

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití nové nedestruktivní techniky zkoušení svarových spojů kolektoru parogenerátoru VVER 1000

Autor: **Viliam KOPÁL**
Vedoucí práce: **prof. Dr. Ing Antonín KŘÍŽ**

Akademický rok 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Viliam KOPÁL**
Osobní číslo: **S15N0021K**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Využití nové nedestruktivní techniky zkoušení svarových spojů kolektoru parogenerátoru VVER 1000.**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

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

1. Teorie svarového spojení, popis degradačních mechanismů, techniky nedestruktivního objemových zkoušek.
2. Vady svarových spojů, problematika výroby etalonů vad.
3. Využití simulací ultrazvukového zkoušení při ověřování citlivosti NDT systému.
4. Praktický návrh NDT systému, návrh zkušební tělesa, analýza ovlivňujících parametrů.
5. Verifikace navrženého systému pomocí simulací.
6. Měření na reálných vzorcích.
7. Diskuze výsledků.
8. Závěr.

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**

Rozsah kvalifikační práce: **50-60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Bernard Kopec a kolektiv, Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Akademické nakladatelství CERM, 2008, ISBN:978-80-7204-591-4.

ASM Handbook vol.17, , ASM International, Nondestructive evaluation and quality control, 1989, ISBN: 0-87170-007-7.

Peter, J. Shull, Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications, 2002, ISBN: 0-8247-8872-9.

manuál softwaru CIVA

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2018

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kopál	Jméno Viliam	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KMM; ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Využití nové nedestruktivní techniky zkoušení svarových spojů kolektoru parogenerátoru VVER 1000		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM		TEXTOVÁ ČÁST		GRAFICKÁ ČÁST	
---------------	--	---------------------	--	----------------------	--

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Diplomová práce obsahuje postup nedestruktivního ultrazvukového zkoušení svarů kolektoru parogenerátoru za pomoci techniky phased array a dále teoretické a praktické důkazy o použitelnosti a splnění podmínek daných provozovatelem jaderné elektrárny. Důkazy o použitelnosti metody budou založeny na výstupech ze zkoušení zkušebních těles s umělými necelistvostmi. Pro zahrnutí všech možností šíření vad v materiálu a jejich detekce a hodnocení jsou vytvořeny počítačové simulace v softwaru CIVA. Hodnocení použitelnosti techniky zkoušení je provedeno dle metrologie ENIQ (Evropská síť pro inspekci a kvalifikaci).</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Ultrazvuková kontrola, phased array, parogenerátor, NDT, zkoušení, počítačová simulace, ENIQ, CIVA</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kopál	Name Viliam	
FIELD OF STUDY	3911T016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Dr. Ing. Kříž	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Application of new non-destructive techniques for examination of weld joints steam generator collector VVER 1000		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY		TEXT PART		GRAPHICAL PART	
----------------	--	------------------	--	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The diploma thesis contains the procedure of non-destructive ultrasonic evaluation of the steam generator collector welds using the phased array technique, theoretical and practical evidence of applicability and meeting of conditions given by the nuclear power plant operator. Evidence of the applicability of the method will be based on the test results of defect specimens. Computer simulations in CIVA software are created to include all the possibilities of material defects and their detection and evaluation. The applicability of the testing method is evaluated according to the ENIQ metrology (European Network for Inspection and Qualification).</p>
KEY WORDS	<p>Ultrasonic testing, phased array, steamgenerator, NDE, examination, computer modeling simulation, ENIQ, CIVA</p>

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce prof. Dr. Ing. Antonínovi Kříži a konzultantovi Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za podporu, vedení a čas, který mi věnovali. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Houfkovi za jeho cenné rady a Ing. Zdeňkovi Čančurovi, Ph.D. za motivaci k inženýrskému studiu. V neposlední řadě chci poděkovat rodině za jejich podporu.

Poděkování SGS projektu

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2018-051 „Aplikace nových postupů úpravy a testování povrchu i objemových materiálů za účelem zvýšení uplatnitelnosti konstrukčního celku nebo pracovního nástroje v průmyslové praxi“.

Poděkování projektu VVRC a SGS

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2018-051 „Aplikace nových postupů úpravy a testování povrchu i objemových materiálů za účelem zvýšení uplatnitelnosti konstrukčního celku nebo pracovního nástroje v průmyslové praxi“. K realizaci diplomové práce bylo využito přístrojové vybavení finančně podpořeno Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována v infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Seznam použitých výrazů.....	10
Úvod	11
1. Popis kontrolního místa a provedení svarového spoje	12
1.1. Konstrukční varianty svarového spoje	12
1.2. Materiálové provedení svarového spoje	15
1.3. Současný stav NDT kontrol.....	15
1.3.1. Podmínky zkoušení	15
1.3.2. Povrchové kontroly	15
1.3.3. Objemové kontroly.....	16
2. Popis degračních mechanismů	18
2.1. Koroze	18
2.1.1. Důlková koroze	18
2.1.2. Korozní praskání pod napětím	19
2.2. Události ve světě.....	19
2.3. Provozní podmínky a způsob poškození v Ruské federaci a Ukrajině.....	20
2.4. Provozní podmínky na jaderné elektrárně Temelín.....	21
2.5. Kritické velikosti vad.....	23
3. Metody nedestruktivních objemových kontrol	24
3.1. Radiografická metoda.....	25
3.2. Metoda magnetické paměti materiálu.....	25
3.3. Ultrazvuková metoda.....	26
3.3.1. Odrazová technika Pulse echo (UT-PE).....	27
3.3.2. Ultrazvuková technika Phased array (UT-PA).....	28
3.3.3. Výhody použití UT-PA techniky	29
3.3.4. Volba parametru ultrazvukových sond	29
4. Využití simulací ultrazvukového zkoušení při ověřování citlivosti NDT systému	33
4.1. Obecný postup simulace kontroly	34
4.2. Modelování necelistvostí	35
5. Stanovení rozsahu kontroly na základě znalosti degračního mechanismu.....	35

6.	Návrh zkušební tělesa.....	36
6.1.	Umělé necelistvosti ve zkušebním tělese	37
7.	Návrh a popis NDT systému	39
7.1.	Technika	39
7.2.	Zařízení.....	39
7.2.1.	Saturace ultrazvukového signálu.....	39
7.3.	Sondy a použité předsádky	40
7.4.	Referenční měřka.....	43
7.5.	Vazební médium.....	44
7.6.	Manipulátor	44
7.7.	Způsob a směr skenování	45
7.7.1.	Souřadnicový systém.....	46
7.8.	Úhel ultrazvukového svazku PA sond.....	46
7.8.1.	Povrch 1 – zkoušení sondou 13EM-01	46
7.8.2.	Povrch 2 – zkoušení sondou 2L-16A1 a 5L-16A1.....	47
7.8.3.	Povrch 3 – zkoušení sondou 13EM-01	47
7.9.	Hodnotící software naměřených dat	47
8.	Nastavení NDT systému.....	47
8.1.	Kalibrace.....	48
8.1.1.	Kontrolu technické připravenosti NDT systému.....	48
8.1.2.	Kontrolu funkčnosti elementů Phased array sondy.....	48
8.1.3.	Nastavení citlivosti.....	49
8.1.4.	Zpoždění v předsádce (Wedge delay)	49
8.1.5.	Index offset.....	49
8.2.	Ověření kalibrace.....	49
8.3.	Sběr dat a způsob hodnocení indikací	50
8.3.1.	Hodnocení	50
8.3.2.	Úroveň pro hodnocení.....	51
8.3.3.	Registrace indikací	51
8.3.4.	Určení výšky necelistvosti	51
8.3.5.	Určení délky necelistvosti	53
8.3.6.	Určení polohy necelistvosti.....	53
9.	Analýza ovlivňujících parametrů	53

9.1.	Analýza ovlivňujících/základních parametrů svarového spoje	54
9.2.	Analýza ovlivňujících/základních parametrů předpokládaných vadových necelistvostí.....	55
9.3.	Analýza ovlivňujících/základních parametrů postupu zkoušení	55
9.4.	Analýza ovlivňujících/základních parametrů použitého zařízení.....	57
9.5.	Analýza ovlivňujících/základních parametrů použitého Phased array defektoskopu	58
10.	Fyzikální zdůvodnění	58
10.1.	Prostředí zkoušení a přístupnost	58
10.2.	Materiál.....	59
10.3.	Stav zkušební povrchu.....	59
10.4.	Morfologie, náklon a orientace necelistvostí.....	59
10.5.	Rozpětí úhlů sondy	59
10.6.	Zkušenosti personálu a vliv lidského faktoru	60
10.7.	Detekce necelistvostí	60
10.8.	Hodnocení rozměrů necelistvostí	61
10.9.	Závěry hodnocení rozměrů necelistvostí	61
11.	Výsledky reálného měření na zkušebním tělese	64
11.1.	Analýza dat zkoušení z povrchu 1 a 3 sondou 13EM-01	64
11.2.	Analýza dat zkoušení z povrchu 2 sondami 2L16-A1 a 5L-16A1	65
12.	Ověření navrženého NDT systému pomocí simulací zkoušení	66
12.1.	Postup simulace	66
12.2.	Nastavení a parametry simulace	67
12.3.	Modelování necelistvosti	67
12.4.	Výsledky simulace zkoušení sondou 5L-16A1	68
12.5.	Interpretace dosažených výsledků	69
13.	Diskuze výsledků	69
14.	Závěr.....	70
	Použitá literatura	71
	Seznam obrázků	74
	Seznam tabulek	76
	Seznam grafů.....	77
	Seznam příloh.....	77

Seznam použitých zkratk a symbolů

FSH	Výška obrazovky (Full Screen Height)
JE	Jaderná elektrárna
NDT	Nedestruktivní testování
MMM	Metoda magnetické paměti
MT	Magnetická metoda
PG	Parogenerátor
PT	Kapilární metoda
RT	Radiografická metoda
SCC	Korozní praskání pod napětím (Stress corrosion cracking)
TOZ	Tepelně ovlivněná oblast
UT	Ultrazvuková metoda
UT-PA	Ultrazvukové zkoušení metodou Phased Array
UT-PE	Ultrazvukové zkoušení odrazovou metodou (Pulse Echo)
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
VT	Vizuální metoda
ZM	Základní materiál
ZT	Zkušební těleso

Seznam použitých výrazů

Pitch	Vzdálenost mezi centry dvou sousedících elementů sondy
Wedge	Předsádka sondy
Wedge delay	Časové zpoždění předsádky
Index Offset	Vzdálenost čela předsádky sondy od referenčního bodu
Volumeric Merge	Funkce objemového sloučení dat v software Ultravision

Úvod

NDT kontroly na jaderné elektrárně jsou prováděny za účelem zjištění a dokumentování stavu zařízení: na monitorování rozvoje výrobních, přípustných necelistvostí nebo zjišťování nově vzniklých provozních vad vznikajících působením degračních mechanismů. Cílem je ověření další provozuschopnosti zařízení. Monitorování stavu zařízení důležitého z pohledu jaderné bezpečnosti je realizováno pomocí programu provozních kontrol stanovených výrobcem a odsouhlasených provozovatelem, který může být na základě probíhajících kontrol upřesněn, případně rozšířen podle výsledků počátečních kontrol. Program provozních kontrol určuje typ nedestruktivní zkoušky prováděný na daném kontrolním místě, její požadovaný rozsah a periodu. Zároveň jsou ke kontrolním místům stanovena kritéria přípustnosti výrobcem zařízení, které jsou nezbytná pro hodnocení nálezů nedestruktivních kontrol.

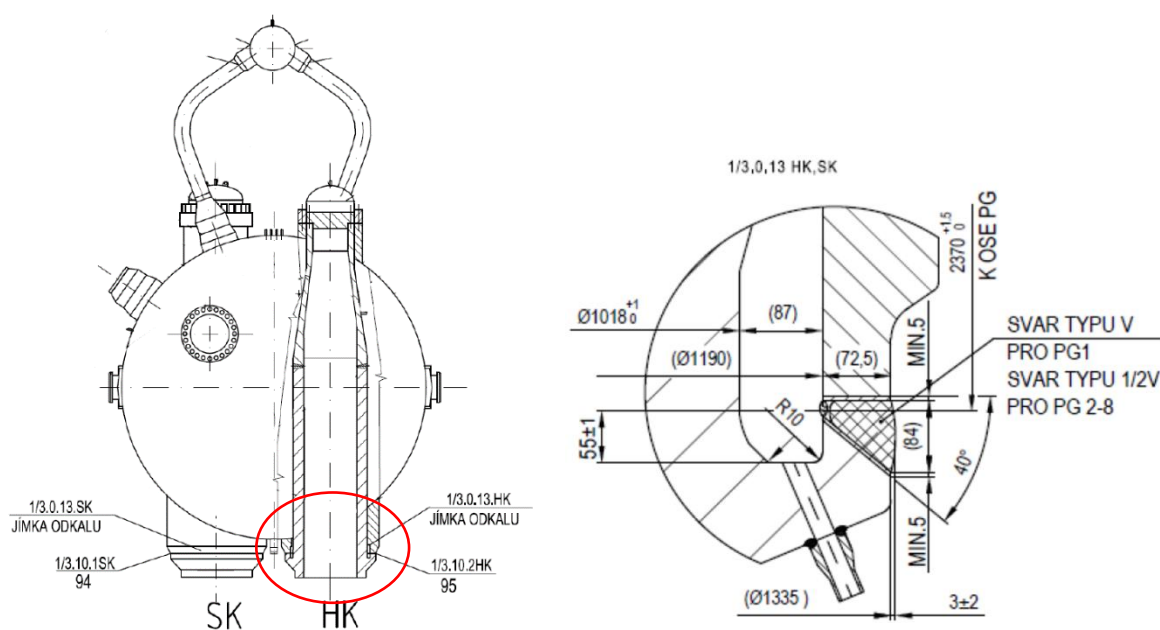
Diplomová práce řeší problematiku poškozování oblasti svarového spoje kolektoru parogenerátoru PGV-1000 nacházejících se na jaderné elektrárně Temelín. Svar na tělese o průměru 1335 mm a tloušťce 72,5 mm byl na základě požadavků výrobce do roku 2017 kontrolován jednoduchou odrazovou ultrazvukovou kontrolou zaměřenou na oblast kořene svarového spoje. Na základě dostupných informací z Ruské federace, kde bylo v rámci provozních kontrol opraveno přes 20 svarů daného typu, a povinnosti vyplývající z atomového zákona o hledání nových možností zlepšování systému řízení (včetně technických zdrojů) bylo přistoupeno k rozšíření kontrol svarového spoje o přilehlou oblast rádiusového přechodu R10 a nasazení techniky Phased array.

Výstupem této diplomové práce je teoretický návrh parametrů ultrazvukového zkoušení technikou Phased Array, ověření funkčnosti a spolehlivosti navrženého NDT systému provedením laboratorního ultrazvukového zkoušení na reálném zkušebním tělese s následnou analýzou dat a posouzení splnění kvalifikačních kritérií stanovených provozovatelem jaderné elektrárny Temelín.

1. Popis kontrolního místa a provedení svarového spoje

Svarové spoje kolektoru primárního okruhu s nátrubkem parogenerátoru DN 1200 PGV 1000M nesou výrobcem Vítkovice označení čísla 94 a 95. Svarové spoje č.94 se nachází na studeném kolektoru parogenerátoru. Svarové spoje č.95 se nachází na horkém kolektoru parogenerátoru (obr. 1). V Ruské Federaci a Ukrajině je tento svar označován číslem 111. Svarové spoje na kolektorech parogenerátoru jsou zavedeny do programu provozních kontrol na základě přílohy dokumentace programu zajišťování jakosti výrobce Vítkovice Power Engineering [1].

Oblast rádiusového přechodu je do programu provozních kontrol zavedena z důvodu zjištěných působících degradačních mechanismů uvedených v kapitole 2. Kontrolní místa rádiusového přechodu R10 se od kořene svarového spoje 94 a 95 nacházejí ve vzdálenosti 55 mm (obr. 1). V těchto místech byly na jaderných elektrárnách Ruské Federace a Ukrajiny zjištěny trhliny (viz kapitola 2.2), které vedly k opravám těchto svarových spojů. Program provozních kontrol na jaderné elektrárně Temelín nezohledňoval do aktualizace dokumentace [1] uvedená riziková místa. Z tohoto důvodu původní NDT kontroly nejsou zaměřeny na detekci vad v oblasti rádiusu R10.

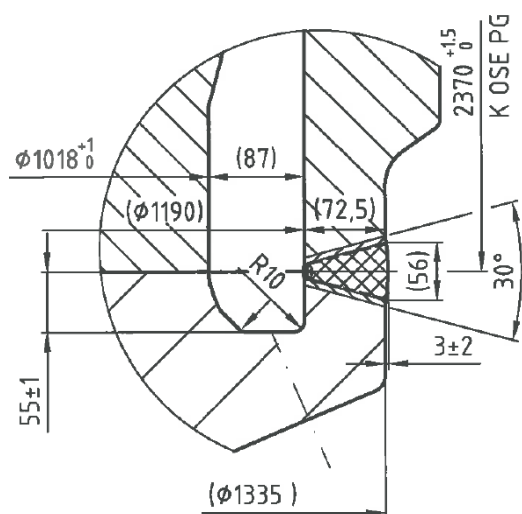


Obr. 1: Poloha svarového spoje a přilehlého rádiusového přechodu R10 na parogenerátoru (vlevo), detail provedení svarového spoje včetně kapsy kolektoru s oblastí rádiusu R10 (vpravo)

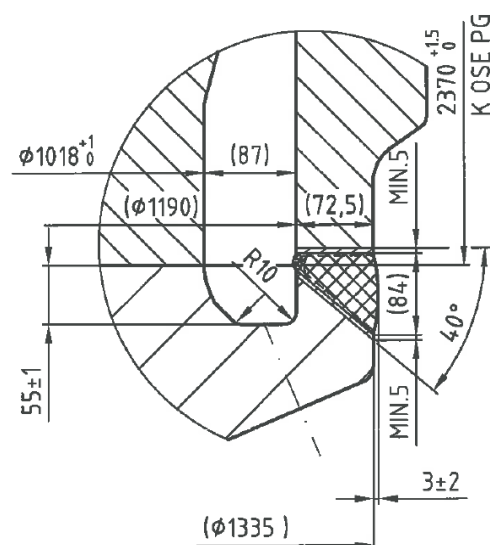
1.1. Konstrukční varianty svarového spoje

Vnější průměr kolektoru je 1335 mm a jmenovitá tloušťka stěny je 72,5 mm. Svarové spoje 94 a 95 jsou tupé spoje typu V svar (obr. 2) a $\frac{1}{2}$ V svar (obr. 3). V svar se nachází pouze na jednom parogenerátoru výrobního bloku č.1 na první větvi smyčky (označení PG11).

Převýšení svarů na svarových spojích č. 94 a 95 není na kolektorech PG V-1000 na JE Temelín odstraněno, na rozdíl od analogických svarových spojů č. 111 na kolektorech PG V-1000 ruské výroby na JE v Rusku a na Ukrajině.



Obr. 2: Konstrukční provedení PG11 svar typu V



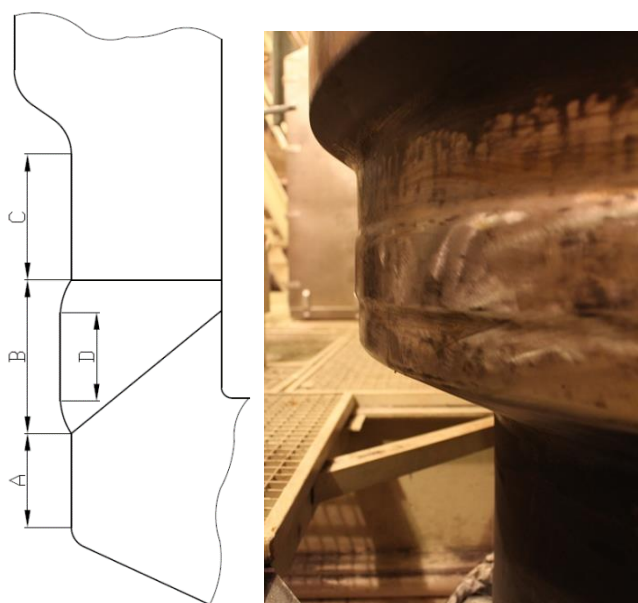
Obr. 3: V PG12-PG24 svar typu 1/2 V

Na základě výkresové dokumentace lze předem předpokládat prostorová omezení pro provádění ultrazvukové zkoušky způsobené:

- přítomností koruny svaru omezující pohyb sond z většího průměru 1335 mm,
- přítomností dvou nátrubků trvalého odkalu na šikmé ploše.

Z důvodu přítomnosti koruny svaru tak nelze provést analogické kontroly po vzoru ruských inspekčních postupů ultrazvukových kontrol TsNIITMASH¹ realizovaných na elektrárnách v Ruské federaci a Ukrajině. Tab. 1 specifikuje naměřená prostorová omezení pro přiložení ultrazvukových sond a jejich případný pohyb směrem od svarového spoje pro každý kolektor jaderné elektrárny Temelín. Jak je z tab. 1 patrné, šířka koruny svaru a přístupnost ke svaru se pro každý kolektor liší. Rozměrové hodnoty stanovené z tab. 1 jsou schematicky vyznačeny na obr. 3. Uvedená prostorová omezení hrají roli při návrhu sondy a její předsádky. Na obr. 4 vpravo je fotografie skutečného provedení 1/2V svarového spoje kolektoru parogenerátoru po odstranění pasivační ochranné vrstvy.

¹ Výzkumné a vývojové centrum materiálů se sídlem v Moskvě zabývající se širokou oblastní průmyslového a technologického inženýrství v chemickém, metalurgickém, dopravním a energetickém odvětví. Specifickou činností je zajišťování provozních NDE kontrol na ruských a ukrajinských elektrárnách.



Obr. 4: Přístup ke zkoušení svarového spoje kolektoru parogenerátoru (varianta 1/2V svar)

Tab. 1: Prostorová omezení pro umístění sond z vnějšího povrchu kolektoru

Projektové značení a typ svarového spoje			Rozměry [mm]			
			A	B	C	D
I. blok	1YB10W01 „V“ svar	Horká smyčka (svar č.95)	78	77	40	-
		Studená smyčka (svar č.94)	82	70	46	-
	1YB20W01 „1/2 V“ svar	Horká smyčka (svar č.95)	45	85	55	53
		Studená smyčka (svar č.94)	48	81	55	53
	1YB30W01 „1/2 V“ svar	Horká smyčka (svar č.95)	38	81	61	48
		Studená smyčka (svar č.94)	30	79	57	47
1YB40W01 „1/2 V“ svar	Horká smyčka (svar č.95)	37	88	57	57	
	Studená smyčka (svar č.94)	45	85	46	62	
II. blok	2YB10W01 „1/2 V“ svar	Horká smyčka (svar č.95)	35	75	60	45
		Studená smyčka (svar č.94)	30	85	55	60
	2YB20W01 „1/2 V“ svar	Horká smyčka (svar č.95)	25	90	55	70
		Studená smyčka (svar č.94)	35	70	65	50
	2YB30W01 „1/2 V“ svar	Horká smyčka (svar č.95)	35	75	55	55
		Studená smyčka (svar č.94)	40	75	55	55
	2YB40W01 „1/2 V“ svar	Horká smyčka (svar č.95)	35	80	55	50
		Studená smyčka (svar č.94)	40	80	50	50

1.2. Materiálové provedení svarového spoje

Pro konstrukci kolektoru parogenerátoru a svařování byly použity následující materiály:

Hrdlo kolektoru PG: základní materiál 10GN2MFA (značení dle OST 108.300.02-86)
návar Sv-08A (značení dle GOST 2246-70)

Přechodová redukce HCP: základní materiál 10GN2MFA
návar Sv-08A

Svarový materiál: UONI 13/55 (značení dle OST 5.9224-75)
Sv-08GS (značení dle GOST 2246-70)

Požadavky na ocel základního materiálu zahrnovaly maximální, jednotlivé množství fosforu a síry do 0,02%. Koncepce chemického složení oceli 10GN2MFA byla zvolena tak, že i při nízkém obsahu uhlíku zaručuje zvýšený obsah niklu a molybdenu její dostatečnou prokalitelnost. U uvedené oceli je prokázána náchylnost k vratné popouštěcí křehkosti, která je vyvolána přítomností niklu a fosforu. Fosfor při zvýšených teplotách difunduje do oceli, což výrazně snižuje kohezní pevnost. Statické deformační stárnutí vede ke zvýšení pevnostních vlastností oceli a ke snížení jejich plastických vlastností a vyvolává zvýšení kritické teploty křehkosti [8].

Chemické složení oceli 10GN2MFA dokladovaných výrobcem parogenerátoru je uvedeno v tab 2.

Tab. 2: Chemické složení oceli 10GN2MFA

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al
Min.	0,08	0,80	0,17	-	-	-	1,80	-	0,40	0,03	-	0,005
Max.	0,12	1,10	0,37	0,008	0,005	0,30	2,30	0,30	0,70	0,07	0,015	0,035

1.3. Současný stav NDT kontrol

1.3.1. Podmínky zkoušení

Na původním kontrolním místě svarového spoje jsou dle doporučení výrobce [1] prováděny kontroly s periodou 6 let. Vnější povrch kolektoru je před zkoušením zbaven pasivační vrstvy (obr. 4). Drsnost povrchu je požadována Ra 6,3 nebo nižší.

1.3.2. Povrchové kontroly

Pro zjišťování indikací komunikujících s vnějším povrchem je prováděno vizuální a magnetické zkoušení. Rozsah vizuální a magnetické zkoušky je 100 % povrchu svaru a přilehlé oblasti do vzdálenosti 20 mm od hranice svaru na obě strany. Přípustnost kontroly je podmíněná nálezem trhlin, studených spojů, zápalů, rozstříku, přeteklého povrchu, plynových kanálů, nebo přítomností objemových vad kruhového, nebo protáhlého tvaru větší než 1,5 mm, jejichž počet je větší než 5 na 100 mm délky svaru [2].

Povrchové kontroly neposkytují informaci o stavu kontrolované oblasti z vnitřního povrchu v návaznosti na působící degradační mechanismy.

1.3.3. Objemové kontroly

Objemová kontrola svaru odrazovou ultrazvukovou kontrolou (UT-PE) je realizována za pomoci úhlových sond 45° a 60° o frekvenci 4 MHz. Přístupnost ke svaru umožňuje přiložení sond ke koruně svaru z obou stran z vnějšího povrchu. Vzhledem k prostorovému omezení popsaných v kapitole 1.1. se využívá pouze přímého svazku (půlkroku). Tímto způsobem nelze obsáhnout ultrazvukovým svazkem horní polovinu svarového spoje, nicméně necelistvosti komunikující s vnějším povrchem jsou řešeny výše popsanou vizuální a magnetickou kontrolou.

Na základě zahraničních informací o působících degradačních mechanismech a realizovaných opravách po určité době provozu (viz kapitola 2.1) byly nedestruktivní kontroly v roce 2015 rozšířeny o ruční zkoušení ze šikmé strany přímou sondou MB4S s předsádkou s nominálním úhlem šíření ultrazvukových vln 25° . Kalibrace sondy probíhá na referenční měrce vyrobené z uhlíkové oceli obsahující vývrt s plochým dnem o průměru 2,5 mm v hloubce 60 mm. Na základě zachyceného signálu od tohoto vývrtu se v defektoskopu vytvoří AVG křivka pro náhradní velikost vady Dn 2,5 mm.

Pomocí simulace v software CIVA je vizualizováno objemové pokrytí zkušebního úseku zvolených sond (obr. 5, 6 a 7). Do simulace jsou zahrnuty parametry sondy uvedené výrobcem v průvodních listech (tab. 3).

Tab. 3: Parametry sond pro zkoušení ultrazvukovou kontrolou

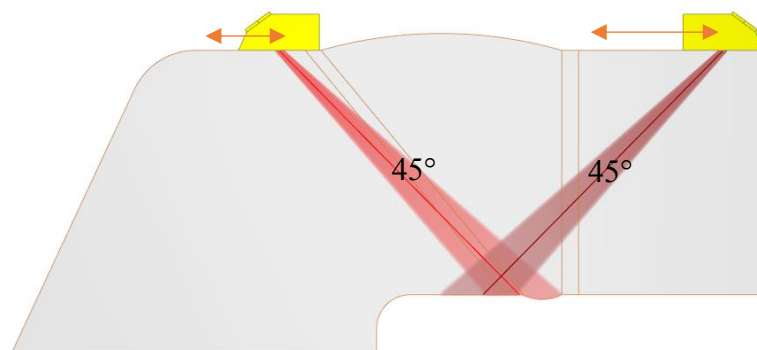
	Úhlové sondy MWB 45-5 a MWB 60-4	Přímá sonda MB4S s předsádkou 25°
Rozměry měniče	8x9 mm	\varnothing 10 mm
Kontaktní plocha sond	24x13,5 mm	\varnothing 16 mm
Vzdálenost blízkého pole	30 mm	16 mm
Frekvence sondy	4 MHz	4 MHz
Druh vlny	Příčná	Podélná
Výstupní úhel	$45^\circ / 60^\circ$	0°

Kontroly úhlovými sondami pokrývají primárně oblast kořene svarového spoje (MWB 45-4, obr. 5) a oblast střední tloušťky v oblasti svaru (MWB 60-4, obr. 6). Z obr. 5 je patrné, že při pohybu sondy MWB 45-5 směrem ke koruně svaru ze strany parogenerátoru je částečně pokryta oblast rádiusu R10. Detekce případných necelistvostí přes svarový spoj není pravděpodobná. V případě trhliny v oblasti rádiusu šířící se z vnitřního povrchu pomocí rohového odrazu je detekce nepravděpodobná.

