

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270014 - Materiálové inženýrství
a výrobní technologie
Studijní specializace: N0715A270014S00 - Materiálové
inženýrství a výrobní technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Perspektivní metody nedestruktivního zkoušení pro použití v
energetice**

Autor: Bc. Jitka KLAISNEROVÁ
Vedoucí práce: Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jitka KLAISNEROVÁ**
Osobní číslo: **S19N0131P**
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce: **Perspektivní metody nedestruktivního zkoušení pro použití v energetice**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Zkoumané oblasti uplatnění NDT v energetickém průmyslu
2. Popis NDT metod a jejich využití
3. Návrh experimentu
4. Experimentální měření na zadaných vzorcích
5. Diskuse výsledků
6. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Krivit Steven B. (editor) *Nuclear energy encyklopedia: science, technology, and applications*. Wiley; 1st Edition, ISBN: 978-0470894392, 2011

Vollmer Michael, Klaus-Peter Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, Wiley-VCH, ISBN: 978-3-527-41351-5, 2018

Schmerr Jr, Lester W., *Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays*, Springer International Publishing, ISBN: 978-3-319-07271-5, 2015

Gupta C. K. *Materials in Nuclear Energy Applications: Volume I*, Chapman and Hall/CRC, ISBN: 978-1315895741, 2018

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

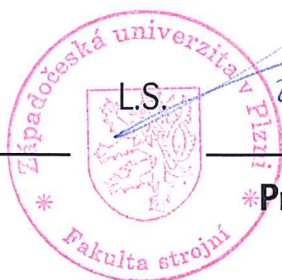
Konzultant diplomové práce: **Ing. Pavel Mareš, Ph.D.**
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



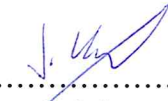
Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

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: 25.5.2021


.....
podpis autora

Poděkování

V této části bych ráda poděkovala vedoucímu této práce Ing. Petru Benešovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Pavlu Marešovi za odborné vedení, cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost. Dále bych chtěla poděkovat zaměstnancům Centra výzkumu Řež a Ing. Michalu Švantnerovi, Ph.D. z Nových technologií – Výzkumného centra Západočeské univerzity v Plzni za pomoc při realizaci experimentální části této práce. Centru výzkumu Řež děkuji za zapůjčení vzorků a použití zařízení. Mé poděkování patří i blízké rodině za podporu ve studiu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Klaisnerová	Jméno Jitka	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Perspektivní metody nedestruktivního zkoušení pro použití v energetice		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	91	TEXTOVÁ ČÁST	76	GRAFICKÁ ČÁST	15
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce je zaměřena na ověření aplikace metod nedestruktivního zkoušení na určité oblasti v energetickém průmyslu, konkrétně kontrolu heterogenních svarů, sklolaminátů a měření mezery tlakové nádoby a biologického stínění. Použitými metodami jsou technika Phased Array a její rozšíření, pulzní termografie a měření pomocí 3D skenování.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	NDT, energetický průmysl, detekce vad, heterogenní svary, sklolamináty, měření mezery, phased array, pulzní termografie, 3D skenování

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Klaisnerová	Name Jitka	
STUDY PROGRAMME	N0715A270014 Materials Science and Manufacturing Technology		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Perspective methods of non-destructive testing in the energy industry		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	91	TEXT PART	76	GRAPHICAL PART	15
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis is focused on the control of the application method of non-destructive testing in certain areas in energy industry, namely the control of heterogeneous welds, fiberglass material and measuring the gap of the pressure vessel and biological shielding. The methods used are the Phased Array technique and its extension, pulse thermography and measurements using 3D scanning.
KEY WORDS	NDT, energy industry, defect detection, heterogeneous welds, fiberglass, gap measurement, Phased Array, pulse thermography, 3D scanning

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	14
TEORETICKÁ ČÁST	
1 Úvod	15
2 Zkoumané oblasti uplatnění NDT v energetickém průmyslu	16
2.1 Heterogenní svary v energetice	16
2.1.1 Vady heterogenních svarů	16
2.2 Sklolamináty	17
2.2.1 Vady sklolaminátů	18
2.3 Měření mezery tlakové nádoby	19
3 Popis použitých metod nedestruktivního testování	21
3.1 Phased array	21
3.1.1 Úvod	21
3.1.2 Historie	21
3.1.3 Princip techniky phased array	23
3.1.4 Konfigurace ultrazvukových paprsků	24
3.1.5 Presentace výsledků	25
3.1.6 Sondy	28
3.1.7 Využití techniky phased array	29
3.2 Full Matrix Capture a metoda zpracování dat Total Focusing Method	30
3.2.1 Úvod	30
3.2.2 Princip techniky FMC/TFM	30
3.2.3 Full Matrix Capture	31
3.2.4 Total Focusing Method	31
3.2.5 Využití Full Matrix Capture / Total Focusing Method	32
3.3 Pulzní termografie	32
3.3.1 Úvod do aktivní termografie	32
3.3.2 Metody aktivní termografie	32
3.3.3 Princip pulzní termografie	33
3.3.4 Zařízení pulzní termografie	34
3.3.5 Záznam a zpracování dat	34
3.3.6 Využití pulzní termografie	36
3.4 3D laserové skenování	37

3.4.1	Úvod.....	37
3.4.2	Princip 3D laserového skenování	37
3.4.3	Laserové skenery	39
3.4.4	Endoskopy s 3D fázovým měřením.....	39
3.4.5	Využití 3D laserového skenování	39
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST		
4	Cíl experimentálního programu	41
5	Heterogenní svary	42
5.1	Vlastnosti základních a přídavného materiálu a jejich vady	42
5.1.1	Ocel 1.4541	42
5.1.2	Ocel P265GH.....	43
5.1.3	OK Tigor 16.95.....	44
5.1.4	Struktura jednotlivých materiálů	44
5.2	Vzorky heterogenních svarů.....	45
5.3	Kontrola pomocí RTG	46
5.3.1	Výsledky kontroly pomocí RTG.....	46
5.4	Kontrola pomocí PAUT.....	47
5.4.1	Výsledky kontroly pomocí PAUT	47
5.5	Shrnutí výsledků měření	49
6	Aplikace Dynamic Depth Focussing, techniky sběru dat Full Matrix Capture a metody zpracování dat Total Focusing Method	50
6.1	Kalibrační měřka a zkušební vzorky	50
6.1.1	Kalibrační měřka.....	50
6.1.2	Zkušební těleso č. 29	50
6.1.3	Zkušební těleso č. 30	51
6.2	Sběr dat pomocí FMC.....	52
6.2.1	Kalibrační měřka.....	52
6.2.2	Zkušební těleso č. 29	53
6.2.3	Zkušební těleso č. 30	54
6.3	Shrnutí výsledků měření	54
7	Nedestruktivní testování sklolaminátů pomocí pulzní termografie	56
7.1	Vzorky	56
7.2	Použitá zařízení.....	57
7.3	Průběh a výsledky měření.....	58
7.3.1	Měření pomocí ATI6000	58
7.3.2	Měření pomocí SC6700	60

7.3.3	Shrnutí výsledků měření	61
8	Měření mezery tlakové nádoby pomocí 3D skenování.....	62
8.1	Simulace mezery.....	62
8.2	Měření mezery pomocí endoskopu.....	63
8.3	Měření mezery pomocí čárového 3D skenování	64
8.4	Shrnutí výsledků měření	66
9	Diskuse výsledků	67
10	Závěr.....	69
11	Citovaná literatura	70
12	Seznam příloh.....	75

Seznam symbolů a zkratk

A	Austenit.
CCD	Charge-Coupled Device. Zařízení s vázanými náboji.
CVŘ	Centrum výzkumu Řež.
DDF	Dynamic Depth Focusing. Dynamická fokusace do hloubky.
F	Ferit.
FMC	Full Matrix Capture.
IR	Infračervená.
IVR	In-vessel retention.
JE	Jaderná elektrárna.
MMK	Mezikrystalová koroze.
NDT	Non-destructive Testing. Nedestruktivní testování
NTC	Nové technologie – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni
Obr.	Obrázek.
PAUT	Phased Array Ultrasonic Testing. Ultrazvukové testování pomocí fázových polí.
PCT	Principal Component Thermography.
PM	Přídavný materiál.
PPT	Pulsed Phase Thermography. Pulzní fázová termografie.
RF	Radio-frequency.
RPV	Reactor Pressure Vessel. Tlaková nádoba reaktoru.
RTG	Rentgenové záření.
TCG	Time Corrected Gain. Časově korigované zesílení.
TFM	Total Focusing Method
TOO	Tepelně ovlivněná oblast.
UT	Ultrasonic Testing. Ultrazvukové testování.
UV	Ultra Violet. Ultrafialové.
ZM	Základní materiál.
ZT	Zkušební těleso.

Seznam obrázků

Obr. 1 – Vady svaru: a) studený spoj, b) kráterová trhлина, c) zápal, d) póry [62]	17
Obr. 2 – Kompozitní opláštění chladicí jednotky v Gdaňsku [8].....	18
Obr. 3 – Označena suchá vlákna pod povrchem [9] Obr. 4 – Označená menší delaminace [9]	19
Obr. 5 – Schéma systému IVR [11] Obr. 6 – Schéma reaktoru VVER-440/V213 a systém IVR-ERVC [12].....	20
Obr. 7 – Detail měřené mezery reaktoru VVER-440/V213 [12]	20
Obr. 8 – Schéma konstruktivní a destruktivní interakce vln [15]	22
Obr. 9 – Přenosný PA UT analogový defektoskop [54]	22
Obr. 10 – Zákon zpoždění [16]	23
Obr. 11 – Příklady zákonů zpoždění: a) nejsou použity žádné zákony zpoždění, b) použití klínu, c) hloubkové zaostřování, d) kombinované řízení a hloubkové zaostřování [16]	24
Obr. 12 – Elektronické skenování s 16 aktivními prvky [19]	25
Obr. 13 – Princip dynamického zaostřování do hloubky [61] Obr. 14 – Sektorové skenování [19].....	25
Obr. 15 – Vizualizace skenů [64].....	25
Obr. 16 – Prezentace A-skenu: RF signál (vlevo) a usměrněný signál (vpravo) [19]	26
Obr. 17 – Ukázka barevného kódování usměrněného signálu Askenu k vytvoření barevně zpracovaného B-skenu [19].....	26
Obr. 18 – Zobrazení amplitudy RF signálu pomocí úrovní šedé [19].....	26
Obr. 19 – Nekorigovaný B-sken zobrazující reflektor [19]	27
Obr. 20 – B-sken upravený o úhel lomu [19].....	27
Obr. 21 – C-sken [19] Obr. 22 – D-sken [19]	27
Obr. 23 – S-sken [6]	27
Obr. 24 – Průřez sondy fázového pole: 1) koaxiální kabel, 2) kabeláž prvku, 3) podpora, 4) vnitřní rukáv, 5) piezokompozitní element [20].....	28
Obr. 25 – Příklady fázových sond [21]	28
Obr. 26 – Příklady využití sondy se zakřiveným klínem přizpůsobeným vzorku: a) konkávní – příčný, b) konvexní – příčný, c) konkávní podélný, d) konvexní – podélný [19].....	29
Obr. 27 – Typy nejčastějších fázových polí [20]	29
Obr. 28 – Porovnání lineárního skenování pomocí PAUT (vlevo) a techniky FMC/TFM (vpravo) [55]	30
Obr. 29 – Oblast sběru dat pomocí FMC/TFM [63]	30
Obr. 30 – Sběr dat pomocí čtyř prvků sondy a výsledná matice získaných dat [24]	31
Obr. 31 – Diagram závislost teploty na čase při vybuzení pulzu při metodách termografie Lock-In a transient [27]	33
Obr. 32 – Schéma principu vibro-termografie [28].....	33
Obr. 33 – Diagram závislost teploty na čase při vybuzení pulzu při metodě pulzní termografie [27]	34
Obr. 34 – Schéma sestavy zařízení pulzní termografie [16]	34
Obr. 35 – Schéma vývoje teploty: a) datová 3D matice, b) teplotní profil pro vadné (pixel 2) a nezávadné (pixel 1) pixely [29].....	35
Obr. 36 – Vzorek laminátového kompozitu s otvory: a) vzorek, b) vývoj teploty (tepelný pulz při $t = 0$, c) teplotní kontrast mezi oblastí díry a homogenní částí vzorku, d) barevná reprezentace IR obrazu při $t = 0,4$ s, e) IR obraz při $0,033$ s, f) IR obraz při $t = 0,067$ s, h) IR obraz při $t = 0,400$ s [29].....	36

Obr. 37 – Optická triangulační geometrie: α – úhel triangulace, M – zvětšovací faktor, b – základní čára, z – hloubková souřadnice bodu P, z' – poloha na CCD kameře [34]	38
Obr. 38 – Pracovní princip laserového skeneru – získávání řezu [34]	38
Obr. 39 – Ukázka měření délky trhliny pomocí 3D skenování [36]	38
Obr. 40 – Ukázka měření hrany lopatky pomocí point to line [36]	38
Obr. 41 – Ukázka měření hloubky defektu [36]	39
Obr. 42 – Lopatka s korozními důlky a sken korozních důlků	40
Obr. 43 – Odchylky (žlutá oblast) na lopatě Francisovy turbíny od ideálního tvaru [39]40	
Obr. 44 – Měření hloubky trhliny na replice [39]	40
Obr. 45 – Graf závislosti obsahu uhlíku na tvrdosti oceli způsobené přítomností martenzitu [4]	44
Obr. 46 – Schaefflerův diagram: A – austenit; F – ferit; M – martenzit [59]	45
Obr. 47 – Použité vzorky: (zleva) Vzorek č. 1, vzorek č. 3, vzorek č. 6	45
Obr. 48 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 1 před korozním testem: červená – 2013, zelená – 5013, modrá – 515, 506	46
Obr. 49 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 1 po korozním testu: 1A – výchozí stav, 1B – kotlová voda	47
Obr. 50 – Měrky K2 použité pro kalibraci TCG: 304 nerezová ocel (vlevo) a A1018 ocel (vpravo)	47
Obr. 51 – Výsledek měření vzorku č. 1 ze strany F před korozním testem	48
Obr. 52 – Výsledek měření vzorku č. 1 ze strany A před korozním testem	48
Obr. 53 – Výsledek měření vzorku č. 1 ze strany F po korozním testu	48
Obr. 54 – Výsledek měření vzorku č. 1 ze strany A po korozním testu	49
Obr. 55 – Kalibrační měrka UT_B-6V1,5-R25/50/75	50
Obr. 56 – Zkušební těleso č. 29	51
Obr. 57 – Část RTG snímku ZT č. 29: 401 (označeny šipkami)	51
Obr. 58 – Zkušební těleso č. 30	51
Obr. 59 – Část RTG snímku ZT č. 30: 3032 (označen šipkou)	
Obr. 60 – Část RTG snímku ZT č. 30: 401 (označen šipkou)	51
Obr. 61 – Kalibrační měrka, S-sken 30° - 80°, FMC/TFM: 2 celá echa vývrtů, 1 částečné	52
Obr. 62 – Kalibrační měrka, S-sken 40° - 80°, FMC/TFM: 1 celé echo vývrtu, 1 částečné	52
Obr. 63 – Kalibrační měrka, S-sken 40° - 70°, PAUT: 1 celé echo vývrtu, 1 částečné ..	52
Obr. 64 – Kalibrační měrka, S-sken 0° - 80°, FMC/TFM, zesílení o 6dB: parných všech 6 ech vývrtů	52
Obr. 65 – ZT č. 29, strana A, S-sken 35° - 75°, PAUT, studený spoj zakroužkován červeně	53
Obr. 66 – ZT č. 29, strana A, S-sken 35° - 75°, PAUT/DDF, žlutá: nová detekovaná indikace	53
Obr. 67 – ZT č. 29, strana B, S-sken 35° - 75°, PAUT, červená: indikace	53
Obr. 68 – ZT č. 29, strana B, S-sken 35° - 75°, PAUT/DDF, žlutá: indikace v pozici 94 mm	53
Obr. 69 – ZT č. 30, S-sken 40° - 80°, PAUT, červená: indikace v pozici 179 mm	54
Obr. 70 – ZT č. 30, S-sken 40° - 80°, PAUT/DDF, červená: indikace v pozici 180 mm ..	54
Obr. 71 – ZT č. 30, S-sken 40° - 80°, FMC/TFM, žlutá: nová indikace	54
Obr. 72 – ZT č. 30, S-sken 45° - 85°, FMC/TFM, fokusace do hloubky 8 mm, žlutá: nová indikace	54
Obr. 73 – Zkušební tělesa LAM – 1.1 (vlevo) a LAM 1.2 (vpravo) – vnější strana	56

Obr. 74 – Zkušební tělesa LAM – 1.1 (vlevo) a LAM 1.2 (vpravo) – vnitřní strana.....	56
Obr. 75 – Sestava ATI6000 při měření vzorku LAM – 1.1	57
Obr. 76 – Záběry před (nahore) a po (dole) použití funkce „Auto focus“	57
Obr. 77 – Sestava SC6700 měřící těleso LAM – 1.1	58
Obr. 78 – Kontrola tělesa LAM – 1.1 pomocí ATI6000, 1-2 s, vady označeny šipkou .	59
Obr. 79 – Kontrola tělesa LAM 1.2 pomocí ATI6000, 1-2 s, vady označeny	59
Obr. 80 – Kontrola tělesa LAM 1.2 pomocí ATI6000, 4 s, vady označeny šipkou.....	59
Obr. 81 – Nerovnosti povrchu na tělese LAM – 1.1	60
Obr. 82 – Kontrola tělesa LAM – 1.1 pomocí SC6700, vady označeny šipkou	60
Obr. 83 – Kontrola tělesa LAM – 1.2 pomocí SC6700, vady označeny šipkou	61
Obr. 84 – Detail grafu znázorňující deformaci RPV: Černá linie – studená RPV, fialová – horká RPV, červená – štít [12]	63
Obr. 85 – Simulace mezery pomocí dvou nerezových těles a koncových měrek s rozměrem 10 mm.....	63
Obr. 86 – Sestava endoskopu a zkušebních těles	63
Obr. 87 – umístění konce sondy v mezeře	63
Obr. 88 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 1.....	64
Obr. 89 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 1.....	65
Obr. 90 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 1.....	65
Obr. 91 – Data získána pomocí skenovacího ramena a softwaru PolyWorks.....	66
Obr. 92 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 3 před korozním testem: červená- 2013, zelená – 5013, fialová – 5041, 506.....	
Obr. 93 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 3 po korozním testu: 1C – kotlová voda + 0,005 % NaCl, 1D – kotlová voda + 0,05 % NaCl	
Obr. 94 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 6 před korozním testem: červená – 2013, fialová – 5041, žlutá – 401, 506	
Obr. 95 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 6 po korozním testu: 1E – kotlová voda + 0,5 % NaCl, 1F – kotlová voda + 5 % NaCl	i
Obr. 96 – Výsledek měření vzorku č. 3 ze strany F před korozním testem	ii
Obr. 97 – Výsledek měření vzorku č. 3 ze strany A před korozním testem	ii
Obr. 98 – Výsledek měření vzorku č. 3 ze strany F po korozním testu	ii
Obr. 99 – Výsledek měření vzorku č. 3 ze strany A po korozním testu	iii
Obr. 100 – Výsledek měření vzorku č. 6 ze strany F před korozním testem	iii
Obr. 101 – Výsledek měření vzorku č. 6 ze strany A před korozním testem	iii
Obr. 102 – Výsledek měření vzorku č. 6 ze strany F po korozním testu	iv
Obr. 103 – Výsledek měření vzorku č. 6 ze strany A po korozním testu	iv
Obr. 104 – ZT č. 29, strana A, S-sken 35° - 75°, FMC/TFM	vii
Obr. 105 – ZT č. 29, strana A, S-sken 60° - 85°, FMC/TFM	vii
Obr. 106 – Deformace RPV v časovém úseku 10 h [12]	xiii
Obr. 107 – Výsledek měření pomocí endoskopu 3D skenovacího objektivu č. 2	xiv
Obr. 108 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 3.....	xiv
Obr. 109 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 4.....	xiv
Obr. 110 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 5.....	xv
Obr. 111 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 6.....	xv

Seznam tabulek

Tab. 1 – Chemické složení základního materiálu P265GH v hm. % [42], [43].....	43
Tab. 2 – Chemické složení základního materiálu P265GH v hm. % [44]	43
Tab. 3 – Chemické složení přídatného materiálu OK Tigor 16.95 v hm. % [45]	44
Tab. 4 – Výsledky výpočtů CrE, NiE a obsah δ -feritu zadaných vzorků	44
Tab. 5 – Výsledky detekce vad pomocí RTG a PAUT a určení, zda konkrétní vada byla detekována (✓), nebyla detekována (✗) a těleso vadu neobsahuje (-).....	49
Tab. 6 – Výsledky detekce vad pomocí PAUT, FMC/TFM, DDF a určení, zda konkrétní vada byla detekována (✓), nebyla detekována (✗) a těleso vadu neobsahuje (-).....	55
Tab. 7 – Hloubky a průměry jednotlivých umělých defektů.....	57
Tab. 8 – Parametry jednotlivých sestav pulzní termografie [30], [49]	58
Tab. 9 – Polohy vad, jejich průměr a hloubka a určení, zda byly detekovány sestavou ATI600 a SC6700	61
Tab. 10 – Hodnoty naměřené pomocí endoskopu s 3D adaptérem a odchylka od základního rozměru.....	64
Tab. 11 – Hodnoty naměřené pomocí 3D skenovacího ramene a odchylka od základního rozměru.....	65
Tab. 12 – Výsledná odchylka měření a charakteristiky měření	66
Tab. 13 – Výsledná tabulka zkoumaných oblastí a metod aplikovaných na tyto oblasti	68

TEORETICKÁ ČÁST

1 Úvod

Energetický průmysl je v současnosti jedním z nejdůležitějších průmyslů na světě. Energetický průmysl nezahrnuje jen výrobu elektrické a tepelné energie, ale také i její distribuci ke koncovým zákazníkům. V případě vzniku vady a následné poruchy systému by nastal velký problém. Bez správného fungování celého systému by nebyla dodávána elektrická energie do rozsáhlých oblastí a způsobila by tak řadu problémů s možnými tragickými následky, jelikož dnešní svět je velmi závislý na přístrojích, které pracují výhradně na elektřinu. V případě dlouhodobého výpadku není řada domácností, institucí i firem schopna fungovat, ať už jde o přívod tepla, provoz strojů, čerpacích stanic a domácích spotřebičů. Mimo zamezení dodávek energie by mohla sama příčina špatného fungování ohrozit široké okolí okolo elektrárny, což je případ například poruchy jaderné elektrárny, nebo by mohla ohrozit obsluhu, která se nachází v místě poruchy.

Jaderné elektrárny (JE) jsou obecně pro společnost velmi znepokojivé. Většinou v důsledku havárie v Černobylu a Fukušimě projevuje veřejnost extrémní citlivost vůči jaderným událostem, aniž by byl brán zřetel na jejich skutečný dopad [1].

Aby se zapříčinilo katastrofickým scénářům a ztrátám z nevyroby při neplánovaných odstávkách, stává se důležitým prvkem provozu energetických zařízení jejich pravidelná kontrola, která umožňuje včasnou detekci začínajících nebo již vzniklých vad. Pro detekci vad se využívají nedestruktivní metody zkoušení (Non-destructive Testing – NDT), které jsou aplikovány v různých oblastech dle potřeby.

První oblastí využití NDT jsou kontroly svarů. Svary jsou po příčinách jako je selhání lidského faktoru nebo vliv přírody (kam spadá např. zemětřesení nebo záplavy) nejčastější příčinou selhávání komponent elektráren. Svary se v energetice vyskytují homogenní i heterogenní, přičemž heterogenní jsou náchylnější ke vzniku defektů a jsou složitější na kontrolu zejména z pohledu ultrazvukového zkoušení. S poruchami svarů je úzce spjata i koroze, která v mnohých případech iniciuje vznik trhliny, která se dále šíří buď samovolně nebo vlivem mechanického namáhání. Koroze vzniká vlivem přítomnosti různých agresivních par a vlhkosti, které jsou v elektrárnách přítomné. Často dochází také k únavovému poškození svarů.

Další oblastí, na kterou by se měla oblast NDT zaměřit, je zkoušení materiálů, které nejsou kovové a není zatím stanovena vhodná metoda, kterou je možné tento materiál zkoušet. Takovým materiálem je například kompozitní materiál sklolaminát, který je často využíván v oblasti energetiky pro svou nízkou váhu, vysokou pevnost a odolnost vůči korozi.

Neposledním příkladem oblastí, pro kterou je třeba určit vhodnou metodu měření pomocí zařízení NDT je měření mezery mezi tlakovou nádobou reaktoru a biologickým stíněním. Vlivem zvýšení teploty se tlaková nádoba rozpíná a je třeba určit metodu měření, která by včas varovala při krizovém rozměru této mezery.

V oblasti NDT je aktuální snaha zrychlit kontroly, získat přesnější výsledky a obsáhnout větší oblast kontroly nebo řešit nové problémy vznikající za provozu. To si žádá vylepšení některých stávajících metod NDT nebo vytvoření nových.

V této práci budou popsány některé metody NDT, které by mohly být aplikovány v energetickém průmyslu v oblastech výše nastíněných a experimentálně ověří jejich účinnost. Budou vytvořena tělesa simulující prostředí elektrárny, která budou namáhána stejným způsobem, jakým by byly namáhány i v provozu, nebo budou obsahovat reálné vady. Použitými nástroji pro zkoušení NDT jednotlivých případů budou přístroje společnosti Centra výzkumu Řež, s.r.o.

2 Zkoumané oblasti uplatnění NDT v energetickém průmyslu

2.1 Heterogenní svary v energetice

V energetickém průmyslu se vyskytuje velké množství nerozebíratelných spojení v podobě svarů. Mimo homogenních svarů vznikají i svary heterogenní. Ty vznikají svařováním komponentů, které pracují v různých provozních teplotách. Tyto heterogenní svary vyžadují vyšší pozornost při kontrole, jelikož jsou náchylnější k vytvoření vad více než svary homogenní [2].

Heterogenní svary jsou v energetickém průmyslu často vystaveny agresivnímu koroznímu prostředí, které napomáhá vzniku a rozvoji trhlin. Trhliny vznikají v korozních důlcích, které působí jako koncentrátoři napětí. Trhlina se poté šíří podél rozhraní základní materiál (ZM) – svarový kov. K iniciaci a šíření trhlin dochází mechanismem korozního praskání. Vady svarového spoje mohou vznikat nejen během provozu, ale také již při svařování vlivem rozdílů mezi mechanickými, fyzikálními a elektro-chemickými vlastnostmi svařovaných materiálů [3].

2.1.1 Vady heterogenních svarů

Pokud jsou svařovány různorodé materiály, které nemají stejné chemické složení nebo mají jiné strukturní báze, dochází vždy k degradaci obou či jednoho ze svařovaných materiálů. Důvodem je vznik natavené zóny, která má jiné chemické složení, než jaké mají oba základní materiály. Tato skutečnost znamená, že natavená zóna bude mít i jiné mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti, a tedy bude podléhat degradaci jinak než základní materiály.

Při tepelném zpracování heterogenních svarů nebo v případě svarů v energetickém průmyslu, které jsou provozovány dlouhodobě za vyšších teplot (v provozu JE do 320 °C, v uhelné elektrárně až 650 °C), probíhají mezi základními kovy a svarovým kovem nezanedbatelné difúzní pochody. Pokud se tedy kombinují vysokolegované, uhlíkové a nízkolegované oceli, bude docházet k difúzním procesům vlivem rozdílného chemického složení. To má za následek snížení strukturní stability svarových spojů. Difúzi lze zabránit použitím přídatného svarového kovu, který bude podobný jednomu ze základních materiálů, a tedy vznikne jen jedna difúzní oblast. Další možností je použití svarového kovu, který obsahuje chrom v takovém obsahu, který odpovídá střední hodnotě gradientu základních ocelí. Vznikají tak dvě difúzní aktivní zóny, které rozdělují chemický gradient na dva menší intervaly. Oba základní materiály se tedy potýkají s menším difúzním pochodem.

Degradace heterogenního svaru vzniká několika mechanismy.

Prvním z nich je redistribuce uhlíku, která způsobuje nauhličené a oduhličené zóny, které mají následně různé mechanické, fyzikální a korozní vlastnosti než základní materiál. V nauhličených oblastech dochází k nárůstu tvrdosti, ale dochází ke snížení pevnosti. Redistribuce uhlíku může být urychlována provozem za vyšších teplot a tepelným zpracováním po svařování.

V prostředí elektrárny je časté i korozní napadení. Jelikož mají základní materiály i svarový kov rozdílné elektrochemické potenciály, dochází společně s působením korozního prostředí ke koroznímu napadení méně ušlechtilého (méně legovaného) základního materiálu. Na straně korozního prostředí se obvykle objevují korozní důlky.

Na degradaci má vliv i vyčerpání plastické deformace a následné iniciování trhlin [4], [5].

Velké množství vad vzniká při svařovacím procesu a jsou způsobeny svářečem, nevhodným nastavením svářecí techniky a nedokonalou přípravou svařovacích ploch.

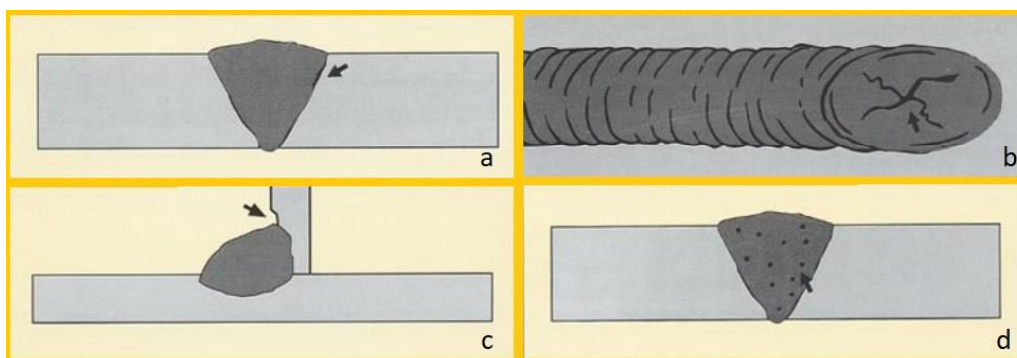
Mezi vady způsobené svářečem patří studené spoje (označení dle ISO 6520 – 401), které se projevují nedokonalým natavením svarového kovu se ZM (obr. 1a). Mezi příčiny vzniku patří nesprávné vedení elektrody (vysoká rychlost posuvu) a nízký svařovací proud. Další vadou způsobenou svářečem jsou kráterové trhliny (104) vznikající při náhlém ukončení svařování (obr. 1b).

Při nesprávně nastavených parametrech, jako je příliš velký svařovací proud, dlouhý oblouk a styk elektrody s tavnou lázní, vznikají zápal (5011, 5012), což jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích ZM a svarové housenky (obr. 1c).

Přítomnost vlhkosti v plynu a nečistoty na svarových plochách způsobují póry (2015) a bubliny (2011). Dříve tento problém způsobovaly nesprávně vysušené elektrody, což je v dnešní době ojedinělá záležitost, díky vylepšení způsobu skladování elektrod. Póry a bubliny se od sebe odlišují tvarem: bublina je plynová dutina kulového tvaru a pór je protažená dutina rovnoběžná s osou svaru [6]. Póry jsou znázorněny v řezu na obr. 1d.

Příkladem typického spojení heterogenních materiálů v energetice je svařování korozivzdorné oceli 1.4541 a kotlové oceli P265GH.

Jelikož je počet svarů v energetickém průmyslu obrovský, je třeba nalézt metodu zkoušení, která by byla rychlá a přesná. Touto metodou by mohlo být např. phased array ultrazvukové testování v kombinaci s dalšími metodami analýzy získaných dat.



