podobě pro ultrazvukové a radiografické zkoušení uvedeny v tabulce *Tab. 28*. Nutné procento je pro oba typy zkoušení ve všech případech shodné. [50]

Tab. 27: Vybraný rozsah požadovaných zkoušení svarů metodou RT/UT [50]

Materiálová skupina	Potrubní kategorie	Obvodové svary	Svary odboček
		RT/UT %	RT/UT %
1.1 1.2 8.1	I	5 (10)*	0
	II	5 (10)*	0
	III	10	10
1.3, 1.4, 1.5, 2.1, 2.2, 4.1, 4.2, 5.1, 5.2, 8.2, 8.3, 9.1, 9.2, 9.3, 10.1, 10.2	I	10	0
	II	10	0
	III	10 (25)*	10
3.1, 3.2, 3.3, 5.3, 5.4, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 7.1, 7.2	I	25	25
	II	25	25
	III	25 (100)*	100

***** Závorkové hodnoty platí v případě 1,1 násobku maximálního tlaku v potrubí, případně pokud je tečení nebo únava řídící faktor v konstrukci.

Vztaženo ke zmíněnému projektu elektrárny bylo v návaznosti na ověření použitelnosti Phased array a podmínkou tenkostěnného potrubí stanoveno několik kritérií:

- vyloučení materiálové kategorie 8.1 – nepoužitelnost Phased array,
- vyloučení materiálových kategorií 5.1, 5.2, 6,4 – podmínka radiografické zkoušky,
- tloušťka stěny:
  - kategorie 0 (2–8 mm),
  - kategorie I, II, III (2,9–8 mm).

Následující tabulka *Tab. 29*, uvádí informace o provedených svarech v případě elektrárny. Tyto údaje o svarech vychází z neveřejných podkladů daného projektu. Vybrané svary odpovídaly výše uvedeným podmínkám a bylo s nimi počítáno jako vhodnými k použití ověřené metody Phased Array.

Tab. 28: Tabulkové hodnoty procesu svařování

Všechny svary:	Vybrané svary:	Počet WPS:	Počet svářečů NW:
2522	602	9	5

Vybrané svary byly následně rozděleny dle WPS a byl aritmeticky zprůměrován počet těchto svarů na základě počtu svářečů. V případě nižších počtů svarů bylo využito plného počtu svářečů. jejich využití by činnost spíše komplikovalo zvyšováním počtu nutných zkoušek.

Tab. 29: Rozdělení svarů na základě WPS

WPS:	Počet svarů:	Počet svářečů NW:	Svarů na svářeče:
WPS1	69	5	13,8
WPS2	200	5	40,8
WPS3	12	3	4,0
WPS4	13	3	4,3
WPS5	5	2	2,5
WPS6	169	5	33,8
WPS7	118	5	23,6
WPS8	11	3	3,7
WPS9	5	2	2,5
Celkem svarů:	602		

Tabulka *Tab. 31* dělí jednotlivé svary mezi svářeče dle daných WPS. Snaha byla o co nejvhodnější rozdělení z časového pohledu i počtu nutných zkoušení.

Tab. 30: Počet provedených svarů jednotlivých svářečů dle WPS

WPS	NW1	NW2	NW3	NW4	NW5
WPS1	14	14	14	14	13
WPS2	40	40	40	40	40
WPS3	–	–	4	4	4
WPS4	5	4	4	–	–
WPS5	3	2	–	–	–
WPS6	34	34	34	34	33
WPS7	23	23	24	24	24
WPS8	–	–	–	4	4
WPS9	–	3	–	–	2

Poslední uvedená tabulka *Tab. 32* uvádí počet svarů, které jsou brány v potaz vzhledem k nutnému procentu zkoušených svarů dle normy ČSN EN ISO 17635. Uvedené hodnoty jsou v souladu s výše uvedenou tabulkou nutných zkoušek *Tab. 28*. Tabulkové hodnoty v posledním sloupci uvádějí požadovaný počet zkoušených svarů dle jednotlivých WPS.

Každá provedená ultrazvuková zkouška je z časového pohledu přibližně čtvrtinová v porovnání se zkouškou radiografickou bez ohledu na dobu vyhodnocování.

Tab. 31: Počet zkoušených svarů na základě četnosti procentuální podmínky dle WPS

WPS	0 %	2 %	5 %	10 %	100 %	Zkoušeno:
WPS1	4	53	12	–	–	5
WPS2	–	171	23	–	6	10
WPS3	12	–	–	–	–	3
WPS4	–	12	–	–	1	3
WPS5	3	1	1	–	–	2
WPS6	–	90	58	20	1	7
WPS7	1	105	12	–	–	5
WPS8	7	1	1	2	–	3
WPS9	–	5	–	–	–	2
					Celkem:	40

$$CFN_{RT} = Z \times FN_{RT} = 40 \times 4.000 = 160.000\ Kč \quad (10)$$

kde:

CFN_{RT} – celkové finanční náklady radiografických zkoušek [Kč],

Z – počet prováděných zkoušek [–],

FN_{RT} – finanční náklady radiografické zkoušky svaru [Kč].

9 Diskuze výsledků

Na základě podrobného nedestruktivního zkoušení bylo stanoveno, že klasické radiografické zkoušení uhlíkových ocelí lze plně nahradit ultrazvukovou zkouškou metodou Phased array v souladu s normou ČSN EN ISO 20601. V případě korozivzdorných ocelí nelze metodu Phased array použít.

Tab. 32: Počty vybraných a testovaných svarů

Typ materiálu	Počet vybraných svarů	Počet zkoušek UZ
Korozivzdorné oceli	1920	–
Uhlíkové oceli	602	40

Z praktického pohledu NDT dochází k časovým potřebám v porovnání radiografické a ultrazvukové zkoušky přibližně v poměru minimálně 4:1. Další značnou nevýhodou je doba vyhodnocování, kdy dochází v případě klasické radiografické zkoušky k často výrazné časové prodlevě až v řádech dní.

Vzhledem k uvedenému projektu lze uvažovat počet 40 zkoušek za počet poměrně malý. Ultrazvukovou zkoušku, včetně vyhodnocení všech svarů, lze provézt v rámci jedné směny. V součtu společně s cestou (2 dny) a jedním rezervním dnem pro případné komplikace je možné stanovit celkovou dobu zkoušení na 4 dny.