Při zkoušení přímou sondou s předsádkou odpovídá nominální úhel zkosení šikmé strany, takže šíření ultrazvukového paprsku probíhá rovnoběžně s vnějším povrchem kolektoru (obr. 7). Z tohoto povrchu je tak možné detekovat indikace v oblasti rádiusu.

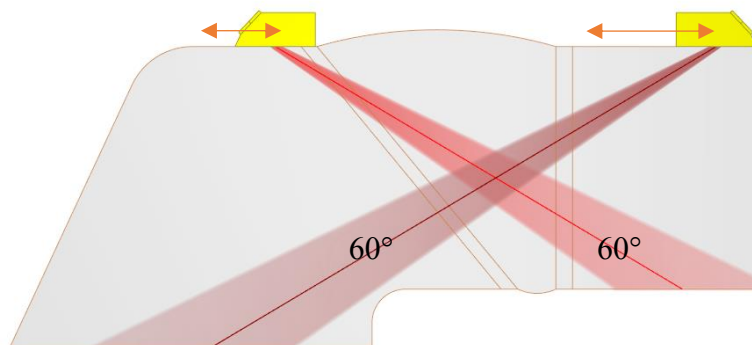
Uvedené vizualizace šíření ultrazvukového signálu zobrazené v softwaru CIVA dávají představu o směru šíření ultrazvukového svazku – nominálního úhlu sondy se zahrnutím úhlu rozevření (φ_{-6dB}).

měření ze strany hlavního cirkulačního potrubí měření ze strany parogenerátoru

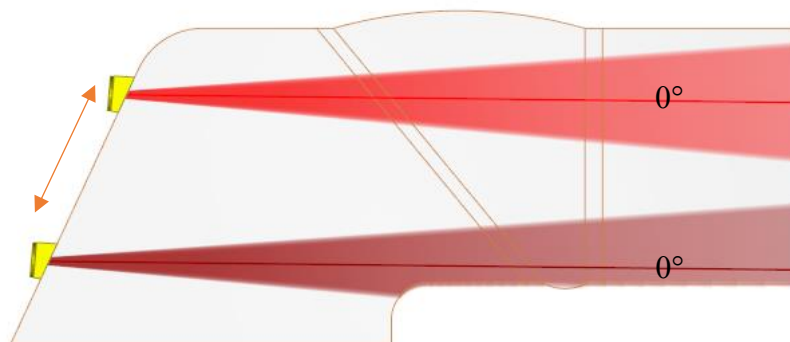


Obr. 5: Prozvučení oblasti vnitřního povrchu kapsy parogenerátoru sondami 45°

měření ze strany hlavního cirkulačního potrubí měření ze strany parogenerátoru



Obr. 6: Prozvučení oblasti vnitřního povrchu kapsy parogenerátoru sondami 60°

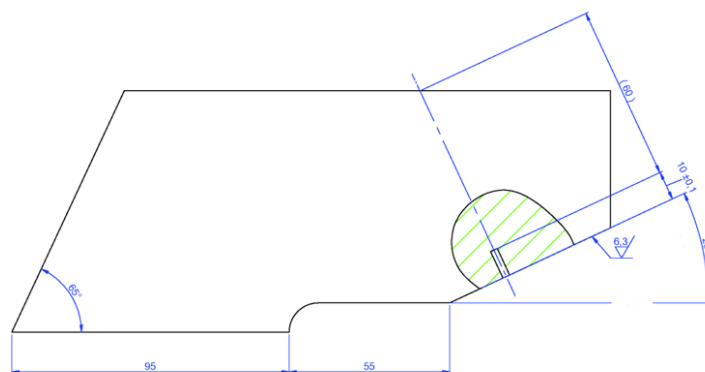


Obr. 7: Prozvučení oblasti vnitřního povrchu kapsy parogenerátoru přímými sondami s předzádkou s úhlem lomu 25°

Kritéria ultrazvukové kontroly jsou nastavena na registrační úroveň indikace odpovídající vývrtnu s plochým dnem $D_n = 2,5$ mm a na nepřípustnou úroveň $D_n = 3,0$ mm. Maximální povolený počet vad na 100 mm délky svaru je 7. Nedovolené jsou taktéž indikace nezávislé na jejich náhradní délce a velikosti echa ve směru pod úhlem 10-40° (příčné indikace) podélně vzhledem k ose svaru, pokud je současně není možné zjistit při zkoušení v kolmém směru [2].

Uvedená kritéria nedestruktivních kontrol svaru kolektoru byla nastavena dle výrobních kritérií předpisu pro kontrolu svarových spojů jaderných elektráren PK 1514-72 [2] a představují nejkonzervativnější přístup k provozním kontrolám.

V roce 2015 byla provedena výpočtová analýza svarového spoje na stanovení velikosti kritických rozměrů trhlin [3]. Pro účely ověření schopnosti detekce indikací bylo navrženo a vyrobeno 6 zkušebních měrek s jiskřenými vadami z materiálu z uhlíkové oceli. Tělesa neobsahují svarový spoj, pouze kopírují geometrii tělesa (obr. 8). Pomocí těles byla ověřena schopnost zvoleného NDT systému detekovat specifické vady vznikající ve svarovém spoji v oblasti rádiusu, nicméně s použitím odrazové techniky nelze spolehlivě určit výšku vady.



Obr. 8: Výkres referenční měrky s vývrtem s plochým dnem $D_n=2,5$ mm pro kalibraci sondy MB4S s předsádkou 25°

2. Popis degračních mechanismů

2.1.Koroze

Korozi lze definovat jako porušení či rozpouštění kovů oxidací, při kterém vznikají korozní produkty. Korozní produkty se mohou rozpouštět ve formě iontů kovů v korozním prostředí, nebo mohou mít tuhou (nerozpustnou) podobu tvořící se na povrchu kovu. Vytvořený povrch korozních produktů má zpravidla pasivační charakter a zpomaluje tak další průběh oxidace kovu. Pokud koroze probíhá v nevodivém prostředí, kdy je základní příčinou reaktivita materiálu, hovoříme o chemické korozi. Ve vodivém prostředí působí elektrochemická koroze, kdy v důsledku rozdílné koncentrace kovu, nebo při styku dvou různých kovů, vznikají vlivem rozdílných elektrochemických potenciálů lokální elektrické (korozní) články. [4,5]

Uvedené mechanismy mají za následek vznik různých forem korozního napadení, mezi které patří rovnoměrná, skvrnitá, galvanická, štěrbinová, nitková, důlková či bodová koroze a různé formy korozního praskání. Analýza poškození materiálu v oblasti kapes parogenerátorů zjistila přítomnost následujících degračních mechanismů. [4]

2.1.1. Důlková koroze

Důlková koroze představuje lokální napadení povrchu pronikající do hloubky materiálu. S pokračujícím napadením, kdy hloubka poškození překročí rozměr průměru důlku, hovoříme o bodové korozi (pittingu), nicméně mechanismus poškození zůstává stejný. Důlková koroze se vyskytuje zejména u materiálu s pasivační vrstvou, typicky u korozivzdorných ocelí. Místem vzniku důlku je nehomogenita v pasivační vrstvě, nebo korozním prostředí. V těchto místech je poté za přítomnosti nejčastěji chloridových nebo halogenidových iontů v korozním prostředí pasivační vrstva nadále narušována nebo je zamezeno její obnově a je tak usnadněno další rozpouštění kovu. [4]

2.1.2. Korozní praskání pod napětím

V případě heterogenních svarových spojů se jedná o často se vyskytující degradační mechanismus, při kterém dochází k rozvoji a šíření trhlin vedoucí k praskání. Vznik a šíření trhlin nastává při působení statického tahového napětí (pod úrovní meze pevnosti nebo i pod mezí kluzu) v kombinaci se specifickým prostředím (teploty prostředí a chemického složení) a citlivosti daného materiálu ke koroznímu praskání. Zdrojem rozvoje trhliny je koncentrátor napětí, například technologická trhlina, makrotrhlina vzniklá cyklickým namáháním nebo lokální poškození způsobené korozi. S rostoucí homogenitou materiálu klesá náchylnost k danému poškození. Čisté kovy jsou nejodolnější. [4,5]

Podle degradačních mechanismů korozního praskání lze provést podrobnější dělení vycházející z klasifikace organizace EPRI programu RI-ISI (Risk Informed - In Service Inspection) [5,6]:

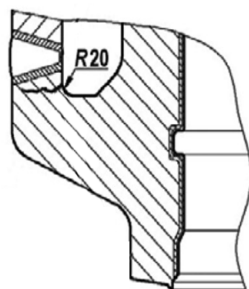
- IGSCC (Intergranular Stress Corrosion Cracking) - mezikrystalové korozní praskání pod napětím,
- TGSCC (Transgranular Stress Corrosion Cracking) - transkrystalové korozní praskání pod napětím,
- ECSCC (External Chloride Stress Corrosion Cracking) - korozní praskání vnějšího povrchu potrubí,
- PWSCC (Primary Water Stress Corrosion Cracking) - korozní praskání pod napětím v primárním prostředí.

2.2. Události ve světě

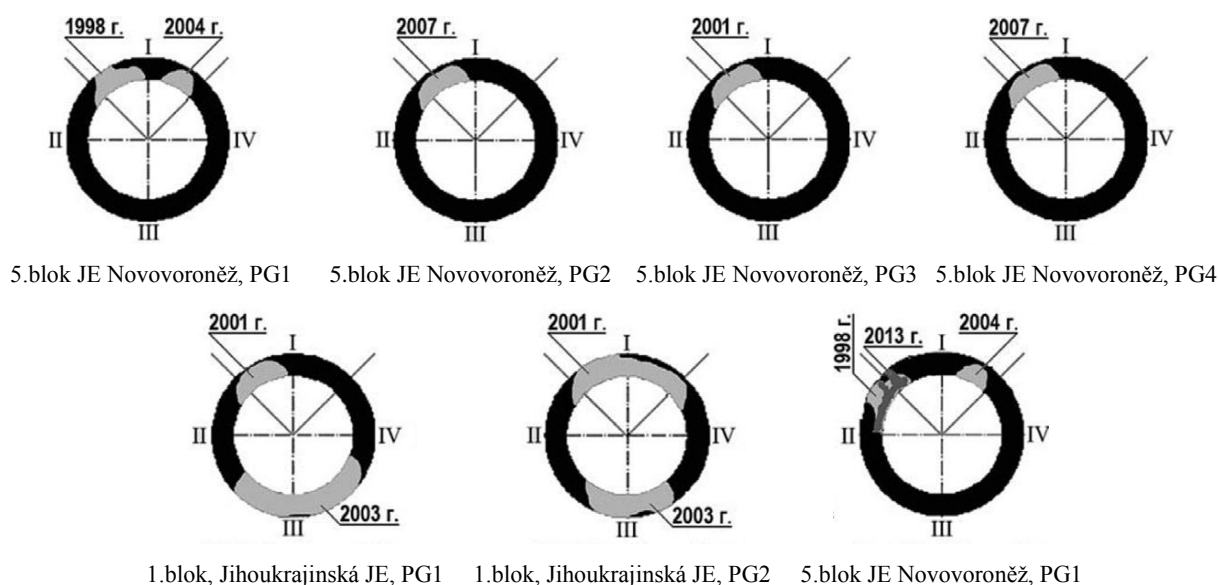
Z informačních zdrojů z Ruské federace a Ukrajiny byly specifické necelistvosti nalezeny celkem na 15 z 92 provozovaných kolektorů typu V-1000 (10 na horké smyčce, 5 na studené smyčce), tj. celkem na 16% provozovaných kolektorů. Počet provedených oprav je dosud celkem 20. Některé kolektory byly opravovány vícekrát. Nejčastěji opravované byly kolektory PG-1 na horkých smyčkách (3krát více než kolektorech studených smyček), přičemž rozhodující většina vyskytujících se opravovaných necelistvostí byly obvodově orientované trhliny (dvakrát více než axiálních a šikmých necelistvostí) v oblastech rádiusových přechodů kapsy parogenerátoru (obr. 9).

Působení degradačních mechanismů a provozních podmínek vedlo v několika případech k rozšíření trhliny skrz celou tloušťku základního materiálu. Na obr. 10 jsou graficky zobrazeny nálezy trhlin na elektrárnách Novovoronež, Balakovo a Jihoukrajinské elektrárny s uvedeným rokem nálezů. Počáteční oblast poškození směřuje ve všech případech ve směru osy hlavního cirkulačního potrubí (Sekce I – II). Trhliny jsou orientované podélně s osou svaru. Po lokálních opravách se ve stejných svarových spojkách objevují příčně orientované trhliny skrz svarový spoj č.111 na opačné straně kolektoru. [7]

Průchozí trhlina byla nalezena během preventivní opravy svarů 111 v roce 2001 na Jihoukrajinské elektrárně. V roce 2006 na ruské Kalininské elektrárně NDT kontroly společnosti TsNIITMASH odhalily téměř průchozí trhlinu nacházející se 30 mm od vnějšího povrchu kolektoru o délce 400 mm. V roce 2013 došlo na 5. bloku jaderné elektrárny Novovoronež při kontrolách izolace kolektoru ke zjištění úniku páry. Následně vizuální a kapilární kontroly potvrdili průchozí defekt o délce 25 mm s úhlem natočení 45° vůči ose svaru. Parogenerátor byl v provozu 24 let a svar kolektoru č.111 Novovoronežského parogenerátoru byl lokálně opravován v letech 1998 a 2005. [7]



Obr. 9: Místo výskytu nálezu trhlin v kapsách kolektoru parogenerátoru z Ruské federace a Ukrajiny [7]



Obr. 10: Nálezy trhlin v kapsách kolektoru parogenerátoru Novovoronežské a Jihoukrajinské elektrárny [7]

2.3. Provozní podmínky a způsob poškození v Ruské federaci a Ukrajině

Vznik trhlin v oblasti vnitřního rádiu $R20$ na ruských a ukrajinských kolektorech je způsoben v důsledku současného působení několika faktorů:

- intenzivní elektrochemická koroze způsobující bodovou korozi – pitting,
- teplotní změny v oblasti kapes kolektorů parogenerátoru,
- působení mechanického napětí v oblasti kapsy parogenerátoru.

Složité geometrie kapsy kolektoru parogenerátoru způsobuje v daném místě stagnaci vody obsahující korozní produkty obsažené ve vodě sekundárního okruhu. Počátečním mechanismem vzniku trhlin je elektrochemická koroze vznikající mezi základním materiálem a úsadami, které se v průběhu provozu akumulují v prostoru kapsy kolektoru parogenerátoru. V úsadách je obsažen oxid měďnatý (CuO), který spolu se základním materiálem vytváří elektrochemický článek. Základní materiál zde představuje anodu, ze kterého jsou odváděny elektrony. Tímto mechanismem se začínají vytvářet korozní důlky. Za současného působení specifického prostředí uvnitř kapsy kolektoru parogenerátoru a působení napětí dochází po čase k porušení materiálu vlivem korozního praskání.

Danému degradačnímu mechanismu napomáhá působení různých tepelných režimů primární a sekundární strany parogenerátoru v kapsách kolektoru v kombinaci s vnášenými teplotními šoky při aktivaci systému periodických odkalů.

Experimentální zkoušení společnosti TsNIITMASH zodpovědné za provádění NDT kontrol prokázalo vznik DSCC trhlin v případech, kdy je povrch kapsy v kontaktu s úsadami korozních prvků obsahující minimálně 10 % CuO.

Mechanismus vzniku úsad obsahující oxid měďnatý je dán chemickým složením vody sekundárního chladicího okruhu v Ruské federaci a Ukrajině. Ocelové slitiny, ze které je vyroben kondenzátor a potrubí napájecí vody obsahují měď, která se do sekundárního okruhu uvolňuje ve formě CuO. Hodnoty oxidů mědi jsou na ruských a ukrajinských elektrárnách o řád vyšší z důvodu použitých materiálů potrubí napájecí vody a kondenzátoru, než je tomu u konstrukčně mladších elektráren v zahraničí, kde jsou pro uvedené komponenty použité korozivzdorné slitiny.

Do nedávné doby byla chemická úprava vody a udržování předepsané pH vody řízeno pomocí Hydrazin hydrátu (H_6N_2O) a amoniaku (NH_4) s následným řízeným spouštěním odtoků kalů v kapsách kolektoru parogenerátoru s průtokem 15-20 t/h. Konstrukční řešení a dosažené průtoky nestačí k odstranění úsad vlivem proudění média. Odstraňování kalů z vnitřních částí parogenerátoru tak zůstávalo hlavním problémem, jak udržet přípustnou rychlost koroze.

Problémy s korozí parogenerátoru znemožňovaly udržovat optimální hodnoty pH a vedly k hledání alternativních aditiv úpravy pH. Bylo proto přistoupeno k náhradě Hydrazinu a amoniaku hydroxidem lithia, morfolínem a ethanolámínem. Taktéž bylo zavedeno pravidelné čištění kapsy speciálním zařízením a byly postupně nahrazeny materiály potrubí napájecích systémů a kondenzátorů trubkami z austenitické oceli.

Nalezená náhradní aditiva spolu s automatizovanou kontrolou chemie přinesla efekt snížení množství vzniklých úsad v kapsách, které na základě provozní dokumentace a požadavků jaderného dozoru začaly být odstraňovány speciálním mycím zařízením během odstávek s šestiletou periodou. Množství úsad z parogenerátoru odstraněných během těchto operací činilo 400-800 kg.

Sledování tepelného zatížení v oblasti kapsy potvrdilo existenci tepelných šoků v případech, kdy systémy odkalu nejsou aktivní. V takovém případě klesá teplota média v kapse parogenerátoru rychlostí 5-10 °C/h. Po aktivaci systému se do oblasti kapes dostává voda o provozní teplotě. V průběhu těchto teplotních cyklů v řádu několika let vznikají mikrotrhliny, které se postupně spojují až vytvoří hlavní trhlinu.

Trhliny vznikají po 20 letech provozu. Nejvýznamnějším faktorem je přítomnost oxidu měďnatého obsaženého v úsadách kapes generátoru. [7]

2.4. Provozní podmínky na jaderné elektrárně Temelín

V letech 2008 byly provedeny endoskopické kontroly prostoru kapes kolektoru parogenerátoru (obr. 11). Byla zjištěna přítomnost usazenin, které způsobily ucpání 5 nátrubků trvalého odkalu z celkového počtu 32 nátrubků. Jednalo se vždy o stranu horkého kolektoru.

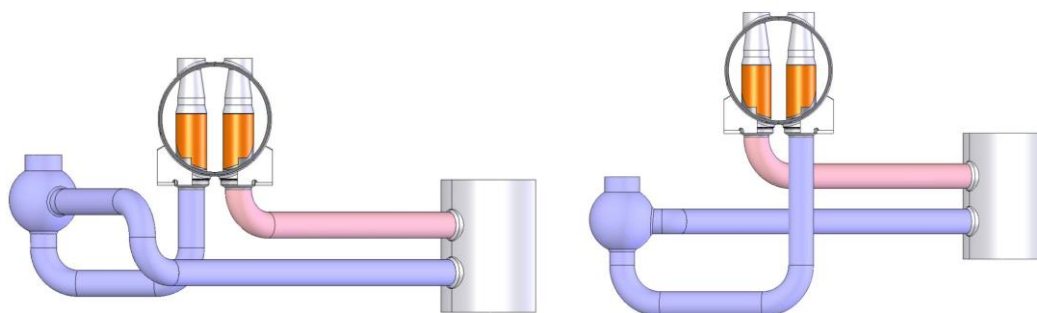


Obr. 11: Usazeniny nalezené během endoskopické kontroly prostoru kapes kolektoru na JE Temelín

Odebrané vzorky usazenin tvořených vodnou zahuštěnou suspenzí a většími částicemi tuhých fází byly podrobeny chemické analýze. Z rozborů je patrné, že fáze jsou tvořeny korozními oxidickými produkty, zejména magnetitem. Chemické složení je uvedeno v tab. 4. Obsah mědi dosahuje hodnoty max. 0,3 %, čímž lze vyloučit mechanismus elektrochemické koroze způsobující poškození důlkovou korozi na elektrárnách v Ruské Federaci a Ukrajině. Úsady na elektrárně Temelín byly v rámci odstávky odstraněny. [8]

Tab. 4: Chemické složení úsad v oblasti kapes kolektoru parogenerátoru JE Temelín [8]

Blok	Fe	Cr	Ni	Cu	Zn	C	Fáze
I.	19,0-98,0	0,2-20,0	1,1-19,0	-	1,5-2,9	0,6-81,0	Hematit
II.	58,0-75,0	8,8	2,8	0,1-0,3	0,1-4,4	6-99,8	magnetit



Obr. 12: Konstrukční provedení hlavního cirkulačního potrubí v Ruské Federaci (vlevo; tzv. malá série) a provedení na elektrárně Temelín (vpravo; tzv. velká série)

Konstrukční uspořádání hlavního cirkulačního potrubí má přímý vliv na velikost působícího napětí v oblasti svaru a kapes parogenerátoru. Vedení horké smyčky hlavního cirkulačního potrubí ke vzdálenějšímu kolektoru parogenerátoru, systém a poloha uložení parogenerátoru pomocí systému GERB nezpůsobuje tak velké namáhání vlivem teplotních dilatací při nájezdu a odstavení reaktoru jako je tomu v případě „malých sérií“ v Ruské federaci a Ukrajině (obr. 12).

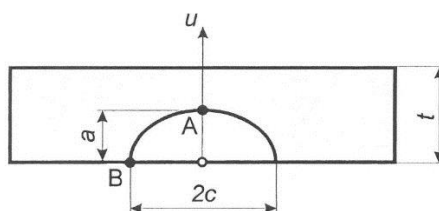
Na svarových spojích kolektoru parogenerátoru 94 a 95 nebyly doposud realizovány opravy. Z tohoto důvodu se na základě zkušeností z Ruské federace nepředpokládá výskyt příčně orientovaných trhlin.

2.5. Kritické velikosti vad

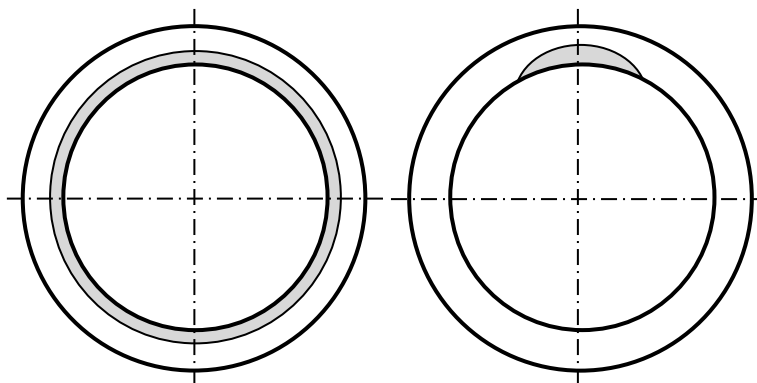
Kritické velikosti vad pro oblast svarového spoje a rádiusu vychází z upřesněných výpočtů ÚAM Brno [3] provedených pružně-plastickým výpočtem metodou konečných prvků. Výstupem uvedené zprávy jsou dílčí rozměry uvažované trhliny: výška trhliny „ a “ a délka trhliny „ $2c$ “ (obr. 13).

Pro stanovení přípustnosti zjištěné trhliny je rozhodující poměr délky a výšky, jak je uvedeno ve výsledcích výpočtů uvedené v tab. 5 pro variantu svarového spoje typu V a v tab. 6 pro variantu svarového spoje v provedení $\frac{1}{2}V$. Pro výpočet je uvažována i kritická výška celoobvodové trhliny. Tato varianta je v tabulkách kritických velikostí označena jako vada s poměrem a/c rovno 0 (obr. 14).

Uvedené výpočty budou použity pro návrh umělých vad do zkušebního kvalifikačního tělesa.



Obr. 13: Modelovaná trhlina a značení charakteristických rozměrů [3]



Obr. 14: Vizualizace trhlin v tělese uvažované pro výpočty: vlevo zobrazení celoobvodové trhliny s poměrem stran $a/c \approx 0$, vpravo zobrazení trhliny s poměrem stran $a/c > 0$ [3]

Tab. 5: Kritické velikosti trhlin pro PG s V svarem [3]

a/c	HORKÝ KOLEKTOR		STUDENÝ KOLEKTOR	
	rádius	Svar	rádius	svar
	a [mm]	a [mm]	a [mm]	a [mm]
0	23,1	14,9	24,5	14,6
0,0625	26,6	16,3	27,0	15,9
0,125	31,7	17,4	30,3	17,0

a/c	HORKÝ KOLEKTOR		STUDENÝ KOLEKTOR	
	rádus	Svar	rádus	svar
	a [mm]	a [mm]	a [mm]	a [mm]
0,25	rádus	Svar	rádus	svar
0,5	a [mm]	a [mm]	a [mm]	a [mm]
1,0	34,1	33,2	40,1	32,2
1,25	38,5	37,3	42,7	36,0
1,5	42,1	42,7	42,7	40,5
1,75	42,7	42,7	42,7	42,7
2,0	42,7	42,7	42,7	42,7

Poznámka: pro celoobvodovou trhlinu použít řádek tabulky s $a/c = 0$

pro trhliny o poměru $a/c > 2$ použít hodnoty z posledního řádku tabulky

Tab. 6: Kritické velikosti trhlín pro PG s půl-V svarem [3]

a/c	HORKÝ KOLEKTOR		STUDENÝ KOLEKTOR	
	rádus	Svar	rádus	svar
	a [mm]	a [mm]	a [mm]	a [mm]
0	19,1	13,7	19,1	13,3
0,0625	20,3	15,1	20,1	14,8
0,125	21,9	16,2	21,4	15,8
0,25	24,5	18,3	23,9	17,8
0,5	29,1	22,2	28,5	21,6
1,0	31,1	28,3	35,0	27,4
1,25	34,8	31,5	39,0	30,5
1,5	38,0	34,5	42,7	33,2
1,75	40,8	37,7	42,7	36,2
2,0	42,7	42,7	42,7	38,6

Poznámka: pro celoobvodovou trhlinu použít řádek tabulky s $a/c = 0$

pro trhliny o poměru $a/c > 2$ použít hodnoty z posledního řádku tabulky

3. Metody nedestruktivních objemových kontrol

Objemové kontroly slouží pro detekci vnitřních vad materiálu. Pro zkoušení svarových spojů lze uvažovat použití následujících vybraných nedestruktivních metod. Jejich jednotlivé výhody, nevýhody a omezení dané techniky zkoušení je rozepsány v následujících kapitolách.

3.1. Radiografická metoda

Na jaderné elektrárně Temelín nejsou radiografické kontroly součástí programu provozních kontrol. Metoda je vhodná pro detekci povrchových i vnitřních vad typu pór, vměstek, studený spoj, neprůvar, vrub v kořeni nebo zápalů dané výrobním předpisem pro provádění kontrol PK 1514-72 [2]. Výhodou dané metody je možnost klasifikace necelistvostí zobrazených na radiogramu. Radiografická kontrola není vhodná pro detekci provozních vad typu trhliny. Technika prozařování neumožňuje hodnotit výšku vady, případně zbytkovou tloušťku základního materiálu z radiogramu. Z pohledu požadavků na detekci a hodnocení provozních vad je radiografická metoda vhodná jako doplňková kontrola k ultrazvukovým kontrolám, kdy lze doplňovat informace o původu nalezených signálů a rozlišovat výrobní a provozní vady komunikující s vnitřním povrchem v kořeni svarového spoje.

Pro případ zkoušení prostoru kapsy kolektoru parogenerátoru je technicky nemožné použití radiografické metody z důvodu požadovaného uspořádání filmu a zářiče/rentgenky. Techniky zkoušení popsané normou pro zkoušení svarových spojů radiografickou metodou by vyžadovaly přístup do prostoru vnitřní části kolektoru parogenerátoru, která je součástí primárního okruhu, nebo do prostoru kapsy, která je přístupná prakticky jen pro průmyslové, dálkově ovládané, miniaturní endoskopy. Prozařování technikou přes dvě stěny takto masivního objektu by nebylo dosaženo dostatečného zčernání pro detekci vad, zejména provozních vad typu trhliny. Potřebné expoziční časy by představovali významný zásah do časového harmonogramu odstávky.

3.2. Metoda magnetické paměti materiálu

Nedestruktivní metoda je založena na měření a analýze rozptylu magnetického pole účinkem provozních nebo zbytkových koncentrací napětí, v místech porušení materiálu nebo v zónách s heterogenitou ve struktuře materiálu. V zónách s napěťovou koncentrací, nebo poškození při zpracování materiálu a jeho chladnutí dochází k nevratným změnám lokálního magnetického stavu. Rozptyl magnetického pole tak odráží historii mikrostrukturních a technologických procesů. [9,10]

V současné době je jediným používaným standardem norma ISO 24497 popisující základní požadavky, kontroly svarových spojů a používané názvosloví [9]. Pro jaderné elektrárny v současné době neexistují závazné předpisy.

Měření se provádí z vnějšího povrchu a lze jej provádět mechanizovaně se záznamem. Lze tak porovnávat s předchozími záznamy. Metodu lze použít u feromagnetických a austenitických ocelí.

Z fyzikálního hlediska pomocí metody nelze stanovit rozměry necelistvostí. Metoda je citlivá na úroveň působícího napětí v okolí necelistvostí zejména v počátečních fázích procesů poškození na úrovni strukturních změn, fázových transformací a mikrotrhlin. Z tohoto důvodu mohou být rozvinuté provozní vady lokalizovány a monitorovány z hlediska rozvoje při provozním zatížení.

Pro stanovení jakosti metody, případně možností stanovení velikostí požadovaných typů vad je nutné provést měření na zkušebních tělesech odpovídající geometrii zkoušené komponenty s realistickými, hledanými necelistvostmi.

