

Použití techniky Phased Array pro stanovení reálných rozměrů necelistvostí ve svarech potrubních systémů

Jan Kolář

Abstrakt

V příspěvku jsou uvedeny první zkušenosti s technikou zkoušení Phased Array, aplikované na zkušebních testovacích blocích s umělými necelistvostmi, které reprezentují potrubí páry a napájecí vody jaderné elektrárny typu VVER. Dále je zde provedeno porovnání výsledků zkoušení s impulsně odrazovou technikou ve smyslu přesnosti a rychlosti stanovení reálných rozměrů necelistvostí ve svarových spojkách.

1. Úvod

Pro nedestruktivní kontrolu potrubních systémů a tlakových nádob v energetice je užíváno zejména ultrazvukového zkoušení, kde jsou oblastí zájmu především svary včetně jejich tepelně ovlivněných oblastí.

Cílem ultrazvukových zkoušek je detekovat případné materiálové necelistvosti v celém objemu zkoušeného materiálu.

Ve fázi výroby a montáže energetických zařízení je ultrazvuková zkouška využívána jak pro detekci inherentních necelistvostí, které jsou v průběhu výroby dále zpracovávány, tak pro detekci takových defektů, jejichž vznik souvisí s vlastním procesem svařování. Typickými představiteli takovýchto defektů jsou zdvojeniny v základním materiálu, ve svaru pak pórovitost, vměstky, studené spoje, neprůvody a trhliny.

Zjišťování necelistvostí, které vznikají až v průběhu provozního namáhání je pak předmětem provozních kontrol zařízení. Zde je ultrazvuková zkouška zaměřena na detekci únavových trhlin nebo korozních trhlin pod napětím.

2. Ultrazvukové zkoušení obvodových svarů potrubí páry a napájecí vody

2.1 Aplikace impulsně odrazové techniky

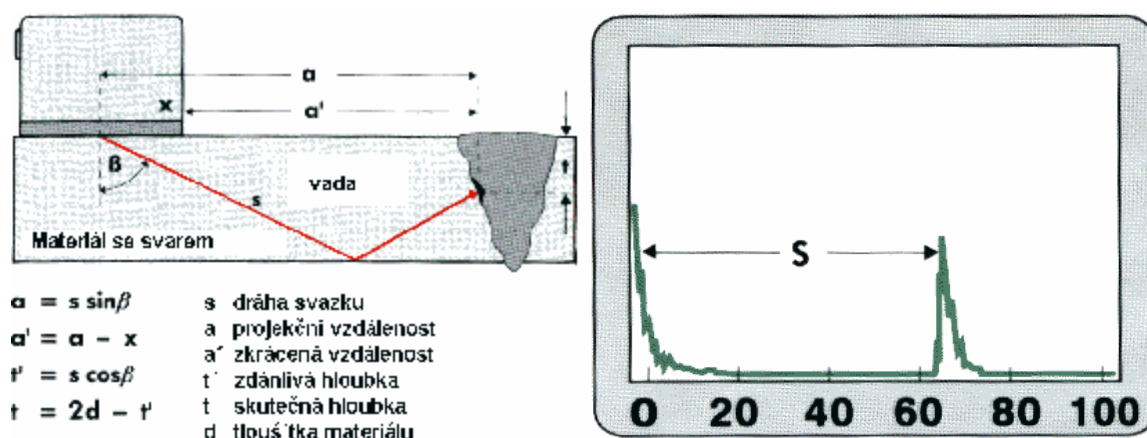
Impulsně odrazová technika ultrazvukového zkoušení představuje základní techniku zkoušení, která je nejpoužívanější, především z důvodu nízkých nákladů na provedení zkoušky, cenové dostupnosti základního zařízení a ultrazvukových sond.