Radiografická zkouška s sebou přináší celou řadu již několikrát zmíněných komplikací. Pokud je brán v potaz až čtyřnásobný nárůst časových požadavků společně s tím, že zkoušení lze provádět z důvodu bezpečnosti pouze mimo hlavní pracovní směny, je možné pouze samotné zkoušení bez vyhodnocení stanovit na počet 5–6 požadovaných dní. Společně s cestou (2 dny) a opět jedním rezervním dnem lze dobu zkoušení stanovit na minimálně 8–9 dní. Značnou část ekonomické náročnosti tvoří také cena jednotlivých radiografických snímků svarů. Jelikož snímání a vyhodnocování probíhá za pomoci externí firmy je třeba započítat v případě dvou expozic v rámci jednoho svaru částku navíc zhruba 4.000 Kč/svar. Zkouška ultrazvukem je vyhodnocována přímo během zkoušení samotným technikem.

I přes nemožnost použití metody Phased array v případě korozivzdorných ocelí, které tvoří výrazně většinový počet svarů, lze dosáhnout poměrně značné časové i ekonomické úspory. Vzhledem k tomu, že tento projekt lze považovat za poměrně malý. V případě větších projektů, často i 5–10 násobně, může být úspora i mnohem větší. Stejně tak poměr korozivzdorných a uhlíkových ocelí je velmi různorodý.

Tab. 33: Časová a finanční náročnost NDT daného projektu

Typ zkoušky	Časová náročnost	Doba vyhodnocení	Finanční náročnost
Radiografická (RT)	8–9 dní	V řádu hodin/dní	4.000 Kč/svar
Ultrazvuková (UT)	4 dny	Součástí měření	–

Finanční náklady navíc za provedení radiografických zkoušek činí zhruba 160.000 Kč. V případě ekonomického pohledu by bylo nutné stanovit také finanční náklady za technika provádějícího zkoušení. V tomto případě jsou finanční úspory vztaženy pouze na částku odpovídající radiografickým snímkům. V případě započtení technika vzhledem k časovým úsporám několika dní by se jednalo o daleko vyšší ušetřenou částku.

10 Závěr

V rámci spolupráce se společností Doosan Škoda Power s.r.o. je účelem této diplomové práce vyzkoušet možnost použití jiné technologie nedestruktivního zkoušení, než které bylo využíváno doposud. Přesněji řečeno se jedná o testování svarových spojů několika daných materiálů. Doposud bylo jejich testování založené na klasické radiografické zkoušce, to však s sebou nese spousty úskalí jako jsou především výrazné časové náklady, komplikace s nutností provádět zkoušení svarů z bezpečnostních důvodů mimo provoz a řadu dalších. Ultrazvuková zkouška, přesněji řečeno její metoda Phased array, by mohla přinést výsledky obdobné, aniž by bylo nutné vyklízet celou strojovnu nebo provádět zkoušení mimo pracovní směny.

Rešeršní část této práce se věnuje představení jednotlivých nedestruktivních zkoušek (NDT), jejich principu, výhodám a nevýhodám, které jejich užití přináší. Ultrazvukovému zkoušení je zde věnována samostatná kapitola včetně specifikací jednotlivých metod. V další části jsou přiblíženy materiály, kterých by se testování mohlo týkat. Jejich samotné užití je poměrně různorodé. Následující kapitola vychází z normy ČSN EN 5817, která stanovuje detekovatelné svarové vady. Zde je vypsáno několik zástupců různých kategorií, které byly doposud v materiálech detekovány radiografickou zkouškou. U těchto vad by bylo vhodné ověřit jejich detekovatelnost právě metodou Phased array. Poslední část definuje časové a ekonomické úspory, které by změna metody mohla výrazně ovlivnit.

Experimentální část je zaměřena na detekovatelnost vad ultrazvukovou metodou Phased array v případě materiálu dvou typů ocelí. V případě korozivzdorných ocelí, za které byl vybrán jako referenční materiál 1.4541, bylo v závislosti na nevyhovujících výsledcích rozhodnuto o nemožnosti použití metody Phased array. Naopak v případě ocelí uhlíkových, kdy byla použita jako referenční ocel 1.5415, byly výsledky zkoušek vyhovující. To bylo následně podloženo pomocí metalografie.

Záměna klasické radiografické zkoušky uhlíkových ocelí za zkoušku ultrazvukovou v rámci reálného projektu elektrárny menšího rozsahu se značně podepsala na časových a ekonomických úsporách. Na základě propočtů dle dostupných dat svarů uhlíkových ocelí byla doba zkoušení zkrácena z 8–9 dní na přibližně 4 dny. Tyto úspory mohou být v případě větších projektů až několikanásobné. Z pohledu ekonomického lze říci, že jen pouhé nahrazení klasické radiografické zkoušky ušetří 160.000 Kč na jednotlivých zkouškách svarů bez započtení práce technika v rámci ušetřených pracovních dní.

11 Použitá literatura

[1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-720-4283-1.

[2] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

[3] Zkoušení materiálu. *Informační systém Masarykovy univerzity* [pdf]. Brno: MU [cit. 2022-10-19]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/podzim2018/TI1008/um/15_16_defektoskopie_tech_zk.pdf

[4] Defektoskopie a provozní diagnostika: 7. přednáška: Zkoušení prozařováním. *Courseware ZČU* [pdf]. Plzeň: ZČU, 2021 [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=211186

[5] KHEDMATGOZAR DOLATI, Seyed Saman, Nerma CALUK, Armin MEHRABI a Seyed Sasan KHEDMATGOZAR DOLATI. Non-Destructive Testing Applications for Steel Bridges. *Researchgate.net* [pdf]. Miami: FIU, 2021, 2021-10-19 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/355433502_Non-Destructive_Testing_Applications_for_Steel_Bridges/fulltext/617018d8435dab3b758383f1/Non-Destructive-Testing-Applications-for-Steel-Bridges.pdf

[6] Defektoskopie a provozní diagnostika: 9. přednáška: Akustická emise. *Courseware ZČU* [pdf]. Plzeň: ZČU, 2021 [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=211188

[7] Defektoskopie a provozní diagnostika: 8. přednáška: Zkoušení těsnosti. *Courseware ZČU* [pdf]. Plzeň: ZČU, 2021 [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=211187