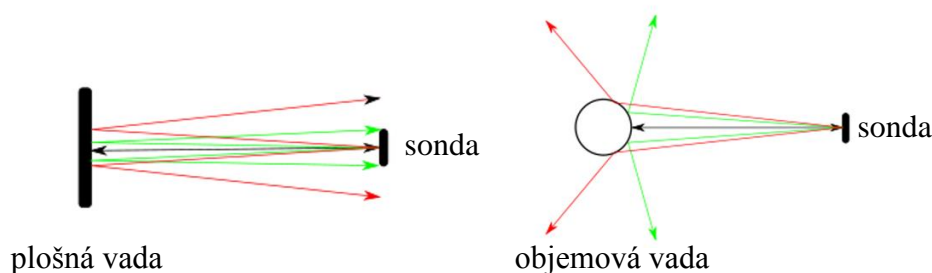
Mezi výhody dané metody patří rychlost a opakovatelnost měření s možností inspekce za provozu zařízení. Potenciálním rizikem z hlediska poklesu citlivosti zkoušení danou

metodou může být proces magnetizace, ke kterému dochází během periodických magnetických kontrol na svarech kolektoru parogenerátoru.

3.3. Ultrazvuková metoda

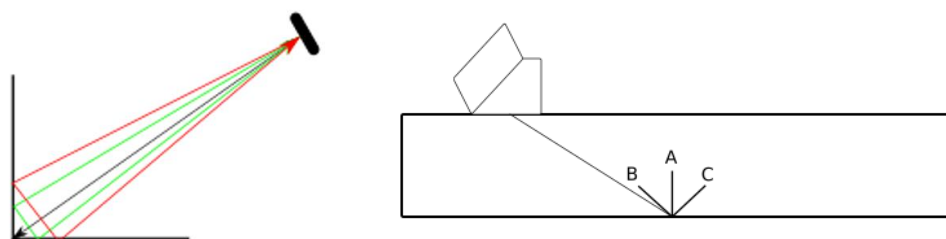
Ultrazvukovou metodu lze použít pro všechny typy materiálů umožňující šíření ultrazvukové vlny. UT umožňuje zkoušení v celém objemu materiálu. Metoda je citlivá na plošné vady (studené spoje, vruby v kořeni, neprůvary a trhliny). Pro registraci objemových vnitřních vad (např. póry, vměstky) je metoda z důvodu velikosti vad nebo její geometrie méně citlivá, protože dochází k odrazu velké části ultrazvukového signálu mimo přijímač ultrazvukové sondy, jak je ilustrováno na obr. 15 vpravo pro případ s ideálními reflektory. Relevantní indikace se od necelistvosti často u bodových indikací posuzuje na základě odstupu signálu od šumu. Při nižších odstupech poměru signál/šum menší než 6 dB není technika zkoušení pro detekci necelistvostí průkazná.

Pokud nejsou pro kontroly využívána kritéria daná standardy, musí být citlivost kontrol ověřována pomocí etalonů a srovnávacích měrek s vytvořenými umělými necelistvostmi (vývrty s plochým dnem, boční vývrty, nebo drážky).



Obr. 15: Odraz ultrazvukového signálu od plošné vady (vlevo) a objemové vady (vpravo)

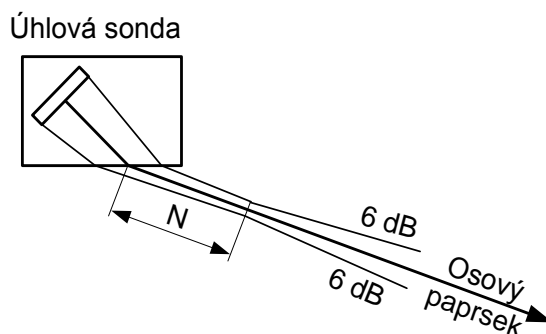
Na detekci plošné vady má velký vliv její náklon a natočení vůči poloze sondy. V případě, kdy je trhlina kolmá na vnitřní povrch kontrolované komponenty (poloha A, obr.16), dochází k rohovému odrazu velkého podílu ultrazvukového signálu zpět do přijímače. Pokud je necelistvost nakloněna směrem k sondě (poloha B, obr. 16), dochází k rohovému odrazu pouze do určité hodnoty náklonu, po jehož překročení se ultrazvukový signál již neodráží zpět do přijímače. Při zkoušení svarových spojů o malých tloušťkách s velkými úhly rozevření svarových ploch se jeví nalezené necelistvosti s tímto náklonem stejně vysoké. Při náklonu necelistvosti směrem od sondy (poloha C, obr. 16) je při kolmém dopadu ultrazvukového svazku získán silný, přímý odraz, ke kterému dochází u vývrty s plochým dnem na referenčních měrkách. V případě vzrůstající odchylky naklonění od této ideální pozice dochází ke ztrátě ultrazvukového signálu zpět do přijímače až do úplného vymizení. Necelistvost s tímto náklonem nemusí být detekována. Z tohoto důvodu je vyžadována kontrola svarových spojů z obou stran.



Obr. 16: Vizualizace rohového odrazu ultrazvukového svazku od reflektoru orientovaného kolmo k povrchu zpět do sondy a vliv náklonu necelistvosti vůči ultrazvukové sondě. Poloha A – necelistvost orientovaná kolmo k vnitřnímu povrchu, poloha B,C – náklon necelistvostí způsobující pokles nebo zesílení získaného ultrazvukového signálu

3.3.1. Odrazová technika Pulse echo (UT-PE)

Sondy pro jednoduchou odrazovou techniku využívají jednoduchého měniče složeného z monolitického piezoelektrického krystalu vysílajícího ultrazvukovou vlnu. Pro zkoušení materiálu se používají jak sondy přímé (jednoměničové, dvouměničové), které se zpravidla používají pro měření tloušťek, korozních úbytků, nebo detekce a hodnocení laminárních vad rovnoběžných s povrchem, tak sondy úhlové pro zkoušení materiálu šikmým ultrazvukovým svazkem viz obr. 17, které se zpravidla používají pro kontroly svarových spojů. Úhlové sondy v technické praxi častěji využívají transformovaných příčných vln. [11]



Obr. 17: Šíření ultrazvukového svazku úhlové sondy [11]

Vlivem rozevření svazku se postupem v materiálu akustická energie zeslabuje. Tato vlastnost se nezahrnuje do útlumu. Poloviční úhel rozevření hlavního svazku $\varphi_{-6\text{ dB}}$ se udává pro pokles výšky echa o 6 dB pomocí vzorce [11]:

$$\sin \varphi_{-6\text{ dB}} = 0,5 \cdot c_L / (f \cdot D_{\text{ef}}) \quad (1)$$

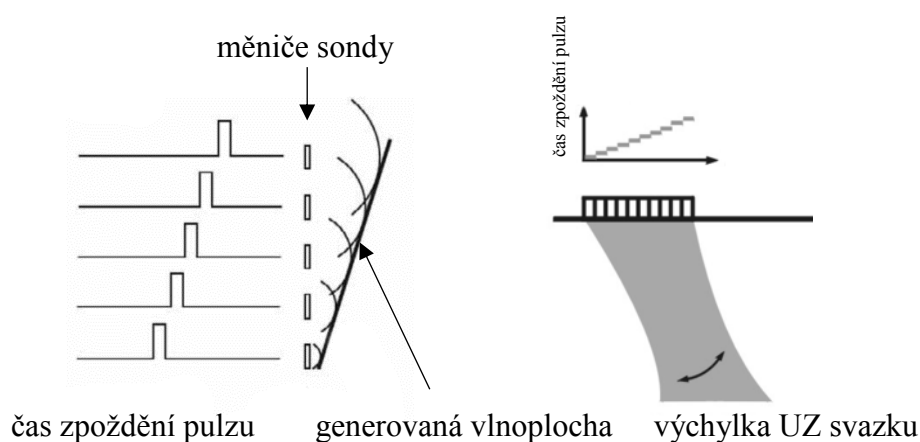
Velikost nalezených vad je na základě předpisů, norem a dalších dokumentů pro ultrazvukové zkoušení a klasifikaci vad hodnocena na základě náhradní velikosti. Tzn., nejedná se o skutečný rozměr vady, ale o náhradní rozměr – průměr plochého dna vývrty orientovaného kolmo ke směru šíření ultrazvukového paprsku, který ve stejné dráze ultrazvukového svazku dosahuje stejné intenzity signálu (výšky echa).

Pro určení náhradní velikosti vady se proto používají srovnávací měrky dané normou ČSN, nebo specifické měrky s uměle vyrobenými vývrty v požadovaných hloubkách.

3.3.2. Ultrazvuková technika Phased array (UT-PA)

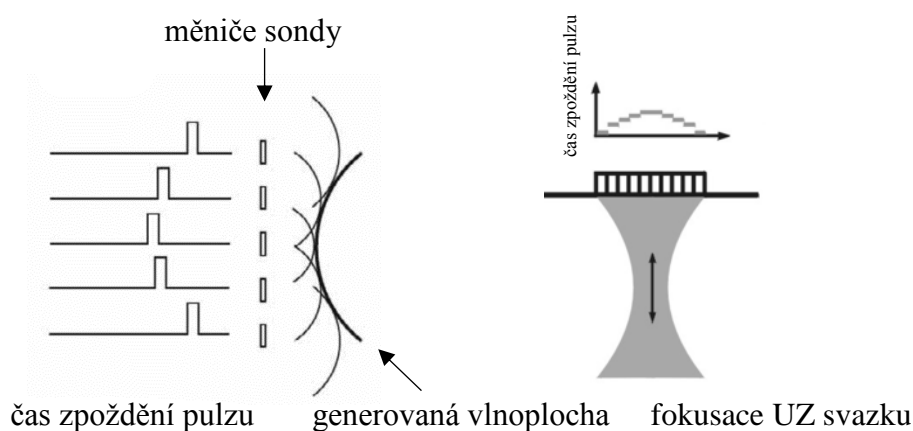
Pro techniku Phased array platí stejné fyzikální principy omezující citlivost kontrolního systému jako při použití techniky UT-PE, od které je metoda odvozena. Phased array využívá měniče složeného z více vzájemně oddělených elementů umístěných v jednom pouzdře. Jednotlivé elementy jsou spouštěny elektronicky s možností časových prodlev v určité sekvenci. Dovolují tak generovat vlnplochy požadovaného směru (obr. 15), tvaru a fokusace (obr. 16). Příjem signálu ze všech elementů je složen do jediného přijatého signálu a ten pak tvoří část výsledného zobrazení. Za pomoci sondy o více elementech lze různým zpožděním jednotlivých elementů docílit [12,13]:

- Elektronicky měnit úhel, pod kterým vstupuje ultrazvukový svazek do materiálu a zvýšit tak pravděpodobnost detekce necelistvostí nepříznivě orientovaných vůči šíření ultrazvukového svazku zpět do sondy.



Obr. 18: Sekvence buzení (časová prodleva) měničů pro generování ultrazvukového svazku pod úhlem [14,15]

- Elektronicky fokusovat ultrazvukový svazek, díky čemuž je možné zvýšit pravděpodobnost detekce, polohu a tvar indikace v kontrolované oblasti. Je dobrým nástrojem pro možnost dosažení lepšího poměru odstupu signálu od šumu.



Obr. 19: Sekvence buzení (časová prodleva) měničů pro generování fokusovaného ultrazvukového svazku [14, 15]

Phased array sondy se používají v kombinaci se zvolenou předsádkou v závislosti na konkrétním použití. Předsádka určuje, jaký typ vln bude procházet do zkoušeného materiálu a v jakém rozmezí úhlů je kontrolu možné provádět [13,16].

3.3.3. Výhody použití UT-PA techniky

Ačkoliv pořizovací cena přístrojů a softwarového vybavení pro techniku UT-PA je násobně větší a přináší vyšší nároky na zaškolení a zkušenosti personálu z hlediska ovládání přístroje a hodnocení naměřených dat ve specializovaném softwaru, má její použití v oblasti jaderné energetiky nesporné výhody:

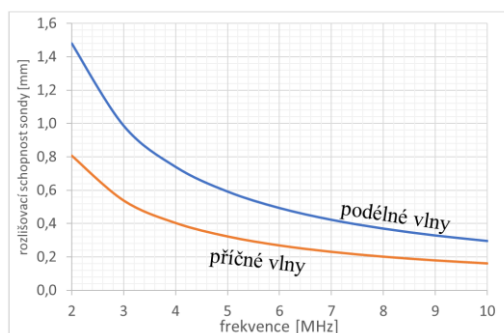
- Kontrolu je možné provádět velkým počtem úhlů současně. To umožňuje měřit pouze jednou sondou bez nutnosti výměny sond s různými úhly skenování.
- Při zkoušení s omezeným pohybem (přítomnost koruny svaru, omezení pohybu sondy od svaru) je možnost z jediného místa skenovat celý, požadovaný objem materiálu.
- Oproti technice UT-PE je dosahováno větší citlivosti systému na základě získání více informací o zkoušené komponentě s obsáhlými možnostmi analýzy dat ve specializovaných softwarech (Olympus: Tomoview, Zetec: Ultravision).
- Možnost pořízení datového záznamu z kontroly umožňuje porovnávat výsledky periodických kontrol a lépe tak hodnotit životnost komponenty. Provozovatel zařízení se zavázal Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost, že bude přednostně provádět zkoušení komponent pomocí NDT metod umožňujících pořízení záznamu zkoušení. Podnětem tohoto závazku byl ruský předpis NP-8415, který požaduje provádění provozních kontrol přednostně technikami se záznamem (technika Phased array, metoda vířivých proudů).
- Fokusační paprsku můžeme dosáhnout většího odstupu signálu od šumu. [12,13,16]

3.3.4. Volba parametru ultrazvukových sond

Volba ultrazvukové sondy vychází z fyzikálních zákonitostí a následujících základních parametrů ovlivňující aplikaci použití.

3.3.4.1. Frekvence sondy

Volba frekvence sondy udává základní rozlišovací schopnost sondy pro nejmenší detekovatelný rozměr nečistosti. Rozlišovací schopnost sondy je dána hodnotou poloviny vlnové délky λ (rychlost šíření ultrazvukové vlny v materiálu / frekvence ultrazvukové sondy), která roste se zvyšující se frekvencí sondy (graf 1).



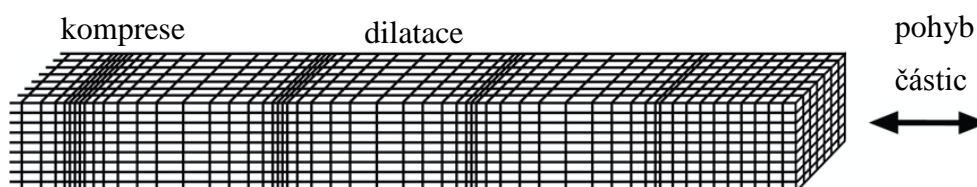
Graf 1: Závislost frekvence sondy na rozlišovací schopnosti – teoretická nejmenší detekovatelná vada.

Se vzrůstající frekvencí sondy se však zvyšuje útlum ultrazvukového signálu při průchodu materiálem. Pro materiály s vysokým útlumem proto volíme sondy s nízkou frekvencí (1-2.5 MHz), aby bylo možné docílit prozvučení požadovaného kontrolovaného objemu. Naopak pro materiály s nízkým útlumem je možné volit sondy s vyšší frekvencí (5MHz a vyšší).

3.3.4.2. Typ ultrazvukové vlny

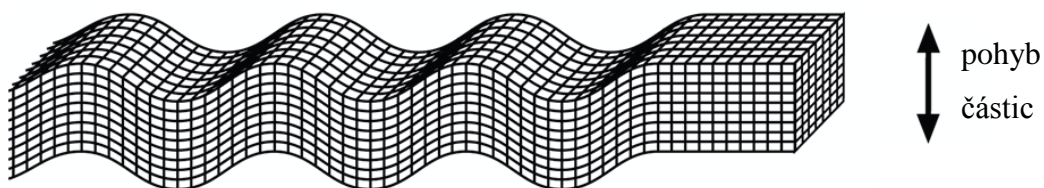
Rozlišujeme tři základní typy mechanického vlnění v závislosti na směru výchylky kmitání jednotlivých částic a rychlosti, s jakou se v materiálu šíří. Volba typu vln pro zkoušení lze volit na základě následujících obecných pravidel:

- Podélné vlny jsou vhodné pro zkoušení materiálu s vysokým útlumem. Částice se prostředím pohybují ve směru šíření. Dochází ke kompresi a dilataci prostředí (obr. 20). Tyto vlny se nejčastěji používají se spojení s dvojitými sondami pro detekci vad. Nevýhodou podélných vln je jejich relativně malá citlivost daná vlnovou délkou a transformace vln, ke kterým dochází v materiálu na vlny příčné, které následně mohou způsobit problémy při hodnocení a působit jako rušivá echa.



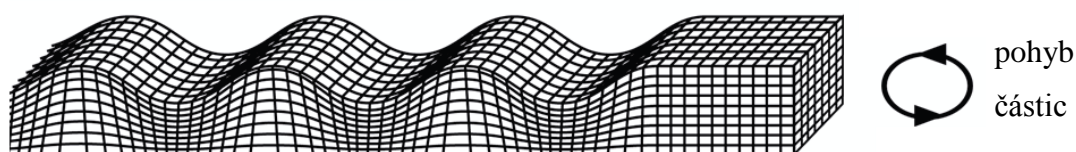
Obr. 20: Šíření podélných vln v prostředí [17]

- Příčné vlny se šíří pouze v pevných látkách. Částice kmitají v kolmém směru šíření vlnění (obr. 21). Rychlost šíření v materiálu je nižší než u podélných vln. Díky kratší vlnové délce mají vyšší rozlišovací schopnost a tím větší citlivost na detekci malých nečistot. Nejsou vhodné pro materiály s vysokým útlumem.



Obr. 21: Šíření příčných vln v prostředí [17]

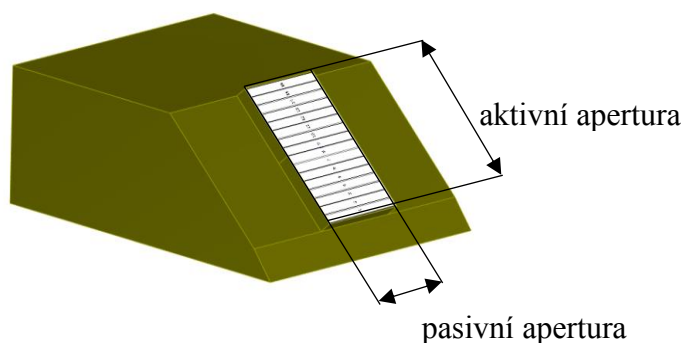
- Povrchové vlny se používají pro detekci nečistot komunikujících s vnějším povrchem potrubí (obr. 22). Lze používat i na relativně velké vzdálenosti, avšak metoda je citlivá na jakoukoliv změnu geometrie nebo nečistoty nacházející se na zkoušeném povrchu a utlumení dalším procházejícím signálem.



Obr. 22: Šíření povrchových Rayleyho vln v prostředí [17]

3.3.4.3. Rozměry měniče / elementu sondy

Rozměr měniče má vliv na délku blízkého pole a na velikost rozevření ultrazvukového svazku. U sond Phased array je měnič složen z dílčích elementů. Pokud budeme uvažovat nejběžnější uspořádání elementů v jedné řadě – tzv. 1D pole, hovoříme o tzv. aktivní a pasivní apertuře. Aktivní apertura je dána součtem šířek jednotlivých elementů umístěných nad sebou. Délka měničů uspořádaných nad sebou představuje pasivní aperturu (obr. 23). Rozměr aktivní apertury můžeme vypínáním jednotlivých elementů v nastavení ultrazvukového přístroje měnit. Obecně však platí, že větší počet aktivních elementů zajišťuje lepší směrové vlastnosti a fokusační schopnosti sondy. Se snižující se velikostí elementů Phased array sond rostou možnosti směřování ultrazvukového svazku, snižuje se vzdálenost blízkého pole, ale logicky pokrýváme menší oblast zkoušení. Délka měniče Phased array je v případě sériových Phased array sond volena výrobcem na základě použité frekvence, případně podle rozsahu fokusace sondy. V případě návrhu specifické sondy způsobuje nevhodná délka elementů vznik parazitních ech – laloků [12].



Obr. 23: Rozměry měniče Phased array sondy s vizualizací předsádky

3.3.4.4. Blízké a vzdálené pole

Na obr. 17 je vizualizována oblast blízkého pole N. Jedná se o oblast šíření ultrazvukových vln, kde je ultrazvukový svazek šířící se ze sondy nejužší a akustický tlak zde dosahuje svého maxima. Mluvíme o tzv. fokusační vzdálenosti, která je délkou blízkého pole N omezena. V této oblasti dosahujeme největší citlivosti sondy [11].

Za oblastí blízkého pole vzniká oblast vzdáleného pole, kde vlivem rozevření svazku postupují ultrazvukové vlny stále větším objemem materiálu a dochází k poklesu (zeslabení) akustické energie. Rozevření ultrazvukového svazku a zeslabování akustické energie se vzdáleností od sondy není považována za útlum způsobený absorpcí a rozptylem v kapitole 3.3.4.6. Základní vzorec pro výpočet blízkého pole pro kruhové měniče představuje rovnice (2). V případě měniče obdélníkového tvaru, lze s dostatečnou přesností použít rovnici (3). [11,12]

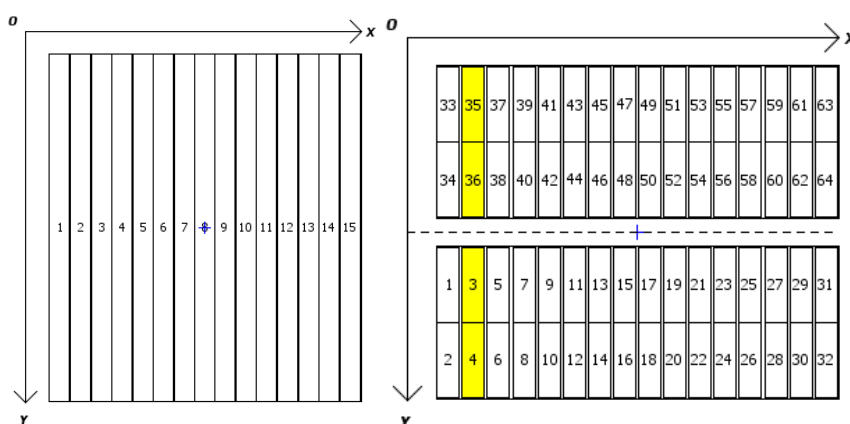
$$N = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot c} \quad (2)$$

$$N_0 \approx \frac{0,25 \cdot A^2 \cdot f}{c} \quad (3)$$

- kde: f – frekvence [MHz]
 c – rychlost šíření ultrazvuku v materiálu [km/s]
 D – efektivní průměr měniče [mm]
 A – rozměr aktivní apertury [mm]

3.3.4.5. Uspořádání měniče 1D a 2D phased array

V zásadě lze hovořit o tvaru a uspořádání jednotlivých elementů měniče tak, aby bylo možno generovat požadovaný tvar ultrazvukového svazku. Nejdůležitějšími typy se jeví elementy měničů uspořádaných do 1D a 2D pole. 1D pole tvoří jednu řadu měničů, jak je popsáno v předchozí kapitole 3.3.4.3 a zobrazeno na obr. 24, vlevo. Fokuse paprsku je umožněna v jedné ose. U 2D typu pole (obr. 24, vpravo) je možné docílit náklonu ultrazvukového svazku ve více osách a je možné fokusovat do jednoho bodu. Práce se sondami s uspořádáním měničů do 2D pole vyžaduje pokročilé, moderní, měřicí zařízení a software, které přináší vysoké pořizovací náklady v řádech milionů korun [12,16].



Obr. 24: Uspořádání měniče do 1D pole (vlevo) a 2D pole (vpravo). Souřadnice x reprezentuje aktivní aperturu, souřadnice y aperturu pasivní

3.3.4.6. Útlum ultrazvukového pole

Jedním ze zásadních parametrů ovlivňující citlivost zkoušení je útlum. Ten je dělen na absorpci a rozptyl. Zatímco absorbce představuje pokles akustického tlaku vlivem přeměny energie zvuku na teplo a lze ji eliminovat zvětšením vysílacího výkonu (zesílením), rozptyl je závislý na stavu struktury materiálu, který významně ovlivňuje další pokles akustického tlaku a tím i odezvy od případné necelistvosti a zároveň zvýšení hodnoty rušivého pozadí (šumu), kde se mohou ztrácet signály od necelistvostí [12]. Běžné feritické materiály použité na jaderné elektrárně mají útlum v rozmezí 20-40 dB/m. Vztah pro výpočet útlumu je určen následujícím vzorcem:

$$\kappa = (\Delta V - \Delta V_S) / (2 \cdot t) \quad (4)$$

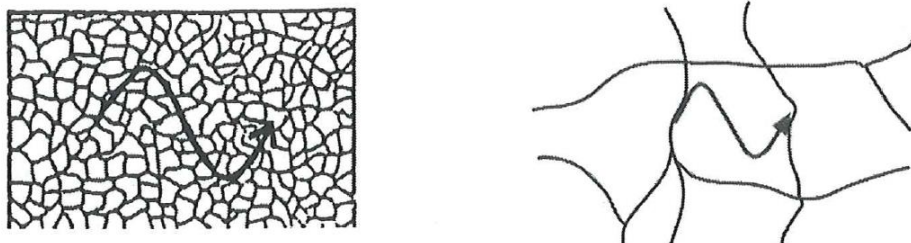
kde:

ΔV – decibelový rozdíl 1 a 2 KE

ΔV_S – 6 dB pro tloušťku $t \geq 3N$

3.3.4.7. Vliv struktury materiálu

Strukturou materiálu zde rozumíme velikost zrna, resp. jejich hranic, kde u hrubozrnné struktury dochází k rozptylu ultrazvukového svazku na hranici zrn (obr. 25). Významným ovlivňujícím parametrem je zde vlnová délka, která vychází ze zvolené frekvence sondy. S vyšší frekvencí dochází k většímu útlumu ultrazvukového svazku v materiálu. Další rozptyly mohou způsobovat odrazy od malých nečistostí a nespojitostí v materiálu.



Obr. 25: Útlum ultrazvukového signálu způsobený rozptylem
a) žádný prokazatelný rozptyl, b) rozptyl např. odrazem a lomem na hranici zrn

4. Využití simulací ultrazvukového zkoušení při ověřování citlivosti NDT systému

Simulace se provádějí za účelem stanovení optimálních parametrů zkoušení pro vybranou aplikaci. Správné interpretování výsledků simulace nedestruktivních kontrol by mělo zajistit nalezení hledaných nečistostí při splnění všech kritérií kladených na danou NDT metodu.

Dalším uplatnění simulací NDT lze nalézt při procesu vyhodnocování reálných výsledků zkoušení, kdy analýza výsledků ze simulace umožňuje pochopit probíhající jevy a snáze interpretovat výsledky reálného zkoušení. Hlavní důvod využívání softwaru v procesu kvalifikace je popis pravděpodobnosti detekce a odchylky určení rozměru nečistostí, které nelze prokázat pomocí laboratorních zkoušek. Ekonomické a technologické aspekty nedovolují, aby ve zkušebních tělesech byly vyrobeny vady všech uvažovaných geometrií, tvarů a poloh, které se mohou vyskytovat v reálných situacích.

Pro simulaci ultrazvukové nedestruktivní zkoušky svarového spoje je použit software CIVA verze 2017 vyvinutý společností CEA (Francie). Simulační software umožňuje modelování nedestruktivního zkoušení ultrazvukem, vířivými proudy a prozařováním. Pro každou vyjmenovanou oblast nedestruktivního zkoušení je vyvinut samostatný modul z důvodu zajištění jednoduchého definování vstupních parametrů zkoušení a interpretace výsledků simulace.

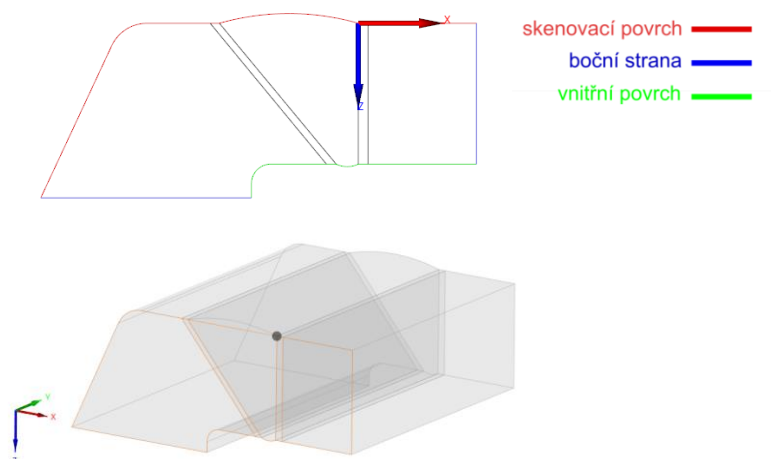
Modul zkoušení ultrazvukovou technikou je rozdělen do dvou módů: Beam Computation a Defekt response. Modul Beam Computation slouží pro výpočet a zobrazení šíření ultrazvukového pole v zadaném zkoušeném tělese. Tímto modulem lze ověřit vhodnost ultrazvukové sondy z hlediska základních fyzikálních parametrů jak katalogových ultrazvukových sond z portfolia výrobce, tak návrhu vlastní, specifické sondy před zadáním do výroby. Mód Defekt response je následně zaměřen na konkrétní výpočet ultrazvukové odezvy od modelovaných nečistostí při simulovaném pohybu sondy na zkušebním tělese.

Úspěšné provedení simulace vyžaduje zadání fyzikálních a rozměrových parametrů sond, přesného nastavení geometrie zkoušeného tělesa a jejich materiálu zejména v případě zkoušení heterogenních svarových spojů a samotných hledaných nečistostí.