Klasická impulsně odrazová technika zkoušení je založena na vysílání a zpětného příjmu ultrazvukových vln ve zkoušeném materiálu. Citlivost zkoušení (schopnost detekce) je závislá nejen na použité frekvenci, typu ultrazvukové vlny a velikosti piezoelektrického snímače ultrazvukové sondy, ale i na parametrech zkoušeného materiálu jako jsou rychlost šíření ultrazvuku v materiálu, tloušťka stěny, akustický útlum a stav povrchu, po kterém se vlastní ultrazvuková sonda pohybuje.

Nejjednodušší technika ultrazvukového zkoušení svarů využívá tzv. A – zobrazení (viz obr. 2.1.1) Jedná se o sledování výskytu echa ultrazvukového svazku, který je odražen od necelistvosti (odražeče). V tomto případě jsou detekovaná echa srovnávána s rozměry známých odražečů (srovnávacích umělých vad). Základními srovnávacími odražeči jsou zářez na vnitřním povrchu, vývrt s plochým dnem nebo boční válcový vývrt. Jejich rozměry a umístění v kalibračním etalonu jsou dány normou nebo předpisem pro provedení zkoušky např. ČSN EN 1714, AD Merkblatt HP5/3, ASME Code sekce V apod. Nalezené indikace

defektů jsou srovnávány s rozměry etalonových vad a dle příslušného předpisu pak vyhodnocovány z hlediska jejich přípustnosti. Z toho vyplývá, že v tomto případě zkoušení není možné vyhodnotit reálné rozměry defektů, ale pouze jejich náhradní velikost. Samozřejmě je zde možné relativně přesně určit polohu necelistvosti ve zkoušeném materiálu a v mnoha případech se určená náhradní délka defektu, stanovená metodou poklesu intenzity ultrazvukového svazku na okraji necelistvosti velmi přibližuje reálným hodnotám. Vyhodnocení výšky necelistvosti ve směru tloušťky materiálu je však velmi nepřesné a mnohdy nemožné. Tento parametr je však velmi důležitý pro hodnocení zbytkové životnosti zařízení obzvláště pokud se jedná o defekty vzniklé provozním namáháním a je u nich předpokládán další rozvoj.

Jedinou možností relativně přesného stanovení výšky necelistvosti ruční impulsně odrazovou technikou s A - zobrazením za použití konvenčních přístrojů je zkoušení dle předpisu API [3], ale použití této techniky má svá omezení. Převážně je technika API určena pro defekty iniciované z vnitřního povrchu potrubí a nelze ji vždy aplikovat, nehledě nato, že s nástupem techniky TOFD (Time of Flight Diffraction) je využívání postupu dle API časově náročnější a méně přesné.