Obr. 1 – Vady svaru: a) studený spoj, b) kráterová trhlina, c) zápal, d) póry [62]

2.2 Sklolamináty

Sklolaminát je kompozitní materiál, který se skládá z ze sklených vláken a matrice z polyesterových pryskyřic. Skleněná vlákna se vyrábí komerčně již od 30. let 20. století, kdy se začaly využívat pro jako izolace budov. Výchozími materiály pro výrobu skleněných vláken je oxid křemičitý (SiO_2), uhličitan sodný (Na_2CO_3) a vápenec (CaCO_3). Vtlačováním roztaveného skla do vytlačovacího zařízení, které má tisíce drobných otvorů vzniká vlákno v průměru 5-20 μm .

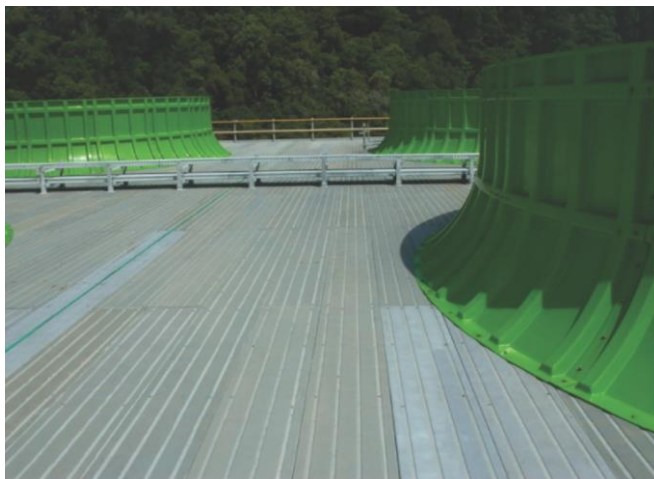
Přestože jsou sklolamináty lehké, jsou extrémně odolné, dále jsou nevodivé, chemicky odolné a nekorodují, tudíž mají ve vlhkém prostředí mnohonásobně větší životnost než kovové součásti.

Pomocí nosných podélných skelných vláken je absorbována podélná zátěž a působící síla a struktura dokáže odolávat vysokému tlaku. Kompozit z polyesterové matrice a sklených vláken je vysoce odolný vůči UV záření.

V energetickém průmyslu se součásti ze sklolaminátu využívají jako stavební prvky. Pro svou nevodivost, pevnost, chemickou odolnost a nízkou hmotnost mohou být aplikovány například jako vnitřní konstrukce chladicích věží, jako opláštění nebo jako nevodivé oplocení, ochranu sloupů a vytvoření lávek.

Vnitřní konstrukce chladících věží je neustále namáhána vlhkostí a parou. Konstrukci je možné tedy seskládat z profilovaných odolných sklolaminátů, se kterými se snadno manipuluje a je možné je upravovat přímo na stavbě. To umožňuje zkrácení doby odstávky, při které je aplikováno kompozitní opláštění. Při správné organizaci práce je možné celou konstrukci vytvořit v rádech týdnů.

Aplikaci sklolaminátů jako opláštění lze vidět na obr. 2. Zde byly použity jako střešní panely a obvodový plášť. V tomto případě je vhodné upravit povrch sklolaminátu protiskluzovou vrstvou kvůli bezpečnosti, ale která také může sloužit i jako ochrana samotného sklolaminátu a prodloužit tak jeho životnost [7], [8].



Obr. 2 – Kompozitní opláštění chladicí jednotky v Gdaňsku [8]

2.2.1 Vady sklolaminátů

Vady sklolaminátů vznikají již při jejich výrobě, ale také během jejich provozu.

Mezi výrobní vady patří tzv. suchá místa, která vznikají nedokonalým smáčením skleněných vláken během nanášení pryskyřice. Jeví se jako bílé stříbřité prameny uvnitř pryskyřice a jsou viditelné v různých úhlech. Ukázka suchých míst je zachycena na obr. 3.

Další výrobní vadou je delaminace. Delaminace je bublina zachyceného vzduchu v materiálu nebo oddělující se vrstvy. Vznikají při nesprávném odstranění vzduchu z vrstvení, při nesprávné přípravě povrchu, při nešetrném řezání a při namáháním v jednom směru. Menší delaminace je označena na obr. 4.

Během výroby i v provozu mohou vznikat pokřivené části, které vznikly zkroucením nebo prohnutím. Tvarové změny způsobuje zvýšená teplota, která zapříčiní změkčení pryskyřice, vnitřní pnutí nebo napětí způsobené při sestavování jednotlivých sklolaminátových dílů. U plochých komponent lze zkroucení napravit ohřátím na určitou teplotu a stiskem mezi dvěma plochými předměty [9].

Sklolamináty vyrobené z polyesterových pryskyřic podléhají degradaci vlivem vniknutí vody, vystavením různých teplot a působením ultrafialového záření. Degradace způsobuje snížení pevnosti, vznik trhlin, nižší kvalitu povrchu a změnu hustoty [10].



Obr. 3 – Označena suchá vlákna pod povrchem [9]



Obr. 4 – Označená menší delaminace [9]

2.3 Měření mezery tlakové nádoby

Jaderná bezpečnost v blízkosti jaderné elektrárny a jejího okolí je velmi důležitá, jelikož poškození jaderné elektrárny a následný únik radiace je nebezpečný a pro široké okolí velmi znepokojující. Důležitá je tedy prevence úniku radioaktivity, ale také zabránění poškození samotného zařízení, které by mohlo ohrozit samotný personál.

Štěpné reaktory generují velké množství radioaktivních izotopů, které emitují alfa, beta nebo gama záření. Při nehodách, při kterých došlo k poškození opláštění JE, vstupuje do prostředí velké množství štěpných produktů, které ohrožují okolí JE v rozsahu desítek kilometrů.

Bezpečnostní strategie JE se vyvíjejí v každé další generaci s větší kapacitou a jsou zavedeny další bezpečnostní funkce. Velké množství bezpečnostních prvků se zaměřuje na nejkritičtější bod JE, tedy na jádro reaktoru. Bezpečnostní funkce se zaměřují na ovládání výkonu a reaktivity, chlazení paliva a omezení radioaktivity štěpných produktů [1].

Systém In-vessel retention (IVR) slouží jako prevence proti selhání tlakové nádoby reaktoru (reactor pressure vessel – RPV) pomocí ochlazení vnějšího povrchu nádoby. Ochlazení probíhá odstraněním tepla z roztaveného koria stěnou tlakové nádoby do vody v zaplavené dutině reaktoru, tedy do kontejneru. Během nehody reaktoru je zajištěno zaplavení dutiny reaktoru.

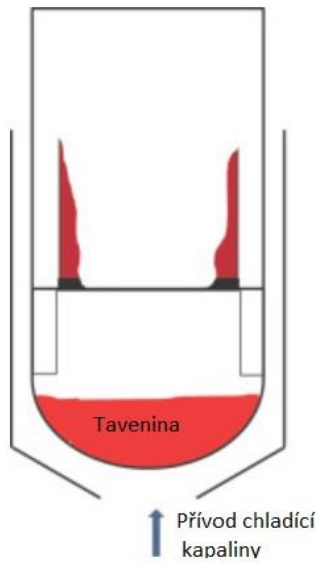
Princip IVR je znázorněn na obr. 5. Tavenina jádra je zde přemístěna do spodní hlavy, kde vytváří kaluž roztavených materiálů, které jsou zahřáté objemově úpadkovým teplem. Přitom je vnější povrch RPV ponořen úplně anebo částečně alespoň na úroveň nad dolní hlavu. Proud chladicí kapaliny, který je poháněn obvykle přirozenou cirkulací, udržuje stěnu nádoby dostatečně chladnou a zabraňuje tak jejímu selhání.

V roce 1989 profesor Theofanous z Kalifornské univerzity navrhl koncept IVR pro reaktory VVER-440, které se nacházely v JE Loviisa ve Finsku. Kontejnmenty JE Loviisa mají relativně nízký tlak a jsou náchylné k úniku taveniny na základnu. Myšlenka IVR přispěla jedinečné vlastnosti reaktorů Loviisa. Mají nízkou hustotu výkonu, pracují s velkým objemem vody v primárním a sekundárním okruhu, které mají za cíl zpomalit postup případné nehody, a přítomnost kontejnerů s ledem a kondenzátorem, který má zajistit zaplavení dutiny reaktoru, pokud by nastal nejzávažnější scénář nehody.

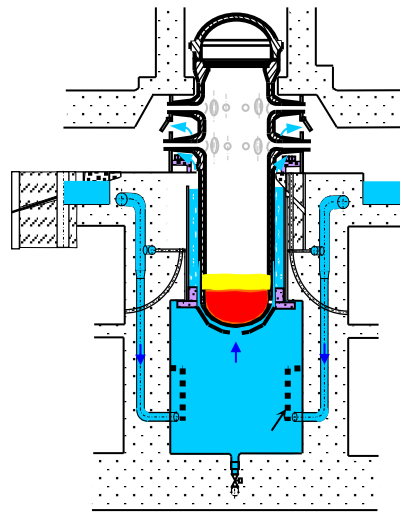
Koncept IVR pro reaktor VVER-440 je dále použit v nových designech jako je Westinghouse AP1000, korejský APR1400 a čínské reaktory PWR HPR1000 a CAP1400.

JE Dukovany využívá na svém reaktoru VVER-440/V213 systém IVR-ERVC. Schéma systému je znázorněno na obr. 6.

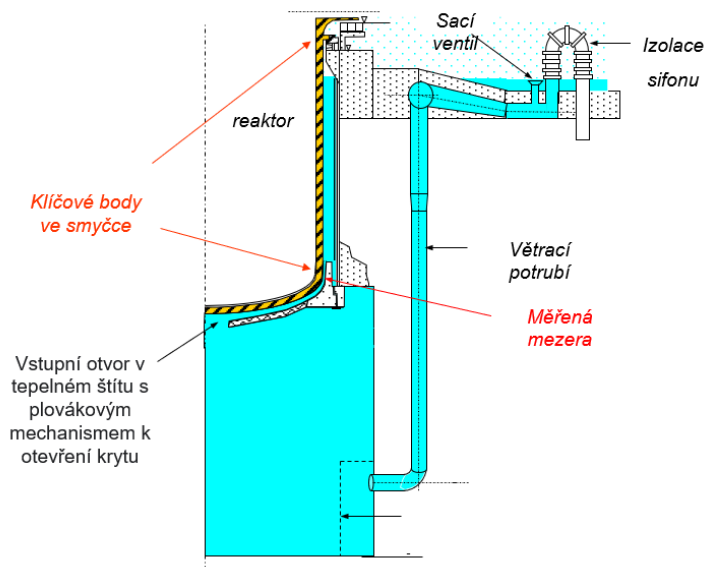
JE Dukovany hledá řešení měření mezery znázorněné na obr. 7. Jedná se o nejužší mezeru mezi stěnou reaktoru a biologickým stíněním [11], [12].



Obr. 5 – Schéma systému IVR [11]



Obr. 6 – Schéma reaktoru VVER-440/V213 a systému IVR-ERVC [12]



Obr. 7 – Detail měřené mezery reaktoru VVER-440/V213 [12]

3 Popis použitých metod nedestruktivního testování

3.1 Phased array

3.1.1 Úvod

Technika fázových polí ultrazvukového testování (PAUT – Phased Array Ultrasonic Testing) je novým přístupem zkoušení pomocí ultrazvuku (UT). Zkoušení pomocí ultrazvuku se řadí mezi jednu ze základních objemových metod NDT, která umožňuje detekovat objemové vady. Využívá se pro kontrolu tvářených polotovárů, svarů a odlitků. Pomocí ultrazvuku lze kontrolovat všechny pevné materiály, které ale musí být dobrými vodiči ultrazvukových vln. Z toho důvodu je možné mimo kovových součástí kontrolovat i některé druhy plastů a kompozitů.

Principem ultrazvukové metody je schopnost šíření ultrazvukových vln skrz materiál a odraz od každého rozhraní, což znamená i od vnitřních vad. Pro zkoušení se využívá frekvence od 0,5 MHz do 25 MHz a platí, že s vyšší frekvencí vlnění lze detekovat menší vady za cenu snížení prozvučitelnosti zkoušeného materiálu [13].

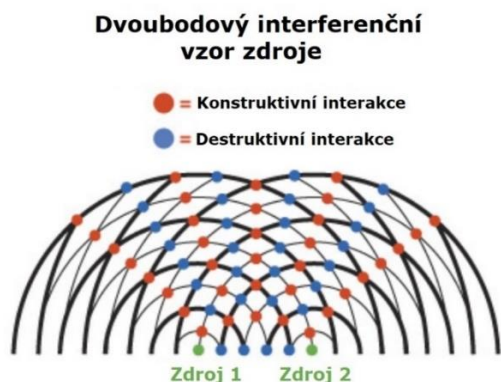
Klasický ultrazvukový přístroj má v převodníku jeden prvek pro vysílání a jeden pro příjem ultrazvukových vln. Kontrolní parametry (ohnisko a úhel dopadu) jsou mechanicky fixovány. Ohniskem se rozumí fokusovaný ultrazvukový svazek (zpravidla se jedná o hloubku v níž je prováděna kontrola), a úhel dopadu je úhel ultrazvukového signálu, který je emitován do materiálu. Fixní parametry UT mohou ale limitovat detekci vad.

Aby se odstranily limity UT, vznikla technika PAUT, která umožňuje rozdělit piezoelektrický měnič ultrazvukové sondy na 16 až 256 piezoelektrických elementů/prvků. Každý prvek tak může pulzovat jednotlivě a v jiných intervalech, což napomáhá nastavovat parametry kontroly, takže se zvyšuje pravděpodobnost detekce vady [14].

3.1.2 Historie

V prvních pár desetiletí přístroje pracující na principu ultrazvuku využívaly jen jednoprvkové převodníky pro příjem a vysílání vln.

Anglický vědec Thomas Young popsal v roce 1801 princip konstruktivní a destruktivní interakce vln, kterou demonstroval pomocí dvou zdrojů světla. Dokázal, že vlny, které se kombinují ve fázi, se navzájem posilují a ty, které se kombinují mimo fázi se vzájemně ruší. Schéma konstruktivní a destruktivní interakce vln je znázorněno na obr. 8. Fázový posun je způsob šíření těchto interakcí pomocí časově posunutých vlnových front pocházejících ze dvou a více zdrojů. Mohou se používat k ohýbání, řízení nebo zaostření energie vlnové fronty.



Obr. 8 – Schéma konstruktivní a destruktivní interakce vln [15]

V šedesátých letech 20. století se začaly vyvíjet ultrazvukové maticové systémy používající vícebodové převodníky zdrojů. Způsob pulzování probíhal tak, aby se směrovaly paprsky pomocí řízených interferenčních obrazců.

V 70. letech se poprvé začaly používat v lékařské praxi komerční systémy fázových polí, a to v diagnostické oblasti, kde se pomocí řízených paprsků zobrazovaly průřezy lidského těla, např. plodu. Na začátcích se fázové soustavy omezovaly pouze na lékařskou oblast, protože složení a struktura lidského těla je předvídatelná a design nástroje a interpretace obrazu jsou relativně jasné.

Aplikace PAUT v průmyslu je mnohem obtížnější. Překážkami jsou měnící se akustické vlastnosti kovů, kompozitů, keramiky, skleněných vláken a plastů a také obrovská rozmanitost geometrií a tloušťek. První zařízení pracující na principu phased array bylo představeno v 80. letech, jeho velikost byla extrémně velká a data musela být přenášena do počítače (obr. 9). Nejčastější využití bylo v energetickém průmyslu, kde se využívalo nejmodernějších technologií detekce vad. Nejčastěji se kontrolovaly kované hřídele a komponenty nízkotlakých turbín.

V 90. letech se začaly objevovat fázově napájené přístroje, které byly přenosné a fungovaly na přenosný zdroj energie. Analogové konstrukce vyžadovali energii a prostor pro vytvoření vícekanálových konfigurací, které jsou nezbytné pro řízení paprsku, a tak byl přechod do digitálního světa rychlý. Vývoj fázových soustav další generace podpořil prudký vývoj levných vestavěných mikroprocesorů. Zmenšení zařízení dále podpořila dostupnost součástek s nízkým výkonem, součásti pro úsporu energie a průmyslová konstrukce desek pro povrchovou montáž [15].

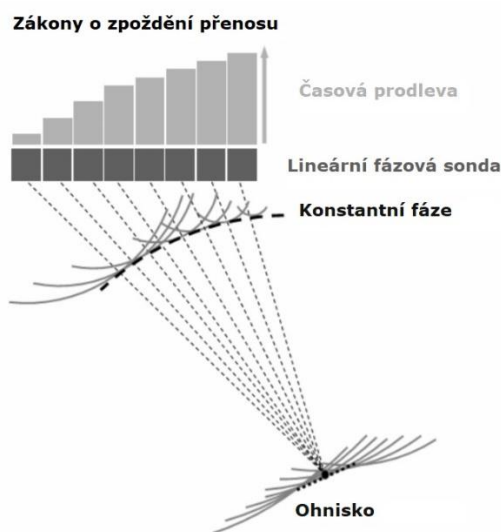


Obr. 9 – Přenosný PA UT analogový defektoskop [54]

3.1.3 Princip techniky phased array

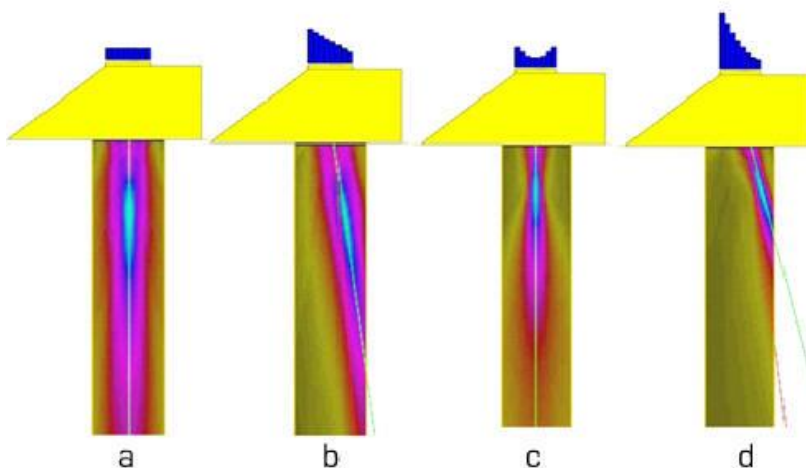
Jak už bylo zmíněno v úvodu, metoda PAUT se od UT liší počtem prvků ve svém převodníku. Sondy pro fázovou metodu se skládají z několika piezoelektrických krystalů. Každý krystal může vysílat a přijímat nezávisle v různých časových intervalech. Aby byl ultrazvukový svazek zaostřen, jsou na jednotlivé prvky aplikována časová zpoždění. Tak se vytvoří konstruktivní rušení vlnových front, což umožňuje zaostření energie v každé hloubce testovaného předmětu.

Princip je znázorněn na obr. 10. Demonstruje, že byly vypočítány zákony zpoždění pro zaostření akustického paprsku na určitý úhel a hloubku, a každý prvek vyzařuje ve stanovený čas sférickou vlnu. Superpozice těchto jednotlivých vln vede k téměř rovinné vlnoploše na požadovaném místě.



Obr. 10 – Zákony zpoždění [16]

Vlnová fronta se sféricky sbíhá a rozchází před a za cíleným ohniskem. Využití zákonů zpoždění je demonstrováno na obr. 11. Pokud nejsou aplikovány žádné zákony zpoždění (obr. 11a), výsledný paprsek je rozostřený a lze ho registrovat běžným plochým převodníkem. Nedochozí k zaostřování ultrazvukové energie a vzniká přirozená „pseudofokalizace“, která odpovídá vzdálenosti blízkého pole sondy. Na obr. 11b je znázorněn stejný ultrazvukový paprsek jako v případě 11a s tím rozdílem, že je generován běžným plochým snímačem ve spojení s předsádkovým klínem. Obrázky 11c a 11d jsou stejné konfigurace jako v případech 11a a 11b, ale s tím rozdílem, že při jejich aplikaci byly upravovány zákony o zpoždění tím způsobem, že zaostřují akustickou energii na určitou hloubku. Ohnisko je v těchto případech užší a lokalizovanější. Stejných výsledků s konvenční sondou se dosáhne pouze pomocí speciálně tvarovaného krystalu [16].



Obr. 11 – Příklady zákonů zpoždění: a) nejsou použity žádné zákony zpoždění, b) použití klínu, c) hloubkové zaostřování, d) kombinované řízení a hloubkové zaostřování [16]

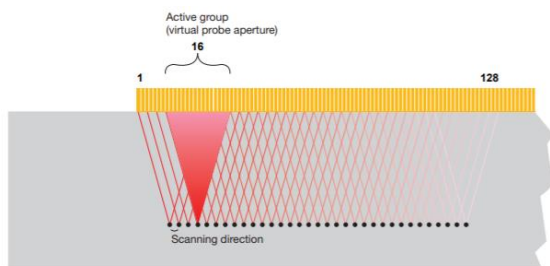
Pro dosažení pulzů v odlišných dobách se využívá kalkulačka ohniskového zákona. Ta stanovuje dobu zpoždění pro každou skupinu prvků a vytváří tak požadovaný tvar paprsku s ohledem na charakteristiky klínu, sondy a také počítá s akustickými vlastnostmi a geometrií testovaného materiálu. Ovládací software přístroje navolí již naprogramovanou pulzující sekvenci a ta do materiálu zavádí několik vlnových front, které se pak po spojení do jedné vlny odráží od zadních stěn, vad a dalších hranic materiálu [17].

3.1.4 Konfigurace ultrazvukových paprsků

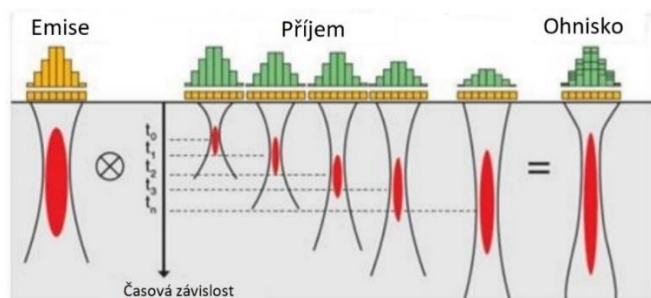
Elektronické skenování využívá stejný ohniskový zákon a zákon zpoždění napříč celou skupinou aktivních prvků. Skenování se provádí pomocí konstantního úhlu podél celé délky fázového pole. Tohoto skenování se využívá pro mapování koroze. Pokud je na sondě využit šikmý klín, jsou ohniskové zákony kompenzovány uvnitř klínu. Schéma elektronického skenování je znázorněno na obr. 12.

Dynamická fokusace do hloubky (Dynamic Depth Focusing – DDF) se provádí pomocí skenování s různými ohniskovými hloubkami. DDF je všestranná technika formování paprsků, která umožňuje přijímací sondě změnit prostorovou odezvu pole změnou ohniskových zákonů příjmu. V praxi to znamená, že při přenosu se aplikuje jeden ohniskový zákon a při příjmu se použije následných zákonů o zpoždění, které tvoří ohnisko s dlouhou a tenkou ohniskovou vzdáleností. Princip DDF je znázorněn na obr. 13. DDF umožňuje tvarování paprsků, elektronické zaostřování a elektronické skenování [18].

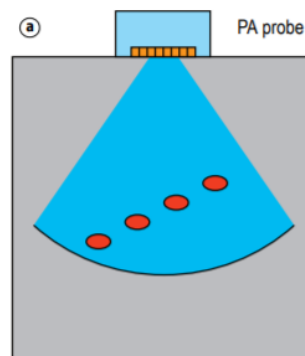
Sektorové skenování, také jinak azimutální nebo úhlové skenování, využívá pohyb paprsku přes hloubkový rozsah pro určitou ohniskovou hloubku pomocí stejných prvků. Úhlové sektory mohou mít různé hodnoty a mohou být přidány další rozsahy s různými ohniskovými hloubkami. Sektorové skenování znázorňuje obr. 14 [19].



Obr. 12 – Elektronické skenování s 16 aktivními prvky [19]



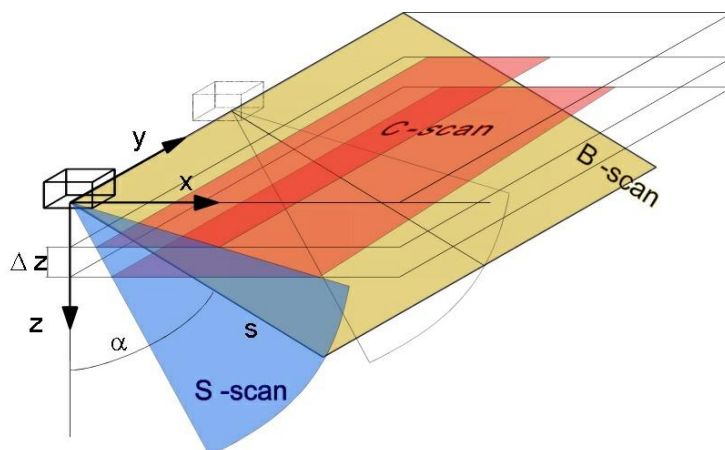
Obr. 13 – Princip dynamického zaostřování do hloubky [61]



Obr. 14 – Sektorové skenování [19]

3.1.5 Prezentace výsledků

Výsledky skenování jsou zobrazovány ve formě ultrazvukových pohledů neboli skenů. Ultrazvukové pohledy jsou zobrazení řezů tělesa, která jsou definována v rovině ultrazvukovým paprskem a parametrem skenování, jako je osa skenu a indexu. Nejdůležitější skeny jsou podobné 2D projekcím technického výkresu kontrolované součásti. B-sken odpovídá bočnímu pohledu, C-sken půdorysu a D-sken koncovému pohledu (obr.15). Dalšími významnými skeny je A-sken a S-sken.

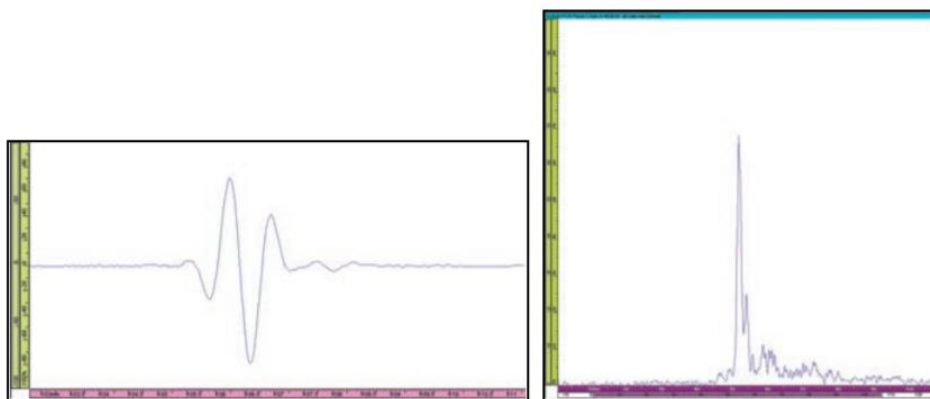


Obr. 15 – Vizualizace skenů [64]

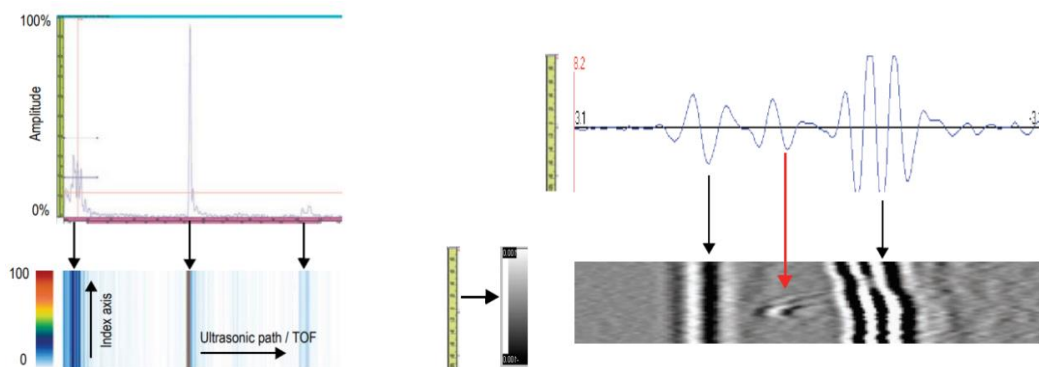
A-sken zobrazuje přijatou amplitudu ultrazvukového pulzu v závislosti na čase letu nebo tvaru vlny. Zobrazení A-skenu je možné jako RF (radio-frequency) signál nebo jako bipolární usměrněný signál. Porovnání těchto dvou zobrazení je znázorněno na obr. 16.

Pomocí barevného kódování amplitudy usměrněného signálu je možné spojit souřadnice pohybu sondy se získanými ultrazvukovými daty a získat tak barevně kódovanou amplitudu. To je výhodné pro vytvoření např. barevného B-skenu (obr. 17).

Pomocí RF signálu jsou vzniklé obrazy vytvořené různými stupni šedé s černými a bílými liniemi (obr. 18).



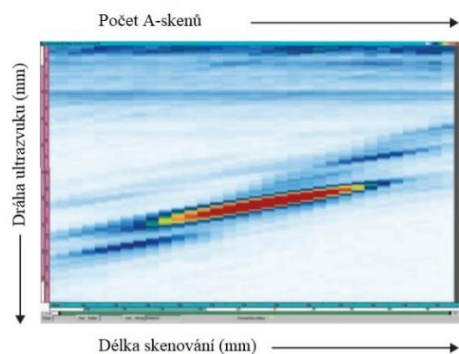
Obr. 16 – Prezence A-skenu: RF signál (vlevo) a usměrněný signál (vpravo) [19]



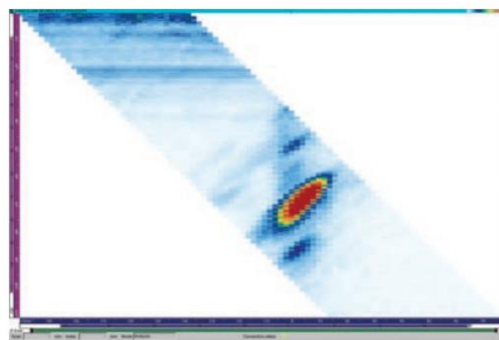
Obr. 17 – Ukázka barevného kódování usměrněného signálu A-skenu k vytvoření barevně zpracovaného B-skenu [19]

Obr. 18 – Zobrazení amplitudy RF signálu pomocí úrovní šedé [19]

B-sken zobrazuje zaznamenaná ultrazvuková data ve 2D pohledu. Obvykle slouží horizontální osa jako osa skenování a svislá osa je dráha ultrazvukového svazku nebo času. B-sken se skládá z A-skenů, které jsou barevně kódovány. Každý A-sken obsažený v B-skenu je reprezentován polohou vzorkování kódeřu/časové základny. Indikovaná vada je na získaném obrazu prodloužená, tudíž je velikost objektu deformovaná. Tento jev vzniká vlivem šíření paprsku a dalšími faktory. Určení skutečné velikosti a umístění vady tak vyžaduje zkušenost obsluhy zařízení. Na obr. 19 je znázorněn B-sken, který není korigovaný. Pokud je korigována ultrazvuková dráha na úhel lomu a zpoždění, vytvoří se korigovaný B-sken. To znamená, že bude odpovídat bočnímu pohledu kontrolované součásti s délkou na vodorovné a hloubkou na svislé ose (obr. 20).



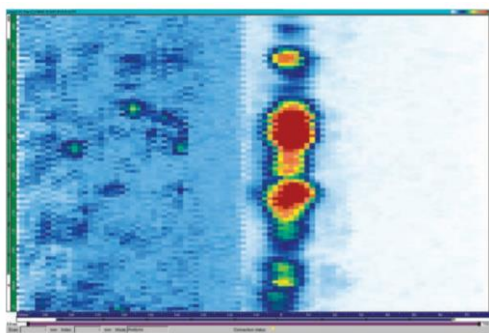
Obr. 19 – Nekorigovaný B-sken zobrazující reflektor [19]



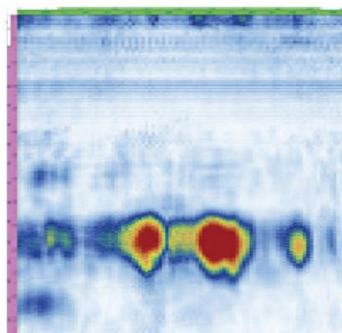
Obr. 20 – B-sken upravený o úhel lomu [19]

C-sken zobrazuje ultrazvuková data jako půdorysný pohled zkoumané součásti. Pozice zobrazených reflektorů odpovídají pozicím kódéru během snímání. Zobrazení C-skenu je znázorněno na obr. 21.