[8] Introduction to Acoustic Emission. *Integrity Diagnostics (ID)* [online]. [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: http://www.idinspections.com/acoustic-emission-phenomenon/

[9] WASGESTIAN, Petr. Tenzometry HBM. *Adoc.pub* [pdf]. HBM – Hottinger Baldwin Messtechnik [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: https://adoc.pub/download/tenzometry-hbm-petr-wasgestian.html

[10] What is Thermographic Testing?. *Infralogix.com* [online]. 2017, 2017-09-25 [cit. 2022-11-01]. Dostupné z: http://www.infralogix.com/thermographic-testing/

[11] What is Thermographic Testing?. *Advancedtech.com* [online]. [cit. 2022-11-01]. Dostupné z: https://www.advancedtech.com/blog/thermography-testing/

[12] Infrared Cameras for Plant Inspections. *Infratec.eu* [online]. [cit. 2022-11-02]. Dostupné z: https://www.infratec.eu/thermography/industries-applications/plant-inspection/

[13] ŽBÁNEK, Petr, Jiří BLAHUŠEK, Jan MATOUŠEK a Tomáš ZAVADIL. *Ultrazvuková metoda stupeň I, II: podklady pro školení dle ISO 9712, SNT-TC-1A a EN 4179 / NAS 410*. 0.97. ATG – ADVANCED TECHNOLOGY GROUP, 2017.

[14] Defektoskopie a provozní diagnostika: 6. přednáška: Ultrazvukové zkoušení. *Courseware ZČU* [pdf]. Plzeň: ZČU, 2022 [cit. 2022-11-05]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=211185

[15] Snellův zákon. *Energetický ústav, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno: VUT [cit. 2022-11-05]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0211.htm

[16] REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-466-8.

[17] BENSON, Keith. Phased Array Beamforming ICs Simplify Antenna Design. *Analog.com* [online]. 2019 [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.html

[18] Phased Array Bolt Inspection. *Sonatest.com – Leading Ultrasonics* [online]. [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: https://sonatest.com/resources/application-notes/phased-array-bolt-inspection

[19] Olympus Industrial Resources: Using the Total Focusing Method to Improve Phased Array Ultrasonic Imaging. Evident *Olympus Inspection Solutions* [online]. [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: https://www.olympus-ims.com/en/applications/using-the-total-focusing-method-to-improve-phased-array-ultrasonic-imaging/

[20] MAES, Guy. How FMC and TFM Work Together for More Effective Ultrasonic Inspections. *Zetec.com* [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: https://www.zetec.com/how-fmc-and-tfm-work-together-for-more-effective-ultrasonic-inspections/

[21] BOURGELAS, Tommy. InSight Blog: Top 3 FMC/TFM Enhancements of the New OmniScan X3 Flaw Detector Explained. Evident *Olympus Inspection Solutions* [online]. 2019 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: https://www.olympus-ims.com/en/insight/top-3-fmc-tfm-enhancements-of-the-new-omniscan-x3-flaw-detector-explained/

[22] Olympus Industrial Resources: Introduction to Time-of-Flight Diffraction (TOFD) for Weld Inspection. *Evident Olympus Inspection Solutions* [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: https://www.olympus-ims.com/en/applications/introduction-to-time-of-flight-diffraction-for-weld-inspection/

[23] G17CrMo5-5 (1.7357). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=374

[24] G17CrMoV5-10 (1.7706). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=377

[25] Product manual ASTM A335/A335M ASME SA335 P91: Seamless Ferritic Alloy Steel Pipe for High Temperature Service. *Steeltube.biz* [pdf]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: http://www.steeltube.biz/files/SA335P91.pdf

[26] X5CrNi18-10 (1.4301). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=100

[27] X6CrNiTi18-10 (1.4541). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=102

[28] X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=107

[29] 16Mo3 (1.5415). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=441

[30] 13CrMo4-5 (1.7335). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=445

[31] 10CrMo9-10 (1.7380). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=447

[32] 14MoV6-3 (1.7715). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=501

[33] S355JR (1.0045). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=8

[34] P235GH (1.0345). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=437

[35] X6Cr13 (1.4000). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=60

[36] X22CrMoV12-1 (1.4923). *Steelnumber.com* [online]. [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=283

[37] SEW 555 Grade X14CrMoVNbN10-1 quenched and tempered (+QT). *Matmatch.com* [online]. [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: https://matmatch.com/materials/minfm32857-sew-555-grade-x14crmovnbn10-1-quenched-and-tempered-qt-

[38] Germany DIN EN 10269 27NiCrMoV15-6. *Steel-grades.com* [online]. [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: https://www.steel-grades.com/metals/85/1641/DIN-27NiCrMoV15-6.html

[39] Germany SEW 555 1.6985 (Datasheet). *Steel-grades.com* [online]. [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: https://www.steel-grades.com/metals/85/10426/.html

[40] *SIQUAL 8070 Steel* [online]. 2022 [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: https://steelselector.sij.si/steels/PT759.html

[41] ČSN EN ISO 11666. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Stupně přípustnosti*. Praha: ÚNMZ, 2018, Třídící znak 051172.

[42] ČSN EN ISO 5817. *Svařování – Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (mimo elektronového a laserového svařování) – Určování stupňů jakosti*. Praha: ÚNMZ, 2014, Třídící znak 05 0110.

[43] SILD, Siim. TIG Welding Explained. *Fractory* [online]. 05.04.2022 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://fractory.com/tig-welding-explained/

[44] What is Heat Affected Zone or HAZ in Welding & HAZ width?. *Materialwelding.com* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: https://www.materialwelding.com/what-is-heat-affected-zone-or-haz-in-welding-haz-width/

[45] HUCEK, František. *Strukturní analýza austenitických svarových spojů* [pdf]. Plzeň, 2021 [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/44145/1/BP%202021%20Frantisek%20Hucek.pdf. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Antonín Kříž.

[46] PROCHÁZKA, Robert. *Strukturní analýza austenitických svarových spojů* [pdf]. Brno [cit. 2023-01-12]. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Petr Havlík.