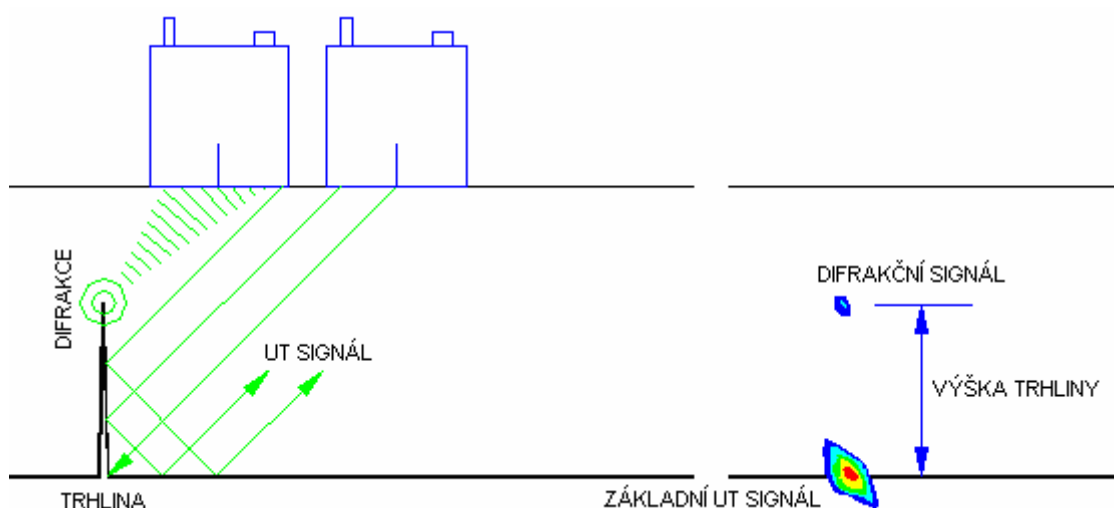


Obr. 2.1.1 Detekce necelistvostí ve svarech pomocí A - zobrazení

Pro provozní kontroly bezpečnostně významných komponent mezi které patří i vysoko energetické potrubí páry a napájecí vody se používá vícekanálové mechanizované zkoušení s průběžným ukládáním naměřených dat. Tento způsob kontroly využívá počítačově řízeného manipulátoru do jehož hlavičky se upevňuje různý počet ultrazvukových sond (v závislosti na počtu dostupných kanálů ultrazvukového systému). Pomocí softwaru pro sběr dat je řízen pohyb manipulátoru a sond ve dvou osách a naměřená data jsou ukládána na pevný disk řídicího počítače nebo na externí paměťovou jednotku. Po ukončení měření, obsluha pouze zkontroluje kompletnost dat a následné vyhodnocení datových souborů se provádí odděleně. Takto provedená kontrola významně zkracuje čas potřebný pro provedení zkoušky nebo umožňuje provést měření v místech, kde je obtížná nebo nemožná trvalá přítomnost zkoušejícího personálu. Na rozdíl od ručního zkoušení je v tomto případě možné uložené záznamy z kontroly vyhodnotit i po ukončení měření. Další výhodou je možnost porovnávání starých záznamů s novými a sledovat takto případné šíření detekovaných necelistvostí, protože mechanizovaný způsob zkoušení eliminuje odchylky měření, vzniklé ručním vedením ultrazvukové sondy.

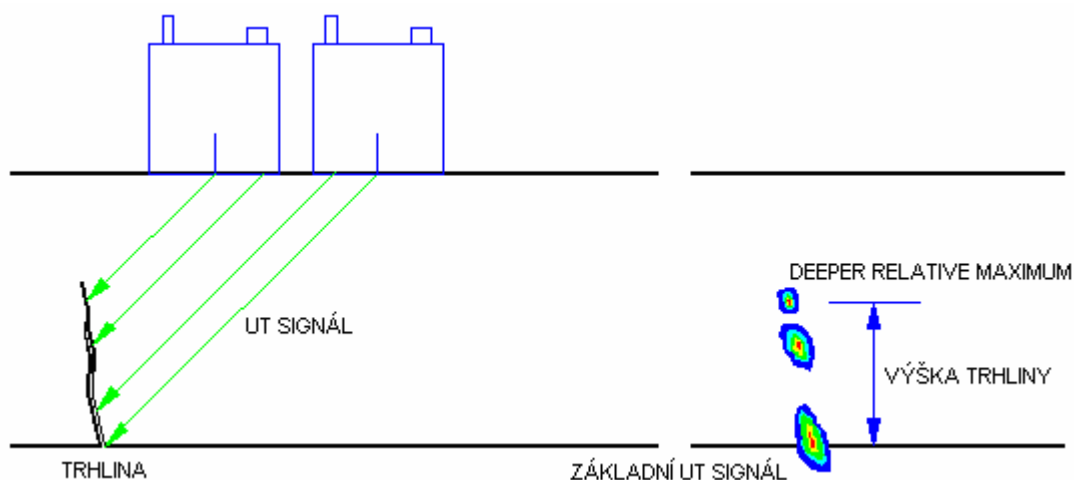
Vlastní vyhodnocování dat se provádí pomocí speciálního vyhodnocovacího softwaru s možností zobrazení typu A, B, C nebo D současně. Sice se stále jedná o impulsně odrazovou techniku zkoušení, ale počítačové zpracování průběhu ultrazvukového signálu umožňuje