D-sken (obr. 22) je podobná prezentace dat jako je B-sken a leží k B-skenu v pravém úhlu. Pokud se ultrazvuková dráha zkoriguje na úhel a zpoždění, tak vertikální osa představuje hloubku. D-skeny jsou užitečné v případě analýzy dat svarů.

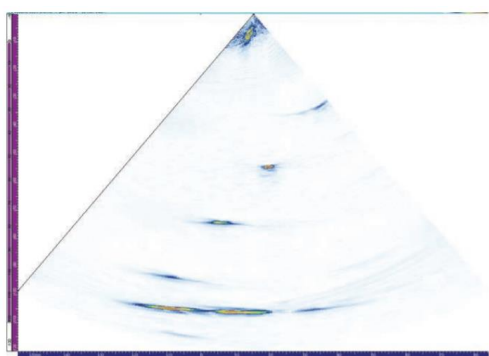


Obr. 21 – C-sken [19]



Obr. 22 – D-sken [19]

S-sken (sektorový sken) je složení všech A-skenů, které jsou ze specifického kanálu korigované na zpoždění a úhel lomu. Typický S-sken využívá pro všechny úhly stejnou ohniskovou vzdálenost. Vodorovná osa představuje promítnuté vzdálenosti (tedy šířku zkušební vzorku) z jednoho výstupního místa a svislá osa odpovídá hloubce (obr. 23) [19].

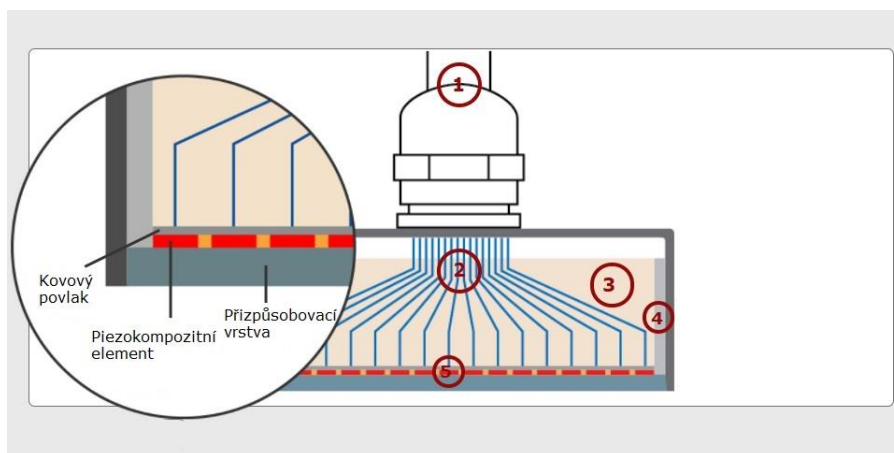


Obr. 23 – S-sken [6]

3.1.6 Sondy

Sondy – měniče fázových polí – se dodávají ve všech možných velikostech, tvarech, o různých frekvencích a počtu prvků. Všechny obsahují piezoelektrický prvek, který je rozdělen do několika segmentů.

Současné sondy, které se využívají v oblasti NDT, se obvykle skládají z piezokompozitních materiálů, které se komponují z mnoha malých tenkých elementů piezoelektrické keramiky, které jsou zasazené do polymerní matrice. Přestože je jejich výroba náročnější, tyto měniče jsou citlivější než piezokeramické měniče podobného provedení. Pro rozdělení kompozitních pásů na řadu elektricky samostatných prvků, které pulzují samostatně, se využívá segmentované kovové povlaky. Tyto segmentované prvky jsou posazeny do sestavy převodníku, která dále obsahuje ochrannou přizpůsobovací vrstvu, podložku, kabelové spoje a pouzdro. Schéma měniče s popisem jednotlivých částí je znázorněno na obr. 24. Schéma zobrazuje lineární pole s obdélníkovým průřezem, což je jedna z nejběžnějších konfigurací pro phased array [20].



Obr. 24 – Průřez sondy fázového pole: 1) koaxiální kabel, 2) kabeláž prvku, 3) podpora, 4) vnitřní rukáv, 5) piezokompozitní element [20]

Fázové sondy jsou kategorizovány podle základních parametrů jako je typ, frekvence, počet a velikost prvků. Příklady používaných sond jsou znázorněny na obr. 25 [21].



Obr. 25 – Příklady fázových sond [21]

Většinu měničů s fázovým polem lze řadit do kategorií podle typu úhlového paprsku. Ten je určen pro plastový klín nebo přímou plastovou předsádku (klín nulového stupně). Plastové klíny spojují zvukovou energii z převodníku se zkušebním kusem tak, že je tento režim převádí a/nebo láme v požadovaném úhlu v souladu se Snellovým zákonem. Klíny lze upravit tak, aby odpovídaly složitější geometrii zkoumané součásti (obr. 26) [21], [22].

Rozdělení podle frekvencí se řídí většinovým rozsahem mezi 2 MHz a 10 MHz, kam spadá většina používaných sond. K dispozici jsou dále sondy s nižší a vyšší frekvencí.

Nejčastější počet prvků fázových převodníků je od 16 do 128 prvků, ale některé měniče obsahují až 256 prvků. S vyšším počtem prvků se zvyšuje schopnost zaostření a může se zvýšit

pokrytí zkoumané oblasti. Nevýhodou je ale zvýšení nákladů jak na sondu, tak i na přístrojové vybavení.

Dále platí pravidlo, že s nižší šířkou prvku se zvyšuje schopnost řízení paprsku, ale pro pokrytí větší plochy je potřeba více prvků, které zvyšují finanční náklady [21].

Fázové pole lze upořádat jako matici nebo jako kruhové pole. Matice poskytuje větší kontrolu paprsku nad povrchovým průřezem. Kruhové pole poskytuje zaostřovací obrazec více sféricky. Fázová pole, která jsou níže popsána, jsou znázorněna na obr. 27.

1D lineární pole je nejčastěji využívané při kontrole pomocí přímého i úhlového paprsku. Výhodou je snadná výroba i montáž na klíny. Další výhodou je, že se v jedné ose může zaměřit na různé hloubky a úhly. Nevýhodou je potřeba velkých rozměrů pro hluboké zaostření, rozbíhání paprsku se zvyšuje s úhlem a hloubkou a nemá schopnost zkosení paprsku.

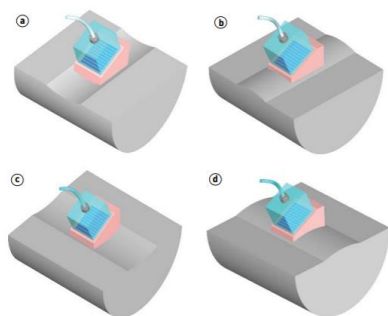
Pole ve tvaru 2D čtverce má schopnost řízení ve třech rozměrech, využívá sférické nebo jednoosé zaostření. Má ale složitý design a složitý výrobní proces, vyžaduje velké množství pulzů a přijímačů a vyžaduje složité programování.

1,5D čtvercová nebo obdélníková matice má vynikající schopnost řízení, zaostřuje v jedné ose v různých hloubkách a úhlech. Výhodou je, že snižuje nežádoucí artefakty paprsku. Stejně jako 2D čtvercové pole má složitý design a výrobní postup, a také vyžaduje velké množství pulzů a přijímačů a složité programování.

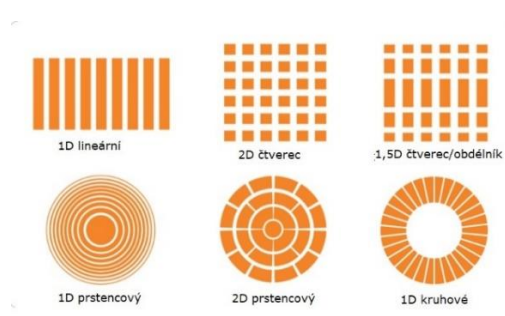
1D prstencové pole je vhodné pro detekci malých vad a umožňuje zaostřování v různých hloubkách. Nemá žádnou schopnost řízení, vyžaduje velkou clonu pro ostré zaostření a složité programování.

O něco složitější 2D segmentové prstencové pole má možnost eliptický nebo sférický paprsek řídit v různých hloubkách a úhlech. Také má složitý design a komplikovaný výrobní proces, vyžaduje velké množství pulzů a přijímačů a složité programování. Generuje pouze podélné vlny, což je také nevýhodou.

Posledním častým polem je 1D kruhové pole. To využívá eliptický nebo sférický paprsek se schopností řízení v různých hloubkách. Obvykle se využívá pro zakřivené plochy. Jako u většiny předcházejících polí má složitý design a komplikovanou výrobu [20].



Obr. 26 – Příklady využití sondy se zakřiveným klínem přizpůsobeným vzorku: a) konkávní – příčný, b) konvexní – příčný, c) konkávní podélný, d) konvexní – podélný [19]



Obr. 27 – Typy nejčastějších fázových polí [20]

3.1.7 Využití techniky phased array

Své využití může metoda phased array nalézt v každém technickém odvětví. V leteckém průmyslu ji lze použít před uvedením letadel do provozu kvůli kontrole svarů, titanových sochorů a otvorů pro upevňující prvky. Během provozu slouží tato metoda pro mapování koroze na trupu letadla nebo pro inspekci přistávacích zařízení, které je vystavené extrémnímu namáhání.

V energetickém průmyslu nalezne nejčastější využití při kontrole svarů, kterých je v této oblasti velké množství. Kontrolované svary mohou být z různých materiálů s různými koeficienty roztažnosti a různou přístupností. Často se kontrolují potrubí a trubky pomocí tvarovaných předsádek na sondě. Pro kontrolu tlakových nádob lze využít voděodolné sondy. Pomocí phased array je v energetickém průmyslu detekováno korozní praskání pod napětím na rotorech či na blocích rotoru a únavové trhliny na lopatkách.

Pro všechny aplikace phased array je možné zkonstruovat manipulační zařízení, které usnadní použití této metody. Manipulační zařízení je možné např. opatřit magnetickými kolečky, vodotěsnou ochranou, kontrolovaný prvek lze vybavit vodičí lištou nebo lze využít manipulačního ramene [19].

3.2 Full Matrix Capture a metoda zpracování dat Total Focusing Method

3.2.1 Úvod

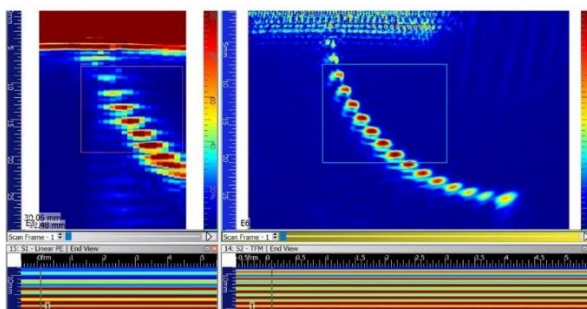
Technika Full Matrix Capture (FMC) a metoda jejího zpracování je aplikace rozšiřující metodu testování phased array. Full Matrix Capture se věnuje sběru dat, která se spojuje se zpracováním dat Total Focusing Method (TFM). Spojením vzniká nástroj, který umožňuje detailní analýzu indikací. Tím se výrazně zlepšuje detekce indikací a vyhodnocení dat metody phased array [23].

3.2.2 Princip techniky FMC/TFM

Technika FMC/TFM je založena na sběru dat, která jsou získávána vhodným způsobem pro jejich další analýzu. Každý z elementů phased array sondy vyšle signál, který následně přijmou všechny elementy sondy. Následně je signál digitalizován [23].

Výhodou techniky FMC/TFM je, že může zaostřit na 1024 míst, zatímco PAUT zaostřuje maximálně na 80 míst. Porovnání těchto dvou technik je znázorněno na obr. 28.

Velkou výhodou této techniky je získání velkého množství dat, která lze zpracovávat různými metodami bez nutnosti nového měření. Může to být ale i nevýhodou, protože velké množství dat zabírá hodně prostoru (např. kontrola 10 mm součásti zabírá několik GB prostoru na disku) a zpracování trvá delší čas. Schéma získání dat je znázorněno na obr. 29.



Obr. 28 – Porovnání lineárního skenování pomocí PAUT (vlevo) a techniky FMC/TFM (vpravo) [55]

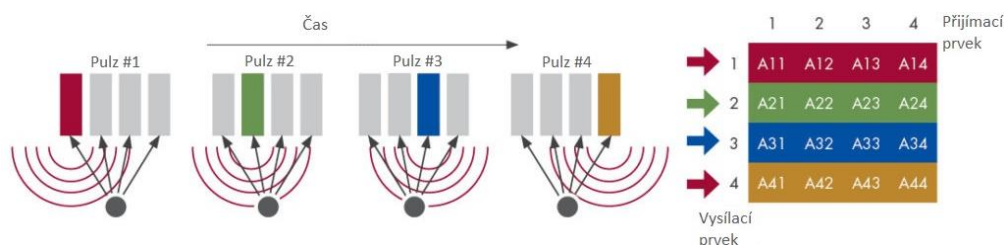


Obr. 29 – Oblast sběru dat pomocí FMC/TFM [63]

3.2.3 Full Matrix Capture

Při použití techniky Full Matrix Capture (FMC) je každý prvek snímače v poli pulzován jednotlivě jeden po druhém a všechny prvky jsou využity jako přijímače. Vytváří se tak matice signálních dat. Platí, že sonda s n -prvky získává celkem n^2 jednotlivých datových sad. Pro použití techniky FMC je potřeba použití sondy Matrix Phased Array (MPA).

Schéma principu sběru dat pomocí čtyř prvků sondy je znázorněno na obr. 30 [24].



Obr. 30 – Sběr dat pomocí čtyř prvků sondy a výsledná matice získaných dat [24]

Data jsou zpracována dvěma způsoby. Mohou být ihned použita pro výpočet potřebného zobrazení nebo jsou surová data uložena pro následnou analýzu.

V prvním případě je výsledkem živý obraz, který znázorňuje situaci ve vybrané oblasti nacházející se pod sondou. Využívá se k tomu vysokorychlostního hardwaru, který umožňuje rychlé zpracování velkého množství dat v reálném čase. Nevýhodou je, že data nejsou ukládána a nejsou tak použitelná k dalšímu zpracování.

V druhém případě se výsledek hned nezobrazuje. Operátor přístroje vidí jen data, získaná pomocí FMC, která ale nelze okamžitě interpretovat a je vhodné použít spolu s tímto způsobem dodatečné PAUT. Výhodou je, že získaná uložená data se mohou zpracovávat pomocí různých pravidel a může být provedena detailní analýza oblasti a může se měnit rozlišení. Nevýhodou je, že zde není živý obraz a inspekce oblasti je tedy pomalejší.

V obou případech jsou získávána data neusměrněné A-skeny. Pro zpracování je důležité, aby byly získány informace o fázi signálu. Pomocí této informace je možné vypočítat, zda došlo ke konstruktivní nebo destruktivní interferenci v daném bodě. Minimální hodnota digitalizační frekvence by měla být 100 MHz.

Nevýhodami FMC je absence možnosti zesílení, neexistuje obecně daný způsob kalibrace, signál nelze filtrovat, není možné použít průměrování a technika nepodléhá žádným obecným standardům [23].

3.2.4 Total Focusing Method

Total Focusing Method (TFM) je dosud nejčastěji používaný zaostřovací algoritmus. Pro jeho použití je potřeba soustava A-skenů, která je získávána pomocí FMC. Jeho funkcí je generování skalárního zobrazení $I(P)$ oblasti, která je zkoušena, a kde je sken zafokusován do každého pixelu. Výpočet $I(P)$ je obsažen ve vzorci (1)

$$I(P) = \sum_{i,j=1}^{N_i} S_{ij}(T_{ip} + T_{jp}), \quad (1)$$

kde S_{ij} je získaný signál a T_{ip} a T_{jp} jsou časy nutné pro dosažení bodu P pro i-tý a j-tý měnič.

Pro využití algoritmu TFM jsou potřeba určitá data. Mezi tato data patří oblast, která bude propočítána TFM, tedy oblast určená ke kontrole vzhledem k sondě. Dále počet bodů, které budou počítány, tedy rozlišení. A posledním je režim šíření, resp. rychlost nebo kombinace rychlosti šíření, které budou k výpočtu použity.

TFM umožňuje režim „živý obraz“, kdy jsou všechny získané A-skeny ihned použity a ihned smazány pro uvolnění místa pro další data. Pokud jsou data ukládána a zpracovávána později, je možné stejná data analyzovat různou změnou kritérií TFM, jako je pozice a velikost rámce a různé režimy šíření.

Algoritmus rozděluje oblast na počet bodů odpovídající velikosti oblasti a rozlišení, poté vypočítá každý svazek tak, aby fokusací odpovídal každému z bodu oblasti. Výsledkem je dokonalé zafoksování každého bodu, který je možné fokusovat. Není možné fokusovat za hranici blízkého pole definovanou velikostí apertury dané sondy, frekvencí, rychlosti šíření a použité předsádky [23].

3.2.5 Využití Full Matrix Capture / Total Focusing Method

Pomocí FMC/TFM se zvyšuje spolehlivost ultrazvukového testování. Zvýšení spolehlivosti má za následek snížení nákladů a zvýšení bezpečnosti, jelikož je detekováno větší množství vad ve vyšší kvalitě obrazu [25].

FMC/TFM lze aplikovat ve všech odvětvích, kde se běžně využívá PAUT. Získané výsledky budou ve vyšší kvalitě a poskytnou detailnější analýzu vad kontrolované součásti.

3.3 Pulzní termografie

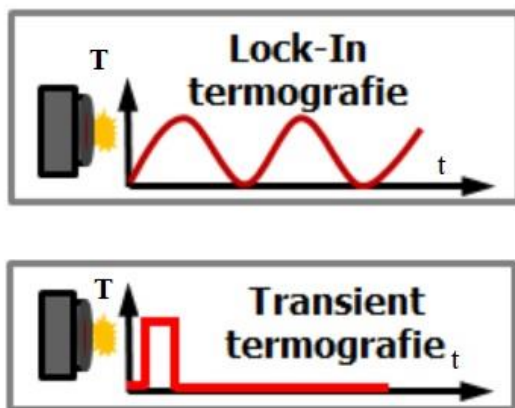
3.3.1 Úvod do aktivní termografie

Pulzní termografie spadá pod systémy založené na aktivní termografii. Aktivní termografie se zakládá na vyvolání tepelného toku v kontrolované součásti. Tepelného toku lze dosáhnout pomocí energie v pulzní formě (pulzní termografie) nebo harmonickým regulovaným způsobem (Lock-In termografie). Tepelný tok, který se šíří materiálem, má přímý vliv na časové chování povrchové teploty. Povrchová teplota je zaznamenávána infračervenou kamerou a výsledný obraz, pomocí kterého se interpretují nalezené indikace, se zpracovává pomocí vhodné matematické analýzy. Mimo pulzní a Lock-In termografie se mezi aktivní termografii řadí i jiné kontrolní metody, které využívají různé měřicí techniky. Jejich využití se řídí materiálem a strukturou součásti. Jejich rozdělení se určuje hlavně podle typu použitého zdroje buzení, způsobem aplikace tepelné energie a druhem využívané matematické analýzy [26].

3.3.2 Metody aktivní termografie

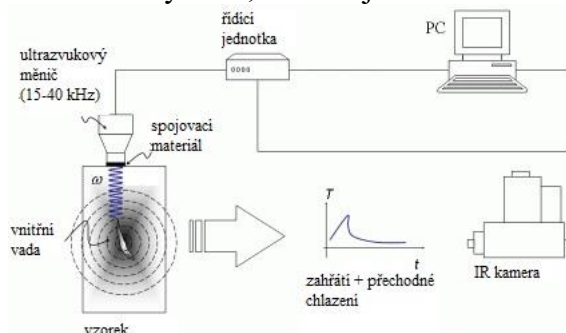
Lock-In termografie neboli metoda periodického buzení využívá modulovaný periodický zdroj (schéma na obr. 31). Vyhodnocení probíhá analýzou fází a amplitud měřeného signálu různými technikami. Jako budící zdroje slouží např. LED lampy, halogenové lampy, ultrazvuk nebo elektrický proud. Výhodně se tato metoda využívá pro kontrolu velkých ploch. Tepelné zatížení zkoumané součásti je nízké. Nevýhodou může být delší čas, který je potřeba pro provedení zkoušky, a detekční schopnost je omezena geometrickou orientací defektů. Lock-In termografie je vhodná pro testování součástí z materiálů, které mají nízkou tepelnou difuzivitu [27].

Transient termografie je jinak nazvaná metodou tepelné vlny. Aplikace energie se podobá aplikaci při pulsní termografii, tedy v energetických pulzech, ale provádí se delší dobu a v obdélníkovém tvaru (schéma na obr. 31). Je možné využití levných zdrojů buzení, např. halogenové žárovky nebo horkovzdušná dmyhadla. Výhodou jsou krátké inspekční doby a možnost určovat hloubku vad. Výhodou je i možnost kontroly kompozitních materiálů. Nevýhoda je omezená citlivost metody vlivem geometrické orientací defektů.



Obr. 31 – Diagram závislost teploty na čase při vybuzení pulzu při metodách termografie Lock-In a transient [27]

Vibro-termografie využívá jako zdroj energie ultrazvuk, který je napojen na kontrolovanou součást. Schéma této techniky je znázorněno na obr. 32. V místech defektu se ultrazvuková vlna transformuje na teplo třením. Možné vady tak fungují jako vnitřní zdroje tepla, kdežto oblasti bez defektů nevykazují nárůst teploty. Defekty jsou tak zobrazeny s vysokým kontrastem a jsou snadno detekovány. Výhodou je velký hloubkový dosah. Nevýhodou může být fakt, že se nejedná o bezkontaktní metodu [26], [27].



Obr.32 – Schéma principu vibro-termografie [28]

Poslední metodou je pulzní termografie, která je popsána samostatně v následujících kapitolách.

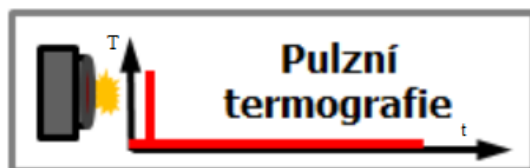
3.3.3 Princip pulzní termografie

Pulzní termografie je jednou z nejvíce používaných metod aktivní termografie. Principem této metody je vybuzení velmi krátkého pulzu a následná analýza procesu chladnutí zkoumané součásti. Schéma buzení je znázorněno na obr. 33 [27].

Kontrola pomocí této metody je rychlá, jelikož tepelný pulz trvá od několika milisekund v případě materiálu s vysokou tepelnou vodivostí až do několika sekund v případě materiálů s nízkou tepelnou vodivostí. Další výhodou je možnost odhadu hloubky defektu. Nevýhodou je, že získaná data neobsahují informace o vnitřních vadách ve větších hloubkách, detekovat lze pouze vady v blízkosti povrchu. [27], [28].

Pulzní termografie je sice snadno proveditelná, ale má omezený kontrast a rozsah hloubky. Lock-in termografie sice tento problém řeší, ale doba měření je delší. Jako řešení všech omezení a zachování jednoduchého nastavení byla zavedena pulzní fázová termografie (PPT – Pulsed Phase Thermography). Podobně jako Lock-in termografie analyzuje fáze a

amplitudy, ale využívá pulzní tepelnou stimulaci, jako pulzní termografie. Zakládá se na Fourierovo konceptu, tedy že jakýkoliv pulz libovolného tvaru lze popsat jako superpozici harmonických vln o různé frekvenci. Čtvercový pulz, který využívá pulzní termografie, lze tedy také považovat za složený z mnoha různých harmonických vln o různé frekvenci a souvisejících amplitud. Principem PPT je získávání výsledků pro velké spektrum frekvencí, čímž se zkoumají i různé rozsahy hloubky. Na zkoumaný povrch je aplikovaný čtvercový pulz, který vede k tepelným tokům v materiálu, které se mění v důsledku přítomnosti poruch jednotlivých frekvencí vlivem vad materiálu [29].

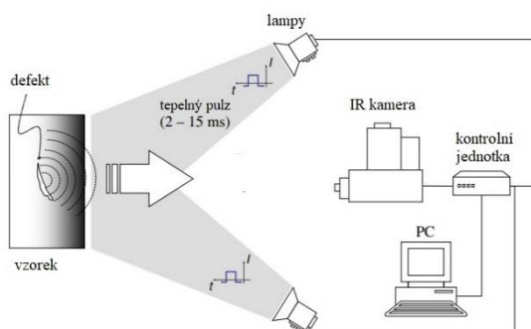


Obr. 33 – Diagram závislost teploty na čase při vybuzení pulzu při metodě pulzní termografie [27]

3.3.4 Zařízení pulsní termografie

Typická sestava využívaná pro kontrolu pulsní termografií se skládá ze zdroje světelného buzení (lampy), infračervené kamery (IR kamera), zdroje napájení, průmyslového počítače, kabelů propojujících sestavu a software pro aktivní termografii. Schéma sestavy je znázorněno na obr. 34. Obvykle je součástí sestavy i kalibrační certifikát, přepravní kufr a ochranné brýle [30].

Lampy se používají k zahřátí povrchu kontrolované součásti. Změny teplot na povrchu jsou zaznamenány IR kamerou. Pro řízení času mezi vypuštěním tepelného pulzu a záznamem IR kamerou se využívá synchronizační jednotky.

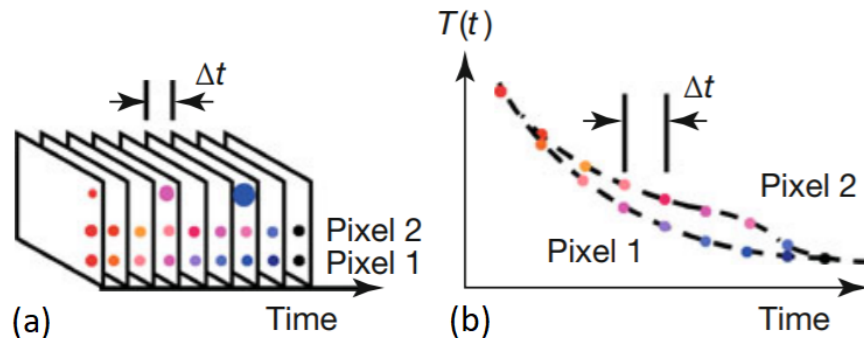


Obr. 34 – Schéma sestavy zařízení pulzní termografie [16]

3.3.5 Záznam a zpracování dat

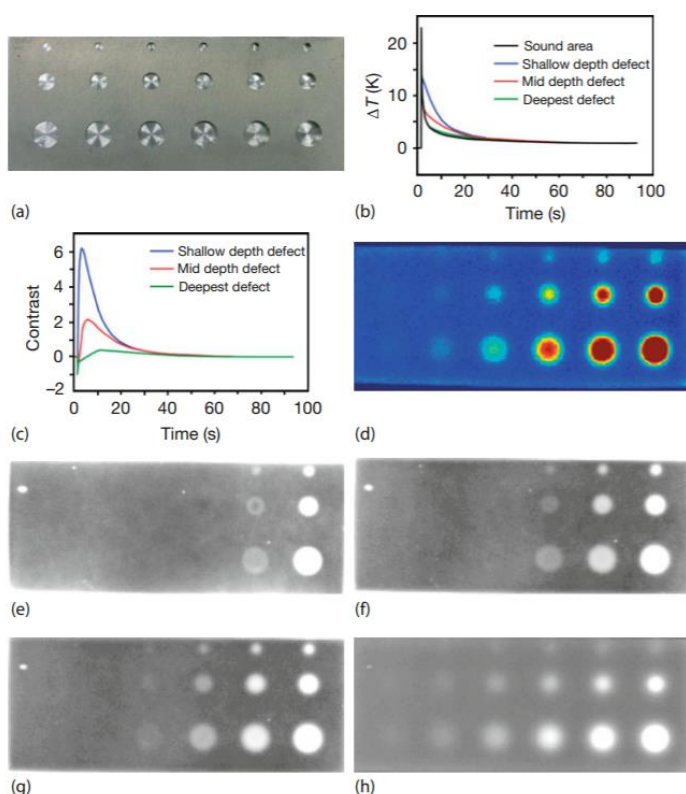
Veškerá zaznamenaná data se ukládají do počítače jako 3D matice, ve které znázorňují souřadnice x a y prostor a čas. Pomocí této matice vzniká teplotní profil (obr. 35a), který schematicky zobrazuje časovou řadu IR obrazů, které jsou od sebe odděleny o intervaly času Δt . Každý snímek zaznamenává pokles teploty dvou vybraných pixelů a různé barvy se vztahují k různým teplotám. Časová závislost teplot dvou sledovaných pixelů je schematicky zakreslena do grafu (obr. 35b). Teplota na povrchu zkoumané součásti klesá po počátečním impulzu vlivem difundace tepelné energie do materiálu. Na obr. 35a a 35b se dva pozorované pixely liší vlivem prostředí. Jeden pixel zobrazuje nenarušený materiál a druhý znázorňuje polohu, ve

které podpovrchová struktura blokuje tok tepla, což vede k vyšší povrchové teplotě, než je tomu tak u ostatních pixelů [29], [31].



Obr. 35 – Schéma vývoje teploty: a) datová 3D matice, b) teplotní profil pro vadné (pixel 2) a nezávadné (pixel 1) pixely [29]

Na obr. 36 je možné pozorovat výsledek měření zkušebního vzorku vyrobeného z pevného laminátového kompozitu. Je zde zkoumána sada otvorů s plochým dnem s různými průměry a hloubkami. Průměr otvorů se zvětšuje odshora dolů a hloubka se zvětšuje zleva doprava. Po pulsní excitaci byly IR obrázky zaznamenávány ze zadní strany jako funkce času. Je vidět, že hluboké díry jsou vidět již při krátké excitaci. S rostoucím časem jsou viditelnější i otvory s menší hloubkou, ale jejich záznam je rozmazaný vlivem boční difúze tepla. Porovnáním je i zřejmé, že menší díry mají větší sklon k difúzi tepla do boční stěny [29].



Obr. 36 – Vzorek laminátového kompozitu s otvory: a) vzorek, b) vývoj teploty (tepelný pulz při $t = 0$), c) teplotní kontrast mezi oblastí díry a homogenní částí vzorku, d) barevná reprezentace IR obrazu při $t = 0,4$ s, e) IR obraz při $0,033$ s, f) IR obraz při $t = 0,067$ s, h) IR obraz při $t = 0,400$ s [29]

3.3.6 Využití pulzní termografie

Hlavním využitím aktivní termografie, tedy i pulzní, je nedestruktivní testování. Počátek nedestruktivního testování pomocí aktivní termografie je v 60. letech 20. století. V tomto období se provádí první laboratorní výzkumy zkoumající detekci přechodové teploty objektů. Využívali se k tomu například tepelně citlivé barvy, bodové měřicí senzory a další přístroje, ale všechny tyto techniky byly omezeny citlivostí na nízkou teplotu a pomalou odezvou. V sedmdesátých letech se začínala vyvíjet s větším úspěchem termostatická a pulzní termografie, čemuž napomohl rostoucí vývoj termálních zobrazovacích systémů, nových metod ohřevu a počítačové technologie.

Pomocí fázové pulzní termografie lze měřit i tloušťku nátěru. V již provedeném experimentu byla nanášena na nerezovou ocel AISI 304 černá barva (LabIR HERP-LT-MWIR-BK-11). Barva byla na povrch nastříkána nerovnoměrně. Při tomto experimentu byla relativní chyba měření nižší než 3,6 %, což lze považovat za příznivý výsledek. Chyba závisí na kalibrační křivce, která se odvíjí od fázových hodnot v průběhu měření. Ty jsou ovlivněny výkonem lampy, vzdáleností lampy od vzorku a použitou barvou. Kalibrační křivka se mění v závislosti na těchto hodnotách a je platná v případě pevného nastavení. Největší výhodou je rychlost měření. Celý vzorek o rozměrech 100×50 mm byl změřen za 4 s, což odpovídá rychlosti změření dvou bodů pomocí tloušťkoměru. Výhodou je i že se jedná o bezkontaktní měření a nedochází k poškození povrchu nátěru [32].