[47] VILCSEK, Igor. Vybrané kapitoly ze svařování – Podklady k předmětu. *Courseware ZČU* [pdf]. Plzeň: ZČU [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=164774

[48] VELLING, Andreas. Heat Affected Zone – Causes, Effects and How to Reduce It. *Fractory* [online]. 2019-11-25 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: https://fractory.com/heat-affected-zone-causes-effects-reduction/

[49] ROUŠAR, Vít. *Analýza deformačních jevů pomocí vysokorychlostního záznamu* [online]. Plzeň, 2021 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/44150/1/Bakalarska%20prace%20-%20Vit%20Rousar.pdf. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Petr Beneš.

[50] ČSN EN 13480-5 . *Kovová průmyslová potrubí - Část 5: Kontrola a zkoušení*. Praha: ÚNMZ, 2018. Třídící znak 130020

[51] EN ISO 4761:2022. *Non-destructive testing of welds — Phased array ultrasonic testing (UT-PA) for thin-walled steel components — Acceptance levels*. International Organization for Standardization, 2022. Třídící znak: 25.160.40

[52] ČSN EN ISO 17635. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Obecná pravidla pro kovové materiály*. Praha: ÚNMZ, 2018. Třídící znak 051170

[53] ČSN EN ISO 20601. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení ultrazvukem - Využití automatizované techniky phased array pro ocelové díly s malou tloušťkou stěny*. Praha: ÚNMZ, 2019.

[54] CIRC-IT Manual Scanners: CIRC-IT - Dual Probe Weld Scanner. *JIREH* [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: https://www.jireh.com/products/circ-it-dual-probe-weld-scanner/

[55] Olympus 7.5MHz Phased Array Transducer: Phased Array Probes and Wedges – Phased Array Inspections Probe Catalog. *Atecorp.com* [pdf]. 2016 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/olympus-7-5mhz-phased-array-transducer.pdf?ext=.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1: Proces kapilární (penetrační) zkoušky [3] 14
Obr. 2: Rozptylový tok v případě různé orientace vad [1] 15
Obr. 3: Princip radiografické zkoušky [4] 16
Obr. 4: Princip zkoušky vířivými proudy [5] 17
Obr. 5: Princip zkoušky akustickou emisí [8] 17
Obr. 6: Schéma tenzometru [9] 19
Obr. 7: Využití infračervené termografické zkoušky v energetice [12] 20
Obr. 8: Kmitání: (a) netlumené, (b) středně tlumené, (c) silně tlumené [13] 22
Obr. 9: Detekce defektu povrchovou vlnou [13] 23
Obr. 10: Schéma šikmého dopadu na rozhraní dvou prostředí [13] 25
Obr. 11: Schéma kolmého dopadu na rozhraní dvou prostředí [13] 26
Obr. 12: Zobrazení signálů: a) přímá sonda, b) dvojitá sonda [13] 27
Obr. 13: Schéma zobrazovacích metod: a) A – zobrazení, b) B – zobrazení [13] 29
Obr. 14: Schéma teoretického základu metody Phased array zobrazující časové zpoždění jednotlivých měničů [17] 29
Obr. 15: Výstup z ultrazvukové zkoušky metodou Phased array, S-sken [18] 30
Obr. 16: Výstup z ultrazvukové zkoušky metodou TFM, S-sken [21] 30
Obr. 17: Výstup z ultrazvukové zkoušky metodou TOFD, D-sken [22] 31
Obr. 18: Schéma, skutečný obraz a rentgenogram podélné trhliny [13] 38
Obr. 19: Schéma, skutečný obraz a rentgenogram příčné trhliny [13] 38
Obr. 20: Schéma a rentgenogram póru [13] 39
Obr. 21: Schéma a rentgenogram rovnoměrné pórovitosti [13] 39
Obr. 22: Schéma a rentgenogram shluku pórů [13] 39
Obr. 23: Schéma a rentgenogram řádku pórů [13] 40
Obr. 24: Schéma a rentgenogram protáhlého póru [13] 40
Obr. 25: Schéma a rentgenogram červovitého póru [13] 40
Obr. 26: Schéma a rentgenogram povrchového póru [13] 40
Obr. 27: Schéma a rentgenogram kráterové staženiny [13] 41
Obr. 28: Schéma a rentgenogram koncové kráterové staženiny [13] 41
Obr. 29: Schémata a rentgenogramy typů studeného spoje [13] 42
Obr. 30: Schémata, skutečné obrazy a rentgenogramy typů neprovařeného kořene [13] 42
Obr. 31: Schéma a rentgenogram hubeného kořene [13] 43
Obr. 32: Schéma tepelně ovlivněné zóny (TOZ) [44] 44
Obr. 33: Náčrt referenční měrky včetně charakteristických rozměrů [53] 49
Obr. 34: Kalibrace – vlevo: modelace reálného tvaru svaru; vpravo: certifikovaná měrka (vlastní zdroje) 50
Obr. 35: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 1) [51] 53
Obr. 36: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 2) [51] 54
Obr. 37: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 3) [51] 54
Obr. 38: Kumulativní délka indikací [51] 55
Obr. 39: Kritéria přípustnosti pro jednostranné zkoušení (stupeň 2) [51] 56
Obr. 40: Kritéria přípustnosti pro jednostranné zkoušení (stupeň 3) [51] 57
Obr. 41: Kumulativní délka indikací [51] 57
Obr. 42: Použitá zařízení – vlevo: defektoskop; vpravo: splitter (vlastní zdroje) 58