detailní zvětšení oblasti zájmu a tím je možné zjistit přítomnost tzn. difrakčního echa, které je umístěno zpravidla těsně před dominantním echem od hrany trhliny iniciované z vnitřního povrchu. K difrakci na vrcholu trhliny dochází vlivem interakce ultrazvukového vlnění a ostrého zakončení necelistvosti, čímž vzniká difraktované sférické vlnění šířící se od tohoto ostrého zakončení. Identifikace a stanovení polohy difraktovaného signálu dovoluje určit výšku necelistvosti v materiálu zkoušené oblasti. Protože difrakční echo tedy představuje signál od vrcholu trhliny, je možné, na základě jeho analýzy, určit poměrně přesně nejen výšku takovéto trhliny, ale i ligament necelistvosti (viz obr. 2.1.2).



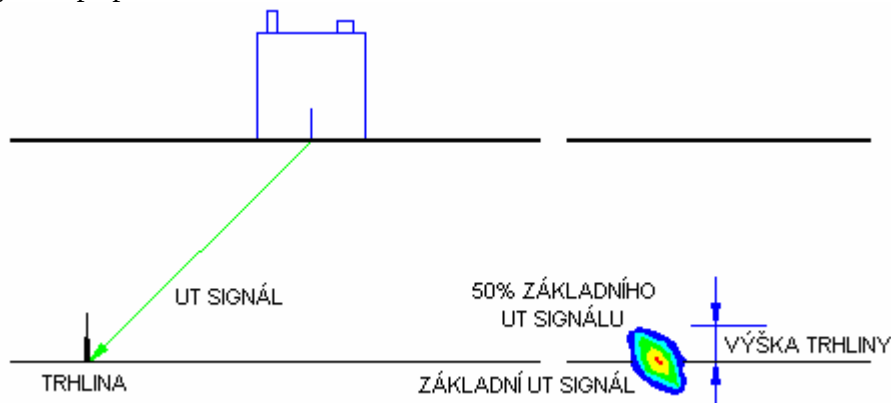
Obr. 2.1.2 Vyhodnocování výšky defektu pomocí difrakčního signálu

Pokud není difrakční signál zřetelně oddělený od dominantního echa základního ultrazvukového signálu, je nutné použít vyhodnocovací techniku DRM (deeper relative maximum). Je-li necelistvost orientována téměř kolmo k ultrazvukovému svazku (obr. 2.1.3), potom jeho amplituda roste když se signál začne blížit k dolnímu konci necelistvosti, pak dojde k maximalizaci amplitudy a následně začne signál klesat ve směru pohybu sondy. Zde vzniká difrakční signál a zesiluje dominantní ultrazvukový signál. Nelze ho však od hlavního ultrazvukového signálu oddělit. V bodě opětového zesílení hlavního ultrazvukového signálu lze pozorovat nový růst amplitudy. Tento bod se nazývá “deeper relative maximum” ultrazvukového signálu.



Obr. 2.1.3 Vyhodnocování výšky defektu pomocí metody DRM

Je-li vrchol necelistvosti příliš otevřený na to, aby na něm docházelo k difrakci ultrazvukového signálu, anebo je-li výška necelistvosti příliš malá, pak jsou difrakční ultrazvukový signál i signál DMR buď překryty hlavním ultrazvukovým signálem, anebo mají tak malé amplitudy, že je nelze oddělit od úrovně šumu. Potom se pro účely stanovení rozměrů použije metoda využívající pokles maximální amplitudy ultrazvukového signálu o 6dB. Tato metoda spočívá v tom, že u maximální amplitudy příslušející necelistvosti určí místo jejího 50 % snížení (o 6 dB) na konci necelistvosti (viz obr. 2.1.4). Výška necelistvosti se změří od tohoto 50 % poklesu ultrazvukového signálu k základně signálu od necelistvosti (vnitřní povrch potrubí). Tento způsob vyhodnocení výšky však není tak přesný jako v předcházejících případech.