3.4 3D laserové skenování

3.4.1 Úvod

Zásluhou neustále se zvyšující přesnosti 3D skenerů je možné technologii 3D skenování využívat stále častěji v průmyslové oblasti. Nejčastější využití je v automobilovém průmyslu, ale nově se objevuje např. i v oděvním průmyslu, kde lze pomocí 3D skenu těla generovat stříhy přímo pro danou postavu. V zemědělství se využívá pro automatické odsávačky mléka nebo v archeologii a architektuře, kde lze pomocí dronů naskenovat celé objekty.

3D skenování lze aplikovat i v energetickém průmyslu pro měření a hodnocení. Využívá se pro defektoskopické kontroly a pro kontrolu stavu povrchu, opotřebení a monitorování koroze [23].

3.4.2 Princip 3D laserového skenování

Při využití 3D skenování v oblasti NDT je nejčastější postup srovnání CAD modelu kontrolované součásti s 3D modelem vzniklým skenováním.

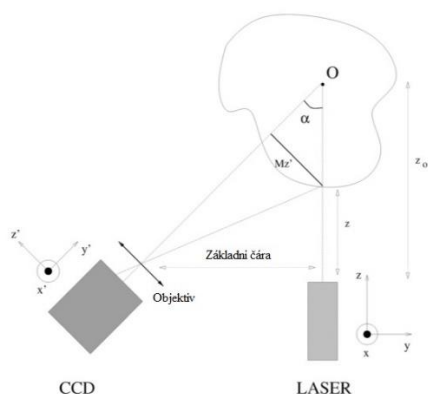
Jednoduchý skener je čárový laser, který promítá na skenovaný objekt „čáru“, světlo se šíří pouze v jedné rovině. Na předmět se laser promítne jako křivka, která odpovídá řezu tělesa a tento průmět je snímán kamerou ve vhodném úhlu. Typické geometrické znázornění skenovací sestavy je znázorněna na obr. 38. Světelný bod, který je vržený na objekt laserovým paprskem, je zobrazen na detektoru pro určení jeho polohy z' , což je vzdálenost obrazu od středu detektoru. Z této polohy lze vypočítat hloubkovou souřadnici podle vzorce (2):

$$z = \frac{b}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)}, \quad (2)$$

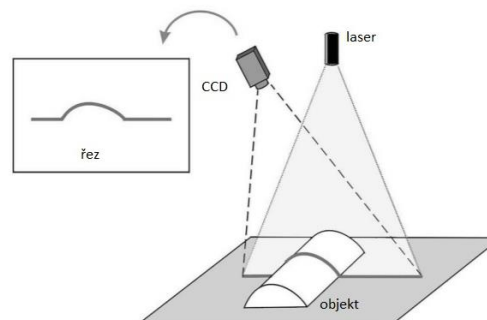
kde b je základní čára, α je úhel mezi optickou osou, detektorem a laserem a β úhel vztahující se k poloze z' obrazu bodu na detektoru. Znalost parametrů b a α ovlivňují přesnost měření a jsou založeny na kalibračním postupu.

Princip fungování laserového skeneru je znázorněn na obr. 37. Světelná čára, která je vyzařována laserovým zdrojem dopadá na zkoumaný objekt a kopíruje jeho tvar. Kamera vykreslí profil, který je poté zpracováván. Nejčastěji se využívá CCD kamera (CCD – z ang. Charge-Coupled Device, neboli zařízení s vázanými náboji), jelikož má vysokou citlivost, dynamický rozsah a snadné řízení. Prostorová poloha bodů ve světelném profilu je získávána pomocí triangulace za předpokladu, že jsou známi parametry geometrického měření. Jedná se o relativní polohu laseru, CCD kamery a objektu.

Pootočením nebo posunutím tělesa nebo skenu o předem danou hodnotu se získávají další řezy skenovaného objektu. Podle počtu získaných řezů a rychlosti posuvu nebo pootočení se mění rozlišení vzniklého modelu, který je složen z těchto řezů. Schéma získávání řezu je znázorněno na obr. 38.



Obr. 37 – Optická triangulační geometrie: α – úhel triangulace, M – zvětšovací faktor, b – základní čára, z – hloubková souřadnice bodu P , z' – poloha na CCD kameře [34]



Obr. 38 – Pracovní princip laserového skeneru – získávání řezu [34]

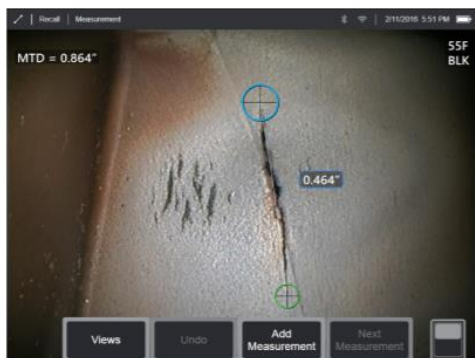
Přesnost získaného modelu závisí na několika faktorech. Přesnost ovlivňuje topografie povrchu skenované součásti, geometrická přesnost promítnutého obrazce, rozlišení a kvalita kamery, kalibrace poloh jednotlivých komponentů a software, který je pro skenování využit [33], [34].

Skenování pomocí laseru má omezení v podobě obtížného skenování lesklých povrchů. Emitované paprsky se mohou na povrchu odrazit pod úhlem, které zachycující zařízení nedetekuje. Zkoumaný povrch by měl mít dostatečnou difúzní odrazivost. Pokud je třeba kontroly lesklého povrchu, lze tento problém kompenzovat pomocí nanesení matné vrstvy pomocí spreje určeného pro tyto případy, který zajistí rovnoměrné pokrytí povrchu [35].

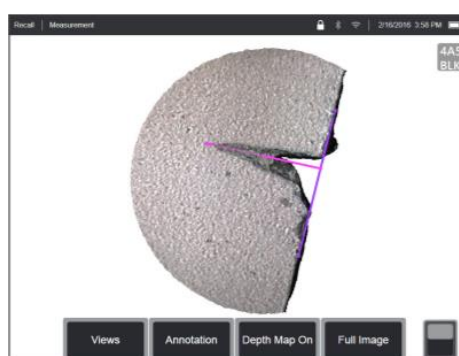
Skenery používané v NDT oblasti mají možnost různých druhů měření, které lze využít přímo v terénu při skenování a lze jimi určit velikost vady nebo její vzdálenost od určitého bodu. Příkladem je měření délky, technika „point to line“ a měření hloubky.

Nejjednodušší je měření délky, které je znázorněno na obr. 39. Pomocí měření délky lze určit délku trhliny nebo umístění indikace na objektu. Není ale vhodné měřit na zakřiveném povrchu.

Další technikou měření je tzv. point to line (obr. 40). Touto technikou lze změřit poškození hrany lopatky turbíny, změřit šířku mezery nebo svaru.

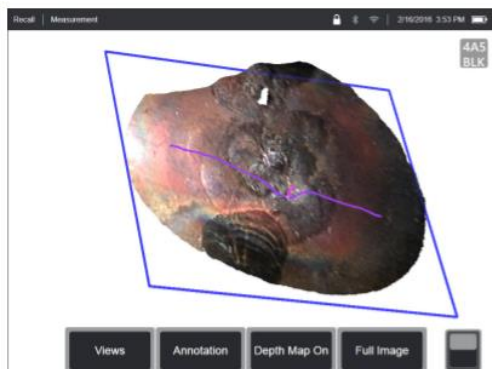


Obr. 39 – Ukázka měření délky trhliny pomocí 3D skenování [36]



Obr. 40 – Ukázka měření hrany lopatky pomocí point to line [36]

Měření hloubky (obr. 41) je výhodné použít pro měření hloubky důlků vzniklých korozi nebo erozí, také výška svaru nebo např. vnitřní průměr potrubí [36].



Obr. 41 – Ukázka měření hloubky defektu [36]

3.4.3 Laserové skenery

Pro využití v NDT oblasti musí mít použité skenery určitá specifika. Důležitá je přesnost skeneru a jeho použitelnost při různých geometrických omezeních, které plynou z provozních podmínek, jako je třeba stísněný prostor nebo radioaktivita.

Pro tyto účely je vhodné zvolit ramenový skener s vysokou přesností. Pro upnutí skeneru na tvarově složité plochy lze zkonstruovat přípravek, který tak manipulaci v prostoru usnadní [23].

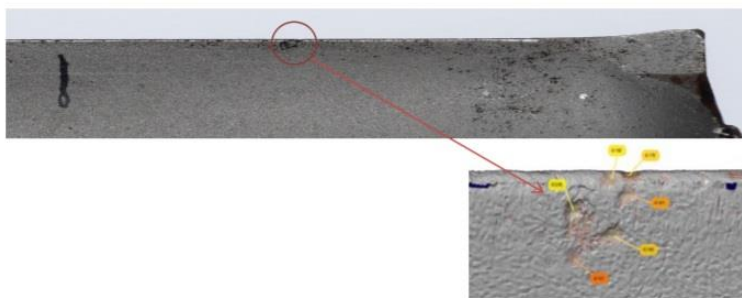
3.4.4 Endoskopy s 3D fázovým měřením

Endoskopy (též videoskopy) jsou zařízení, která umožňují kontrolu těžko přístupných prostorů pomocí kamery (sondy), která je připojena kabelem k ovládacímu zařízení. Sondy lze podle potřeby vyměňovat. Endoskopy nabízejí okamžité zobrazení vady pomocí displeje a následné sejmutí obrazu a přenesení do zvoleného formátu (např. jpg). Výsledky inspekce lze poté velmi dobře vizuálně posoudit.

Mimo vizuální prohlídky lze použít i speciální vyměnitelný nástavec, který umožňuje 3D měření. Při tomto měření lze určovat délku, hloubku, plochu, pitting a lze vykreslit topografii povrchu [37], [38].

3.4.5 Využití 3D laserového skenování

3D skenování lze použít pro NDT kontrolu a sledování degračních pochodů namáhaných komponentů. V energetické oblasti bylo 3D skenování aplikováno na kontrolu lopatek nízkotlakých 200MW rotorů, které se nachází v klasických elektrárnách. Na těchto lopátkách byly pomocí technik skenování nalezeny korozní důlky. Během měření lze stanovit přesnou polohu důlku, hloubku (pokud nepřesahuje 50 μm) a šířku. Poté následuje analýza kritičnosti jednotlivých důlků (obr. 42).



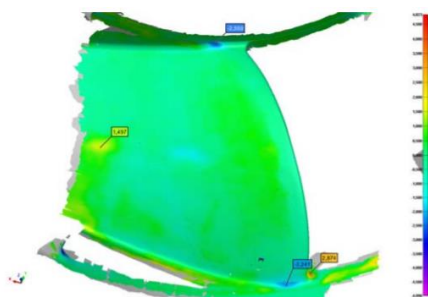
Obr. 42 – Lopatka s korozními důlky a sken korozních důlků

Při odstávkách vodních elektráren jsou pomocí 3D skenování kontrolovány lopaty oběžných kol, kde se hodnotí kavitace na lopkách a sleduje se kritický úbytek na místech oběžných kol (obr. 43). Úbytky je možné opravit navařením.

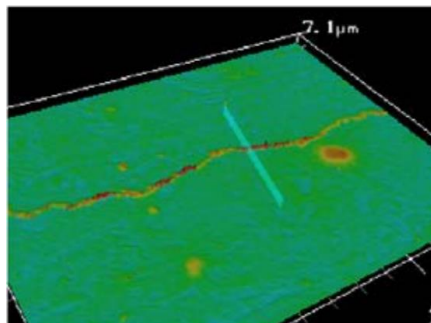
V JE byly pomocí ramenového skeneru kontrolovány vývoje otlaků po jednom roce provozu v oblasti drážek těsnění hlavní dělicí roviny a víka reaktoru.

Skenery se využívají i v místech, kde není člověku umožněn přístup vlivem radiace nebo nepřístupnosti. Zde se využívají například videoskopy s možností 3D měření.

3D skenování lze využít i v kombinaci s replikami. Replika je vytvořena pomocí rychletvrdnoucí hmoty, která je přitisknutá na kontrolované místo. Přenáší strukturu materiálu s přesností 0,1 μm a umožňuje zkoumat detailně defekty typu trhliny, korozní důlek nebo identifikovat různé tvarové odchylky. Po sejmutí repliky z povrchu je replika nasnímána pomocí 3D skeneru a je získán model negativu k povrchu. Lze tak např. změřit hloubku trhliny (obr. 44) [39].



Obr. 43 – Odchylky (žlutá oblast) na lopatě Francisovy turbíny od ideálního tvaru [39]



Obr. 44 – Měření hloubky trhliny na replice [39]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4 Cíl experimentálního programu

Cílem prováděných experimentů je ověření uplatnění jednotlivých nedestruktivních metod testování v energetickém průmyslu. Jednotlivé metody budou použity v konkrétním řešeném případě. Experimentální vzorky by se měly ideálně co nejvíce blížit objektům, které obsahují skutečné provozní vady. Experimentální program obsahuje popis zkušebních vzorků a použitých zařízení, kalibraci nebo popis použití jednotlivých zařízení a výsledky měření.

Výsledky získané jednotlivými zkušebními metodami budou ověřeny další NDT metodou nebo porovnáním s modelem zkušebního tělesa.

5 Heterogenní svary

Tato kapitola se zabývá vlastnostmi jednotlivých materiálů, ze kterých jsou vyrobeny zkušební vzorky. Byly popsány možné vady, které se u těchto materiálů objevují a byla porovnána zkoumaná metoda kontroly PAUT se zkouškou prozářením rentgenovým zářením.

5.1 Vlastnosti základních a přídatného materiálu a jejich vady

Pro testování techniky PAUT byly vytvořeny vzorky ze dvou plechů. Základní materiály (1.4541 a P256GH) byly svařeny metodou 141 (označení dle EN ISO 4063) pomocí přídatného materiálu (PM) svařovacího drátu OK Tigrod 16.95 (\varnothing 2,4 mm).

5.1.1 Ocel 1.4541

Austenitická chromniklová korozivzdorná ocel s označením 1.4541 (W.Nr., dle DIN EN X6CrNiTi18-10) je ocel stabilizovaná titanem a vykazuje odolnost vůči vysokým teplotám (bez okujení při oxidaci vzduchem ji lze použít až do teploty 800 °C, proti žáru a na vzduchu odolává až do teploty 850 °C). Tab. 1 obsahuje údaje o chemickém složení této oceli. Její použití se odvíjí obvykle od teploty 300 °C a více. Do 400 °C je tato ocel schválena používat pro výrobu tlakových nádob. V oxidačním prostředí, které obsahuje oxid siřičitý, odolává do 750 °C. Nelze svařit pomocí plamenného svařování, při svařování elektrickým obloukem je svařitelnost dobrá při použití všech metod. Využívá se hlavně pro výrobu součástí energetických a tepelných zařízení. Vlivem přítomnosti titanu nelze tuto ocel leštit do vysokého lesku a je hůře obrobitelná. Titan obsažený v této oceli zajišťuje odolnost vůči mezikrystalové korozi (MKK) v rozsahu všech teplot.

K mezikrystalové korozi austenitických ocelí dochází při působení tepla mezi 450 až 850 °C (feritické oceli nad 900 °C). Při těchto teplotách se na hranicích zrn vylučují karbidy chromu, což způsobuje ochuzování o chrom v okolí vyloučených karbidů chromu. Tento jev se vyskytuje často v blízkosti svarového spoje, tedy v přechodovém pásmu. Tento problém lze vyřešit výrazným snížením obsahu uhlíku v oceli nebo přidáním přísadového prvku, který naváže uhlík, jako je niob nebo v případě této oceli titan [40], [41], [42].

Svařování korozivzdorných austenitických ocelí je možné, ale je nutné dodržet určité podmínky a počítat s několika jevy, které by mohly být při zanedbání příčinou vady. Je nutné počítat s tím, že koeficient tepelné roztažnosti je oproti feritickým ocelím o 50 % vyšší, což může mít za následek vznik deformací a zbytkových napětí. Tepelná vodivost je přibližně o 60 % nižší, což má za následek soustředění tepla do svařovací zóny. Při svařování lze soustředění tepla eliminovat použitím měděných vložek, které teplo odvádí ze svarové oblasti (34).

Svařitelnost této austenitické Cr-Ni oceli ovlivňuje náchylnost k tvorbě teplejších trhlin, precipitace karbidů chromu, která vede k MKK, a zkrěhnutí vznikem σ -fáze.

Teplé trhliny vznikají vlivem přítomnosti prvků jako je S, P, Ti, Si a Nb. Tyto prvky snižují plasticitu kovu, který tuhne v mezidendritických prostorech nebo mohou vytvářet se železem a niklem nízkotavitelná eutektika a snižují tak technologickou pevnost hranic zrn. Rozhodující faktor, který snižuje náchylnost austenitických ocelí k tvorbě trhlin, je obsah δ -feritu ve struktuře. Svarový kov by měl obsahovat 2-6 hm. % δ -feritu, základní materiál 3 hm. % δ -feritu při teplotě okolí. Vyšší obsah snižuje odolnost proti korozi. Obsah δ -feritu lze vypočítat pomocí vzorce (3). Tento výpočet je určen pouze pro výpočet obsahu δ -feritu Cr-Ni austenitických ocelí. K tomuto výpočtu je potřeba zjistit ekvivalenty chromu Cr_E (4) a niklu Ni_E (5). Pomocí výpočtu je určen obsah δ -feritu 2,63 hm. %, což nepřesahuje maximální množství obsahu δ -feritu a lze tedy předpokládat, že nedojde ke vzniku trhlin. Výsledky získané pomocí těchto vzorců pro všechny materiály vzorků jsou zapsány v tab. 3.

$$\% \delta \text{feritu} = 3(Cr_E - 0,93 \cdot Ni_E - 6,7) \quad (3)$$

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (4)$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (5)$$

Tab. 1 – Chemické složení základního materiálu P265GH v hm. % [42], [43]

C	Si	Cr	Ni	Mn	Ti
Max 0,08	Max 1,0	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0	Max 2,0	5×C – 0,7

5.1.2 Ocel P265GH

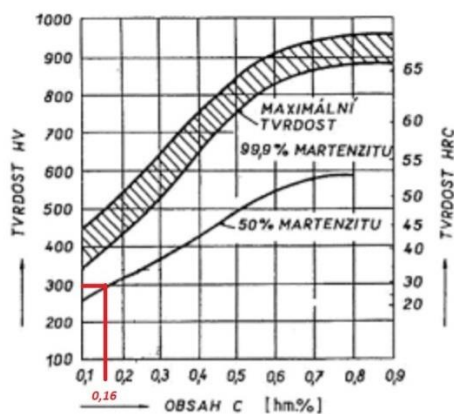
Ocel P265GH (ČSN EN 10028-2) je neušlechtilá, nízkouhlíková, nelegovaná a žárupevná ocel. Chemické složení této oceli je napsáno v tab. 2. Pro své časté využití pro výrobu kotlů se nazývá přívlastkem kotlová. Dále se využívá pro výrobu tlakových nádob a bezešvých trubek pro přepravu horkých kapalin. Odolává souvislému tepelnému zatížení až do 450 °C. Svařitelnost této oceli je dobrá a je vhodná pro tváření za studena i tepla. Struktura této oceli je feriticko-perlitická [44].

Při svařování nelegovaných ocelí je potřeba počítat se zvýšením tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti (TOO), která je zapříčiněna přítomností uhlíku. Současně je i snížena plasticita a vzniká pnutí, které může vést ke vzniku prasklin. Maximální tvrdost, kterou může TOO dosáhnout, je 350 HV, což odpovídá struktuře, která obsahuje 50 % martenzitu při obsahu uhlíku 0,25 hm %. Tato hodnota je odečtena z obr. 45. Hodnota obsahu uhlíku 0,25 hm. % je i mezní hodnotou, pod kterou není třeba zajišťovat zvláštní podmínky při svařování (např. předehřev). Ocel P265GH obsahuje dle tab. 2 0,16 hm % C, což odpovídá přibližně tvrdosti TOO 300 HV a není nutné pro její svařování zajišťovat zvláštní podmínky.

Při svařování této oceli je nutné zvolit vhodné konstrukční řešení. Na vznik prasklin během svařování má vliv tloušťka základního materiálu, protože s větší tloušťkou vzrůstá rychlost ochlazování. Aby se zamezilo vnitřnímu pnutí, tak musí být konstrukce dostatečně pružná a z toho důvodu je vhodnější použít tupé svary místo koutových [4].

Tab. 2 – Chemické složení základního materiálu P265GH v hm. % [44]

C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	Cu	S	Ti	Nb	P	V
Max 0,16	Max 0,35	0,30	0,30	0,60 – 1,20	0,08	0,30	0,015	0,30	0,02	0,025	0,02



Obr. 45 – Graf závislosti obsahu uhlíku na tvrdosti oceli způsobené přítomností martenzitu [4]

5.1.3 OK Tigor 16.95

Jedná se o austenitický drát typu 18Cr8Ni7Mn používaný pro svařování heterogenních svarů a obtížně svařitelných ocelí. Jeho chemické složení je zapsáno v tab. 3 [45].

Tab. 3 – Chemické složení přídatného materiálu OK Tigor 16.95 v hm. % [45]

C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	Cu
0,08	0,90	18,70	8,10	7,00	0,20	0,10

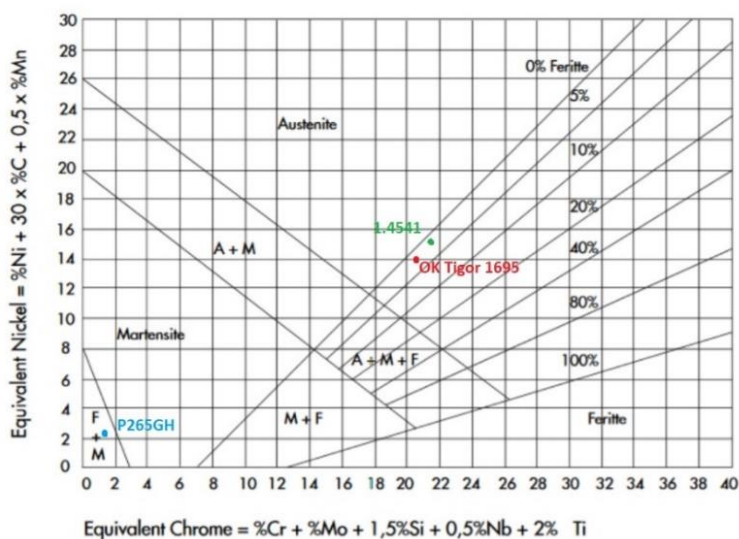
5.1.4 Struktura jednotlivých materiálů

Struktura materiálů vzorků byla určena pomocí výpočtů (4) a (5) a Schaefflerova diagramu. Ekvivalenty Cr_E a Ni_E jsou zapsány v tab. 4 a jejich hodnota je vynesena do Schaefflerova diagramu na obr. 46.

Z diagramu vyplývá, že ocel 1.4541 obsahuje austenit a okolo 5 % feritu, stejně jako přídatný materiál. Kotlová ocel P265GH obsahuje ferit a martenzit.

Tab. 4 – Výsledky výpočtů Cr_E , Ni_E a obsah δ -feritu zadaných vzorků

	1.4541	P265GH	OK Tigor 16.95
Cr_E	21,90	1,52	20,25
Ni_E	15,40	2,04	14,00
δ -ferit [hm. %]	2,63	-	-



Obr. 46 – Schaefflerův diagram: A – austenit; F – ferit; M – martenzit [59]

5.2 Vzorky heterogenních svarů

Vzorky byly svařeny ze dvou plechů (ZM 1.4541 a P256GH) metodou 141. přídavný drát OK Tigrod 16.95 měl Ø 2,4 mm. Každý plech měl délku 300 mm, šířku 40 mm a tloušťku 10 mm. Svařením vznikly vzorky o rozměru 300×80 mm. Použité vzorky jsou vyfoceny na obr. 47. Jedná se o tři vzorky heterogenních svarů, které jsou vyrobeny ze stejných materiálů a stejnou technologií svařování. Vzorky nesou číselné označení 1, 3 a 6. V této práci budou označeny jako vzorek č. 1, vzorek č. 3 a vzorek č. 6.

Po svaření byly vzorky podrobeny zkouškou prozářením rentgenovým zářením (RTG) a kontrole pomocí PAUT.

Po dokončení NDT kontrol byly vzorky rozříznuty napůl podle linie naznačené na obr. 47. Jednotlivé poloviny vzorků o rozměru 150×80 mm byly umístěny do různých korozních prostředí. Korozní testy probíhaly 53 dní v roztocích kotlové vody a NaCl v různé koncentraci.

Po vyjmutí z korozního prostředí byly zopakována RTG zkouška a kontrola pomocí PAUT.



Obr. 47 – Použité vzorky: (zleva) Vzorek č. 1, vzorek č. 3, vzorek č. 6

5.3 Kontrola pomocí RTG

Kontrola proběhla pomocí RTG systému s digitálním detektorem obrazu GE DXR 250u-w. Žhavicí proud činil 5,0 mA, předpětí 120 kV a doba expozice byla 0,3 s. Vzdálenost RTG zdroje od zkušebních těles byla 500 mm.

Jako indikátor jakosti obrazu byla použita radiografická drátková měrka 10 FE EN (dle normy EN 462-1:1994).

5.3.1 Výsledky kontroly pomocí RTG

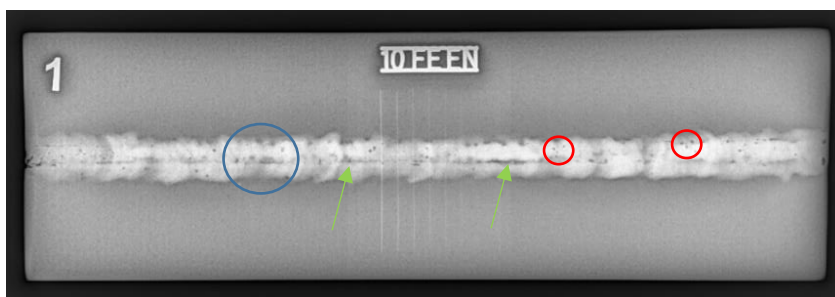
Pomocí normy ČSN EN ISO 17635 byl určen požadovaný stupeň kvality kontrolovaných svarů pro radioskopické zkoušení pomocí digitálního zobrazení jako stupeň B podle ČSN EN ISO 5817. V závorkách u jednotlivých vad jsou vypsány referenční čísla jednotlivých vad podle ISO 6520-1.

Výsledek RTG zkoušky pro vzorek č. 1 před korozní zkouškou představuje obr. 48 a výsledek po korozních testech je znázorněn obr. 49. Rentgenové snímky vzorků č. 3 a 6 jsou obsaženy v příloze č. 1.

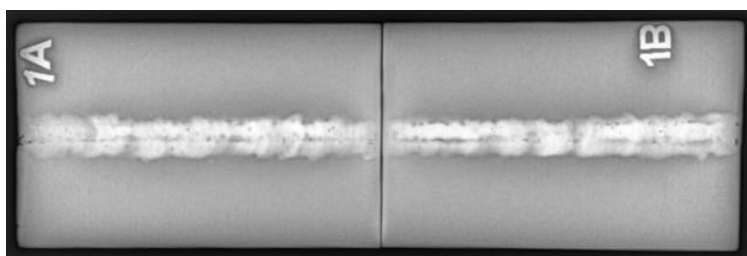
Na snímku vzorku č. 1 lze indikovat velké množství pórů (2011), které nevykazují rovnoměrné rozmístění. Objevují se zde shluky pórů (2013), které jsou na obr. 48 označeny červeně. Po celé délce svaru se objevují výrazné linie rovnoběžné s osou svaru, které jsou určeny jako vrub v kořeni (5013) a je na ně odkázáno zelenou šipkou. Modře označený je hubený kořen (515), který se na snímku jeví širší, než je vrub v kořeni. Po celé délce se kresba svaru jeví jako nepravidelná, je detekováno přetečení (506). Dle normy ISO 5817 jsou velikosti a rozsahy těchto vad nepřijatelné. Při srovnání indikací před a po korozním testu není zjevný rozdíl.

Na RTG snímku vzorku č. 3 jsou detekovány póry a jejich shluky, vruby v kořeni a místní nadměrný průvar neboli krápník (5041), který se objevuje na více místech a v přiloženém RTG snímku se jeví jako světlejší až bílé plochy a je zvýrazněn fialově. Detekováno je i přetečení a kresba svarového kovu je nepravidelná. I zde jsou vady dle normy nepřijatelné. Při srovnání indikací před a po korozním testu není zjevný rozdíl.

RTG snímky vzorku č. 6 vykazují póry, shluky pórů, krápníky po celé délce svaru. Dále byl detekován studený spoj (401), který se jeví jako krátká tmavší linie na okraji svarové housenky. Je detekováno přetečení. Vady jsou dle normy nepřijatelné a při porovnání snímku před a po korozních testech nejsou detekovány další vady.



Obr. 48 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 1 před korozním testem: červená – 2013, zelená – 5013, modrá – 515, 506



Obr. 49 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 1 po korozním testu: 1A – výchozí stav, 1B – kotlová voda

5.4 Kontrola pomocí PAUT

Pro účely zkoušení bylo použit přístroj Dynaray 128/128 PR. Pro první měření před korozním testem byla použita 2D maticová sonda AM5_9×7. Při kontrole po korozním testu byla použita 1D lineární sonda AS5 z důvodu nedostupnosti původní sondy. Při měření byl použit enkodér, což je snímací zařízení, které se v oblasti PAUT používá pro měření délky dráhy, kterou urazila sonda při měření [46]. Jako vazební médium byla použita voda.

Zkoušení vyžaduje kalibraci časově korigovaného zesílení (Time Corrected Gain – TCG). TCG kompenzuje prostorový útlum zvýšením vstupního zesílení podle očekávaného útlumu. Kalibrace proběhla pomocí bočního vývrtu měrek K2 dle normy ČSN EN 27963 z materiálu A1018 ocel a 304 nerezová ocel. Měrky jsou zachyceny na obr. 50 [47], [48].

Měření proběhlo z obou stran svarového spoje, pokaždé s kalibrací pro daný materiál.



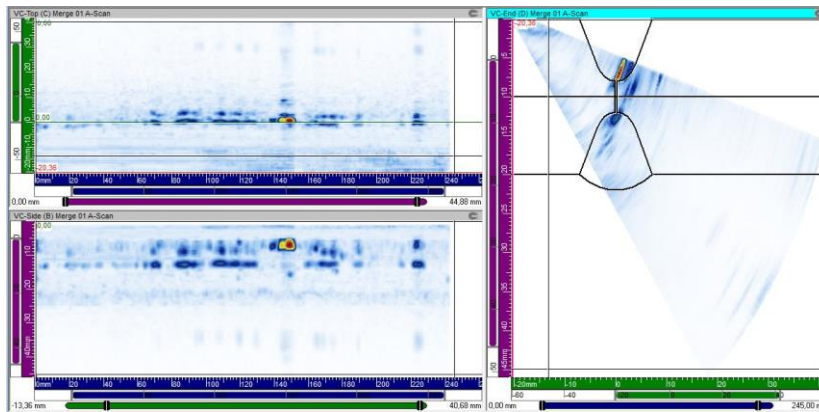
Obr. 50 – Měrky K2 použité pro kalibraci TCG: 304 nerezová ocel (vlevo) a A1018 ocel (vpravo)

5.4.1 Výsledky kontroly pomocí PAUT

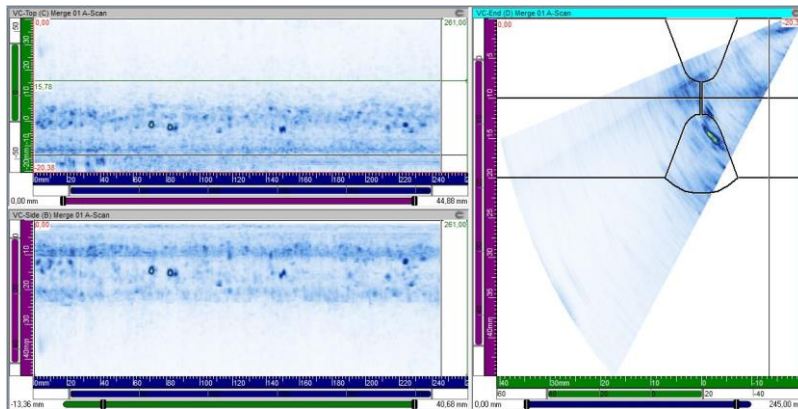
Kontrola vzorku č. 1 ze strany kotlové oceli (feritické – F) prokázala velké množství indikací v oblasti kořene svarového spoje nad vnitřním povrhu svarové plochy. Na pozici 150 mm byla detekována výraznější vada ve srovnání s ostatními. Výsledky měření z této strany jsou znázorněny na obr. 51. Na obr. 52 jsou vyobrazeny výsledky z měření z austenitické části vzorku (austenitické – A) byly detekovány pouze dvě výraznější indikace. Při srovnání kontroly po korozních testech (obr. 53 a 54) se snímky 51 a 52 je zřejmé, že by nebyly detekovány další indikace.