4.1. Obecný postup simulace kontroly

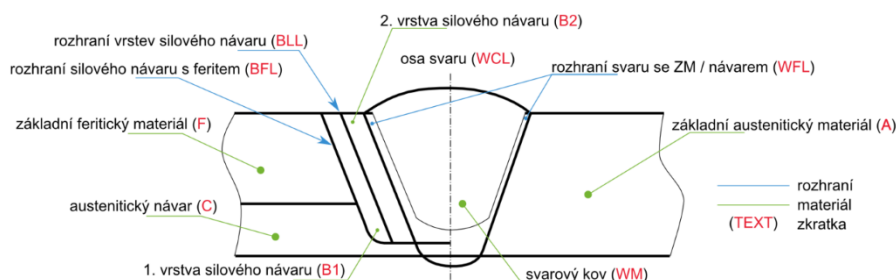
Virtuální těleso zkoušené oblasti (komponenty) je možné vytvořit v programu CIVA několika způsoby. Pomocí předdefinovaných komponent se zadáním požadovaných rozměrů součásti (rovinná deska, potrubí bez svaru, koleno atd.) nebo v případě specifické komponenty vložení 2D nebo 3D výkresu ve formátu CAD. Z 2D výkresů lze generovat 3D modely komponent pomocí funkce „vytažení“ nebo pomocí nástroje rotace vztažené k referenční ose. Funkci vytažení lze použít i u komponent typu potrubí, kde má vliv zakřivení povrchu vzhledem k velkému průměru zanedbatelný vliv na výsledek zkoušky. Modely získané funkcí rotace používáme u těles malých průměrů, kde vzniká požadavek na zakřivení předsádky sondy a kontaktní plocha silně ovlivňuje charakter odezvy ultrazvukového signálu. 3D modely využíváme u komponent, kde se v průběhu pohybu sondy mění geometrie průřezu. Příkladem mohou být stromečkové závěsy lopatek turbín, nebo zkoušení koutových svarů nátrubků tlakových nádob.

Při použití 2D CAD výkresu musí být barevně označeny jednotlivé entity povrchu součásti. CIVA rozlišuje zkoušený, protilehlý a boční povrch tělesa. Jak je z obr. 26 patrné, červeně je označen povrch, ze kterého je realizováno zkoušení. Boční povrch má tu funkci, že neodráží ultrazvukový svazek zpět do součásti. Dalším krokem je určení souřadnicového systému, který je v případě importu z CAD výkresu zachován. [18]



Obr. 26: CAD výkres rovinné součásti s barevným rozlišením jednotlivých entit a jeho zobrazení v programu CIVA

Kromě základní geometrie kontrolované oblasti je možné v programu CIVA definovat oblasti o různých vlastnostech materiálů vlastním zadáním příslušných parametrů, nebo výběrem z databáze a zpřesnit tak výsledek simulace. Toho se využívá především při modelování heterogenních svarových spojů. V 2D profilu tělesa jsou určena rozhraní, která vymezují definované geometrické a materiálové oblasti (svarový materiál, návar, základní materiál; viz obr. 27). [18]

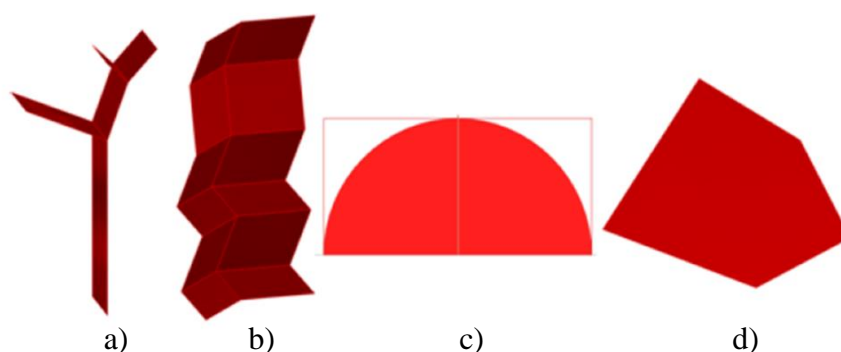


Obr. 27: Označení různých částí svaru používaných k popisu svaru a jejich zkratky [18]

4.2. Modelování necelistvostí

Podobně jako v případě vytváření 3D modelu zkoušené oblasti obsahuje software CIVIA několik předdefinovaných parametrizovaných tvarů necelistvostí (boční vývrt, vývrt s plochým dnem, obdélníková nebo poloeliptická necelistvost, kulová objemová necelistvost a další). U uvedených necelistvostí (obr. 28) můžeme editovat jejich délku, výšku/průměr, sklon, natočení a vzdálenost od vnějšího okraje (ligament) v případě vady nekomunikující s vnějším povrchem součásti. V případě objemových necelistvostí lze nastavit materiál vyplňující objem necelistvosti.

Pokročilými možnostmi lze za pomoci importování geometrie nebo skládáním elementárních tvarů vytvořit modely necelistvostí podobné reálným trhlinám, které simulují únavové trhliny s možností větvení do různých směrů. [18]

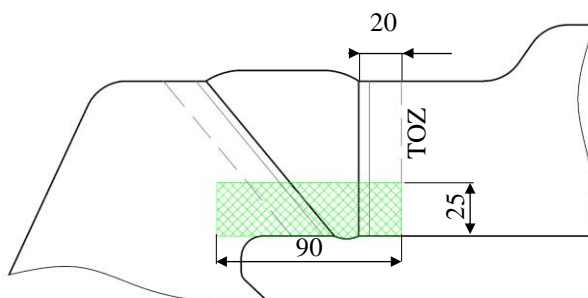


Obr. 28: Možné podoby simulovaných necelistvostí v softwaru CIVIA
a) větvená necelistvost, b) lomená necelistvost, c) poloeliptická necelistvost, d) planární 2D necelistvost

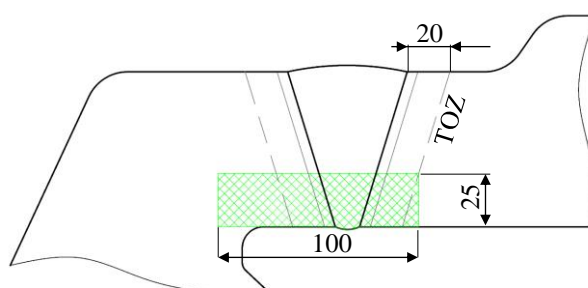
5. Stanovení rozsahu kontroly na základě znalosti degradačního mechanismu

Na základě znalosti geometrie svarového spoje (obr. 2 a 3) a míst působení degradačního mechanismu je na obr. 29 pro svarový spoj typu $\frac{1}{2}V$ a na obr. 30 pro svarový spoj typu V navržen požadovaný rozsah ultrazvukových kontrol. Výška zvolené zkušební oblasti představuje hodnotu $\frac{1}{3}$ jmenovité tloušťky stěny kolektoru (25 mm). Poloha zvolené oblasti zkoušení zahrnuje oblast svaru, rozhraní svarového kovu, tepelně ovlivněné zóny (20 mm na každou stranu) a oblast rádiusu R10. Stanovený rozsah ultrazvukového zkoušení je zaměřen na detekci trhlin nacházející se ve svarovém spoji v oblasti kořene svaru a v oblasti základního materiálu na vnitřním povrchu kapsy v oblasti rádiusu R10.

Pro stanovení výšky trhlin musí být uvažován celý objem, aby byla jistota, že necelistvosti větší než 1/3 tloušťky stěny kolektoru budou určeny správně.



Obr. 29: Rozsah ultrazukového zkoušení svarového spoje typu $\frac{1}{2}$ V zaměřených na detekci trhlin

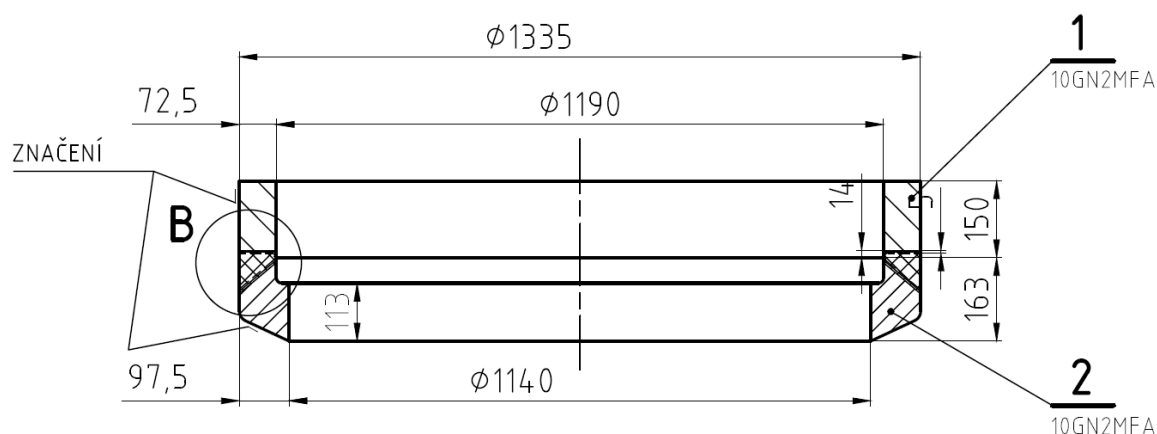


Obr. 30: Rozsah ultrazukového zkoušení svarového spoje typu V zaměřených na detekci trhlin

6. Návrh zkušební tělesa

Zkušební těleso je navrženo a vyrobeno na základě průvodní technické dokumentace výrobce parogenerátoru Vítkovice. Cílem dodržení technologických postupů je snaha zajistit identické podmínky pro šíření ultrazvuku uvnitř materiálu tělesa. V konečném důsledku jsou tak při analýze a hodnocení dat ze zkušební tělesa přítomny stejné rušivé vlivy a faktory (útlum materiálu, zvýšený šum v oblastech návarů svarového spoje nebo přítomnost geometrických ech) jako na reálném kolektoru parogenerátoru.

Pro potřeby kvalifikace kontroly bylo zkušební těleso vyrobeno svařením dvou prstenců (pozice 1 a 2 na obr. 31) ve společnosti Vítkovice Power Engineering. Optimalizace rozměrů tělesa proběhla na základě znalosti prostorových omezení po přiložení ultrazukové sondy a požadavků na dodržení prozvučeného objemu.



Obr. 31: Zkušební těleso kontrol svaru kolektoru parogenerátoru

6.1. Umělé necelistvosti ve zkušebním tělese

Návrh necelistvostí do zkušebního tělesa byl proveden na základě podkladů kritických velikostí necelistvostí typu trhliny provedených v ÚAM Brno [3] a je taktéž proveden v souladu s metodologickými doporučeními postupy ENIQ [19,20] pro návrh zkušebních těles a distribuci umělých necelistvostí.

Do tělesa bylo navrženo 13 ks umělých necelistvostí uvedených v tab. 7 a 8. 7 ks necelistvostí je umístěno v oblasti kořene svarového spoje a 6 ks necelistvostí do oblasti rádiusového přechodu.

Kromě rozměrů jsou u navržených necelistvostí variovány úhly natočení necelistvostí. Výkresy zkušebního tělesa s jiskřenými necelistvostmi jsou uvedeny v příloze I.

V tělese v oblasti rádiusu se dále nachází 4 necelistvosti typu realistická trhlina, které byly vyrobeny lokálním, tepelně cyklickým zatížením. U dvou necelistvostí došlo v procesu výroby ke vzniku sekundárních trhlin, které neodpovídají reálnému poškození v kapsách kolektoru parogenerátoru a nebudou do procesu hodnocení zahrnuty.

Realistická necelistvost je záměrně vložená necelistvost do kvalifikačního tělesa, jejíž odezva na použitou nedestruktivní metodu se podobá odezvě reálné necelistvosti.

Jiskření necelistvostí bylo provedeno v jedné polovině zkušebního tělesa pro účely kvalifikace NDT systému. Druhá polovina zkušebního tělesa je určena pro budoucí výrobu necelistvostí, které budou sloužit účelům personální kvalifikace.

Do návrhu necelistvostí nebyly uvažovány vady v axiálním směru vůči ose svarového spoje. Důvodem je výskyt těchto necelistvostí až po opravách kolektoru parogenerátoru v Ruské Federaci a na Ukrajině.

Tab. 7: Návrh distribuce umělých necelistvostí ve zkušebním tělese pro otevřené testy v oblasti rozhraní svaru a nátrubku kolektoru

Označení	Typ	Výška* [mm]	Délka [mm]	Obvodová poloha [°]	Pozice**	Úhel natočení*** [°]
D1	SE	2,5	12,0	70	0 (+N-ZM)	0
D21	SE	30,7	61,4	78	0 (+N-ZM)	5
D3	SE	9,0	45,2	7	0 (+N-ZM)	0
D4	SE	15,3	61,2	17	0 (+N-ZM)	10
D5	PISC	5,0	22,0	99	0 (-N-ZM)	-40
D6	SE	8,0	32,0	27	0 (-N-ZM)	-40
D10	SE	14,5	60,0	36	0 (-N-ZM)	-35

Tab. 8: Návrh distribuce umělých necelistvostí ve zkušebním tělese pro otevřené testy v oblasti rádiusu

Označení	Typ	Výška* [mm]	Délka [mm]	Obvodová poloha [°]	Pozice**	Úhel natočení*** [°]
R12	SE	8,0	32,0	46	0 (R)	0
R13	SE	18,1	36,8	54	0 (R)	0
R14	SE	12,0	48,0	63	0 (R)	0
R15	SE	5,0	20,0	106	0 (R)	0
R17	SE	28,5	75,4	89	0 (R)	10
R18	SE	3,0	25,0	113	0 (R)	0
C1	reálná trhlina	2,8	15,8	124	0 (R)	0
C2	reálná trhlina	4,1	16,5	129	0 (R)	0

Vysvětlující poznámky k tabulkám:

* Výška – rozměr ve směru kolmém k povrchu (paralelní rozměr s osou svaru)

** Vzdálenost necelistvosti od rozhraní návar – základním materiál – označeno (\pm N-ZM), poloha v rádiusu – označeno (R)

*** Úhel natočení od osy svaru (náklon směrem do nátrubku DN1200 (na výkrese v příloze 1 vpravo od osy (0°)) je hodnota „-“; náklon směrem ke kolektoru (na výkrese vlevo od osy) je označen „+“)

oblast „+N-ZM“ = rozhraní návar – základní materiál nátrubku DN1200 (na výkrese v příloze 1 vpravo od svaru)

oblast „-N-ZM“ = rozhraní návar – základní materiál kolektoru PG (na výkrese v příloze 1 vlevo od svaru)

0 (R) = počátek rádiusu ze strany svaru (nátrubku DN 1200 s kolektorem)

7. Návrh a popis NDT systému

NDT systém se skládá ze zkušebního zařízení sloužícího pro sběr a ukládání naměřených dat, propojovacích kabelů a propojovacích konektorů, ultrazvukové sondy s předsádkou, snímače polohy a manipulátoru pro uchycení a vedení sondy.

7.1. Technika

Na základě požadavků kladených na zkoušení (přístupnost, rozsah objemu zkoušení, záznam naměřených dat, stanovení velikosti necelistvosti) je voleno mechanizované zkoušení pomocí techniky Phased array.

7.2. Zařízení

Pro danou aplikaci je zvoleno zařízení společnosti ZETEC – TOPAZ 32 (obr. 32). Uvedený ruční přístroj disponuje 32/128PR modulem. Tento popis udává maximální počet elementů, které mohou být v jednom cyklu aktivní, tzn. počet vysílacích elementů tvořících aperturu (32) a maximální počet elementů, které mohou přijímat ultrazvukový signál (128). Značení PR označuje modul schopný pracovat s dvojitými Phased array sondami, kdy lze oddělit elementy pro vysílání a příjem ultrazvukového signálu. Defektoskop je vhodný pro manuální, semi-automatizovanou i automatizovanou kontrolu. Defektoskop disponuje vysokým dynamickým rozsahem skenovaných dat díky 16-bit A/D převodníku. Možnost úpravy zesílení signálu až v rozsahu 800% FSH (výšky získaného echa na obrazovce) snižuje pravděpodobnost provádění opakovaných kontrol z důvodu saturace signálu během získávání dat (viz kapitola 7.2.1). Přístroj je ovládán přímo přes dotykový displej a rozhraní Ultravision touch 3.8R30 instalovaném v přístroji, nebo přes připojený notebook s instalovaným software Ultravision. Podrobnější parametry zařízení jsou uvedeny na stránkách výrobce Zetec.

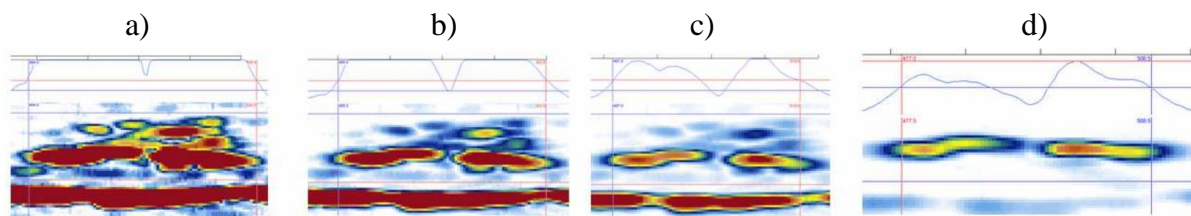


Obr. 32: Zařízení pro snímání a ukládání dat Zetec Topaz 32

7.2.1. Saturace ultrazvukového signálu

Saturace je negativní jev, který nastává zejména v případech snímání slabých signálů vyžadující větší zesílení. Při takovém nastavení jsou větší nebo vhodněji natočené

necelestvosti zachyceny se silnou odezvou a hrozí saturace signálu (záznam signálu z amplitudou přesahující 100% obrazovky). V těchto případech, při hodnocení saturovaných dat, nelze snížit úroveň signálu pod 100% obrazovky pro stanovení délky nebo výšky indikace. V případě analýzy saturovaných dat dochází k nadhodnocení rozměrů indikace. Příkladem je nadhodnocení délky indikace (obr. 33), kdy saturace dat neumožňuje korektně stanovit délku pomocí poklesu 6 dB. [21]



Obr. 33: Příklad hodnocení délky indikace s různým zesílením signálu nad referenční úroveň a stupněm saturace a) zesílení +14dB, stanovená délka 41 mm, b) zesílení +6dB, stanovená délka 37 mm, c) bez zesílení, stanovená délka 32,6 mm, d) zesílení signálu -2 dB, stanovená délka 31,5 mm [21]

7.3. Sondy a použité předsádky

Ultrazvukové sondy (typ vlny, frekvence, velikost měniče a použitý úhel) jsou voleny s ohledem na potřebnou citlivost kontrolního systému a materiál zkoušené komponenty (materiálová struktura). Uvedené parametry sondy (tab. 9) jsou na sobě navzájem závislé a musí být přihlédnuto k omezujícím faktorům, kterými jsou geometrie zkoušené součásti a prostorová omezení.

Pro zkoušení oblasti svarového spoje a oblasti rádiusu R10 byla primárně zvolena sonda 13EM-01. Vzhledem k rozměrům předsádky je možné tuto sondu přiložit na povrch 1 a 3. Tato sonda generující podélné vlny byla zvolena z důvodu možnosti fokusace sondy do libovolné hloubky (výhoda uspořádání měniče do 2D pole, kapitola 3.3.4.5) a z důvodu úhlového rozsahu, které podélné vlny umožňují generovat (obr. 44 a 45). Podélné vlny jsou zároveň méně náchylné ke změně šíření ultrazvukového svazku v případě průchodu přes silový návar.

Pro zkoušení z povrchu 2, kam nelze z prostorových důvodů přiložit sondu 13EM-01 byl proveden výběr sondy příčných vln na základě její velikosti. Velikost sondy (měniče) je navržena v závislosti na požadované fokusační vzdálenosti do oblastí kořene svaru – přibližně 100 mm při uvažování prozvučování úhlem 45° a v závislosti na použité frekvenci. Do vztahu (3) pro výpočet blízkého pole N dosadíme požadovanou hodnotu blízkého pole N a vyjádříme rozměr aktivní apertury sondy A pro zvolené frekvence.

$$A_{2MHz} \approx \sqrt{\frac{N_0 \cdot c}{0,25 \cdot f}} = \sqrt{\frac{100 \cdot 3,2}{0,25 \cdot 2}} = 25,3 \text{ mm}$$

$$A_{5MHz} \approx \sqrt{\frac{N_0 \cdot c}{0,25 \cdot f}} = \sqrt{\frac{100 \cdot 3,2}{0,25 \cdot 5}} = 16,0 \text{ mm}$$

kde: f – frekvence [MHz]

c – rychlost šíření ultrazvuku v materiálu [km/s]

N_0 – požadovaná vzdálenost blízkého pole [mm]

Byly vypočteny hodnoty aktivní apertury pro sondu o frekvenci 2 MHz rovnající se 25,3 mm a pro sondu o frekvenci 5 MHz rovnající se 16,0 mm. Na základě znalosti požadované velikosti aktivní apertury pro dosažení nejvyšší citlivosti zkoušení v požadované vzdálenosti provedeme výběr z katalogu sériově vyráběných sond společnosti Olympus [22]. Požadovaným velikostem měniče odpovídají sondy příčných vln 2.25L32-A32 s předsádkou SA32-N55S a 5L32-A31 s předsádkou SA31-N55S. Uvedené klíny mají kontaktní plochu o rozměrech (délka x šířka) 62x30 mm a 49x30 mm.

Je patrné, že pro dosažení vysoké citlivosti zkoušení je nutné volit rozměrově velké sondy, které jsou z důvodu přítomnosti koruny svaru na kolektoru parogenerátoru nepoužitelné a musí být přistoupeno ke kompromisu mezi velikostí měniče sondy, resp. předsádky a citlivostí kontroly.

Na základě výše popsaného jsou pro zkoušení navrženy sondy Olympus 2L16-A1 a Olympus 5L-16A1 s předsádkou SA1-N45S o rozměrech kontaktní plochy 30x40 mm. U těchto sond je blízké pole N rovno 22,5 mm (sonda 2L16-A1) a 36,0 mm (sonda 5L-16A1). Parametry sond a předsádek jsou uvedeny v tab. 9.

Teoretická rozlišovací schopnost sond dosahuje dle grafu 1 hodnoty 0,3 mm pro zkoušení s 5 MHz sondou a 0,8 mm pro zkoušení se sondou o frekvenci 2 MHz.

Zkoušení sondami 2L16-A1 a 5L16-A1 z povrchu 3 (obr. 40) není možné realizovat z důvodu nutnosti většího odstupů od koruny svarového spoje, které by bylo nutné pro pokrytí zkoušeného objemu (obr. 29 a 30) ultrazvukovým svazkem 30-75°. Většímu odstupů brání prostorové omezení v reálných podmínkách.

Tab. 9: Základní údaje sondy a předsádky [22]

Sonda	Olympus 2L16-A1	Olympus 5L16-A1	HQ Sonics 13EM-01
Typ měniče	1D pole	1D pole	2D pole
Typ vlny	příčná	příčná	podélná
Frekvence	2,25 MHz	5 MHz	3,5 MHz
Počet elementů	16	16	2x16
Aktivní apertura	12,0 mm	9,6 mm	19,2 mm
Pasivní apertura	12,0 mm	10,0 mm	8,0 mm
Pitch	0,75 mm	0,6 mm	1,2 mm
Vnější rozměry (LxWxH, obr. 36)	17x29x25 mm	17x29x25 mm	13x27x24 mm
Blízké pole	22,5 mm	36,0 mm	-

Předsádka	SA1-N45S	SA1-N45S	HQS PA P68-1
Nominální úhel	45°	45°	22,3°
Použitý rozsah úhlů	30° - 75°	30° -75°	Povrch 1: 15°-35° Povrch 3: 10°-80°
Střechový úhel	-	-	5,5°
Vnější rozměry (LxWxH)	30x40x17 mm	30x40x17 mm	35x40x20 mm

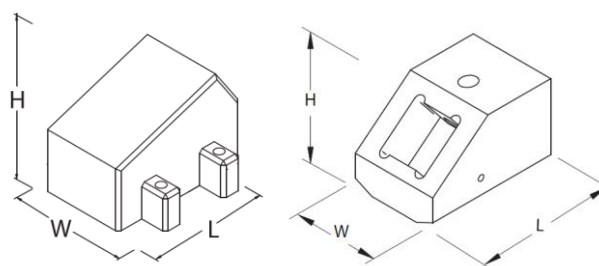
Uvedené sondy jsou se zařízením TOPAZ propojeny pomocí PUR kabelu o délce 5 m a konektorem Omniscan.



Obr. 34: Sonda Olympus 5L-16A1 s předsádkou SA1-N45S-IHC



Obr. 35: Sonda HQ Sonics 13EM-01 s předsádkou HQS PA P68-1



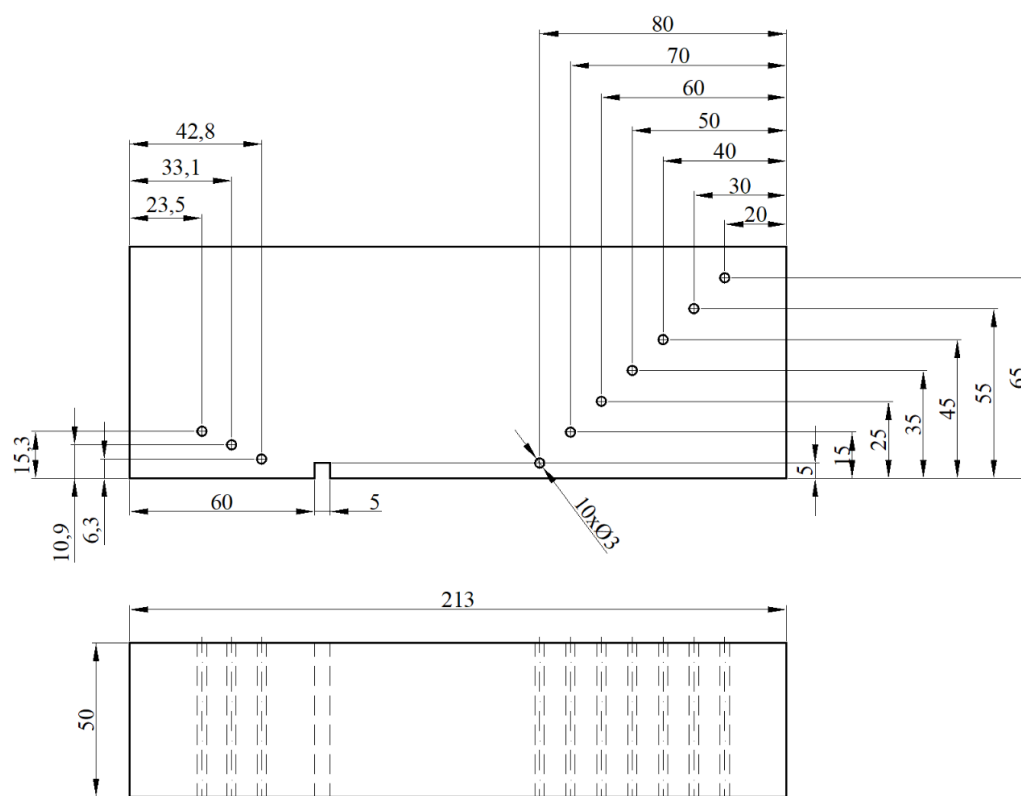
Obr. 36: Schéma rozměrů měniče sondy a předsádky [22]

7.4.Referenční měrka

Pro kalibraci NDT systému a ověření jeho funkčnosti byla navržena a vyrobena referenční měrka s bočními vývrty o průměru 3 mm (obr. 37). Tato měrka slouží primárně pro kalibraci ultrazvukových sond a nastavení parametrů zkoušení před a po realizaci zkoušení, nebo při podezření na vznik odchylky během měření. Měrka dále slouží pro kontrolu funkčnosti všech elementů Phased array sondy.

Vývrty jsou umístěny v různých hloubkách s 10 mm odstupem a slouží pro nastavení:

- Wedge delay (zpoždění v sondě) - maximální echo od kalibračního reflektoru odpovídá reálné hloubce vývrty,
- Index Offset – zobrazovaná vzdálenost čela sondy (průmětová vzdálenost) od vývrty odpovídá reálné vzdálenosti,
- Gain (zesílení) – amplituda signálu od bočního vývrty odpovídá výšce 80% výšky obrazovky (FSH).



Obr. 37: Referenční měrka navržena pro zkoušení svaru kolektoru parogenerátoru

7.5. Vazební médium

Vazebním médiem pro ultrazvukové zkoušení je voda. Vazební prostředek zajišťuje dostatečnou vazbu pro detekci necelistvostí, což bylo prokázáno při kontrole na zkušebním tělese. Stejně vazební médium je nutné použít jak pro samotné ultrazvukové zkoušení, tak pro kalibraci zařízení.

7.6. Manipulátor

Ultrazvukové zkoušení Phased Array je navrženo jako mechanizované zkoušení. Mechanizované zkoušení zaručuje pevné vedení sondy a dodržení požadované vzdálenosti od svarového spoje, případně rozestupu při meandrovitém skenování. Pro obvodové skenování realizované z pevné vzdálenosti od osy svaru je zvolen stavebnicový manipulátor Jireh ROTIX. Tento modulární systém umožňuje snadné sestavení na požadovaný průměr kolektoru 1335 mm. Obsahuje veškeré komponenty pro uchycení a aretaci sondy v požadované vzdálenosti a poloze (obr. 38, 39). Součástí skeneru je i enkodér pro zaznamenávání aktuální polohy sondy.