Obr. 2.4 Vyhodnocování výšky pomocí poklesu maxima UZ signálu o 6dB

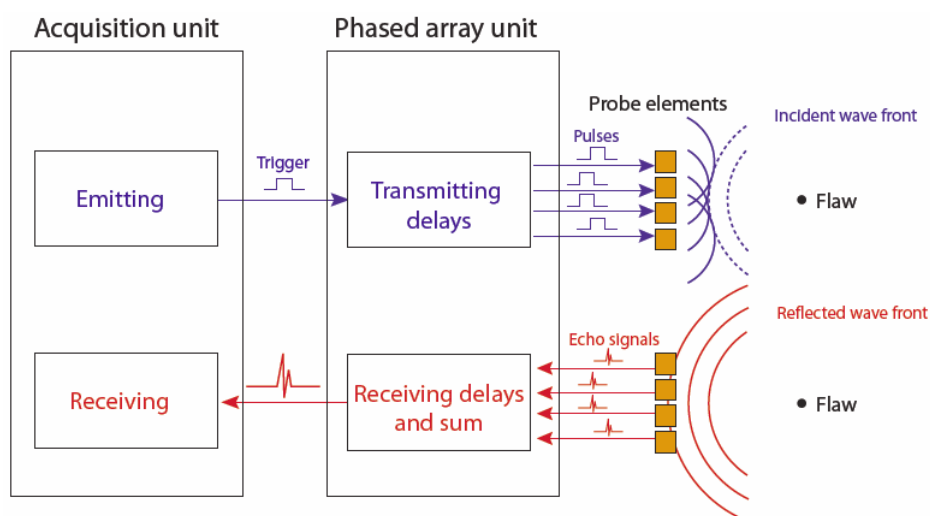
2.2 Aplikace techniky Phased Array

Technika Phased Array je v podstatě pouze zdokonalením impulsně odrazové techniky zkoušení ultrazvukovou metodou. Sondy Phased Array pro zkoušení svarů se skládají z většího počtu dílčích elementů (zpravidla 16 – 128) viz obr. 2.2.1. To umožňuje tzv. multiúhlovou inspekci pouze jednou sondou. Řídící jednotka ultrazvukového přístroje zpracovává veškeré odrazy od materiálových nehomogenit do jednotného záznamu. Takto vytvořený záznam je možné hodnotit v zobrazení typu A, B a C. Navíc je zde možné prohlížení záznamů v tzv. zobrazení typu S (sectorial) viz obr. 2.2.2 [2].

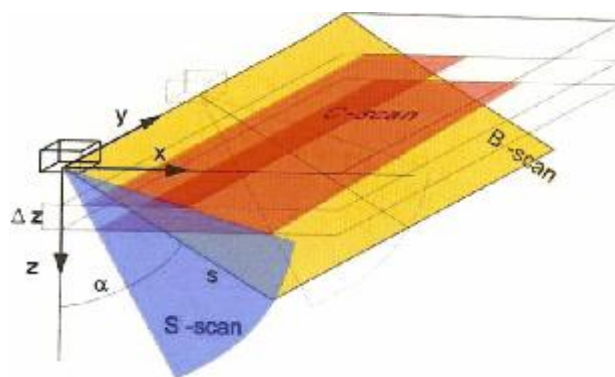
Všechny výše uvedené skutečnosti umožňují použití pouze jedné sondy a provedení pouze jednoho skenu zkoušené oblasti. To výrazně urychluje provedení zkoušky, protože obvodové svary potrubí, zkoušené touto technikou, mohou být skenovány pouze po obvodě bez posuvu sondy ve směru osy potrubí. Tento pohyb je nahrazen postupně se měnícími úhly ultrazvukového svazku viz obr. 2.2.3.

Techniku zkoušení Phased Array lze použít i pro ruční zkoušení, ale zpravidla bývá mechanizována a automatizována.