Snímky s výsledky pro vzorek č. 3 jsou obsaženy v příloze č. 2. Snímky vzniklé před korozním testem obsahují několik slabších indikací z obou stran materiálů. S-sken zobrazuje tyto indikace v celém objemu svarového kovu. Měření po korozním testu detekuje výraznější indikace, které mohou být způsobeny vlivem korozního testu nebo změnou sondy.

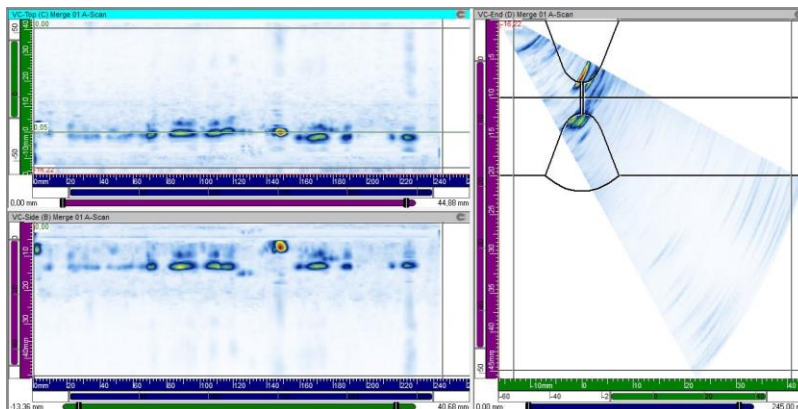
Snímky s výsledky pro vzorek č. 6 jsou obsaženy v příloze č. 2. Výsledkem měření je detekce většího množství indikací v oblasti kořene svarového spoje nad vnitřním povrchem svarové plochy především ze strany austenitické oceli. Rozdíl mezi snímky před a po korozním testu není patrný.



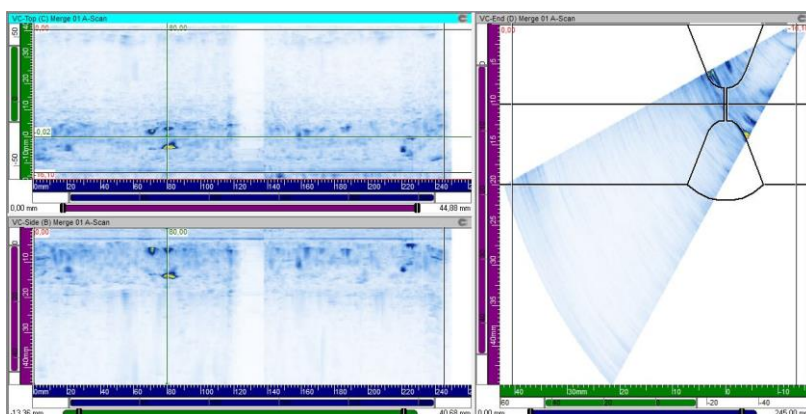
Obr. 51 – Výsledek měření vzorku č. 1 ze strany F před korozním testem



Obr. 52 – Výsledek měření vzorku č. 1 ze strany A před korozním testem



Obr. 53 – Výsledek měření vzorku č. 1 ze strany F po korozním testu



Obr. 54 – Výsledek měření vzorku č. 1 ze strany A po korozním testu

5.5 Shrnutí výsledků měření

Detekované vady ve všech použitých vzorcích pro obě metody testování (RTG a PAUT) jsou zapsány v tab. 5. Pomocí použitých metod byly detekovány póry a shluky pórů. Při srovnání RTG snímků a výsledků z PAUT zkoušky lze nalezené indikace pojmenovat.

Na pozici 150 mm ve vzorku č. 1 je dle PAUT detekována větší indikace, která je možná pomocí RTG určit jako vrub v kořeni.

Slabší indikace detekované pomocí PAUT vzorku č. 3 lze identifikovat pomocí S-skenů jako póry a shluky pórů. Vrub v kořeni nebyl detekován, nejspíše vlivem šumu v okolí pórů. Indikace nad vnitřním povrchem svarové plochy (PAUT) lze určit jako studený spoj, který je dobře patrný na obr. 100 obsaženého v příloze č. 2. Dále je možné určit drobné indikace jako póry a shluky pórů.

Tab. 5 obsahuje seznam vad detekovaných pomocí RTG zkoušky a určení, zda byly detekovány v konkrétním vzorku pomocí obou metod zkoušení.

Tab. 5 – Výsledky detekce vad pomocí RTG a PAUT a určení, zda konkrétní vada byla detekována (✓), nebyla detekována (✗) a těleso vadu neobsahuje (-)

Vada	Vzorek č. 1		Vzorek č. 3		Vzorek č. 6	
	RTG	PAUT	RTG	PAUT	RTG	PAUT
Pór	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Shluk pórů	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vrub v kořeni	✓	✓	✓	✗	-	-
Hubený kořen	✓	✗	-	-	-	-
Přetečení	✓	✗	✓	✗	✓	✗
Nadměrný průvar	-	-	✓	✗	✓	✗
Studený spoj	-	-	-	-	✓	✓

6 Aplikace Dynamic Depth Focussing, techniky sběru dat Full Matrix Capture a metody zpracování dat Total Focusing Method

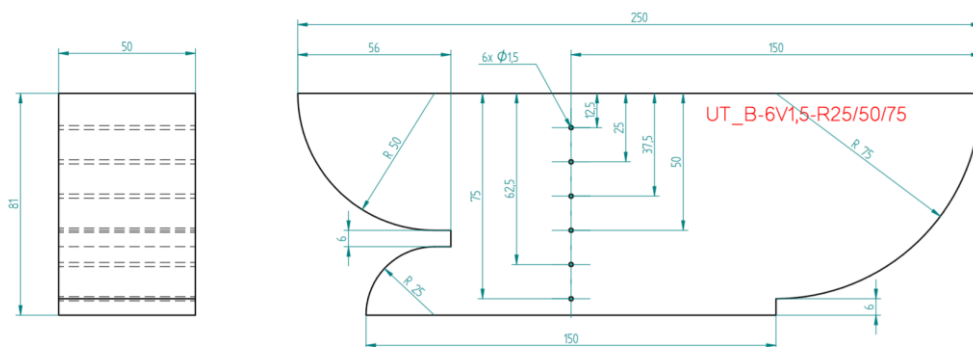
Tato kapitola se zabývá ověřením techniky sbírání dat Full Matrix Capture a následnou analýzou pomocí metody Total Focusing Method a využití Dynamic Depth Focussing při měření pomocí techniky PAUT. Ověření správnosti jednotlivých analýz proběhlo pomocí porovnání s výkresem součásti v případě kalibrační měrky a pomocí srovnání s rentgenovými snímky zkušebních těles. Jelikož se jednalo o měření na kalibrační měrce a nově nevyráběných tělesech, nezabývala se tato kapitola podrobnou charakteristikou jednotlivých materiálů, ze kterých jsou zkušební tělesa vyrobená.

6.1 Kalibrační měrka a zkušební vzorky

Zkušební tělesa (ZT) č. 29 a 30 byla v roce 2018 podrobena zkoušce prozářením podle normy ČSN EN ISO 17636-1/B. Jako zdroj záření byl použit YXLON DS225, žhavicí proud při této zkoušce byl 4,0 mA a doba expozice činila 5 min 45 s v případě ZT č. 29 a 1 min 50 s pro ZT č. 30. Vzdálenost RTG zdroje od zkušebních těles byla 700 mm. Jako indikátor jakosti obrazu byla použita radiografická drátková měrka 10 FE EN (dle normy EN 462-1:1994).

6.1.1 Kalibrační měrka

Jedním z testovaných těles je kalibrační měrka UT_B-6V1,5-R25/50/75 z materiálu AISI 1018. Rozměry této měrky jsou převzaty z výkresu součásti a jsou zachyceny na obr. 55. Měrka obsahuje šest bočních vývrtů o průměru 1,5 mm, které jsou umístěny v linii nad sebou ve vzdálenosti 12,5 mm.



Obr. 55 – Kalibrační měrka UT_B-6V1,5-R25/50/75

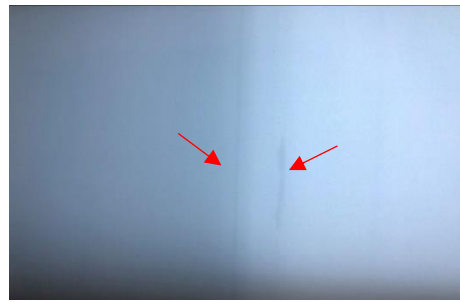
6.1.2 Zkušební těleso č. 29

Druhé těleso nese označení ZT č. 29 a jedná se o heterogenní svařenec z plechů o tloušťce 26 mm z oceli ASTM A441 a neznámé korozivzdorné oceli. ZT č. 29 je znázorněno na obr. 56.

Protokol 111/2018 o zkoušce prozářením (příloha č. 3) udává, že byly detekovány dvě vady. Jedná se o studený spoj (401) na pozici X250; Y95 o velikosti 22×1,4 mm a X240; Ycelá délka. Rentgenový snímek, který existuje pouze ve fyzické podobě, byl prosvícen na negatoskopu a byl pořízen snímek vady (obr. 57).



Obr. 56 – Zkušební těleso č. 29



Obr. 57 – Část RTG snímku ZT č. 29: 401
(označeny šipkami)

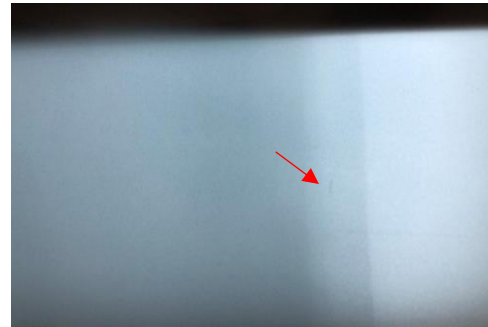
6.1.3 Zkušební těleso č. 30

Zkušební těleso č. 30 je vyrobeno z feritické oceli a korozivzdorné oceli AISI 316 a jde o segment trubky o tloušťce 18 mm. Těleso je vyfotografováno na obr. 58.

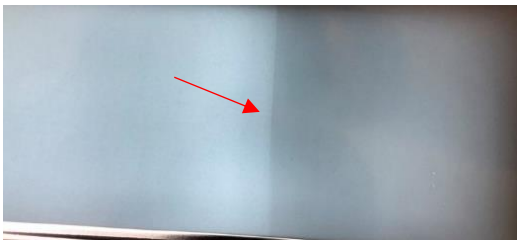
Protokol 118/2018 (příloha č. 4), který obsahuje data ke zkoušce prozáření tohoto tělesa udává, že byly detekovány dvě vady – studený spoj (401) na pozici X237; Y160 o velikosti 70×0,5 mm a ojedinělý oxidický vměstek (3032) na pozici X237; Y54 o velikosti 3×1 mm. Vada 3032 je možná vidět na obr. 59 na části RTG snímku a 401 je zachycená na obr. 60.



Obr. 58 – Zkušební těleso č. 30



Obr. 59 – Část RTG snímku ZT č. 30: 3032
(označen šipkou)



Obr. 60 – Část RTG snímku ZT č. 30: 401 (označen šipkou)

6.2 Sběr dat pomocí FMC

Sběr dat proběhlo pomocí maticové sondy AM 5 MHz 9×7 elementů a byl použit přístroj Dynaray 128/128 PR. Kalibrace byla uložena z předchozího měření PAUT z kapitoly 5.4.

Během měření touto technikou se objevila komplikace v podobě obtížného a velmi pomalého sběru dat vlivem získávání obrovského množství dat. To umožňovalo posun sondy rychlostí max 0,5mm/s a data získaná pro 10 mm zkoumané plochy měla velikost několik GB. Tento velký objem dat kladl vysokou náročnost na ultrazvukový přístroj a zejména počítač s ovládacím softwarem, který zpracovával data několik minut. V případě běžného měření pomocí PAUT byla data zpracována do jedné minuty a měření probíhalo rychle. Při dalším měření bylo aplikováno DDF.

Po měření byla na data aplikována metoda sběru dat TFM, jejíž zpracování trvalo několik minut.

6.2.1 Kalibrační měrka

Kalibrační měrka byla pro porovnání změřena bez aplikace FMC. Pořízený S-sken na obr. 61 je v úhlu 40° - 70° a lze na něm detekovat pouze celé echo jednoho vývrvtu a část echa vývrvtu pod ním. S-sken 40° - 80° při aplikaci FMC/TFM zvýrazní již detekované vývrvtu a odstraní část šumu (obr. 62).

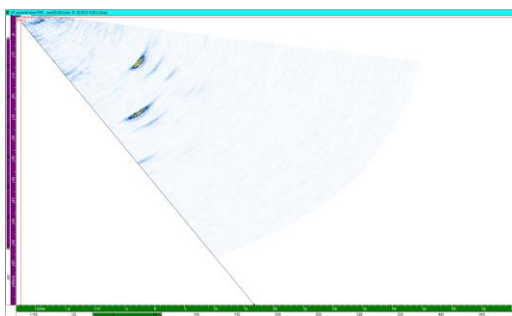
Velkou výhodou při FMC je možnost měnit úhly v celém rozsahu měřené plochy v post procesu. Obr. 63 představuje změnu úhlů na 30° - 80°, kde lze vidět detekované dva vývrvtu a část echa třetího. Na S-skenu na obr. 64 jsou patrné všechny vývrvtu. Vzhledem k dosažení 2. kritického úhlu, při kterém mizí příčná vlna, jsou echa od vývrvtů ve spodní části měrky značně zeslabené. Pro zvýraznění vývrvtů byl signál zesílen o 6 dB.



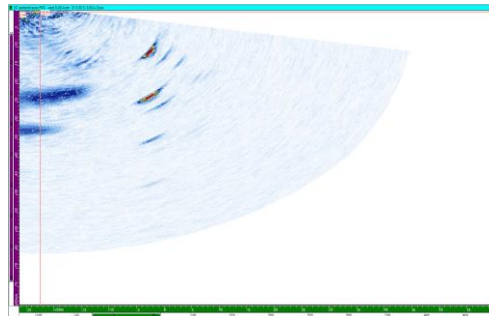
Obr. 61 – Kalibrační měrka, S-sken 30° - 80°, FMC/TFM: 2 celá echa vývrvtů, 1 částečné



Obr. 62 – Kalibrační měrka, S-sken 40° - 80°, FMC/TFM: 1 celé echo vývrvtu, 1 částečné



Obr. 63 – Kalibrační měrka, S-sken 40° - 70°, PAUT: 1 celé echo vývrvtu, 1 částečné



Obr. 64 – Kalibrační měrka, S-sken 0° - 80°, FMC/TFM, zesílení o 6dB: parných všech 6 ech vývrvtů

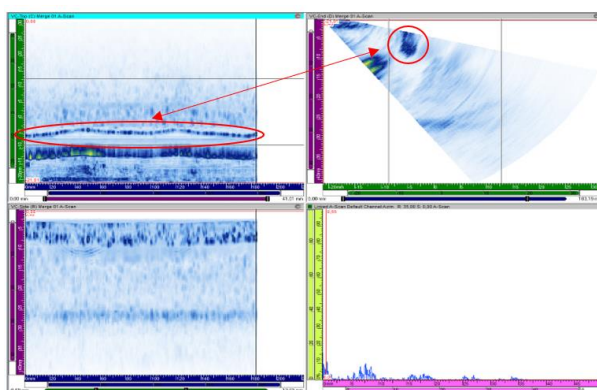
6.2.2 Zkušební těleso č. 29

ZT č. 29 bylo měřeno dvakrát z feritické strany na straně A a B.

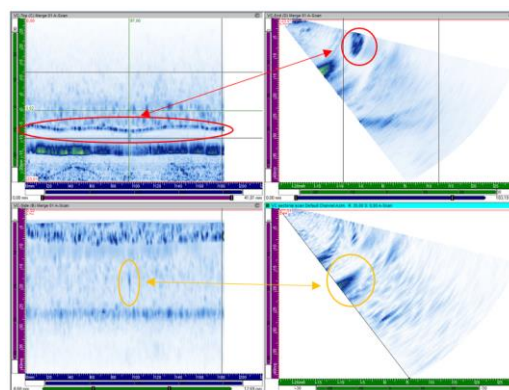
Nejprve se měřila strana A. Pro srovnání bylo ZT č. 29 změřeno bez aplikace FMC. Vznikl S-sken 35° - 75°, B-sken a C-sken (obr. 65). Na C-skenu lze jasně detekovat indikaci, která byla v RTG snímcích označena jako studený spoj. Tato indikace je patrná i na S-skenu. Studený spoj je zvýrazněn na obr. 65 červeně.

Na obr. 66 jsou zobrazeny výsledky měření pomocí PAUT/DDF. Při aplikaci DDF byla detekována indikace navíc ve srovnání se samotným PAUT (žlutě označeno).

Dále byly vytvořeny S-skeny pomocí aplikace FMC/TFM s rozpětím úhlu 35° - 65° a 60° - 85°. Tyto S-skeny jsou součástí přílohy č. 5. Výsledkem těchto měření je zjištění, že nově nalezená indikace pokračuje dál k vnějšímu povrchu, což v porovnání s obr. 65 nebylo při měření bez použití FMC/TFM patrné.

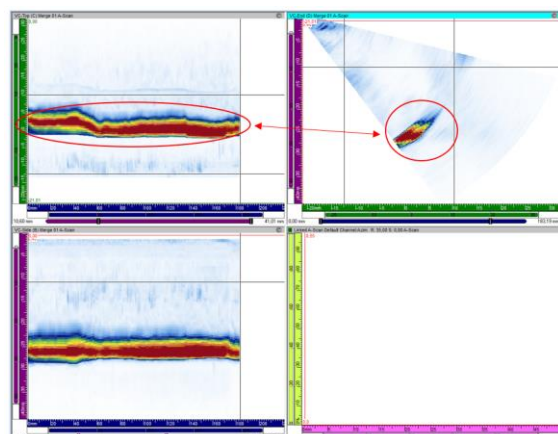


Obr. 65 – ZT č. 29, strana A, S-sken 35° - 75°, PAUT, studený spoj zakroužkován červeně

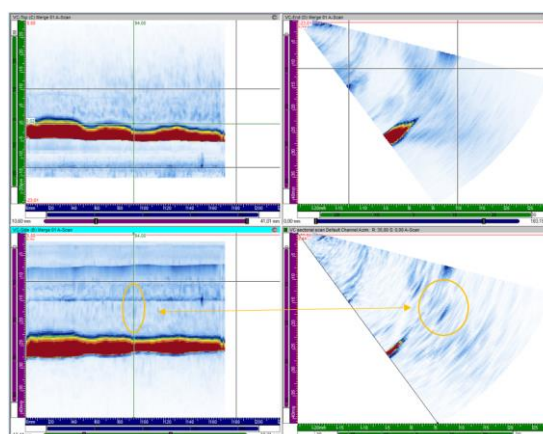


Obr. 66 – ZT č. 29, strana A, S-sken 35° - 75°, PAUT/DDF, žlutá: nová detekovaná indikace

Při měření na straně B bez použití sběru dat FMC byla detekována výrazná indikace (obr. 67). Aplikace PAUT/DDF odhalila indikaci na pozici 94 mm (obr. 68) která byla detekována při měření pomocí PAUT/DDF na straně A. Větší snímek je přiložen v příloze č. 5.



Obr. 67 – ZT č. 29, strana B, S-sken 35° - 75°, PAUT, červená: indikace



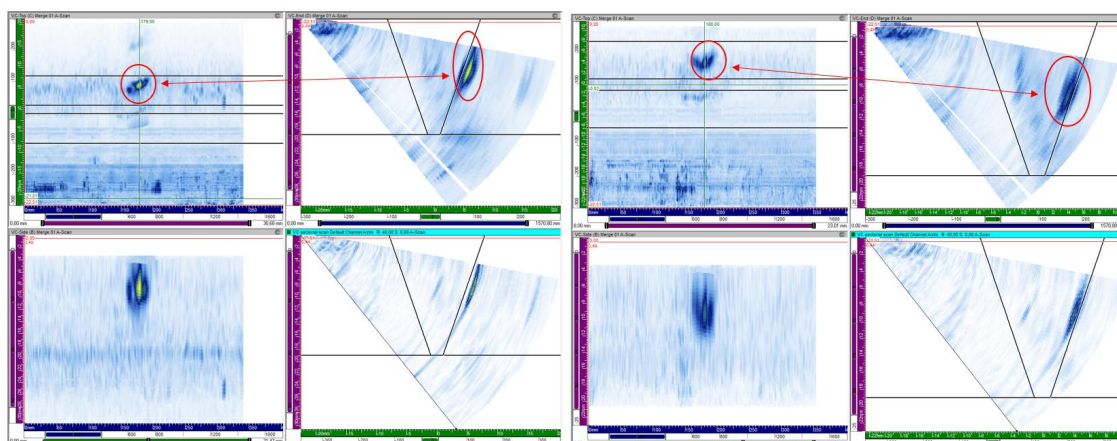
Obr. 68 – ZT č. 29, strana B, S-sken 35° - 75°, PAUT/DDF, žlutá: indikace v pozici 94 mm

6.2.3 Zkušební těleso č. 30

ZT č. 30 bylo zkušeno pouze z vnější strany na straně feritu.

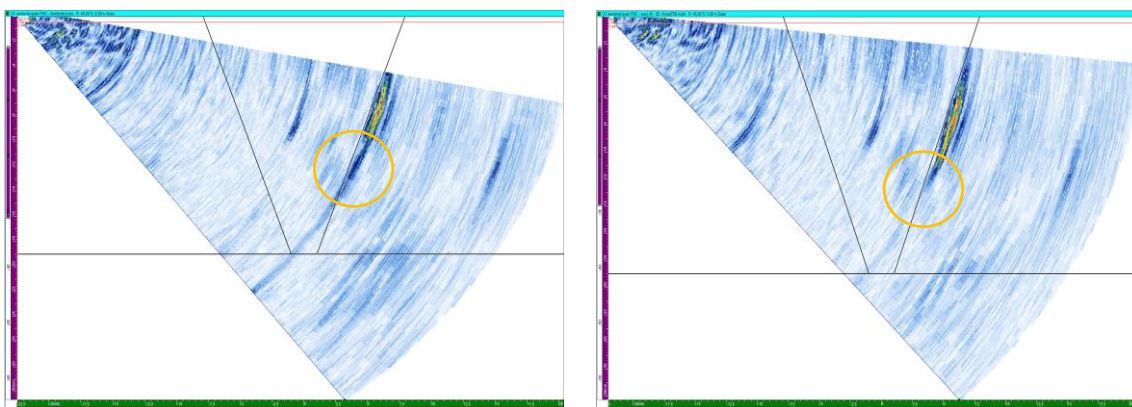
První proběhlo měření bez použití FMC. Vznikl C-sken, B-sken a S-sken v úhlu $40^\circ - 80^\circ$. Je zde detekována vada na pozici 179 mm, která leží na rozmezí svar-základní materiál, což lze vidět na S-skenu (obr. 69). Aplikace PAUT/DDF (obr. 70) nevykazuje zlepšení v detekci vady. Obr. 69 a 70 jsou obsahem přílohy č. 5 ve větší velikosti.

Použití FMC/TFM vykazuje zlepšení ve formě detekování další vady (obr. 71) ve srovnání s PAUT (obr. 67). Při fokusaci do hloubky 8 mm je indikace více zřetelná (obr. 72). V porovnání s RTG se nejspíše jedná o oxidický vměstek. Tyto dva S-skeny se nachází ve větší velikosti v příloze č. 5.



Obr. 69 – ZT č. 30, S-sken $40^\circ - 80^\circ$, PAUT, červená: indikace v pozici 179 mm

Obr. 70 – ZT č. 30, S-sken $40^\circ - 80^\circ$, PAUT/DDF, červená: indikace v pozici 180 mm



Obr. 71 – ZT č. 30, S-sken $40^\circ - 80^\circ$, FMC/TFM, žlutá: nová indikace

Obr. 72 – ZT č. 30, S-sken $45^\circ - 85^\circ$, FMC/TFM, fokusace do hloubky 8 mm, žlutá: nová indikace

6.3 Shrnutí výsledků měření

Metoda sběru dat FMC se projevila jako velmi užitečná při následném zpracování výsledků. Velký objem umožnil podrobnější detekci již změřeného tělesa bez nutnosti nového měření. Pomocí tohoto nástroje lze měnit úhly S-skenů a detekovat rozsah vady v mnohem větší míře než při použití klasického PAUT.

Aplikace DDF a metody zpracování dat TFM se projevila jako užitečná, jelikož obě tyto techniky umožnily mnohem přesnější detekci vad než u měření pomocí samotného PAUT. Při

použití FMC/TFM (konkrétně změny úhlů S-skenů a zesílení signálu o 6 dB) na zkušební měrce, byly detekovány všechny umělé vady měrky, avšak spodní dvě byly detekovány pouze jako částečné echo, které ale zkušební obsluha kontroly dokáže rozlišit.

Kontrola ZT č. 29 pomocí PAUT detekovala protáhlou indikaci, která je při porovnání s výsledky RTG určena jako studený spoj. Studený spoj byl detekován i při aplikaci PAUT/DDF s tím rozdílem, že byla navíc detekována další indikace, tedy kratší studený spoj (obr. 68). Analýza pomocí FMC/TFM odhalila, že detekovaná vada vede dále k povrchu pomocí změny úhlů v S-skenu (příloha č. 5, obr. 104 a 105) a potvrdila tak správnou detekci vady pomocí PAUT/DDF, která detekovala indikaci na stejné pozici.

Aplikace PAUT na ZT č. 30 napomohla detekci studeného spoje (ve srovnání s RTG snímkem). Analýza dat pomocí PAUT/DDF nenapomohla detekci dalších vad. Aplikace FMC/TFM a fokusace do 8 mm se projevila jako užitečnější, jelikož byla detekována další indikace. Při porovnání s daty z RTG snímku se jedná o oxidický vměstek.

Tab. 6 obsahuje seznam vad nalezených pomocí RTG zkoušky a určení, zda byly detekovány metodou PAUT, PAUT/DDF a FMC/TFM.

Tab. 6 – Výsledky detekce vad pomocí PAUT, FMC/TFM, DDF a určení, zda konkrétní vada byla detekována (✓), nebyla detekována (✗) a těleso vadu neobsahuje (-)

Těleso	Kalibrační měrka		ZT č. 29			ZT č. 30		
	PAUT	FMC/TFM	PAUT	PAUT/DDF	FMC/TFM	PAUT	PAUT/DDF	FMC/TFM
Vývrty (celkem 6)	✗ (detekovány 2)	✓ (detekováno 6)	-	-	-	-	-	-
Studený spoj 22×1,4 mm	-	-	✗	✓	✓	-	-	-
Studený spoj celá délka	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
Studený spoj 70×0,5 mm	-	-	-	-	-	✓	✓	✓
Oxidický vměstek	-	-	-	-	-	✗	✗	✓

7 Nedestruktivní testování sklolaminátů pomocí pulzní termografie

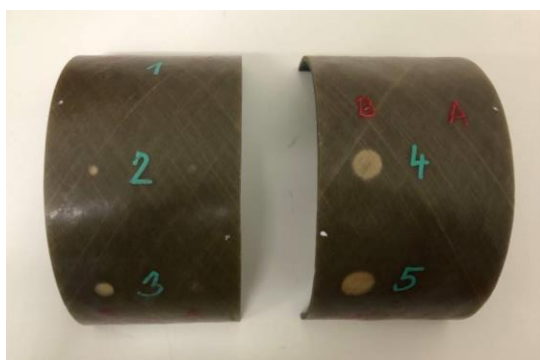
Tato kapitola se zabývá ověřením schopnosti pulzní termografie detekovat vady ve sklolaminátech. K tomuto experimentu budou použity sklolaminátové vzorky a sestava pulzní termografie ATI6000, které jsou vlastnictvím Centra výzkumu Řež a sestava SC6700 ze společnosti Nových technologií – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni. Obě sestavy budou mezi sebou porovnány.

7.1 Vzorky

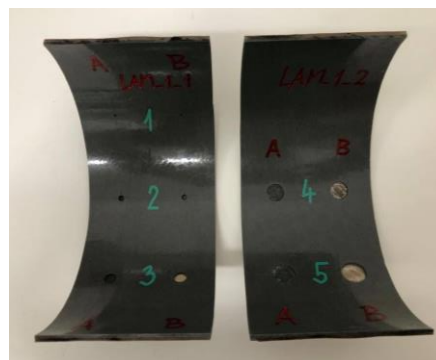
Pro testování využití pulzní termografie pro kontrolu sklolaminátů byly použity vzorky LAM – 1.1 a LAM – 1.2 vyrobené z vinylesterové pryskyřice DERAKANE 411-45 a ze skelné výztuže z ECR skla firmy Owens corning. Zkušební tělesa jsou zachycena na obr. 73 a 74. Polotovarem zkušebních těles byla trubka o průměru 105 mm s ošetřenou vnitřní stěnou pomocí chemicky odolné vrstvy s SiC. Tloušťka stěny je 4,5 mm.

Na vnitřní straně obou těles jsou vyfrézovány kruhové defekty o různých hloubkách a průměrech. Výkresy těchto těles se nachází v přílohách. Pomocí přiložených výkresů (příloha č. 7) je určena hloubka a průměr jednotlivých umělých defektů, které jsou rozděleny dle popisu přímo na vzorcích na sloupce A a B a jejich poloha je označena číslem 1-5. Defekty tělesa LAM – 1.1 byly určeny pomocí 3D skenování a pomocí digitálního posuvného měřítka. Rozměry defektů LAM – 1.2 jsou určeny z rozměrů označených na výkrese. Hodnoty defektů jsou zapsány v tab. 7.

Vnější strana těles, která bude podrobena inspekci, vykazuje lesk, který by mohl ovlivnit měření, jelikož odraz pulzu by se mohl jevit jako indikace. Jelikož tento jev nelze odstranit bez použití zmatňujícího prostředku, byla tělesa podrobena měření v různých polohách a indikace se tedy přesunula mimo kontrolované místo.



Obr. 73 – Zkušební tělesa LAM – 1.1 (vlevo) a LAM 1.2 (vpravo) – vnější strana



Obr. 74 – Zkušební tělesa LAM – 1.1 (vlevo) a LAM 1.2 (vpravo) – vnitřní strana

Tab. 7 – Hloubky a průměry jednotlivých umělých defektů

Pořadí defektu a poloha	Hloubka v rozmezí [mm]		Průměr otvoru [mm]	
	A	B	A	B
LAM – 1.1				
1	1,8	2,85	2	2
2	1,7 – 1,8	2,4 – 2,5	5	5
3	1,5 – 1,7	3,1 – 3,2	10	10
LAM – 1.2				
4	1,5 ± 0,1	3 ± 0,1	15	15
5	1,5 ± 0,1	3 ± 0,1	20	20

7.2 Použitá zařízení

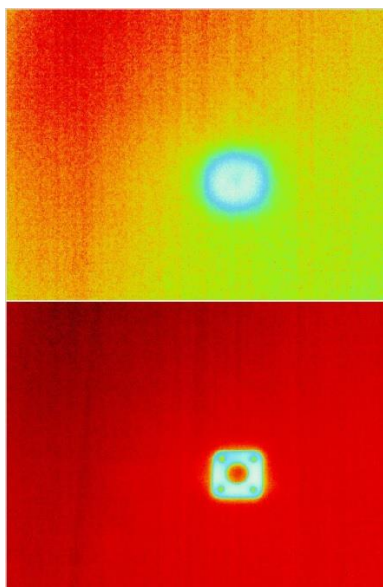
Pro testování byly použity dvě sestavy pulzní termografie – ATI6000 a SC6700.