Obr. 43: Schéma geometrie zkoušeného svaru (vlastní zdroje) 59
Obr. 44: Vzorky s umělými vadami z austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (vlastní zdroje) 59
Obr. 45: Vzorky s umělými vadami z nízkolegované oceli 1.5415 (vlastní zdroje) 60
Obr. 46: Schéma geometrie zkoušeného svaru včetně vyznačených vad (vlastní zdroje) 60
Obr. 47: Vzorek s umělými vadami dle normy z austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (vlastní zdroje) 61
Obr. 48: Vzorek s umělými vadami dle normy z nízkolegované oceli 1.5415 (vlastní zdroje) 61
Obr. 49: Schéma řezu vzorkem s vyznačením umělých vad [53] 62
Obr. 50: Materiál 1.4541 – vlevo: přímo; uprostřed: přes svar; vpravo: vývrt (vlastní zdroje) 62
Obr. 51: Materiál 1.5415 – vlevo: přímo (vnější strana); uprostřed: přímo (vnitřní strana); vpravo: vývrt (vlastní zdroje) 63
Obr. 52: Materiál 1.5415 – vlevo: přes svar (vnitřní strana); vpravo: přes svar (vnější strana) (vlastní zdroje) 63
Obr. 53: Materiál 1.5415 – Použití manipulátoru JIREH CIRC-IT – Dual Probe Weld Scanner (vlastní zdroje) 64
Obr. 54: Materiál 1.5415 – JIREH CIRC-IT – Dual Probe Weld Scanner (28 dB) (vlastní zdroje) 64
Obr. 55: Materiál 1.5415 – JIREH CIRC-IT – Dual Probe Weld Scanner (32 dB) (vlastní zdroje) 65
Obr. 56: Detail svaru v leptaném stavu – vlevo: ocel 1.451; vpravo: ocel 1.5415 (vlastní zdroje) 66
Obr. 57: Vzorek austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (x100) – vlevo: mimo svar; vpravo: oblast svaru (vlastní zdroje) 66
Obr. 58: Vzorek austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (x50) – přechodová oblast (vlastní zdroje) 66
Obr. 59: Vzorek nízkolegované oceli 1.5415 (x100) – vlevo: mimo svar; vpravo: oblast svaru (vlastní zdroje) 67
Obr. 60: Vzorek nízkolegované oceli 1.5415 (x50) – přechodová oblast (vlastní zdroje) 67

Seznam tabulek

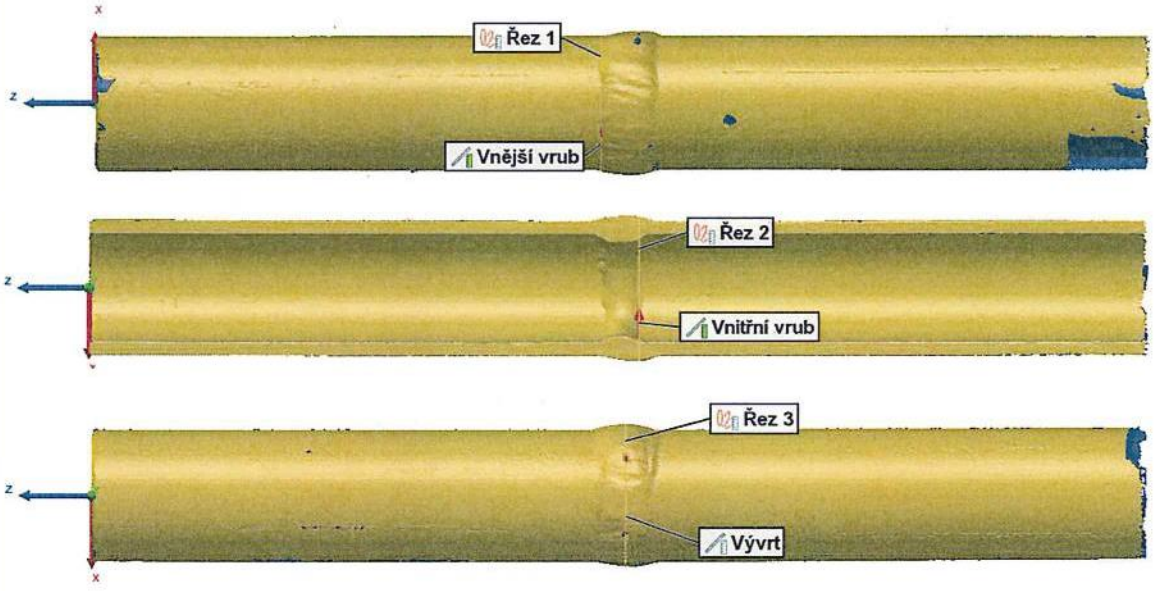
Tab. 1: Pásma zvuku na základě frekvence [14] 22
Tab. 2: Chemické složení lité oceli 1.7357 v hm. % [23] 32
Tab. 3: Chemické složení lité oceli 1.7706 v hm. % [24] 32
Tab. 4: Chemické složení feritické oceli P91 v hm. % [25] 32
Tab. 5: Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli 1.4301 v hm. % [26] 33
Tab. 6: Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 v hm. % [27] 33
Tab. 7: Chemické složení austenitické korozivzdorné oceli 1.4571 v hm. % [28] 33
Tab. 8: Chemické složení nízkolegované oceli 1.5415 v hm. % [29] 34
Tab. 9: Chemické složení nízkolegované oceli 1.7335 v hm. % [30] 34
Tab. 10: Chemické složení nízkolegované oceli 1.7380 v hm. % [31] 34
Tab. 11: Chemické složení nízkolegované oceli 1.7715 v hm. % [32] 34
Tab. 12: Chemické složení uhlíkové oceli 1.0045 v hm. % [33] 35

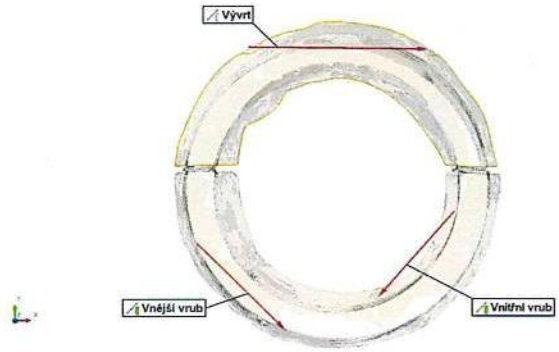
Tab. 13: Chemické složení uhlíkové oceli 1.0345 v hm. % [34] 35
Tab. 14: Chemické složení feritické oceli 1.4000 v hm. % [35] 35
Tab. 15: Chemické složení martenzitické oceli 1.4923 v hm. % [36] 36
Tab. 16: Chemické složení oceli 1.4902 v hm. % [37] 36
Tab. 17: Chemické složení oceli 1.6957 v hm. % [38] 36
Tab. 18: Chemické složení oceli 1.6985 v hm. % [39] 36
Tab. 19: Chemické složení oceli 1.8070 v hm. % [40] 37
Tab. 20: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 1) [51] 53
Tab. 21: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 2) [51] 53
Tab. 22: Kritéria přípustnosti pro oboustranné zkoušení (stupeň 3) [51] 54
Tab. 23: Kritéria přípustnosti pro jednostranné zkoušení (stupeň 2) [51] 56
Tab. 24: Kritéria přípustnosti pro jednostranné zkoušení (stupeň 3) [51] 56
Tab. 25: Parametry použité sondy 7,5CCEV35-16 [55] 58
Tab. 26: Tabulka použitelnost metody Phased array 65
Tab. 27: Vybraný rozsah požadovaných zkoušení svarů metodou RT/UT [50] 68
Tab. 28: Tabulkové hodnoty procesu svařování 68
Tab. 29: Rozdělení svarů na základě WPS 68
Tab. 30: Počet provedených svarů jednotlivých svářečů dle WPS 69
Tab. 31: Počet zkoušených svarů na základě četnosti procentuální podmínky dle WPS 69
Tab. 32: Počty vybraných a testovaných svarů 70
Tab. 33: Časová a finanční náročnost NDT daného projektu 70