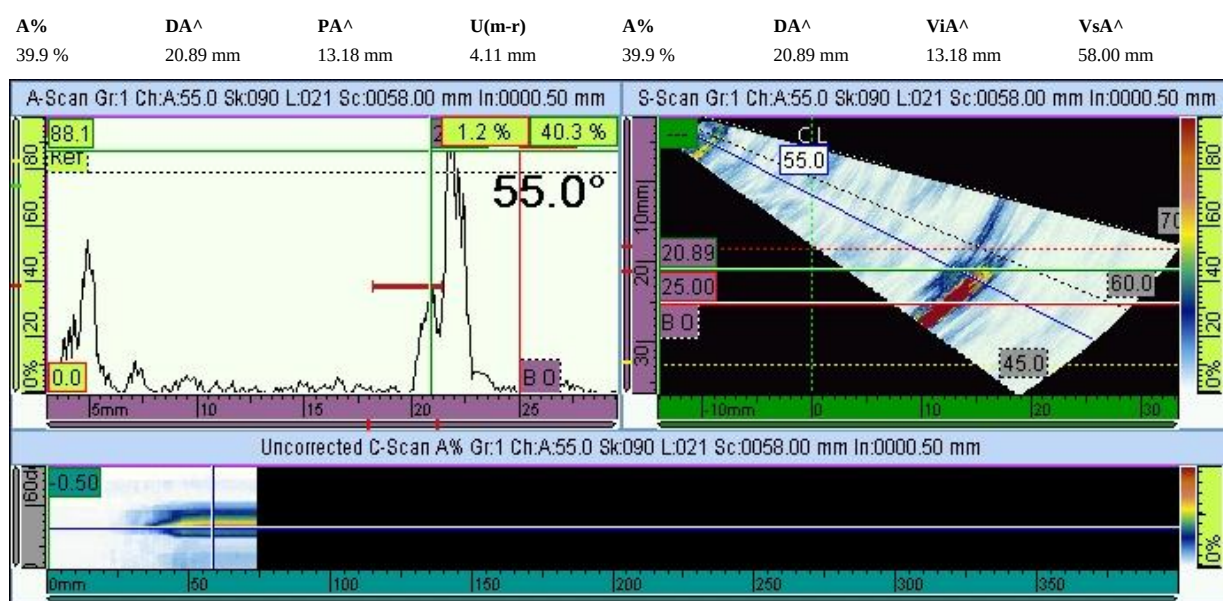
Pro měření výšky necelistvosti ve směru tloušťky stěny, platí zde stejné přístupy, které byly uvedené v odst. 2.1 Jako příklad je na obr. 2.2.4 zobrazena ukázka hodnocení rozměrů kalibračního zářezu výšky 4 mm, který byl následně vyhodnocen na základě difrakčního signálu a naměřená výška zářezu činila 4,11 mm.



Obr. 2.2.1 Princip techniky Phased Array



Obr. 2.2.2 Zobrazování při aplikaci Phased Array Obr. 2.2.3 Pohyblivý ultrazvukový svazek



Obr. 2.2.4 Ukázka hodnocení záznamů technikou Phased Array

3. Experimentální měření na zkušebních tělesech

3.1 Použitá zkušební tělesa

Za účelem ověření příslušné techniky ultrazvukového zkoušení spolehlivě detekovat a správně určit rozměry nebezpečných necelistvostí, byly vyrobeny dva kusy zkušebních těles, která plně reprezentují (rozměrově, materiálově i způsobem výroby) skutečné obvodové svary potrubí páry a napájecí vody jaderné elektrárny typu VVER [1].

Do každého svaru byly vyrobeny umělé defekty o takových rozměrech, které jsou kritické pro další provoz příslušného potrubního systému. Pro implementaci do zkušebních těles byly vybrány necelistvosti typu podélné (obvodové) trhliny iniciované z vnitřního povrchu a studených spojů na svarovém úkosu. V případě defektů typu trhliny byly použity jak vyjiskřované necelistvosti PISC type A, jejichž tvar a výroba odpovídá ASTM C11000, tak i skutečné únavové trhliny (FC), cyklované třibodovým ohybem a zavařené do zkušebního tělesa. Defekty typu studeného spoje (LOF) byly vyrobeny vyjiskřováním podél svarového úkosu v průběhu svařování zkušebního tělesa [1].

Parametry zkušebních těles jsou uvedeny v Tab. 3.1.1.