Obr. 38: Manipulátor ROTIX [23]

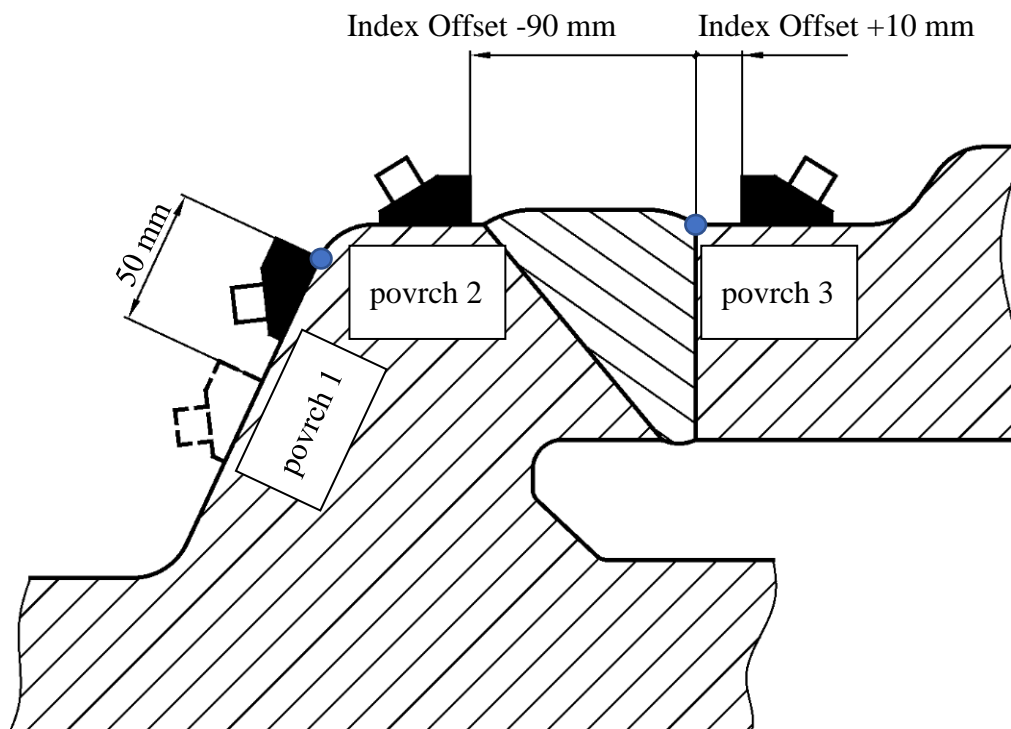
Pro zkoušení ze šikmého povrchu 1 je volen dvuosý manipulátor PISA. Toto zařízení s dvěma enkodéry pro odečítání polohy umožňuje programování meandrovitého pohybu.



Obr. 39: Manipulátor ROTIX nasazený na zkušebním tělese se svarem 94, 95 kolektoru parogenerátoru

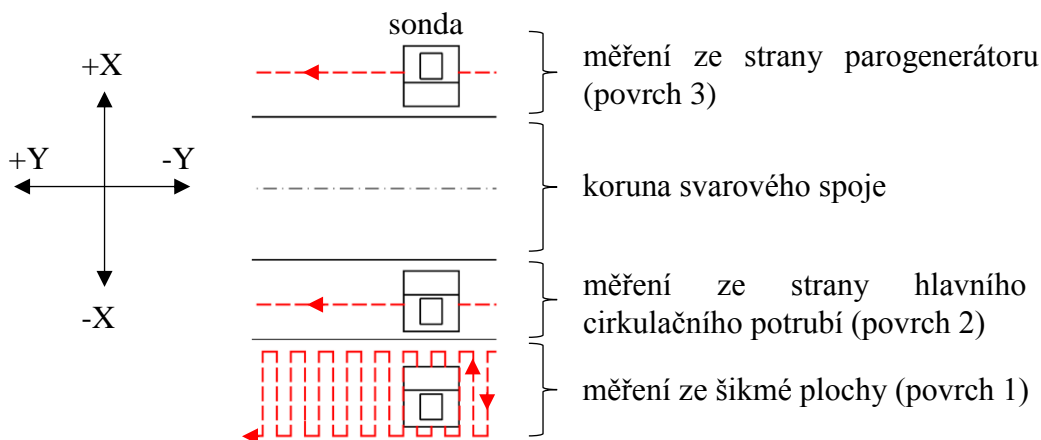
7.7. Způsob a směr skenování

Zkoušení je možné realizovat z povrchů uvedených na obr. 40. Zejména povrch 2 představuje z pohledu přístupnosti omezení při volbě použité sondy. Výchozí poloha sondy z povrchu 1 je odečítána od rozhraní rádiusu a kónusu kolektoru k čelu sondy.



Obr. 40: Polohy sond pro zkoušení svarového spoje a oblastí rádiusu kolektoru parogenerátoru

Sondy jsou na zkoušenou komponentu umístěny takovým způsobem, aby ultrazvukový svazek sondy vždy směřoval kolmo k ose svarového spoje. V případě zkoušení z povrchu 2 a 3 jsou ultrazvuková data snímána rovnoběžně s osou svarového spoje. Z povrchu 1 ze šikmé strany jsou data snímána meandrovitým pohybem sondy s krokem 4 mm a pohybem od osy svaru v délce 50 mm (obr. 41).



Obr. 41: Pohyb sond při kontrolách svaru

7.7.1. Souřadnicový systém

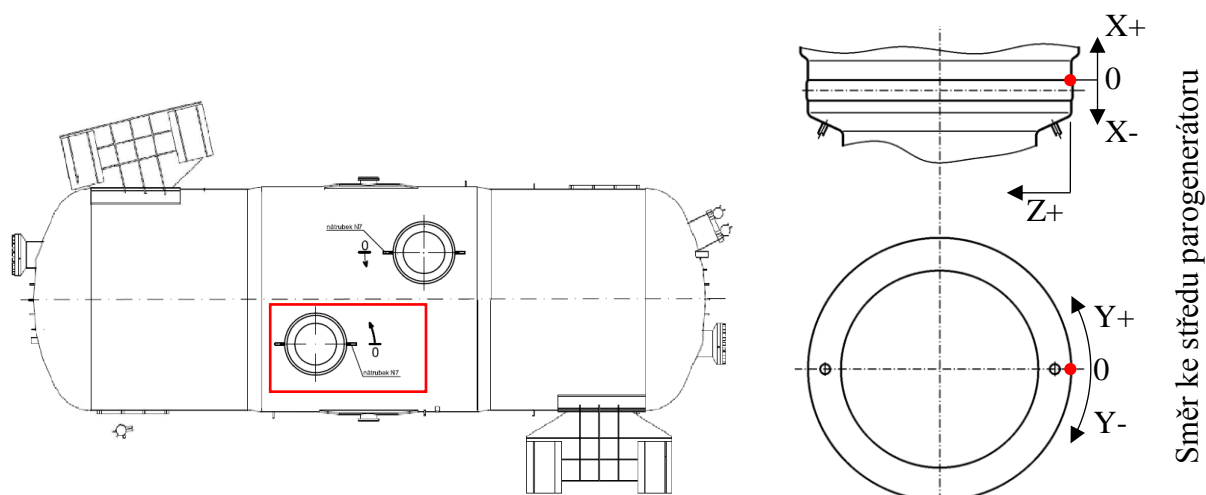
Souřadnicový systém je definován souřadnicemi X, Y, Z.

Počátek souřadnice **X** se nalézá na kraji koruny svarového spoje na straně pláště parogenerátoru. Kladný směr osy je směrem k plášti parogenerátoru. Tato souřadnice udává vzdálenost od svaru (Index Offset). Souřadnice narůstá ve směru k parogenerátoru (vzhůru).

Počátek souřadnice **Y** se nalézá souběžně s osou „vnitřního“ nátrubku odkalu, který směřuje ke středu nádoby parogenerátoru (obr. 42). Souřadnice **Y** určuje úhlovou polohu po obvodu svarového spoje. Souřadnice narůstá ve směru otáčení hodinových ručiček (doleva při pohledu na nulový bod).

Počátek souřadnice **Z** se nalézá na vnějším povrchu kolektoru PG a narůstá kolmo směrem k vnitřnímu povrchu kolektoru PG. Souřadnice **Z** představuje rozměr ve směru tloušťky materiálu od vnějšího povrchu k povrchu vnitřnímu.

Popsaný souřadnicový systém se použije jak k definici pohybu ultrazvukové sondy, tak pro vyhodnocování polohy případných nalezených indikací ve svarovém spoji. Při zkoušení ze šikmé strany se k charakterizaci případných nalezených indikací zaznamená pouze souřadnice **Y**.



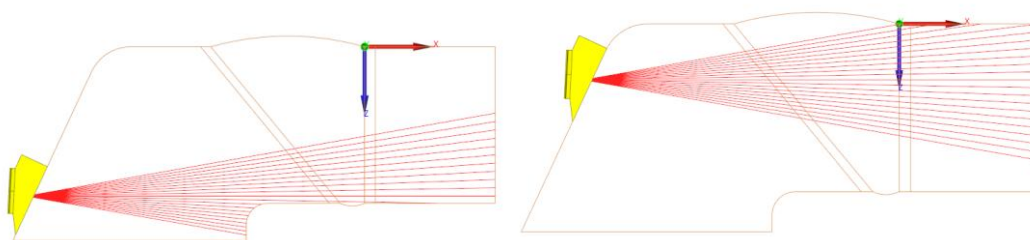
Obr. 42: Určení souřadnicového systému pro zkoušení svarového spoje kolektoru parogenerátoru

7.8. Úhel ultrazvukového svazku PA sond

Rozsah pokrytí požadovaného objemu součásti z určených poloh (obr. 40) je vizualizován v softwaru CIVA v následujících podkapitolách.

7.8.1. Povrch 1 – zkoušení sondou 13EM-01

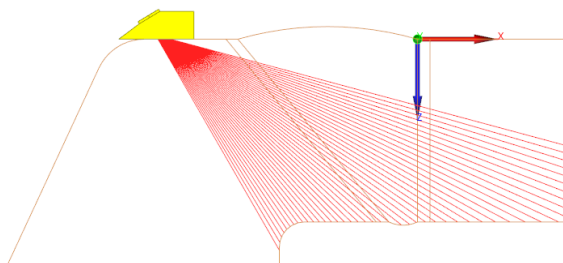
Zkoušení z povrchu 1 (obr. 43) zaměřené na detekci a polohu necelistvostí po obvodu probíhá meandrovitým pohybem s posunem 50 mm čela sondy od zaoblení povrchu. Pro pokrytí požadovaného objemu zkoušení je úhel rozevření ultrazvukového svazku nastaven na 15-35°.



Obr. 43: Pokrytí zkoušeného objemu sondou 13EM-01 v úhlovém rozmezí 15°-35°

7.8.2. Povrch 2 – zkoušení sondou 2L-16A1 a 5L-16A1

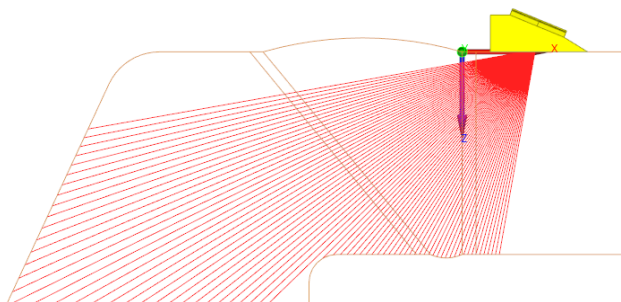
Zkoušení z povrchu 2 zaměřené na detekci a určení pozice a výšky indikace probíhá zkoušením ze vzdálenosti Index Offset -90 mm. Pro pokrytí požadovaného objemu zkoušení je úhel rozevření ultrazvukového svazku nastaven na 30°-75°.



Obr. 44: Pokrytí zkoušeného objemu sondou 2L-16A1 a 5L-16A1 v úhlovém rozmezí 30°-75°

7.8.3. Povrch 3 – zkoušení sondou 13EM-01

Zkoušení z povrchu 3 zaměřené na detekci a určení pozice a výšky indikace probíhá zkoušením ze vzdálenosti Index Offset +10 mm. Pro pokrytí požadovaného objemu zkoušení je úhel rozevření ultrazvukového svazku nastaven na 10°-80°.



Obr. 45: Pokrytí zkoušeného objemu sondou a 13EM-01 v úhlovém rozmezí 10°-80°

7.9. Hodnotící software naměřených dat

Zpracování a analýza naměřených dat proběhne v softwaru Ultravision 3.9R9. Software umožňuje komplexně pracovat s naměřenými daty ze zařízení Zetec TOPAZ 32.

8. Nastavení NDT systému

Pro realizaci zkoušení je nutné nastavit zvolený NDT přístroj. Nastavení probíhá pomocí parametrů v softwaru Ultravision (nástroj PA calculator), které lze uložit do souboru

a následně vyvolat v přístroji bez nutnosti nastavení v softwarovém prostředí Ultravision Touch. Nastavení pro jednotlivé sondy v software Ultravision je uvedeno v příloze 2. Uvedené hodnoty jsou nastaveny v souladu s teoretickou částí kapitoly 7.

8.1. Kalibrace

Kalibrace systému je prováděna vždy před zahájením zkoušení a pravidelně se ověřuje v souladu s kapitolou 8.2. Kalibrace je prováděna na referenční měrce v kapitole 7.4 (obr. 37).

Kalibrace systému zkoušení zahrnuje dílčí činnosti popsané v následujících kapitolách.

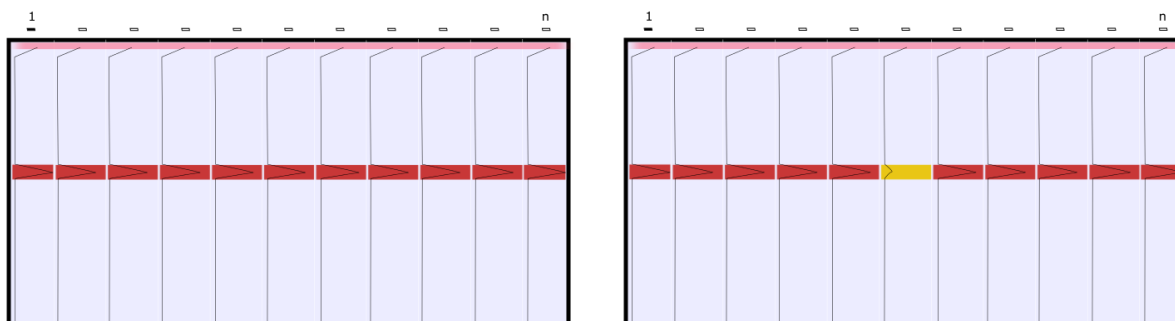
8.1.1. Kontrolu technické připravenosti NDT systému

Použitý NDT systém nesmí vykazovat známky poškození, které mají vliv na výsledek zkoušení. Kontrola technické připravenosti zahrnuje ověření platnosti kalibrace NDT systému v souladu s požadavky ČSN EN 18563-1 [24].

8.1.2. Kontrolu funkčnosti elementů Phased array sondy

Kontrola se provádí při nastavení systému popsaném v příloze 2 a dle následujících kroků:

1. Nastavení A a C-zobrazení,
2. přiložením sondy (bez nasazené předsádky) na referenční měrku,
3. nastavení časové základny, aby bylo vidět první koncové echo od zadní stěny měrky,
4. porovnání koncových ech od jednotlivých elementů,
5. provedení hodnocení funkčnosti elementů.



Obr. 46: Ukázka C-zobrazení při kontrole funkčnosti elementů. vlevo – funkční sonda, vpravo nefunkční jeden element

Kritéria pro hodnocení funkčnosti elementu:

- Všechny signály od jednotlivých elementů se nachází v pásmu 20 dB,
- sousední signály se nesmí lišit o více než 3 dB.

Pokud jsou překročena kritéria pro hodnocení funkčnosti elementů je element považován na nefunkční.

Je povolen jeden nefunkční element v sondě ve směru aktivní apertury (pro dvojitou sondu s elementy ve dvou řadách mohou být nefunkční elementy dva, pokud se nenacházejí ve stejné řadě). V případě většího počtu nefunkčních elementů musí být závada odstraněna a zkoušení nesmí být realizováno.

8.1.3. Nastavení citlivosti

Na vývrtu v referenční měrce v hloubce 70 mm, který odpovídá hloubce oblasti kořene svaru a rádiusu R10 se v přístroji TOPAZ provede nastavení citlivosti v následujících krocích:

- Přiložení sondy na referenční měrku,
- nalezení maximálního echa od vývrtu v hloubce 70 mm pro referenční úhel kalibrované sondy,
- v místě maximálního echa od vývrtu nastavení amplitudy pomocí zesílení na 80% obrazovky (FSH).

Pro zkoušení z povrchu 1 je kalibrace prováděna pro úhel 25°, z povrchu 2 pro úhel 45° a z povrchu 3 pro úhel 25°. Tyto úhly jsou voleny na základě předpokládaných oblastí výskytu vad.

8.1.4. Zpoždění v předsádce (Wedge delay)

Podstatou je nastavení zpoždění v předsádce (Wedge delay) v přístroji TOPAZ tak, aby udávaná hloubka odrazu maximálního signálu od vývrtu korespondovala se skutečnou hloubkou v referenční měrce.

- Nalezení maximálního echa od vývrtu v hloubce 70 mm pro referenční úhel kalibrované sondy,
- maximální signál od tohoto vývrtu nastavit pomocí zpoždění v předsádce (Wedge delay) na hloubku 69 mm.

Nastavení hodnoty hloubky 69 mm přibližně odpovídá hloubce odrazu nejsilnějšího signálu od vývrtu. V hloubce 70 mm se nachází geometrický střed vývrtu.

8.1.5. Index offset

Posledními kroky kalibrace je nastavení průmětové vzdálenosti tak, aby vzdálenost čela sondy odpovídala reálné vzdálenosti vývrtu od čela sondy.

- Nalezení maximálního echa od vývrtu v hloubce 70 mm pro referenční úhel kalibrované sondy,
- nastavení offsetu sondy (index offset) tak, aby průmětová vzdálenost drážky a čela sondy odpovídala metrem (kovovým pravítkem) naměřené hodnotě.

8.2. Ověření kalibrace

Kalibrace je ověřována každé 4 hodiny nepřetržité práce a na konci zkoušení. Dále musí být parametry ověřeny vždy, pokud se změní parametry zkoušení anebo pokud personál předpokládá odchylku od nastavení zařízení.

Pro ověření parametrů sondy musí být použita stejná referenční měrka jaká byla použita pro původní nastavení systému.

Počáteční kalibraci můžeme považovat za úspěšnou s následujícími odchylkami:

- Tolerance amplitudy echa při ověření kalibrace je $\pm 20\%$ FSH,
- průmětová vzdálenost a hloubka echa ± 1 mm,
- tolerance odchylky dráhy v sondě $\pm 0,5$ μ s.

V případě překročení odchylky je nutné závadu odstranit a provést opětovné snímání dat.

8.3. Sběr dat a způsob hodnocení indikací

Dle postupu z předchozích kapitol bylo provedeno snímání dat. Snímání dat se provádí v plném rozsahu obvodu zkušební tělesa s následujícími kroky před samotným měřením:

- Přesnost snímání polohy enkodérem se zkontroluje porovnáním skutečné a naměřené vzdálenosti.
- Během snímání dat by neměla překročit rychlost pohybu sondy 5 mm/s. Během záznamu je kontrolována kompletnost dat.

V rámci této práce byly naměřeny tyto zkušební skeny:

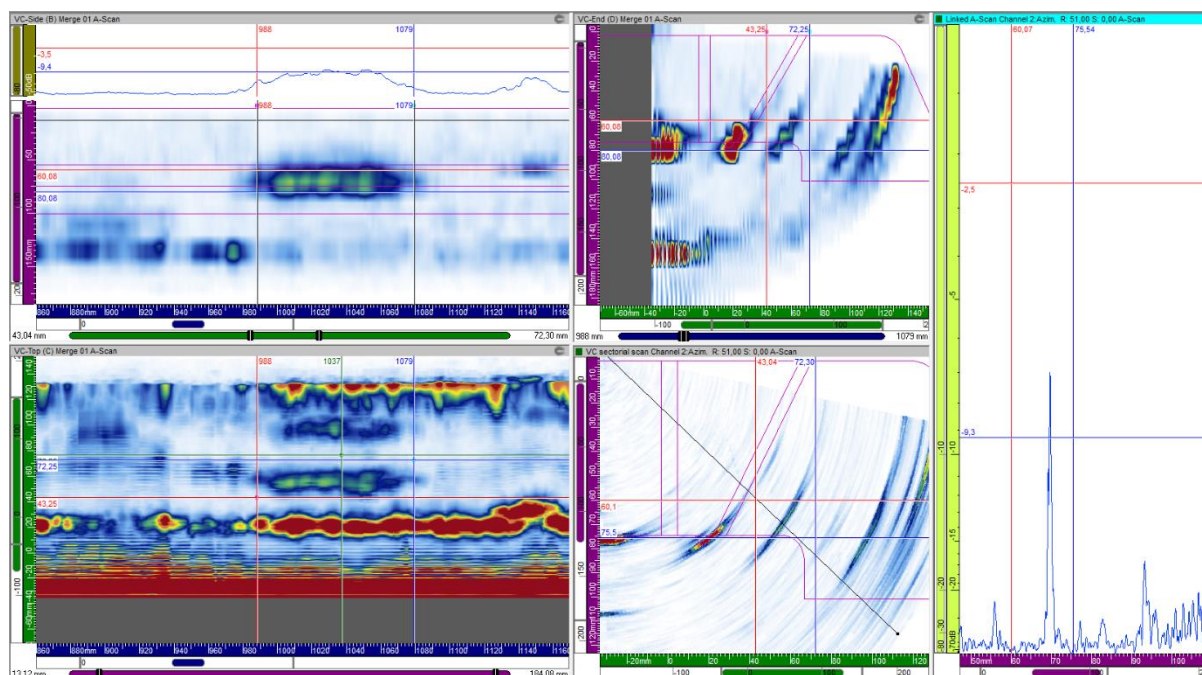
- Povrch 1 – sonda 13EM-01 – Meandrovitý pohyb po šikmé ploše,
- povrch 2 – sonda 2L-16A1 – Index Offset -90 mm,
- povrch 2 – sonda 5L-16A1 – Index Offset -90 mm,
- povrch 3 – sonda 13EM-01 – Index Offset +10 mm.

8.3.1. Hodnocení

Hodnocení indikací z ultrazukového datového záznamu je prováděno pomocí softwaru Ultravision popsaného v kapitole 7.9. pomocí následujících zobrazení (obr. 47):

- VC sectorial scan,
- VC Top (C) Merge,
- VC Side (B) Merge,
- VC End (D) Merge,
- A scan.

Nasnímaná „surová“ data se v softwaru Ultravision zpracují funkcí Volumetric Merge.



Obr. 47: Ukázka zobrazení ultrazukových dat pro analýzu v softwaru Ultravision

8.3.2. Úroveň pro hodnocení

Všechny indikace plošného charakteru, které přesahují úroveň šumu +12dB musí být podrobeny analýze.

8.3.3. Registrace indikací

Jsou registrovány všechny indikace plošného charakteru, které komunikují s vnitřním povrchem a nachází se v oblasti zájmu definovaném kapitolou 5.

Indikace v oblasti rádiusu musí být detekovány vždy z povrchu 1 a 2.

U všech registrovaných indikací musí být stanovena poloha, výška a délka podle následujících kapitol.

8.3.4. Určení výšky necelistvosti

Výška indikace představuje kolmý rozměr necelistvosti ve směru tloušťky stěny (obr. 48 a 50).

Hodnocení výšky je prováděno z povrchu 2 a 3.

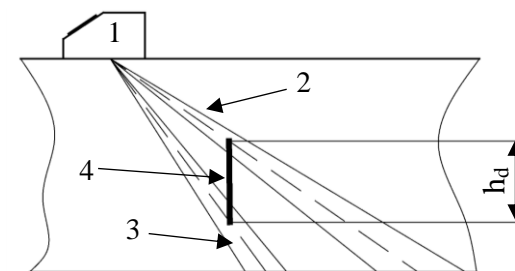
U indikací s proměnlivou výškou podél jejich délky se musí výška stanovit zkoušením v poloze maximálního rozměru výšky.

Určení výšky musí být provedeno na základě dat získaných ze stejné strany svaru, z jaké byla indikace necelistvosti nalezena.

Výška necelistvosti se z uložených dat určí buď technikou poklesu amplitudy signálu o 6dB (kapitola 8.3.4.1) nebo technikou difrakčního echa od vrcholu necelistvosti (8.3.4.2).

8.3.4.1. Technika poklesu amplitudy signálu o 6 dB

Na zvoleném zobrazení signálů (S-zobrazení) se umístí horizontální kurzory do pozice zobrazeného horního a spodního okraje necelistvosti. Krajní pozice necelistvosti se stanoví poklesem signálu o definovanou hodnotu 6 dB při posuvu kurzoru z maximální amplitudy signálu ve směru kolmo na zkušební povrch (obr. 47). Tato technika určení výšky je použitelná tehdy, pokud výška necelistvosti h_d je větší nebo rovna rozměru ultrazvukového svazku ve směru tloušťky stěny (obr. 48).



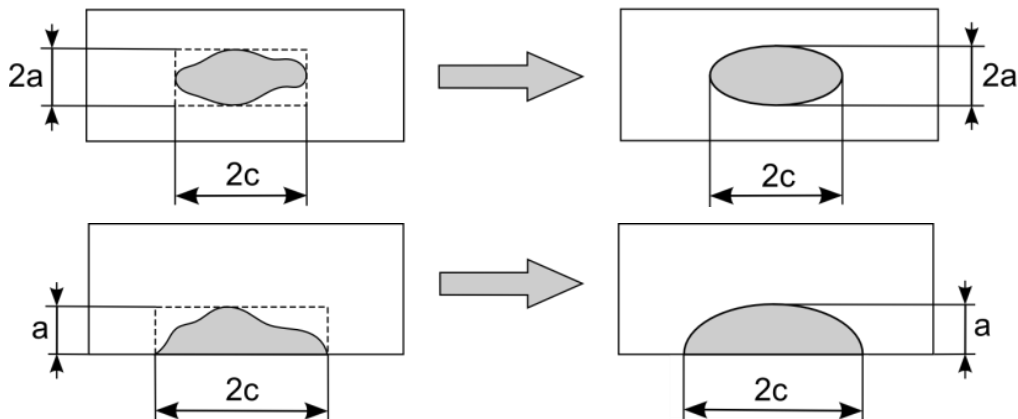
Legenda:

1 - UT-PA sonda, 2 - svazek dopadající na horní okraj necelistvosti, 3 - svazek dopadající na spodní okraj necelistvosti, 4 - necelistvost, h_d - výška necelistvosti.

Obr. 48: Výška necelistvosti určená technikou poklesu signálu z S-zobrazení

Pro stanovení rozměru necelistvosti metodou poklesu o 6 dB je nutné určit, zdali se jedná o podpovrchovou nebo povrchovou necelistvost (komunikující s vnitřním povrchem).

V první fázi se provede schematizování nalezené indikace na jednodušší geometrii (obr. 49). Podpovrchový defekt je nahrazen eliptickou trhlinou o rozměrech $2a \cdot 2c$, povrchový defekt semi-eliptickou trhlinou o rozměrech $a \cdot 2c$. Stejný princip je uvažován pro skupiny indikací hodnocených jako jedna indikace. [25]

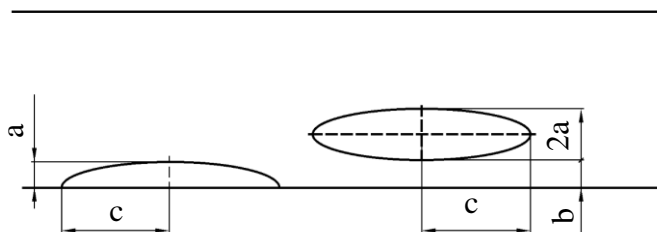


Obr. 49: Tvar podpovrchových a povrchových schematizovaných indikací [25]

Rozměry schematizované podpovrchové nečelistvosti jsou podrobeny rozměrové analýze (obr. 50). Pokud ligament b (nejkratší vzdálenost nečelistvosti od vnějšího povrchu) splňuje vztah (5), je nečelistvost schematizována a hodnocena jako povrchová. [26].

$$b < \frac{a}{9} \quad (5)$$

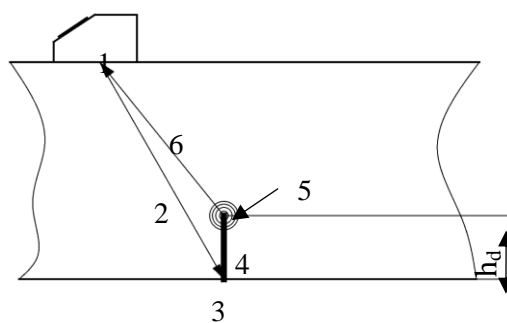
Hodnota vnějšího povrchu je odečítána ze šumové stopy od vnitřního povrchu. V případě, absence šumové stopy v UT záznamu se bere hodnota z projektové dokumentace 72,5 mm.



Obr. 50: Re-schematizace podpovrchové a povrchové trhliny [26]

8.3.4.2. Technika difrakčního echa

Na zvoleném zobrazení signálů se umístí horizontální kurzory přístroje do pozic odpovídajících signálům od horního okraje nečelistvosti (5) a spodního okraje nečelistvosti (3). Podle umístění a orientace vady to mohou být signály od okrajů nečelistvostí nebo signály odražené od plochy nečelistvosti (obr. 51). Rozdíl výšky horního a spodního okraje nečelistvosti ve směru tloušťky materiálu pak představuje výšku nečelistvosti h_d . Polohu horního okraje od nečelistvosti hodnotíme i v případě zachycení odraženým ultrazvukovým svazkem.



Legenda:

1 - UT-PA sonda, 2 - dráha rohového odrazu od spodního povrchu, 3 - rohový odraz, 4 - necelistvost, 5 - difrakční signál od horního okraje necelistvosti, 6 - dráha k signálu od horního okraje necelistvosti, h_d - výška necelistvosti.