PŘÍLOHA č. 1

Protokol měření vzorku z oceli 1.4541 za pomocí 3D skeneru

CVŘ Centrum výzkumu Řež	Zkušební těleso Půltrubka D25x2,5	Protokol č. *(Pr.No.)*	350
		Revize *(Revision)*	0
		Strana *(Page)*	1/3
Protokol - 3D měření		Datum m ěř. (*date*)	9.3.2023

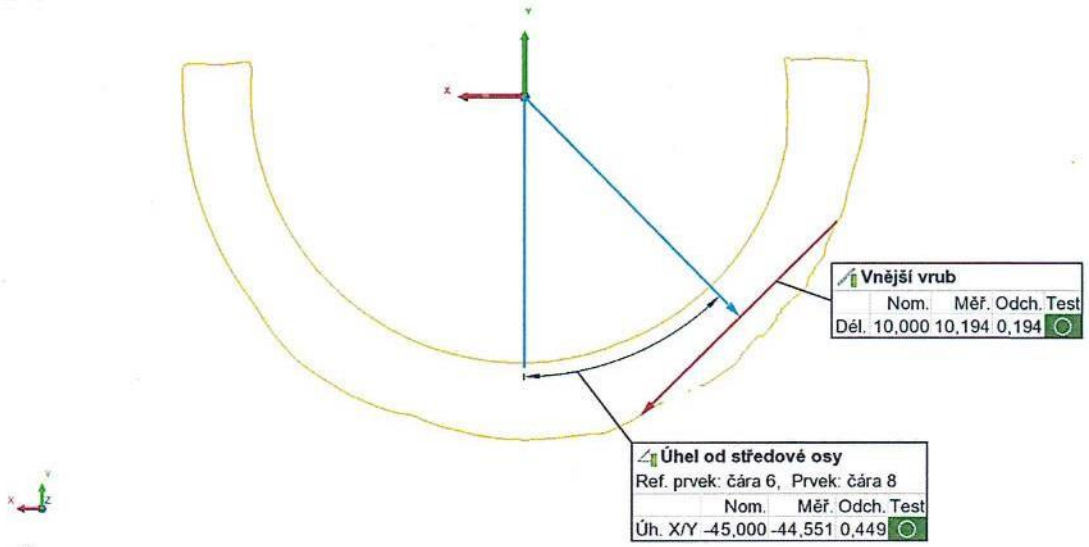




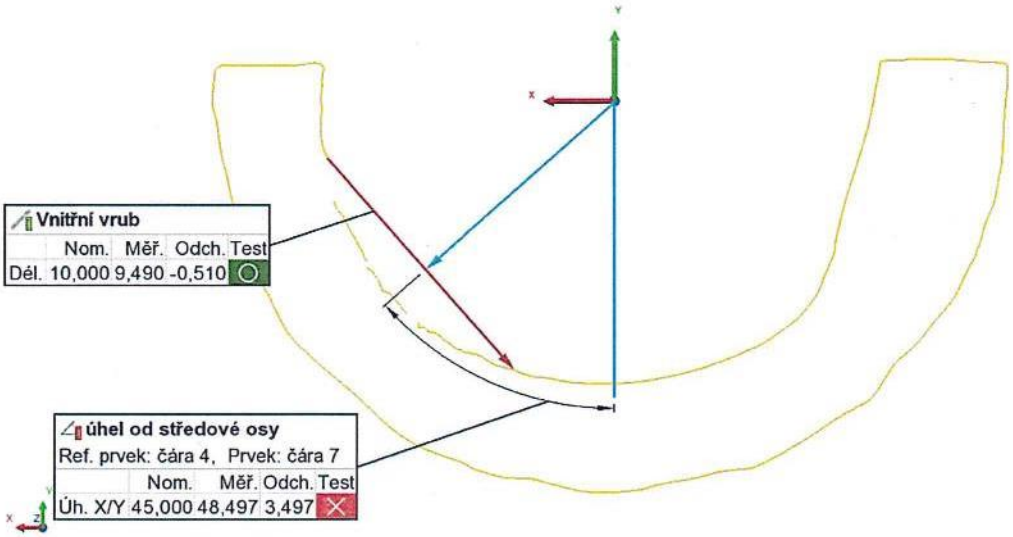
Popis dílu: *(Description)*	*Půltrubka D25x2,5*	Smlouva č.: *(Contract No.)*	
Zákazník: *(Client)*	DOOSAN Škoda Power s.r.o.	Objednávka č.: *(Order No.)*	RN350005686 Rev. 0
Identifikační č.: *(Identification No.)*		Měření provedl: *(Measured by)*	Pavel Zahrádka
Měřící přístroj *(Instrument)*	Hexagon Romer Arm RS4	Místo měření: *(Test location)*	Plzeň
Materiál *(Material)*	1.4541	Stav povrchu: *(Surface condition)*	očištěný
Výkres č.: *(Drawing No.)*	Cz 5833	Teplota povrchu: *(Surface temp.)*	20°C
Společnost: *(Company)*	Centrum výzkumu Řež s.r.o.	Oddělení: *(Department)*	8730 - Diagnostika a kvalifikace
Vyhodnocení: *(Assesed)*	Pavel Zahrádka	Schválení: *(Approved)*	Jana Vesel á
Datum/ Podpis: *(Date/Signature)*	4.4.2023	Datum/ Podpis: *(Date/Signature)*	4.4.2023

CVŘ Centrum výzkumu Řež	Zkušební těleso Půltrubka D25x2,5	Protokol č. *(Pr. No.)*	*350*
		Revize *(Revision)*	*0*
		Strana *(Page)*	2/3
Protokol - 3D měření		Datum m ěř. (*date*)	9.3.2023