ZKUŠEBNÍ TĚLESO	VNĚJŠÍ PRŮMĚR [MM]	TLOUŠŤKA STĚNY [MM]	MATERIÁL	
			ZÁKLADNÍ	SVAR
POTRUBÍ PÁRY	630	25	16 GS	OK 48.00
POTRUBÍ NAPÁJECÍ VODY	425	24	ST 20	OK 48.00

Tab. 3.1.1 Parametry zkušebních těles

3.2 Kontrola impulsně odrazovou technikou

Pro ultrazvukovou kontrolu impulsně odrazovou technikou byl použit automatizovaný zkušební systém SUMIAD osazená manipulátorem PET II. Skenování bylo provedeno standardními postupy s jednoduchými úhlovými sondami příčných vln řady Krautkramer MWB o frekvenci 4 MHz a úhlem lomu 60° a 70°. Následné vyhodnocení záznamů bylo provedeno pomocí softwaru MASERA.

3.3 Kontrola technikou Phased Array

Pro kontrolu technikou Phased Array byl použit ultrazvukový přístroj OMNISCAN PA se sondou typu A1, 2,25 MHz, která disponovala 16-ti elementy. Tato sonda byla osazena klínem SA1-N60S, který umožňuje používání příčného vlnění. V tomto případě se nejednalo o mechanizovanou kontrolu, protože pořízení manipulátoru by pro tyto prvotní testy bylo nákladné. Vzhledem k tomu, že při této technice zkoušení je postačující pohyb sondy pouze v obvodovém směru, bylo ruční vedení sondy dostatečné. Vyhodnocování záznamů bylo provedeno pomocí softwaru TomoView 2.7.