Obr. 51: Výška necelistvosti určená technikou poklesu signálu z S-zobrazení

8.3.5. Určení délky necelistvosti

Měření délky necelistvosti, tj. protažení necelistvosti v podélném směru (souřadnice Y), musí být provedeno na datech získaných ze stejné strany svaru, z jaké byla indikace nalezena. Délka necelistvosti musí být určena pomocí metody poklesu o 6dB.

Vlastní měření délky necelistvosti se může provést ze zobrazení B-scan nebo C-scan. Určí se vzdálenost necelistvosti umístěním svislých kurzorů na okraje necelistvosti (obr. 47).

Délka necelistvosti naměřená z vnějšího povrchu 2 a 3 se vynásobí součinitelem pro korekci délky necelistvosti u vnitřního povrchu: 0,891.

V případě detekce dvou necelistvostí v těsné blízkosti ve směru osy y se tyto indikace hodnotí jako jedna sloučená za předpokladu, že mezera mezi indikacemi je menší než délka kratší indikace. Toto posouzení se provede před korekcí délky podle hloubky indikace.

V případě hodnocení délky z více směrů zkoušení se do celkového hodnocení uvede větší naměřená délka.

8.3.6. Určení polohy necelistvosti

Poloha necelistvosti je určena souřadnicí ve směru X a Y. Střed necelistvosti v podélném směru (souřadnice Y) se určí jako aritmetický průměr polohy okrajů od referenčního nulového bodu (obr. 42).

9. Analýza ovlivňujících parametrů

Účelem analýzy je poskytnout podklad pro technické zdůvodnění, které obsahuje a shromažďuje důkazy o účinnosti a spolehlivosti zkoušení. Technické zdůvodnění spolu s posouzením výsledků praktických zkoušek je podkladem a obhájením splnění kvalifikačních cílů zkoušení z pohledu detekce a hodnocení necelistvostí před kvalifikační komisí.

Úkolem technického zdůvodnění je identifikovat a popsat parametry zkoušení, které můžeme dělit:

- Základní parametr – změna může potenciálně ovlivnit výsledek zkoušení,
- ovlivňující parametr – změna může potenciálně ovlivnit stanovené cíle kvalifikace.

Následující tabulky obsahují seznam základních a ovlivňujících parametrů, včetně krátkého komentáře. Analýzy ovlivňujících a základních parametrů byly provedeny v souladu s doporučeným postupem ENIQ Recommended Practice 1 [27].

9.1. Analýza ovlivňujících/základních parametrů svarového spoje

Tab. 10: Analýza ovlivňujících / základních parametrů svarového spoje

Parametr	Označení	Charakteristiky	Typ parametru	Rozsahy/Poznámky
Geometrie součásti	C1	Výrobní dokumentace	Základní	Zkoušení svarového spoje je ovlivněno geometrií součásti. Popsáno v kapitole 1.1
Přístup ke zkoušené oblasti	C2	Vstupní informace	Ovlivňující	Popsáno v kapitole 1.1
Drsnost povrchu zkoušené oblasti	C3	Požaduje se 6,3 μm nebo nižší	Ovlivňující	Popsáno v kapitole 1.3.1 Dáno způsobem odstranění pasivační vrstvy
Konfigurace základního materiálu	C4	Úkosity, silové návary. Šum a rušivé signály v materiálu návary a na rozhraní základního materiálu a návary.	Základní	Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese. Diskutováno a odůvodněno v kap 10.2
Tloušťka stěny základního materiálu	C5	72,5 mm	Základní	Dáno výrobní dokumentací.
Vnější průměr potrubí	C6	1335 mm	Základní	Dáno výrobní dokumentací.
Materiál svaru	C7	UONI 13/55 – nízký útlum	Základní	Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese. Diskutováno a odůvodněno v kap 3.3.4.6 a 10.2
Materiál návary	C8	Sv-08A – nízký útlum	Základní	Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese. Diskutováno a odůvodněno v kap 3.3.4.6 a 10.2
Materiál tělesa kolektoru	C9	10GN2MFA – nízký útlum	Základní	Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese. Diskutováno a odůvodněno v kap 3.3.4.6 a 10.2
Úhel úkosových hran	C10	V svar s úhlem zkosení 15° ½ V svar s úhlem zkosení 40°	Základní	Dáno výrobní dokumentací.
Úhel zkosení šikmé plochy – povrch 1	C11	Zkosení šikmé plochy 25°	Základní	Dáno výrobní dokumentací.
Teplota zkoušené komponenty	C12	+10°C až +40°C	Základní	Popsáno v kapitole 10.1

9.2. Analýza ovlivňujících/základních parametrů předpokládaných vadových necelistvostí

Tab. 11: Analýza ovlivňujících / základních parametrů předpokládaných vadových necelistvostí

Parametr	Označení	Charakteristiky	Typ parametru	Rozsahy/Poznámky
Typ vadové necelistvosti	D1	Trhlina v materiálu šířící se z vnitřního povrchu v oblasti kořene svaru a v oblasti rádiusu R10	Základní	Popsáno v kap. 2.2
Degradační mechanismus	D2	Důlková koroze SCC trhlina	Ovlivňující	Popsáno v kap. 2.1
Detekce vadové necelistvosti	D3	Výstupní informace	Ovlivňující	Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese. Diskutováno v kap 0
Rozměry vadové necelistvosti	D4	Výstupní informace	Ovlivňující	Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese. Diskutováno v kap 10.8
Pozice vadové necelistvosti	D5	Oblast svaru včetně TOZ + oblast rádiusu R10 do výšky 1/3 tloušťky materiálu z vnitřního povrchu	Základní	Popsáno v kapitole 5
Naklonění vadové necelistvosti	D6	Trhlina v materiálu šířící se z vnitřního povrchu v oblasti kořene svaru a v oblasti rádiusu R10	Základní	Vliv naklonění necelistvosti na detekci popsán v kapitole 3.3. Diskutováno v technickém zdůvodnění v kapitole 10.4

9.3. Analýza ovlivňujících/základních parametrů postupu zkoušení

Tab. 12: Analýza ovlivňujících / základních parametrů postupu zkoušení

Parametr	Označení	Charakteristiky	Typ parametru	Rozsahy/Poznámky
Druhy ultrazvukových vln	P1	Příčné vlny Podélné vlny	Základní	Dáno kapitolou 3.3.4.2
Typ sondy	P2	Phased Array s 16 a 64 elementy	Základní	Dáno kapitolou 7.3 Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese
Konfigurace sondy	P3	Phased Array technika Povrch 1: přijímač a vysílač Povrch 2: přijímač/vysílač Povrch 3: přijímač a vysílač	Základní	Dáno přílohou 2. Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese
Rozměry PA ultrazvukových sond (bez předsádky)	P4	D x Š x V Povrch 1: 13 x 27 x 24 mm Povrch 2: 17 x 29 x 25 mm Povrch 3: 17 x 29 x 25 mm	Základní	Dáno prostorovým omezením popsáním v kapitole 1.1 a volbou sond popsanych v kapitole 7.3
Rozměry aktivní oblasti	P5	Aktivní x pasivní apertura Povrch 1: 19,2 x 8 mm Povrch 2: 9,6 x 10 mm Povrch 3: 19,2 x 8 mm	Základní	Popsáno a diskutováno v kapitole 3.3.4.3 a 7.3 Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese

Parametr	Označení	Charakteristiky	Typ parametru	Rozsahy/Poznámky
Frekvence PA ultrazvukových sond	P6	2,25 MHz, 3,5 MHz, 5MHz	Základní	Popsáno a diskutováno v kapitole 3.3.4.2 a 7.3 Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese
Rozměr klínu	P7	D x Š x V Povrch 1: 35 x 40 x 20 mm Povrch 2: 30 x 40 x 20 mm Povrch 3: 35 x 40 x 20 mm	Základní	Dáno kapitolou 7.3 Ověřeno výsledky zkoušek na zkušebním tělese
Střechový úhel předsádky	P8	Platí pouze pro dvojitou sondu 5,5°	Základní	Dáno kapitolou 7.3
Úhel ultrazvukového svazku PA sond	P9	Sektorový sken Povrch 1: 15°-35° Povrch 2: 30°-75° Povrch 3: 10°-80°	Základní	Dáno volbou předsádek popsaných v kapitole 7.3 Vizualizováno v kapitole 7.8
Fokusační charakteristika	P10	Fokusace do maximální hloubky zkušebního objemu. Povrch 1: do hloubky 200 mm Povrch 2: do hloubky 69 mm Povrch 3: do hloubky 69 mm	Ovlivňující	Dáno kapitolou 7.3 a přílohou č.2 Ověřeno měřením na zkušebním tělese v kapitole 11.
Citlivost zkoušení	P11	Nastavení zesílení 80% FSH na referenční měrce od příčného vývrtu Ø3 mm v hloubce 70 mm	Základní	Dáno kapitolou 8.1.3 Ověřeno měřením na zkušebním tělese v kapitole 11.
Způsob skenování	P12	Povrch 1: posuv po šikmé ploše, meandrovitý pohyb Povrch 2: Podélný sken s osou svaru v pevné vzdálenosti Povrch 3: Podélný sken s osou svaru v pevné vzdálenosti	Základní	Dáno kapitolou 7.7
Rychlost skenování	P13	V závislosti na schopnosti přístroje ukládat kompletní data. Doporučená rychlost 5 mm/s	Základní	Dáno kapitolou 8.3
Rozsah skenování z povrchu komponenty	P14	Skenování po celém obvodu kolektoru Povrch 1: posuv po šikmé ploše v délce 40 mm, skenovací krok 4 mm Povrch 2: Index offset – 90 mm Povrch 3: Index offset +10 mm	Základní	Dáno kapitolou 7.8 Ověřeno měřením na zkušebním tělese v kapitole 11.
Kvalifikace personálu	P15	Certifikace dle ČSN EN ISO 9712	Není základní	Popsáno v kapitole 10.6
Vyhodnocovací metody	P16	Při provádění zkoušky	Základní	Popsáno v kapitole 8.3.4.1 a 8.3.4.2 Ověřeno měřením na zkušebním tělese v kapitole 11.
Úroveň registrace	P17	Indikace převyšující 12dB nad úroveň šumu	Základní	Popsáno v kapitole 8.3.2 a 8.3.3. Ověřeno měřením na zkušebním tělese v kapitole 11.
Hodnocení výšky indikace	P18	Absolutní rozdíl polohy horního okraje necelistvosti (nejvyšší lokální maximum) a polohy vnitřního povrchu (šumová stopa	Základní	Popsáno v kapitole 8.3.4 Ověřeno měřením na zkušebním tělese v kapitole 11.

Parametr	Označení	Charakteristiky	Typ parametru	Rozsahy/Poznámky
	P18	od vnitřního povrchu v těsném okolí indikace)		
Hodnocení délky indikace	P19	Pokles obou okrajů indikace určena poklesem o 6dB z lokálního maxima k příslušnému okraji necelistvosti. Korekce délky necelistvosti k vnitřnímu povrchu: 0,891 měřené délky z vnějšího povrchu. Povrch 2: oblast rádiusu, oblast svaru +N-ZM Povrch 3: oblast svaru -N-ZM	Ovlivňující	Popsáno v kapitole 8.3.5. Ověřeno měřením na zkušebním tělese v kapitole 11.
Hodnocení polohy indikace	P20	Poloha ve směru X a Y v závislosti na výchozí pozici referenčního nulového bodu. Střed indikace se určí jako aritmetický průměr polohy okraje.	Základní	Popsáno v kapitole 8.3.6. Ověřeno měřením na zkušebním tělese v kapitole 11.

9.4. Analýza ovlivňujících/základních parametrů použitého zařízení

Tab. 13: Analýza ovlivňujících / základních parametrů použitého zařízení

Parametr	Označení	Charakteristiky	Typ parametru	Rozsahy/Poznámky
Ultrazvukový PA defektoskop	K1	TOPAZ 32	Základní	Dáno kapitolou 7.2
Akustická vazba	K2	Vazelína	Není základní	Dáno kapitolou 7.5
Výběr sondy	K3	2,25 MHz, 3,5 MHz, 5MHz	Základní	Dáno kapitolou 7.3
Počet a rozmístění elementů sondy	K4	16 elementů, 64 elementů (32 vysílacích, 32 přijímacích)	Základní	Popsáno v kapitole 3.3.4.3 Nastavení dle přílohy 2
Výběr klínu	K5	Bez zaoblení, průměr 1335 mm	Základní	Dáno kapitolou 7.3
Úhlový rozsah klínu pro zkoušení	K6	Povrch 1 – Sektorové zkoušení 15° – 35° Povrch 2 – Sektorové zkoušení 30° – 75° Povrch 3 – Sektorové zkoušení 10° – 80°	Základní	Dáno kapitolou 7.3. Vizualizováno v kapitole 7.8
Krok úhlu	K7	1°	Základní	Dáno kapitolou 7.8.
Manipulátor	K8	Jireh ROTIX	Není základní	Dáno kapitolou 7.6

9.5. Analýza ovlivňujících/základních parametrů použitého Phased array defektoskopu

Tab. 14: Analýza ovlivňujících / základních parametrů použitého Phased array defektoskopu

Parametr	Označení	Charakteristiky	Typ parametru	Rozsahy/Poznámky
Linearita amplitudy	E1	Stanovena < 1% chyba	Základní	Dáno kalibrační zařízením.
Linearita časové základny	E2	Stanovena < 1% chyba	Základní	Dáno kalibrační zařízením.
Linearity zařízení	E3	Povolená odchylka $\pm 3^\circ$	Základní	Stanoveno v ČSN EN ISO 18563-3 [28]
Vzorkovací frekvence	E4	Doporučeno 100 MHz	Základní	Nastavená v souladu s postupem zkoušení v kap. 8 Automaticky nastaveno zařízením.
Komprese	E5	4 (Auto)	Základní	Nastavená v souladu s postupem zkoušení v kap. 8 Automaticky nastaveno zařízením.
Délka pulsu	E6	250 ns (Auto)	Základní	Nastavená v souladu s postupem zkoušení v kap. 8 Automaticky nastaveno zařízením.
Průměrování	E7	0	Základní	Nastavená v souladu s postupem zkoušení v kap. 8 Automaticky nastaveno zařízením.
Další nastavení zařízení	E8		Základní	Nastavená v souladu s postupem zkoušení v kap. 8

10. Fyzikální zdůvodnění

10.1. Prostředí zkoušení a přístupnost

Samotné zkoušení probíhá za relativně ztížených podmínek s ohledem na přístupnost ke svaru po lešení, přítomnosti roštu podlahy a nosníků podlahy, které značně omezují pohyb kolem svaru. Teplota prostředí se pohybuje v rozmezí 25-30 °C. Dávkový příkon v okolí kolektoru parogenerátoru se pohybuje v rozmezí 10-20 $\mu\text{Sv/h}$. Uvedené faktory mohou mít vliv na kvalitu snímání a hodnocení zkoušení. Z tohoto důvodu je přistoupeno k mechanizované kontrole s použitím manipulátoru a následným hodnocením dat v pracovním prostředí s vhodnějšími podmínkami. Manipulátor s ručním pohonem ROTIX byl zvolen pro zkoušení z povrchu 2 a 3 z důvodu prostorových omezení – přítomnosti nátrubků periodických odluhů a obruče s termočlánky, které komplikují pohyb rozměrnějšího manipulátoru PISA s elektrickým pohonem.

Prostorové možnosti pro přiložení sond ovlivnily jejich volbu z hlediska velikosti předsádky sond.

10.2. Materiál

Feritický materiál 10GN2MFA (kapitola 1.2) je tvořen jemnozrnnou mikrostrukturou. Tato malá velikost zrn má za následek vyšší poměry signál / šum (S/N) a lepší kompatibilitu s vyšší frekvenční technikou (typicky mezi 2 a 10 MHz).

Referenční měrka byla vyrobena z ekvivalentního materiálu, kde byl pomocí přímé sondy podélných vln MB4S změřen útlum materiálu dle vzorce (4):

Hodnoty 1. a 2. koncového echa na referenční měrce byly: 18,7dB a 26,3dB.

Hodnoty 1. a 2. koncového echa na zkušební tělese byly: 23,9dB a 30,1dB.

Podmínka pro $\Delta V_S = 6$ dB byla splněna ($t \geq 3N$; $72,5 \text{ mm} \geq 48 \text{ mm}$)

Výsledný útlum referenční měrky: 1,6dB/150 mm tj. 10,6 dB/m

Výsledný útlum zkušebního tělesa: 0,2 dB/145 mm tj. 1,4 dB/m

Rozdíl v útlumu materiálu referenční měrky na dráze 145 mm je o 1,2 dB větší. Na základě údajů normy ČSN EN ISO 13588 [29] jsou odchylky v citlivosti do 4dB zanedbatelné a nevyžadují žádné korekce.

10.3. Stav zkušebního povrchu

Vymezené plochy pro zkoušení jsou očištěné od pasivační vrstvy a obroušené. Koruna svarového spoje byla v minulosti zabroušena do plynulého přechodu. Nicméně v některých místech došlo k podbroušení, které může způsobovat problémy s pohybem sondy a následně vazbou.

10.4. Morfologie, náklon a orientace necelistvostí

Degradační mechanismus a místa vzniku trhlin jsou popsány v kapitole 2. Předpokládá se orientace necelistvostí v podélném směru s osou svaru.

V kapitole 3.3 je popsán vliv natočení necelistvostí na charakter odezvy. Zvýšení pravděpodobnosti detekce v místě, kde je předpokládáno působení degradačního mechanismu je zvýšeno zkoušením z polohy 1.

Kapitola 12.5 popisuje pomocí simulace lomených necelistvostí vliv morfologie vady na pravděpodobnost detekce.

10.5. Rozpětí úhlů sondy

Rozpětí úhlů je nastaveno tak, aby byla kontrolována celá oblast zájmu. UZ svazek je vychylován po 1° krocích, což představuje dostatečné rozlišení pro provedení zkoušení vzhledem k (polovičním) úhlům rozevření jednotlivých svazků u zvolených sond, které jsou vypočteny dle vzorce (1):

$$\sin \varphi_{-6 \text{ dB } 13\text{EM-01}} = 0,5 \times 5,9 / (3,5 \times 0,97 \times 19,2) = 2,6^\circ$$

$$\sin \varphi_{-6 \text{ dB } 2\text{L-16A1}} = 0,5 \times 3,2 / (2 \times 0,97 \times 12,0) = 3,9^\circ$$

$$\sin \varphi_{-6 \text{ dB } 5\text{L-16A1}} = 0,5 \times 3,2 / (5 \times 0,97 \times 9,6) = 2^\circ$$

10.6. Zkušenosti personálu a vliv lidského faktoru

Ultrazvuková zkouška může být prováděna a data hodnocena kvalifikovaným personálem v metodě UT minimálně ve stupni 2 dle normy ČSN EN ISO 9712 [30] a s platným pověřením provozovatele jaderné elektrárny k provádění NDT kontrol, jehož vystavení se řídí vnitřními metodickými postupy provozovatele zařízení.

10.7. Detekce necelistvostí

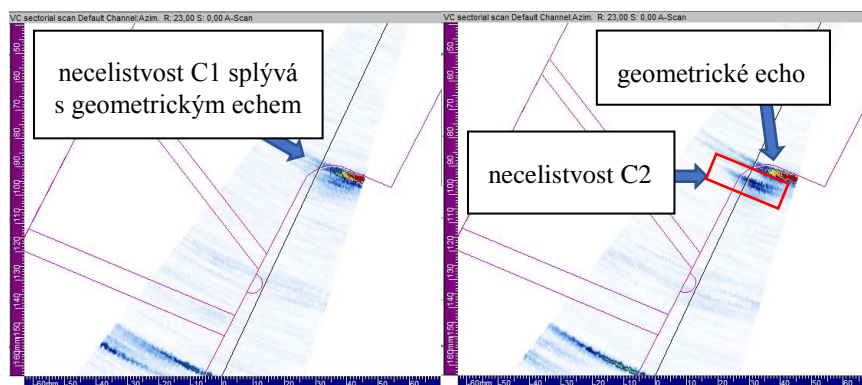
Bylo provedeno hodnocení záznamu dat podle kapitoly 8.3.2. V závislosti na velikosti, umístění a naklonění necelistvosti jsou získány různé odstupy signál/šum. Data jsou uvedena v tab. 15.

Tab. 15: Souhrn hodnocení dat z ultrazvukového zkoušení – detekce necelistvostí

Necelistvost	Detekce Odstup signálu od šumu [dB]			
	Povrch 1 13EM-01	Povrch 2 2L-16A1	Povrch 2 5L-16A1	Povrch 3 13EM-01
D1	43,9	34,7	37,3	28,7
D21	41,2	21,7	35,3	29,8
D3	32,3	39,0	41,8	37,4
D4	40,7	34,9	48,7	40,1
D5	35,7	28,7	40,0	27,6
D6	35,9	28,8	25,6	23,5
D10	43,0	30,4	28,0	27,4
R12	28,5	21,7	20,2	33,2
R13	45,6	26,0	36,9	31,4
R14	46,0	39,8	37,9	30,2
R15	24,6	28,1	45,1	42,8
R17	40,4	31,3	37,3	26,1
R18	35,8	32,5	31,5	18,5
C1	bez detekce	28,9	36,5	17,5
C2	28,4	28,4	40,7	22,0

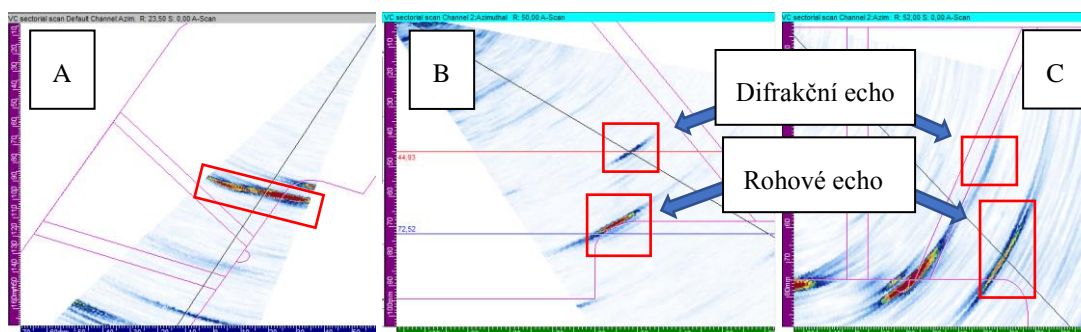
Analýzou naměřených dat jsou stanoveny tyto závěry:

- Sondou z povrchu 1 byly detekovány všechny necelistvosti kromě reálné trhliny C1. Echo od této necelistvosti o výšce 2,8 mm splynulo s geometrickým echem od rádiusu R10. Od reálné necelistvosti C2 o výšce 4,1 mm bylo získáno echo oddělené od geometrického echa a byla umožněna detekce (obr. 52).



Obr. 52: Detekce necelistvosti C1 (vlevo) a v C2 (vpravo) z povrchu 1

- sondou z povrchu 2 byly detekovány indikace všech necelistvostí,
- sondou z povrchu 3 byly detekovány indikace všech necelistvostí.
- Zkoušení z polohy 1 je vhodné zejména pro detekci necelistvostí s velkou výškou, kdy dostáváme oproti zkoušení z povrchu 2 a 3 silný spojitý signál od plochy necelistvosti. Pomocí rozevřeného svazku sondy z povrchu 1 (15° - 35°) lze zachytit přímým odrazem i nakloněné necelistvosti.



Obr. 53: Detekce nakloněné necelistvosti R17, A-zkoušení z povrchu 1, B-zkoušení z povrchu 2, C-zkoušení z povrchu 3

10.8. Hodnocení rozměrů necelistvostí

V souladu s kapitolou 8.3 bylo provedeno hodnocení rozměrů indikací z dat získaných skenováním z povrchu 2 a 3. Hodnocení rozměrů indikací probíhá přednostně vždy sondou nacházející se na stejné straně svarového spoje jako necelistvost. Kompletní výsledky stanovení velikosti necelistvosti jsou uvedeny v příloze 3.

10.9. Závěry hodnocení rozměrů necelistvostí

Výsledky hodnocení naměřených dat ze zkoušení svarového spoje a přilehlé oblasti rádiusu byly porovnány z kvalifikačními kritérii stanovených provozovatelem elektrárny v tab. 16.

Při použití sondy 13EM-01 a 5L-16A1 byla splněna všechna kvalifikační kritéria. Sonda 2L-16A1 nesplnila kvalifikační kritéria z důvodu výrazného podhodnocení necelistvostí R13 a R14. Vzhledem k dosažení lepších výsledků ze stejné polohy sondou 5L-16A1 jsou kritéria přesto považována za splněná. Sonda 2L-16A1 bude pro reálné

zkoušení na tělese kolektoru parogenerátoru vyřazena. Dalšími důvody pro vyřazení této sondy je nižší odstup signálu od šumu při hodnocení necelistvostí, nižší rozlišení ultrazvukového signálu, které je dáno fyzikální podstatou použití nižší frekvence (kapitola 3.3.4.1) a z toho vyplývající menší počet zachycených difrakčních ech oproti sondě 5L-16A1.

Tab. 16: Hodnocení dosažení kvalifikačních kritérií

Popis kritéria	Dosažená hodnota	Splnění kritéria
80% spolehlivost detekce všech podélných necelistvostí typu trhliny obsažených ve zkušebních tělesech s výškou $h \leq 6 \text{ mm}$	Povrch 1: bez detekce necelistvosti C1 detekce 83% necelistvostí s výškou $h \leq 6 \text{ mm}$ Povrch 2: Všechny necelistvosti detekovány Povrch 3: Všechny necelistvosti detekovány	Splněno
100% spolehlivost detekce všech podélných necelistvostí typu trhliny obsažených ve zkušebních tělesech s výškou $h > 6,0 \text{ mm}$	Všechny necelistvosti detekovány	Splněno
hodnocení výšky indikací necelistvostí s maximální odchylkou $\Delta h \pm 5,0 \text{ mm}$	Hodnocení z povrchu 2: Přesnějších výsledků stanovení výšky necelistvostí dosaženo při měření sondou 5L-16A1. Sonda 2L-16A1 nesplnila kritérium. Do splnění kritérií není uvažována. Max. dosažená odchylka: Sonda 5L-16A1: -2,1 mm (C2) Sonda 2L-16A1: -13,4 mm (R13 a R14) Hodnocení z povrchu 3: Max. dosažená odchylka: Sonda 13EM-01: -0,6 mm	Splněno
kvadratická odchylka určení hloubky horního okraje vady nesmí překročit $\text{RMS}_{\text{výška}} \leq 3,2 \text{ mm}$	Hodnocení z povrchu 2: Sonda 2L-16A1 nesplnila kritérium. Do splnění kritérií není uvažována. Sonda 5L-16A1: $\text{RMS}_{\text{výška}} = 1,3 \text{ mm}$ Sonda 2L-16A1: $\text{RMS}_{\text{výška}} = 6,7 \text{ mm}$ Hodnocení z povrchu 3: Sonda 13EM-01: $\text{RMS}_{\text{výška}} = 0,5 \text{ mm}$	Splněno
hodnocení délky indikací necelistvostí s maximální odchylkou $\Delta l \pm 20,0 \text{ mm}$	Hodnocení z povrchu 1: Sonda 13EM-01: $\Delta l = +13,5 \text{ mm (C2)}$ Hodnocení z povrchu 2: Přesnějších výsledků stanovení délky necelistvostí dosaženo při měření sondou	Splněno

	<p>2L-16A1. Sonda 5L-16A1: $\Delta l = -8,3 \text{ mm}$ (R13) Sonda 2L-16A1: $\Delta l = -10,1 \text{ mm}$ (R13)</p> <p>Hodnocení z povrchu 3: Sonda 13EM-01: $\Delta l = +5,5 \text{ mm}$ (D21)</p>	
<p>maximální střední kvadratická odchylna určení délky vad $RMS_{\text{délka}} \leq 12,0 \text{ mm}$</p>	<p>Hodnocení z povrchu 1: Sonda 13EM-01: $\Delta l = 8,9 \text{ mm}$</p> <p>Hodnocení z povrchu 2: Přesnějších výsledků stanovení délky necelistvosti dosaženo při měření sondou 2L-16A1. Sonda 5L-16A1: $RMS_{\text{délka}} = 5,1 \text{ mm}$ Sonda 2L-16A1: $RMS_{\text{délka}} = 5,4 \text{ mm}$</p> <p>Hodnocení z povrchu 3: $RMS_{\text{délka}} = 4,4 \text{ mm}$</p>	Splněno
<p>nejvyšší povolená odchylna umístění necelistvosti po obvodu $\Delta p \pm 20,0 \text{ mm}$ Poloha necelistvosti je určena na vnějším povrchu.</p>	<p>Hodnocení z povrchu 1: Sonda 13EM-01: $\Delta p = -13,9$ (D4)</p> <p>Hodnocení z povrchu 2: Přesnějších výsledků stanovení délky necelistvosti dosaženo při měření sondou 2L-16A1. Sonda 5L-16A1: $\Delta p = -11,3 \text{ mm}$ (D10) Sonda 2L-16A1: $\Delta p = -8,6 \text{ mm}$ (R14)</p> <p>Hodnocení z povrchu 3: Sonda 13EM-01: $\Delta p = -10,4 \text{ mm}$ (D1)</p>	Splněno
<p>maximální střední kvadratická odchylna určení umístění necelistvosti $RMS_{\text{umístění}} \leq 10,0 \text{ mm}$</p>	<p>Hodnocení z povrchu 1: Sonda 13EM-01: $RMS_{\text{poloha}} = 7,9 \text{ mm}$</p> <p>Hodnocení z povrchu 2: Sonda 5L-16A1: $RMS_{\text{poloha}} = 6,5 \text{ mm}$ Sonda 2L-16A1: $RMS_{\text{poloha}} = 5,3 \text{ mm}$</p> <p>Hodnocení z povrchu 3: Sonda 13EM-01: $RMS_{\text{poloha}} = 6,0 \text{ mm}$</p>	Splněno

Střední kvadratické hodnoty odchylky (Root-Mean-Square error) byly vypočteny pomocí uvedeného vzorce:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (U_i - V_i)^2}{n}} \quad (4)$$

kde: U_i je skutečná velikost, V_i je naměřená velikost, n je počet měření

11. Výsledky reálného měření na zkušebním tělese

Kompletní dosažené výsledky analýzy naměřených dat na zkušebním tělese svaru kolektoru parogenerátoru a rádiusu R10 jsou uvedeny v příloze 3. V tab. 18 a 19 jsou vyjmuty hodnoty dosažených odchylek stanovení rozměrů umělých necelistvostí ve zkušebním tělese.