První je vlastnictvím Centra výzkumu Řež (CVŘ) a jedná se o ATI6000 Scientific Kit značky WORKSWELL (obr. 75).

Každá sestava obsahuje svůj vlastní software dodávaný výrobcem. Software WORKSWELL má oproti softwaru Automation Technology patřící k SC6700 omezenější možnosti změny parametrů. Kalibrace systému probíhala pomocí funkce „Auto Focus“. Jako pomůcka pro zaostření byla použita plastová součástka vytisknutá na 3D tiskárně, která obsahuje jeden velký a čtyři malé otvory. Součástka byla zahřáta v dlaních pomocí tření a byla přiložena na kontrolované těleso. Zahřátá součástka napomohla rychlé kalibraci, jelikož vytvořila tepelný kontrast, na který se funkce zaměřila a zaostřila. Záběry před a po použití „Auto Focus“ jsou znázorněny na obr. 76.



Obr. 75 – Sestava ATI6000 při měření vzorku LAM – 1.1



Obr. 76 – Záběry před (nahore) a po (dole) použití funkce „Auto focus“

Druhá sestava je majetkem Nových technologií – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni (NTC) a jedná se o termokameru značky FLIR SC6700, která má vyšší výkon než ATI6000 (obr. 77).

Software Automation Technology umožňuje kalibraci pro konkrétní materiál. Zaostření probíhalo podobně jako v případě ATI6000 s tím rozdílem, že bylo použito ocelové měřítko se stupnicí. Sklolamináty nebyly v databázi zapsány, proto byla kalibrace časově náročnější.



Obr. 77 – Sestava SC6700 měřící těleso LAM – 1.1

Obě sestavy využívají halogenovou lampu o výkonu 6 kJ. Parametry jednotlivých sestav jsou zapsány v tab. 8 [30], [49].

Tab. 8 – Parametry jednotlivých sestav pulzní termografie [30], [49]

Sestava	Rozlišení	Snímková frekvence [Hz]	Typ detektoru	Váha kamery [kg]	Výkon lampy [kJ]	Délka pulzu [ms]
ATI6000	640 × 480	50	Nechlazený mikrobolometr	-	6	-
SC6700	640 × 512	50	Antimonid india (InSb)	4,5	6	2

7.3 Průběh a výsledky měření

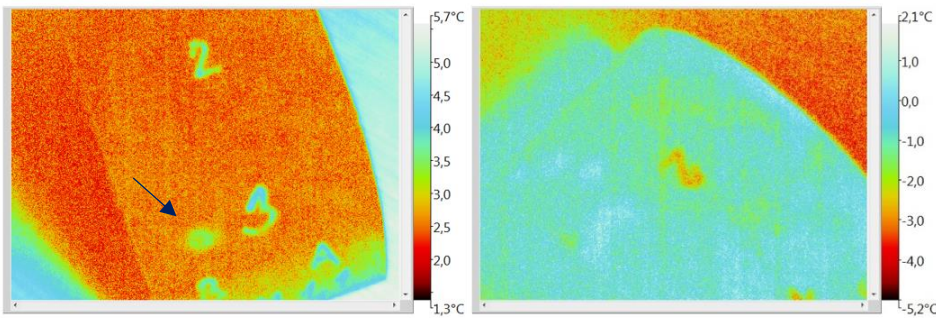
7.3.1 Měření pomocí ATI6000

Měření probíhalo pomocí jedné lampy, která byla nastavena na 100% výkon. Čas měření byl nastaven na 5 s. Během doby, kdy se těleso po pulzu ochlazuje, bylo zachyceno 250 snímků, které byly dále analyzovány různými metodami, jako je PPT nebo metoda Principal component thermography (PCT), které jsou součástí softwaru. Po několika pokusných měření byla určena metoda PCT jako nejvhodnější pro kontrolu sklolaminátových vzorků.

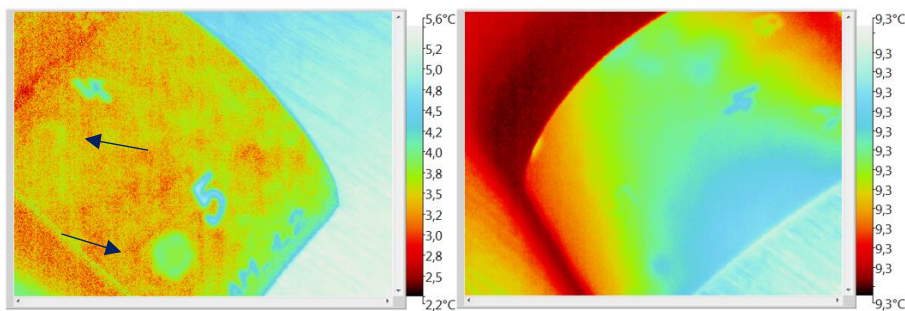
Výsledky měření vzorky LAM – 1.1 jsou znázorněny na obr. 78. Z důvodu zaoblení tělesa, bylo každé těleso měřeno dvakrát, z toho jednou otočené o 180°. Jde o snímky, které jsou zachyceny v 1-2 s měření (to odpovídá přibližně snímku 70 z 250). Měření odhalilo pouze indikaci 3B, která měla největší průměr i hloubku. Z obr. 78 je patrné, že kamera zachycuje i texturu sklolaminátu, která se nachází nejbližší k povrchu, což může vést k šumu, který zabrání indikaci umělých vad.

Pro kontrolu tělesa LAM – 1.2 byly nastaveny stejné podmínky jako pro těleso LAM – 1.1. Nejzřetelnější jsou zde defekty 5B a 4B, které měly i největší hloubku (obr. 79). Defekt 5A

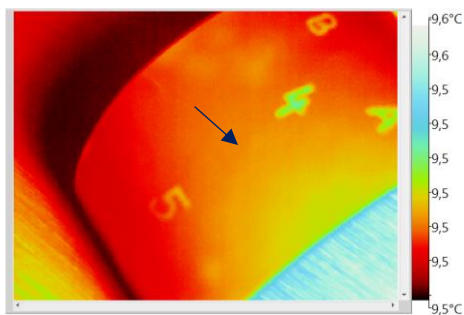
se zdá být též indikovány, ale může jít jen o povrchovou vadu, která způsobuje šum. Při otočení tělesa o 180° je v místě defektu v poloze 5A viditelná indikace, ale ta nekoresponduje s umístěním ve sloupci A, z čehož lze soudit, že se jedná o jinou vadu než uměle vytvořenou. Podle snímku pořízeného ve 4. sekundě měření (obr. 80) lze usoudit, že místo indikace v oblasti 5A soustřeďuje teplo a ochlazuje se pomaleji. Podobné plochy jsou k vidění v oblasti 4B. Jedná se nejspíše o vyšší koncentraci pryskyřice. Detekované vady jsou na obrázcích označeny šipkou.



Obr. 78 – Kontrola tělesa LAM – 1.1 pomocí ATI6000, 1-2 s, vady označeny šipkou



Obr. 79 – Kontrola tělesa LAM 1.2 pomocí ATI6000, 1-2 s, vady označeny



Obr. 80 – Kontrola tělesa LAM 1.2 pomocí ATI6000, 4 s, vady označeny šipkou

7.3.2 Měření pomocí SC6700

Při měření SC6700 bylo detekováno více umělých vad než přístrojem ATI6000. První pokusná měření nedetekovala žádnou z umělých vad, detekovalo pouze vady na povrchu a těsně pod povrchem. Jednalo se o nerovnosti, které jsou vidět na tělese pouhým okem (obr. 81). Šum byl odstraněn pomocí kalibrace.

Tělesa byla jednou pootočená, aby pulzní záblesk dopadal přímo na řádky vad 2 – 5. Vady v řádku 1 nejsou detekovatelné pro svou malou velikost.

Při tomto měření byl problém s leskem těles, jelikož se jevil jako indikace po celé délce, ale při pootočení tělesa a vytvoření dalšího snímku se přesouvala. Z toho lze soudit, že je to chyba měření.

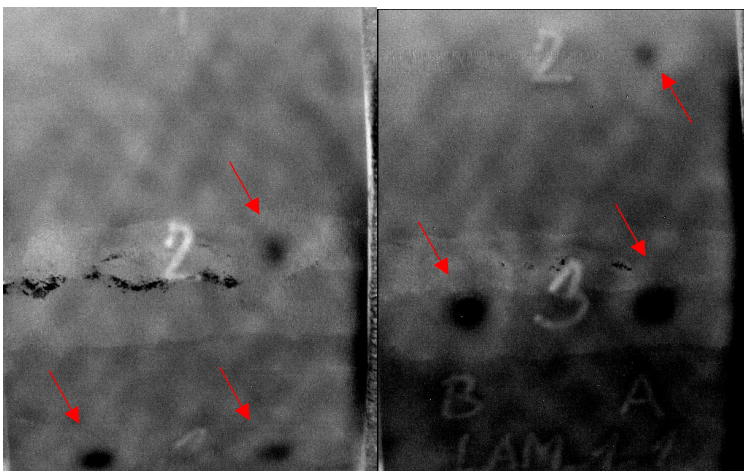


Obr. 81 – Nerovnosti povrchu na tělese LAM – 1.1

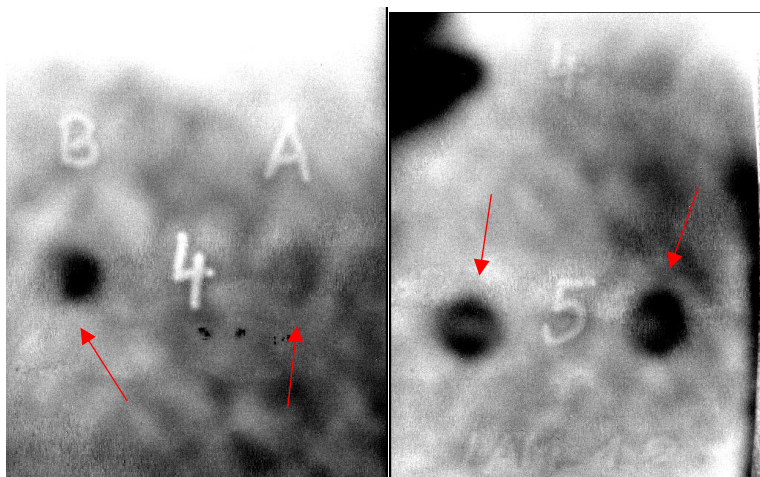
Na tělese LAM – 1.1 byly detekovány vady 2A, 3A a 3B (obr. 82). Umělá vada 2B nebyla nejprve vidět vlivem vzniklé falešné indikace (odrazu záblesku). Na prvním snímku na obr. 82 není též jasně viditelná, přestože má větší hloubku než vada 2A. Její viditelnost nejspíše znemožňuje větší množství podpovrchových vad, které vytváří šum. Tuto teorii podporuje obr. z předchozího měření, kde lze v oblasti 2B pozorovat oblasti s pomalejším ochlazováním.

Na tělese LAM – 1.2 byly indikovány všechny vady (obr. 83). Vada 4A se jeví jako méně výrazná oproti ostatním vadám, což způsobuje její menší hloubka.

Detekované vady jsou na obrázcích označeny šipkou.



Obr. 82 – Kontrola tělesa LAM – 1.1 pomocí SC6700, vady označeny šipkou



Obr. 83 – Kontrola tělesa LAM – 1.2 pomocí SC6700, vady označeny šipkou

7.3.3 Shrnutí výsledků měření

Pomocí sestavy ATI6000 byly detekovány tři umělé vady. Tyto vady se nacházely maximálně 1,3 mm pod povrchem (hloubka vady odečtená od tloušťky trubky – 4,5 mm) a jejich minimální průměr byl 10 mm. Vady s menší hloubkou a průměrem nebyly detekovány.

Sestava s kamerou SC6700 detekovala 7 z 10 vad. Umělé vady o průměru 2 mm nelze odhalit, stejně tak vada o průměru 5 mm umístěnou 2 mm pod povrchem. Důvod, proč tato vada není na snímcích vytvořených pulzní termografií viditelná, spočívá nejspíše ve vyšší koncentraci nesmáčených sklených vláken, které se vyskytují v okolí vady a mohou způsobovat šum, který zamezuje detekci umělé vady. Tato nesmáčená vlákna jsou dobře pozorovatelná na obr. 81. Zbylé vady na zkušebních tělesech včetně vady 2A, která se vyskytuje dál od povrchu než vada 2B jsou jasně detekovatelné.

Tab. 9 obsahuje výčet všech vad a udává, zda byly detekovatelné sestavou ATI6000 a SC6700.

Tab. 9 – Polohy vad, jejich průměr a hloubka a určení, zda byly detekovány sestavou ATI600 a SC6700

Průměr a hloubka umístění vady [mm]	1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
	Ø2; 1,8	Ø5; 1,8	Ø10; 1,7	Ø15; 1,6	Ø20; 1,6	Ø2; 2,85	Ø5; 2,5	Ø10; 3,2	Ø15; 3,1	Ø20; 3,1
ATI6000	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO
SC6700	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	NE	ANO	ANO	ANO

8 Měření mezery tlakové nádoby pomocí 3D skenování

Měření mezery proběhlo pomocí dvou těles, které simulovaly mezeru. Bylo ověřeno použití měření pomocí endoskopu s 3D nástavcem a 3D čárový skener, který je umístěn na rameni.

8.1 Simulace mezery

Dukovanský heterogenní tlakovodní reaktor VVER-440/V213 je vyroben z kalené bainitické oceli 15Ch2MFA, která má vysokou pevnost a odolnost vůči radiačnímu prostředí. Její nevýhodou je, že nevykazuje dostatečnou odolnost vůči korozním účinkům chladiva. Z toho důvodu je vnitřní povrch opatřen návarem z vrstev austenitické korozivzdorné oceli (Sv 07Ch25N13 a Sv08Ch19N10G2B) [50].

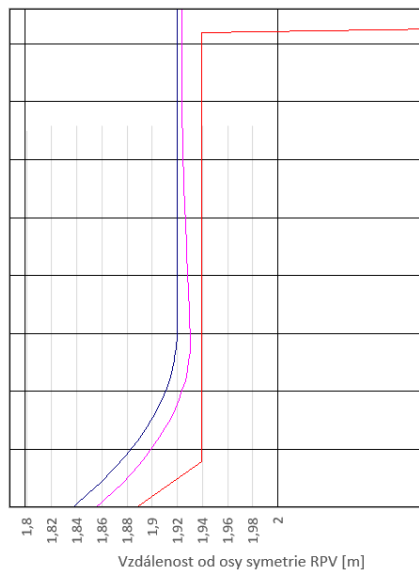
Dle historických fotografií, které pochází z doby výroby reaktoru se povrch jeví leskle, což by mohl být problém při realizaci skenování, protože lesklé povrchy jsou těžko kontrolovatelné (kapitola 3.4.2). Jelikož je reaktor v provozu od roku 1985 lze předpokládat, že spodní část nádoby reaktoru bude pokryta korozními produkty, které povrch zmatní a lze tedy provádět měření pomocí 3D skenování. Tuto myšlenku i podporují fotografie přímo z kontrolovaného místa, ty ale nelze zveřejnit, jelikož jsou majetkem skupiny ČEZ. V případě, že bude povrch stále lesklý, lze při reálném měření použít zmatňující spreje na bázi křídý [51].

Pro vytvoření mezery byly použity dvě tělesa z korozivzdorné oceli, která vykazují mírný lesk. Mírný lesk simuluje obtížnější podmínky pro skenování.

Velikost mezery byla odvozena z obr. 84, který byl přiložen jako detail k grafu řešící deformaci RPV v časovém úseku 10 h. Celý graf je součástí přílohy č. 7. Tento detail byl proložen mřížkou, která napomohla určení nejužšího kritického místa. Pomocí obr. 84 byla určena šířka mezery 10 mm [12].

Pro vytvoření mezery byly mezi tělesa vloženy dvě koncové měrky (dle normy DIN 861, třída přesnosti 1). Rozměr jedné měrky byl 10 mm (naměřená odchylka při 20 °C + 0,06 μm) a druhá byla složena z měrek o rozměrech 9 a 1 mm (naměřená odchylka při 20 °C + 15 μm; - 0,05 μm).

Simulace mezery je znázorněna na obr. 85.



Obr. 84 – Detail grafu znázorňující deformaci RPV: Černá linie – studená RPV, fialová – horká RPV, červená – štít [12]



Obr. 85 – Simulace mezery pomocí dvou nerezových těles a koncových měrek s rozměrem 10 mm

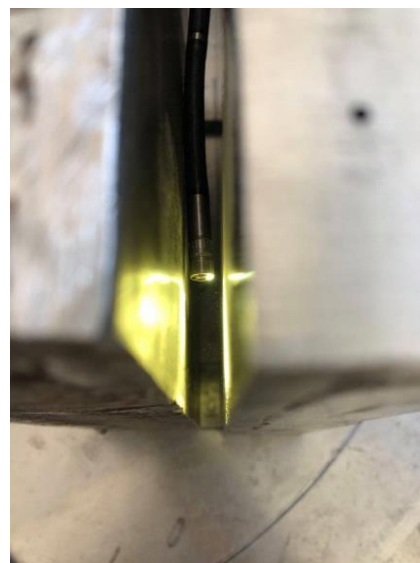
8.2 Měření mezery pomocí endoskopu

Měření pomocí endoskopu probíhalo prostřednictvím přenosného endoskopu Mentor Visual iQ VideoProbe s objektivem umožňující 3D měření. Průměr sondy je 6 mm a délka kabelu je 3 a 6 metrů. Tato sonda má ohebný krk, který umožňuje preciznější manipulaci s kamerou v úzkých prostorech [38], [52].

Konec sondy byl umístěn pomocí stojánku v horní polovině mezery. Sestava je znázorněna na obr. 86. Poloha sondy je upravena pomocí ohebného krku doprostřed mezery, aby se nedotýkala stěn (obr. 87). Jelikož nebyly první pokusné výsledky kvalitní, kvůli lesku oceli, byl aplikován zmatňující sprej REFLECON® tarnich-12-HC.



Obr. 86 – Sestava endoskopu a zkušebních těles



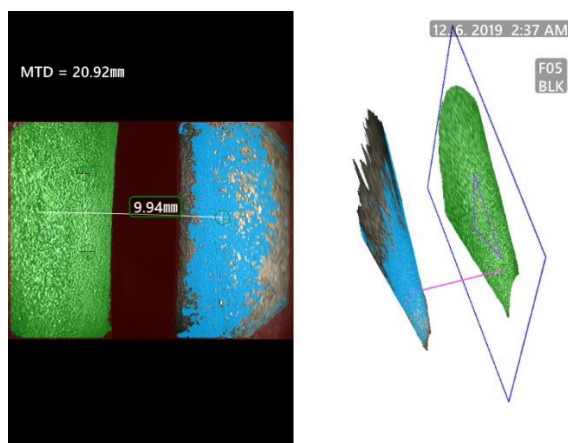
Obr. 87 – umístění konce sondy v mezeře

Provedeno bylo celkem 6 měření, během kterých se sonda pokaždé posunula o krátkou vzdálenost pomocí pohyblivého krku nebo posunutím upevňovacího stojánku.

Získaná data byla následně zpracována přímo v zařízení Mentor Visual IQ pomocí funkce „Depth“, která měří kolmou vzdálenost mezi rovinou označenou třemi body a plochou nad ní nebo pod ní a lze s ní měřit i vzduchové mezery [52]. Na ploše naproti označené rovině se modře zvýrazňují body, které mají od zvolené plochy stejnou vzdálenost, lze tak tedy vybrat vzdálenost, která odpovídá největšímu počtu bodů. Výsledky měření jsou zapsány v tab. 10. V tabulce je zapsán aritmetický průměr odchylek od základního rozměru (10 mm). Dále je jeden výsledek měření vizuálně znázorněn na obr. 88 a v příloze č. 8.

Tab. 10 – Hodnoty naměřené pomocí endoskopu s 3D adaptérem a odchylka od základního rozměru

	1.	2.	3.	4.	5.	6	Průměr
Vzdálenost [mm]	9,94	9,98	9,95	9,98	9,94	9,95	9,957
Odchylka od základního rozměru [mm]	-0,06	-0,02	-0,05	-0,02	-0,06	-0,05	-0,043



Obr. 88 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 1

8.3 Měření mezery pomocí čárového 3D skenování

Měření pomocí 3D čárovým skenováním proběhlo prostřednictvím laserového skeneru RS4, který snímá až 752 000 bodů za sekundu. Přesnost stanovení bodů je 28 μm . Tento skener je umístěn na rameni ROMER Absolute Arm Si, které je díky 7 kloubům velmi variabilní. Celá sestava je zachycena na obr. 89. Pomocí speciálních stativů lze skenovací rameno upnout na složité feromagnetické plochy, obvyklá měření jsou prováděna z lešení [39].

Pro správné vyhodnocení povrchu je potřeba, aby linie bodů skeneru dopadala po celou dobu měření kolmo na měřený povrch. Kontrola tohoto požadavku je zajištěna pomocí kontrolního bodu, který by měl být po celou dobu skenování na linii bodů čárového skeneru (obr. 90).

Zmatňující sprej REFLECON® tarnich-12-HC zůstal na povrchu těles z předchozího měření mezery pomocí endoskopu.



Obr. 89 – Skener RS4 a
skenovací rameno ROMER
Absolute arm Si



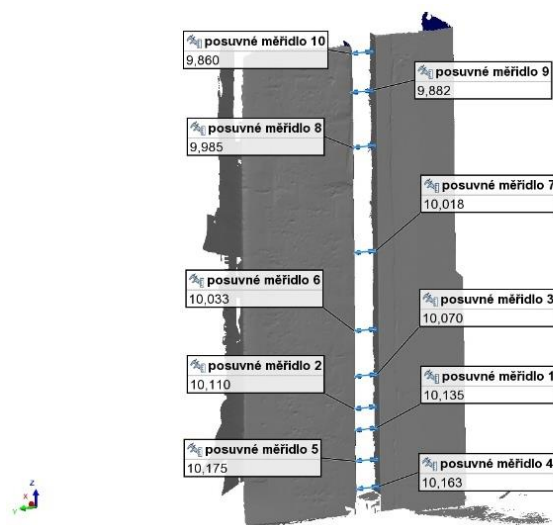
Obr. 90 – Správné skenování monitorované pomocí
kontrolního bodu ležícího na linii bodů

Data získaná měřením jsou zpracována softwarem PolyWorks®. Jedná se o univerzální program, který je možné použít pro zpracování dat jakéhokoliv skeneru. Software umožňuje přímé připojení k 3D skeneru, což napomáhá obsluze skeneru při kontrole nasnímaných dat. Obsluha může okamžitě nasnímat znovu plochy, které nebyly zachyceny správně vlivem rychlého posunu skeneru nebo špatného náklonu skeneru [53].

Výsledkem skenování je 3D model mezery, ve kterém je možné měřit vzdálenost plochy pomocí funkce „posuvné měřidlo“. Bylo naměřeno celkem 10 hodnot v celé délce mezery, podle kterých je možné určit, že dochází k zužování vytvořené mezery (obr. 91). Tělesa byla po ukončení skenování prověřena pomocí vodováhy a digitálního posuvného měřítka. Obě tělesa se podle vodováhy vychylují mírně k sobě, ale základny mají rovné. Jelikož je sevření způsobeno vlivem těles a výsledky měření budou srovnávány s rozměry koncové měřky a s výsledky měření pomocí endoskopu, který byl upevněn v horní polovině výšky mezery, bude započítáno pouze prvních pět měření, která jsou naměřena nejdál od měřky. Z těchto hodnot bude určena odchylka od základní hodnoty – rozměru koncové měřky (10 mm), pomocí aritmetického průměru hodnot. Hodnoty měření a odchylka jsou zapsány v tab. 11.

Tab. 11 – Hodnoty naměřené pomocí 3D skenovacího ramene a odchylka od základního rozměru

	1.	2.	3.	4.	5.	Průměr
Vzdálenost [mm]	9,86	9,882	9,985	10,018	10,033	9,9556
Odchylka od základního rozměru [mm]	-0,14	-0,118	-0,015	0,018	0,033	-0,044



Obr. 91 – Data získána pomocí skenovacího ramena a softwaru PolyWorks

8.4 Shrnutí výsledků měření

Pro vytvoření podobných podmínek pro skenování byly v celkovém porovnání výsledků použity výsledky měření ve stejné oblasti pro obě metody. Pomocí tabulek 10 a 11 je určeno, že menší odchylku od základního rozměru vykazuje měření pomocí endoskopu s 3D adaptérem, tudíž je pro měření mezery vhodnější než skenovací rameno.

Endoskop s 3D adaptérem může být výhodnější i z důvodu menší měřicí techniky a většího dosahu.

3D skenovací rameno má odchylku pouze o 0,001 mm větší (ve srovnání s endoskopem), tudíž je též způsobilé k měření mezery. Výhodou je, že lze při jednom měření naskenovat větší plochu a tu následně neomezeně vyhodnocovat. Nevýhodou je, že nelze měřit mezeru ve větší vzdálenosti od ústí mezery a také obtížná manipulace s měřicí technikou, jelikož je nutné použití lešení nebo magnetického manipulátoru pro upevnění v blízkosti měřené mezery.

Výsledná odchylka a některé charakteristiky měření jsou zapsány v tab. 12.

Tab. 12 – Výsledná odchylka měření a charakteristiky měření

Metoda	Endoskop s 3D adaptérem	3D skenovací rameno
Průměrná odchylka od základního rozměru [mm]	-0,043	-0,044
Manipulace se zařízením	Jednoduchá	Obtížnější
Obtížně přístupná místa	Ano (max 6 m)	Ne
Rozsah měření / jedno měření	Malá oblast	Libovolně dlouhá vzdálenost
Počet výsledků / jedno měření	1 / metodu zpracování výsledku	Neomezené

9 Diskuse výsledků

V kapitole 5 Heterogenní svary byly detailně popsány materiály použité pro výrobu zkušebních vzorků a jejich možné vady, které lze v době výroby heterogenního svaru a jeho provozu nalézt. Byly vyrobeny vzorky heterogenního svaru metodou 141 z materiálů 1.4541 a P256GH a přídatného drátu OK Tigrod 16.95. Pomocí RTG zkoušky byly detekovány vady způsobené svářecím, nevhodným nastavením svářecí techniky a nedokonalou přípravou svarových ploch. Jelikož nebyly detekovány trhliny, lze usoudit, že materiály heterogenního svaru a jejich konstrukce byly správně zvolené. Na RTG snímcích tří zkoumaných vzorků bylo možné detekovat velké množství pórů ojedinělých i ve shluku, vruby v kořeni, nadměrné průvary, hubený kořen, studený spoj a přetečení spolu s nepravidelnou kresbou. Technika PAUT, která měla tyto vady detekovat, byla v kontrole částečně úspěšná. Detekovala celkem přesně póry, v jednom případě vrub v kořeni a studený spoj. Přetečení a nadměrný průvar nebyly detekovány, ale tento nedostatek lze kompenzovat vizuální zkouškou. Tato metoda vyžaduje určitý čas pro kalibraci, školenou obsluhu a vhodnou měřicí techniku. Při zajištění všech potřeb se jedná o metodu vhodnou pro kontrolu heterogenních varů i v terénu.

Kapitola 6 se zabývala rozšířením techniky PAUT. Pro účely měření byla jako zkušební tělesa vybrána kalibrační měrka se šesti bočními vývrty a dva heterogenní svařence, jeden vyrobený z plechu a druhý ze segmentů trubek. Svařenec z plechů obsahoval jeden studený spoj po celé délce svarové plochy a jeden kratší studený spoj. Svařenec z trubek obsahoval studený spoj a oxidický vměstek. Sběr dat proběhl pomocí techniky PAUT/DDF a FMC. Technika FMC se projevila jako náročná na techniku a čas z hlediska zpracování výsledků. Výhodou této techniky bylo velké množství získaných dat a prakticky neomezená možnost jejich následné analýzy pomocí různých metod. Použitou metodou analýzy zpracování výsledků byla technika TMC. Kombinace FMC/TFM se projevila jako užitečnější než PAUT/DDF, jelikož napomohla detekci všech vad, které byly určeny pomocí RTG zkoušky, ve vysoké kvalitě. Kombinace PAUT/DDF se projevila jako výhodnější oproti klasickému PAUT, ale nedokázala detekovat ojedinělý oxidický vměstek. Zpracování výsledků bylo pomocí PAUT/DDF rychlejší než v případě kombinaci FMC/TFM.

V kapitole 7 věnované nedestruktivnímu testování pomocí pulzní termografie se ověřuje, zda je pulzní termografie vhodná pro kontrolu sklolaminátů. Testování probíhalo pomocí dvou sestav pulzní termografie – ATI6000 a SC6700. Výsledky testování pulzní termografie byly porovnány s rozměry zkoumaných těles LAM – 1.1 a LAM – 1.2., které obsahovaly umělé vady. Sestava ATI6000 je vhodná pro detekci vad od min. průměru 10 mm a max. hloubkou pod povrchem 1,4 mm. Sestava SC6700 je vhodná pro detekci vad od min. průměru 5 mm a max. hloubky pod povrchem 2,9 mm. Během měření byly mimo umělých vad detekovány i vady sklolaminátu. Byla viditelná textura sklolaminátu a oblast 2B na tělese LAM – 1.1 nebylo možné zkontrolovat, přestože vada v tomto místě má větší hloubku než v oblasti 2A. Tento jev nejspíše vznikl vlivem šumu, který způsobuje větší podpovrchová vada, např. v důsledku větší koncentrace pryskyřice. Jelikož tělesa nejsou určena k destrukci a vzhledem k restrikcím vlivem COVID-19 nebyl prostor pro hledání jiné metody testování, nebylo možné tuto hypotézu ověřit. Pro zkoušení se sestava SC6700 projevila jako vhodnější, pro svůj větší výkon, větší počet detekovaných vad a pro svou menší velikost (a tedy lepší manipulovatelnost). Při použití obou sestav je nutné počítat s možností překryvu indikací ve větší hloubce vlivem detekce vad sklolaminátů ležících na povrchu a s odleskem, který způsobuje nemožnost detekce vad ve svém blízkém okolí. Odlesk lze eliminovat pomocí zmatňujících sprejů, které ale nelze aplikovat ve všech případech, jelikož to pravidla pro nedestruktivní testování komponent dané jejich provozovatelem nemusí vždy povolovat.

Poslední kapitola experimentální části se zabývala měřením mezery tlakovodního reaktoru VVER-440/V213 pomocí laserového skenování. Měření mezery přineslo výsledek v podobě záporných hodnot odchylky od základního rozměru. To je způsobeno sevřením zkušebních těles, které simulovaly prostor mezery. Při použití endoskopu s 3D nástavcem byly výsledky přesnější a manipulace s endoskopem byla jednodušší, než s čárovým skenerem umístěným na manipulačním ramenu. Výhodou endoskopu je i možnost měření až do vzdálenosti 6 m. Rameno s 3D čárovým skenerem je vhodnější použít v případě potřeby získání více dat při jednom měření. Problém při měření by mohl způsobovat lesklý povrch, který vytváří falešné indikace. I zde by byla v případě lesklého povrchu možnost použití zmatňujících sprejů, ale bylo usouzeno, že povrch reaktoru je vlivem degradace zmatněn, což potvrdily fotografie z místa měření, které není možné publikovat.

Výstup této diskuse výsledků je tab. 13, která obsahuje zkoumané oblasti v energetickém průmyslu, metody, kterými byla tato oblast zkoumána a vyhodnocuje některé aspekty měření pomocí dané metody.