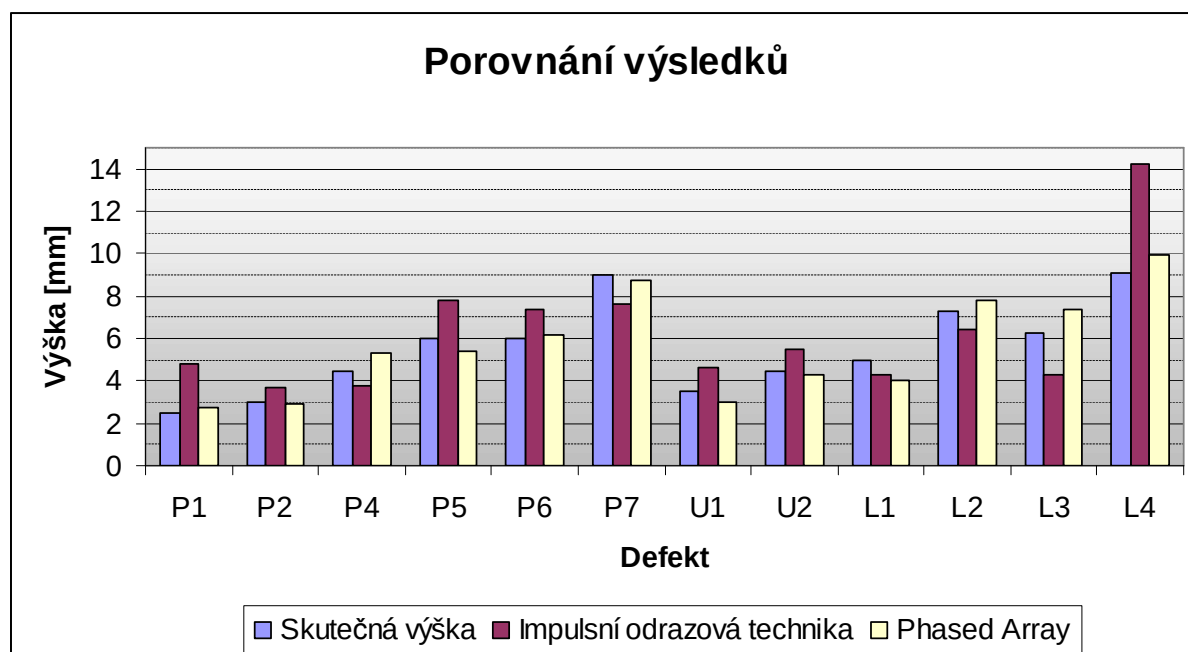
3.4 Porovnání dosažených výsledků

Výsledky zkoušek, které jsou uvedeny v Tab. 3.4.1 a graficky znázorněny na Obr. 3.4.2, zohledňují naměřené hodnoty výšky příslušných defektů v porovnání se skutečnými rozměry necelistvostí. Testování obou technik ultrazvukového zkoušení nezahrnovalo měření délky defektů, protože způsob měření délky je dobře osvojená technika, která vychází z teorie poklesu maximální amplitudy signálu o 50%, a zpravidla je dosahováno příznivých výsledků měření i případech ručního měření s konvenčními sondami a zobrazením typu A.

Za účelem porovnání obou technik zkoušení bylo použito zkušební těleso potrubí páry.

DEFEKT	TYP	SKUTEČNÝ ROZMĚR	NAMĚŘENÝ ROZMĚR DEFEKTU [MM]			
		DEFEKTU [MM]	IMPULSNĚ ODRAZOVÁ TECH.		TECHNIKA PHASED ARRAY	
		VÝŠKA	VÝŠKA	ODCHYLKA	VÝŠKA	ODCHYLKA
P1	PISC	2,50	4,76	+2,26	2,72	+0,22
P2	PISC	3,00	3,72	+0,72	2,91	-0,09
P4	PISC	4,50	3,79	-0,71	5,29	+0,79
P5	PISC	6,00	7,76	+1,76	5,44	-0,56
P6	PISC	6,00	7,40	+1,40	6,15	+0,15
P7	PISC	9,00	7,60	-1,40	8,76	-0,24
U1	FC	3,50	4,66	+1,16	3,04	-0,46
U2	FC	4,50	5,49	+0,99	4,25	-0,25
L1	LOF	5,00	4,25	-0,75	4,07	-0,93
L2	LOF	7,30	6,44	-0,86	7,81	+0,51
L3	LOF	6,30	4,30	-2,00	7,33	+1,03
L4	LOF	9,10	14,22	+5,12	9,91	+0,81

Tab. 3.4.1 Výsledky měření na zkušebním tělese potrubí páry



Obr. 3.4.2 Grafické znázornění dosažených výsledků

4. Závěr

Na základě výsledků zkoušek lze konstatovat, že technika Phased Array poskytuje přesnější údaje pro stanovení výšky předpokládaných necelistvostí ve svarových spojích. Další výhodou této techniky je kratší čas potřebný pro vlastní provedení zkoušky z důvodu skenování svaru s pohybem sondy pouze v obvodovém směru. Taktéž hodnocení naměřených dat vykazalo přibližně poloviční časovou náročnost, protože v případě hodnocení záznamů z impulsně odrazové techniky je nutné hodnotit data z každé úhlové sondy samostatně, což při aplikaci Phased Array odpadá díky pohyblivému ultrazvukovému svazku.

Nevýhodou techniky Phased Array jsou vysoké pořizovací náklady na přístrojové vybavení a ultrazvukové sondy. Pokud je však zkoušení touto technikou použito pro provozní kontroly energetických zařízení, jsou tyto pořizovací náklady zanedbatelné v porovnání s úsporami, které vzniknou provozovateli z důvodu zkrácení odstávky a tím zvýšení produkce.

5. Použitá literatura

- [1] Kolář, J. Provozní kontroly vysoko energetického potrubí v JE Temelín, 33. mezinárodní konference Defektoskopie 2003.
- [2] Kolář, J., Kováčik, M., Hyža, R. Skúšanie heterogénnych a austenitických zvarov technikou Phased Array a technikou TOFD, NDT Welding Bulletin.
- [3] Recommended Practice for Ultrasonic Evaluation of Pipe Imperfections, API Recommended Practice 5UE first edition, March 2002, American Petroleum Institute.