Řez 1:

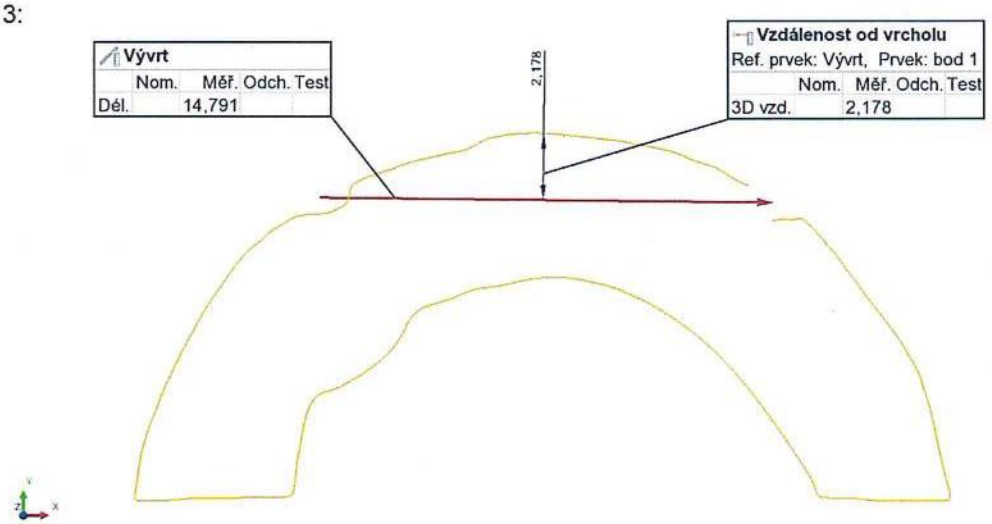


Řez 2:



CVŘ Centrum výzkumu Řež	Zkušební těleso Půltrubka D25x2,5	Protokol č. *(Pr. No.)*	*350*
		Revize *(Revision)*	*0*
Protokol - 3D měření		Strana *(Page)*	3/3
		Datum m ěř. (*date*)	9.3.2023

Řez 3:

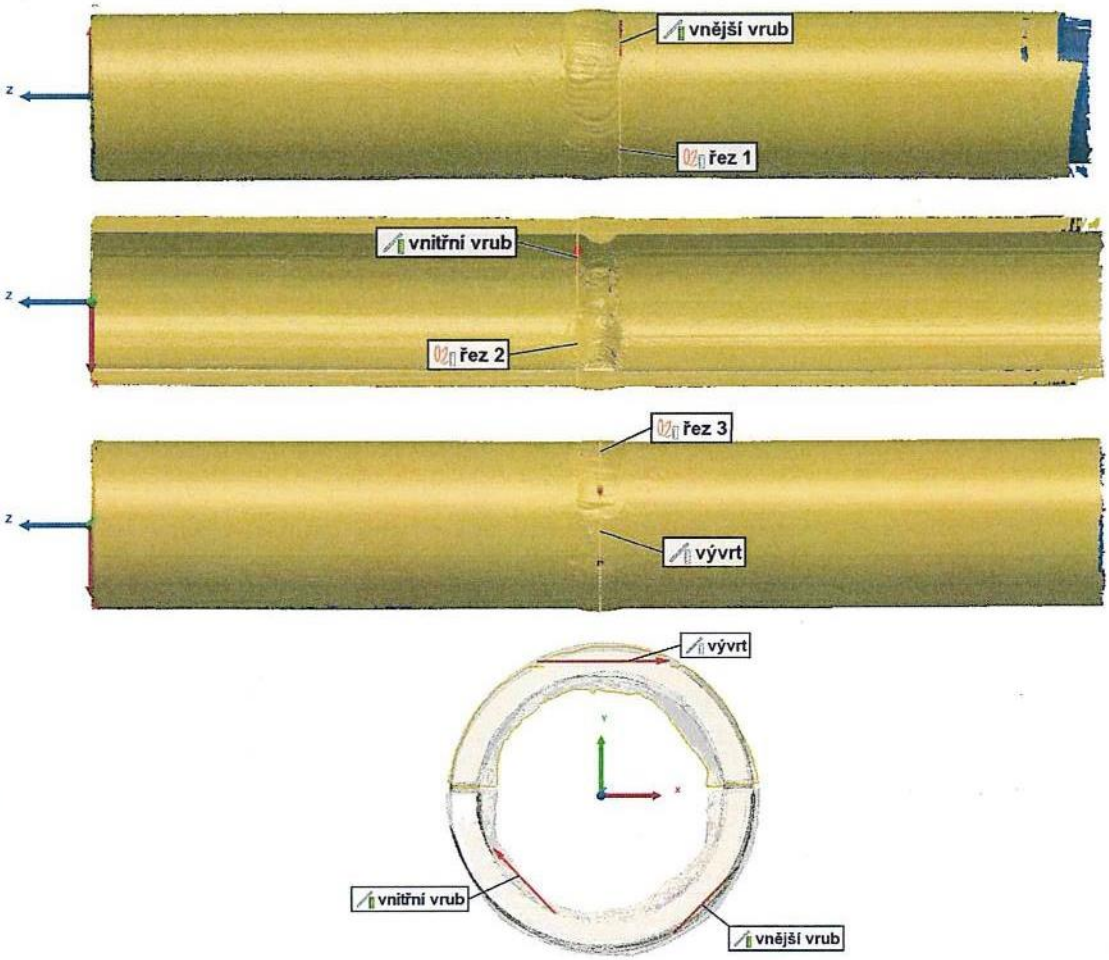


Odchylky v geometrii stěny jsou d ány tím, že řezy ve kter ých jsou rozměry uměl ých vad hodnoceny, procházı přes svarov ý spoj.