11.1. Analýza dat zkoušení z povrchu 1 a 3 sondou 13EM-01

Hodnocením dat z povrchu 1 byl vzhledem k pozici sondy stanoven pouze délkový rozměr a poloha necelistvostí. Přínos zkoušení z polohy 1 spočívá zejména ve schopnosti detekce rozměrných necelistvostí přímým odrazem a snižuje se pravděpodobnost záměny slabého difrakčního echa při zkoušení z polohy 2 s místy s lokálně zvýšeným šumem (viz kapitola 10.7).

Rozměry necelistvostí z povrchu 3 byly hodnoceny s velkou přesností stanovení výšky necelistvostí.

Tab. 17: Dosažené odchylky od skutečných rozměrů necelistvostí při zkoušení sondou 13EM-01

necelistvost	13EM-01		
	odchylka určení délky [mm]		odchylka určení výšky [mm]
	povrch 1	povrch 2	povrch 2
D3	-3,2	4,7	-0,5
D4	-1,2	3,0	-0,6
D6	10,8	10,8	-0,9
D10	0,0	0,6	-2,3
R12	4,7	-5,3	3,3
R13	11,2	-3,8	-2,4
R14	6,0	-8,8	-5,4
D1	12,5	-4,0	-0,3
D21	10,6	5,5	-0,6
R17	-1,4	14,6	5,6
D5	8,6	4,7	4,9

necelistvost	13EM-01		
	odchylka určení délky [mm]		odchylka určení výšky [mm]
	povrch 1	povrch 2	povrch 2
R15	4,0	-6,6	9,3
R18	5,0	-8,1	4,2
C1 215BIB5543	bez detekce	10,9	8,4
C2 281BIB5588	13,5	4,9	7,0

Pozn.: Šedivě jsou vyznačeny hodnoty, které byly získány hodnocením necelistvostí přes svarový spoj. V případě zkoušení z povrchu 2 nejsou tyto hodnoty zahrnuty do plnění kvalifikačních kritérií, jelikož hodnocení indikací přes svarový spoj se dle kapitoly 8.3.4 neprovádí.

11.2. Analýza dat zkoušení z povrchu 2 sondami 2L16-A1 a 5L-16A1

U obou sond je při hodnocení výšky necelistvostí přes svarový spoj pozorovatelný nárůst odchylky stanovení rozměru necelistvostí způsobený rozptylem ultrazvukového svazku. Sonda 2L16-A1 vzhledem k odchylkám ve stanovení výšky necelistvostí nesplnila kvalifikační kritéria (viz kapitola 10.9).

Tab. 18: Dosažené odchylky od skutečných rozměrů necelistvostí při zkoušení sondou 2L-16A1 a 5L-16A1

Necelistvost	Zkoušení z povrchu 2			
	2L-16A1		5L-16A1	
	Odchylka určení výšky [mm]	Odchylka určení délky [mm]	Odchylka určení výšky [mm]	Odchylka určení délky [mm]
D3	11,8	-21,1	5,6	-6,9
D4	-1,9	-22,9	6,1	-4,2
D6	-3,1	-4,4	-1,2	1,9
D10	-4,3	-3,0	-1,3	-4,7
R12	-3,5	-2,6	-0,1	5,4
R13	-13,4	-10,1	-2,0	-8,3
R14	-11,4	7,8	-1,2	1,0
D1	10,4	0,5	8,7	6,7
D21	3,8	-2,6	-6,0	0,1
R17	3,5	-9,4	-0,9	-5,9
D5	0,4	-3,3	0,5	-7,7

Necelistvost	Zkoušení z povrchu 2			
	2L-16A1		5L-16A1	
	Odchylka určení výšky [mm]	Odchylka určení délky [mm]	Odchylka určení výšky [mm]	Odchylka určení délky [mm]
R15	0,4	2,3	1,2	1,4
R18	2,0	-0,9	1,6	-4,5
C1 215BIB5543	2,0	-4,2	-0,3	-6,0
C2 281BIB5588	-0,4	-2,2	-2,1	-2,2

Pozn.: Šedivě jsou vyznačeny hodnoty, které byly získány hodnocením necelistvostí přes svarový spoj. V případě zkoušení z povrchu 2 nejsou tyto hodnoty zahrnuty do plnění kvalifikačních kritérií, jelikož hodnocení indikací přes svarový spoj se dle kapitoly 8.3.4 neprovádí.

12. Ověření navrženého NDT systému pomocí simulací zkoušení

Cílem této kapitoly je splnění požadavku ENIQ Report nr. 31 [31], kdy je v případě provedení praktických zkoušek na zjednodušených tělesech obsahující jiskřené necelistvosti nutné výsledky zkoušení extrapolovat do reálné situace technickým zdůvodněním a modelováním (provedení simulací).

Postup validace simulace s reálně získanými daty a analýza výsledků simulace je provedena pro jednu vybranou necelistvost R14 hodnocenou z povrchu 2. Důvodem je fakt, že provedení plného rozsahu validace, simulování a predikce výsledků zkoušení je samostatným tématem diplomové práce.

12.1. Postup simulace

V první etapě je nutné provést simulaci necelistvosti vyrobené ve zkušebním tělese a docílit korelace výsledků vhodným nastavením parametrů simulace s reálnými výsledky zkoušení. V druhé etapě budou vytvořeny různé varianty necelistvosti R14 simulující reálné šíření v materiálu a provedena analýza (posouzení schopnosti detekce) získaných odchylek poklesu echa ultrazvukového signálu oproti vyrobené necelistvosti. Uvedený postup je proveden v tomto sledu činností:

- Vytvoření modelu tělesa,
- vložení semi-eliptické necelistvosti R14 do modelu tělesa a provedení výpočtu simulace,
- porovnání echa simulované a reálné necelistvosti – verifikace simulace na reálné podmínky,
- vytvoření modelu lomené necelistvosti v různých variantách šíření materiálem a provedení výpočtu simulace,
- posouzení schopnosti detekce různých variant lomené a semi-eliptické necelistvosti R14.

12.2. Nastavení a parametry simulace

Návrh zkušební tělesa odpovídá reálné geometrii na základě výrobní dokumentace. Výkres komponenty (varianta ½V svar) se zjednodušenou geometrií je vytvořena v souladu s kapitolou 4.1 (obr. 26). Zkušební těleso je vzhledem k velkému průměru a zanedbatelnému zakřivení povrchu uvažováno jako rovinné.

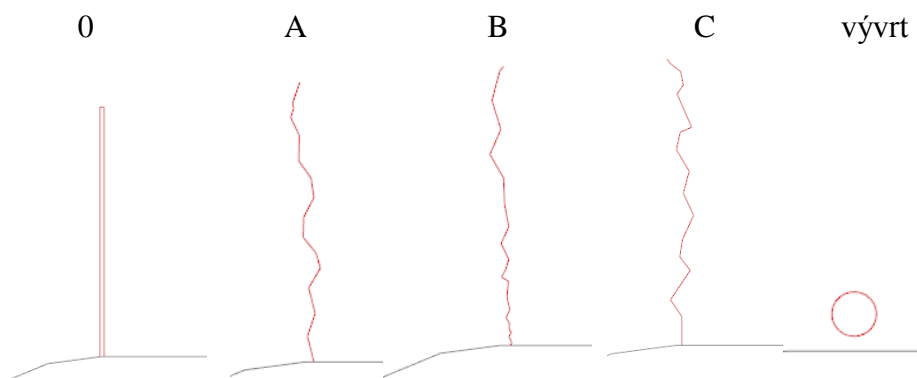
Do simulace je vybrána necelistvost R14 v oblasti rádiusu o výšce 12,0 mm dle tab. 8.

Rozměry modelované necelistvosti jsou hodnoceny z povrchu 2. Proto bude do simulace zkoušení použita sonda 5L-16A1 s nastavením, které je v souladu se základními parametry sondy (tab. 9) a nastavením PA calculator (příloha 2).

12.3. Modelování necelistvosti

Pro verifikaci simulace na reálné podmínky je nutné nejdříve modelovat necelistvost odpovídající reálné necelistvosti ve zkušebním tělese (varianta necelistvosti 0, obr. 54).

Pro posouzení odezvy od necelistvostí, které svým tvarem lépe vystihují průběh šíření materiálem, jsou do modelu tělesa uvažovány lomené necelistvosti (varianta A, B, C, obr. 54). Sklon a velikosti elementárních plošek se mění, celková výška necelistvosti R14 zůstává stejná.



Obr. 54: Varianty simulovaných necelistvostí v software CIVA

Detekce necelistvostí při reálném měření je odvozena od úrovně signálu necelistvosti vůči šumu vznikající od mikrostruktury polykrystalického materiálu a nehomogenity materiálu. Modelování šumu v materiálu a svaru je v programu CIVA obtížné a pro stanovení její úrovně silně problematické.

Intenzita dosažené odezvy od simulovaných necelistvostí je v programu CIVA zobrazena v jednotkách pts. Takto odměřenou hodnotu od modelovaných necelistvostí je nutné vztáhnout k referenční úrovni od bočního vývrtu o průměru 3 mm v hloubce odpovídající oblasti zájmu: 70 mm (varianta necelistvosti D, obr. 54). Poté jsme schopni porovnáním dosažených intenzit od umělých necelistvostí a referenční hodnoty od bočního vývrtu vyjádřit odstup signálu v decibelových jednotkách a posuzovat schopnost detekce necelistvosti v reálných podmínkách.

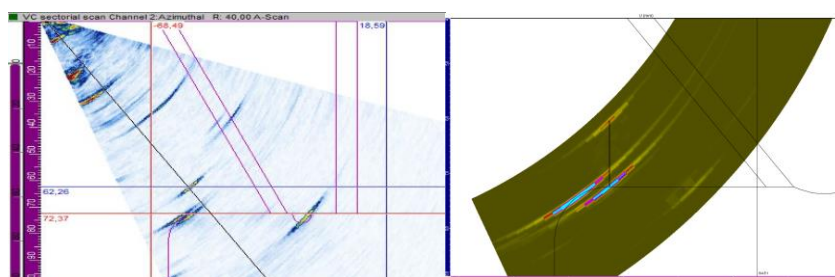
12.4. Výsledky simulace zkoušení sondou 5L-16A1

Hodnota amplitudy simulovaného bočního vývrtnu v hloubce 70 mm je 0,136 pts.

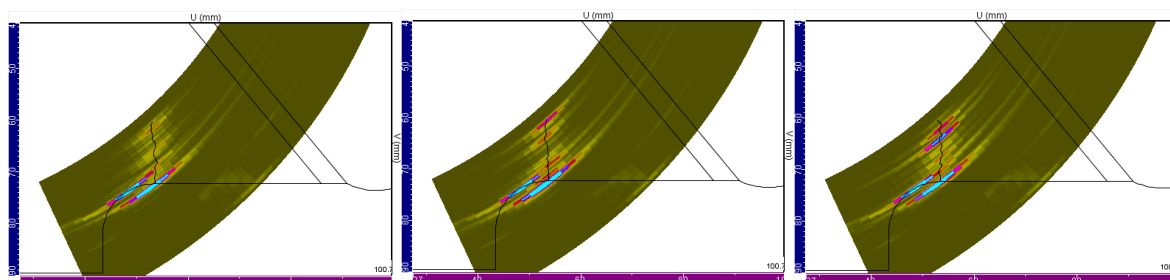
Tato hodnota byla pro simulované varianty necelistvosti R14 nastavena jako referenční úroveň. Získané odstupy od referenční úrovně jsou uvedeny v tab. 21 pomocí vztahu (5):

$$\Delta V = 20 \cdot \log P_1 / P_2 \text{ [dB]} \quad (5)$$

Kde: P – rozdíl výšek ech v jednotkách pts, nebo procentech obrazovky



Obr. 55: Porovnání charakteru odezvy od necelistvosti R14 při reálném zkoušení a simulaci z povrchu 2 sondou 5L-16A1



Obr. 56: Charakter odezvy od modelované necelistvosti ve variantě A, B, C

Tab. 19: Velikosti odezvy od bočního vývrtnu o $\varnothing 3$ mm

Varianta defektu	Odstup signálu Rohový odraz/ Vývrt	Odstup signálu Vrchol necelistvosti/ referenční hodnota
0	0,169 pts +1,7 dB	0,044 pts -9,8 dB
A	0,284 pts +6,4 dB	0,040 pts -10,6 dB
B	0,395 pts +9,3 dB	0,083 pts -4,2 dB
C	0,279 pts +6,2 dB	0,070 pts -5,8 dB
R14	Data 2: 0 dB	Data 2: -12db

12.5. Interpretace dosažených výsledků

Charakter odezvy (tvar a umístění echa) od necelistvostí modelovaných v software CIVA 2017 a výsledků zkoušení na zkušebním tělese vykazuje vysokou shodu (obr. 54). Dominantní signál je získán rohovým odrazem, který se nachází v blízkosti signálu od geometrie rádiusu R10. Dobře patrný je signál od horního okraje necelistvosti (viz tab. 19). Intenzita odezvy získaná při simulaci a reálném zkoušení se od referenční úrovně liší o 2,2 dB. Na základě těchto zjištění lze konstatovat, že model vytvořený v software CIVA 2017 je validován pro použití na zkoušené komponentě.

Validace byla provedena na základě srovnání parametrů simulovaných necelistvostí a umělých necelistvostí vyrobených ve zkušebním tělese:

- Referenční hodnotu uvažujeme jako velikost signálu od vývrtu nastavenou na 80% obrazovky
- Z reálných naměřených dat víme, že hodnota šumu od materiálu se pohybuje při nastavení referenční úrovně do 5% obrazovky.
- Decibelový rozdíl poklesu velikosti echa z 80% na 5% obrazovky odpovídá podle vzorce (5) -24 dB. Při podkročení této úrovně zcela zaniká signál od necelistvosti v uvažovaném šumu materiálu. Z výsledků uvedených v tab.21 je patrné, že i nejslabší difrakční signál od uvažovaných variant lomených necelistvostí je nad úrovní pro registraci.

13. Diskuze výsledků

Navrženým NDT systémem byly detekovány všechny vady, kromě necelistvosti C1 (výšky 2,8 mm) nacházející se v oblasti rádiusu z povrchu 1 z důvodu splynutí echa s geometrickým echem pocházející od rádiusu R10. Tato necelistvost je detekována z povrchu 2 i z povrchu 3, který není primárně určen pro detekci a hodnocení necelistvostí nacházejících se za osou svaru.

Zkoušení z povrchu 1 slouží pro potvrzení detekce indikací necelistvostí (vyvrácení falešných indikací) z povrchu 2 a 3.

Sonda 2 MHz byla zvolena z důvodu vyšší pravděpodobnosti detekce indikací od necelistvostí vlivem rozevření svazku a lepší prozvučovací schopností sondy. Na základě experimentálních výsledků bylo prokázáno, že i při splnění podmínek detekce bylo dosaženo nižší přesnosti při stanovení rozměrů necelistvostí a zkoušení touto sondou nesplnilo kvalifikační kritéria. Toto bylo způsobeno rozměrem měniče sondy, který byl volen na základě prostorových omezení pro přiložení sondy na zkoušenou komponentu.

Pomocí simulací v software CIVA 2017 byla prokázána citlivost systému na předpokládané vyrobené necelistvosti R14 a tím byla splněna podmínka extrapolace výsledků dle ENIQ Report nr. 31 [31].

14. Závěr

V diplomové práci byly popsány všechny vstupní informace potřebné k provedení kvalifikace NDT systému. Vstupní informace zahrnovaly popis kontrolního místa a působení degradačních mechanismů, které vychází ze zkušeností na provozovaných elektrárnách VVER-1000 ve světě.

Na základě vstupních informací byl navržen systém nedestruktivního zkoušení takovým způsobem, aby splňoval podmínky na citlivost systému určeného provozovatelem zařízení.

Navržený NDT systém (postup zkoušení) byl podroben analýze za účelem zjištění splnění kritérií pro kontrolní místo. Vhodnost postupu zkoušení byla prokázána na základě teoretických a praktických důkazů v souladu s doporučením Evropské sítě pro inspekce a kvalifikace (ENIQ).

Teoretické důkazy byly hodnoceny za pomoci analýzy ovlivňujících parametrů. Praktické důkazy byly doloženy výsledky laboratorního zkoušení na navrženém zkušebním tělese svaru kolektoru parogenerátoru s přílehlým rádiusem R10.

Zkušební těleso bylo navrženo v souladu s pokyny pro návrh zkušebních kvalifikačních těles – ENIQ: Recommended Practice 5 [17] s uvážením výpočtu kritických velikostí vad [3].

Ovlivňující parametry systému NDT zkoušení budou využity jako podklad pro vypracování jednoznačného inspekčního postupu realizace kontroly dané komponenty na JE Temelín.

Výsledky laboratorních testů byly porovnány s kritérii stanovených držitelem povolení. Navržený NDT systém po konečném hodnocení splňuje kvalifikační požadavky navržený provozovatelem.

Zároveň byla provedena extrapolace naměřených ultrazvukových dat do reálného prostředí pomocí software CIVA 2017.

Použitá literatura

- [1] KUSÝN, Libor. *Program provozních kontrol základního materiálu, svarových spojů a návaru parogenerátoru typu PGV 1000M na I. A II. bloku ČEZ, a.s., Jaderné elektrárny Temelín, Příloha IPZJ BT1/3. revize 4.* Ostrava - Vítkovice: 2017.
- [2] *Bezpečnost jaderných zařízení: požadavky a návody: Předpis pro kontrolu svarových spojů a návaru uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů PK 1514-72, ČSKAE, Ústřední informační středisko pro jaderný program, Zbraslav: 1976.*
- [3] JURÁŠEK, Ladislav. *Provedení pružně-plastického výpočtu svarového spoje kolektoru PG s pláštěm, 5474/14. revize 1.* Ústav aplikované mechaniky, Brno: 2015.
- [4] VODĚROVÁ, Milena a kol. *Koroze a protikorozi ochrana. Revize 1.* ATG Praha, 2015.
- [5] ERTL, Jakub. *Popis potencionálních degračních mechanismů - volná příloha E. Revize 3.* ČEZ, a.s., 2017
- [6] O'REGAN, Patrick, MOODY, Jim, LOTMAN, Jan, SANDSTADT, Johan. *Using the EPRI Risk-Informed ISI Methodology on Piping Systems in Forsmark 3, Swedish Radiation Safety Authority. Stockholm: 2010. ISSN: 2000-0456*
- [7] POVAROV, V. *Analysis of damaged welds no. 111 in the PGV-1000 steam generator and damage repair proposals, Novovoronezh NPP, Branch Department of JSC. Russia: 2016.*
- [8] BYSTRIANSKÝ, Jaroslav. *Stanovisko k možnému vlivu kontaktu oceli 10GN2MFA a tuhých fází bohatých uhlíkem - grafitem. Revize 1.* Zpráva VŠCHT Praha, 2013.
- [9] ISO 24497-1:2007: *Non-destructive testing -- Metal magnetic memory -- Part 1: Vocabulary.* Switzerland: ISO copyright office, Geneva, 2007, 4 s.
- [10] KOPEC, Bernard a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, Akademické nakladatelství CERM, 2008, ISBN: 978-80-7204-591-4*
- [11] REGAZZO, Richard, REGAZZOVÁ Marcela. *Základy ultrazvuku, Skripta pro ultrazvukové kurzy UT-1, UT-2, UT-3 a studium základů. Revize 2.* Zeleneč, 2012.
- [12] ŽBÁNEK, Petr a kol. *Ultrazvuková metoda stupeň II – Phased array. Verze dokumentu 0.91.* ATG Praha, 2015.
- [13] SHULL, J. Peter. *Nondestructive Evaluation: theory, techniques, and applications, 2002, ISBN: 0-8247-8872-9*
- [14] *UW Courses Web Server* [online]. Copyright ©t [cit. 26.02.2019]. Dostupné z: <https://courses.washington.edu/bioen508/Lecture6-US.pdf>
- [15] EMSP: Current Projects. [online]. Copyright © [cit. 28.02.2019]. Dostupné z: https://www.emsp.tu-berlin.de/menue/forschung_research/current_projects/ultrasonic_phased_array_for_investigations_of_concrete_components/
- [16] *ASM Handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation and quality control, ASM International, 1989. ISBN: 0-87170-007-7*

- [17] Which seismic wave is the most dangerous? Why? - Quora. *Quora - A place to share knowledge and better understand the world* [online]. Dostupné z: <https://www.quora.com/Which-seismic-wave-is-the-most-dangerous-Why>
- [18] *Civa 10 User Manual*. 854 s., Saclay : CEA: 2010.
- [19] DE SMET, Michael, DOMBRET, Philippe, STIJN, Michiels, NEUPAUER, Juraj, REAL RUBIO, Ignacio, SCHERRER, Michael, TSVETKOV, Elenko, MARTIN, Oliver. *ENIQ Recommended practice 5: Guidelines for the Design of Test Pieces and Conduct of Test Piece Trials*, Revize 2, Lucembursko, Publications Office of the European Union, 2011, ISBN 978-92-79-20613-9.
- [20] NEUPAUER, Juraj, DUXBURY, David, MAREŠ, Pavel, MARTIN, Etienne, PEREZ, Samuel, MARTIN, Oliver. *ENIQ Recommended practice 6: The Use of Modelling in Inspection Qualification*, Revize 3, Brusel, The NUGENIA Association 2018, ISBN 978-2-919313-17-4.
- [21] CIORAU, Peter, LAM, Jessica David. *A contribution to lenght sizing of saturated amplitud efor conventional and Phased array ultrasonic techniques*, [online]. Copyright © [cit. 05.05.2019]. Dostupné z: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2011/1_Ciorau.pdf
- [22] *Phased array probes and wedges, Probe Catalog*, USA, Olympus 2016, P/N: 920-165-EN Rev. E
- [23] JIREH Industries. *Let JIREH Industries help you perform efficient inspection for every UT application*. [online]. Copyright © 2019 JIREH Industries. All rights reserved. [cit. 10.05.2019]. Dostupné z: <https://www.jireh.com/products/rotix-4-probe-weld-scanner-w-pps/>
- [24] ČSN EN ISO 18563-1. *Nedestruktivní zkoušení – Charakterizace a ověřování ultrazvukového phased array zařízení – Část 1: Přístroje*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 40 s. Třídící znak 01 5063
- [25] ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. *Zvláštní případy zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, Příklad 9/2016, Obecná metodika hodnocení přípustnosti nalezených indikací během provozu na zařízeních a potrubních systémech JE*, Asociace strojních inženýrů, 2016, Identifikační číslo: NTD ASI – ZP – 9 – 2016
- [26] ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. *Zvláštní případy zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, Sekce zvláštní případy - Příloha X – schematizace necelistvostí*, Asociace strojních inženýrů, 2016
- [27] ERIKSSON, A., WHITTLE, J. *ENIQ Recommended practice 1: Influential/essential parameters*, Revize 2, Lucembursko, Office for Official Publications of the European Communities, 2005, EUR 21751 EN.
- [28] ČSN EN ISO 18563-3. *Nedestruktivní zkoušení – Charakterizace a ověřování ultrazvukového phased array zařízení – Část 3: Kompletní zkušební zařízení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 36 s. Třídící znak 01 5063
- [29] ČSN EN ISO 13588. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Využití automatizované techniky phased array*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 20 s. Třídící znak 05 1175

- [30] ČSN EN ISO 9712. *Nedestruktivní zkoušení – Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 36 s. Třídící znak 01 5004
- [31] EUROPEAN NETWORK FOR INSPECTION AND QUALIFICATION. *ENIQ Report nr. 31*, Revize 3, Copyright ©European Communities [cit. 16.05.2019] European Communities, 2007, ISSN 1018-5593

Seznam obrázků

Obr. 1: Poloha svarového spoje a přilehlého rádiusového přechodu R10 na parogenerátoru (vlevo), detail provedení svarového spoje včetně kapsy kolektoru s oblastí rádiusu R10 (vpravo)	12
Obr. 2: Konstrukční provedení PG11 svar typu V ½ V	13
Obr. 3: V PG12-PG24 svar typu ½ V	13
Obr. 4: Přístup ke zkoušení svarového spoje kolektoru parogenerátoru (varianta ½V svar)...	14
Obr. 5: Prozvučení oblasti vnitřního povrchu kapsy parogenerátoru sondami 45°	17
Obr. 6: Prozvučení oblasti vnitřního povrchu kapsy parogenerátoru sondami 60°	17
Obr. 7: Prozvučení oblasti vnitřního povrchu kapsy parogenerátoru přímými sondami s předsádkou s úhlem lomu 25°	17
Obr. 8: Výkres referenční měrky s vývrtem s plochým dnem Dn=2,5 mm pro kalibraci sondy MB4S s předsádkou 25°	18
Obr. 9: Místo výskytu nálezu trhlin v kapsách kolektoru parogenerátoru z Ruské federace a Ukrajiny [7]	20
Obr. 10: Nálezy trhlin v kapsách kolektoru parogenerátoru Novovoronežské a Jihoukrajinské elektrárny [7]	20
Obr. 11: Usazeniny nalezené během endoskopické kontroly prostoru kapes kolektoru na JE Temelín.....	22
Obr. 12: Konstrukční provedení hlavního cirkulačního potrubí v Ruské Federaci (vlevo; tzv. malá série) a provedení na elektrárně Temelín (vpravo; tzv. velká série)	22
Obr. 13: Modelovaná trhlina a značení charakteristických rozměrů [3].....	23
Obr. 14: Vizualizace trhlin v tělese uvažované pro výpočty: vlevo zobrazení celoobvodové trhliny s poměrem stran $a/c \approx 0$, vpravo zobrazení trhliny s poměrem stran $a/c > 0$ [3].....	23
Obr. 15: Odraz ultrazvukového signálu od plošné vady (vlevo) a objemové vady (vpravo) ..	26
Obr. 16: Vizualizace rohového odrazu ultrazvukového svazku od reflektoru orientovaného kolmo k povrchu zpět do sondy a vliv náklonu necelistvosti vůči ultrazvukové sondě. Poloha A – necelistvost orientovaná kolmo k vnitřnímu povrchu, poloha B,C – náklon necelistvostí způsobující pokles nebo zesílení získaného ultrazvukového signálu.....	27
Obr. 17: Šíření ultrazvukového svazku úhlové sondy [11].....	27
Obr. 18: Sekvence buzení (časová prodleva) měničů pro generování ultrazvukového svazku pod úhlem [14,15]	28
Obr. 19: Sekvence buzení (časová prodleva) měničů pro generování fokusovaného ultrazvukového svazku [14, 15]	28
Obr. 20: Šíření podélných vln v prostředí [17]	30
Obr. 21: Šíření příčných vln v prostředí [17]	30
Obr. 22: Šíření povrchových Rayleyho vln v prostředí [17].....	30
Obr. 23: Rozměry měniče Phased array sondy s vizualizací předsádky	31

Obr. 24: Uspořádání měniče do 1D pole (vlevo) a 2D pole (vpravo). Souřadnice x reprezentuje aktivní aperturu, souřadnice y aperturu pasivní	32
Obr. 25: Útlum ultrazvukového signálu způsobený rozptylem a) žádný prokazatelný rozptyl, b) rozptyl např. odrazem a lomem na hranici zrn	33
Obr. 26: CAD výkres rovinné součásti s barevným rozlišením jednotlivých entit a jeho zobrazení v programu CIVA	34
Obr. 27: Označení různých částí svaru používaných k popisu svaru a jejich zkratky [18].....	35
Obr. 28: Možné podoby simulovaných necelistvostí v softwaru CIVA a) větvená necelistvost, b) lomená necelistvost, c) poloeliptická necelistvost, d) planární 2D necelistvost.....	35
Obr. 29: Rozsah ultrazvukového zkoušení svarového spoje typu ½ V zaměřených na detekci trhlin	36
Obr. 30: Rozsah ultrazvukového zkoušení svarového spoje typu V zaměřených na detekci trhlin	36
Obr. 31: Zkušební těleso kontrol svaru kolektoru parogenerátoru.....	37
Obr. 32: Zařízení pro snímání a ukládání dat Zetec Topaz 32	39
Obr. 33: Příklad hodnocení délky indikace s různým zesílením signálu nad referenční úroveň a stupněm saturace a) zesílení +14dB, stanovená délka 41 mm, b) zesílení +6dB, stanovená délka 37 mm, c) bez zesílení, stanovená délka 32,6 mm, d) zeslabení signálu -2 dB, stanovená délka 31,5 mm [21]	40
Obr. 34: Sonda Olympus 5L-16A1 s předsádkou SA1-N45S-IHC	42
Obr. 35: Sonda HQ Sonics 13EM-01 s předsádkou HQS PA P68-1	42
Obr. 36: Schéma rozměrů měniče sondy a předsádky [22].....	42
Obr. 37: Referenční měrka navržená pro zkoušení svaru kolektoru parogenerátoru.....	43
Obr. 38: Manipulátor ROTIX [23].....	44
Obr. 39: Manipulátor ROTIX nasazený na zkušebním tělese se svarem 94, 95 kolektoru parogenerátoru.....	44
Obr. 40: Polohy sond pro zkoušení svarového spoje a oblasti rádiusu kolektoru parogenerátoru.....	45
Obr. 41: Pohyb sond při kontrolách svaru.....	45
Obr. 42: Určení souřadnicového systému pro zkoušení svarového spoje kolektoru parogenerátoru.....	46
Obr. 43: Pokrytí zkoušeného objemu sondou 13EM-01 v úhlovém rozmezí 15°-35°	47
Obr. 44: Pokrytí zkoušeného objemu sondou 2L-16A1 a 5L-16A1 v úhlovém rozmezí 30°-75°	47
Obr. 45: Pokrytí zkoušeného objemu sondou a 13EM-01 v úhlovém rozmezí 10°-80°	47
Obr. 46: Ukázka C-zobrazení při kontrole funkčnosti elementů. vlevo – funkční sonda, vpravo nefunkční jeden element.....	48
Obr. 47: Ukázka zobrazení ultrazvukových dat pro analýzu v softwaru Ultravision	50