Tab. 13 – Výsledná tabulka zkoumaných oblastí a metod aplikovaných na tyto oblasti

Oblast	Heterogenní svary			Sklolamináty	Měření mezery tlakové nádoby	
	PAUT	PAUT/DDF	FMC/TCM		Pulzní termografie	Endoskop s 3D nástavcem
Metoda	PAUT	PAUT/DDF	FMC/TCM	Pulzní termografie	Endoskop s 3D nástavcem	3D čárový skener
Vyhovující dané aplikaci	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Manipulace s měřicím zařízením	Jednoduchá	Jednoduchá	Jednoduchá	Obtížnější (velká hmotnost zařízení)	Jednoduchá	Obtížnější (velká hmotnost zařízení)
Složitost kalibrace	Středně obtížná	Středně obtížná	Středně obtížná	Jednoduchá	Jednoduchá	Jednoduchá
Náročnost sběru dat	Nízká	Nízká	Vysoká	Jednoduchá	Jednoduchá	Jednoduchá
Nároky na obsluhu metody	Nutno školená	Nutno školená	Nutno školená	Nutno školená	Nutno školená	Nutno školená
Náročnost vyhodnocení	Středně těžká	Středně těžká	Středně těžká	Jednoduchá	Jednoduchá	Jednoduchá
Aplikace v terénu	Ano	Ano	Ano	Ne v omezeném prostoru	Ano	Ano (nutné lešení/manipulátor)

10 Závěr

Cílem této práce bylo odzkoušení nedestruktivních zkoušek kontroly v různých oblastech energetického průmyslu. Zkoumanými oblastmi byly heterogenní svary, sklolamináty a měření mezery mezi tlakovou nádobou reaktoru a biologickým stíněním.

Heterogenní svary byly kontrolovány technikou Phased Array a použitím Dynamic Depth Focussing a rozšířením PAUT v podobě metody sběru dat Full Matrix Capture a zpracováním těchto dat pomocí Total Focusing Method. Technika PAUT se ukázala jako vhodná pro rychlou, nenáročnou kontrolu heterogenních svarů. Technika FMC společně s metodou analýzy dat TFM tuto kontrolu zpřesnily a dokázaly odhalit více indikací než při použití PAUT, ale jejich použití vyžaduje výkonnější techniku a kontrola je časově náročnější. Výsledky při použití kombinace PAUT/DDF nebyly tak přesné jako v případě FMC/TFM, ale rychlost získání dat a jejich zpracování byly rychlejší.

Sklolamináty byly zkoušeny pomocí pulzní termografie. Tato metoda je vhodná pro detekci povrchových a podpovrchových vad u sklolaminátů. Minimální detekovatelná velikost je kruhový defekt o průměru 5 mm v hloubce max 2,9 mm pod povrchem. Detekci podpovrchových defektů ovlivňují vady sklolaminátů, které se vyskytují na povrchu (např. nesmáčená vlákna).

Mezera tlakové nádoby byla měřena pomocí endoskopu s 3D objektivem a 3D čárovým skenerem. Obě metody měření přinesly příznivé výsledky a jsou vhodné pro kontrolu mezery tlakové nádoby.

Navrhované metody nedestruktivního testování jsou vhodné pro zkoušení zkoumaných oblastí nedestruktivního testování, ale je třeba zahrnout i omezení, která jsou probíraná v diskusi výsledků.

11 Citovaná literatura

- [1] KRIVIT, Steven B. *Nuclear energy encyclopedia: science, technology, and applications*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2011. 978-0470894392.
- [2] KREJČÍ, Lucie a Zdeněk KUBOŇ. Konstrukce. *Svarové spoje žárovevých materiálů používaných v energetice*. [Online] 28. 11 2010. [Citace: 15. 12 2020.] <http://old.konstrukce.cz/clanek/svarove-spoje-zarovevnych-materialu-pouzivanych-v-energetice/>.
- [3] *Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. autorů, Kolektiv. Srní : Západočeská univerzita v Plzni, 2019. ISBN 978-80-261-0885-6.
- [4] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava : ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-63-2.
- [5] DUCHÁČEK, Jiří a Jiří JANOVEC, Michal JUNEK. all for power. *Připojovací heterogenní svarové spoje parogenerátorů (22K - 08CH18N10T)*. [Online] 09. 12 2019. [Citace: 04. 05 2021.] <https://allforpower.cz/jaderna-energetika/pripojovaci-heterogenni-svarove-spoje-parogeneratoru-22k-08ch18n10t-65>.
- [6] BARTÁK, Jiří. Česká svářečská společnost ANB. *Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení*. [Online] 01. 03 2012. [Citace: 09. 05 2021.] <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>.
- [7] JACOBY, Mitch. Chemical and engineering news. *What's fiberglass, and how does the delicate material reinforce thousands of products?* [Online] 22. 9 2018. [Citace: 15. 12 2020.] <https://cen.acs.org/materials/inorganic-chemistry/s-fiberglass-does-delicate-material/96/i38>.
- [8] OCHEC, Jan. all for power. *Kompozitní materiály v energetice*. [Online] 19. 1 2018. [Citace: 14. 12 2020.] <http://old.allforpower.cz/clanek/kompozitni-materialy-v-energetice/>.
- [9] Cozy Serenity. *Fiberglass Defects Reference*. [Online] [Citace: 08. 05 2021.] <https://cozyserenity.weebly.com/fiberglass-defects.html>.
- [10] HEINRICK, M. a CRAWFORD B, Milani AS. MOJ Poly Sci. *Degradation of fibreglass composites under natural*. [Online] 29. 03 2017. [Citace: 09. 05 2021.] <http://medcraveonline.com/MOJPS/MOJPS-01-00004.pdf>. DOI: 10.15406/mojps.2017.01.00004.
- [11] WEIMIN, Maa and Yidan YUANA, Bal RajSehgalb. ScienceDirect. *In-Vessel Melt Retention of Pressurized Water Reactors: Historical Review and Future Research Needs*. [Online] 3 2016. [Citace: 15. 12 2020.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809916301540>.
- [12] ERVIN, Hofmann. Safety enhancements on CEZ NPP's. *Assessment of In-vessel corium retention for DUKOVANY NNP (VVER-440/V213)*. Bulgaria : WANO-MC SEMINAR , 2013.
- [13] Advanced Technology Group ATG. *Ultrasonic Testing (UT)*. [Online] [Citace: 23. 10 2020.] <https://www.atg.cz/ndt-121&display=UT>.

- [14] MARSHMAN, Connor. Magnum NIS. *What are the Differences Between Conventional Ultrasonic Testing (UT) and Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)?* [Online] 15. 10 2019. [Citace: 23. 10 2020.] <https://www.magnumndt.com/what-are-the-differences-between-conventional-ultrasonic-testing-and-phased-array-ultrasonic-testing-blog>.
- [15] Olympus corporation. *General Introduction To Ultrasonic Testing*. [Online] [Citace: 25. 10 2020.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/intro/breif-history/>.
- [16] HOPKINS, Guillaume a Deborah NEAU. The promise of ultrasonic phased arrays and the role of modeling in. *bercli*. [Online] 10 2006. [Citace: 28. 10 2020.] http://www.bercli.net/docs/ANSTpaperBERCLI_homeformat.pdf.
- [17] AZO materials. *Introduction to Ultrasonic Phased Array Testing*. [Online] 2. 1 2013. [Citace: 28. 10 2020.] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8023>.
- [18] LAMARRE, André . NDT.net. *Dynamic Focusing of Phased Arrays for Nondestructive Testing: Characterization and Application*. [Online] 09 1999. [Citace: 11. 05 2021.] <https://www.ndt.net/article/v04n09/lamarre/lamarre.htm>.
- [19] Olympus. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Olympus Guideline. *Advanced Practical NDT Series*. 2004. DUMG068D.
- [20] Olympus corporation. *Inside a Phased Array Transducer*. [Online] [Citace: 31. 10 2020.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/inside/>.
- [21] Olympus corporation. *Phased Array Transducer Characteristics*. [Online] [Citace: 31. 10 2020.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/>.
- [22] Olympus corporation. *Phased Array Wedges*. [Online] [Citace: 1. 11 2020.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/wedges/>.
- [23] *Defektoskopie 2018 / NDE for Safety 2018*. Pazdera, Luboš a Pavel Mazal. Praha : Vysoké učení technické v Brně, 2018 . ISBN 978-80-214-5684-6.
- [24] MILLIGAN, Jeff a Gressler STEVEN. Structural Integrity Associates, Inc. *The Newest Phased Array Ultrasonic Technique: Full Matrix Capture*. [Online] 2019. [Citace: 13. 12 2020.] <https://www.structint.com/resources/news-and-views-46-2019/the-newest-phased-array-ultrasonic-technique-full-matrix-capture/>.
- [25] TWI Ltd. *Full matrix capture*. [Online] [Citace: 15. 04 2021.] <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/full-matrix-capture>.
- [26] Quality magazine. *Active Thermography for Nondestructive Composites Testing*. [Online] 5. 7 2013. [Citace: 26. 11 2020.] <https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing?>.
- [27] Nové technologie – výzkumné centrum. *Aktivní termografie a IRNDT*. [Online] [Citace: 27. 11 2020.] <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/irndt/aktivni-termografie>.
- [28] Visiooimage . *Simple tutorial about Infrared Thermography for Non Destructive Testing (NDT)*. [Online] [Citace: 28. 11 2020.] http://visiooimage.com/en/products_ir_ndt_thermography_tutorial.htm.

- [29] VOLLMER, Michael a Klaus-Peter MÖLLMANN. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, Second Edition*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018. 978-3-527-41351-5.
- [30] Workswell Active Thermography. *ATI6000 - Active Thermolnspector Scientific Kit*.
- [31] CLEMENTE Ibarra-Castaneda a Marc GENEST, Jean-Marc PIAU, Stéphane GUIBERT, Abdelhakim BENDADA, Xavier P. V. MALDAGUE. Materials Science. *Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials*. [Online] 2007. [Citace: 3. 12 2020.]
https://pdfs.semanticscholar.org/4a1f/76593efeea2ffb892f7b2774b7b2c9a5fab3.pdf?_ga=2.8682812.889988034.1607007716-1691331162.1606560465.10.1142/9789812770943_0014.
- [32] MUZIKA, Lukáš a Michal ŠVANTNER. Flash pulse phase thermography for a paint thickness determination. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, Sv. 723, 012021.
- [33] LOCKER, Martin. Robot klub Rychnov. *3D scanner*. [Online] 6. 11 2015. [Citace: 14. 12 2020.] <https://robotika.vosrk.cz/robots/3dscanner/cs>.
- [34] GRECO, Marinella et al. Three-dimensional modelling of statues: The Minerva of Arezzo. *Journal of Cultural Heritage*. 2002, Sv. 3, 2002/10/01.
- [35] ČERMÁK, Jan. *Metody 3D skenování objektů*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. [Online] 2015. [Citace: 06. 05 2021.]
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103850.
- [36] GE Inspection Technologies. *VideoProbe* 3D Measurement Handbook*. New York : autor neznámý, 2016. GEA31907A.
- [37] Netinbag.com. *Co je videoskop?* [Online] [Citace: 06. 05 2021.]
<https://www.netinbag.com/cs/technology/what-is-a-videoscope.html>.
- [38] PAPCO, s.r.o. *Mentor visual IQ - videoprobe unikátní přenosný HD videoskop s 3D fázovým měřením (3D phase measurement - real 3D)*. [Online] [Citace: 06. 05 2021.]
<https://papco.cz/mentor-iq/>.
- [39] ZAHRÁDKA, Pavel, Vlastimil HABRCETL, Jan PATERA . Czech Society for Nondestructive Testing. *VYUŽITÍ 3D PROFILOMETRIE V ENERGETICE*. [Online] 11 2018. [Citace: 15. 04 2021.] http://old.allforpower.cz/UserFiles_2/file/2019/defe15.pdf.
- [40] italinox. *Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování, svařování a možné korozi*. [Online] [Citace: 01. 05 2021.]
<https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>.
- [41] AK s.r.o. *Legovaná ušlechtilá ocel, austenitická stabilizovaná titanem*. [Online] [Citace: 01. 05 2021.] <https://www.ak1324.cz/jakost-1-4541/>.
- [42] *Vlastnosti korozivzdorných ocelí*. Arlon : Euro Inox, 2002. ISBN 2-87997-082-2.
- [43] armat s.r.o. *Specifikace nerezových materiálů*. [Online] [Citace: 04. 05 2021.]
<https://armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>.

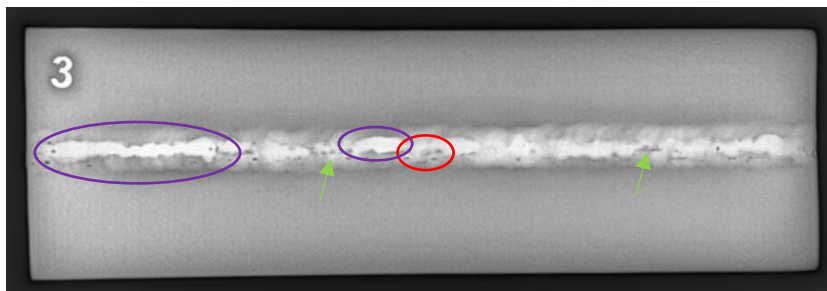
- [44] Ripra s.r.o. *P235GH - nelegovaná teple odolná ocel pro tlakové nádoby a bezešvé trubky*. [Online] 17. 01 2014. [Citace: 03. 05 2021.] <https://www.pdms.cz/news/p235gh-tepelne-odolna-ocel-pro-tlakove-nadoby/>.
- [45] ESAB. *OK TIGROD 16.95*. [Online] [Citace: 29. 04 2021.] <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/tig-rods-gtaw/stainless-steel-rods/ok-tigrod-16-95.cfm>.
- [46] Encoder Products Company. *What Is an Encoder?* [Online] [Citace: 13. 05 2021.] <https://www.encoder.com/article-what-is-an-encoder>.
- [47] PIPA, DANIEL, R and GIOVANNI A. GUARNERI, Hector L. de MOURA. 25th European Signal Processing Conference. *Adaptive Time Corrected Gain for Ultrasound*. [Online] 2017. [Citace: 13. 05 2021.] <https://www.eurasip.org/Proceedings/Eusipco/Eusipco2017/papers/1570347289.pdf>. ISBN 978-0-9928626-7-1.
- [48] Nabídka kalibračních ultrazvukových měrek firmy. *Energoservis spol. s r.o.* místo neznámé : www.defektoskopie.cz.
- [49] FLIR Systems, Inc. *FLIR SC6700*. [Online] 2015. [Citace: 09. 05 2021.] <https://www.termokamery-flir.cz/wp-content/uploads/flir-sc6700-mwir.pdf>.
- [50] ŠTEFAN, Jan. Energetické stroje - 2002. *Fraktografický přístup k hodnocení zkoušek lomové houževnatosti materiálů TNR ve stavu po ozáření neutrony*. [Online] [Citace: 06. 05 2021.] <http://www.spolky-csvts.cz/cns/news14/stefan14.pdf>.
- [51] HROZEK, Dian. OENERGETICE.cz. *Jaderná elektrárna Dukovany je v provozu od roku 1985*. [Online] 30. 10 2018. [Citace: 06. 05 2021.] <https://oenergetice.cz/jaderna-elektrarny/jaderna-elektrarna-dukovany>.
- [52] GE imagination at work. *Mentor*. [Online] 05 2018. [Citace: 08. 05 2021.] https://www.bakerhughesds.com/sites/g/files/cozyhq596/files/2019-07/mviqamanual-revk_cz_lr.pdf.
- [53] 3D scan. *PolyWorks*. [Online] [Citace: 05. 08 2021.] <https://www.3d-skenovani.cz/software/kontrola-kvality/polyworks/>.
- [54] Olympus corporation. *General Introduction To Ultrasonic Testing*. [Online] [Citace: 23. 10 2020.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/intro/ut/>.
- [55] koli. *FMC-TFM – a new solution for Sonatest products*. [Online] 26. 4 2018. [Citace: 13. 12 2020.] <https://www.koli.com.pl/fmc-tfm-a-new-solution-for-sonatest-products,164,en.html>.
- [56] inerez.cz. *Jakosti nerezových materiálů*. [Online] [Citace: 15. 12 2020.] <https://www.inerez.cz/jakosti-nerezovych-materialu/>.
- [57] Feromat. *Jakosti ocelí*. [Online] [Citace: 15. 12 2020.] http://www.feromat.cz/jakosti_oceli.
- [58] *euro inox*. Lucembu : autor neznámý, 2002. ISBN 2-87997-082-2.

- [59] BARNARD, P. Science direct. 4 - *Austenitic steel grades for boilers in ultra-supercritical power plants*. [Online] 2017. [Citace: 05. 05 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008100552100004X>. ISBN 9780081005521.
- [60] GE imagination at work. *Mentor Visual iq VideoProbe Uživatelská příručka*. [Online] 13. 05 2015. [Citace: 08. 05 2021.] <https://docplayer.cz/5561425-Mentor-visual-iq-videoprobe-uzivatelska-prirucka-mviqamanual-rev-g.html>.
- [61] GINZEL, Edward . NDT encyclopedia. *Ultrasonic Testing (UT): dynamic depth focusing*. [Online] 22. 08 2007. [Citace: 12. 05 2021.] <https://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=693>.
- [62] MARTINÁK, Josef. *Problémy při obloukovém svařování - příčiny a odstranění vad*. [Online] [Citace: 12. 05 2021.] <https://slideplayer.cz/slide/3694337/>. OB21-OP-STROJE-TE-MAR-U-3-007.
- [63] Olympus. *Defektoskopy: OmniScan X3 for Weld*. [Online] [Citace: 12. 05 2021.] <https://www.olympus-ims.com/cs/phasedarray/omniscan-x3-for-weld/>.
- [64] KOVÁČIK, Miloš a Jan KOLÁŘ. *Zkoušení heterogenních a austenitických svarů technikou Phased Array a technikou TOFD*. [Online] [Citace: 17. 05 2021.] <https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fdocplayer.cz%2Fdocs-images%2F56%2F39002245%2Fimages%2F3-0.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fdocplayer.cz%2F39002245-Zkouseni-heterogennich-a-austenitickych-svaru-technikou-phased-array-a-technikou-tofd.html&tbid>.

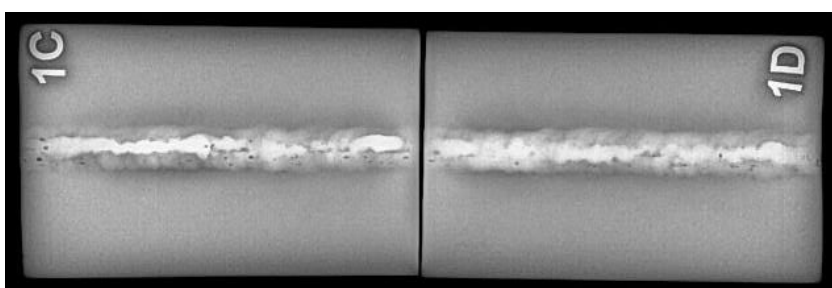
12 Seznam příloh

- Příloha č. 1: Výsledky RTG zkoušky heterogenních svarů
- Příloha č. 2: Výsledky PAUT zkoušky heterogenních svarů
- Příloha č. 3: Protokol 111/2018, ZT č. 29
- Příloha č. 4: Protokol 118/2018, ZT č. 30
- Příloha č. 5: Výsledky aplikace FMC
- Příloha č. 6: Výkresy sklolaminátových těles LAM – 1.1 a LAM – 1.2
- Příloha č. 7: Deformace RPV v časovém úseku 10 h
- Příloha č. 8: Výsledky měření pomocí endoskopu s 3D adaptérem

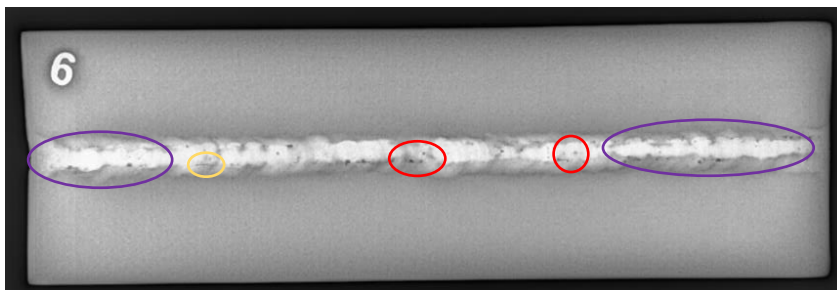
Příloha č. 1: Výsledky RTG zkoušky heterogenních svarů



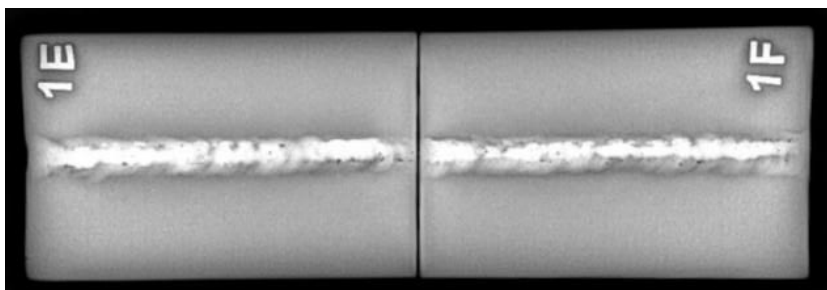
Obr. 92 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 3 před korozním testem: červená – 2013, zelená – 5013, fialová – 5041, 506



Obr. 93 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 3 po korozním testu: 1C – kotlová voda + 0,005 % NaCl, 1D – kotlová voda + 0,05 % NaCl

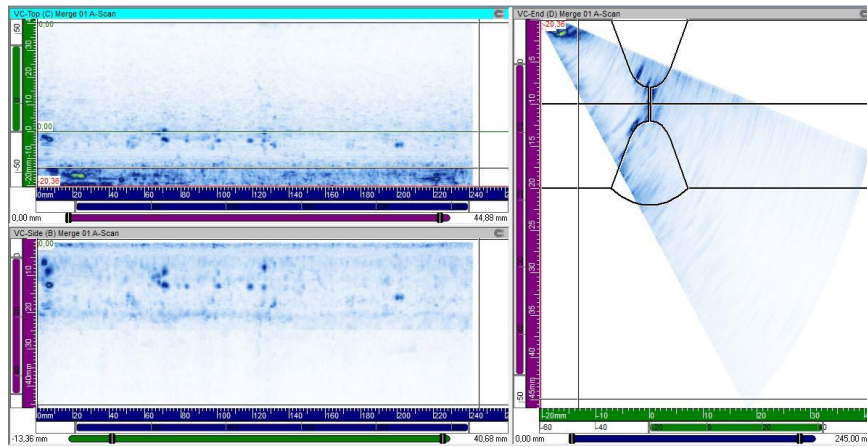


Obr. 94 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 6 před korozním testem: červená – 2013, fialová – 5041, žlutá – 401, 506

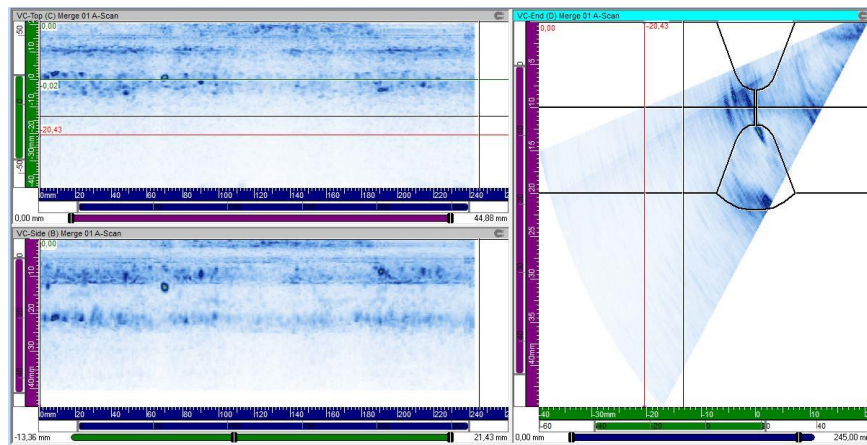


Obr. 95 – Výsledek RTG zkoušky vzorku č. 6 po korozním testu: 1E – kotlová voda + 0,5 % NaCl, 1F – kotlová voda + 5 % NaCl

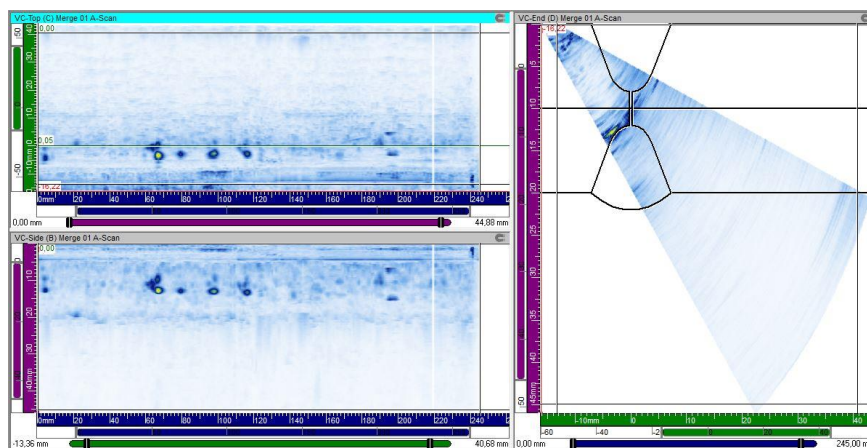
Příloha č. 2: Výsledky PAUT zkoušky heterogenních svarů



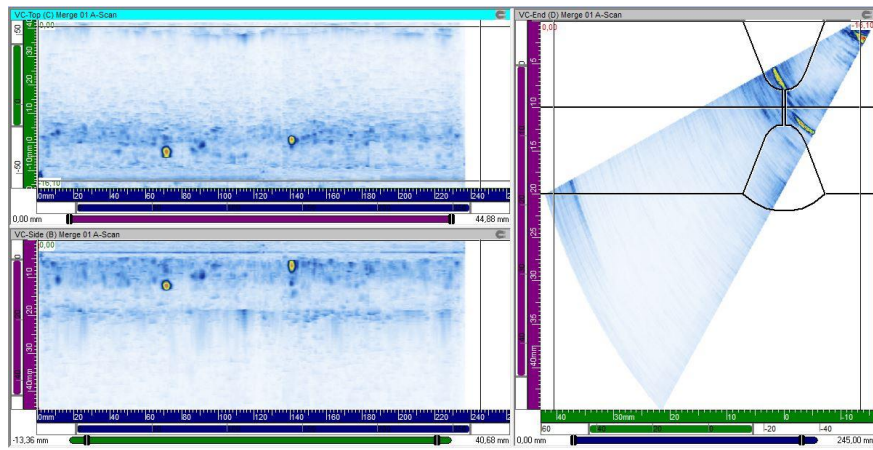
Obr. 56 – Výsledek měření vzorku č. 3 ze strany F před korozním testem



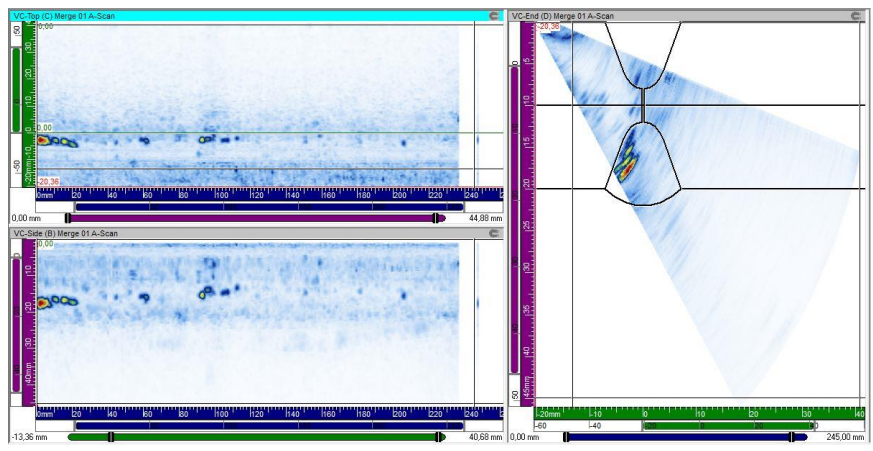
Obr. 97 – Výsledek měření vzorku č. 3 ze strany A před korozním testem



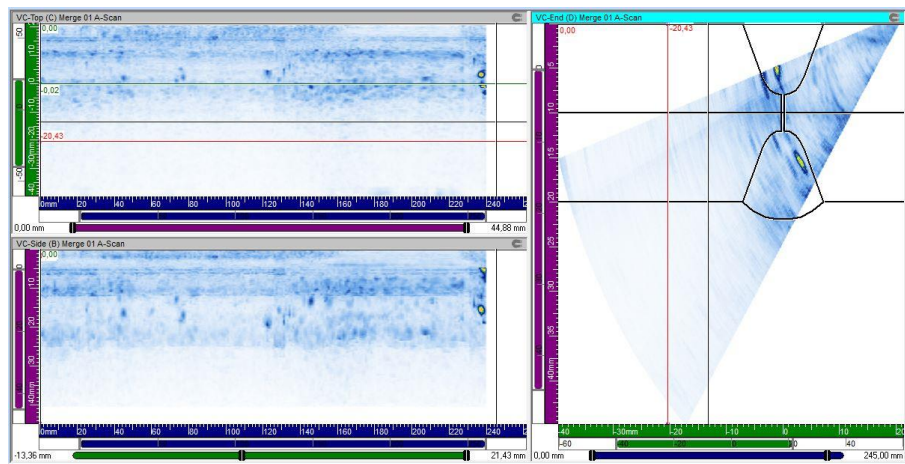
Obr. 98 – Výsledek měření vzorku č. 3 ze strany F po korozním testu



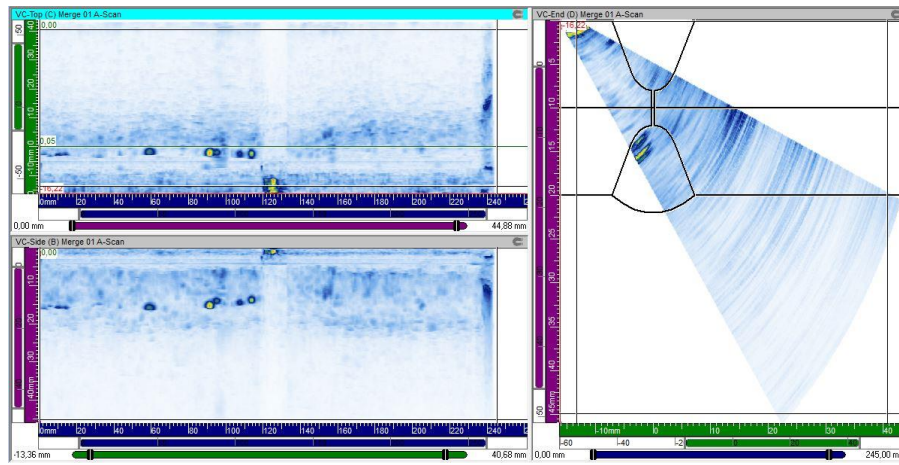
Obr. 99 – Výsledek měření vzorku č. 3 ze strany A po korozním testu



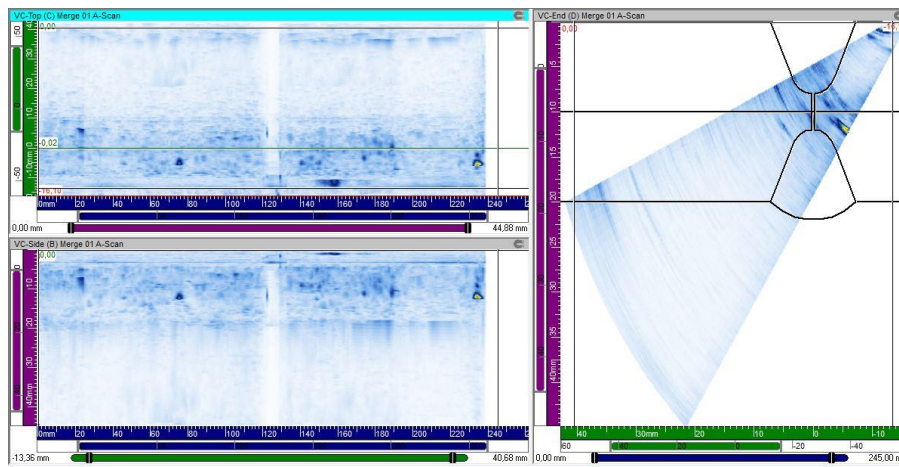
Obr. 100 – Výsledek měření vzorku č. 6 ze strany F před korozním testem