PŘÍLOHA č. 2

Protokol měření vzorku z oceli 1.5415 za pomocí 3D skeneru

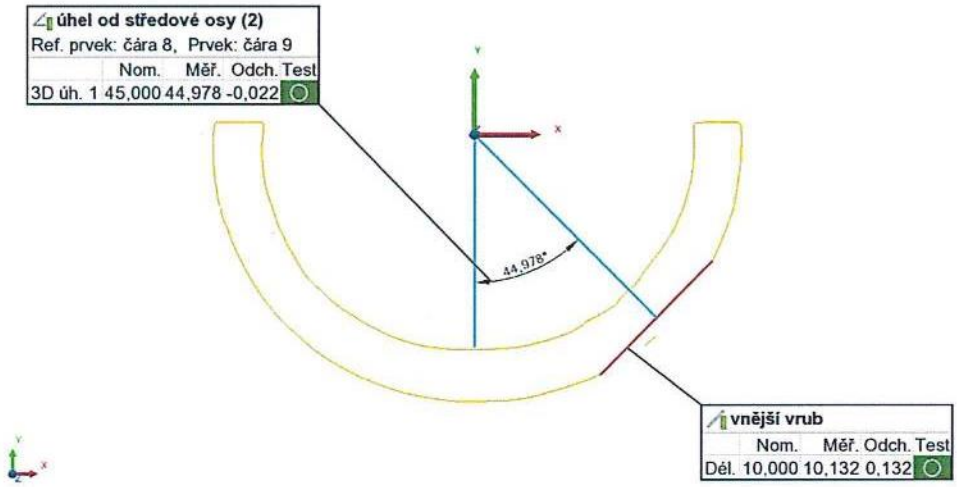
CVŘ Centrum výzkumu Řež	Zkušební těleso Půltrubka D33,5x3	Protokol č. *(Pr.No.)*	349
		Revize *(Revision)*	0
		Strana *(Page)*	1/3
Protokol - 3D měření		Datum m ěř. (*date*)	9.3.2023



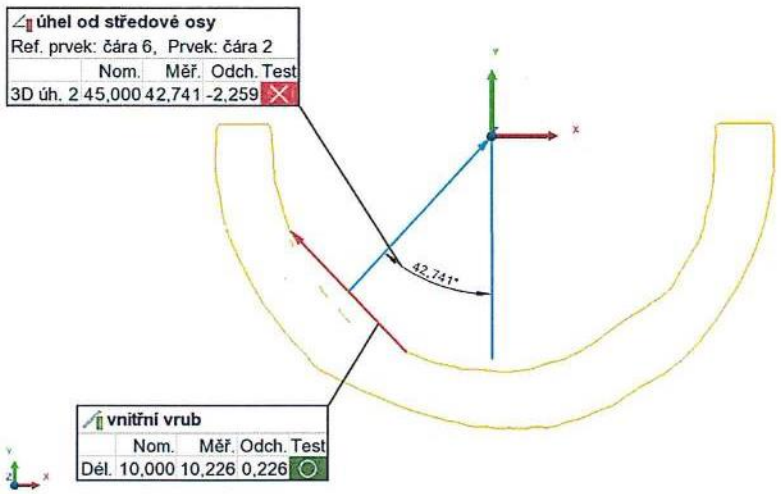
Popis dílu: *(Description)*	*Půltrubka D33,5x3*	Smlouva č.: *(Contract No.)*	
Zákazník: *(Client)*	DOOSAN Škoda Power s.r.o.	Objednávka č.: *(Order No.)*	RN3500005686 rev.0
Identifikační č.: *(Identification No.)*		Měření provedl: *(Measured by)*	Pavel Zahrádka
Měřicí přístroj *(Instrument)*	Hexagon Romer Arm RS4	Místo měření: *(Test location)*	Plzeň
Materiál *(Material)*	1.5415	Stav povrchu: *(Surface condition)*	očištěný
Výkres č.: *(Drawing No.)*	Cz 5833	Teplota povrchu: *(Surface temp.)*	20°C
Společnost: *(Company)*	Centrum výzkumu Řež s.r.o.	Oddělení: *(Department)*	8730 - Diagnostika a kvalifikace
Vyhodnocení: *(Assesed)*	Pavel Zahrádka	Schválení: *(Approved)*	Jana Vesel á
Datum/ Podpis: *(Date/Signature)*	4.4.2023	Datum/ Podpis: *(Date/Signature)*	4.4.2023

CVŘ Centrum výzkumu Řež	Zkušební těleso Půltrubka D33,5x3	Protokol č. *(Pr. No.)*	*349*
		Revize *(Revision)*	*0*
		Strana *(Page)*	2/3
Protokol - 3D měření		Datum m ěř. (*date*)	9.3.2023

Řez 1:

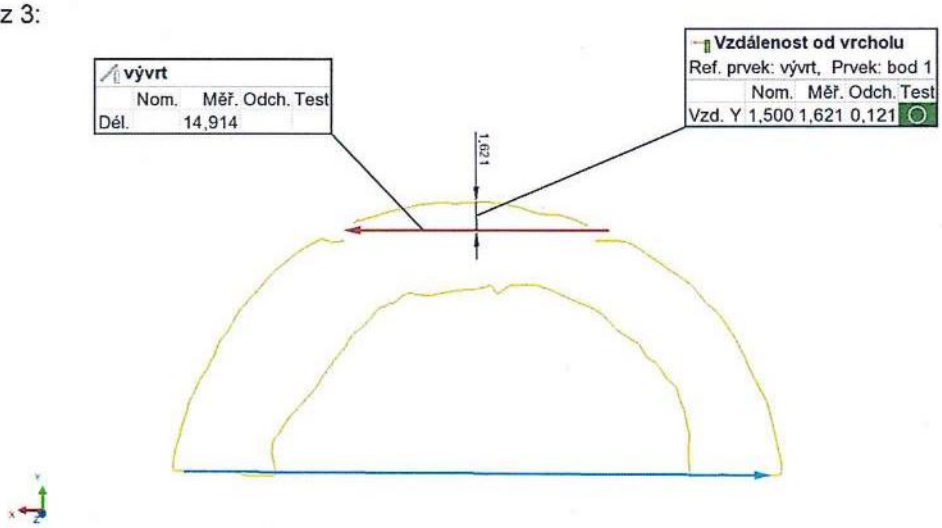


Řez 2:



CVŘ Centrum výzkumu Řež	Zkušební těleso Půltrubka D33,5x3	Protokol č. *(Pr. No.)*	*349*
		Revize *(Revision)*	*0*
		Strana *(Page)*	3/3
Protokol - 3D měření		Datum m ěř. (*date*)	9.3.2023

Řez 3:



Odchylky v geometrii stěny jsou d ány tím, že řezy ve kter ých jsou rozměry uměl ých vad hodnoceny procházi přes svarový spoj.