Obr. 48: Výška necelistvosti určená technikou poklesu signálu z S-zobrazení	51
Obr. 49: Tvar podpovrchových a povrchových schematizovaných indikací [25]	52
Obr. 50: Re-schematizace podpovrchové a povrchové trhliny [26].....	52
Obr. 51: Výška necelistvosti určená technikou poklesu signálu z S-zobrazení	53
Obr. 52: Detekce necelistvosti C1 (vlevo) a v C2 (vpravo) z povrchu 1	61
Obr. 53: Detekce nakloněné necelistvosti R17, A-zkoušení z povrchu 1, B-zkoušení z povrchu 2, C-zkoušení z povrchu 3.....	61
Obr. 54: Varianty simulovaných necelistvosti v software CIVA.....	67
Obr. 55: Porovnání charakteru odezvy od necelistvosti R14 při reálném zkoušení a simulaci z povrchu 2 sondou 5L-16A1	68
Obr. 56: Charakter odezvy od modelované necelistvosti ve variantě A, B, C.....	68

Seznam tabulek

Tab. 1: Prostorová omezení pro umístění sond z vnějšího povrchu kolektoru	14
Tab. 2: Chemické složení oceli 10GN2MFA.....	15
Tab. 3: Parametry sond pro zkoušení ultrazvukovou kontrolou	16
Tab. 4: Chemické složení úsad v oblasti kapes kolektoru parogenerátoru JE Temelín [8]	22
Tab. 5: Kritické velikosti trhlin pro PG s V svarem [3].....	23
Tab. 6: Kritické velikosti trhlin pro PG s půl-V svarem [3]	24
Tab. 7: Návrh distribuce umělých necelistvostí ve zkušebním tělese pro otevřené testy v oblasti rozhraní svaru a nátrubku kolektoru.....	38
Tab. 8: Návrh distribuce umělých necelistvostí ve zkušebním tělese pro otevřené testy v oblasti rádiusu	38
Tab. 9: Základní údaje sondy a předsádky [22]	41
Tab. 10: Analýza ovlivňujících / základních parametrů svarového spoje.....	54
Tab. 11: Analýza ovlivňujících / základních parametrů předpokládaných vadových necelistvostí.....	55
Tab. 12: Analýza ovlivňujících / základních parametrů postupu zkoušení.....	55
Tab. 13: Analýza ovlivňujících / základních parametrů použitého zařízení	57
Tab. 14: Analýza ovlivňujících / základních parametrů použitého Phased array defektoskopu	58
Tab. 15: Souhrn hodnocení dat z ultrazvukového zkoušení – detekce necelistvostí	60
Tab. 16: Hodnocení dosažení kvalifikačních kritérií	62
Tab. 17: Dosažené odchylky od skutečných rozměrů necelistvostí při zkoušení sondou 13EM-01	64

Tab. 18: Dosažené odchylky od skutečných rozměrů necelistvostí při zkoušení sondou 2L-16A1 a 5L-16A1..... 65

Tab. 19: Velikosti odezev od bočního vývrtnu o $\varnothing 3$ mm 68

Seznam grafů

Graf 1: Závislost frekvence sondy na rozlišovací schopnosti – teoretická nejmenší detekovatelná vada. 29

Seznam příloh

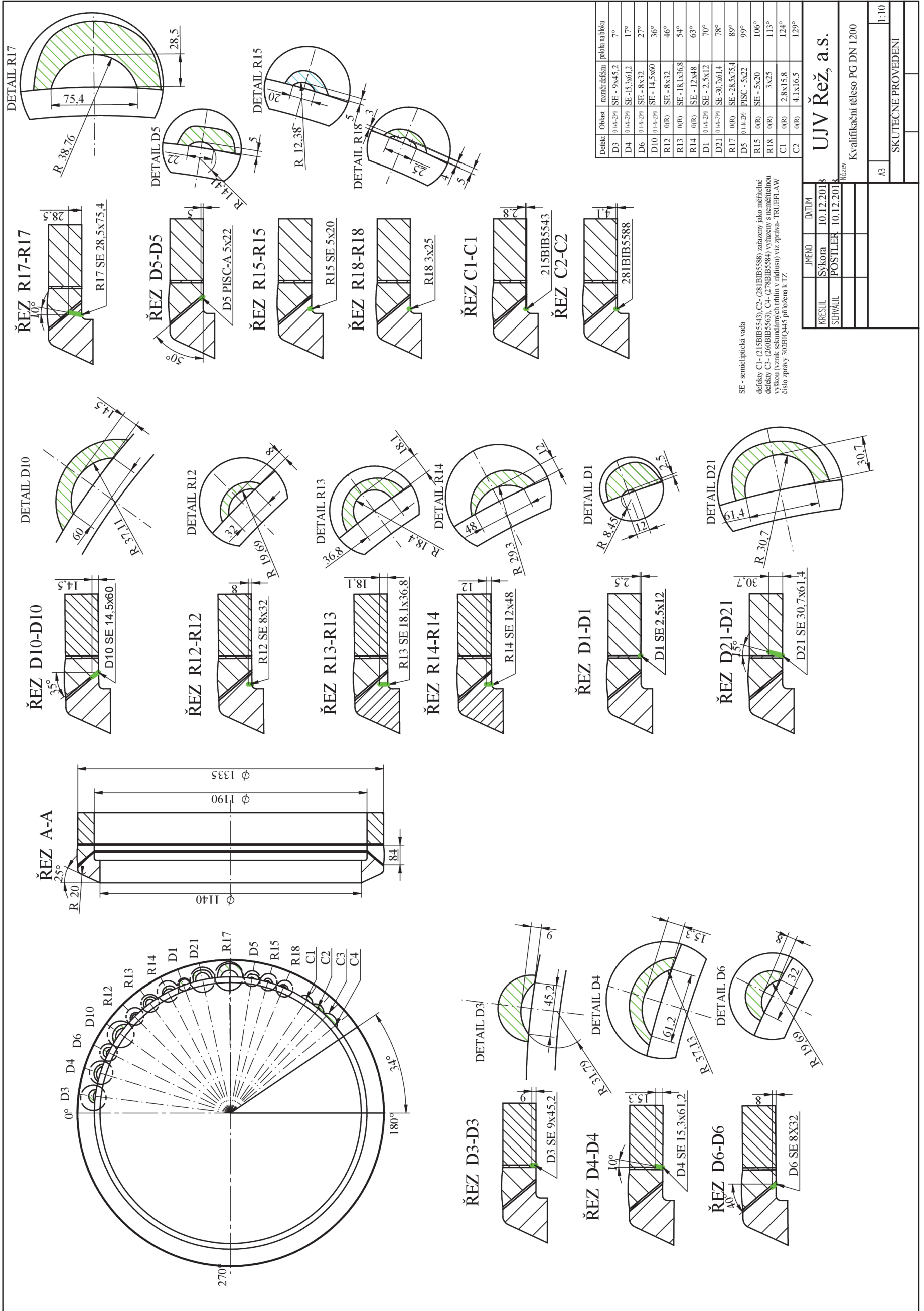
Příloha 1 I

Příloha 2..... III

Příloha 2..... X

PŘÍLOHA č. 1

**Výkres zkušebního tělesa kolektoru parogenerátoru s vyrobenými
jiskřenými necelistvostmi**



PŘÍLOHA č. 2

**Nastavení PA calculator v software Ultravision a nastavení přístroje
TOPAZ: UT a Mechanical settings pro jednotlivé sondy**

Nastavení ultrazvukové sondy 2L-16A1 – PA Calculator

Probe		Wedge	
Type	1-D Linear array	Wedge Type	Solid
Configuration	Pulse-Echo	Wedge Definition mode	Fixed wedge path
Transmitter wave type	Shear	Wedge angle	31°
Receiver wave type	Shear	Roof angle	-
Probe skew angle	90°	Longitudinal sound velocity	2330 m/s
Probe frequency	5 MHz	Height of first element	8,0 mm
Number of elements on primary axis	16	Primary offset of first element	3,4 mm
Primary axis pitch	0,6 mm	Secondary offset of first element	15,0 mm
Primary element size	0,6 mm	Primary axis position of wedge reference	-29,7 mm
Secondary element size	10,0 mm	Secondary axis position of wedge reference	-15,0 mm
Reverse primary axis	No	Wedge length	29,7 mm
Fit to surface	-	Distance between contact points	30,0 mm
Element numbering	Regular	Wedge height	40,0 mm
Scanner		Wedge length	29,7 mm
Scan Axis	0,0 mm	Distance between contact points	30,0 mm
Index Axis	-90,0 mm	Wedge height	40,0 mm
Beam Angles		Focalization	
Type	Azimuthal	Focusing type	Half path
Selection	Refracted angle	Emission focus position	100,0 mm
Refraction angle	25° – 75°	Emission focus position	100,0 mm
Resolution	1°	-	-
Elements - transmitter		-	-
Primary axis	1	-	-
Primary axis aperture	16	-	-
Connection	1	-	-

Nastavení ultrazvukové sondy 5L-16A1 – PA Calculator

Probe		Wedge	
Type	1-D Linear array	Wedge Type	Solid
Configuration	Pulse-Echo	Wedge Definition mode	Fixed wedge path
Transmitter wave type	Shear	Wedge angle	31°
Receiver wave type	Shear	Roof angle	-
Probe skew angle	90°	Longitudinal sound velocity	2330 m/s
Probe frequency	5 MHz	Height of first element	8,0 mm
Number of elements on primary axis	16	Primary offset of first element	3,4 mm
Primary axis pitch	0,6 mm	Secondary offset of first element	15,0 mm
Primary element size	0,6 mm	Primary axis position of wedge reference	-29,7 mm
Secondary element size	10,0 mm	Secondary axis position of wedge reference	-15,0 mm
Reverse primary axis	No	Wedge length	29,7 mm
Fit to surface	-	Distance between contact points	30,0 mm
Element numbering	Regular	Wedge height	40,0 mm
Scanner		Wedge length	29,7 mm
Scan Axis	0,0 mm	Distance between contact points	30,0 mm
Index Axis	-90,0 mm	Wedge height	40,0 mm
Beam Angles		Focalization	
Type	Azimuthal	Focusing type	Half path
Selection	Refracted angle	Emission focus position	100,0 mm
Refraction angle	25° – 75°	Emission focus position	100,0 mm
Resolution	1°	-	-
Elements - transmitter		-	-
Primary axis	1	-	-
Primary axis aperture	16	-	-
Connection	1	-	-

Nastavení ultrazvukové sondy 13EM-01 – PA Calculator

Probe		Wedge	
Type	2-D Matrix array	Wedge Type	Solid
Configuration	Pitch and Catch	Wedge Definition mode	Fixed wedge path
Transmitter wave type	Longitudinal	Wedge angle	22,3°
Receiver wave type	Longitudinal	Roof angle	5,5/-5,5° (T/R)
Transmitter element configuration	Type 1	Longitudinal sound velocity	2730 m/s
Receiver element configuration	Type 1	Height of first element	8,48 mm
Probe skew angle	90°	Primary offset of first element	7,0 mm
Probe frequency	3,5 MHz	Secondary offset of first element	6,0 mm
Number of elements on primary axis	16	Primary axis position of wedge reference	-40,0 mm
Number of elements on secondary axis	2	Secondary axis position of wedge reference	-17,5 mm
Primary axis pitch	1,2 mm	Wedge length	40,0 mm
Primary element size	1,2 mm	Distance between contact points	17,5 mm
Secondary axis pitch	4,0 mm	Wedge height	19,77 mm
Secondary element size	4,0 mm	Fix solid	No
Reverse primary axis	No	Focalization	
Reverse secondary axis	Yes	Focusing type	Half path
Symmetric	No	Emission focus position (start/stop)	120,0/50,0 mm
Scanner		Resolution	10,0 mm
Scan Axis	0,0 mm	Timebase Type	None
Index Axis	-10,0 mm	Elements – transmitter/receiver	
Beam Angles		Primary axis	1
Type	Azimuthal	Secondary axis	1
Selection	Refracted/Beam skew angle	Primary axis aperture	16
Refraction angle	Povrch 1:15-35° Povrch 3:15-35°	Secondary axis aperture	2
Beam skew angle	0°	Connection	Transmitter: 1 Receiver: 33
Resolution	1°	-	-

Nastavení přístroje – UT settings – sonda 13EM-01

General		Pulser/Receiver	
Gain	Kalibrační hodnota	Voltage	High (75V)
Amplitude range	0-100%	Pulse width	Auto (140ns)
Start	20,0 mm	Rectification	Bipolar
Range	Povrch 1: 300,0 mm Povrch 3: 160,0 mm	Input Filter	Auto (1-5 MHz)
Mode	True Depth	Smoothing	Auto (2 MHz)
Digitizer		Blanking	Quick
Acquisition rate	Povrch 1:Max(51,6 Hz) Povrch 3: Max (38 Hz)	TCG/DAC	
Recurrence	2500 Hz	Mode	Off
Average	None	-	-
Compression	Auto (5)	-	-
Digitizing Frequency	100 MHz	-	-
Sample size	16 bits	-	-

Nastavení přístroje – Mechanical settings – sonda 13EM-01

Sequence		Scan Encoder	
Sequence type	One line	Encoder ID	1
Scan Start	0,0 mm	Type	Quadrature
Scan Stop	4300,0 mm	Resolution	19,13 steps/mm
Scan Resolution	1,0 mm	Invert	Povrch 1:Inverted Povrch 3:Inverted
Index start	0,0 mm	Preset	0,0 mm
-		Units	Linear (steps/mm)

Nastavení přístroje – UT settings – sonda 5L-16A1

General		Pulser/Receiver	
Gain	Kalibrační hodnota	Voltage	High (75V)
Amplitude range	0-100%	Pulse width	Auto (100ns)
Start	20,0 mm	Rectification	Bipolar
Range	145,0 mm	Input Filter	Auto (2-10 MHz)
Mode	True Depth	Smoothing	Auto (4 MHz)
Digitizer		Blanking	Quick
Acquisition rate	Max (31,3 Hz)	TCG/DAC	
Recurrence	2500 Hz	Mode	Off
Average	None	-	-

Compression	Auto (4)	-	-
Digitizing Frequency	100 MHz	-	-
Sample size	16 bits	-	-

Nastavení přístroje – Mechanical settings – sonda 5L-16A1

Sequence		Scan Encoder	
Sequence type	One line	Encoder ID	1
Scan Start	0,0 mm	Type	Quadrature
Scan Stop	4300,0 mm	Resolution	19,13 steps/mm
Scan Resolution	1,0 mm	Invert	Povrch 2:Inverted Povrch 3:Inverted
Index start	0,0 mm	Preset	0,0 mm
-		Units	Linear (steps/mm)

Nastavení přístroje – UT settings – sonda 2L-16A1

General		Pulser/Receiver	
Gain	Kalibrační hodnota	Voltage	High (75V)
Amplitude range	0-100%	Pulse width	Auto (220 ns)
Start	0,2 mm	Rectification	Bipolar
Range	140,0 mm	Input Filter	Auto (1-5 MHz)
Mode	True Depth	Smoothing	Auto (2 MHz)
Digitizer		Blanking	Quick
Acquisition rate	Max (32 MHz)	TCG/DAC	
Recurrence	2500 Hz	Mode	Off
Average	None	-	-
Compression	Auto (8)	-	-
Digitizing Frequency	100 MHz	-	-
Sample size	16 bits	-	-

Nastavení přístroje – Mechanical settings – sonda 2L-16A1

Sequence		Scan Encoder	
Sequence type	One line	Encoder ID	1
Scan Start	0,0 mm	Type	Quadrature
Scan Stop	4300,0 mm	Resolution	19,13 steps/mm
Scan Resolution	1,0 mm	Invert	Povrch 2:Inverted Povrch 3:Inverted
Index start	0,0 mm	Preset	0,0 mm
-		Units	Linear (steps/mm)

Nastavení přístroje – Mechanical settings pro kontrolu funkčnosti elementů sondy

Scan Type (typ skenování):	Linear (lineární)	Last element (poslední element):	Počet elementů
First/start (První/start):	1	Element step (krok elementu):	1
No. of active elements (Počet aktivních elementů):	1	Angle (úhel):	0°
First element (první element):	1	Focal depth (ohnisková vzdálenost):	50 mm

PŘÍLOHA č. 3

**Tabulky výsledků ultrazvukového zkoušení zkušebního tělesa kolektoru
parogenerátoru Dn 1200**

Výsledky hodnocení UT zkoušení sondou 13EM-01 z povrchu 1

Necelistvost	X [mm]	Y1 [mm]	Y2 [mm]	Y1 [mm]	Y2 [mm]	Z1 [mm]	Z2 [mm]	Naměřená délka [mm]	Geom. střed indikace [mm]	Geom. střed indikace [°]	Naměřená výška [mm]	Metoda hodnocení	Odstup signál/šum [dB]	Skutečná výška [mm]	Rozdíl výšky [mm]	Skutečná délka [mm]	Rozdíl délky [mm]
D3	-	71,9	113,9	64,1	101,5	-	-	42,0	85,1	8,2	-	-	43,9	9,0	-	45,2	-3,2
D4	-	179,9	239,9	160,4	213,8	-	-	60,0	190,4	18,3	-	-	41,2	15,3	-	61,2	-1,2
D6	-	281,0	323,8	250,5	288,6	-	-	42,8	271,9	26,2	-	-	32,3	8,0	-	32,0	10,8
D10	-	389,9	449,9	347,6	401,0	-	-	60,0	377,6	36,4	-	-	40,7	14,5	-	60,0	0,0
R12	-	500,9	537,6	446,5	479,2	-	-	36,7	464,8	44,8	-	-	35,7	8,0	-	32,0	4,7
R13	-	605,9	653,9	540,1	582,9	-	-	48,0	564,1	54,3	-	-	35,9	18,1	-	36,8	11,2
R14	-	689,9	743,9	615,0	663,1	-	-	54,0	642,0	61,8	-	-	43,0	12,0	-	48,0	6,0
D1	-	800,2	824,7	713,3	735,1	-	-	24,5	725,5	69,9	-	-	28,5	2,5	-	12,0	12,5
D21	-	869,9	941,9	775,4	839,6	-	-	72,0	811,4	78,2	-	-	45,6	30,7	-	61,4	10,6
R17	-	1001	1075	892,3	958,2	-	-	74,0	929,3	89,5	-	-	46,0	28,5	-	75,4	-1,4
D5	-	1136,2	1166,8	1012,8	1040,1	-	-	30,6	1028,1	99,0	-	-	24,6	5,0	-	22,0	8,6
R15	-	1217,9	1241,9	1085,6	1107,0	-	-	24,0	1097,6	105,7	-	-	40,4	5,0	-	20,0	4,0
R18	-	1295,9	1325,89	1155,1	1181,9	-	-	30,0	1170,1	112,7	-	-	35,8	3,0	-	25,0	5,0
215BIB5543	-	bez detekce	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
281BIB5588	-	1475,9	1505,9	1315,6	1342,3	-	-	30,0	1330,6	128,2	-	-	28,4	4,1	-	16,5	13,5

Výsledky hodnocení UT zkoušení sondou 2L-16A1 z povrchu 2 ze vzdálenosti Index Offset -90 mm

Necestivost	X [mm]	Y1 [mm]	Y2 [mm]	Y1 [mm]	Y2 [mm]	Z1 [mm]	Z2 [mm]	Naměřená délka [mm]	Geom. střed indikace [mm]	Geom. střed indikace [°]	Naměřená výška [mm]	Metoda hodnocení	Odstup signál/šum [dB]	Skutečná výška [mm]	Rozdíl výšky [mm]	Skutečná délka [mm]	Rozdíl délky [mm]
D3	1,8	78,0	105,0	69,5	93,6	68,3	47,5	24,1	81,6	7,9	20,8	-6db	34,7	9,0	11,8	45,2	-21,1
D4	1,0	179,0	222,0	159,6	197,9	68,3	54,9	38,3	178,7	17,2	13,38	-6db	21,7	15,3	-1,9	61,2	-22,9
D6	-32,0	298,0	329,0	265,6	293,3	74,7	69,8	27,6	279,4	26,9	4,92	Tip Diffraction	39	8,0	-3,1	32,0	-4,4
D10	-30,0	385,0	449,0	343,2	400,2	74,5	64,3	57,0	371,7	35,8	10,22	Tip Diffraction	34,9	14,5	-4,3	60,0	-3,0
R12	-53,0	511,0	544,0	455,5	484,9	68,3	63,8	29,4	470,2	45,3	4,48	-6db	28,7	8,0	-3,5	32,0	-2,6
R13	-51,0	619,0	649,0	551,8	578,5	72,1	67,4	26,7	565,1	54,4	4,67	-6db	28,8	18,1	-13,4	36,8	-10,1
R14	-48,0	699,0	749,0	623,1	667,6	72,5	65,8	44,6	645,4	62,2	6,72	-6db	30,4	18,1	-11,4	36,8	7,8
D1	3,5	803,0	817,0	715,8	728,3	68,3	55,4	12,5	722,0	69,6	12,93	-6db	21,7	2,5	10,4	12,0	0,5
D21	6,0	870,0	936,0	775,5	834,3	68,3	33,8	58,8	804,9	77,5	34,5	Tip Diffraction	26	30,7	3,8	61,4	-2,6
R17	-54,0	999,0	1073,0	890,5	956,5	74,5	42,5	66,0	923,5	89,0	31,96	Tip Diffraction	39,8	28,5	3,5	75,4	-9,4
D5	-27,0	1137,0	1158,0	1013,5	1032,2	68,5	63,1	18,7	1022,9	98,5	5,36	-6db	28,1	5,0	0,4	22,0	-3,3
R15	-54,0	1216,0	1241,0	1083,9	1106,2	72,4	67,0	22,3	1095,1	105,5	5,36	-6db	31,3	5,0	0,4	20,0	2,3
R18	-53,0	1294,0	1321,0	1153,5	1177,5	72,7	67,8	24,1	1165,5	112,3	4,95	-6db	32,5	3,0	2,0	25,0	-0,9
215BIB5543	-52,0	1432,0	1445,0	1276,5	1288,1	73,2	68,4	11,6	1282,3	123,5	4,76	-6db	28,9	2,8	2,0	15,8	-4,2
281BIB5588	-56,0	1489,0	1505,0	1327,3	1341,5	72,5	68,8	14,3	1334,4	128,5	3,69	-6db	28,4	4,1	-0,4	16,5	-2,2

Výsledky hodnocení UT zkoušení sondou 5L-16A1 z povrchu 2 ze vzdálenosti Index Offset -90 mm

Necestivost	X [mm]	Y1 [mm]	Y2 [mm]	Y1 [mm]	Y2 [mm]	Z1 [mm]	Z2 [mm]	Naměřená délka [mm]	Geom. střed indikace [mm]	Geom. střed indikace [°]	Naměřená výška [mm]	Metoda hodnocení	Odstup signál/šum [dB]	Skutečná výška [mm]	Rozdíl výšky [mm]	Skutečná délka [mm]	Rozdíl délky [mm]
D3	0,0	64	107	57,0	95,4	71,1	56,45	38,3	76,2	7,3	14,65	-6db	37,3	9	5,6	45,2	-6,9
D4	2,0	169	233	150,6	207,7	72,49	51,1	57,0	179,2	17,3	21,39	Tip Diffraction	35,3	15,3	6,1	61,2	-4,2
D6		296	334	263,9	297,7	72,49	65,72	33,9	280,8	27,0	6,77	Tip Diffraction	41,8	8	-1,2	32,0	1,9
D10	-29,0	392	454	349,4	404,7	85,77	72,52	55,3	377,1	36,3	13,25	Tip Diffraction	48,7	14,5	-1,3	60,0	-4,7
R12	-52,7	502	544	447,5	484,9	72,46	64,55	37,4	466,2	44,9	7,91	Tip Diffraction	40	8	-0,1	32,0	5,4
R13	-55,8	607	639	541,1	569,6	72,38	56,24	28,5	555,3	53,5	16,14	Tip Diffraction	25,6	18,1	-2,0	36,8	-8,3
R14	-53,6	695	750	619,5	668,5	72,49	61,69	49,0	644,0	62,0	10,8	Tip Diffraction	28	12	-1,2	48,0	1,0
D1	0,0	803	824	715,8	734,5	72,54	61,34	18,7	725,1	69,9	11,2	-6db	20,2	2,5	8,7	12,0	6,7
D21	6,6	873	942	778,2	839,7	72,48	47,79	61,5	808,9	77,9	24,69	Tip Diffraction	36,9	30,7	-6,0	61,4	0,1
R17	-52,0	1003	1081	894,1	963,6	72,54	44,93	69,5	928,8	89,5	27,61	Tip Diffraction	37,9	28,5	-0,9	75,4	-5,9
D5	-29,5	1133,0	1149,0	1009,9	1024,2	72,6	67,1	14,3	1017,1	98,0	5,5	-6db	45,1	5,0	0,5	22,0	-7,7
R15	-51,1	1218	1242	1085,7	1107,1	72,56	66,36	21,4	1096,4	105,6	6,21	Tip Diffraction	37,3	5	1,2	20,0	1,4
R18	-54,0	1302	1325	1160,6	1181,1	72,52	67,93	20,5	1170,8	112,8	4,59	Tip Diffraction	31,5	3	1,6	25,0	-4,5
215BIB5543	-52,0	1438	1449	1281,8	1291,6	70,4	67,87	9,8	1286,7	124,0	2,53	-6db	36,5	2,8	-0,3	15,8	-6,0
281BIB5588	-49,5	1487	1503	1325,5	1339,8	71	69,03	14,3	1332,6	128,4	1,97	-6db	40,7	4,1	-2,1	16,5	-2,2

Výsledky hodnocení UT zkoušení sondou 13EM-01 z povrchu 3 ze vzdálenosti Index Offset +10 mm

Nečistivost	X [mm]	Y1 [mm]	Y2 [mm]	Y1 [mm]	Y2 [mm]	Z1 [mm]	Z2 [mm]	Naměřená délka [mm]	Geom. sítě indikace [mm]	Geom. sítě indikace [°]	Naměřená výška [mm]	Metoda hodnocení	Odstup signal/šum [dB]	Skutečná výška [mm]	Rozdíl výšky [mm]	Skutečná délka [mm]	Rozdíl délky [mm]
D3	0,0	51	107	45,5	95,4	75,58	67,06	49,9	70,4	6,8	8,52	Tip Diffraction	28,7	9	-0,5	45,2	4,7
D4	0,0	156	228	139,1	203,2	75,86	61,16	64,2	171,1	16,5	14,7	Tip Diffraction	29,8	15,3	-0,6	61,2	3,0
D6	34,0	284	332	253,2	295,9	72,7	65,63	42,8	274,5	26,4	7,07	Tip Diffraction	37,4	8	-0,9	32,0	10,8
D10	35,3	377	445	336,1	396,7	73,18	60,95	60,6	366,4	36,3	12,23	Tip Diffraction	40,1	14,5	-2,3	60,0	0,6
R12	54,0	501	531	446,6	473,3	74,7	63,39	26,7	460,0	44,3	11,31	-6db	27,6	8	3,3	32,0	-5,3
R13	56,0	578	615	515,2	548,2	74,2	58,51	33,0	531,7	51,2	15,69	-6db	23,5	18,1	-2,4	36,8	-3,8
R14	60,0	692	736	616,8	656,1	71,65	65,06	39,2	636,4	61,3	6,59	-6db	27,4	12	-5,4	48,0	-8,8
D1	3,0	799	808	712,2	720,2	74,77	72,53	8,0	716,2	69,0	2,24	-6db	33,2	2,5	-0,3	12,0	-4,0
D21	8,5	870	945	775,5	842,4	75,49	45,34	66,9	808,9	77,9	30,15	Tip Diffraction	31,4	30,7	-0,6	61,4	5,5
R17	53,0	981	1082	874,4	964,5	75,94	41,88	90,0	919,5	88,6	34,06	Tip Diffraction	30,2	28,5	5,6	75,4	14,6
D5	33,0	1125	1155	1002,8	1029,6	74,6	64,68	26,7	1016,2	97,9	9,92	-6db	42,8	5	4,9	22,0	4,7
R15	65,0	1217	1232	1084,8	1098,2	73,18	58,9	13,4	1091,5	105,1	14,28	-6db	26,1	5	9,3	20,0	-6,6
R18	60,0	1296	1315	1155,2	1172,2	68,89	61,73	16,9	1163,7	112,1	7,16	-6db	18,5	3	4,2	25,0	-8,1
215BIB5543	63,0	1425	1455	1270,2	1297,0	74,75	63,58	26,7	1283,6	123,7	11,17	-6db	17,5	2,8	8,4	15,8	10,9
281BIB5688	60,0	1482	1506	1321,0	1342,4	74,75	63,64	21,4	1331,7	128,3	11,11	-6db	22	4,1	7,0	16,5	4,9