Obr. 101 – Výsledek měření vzorku č. 6 ze strany A před korozním testem

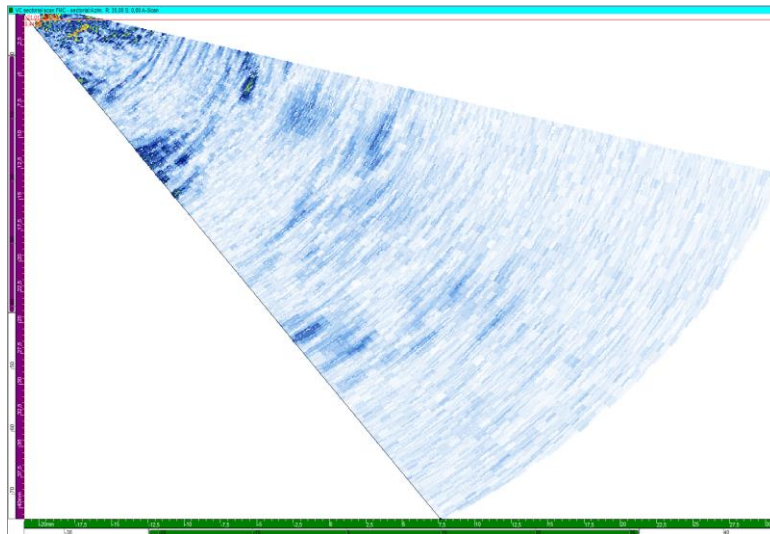


Obr. 102 – Výsledek měření vzorku č. 6 ze strany F po korozním testu

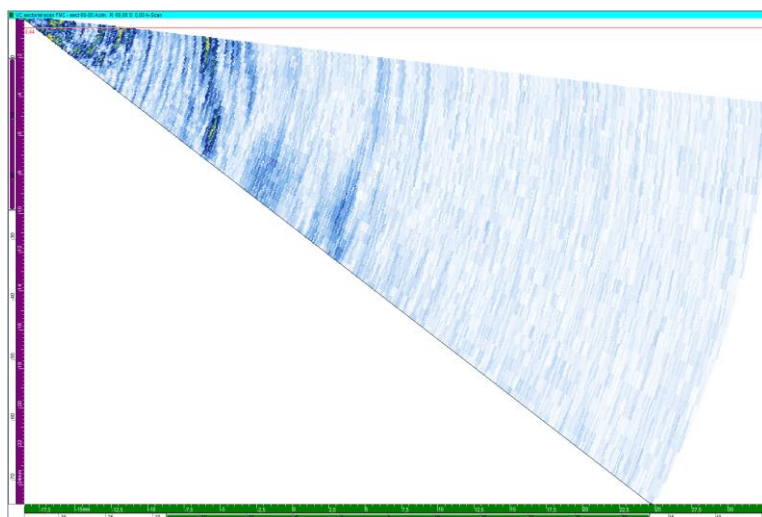


Obr. 103 – Výsledek měření vzorku č. 6 ze strany A po korozním testu

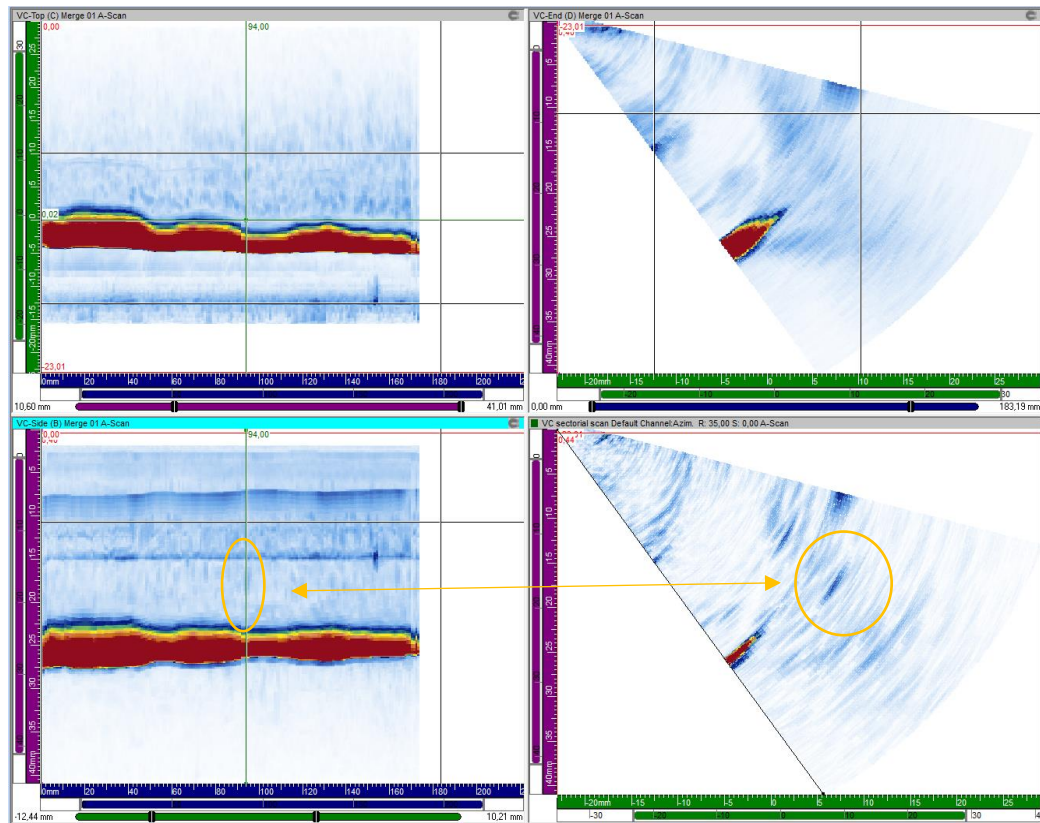
Příloha č. 5: Výsledky aplikace FMC



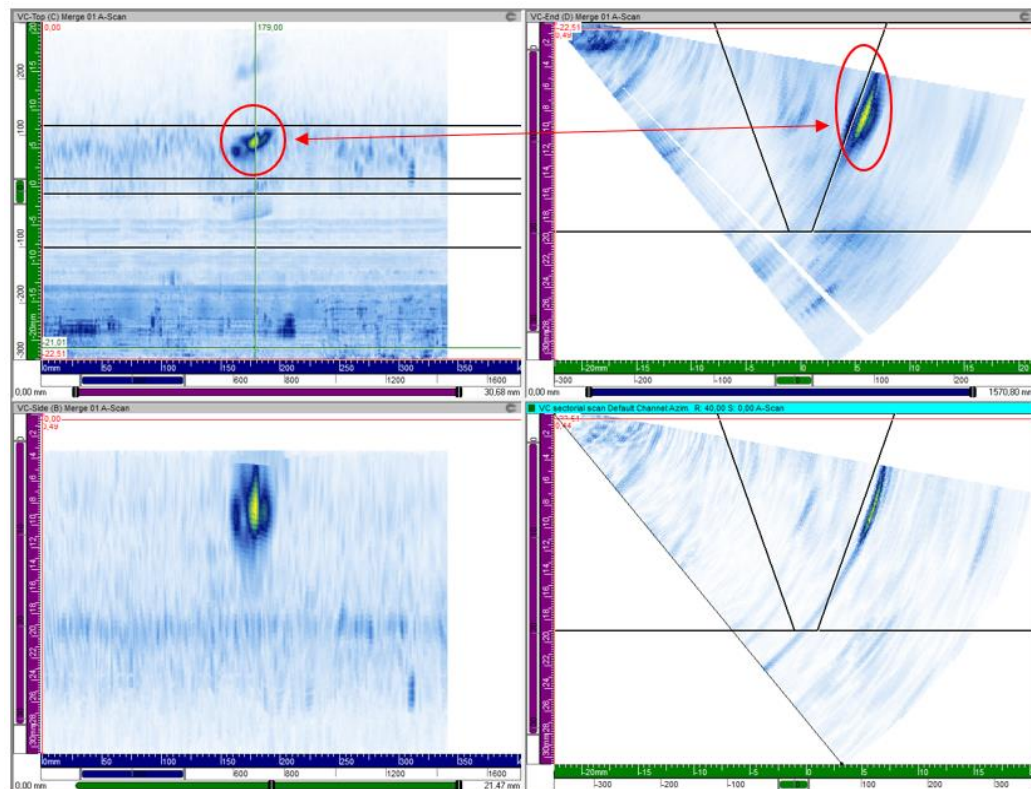
Obr. 104 – ZT č. 29, strana A, S-sken 35° - 75°, FMC/TFM



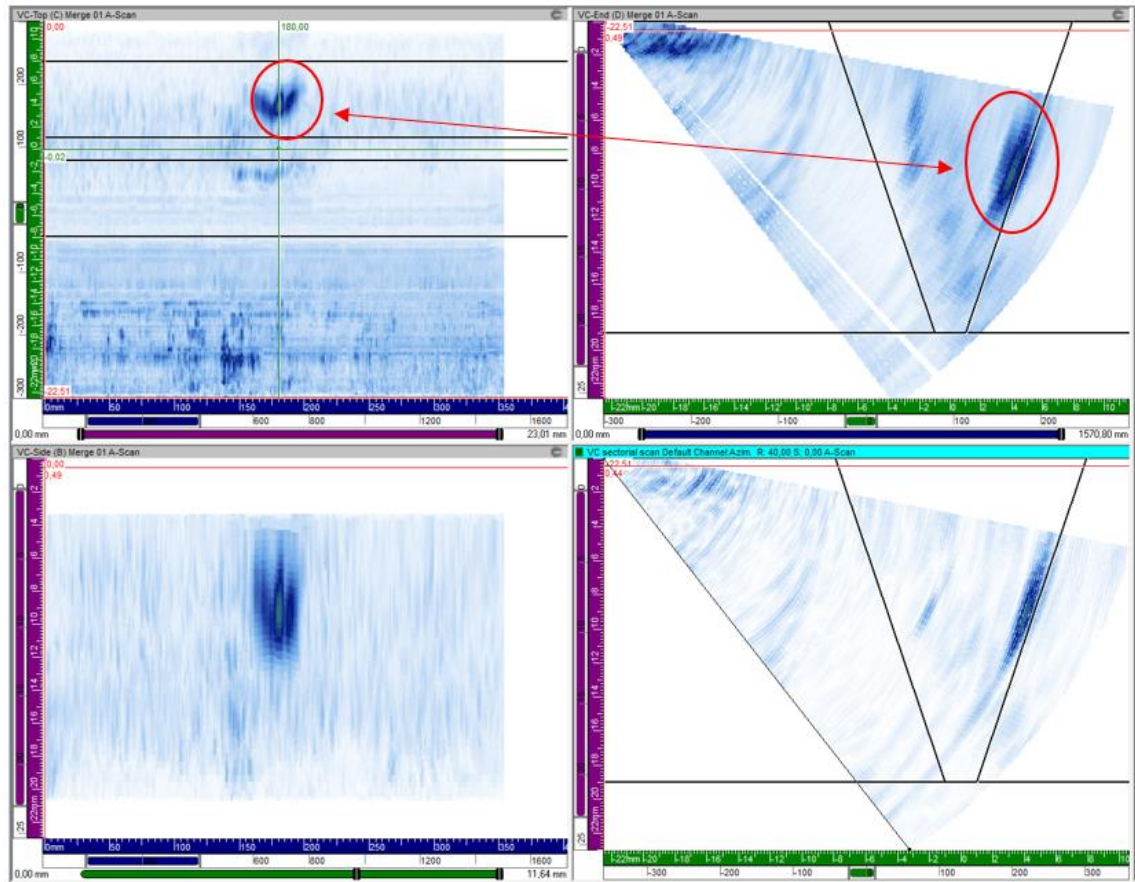
Obr. 105 – ZT č. 29, strana A, S-sken 60° - 85°, FMC/TFM



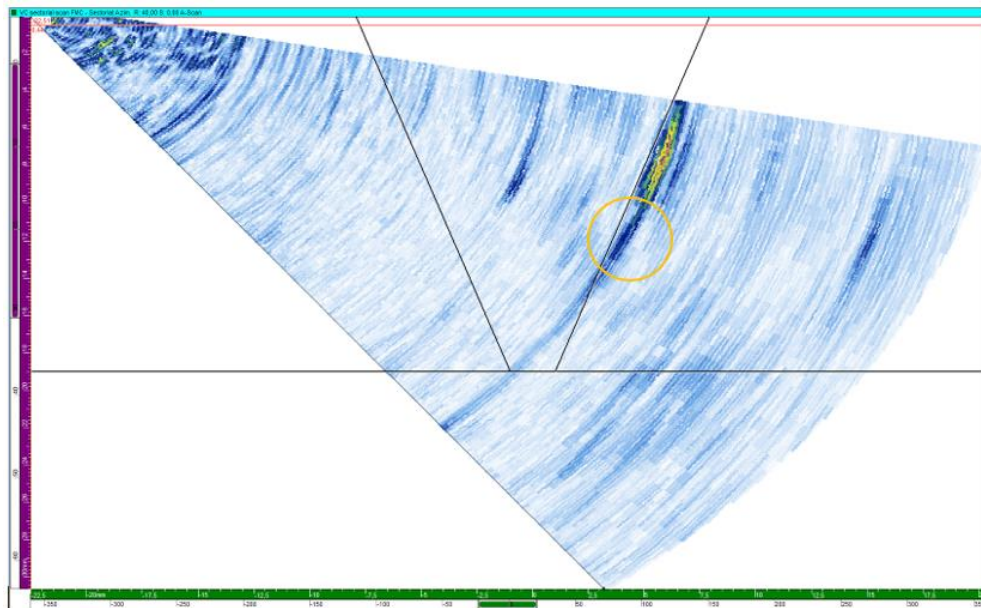
Obr. 68 – ZT č. 29, strana B, S-sken 35° - 75°, PAUT/DDF, žlutá: indikace v pozici 94 mm



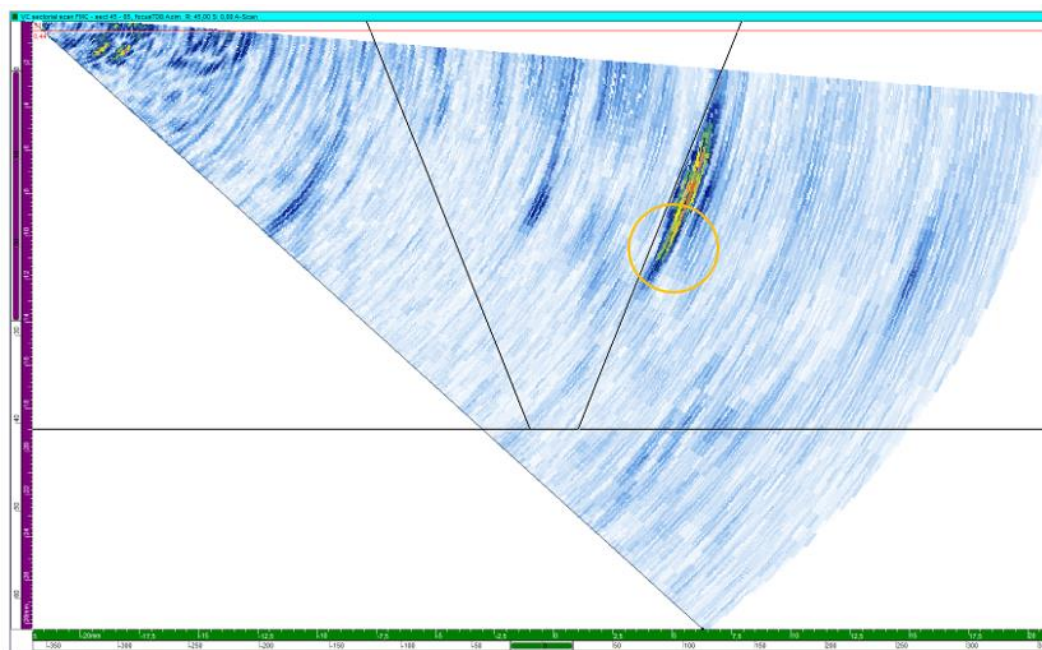
Obr. 69 – ZT č. 30, S-sken 40° - 80°, PAUT, červená: indikace v pozici 179 mm



Obr. 70 – ZT č. 30, S-sken 40° - 80°, FMC/DDF, červená: indikace v pozici 180 mm

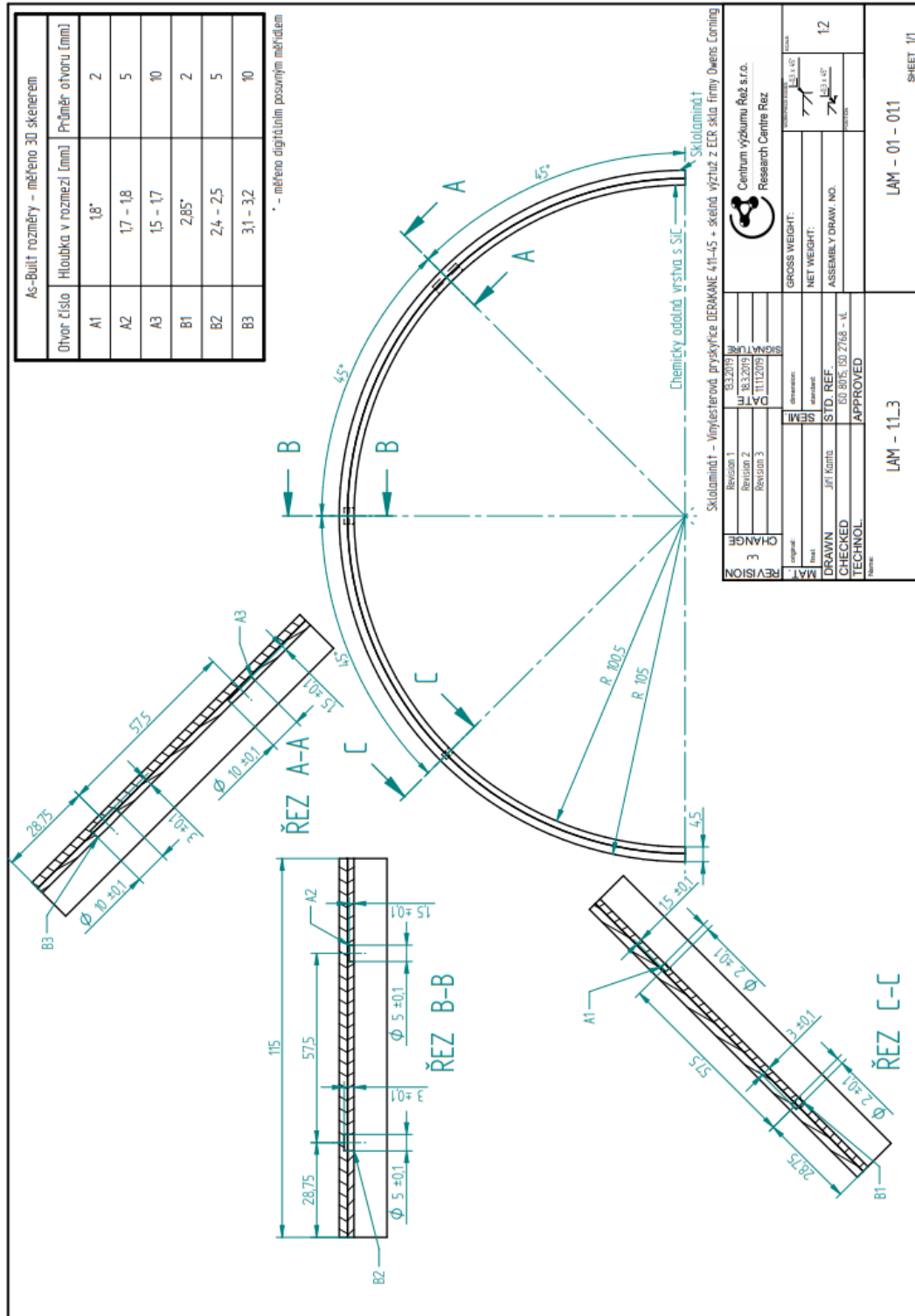


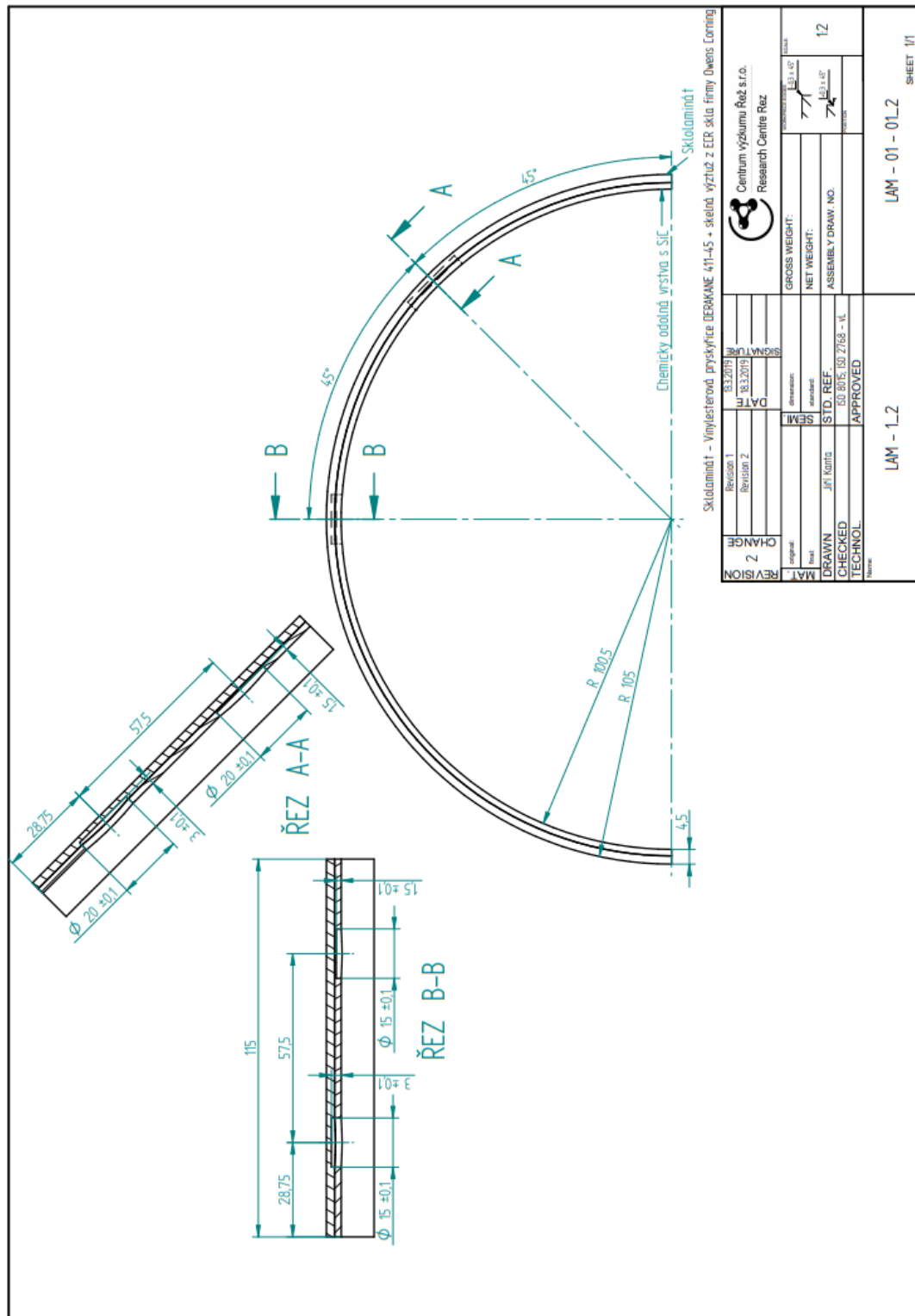
Obr. 71 – ZT č. 30, S-sken 40° - 80°, FMC/TFM, žlutá: nová indikace



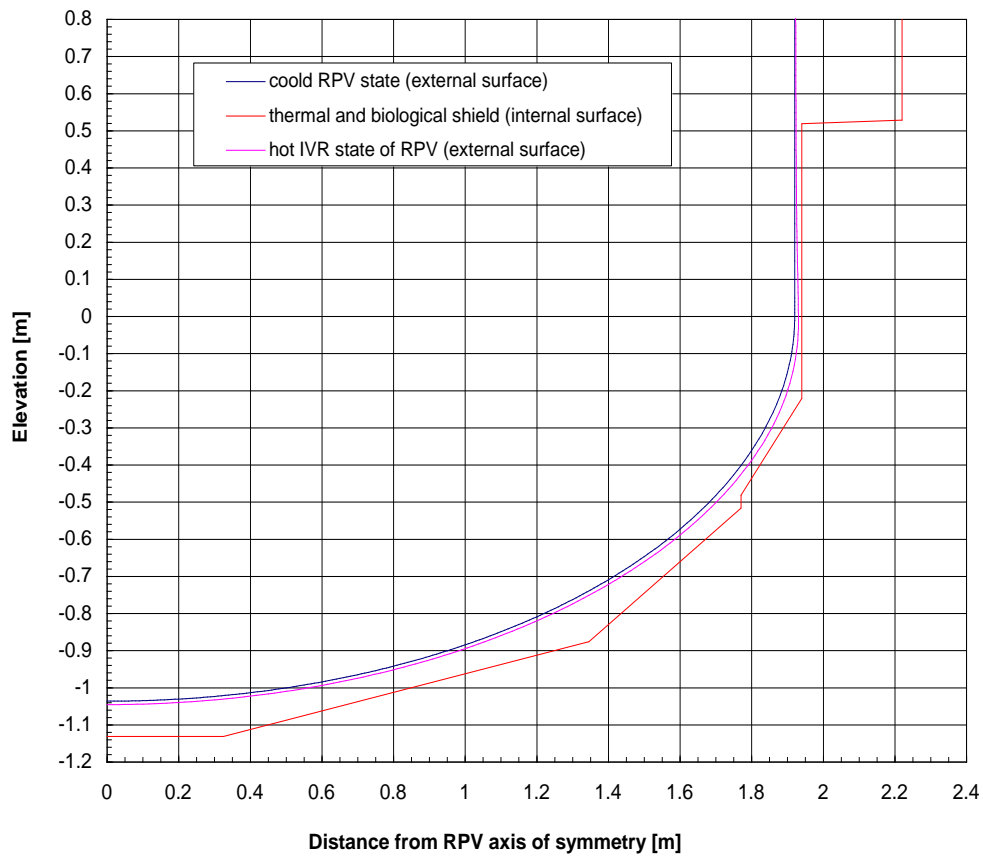
Obr. 72 – ZT č. 30, S-sken 45° - 85°, FMC/TFM, fokusace do hloubky 8 mm, žlutá: nová indikace

Příloha č. 6: Výkresy sklolaminátových těles LAM – 1.1 a LAM – 1.2



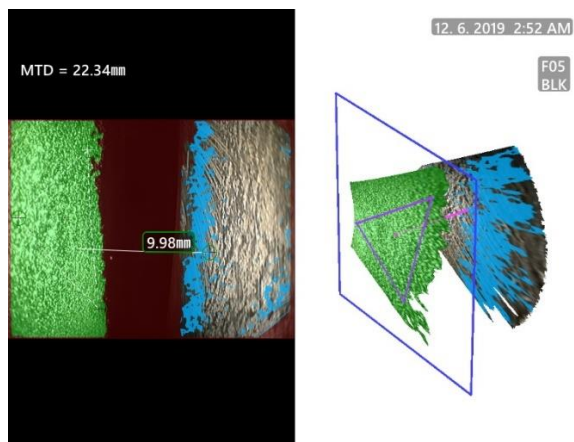


Příloha č. 7: Deformace RPV v časovém úseku 10 h

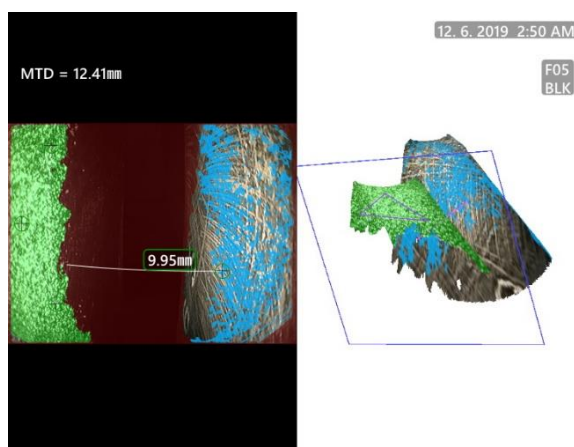


Obr. 106 – Deformace RPV v časovém úseku 10 h [12]

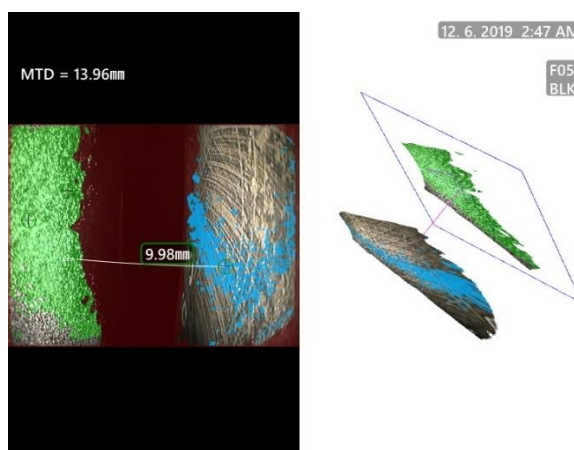
Příloha č. 8: Výsledky měření pomocí endoskopu s 3D adaptérem



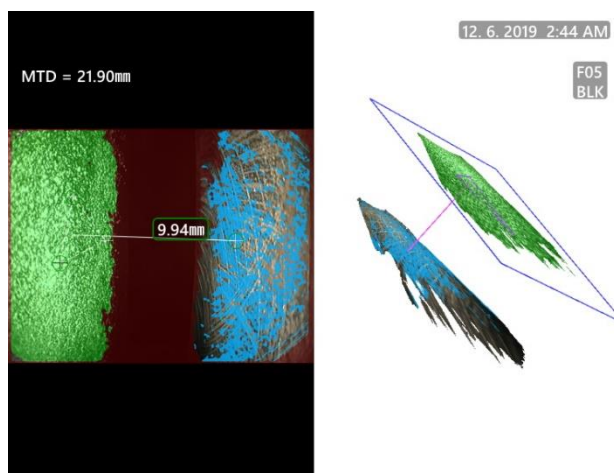
Obr. 107 – Výsledek měření pomocí endoskopu 3D skenovacího objektivu č. 2



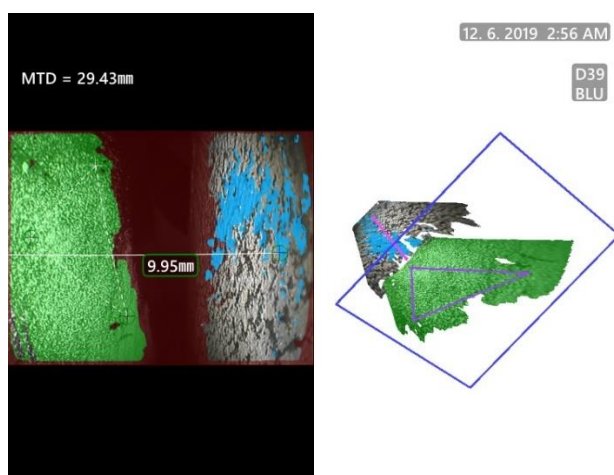
Obr. 108 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 3



Obr. 109 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 4



Obr. 110 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 5



Obr. 111 – Výsledek měření pomocí endoskopu a 3D skenovacího objektivu č. 6