



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ TECHNIKY PHASED ARRAY PRO NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ NÁTRUBKU HRK U REAKTORU VVER 440

USE OF ULTRASONIC PHASED ARRAY TECHNIQUE FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE HRK SOCKET AT
THE VVER 440 REACTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Nováček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Juliš, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Nováček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Martin Juliš, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití ultrazvukové techniky phased array pro nedestruktivní zkoušení nátrubku HRK u reaktoru VVER 440

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma bakalářské práce je zaměřeno na problematiku nedestruktivního zkoušení nátrubku HRK u reaktoru VVER 440 v JE Dukovany pomocí ultrazvuku. Úkolem studenta bude v rámci teoretické části práce vypracovat rešerši zaměřenou na současné možnosti využití ultrazvukové NDT techniky phased array. V rámci experimentální části bude realizován návrh zkušebního systému včetně analýzy ovlivňujících parametrů a ověření zkušebního systému na zkušebních vzorcích.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Literární rešerše zaměřená na současné možnosti využití ultrazvukové NDT techniky phased array.
- 2) Popis zkoušeného objektu.
- 3) Přehled a charakteristika předpokládaných necelistvostí v souladu s ČSN EN ISO 6520–1.
- 4) Návrh zkušebního systému.
- 5) Analýza ovlivňujících parametrů.
- 6) Ověření zkušebního systému na zkušebních vzorcích.

Seznam doporučené literatury:

KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, CERM, Brno 2009. ISBN 978-80-7204-591-4.

ČSN EN ISO 9712. Nedestruktivní zkoušení - Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT.

ASM INTERNATIONAL. Metals handbook: Volume 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 17 v. ISBN 08717000771.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V bakalářské práci je popsán návrh zkušebního systému pro nedestruktivní ultrazvukovou kontrolu nátrubku HRK na jaderném reaktoru VVER 440. Pomocí navrženého zkušebního systému využívajícího pokročilou ultrazvukovou metodu Phased array byla provedena kontrola rozhraní základního materiálu nátrubku HRK z oceli 22K s návarem ZIO-8. Funkčnost navrženého zkušebního systému složeného ze zařízení TOPAZ 32, sondy 5L64-A32 a manipulátoru STIX byla prověřena na třech etalonech s různě velkými uměle vytvořenými defekty. Citlivost zkušebního systému byla nastavena pomocí umělého defektu v podobě drážky o výšce 0,7 mm na základě simulací v softwaru CIVA 2020. Provedením experimentálního měření na etalonech byla potvrzena funkčnost a dostačující citlivost systému s odchylkou ± 1 mm na výšku indikace a ± 5 mm na délku indikace.

Klíčová slova

ultrazvuk, phased array, HRK, VVER 440, TOPAZ 32, CIVA 2020

ABSTRACT

The bachelor's thesis describes the design of a test system for non-destructive ultrasonic inspection of the HRK on the nuclear reactor VVER 440. Using the designed test system, the basic material interface of the HRK 22K steel shell with the weld on ZIO-8 was verified by the advanced ultrasonic Phased array method. The functionality of the designed test system consisting of the TOPAZ 32 device, the 5L64-A32 probe and the STIX manipulator was tested on three standards with variously large artificial defects. The sensitivity of the test system was set using an artificial defect in the form of a groove 0.7 mm high based on simulations in CIVA 2020 software. The functionality and sufficient sensitivity of the system with a deviation of ± 1 mm for the height of the indication and ± 5 mm for the length of the indication were confirmed by performing experimental measurements on standards.

Key words

ultrasound, phased array, HRK, VVER 440, TOPAZ 32, CIVA 2020

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁČEK, Jan. *Využití ultrazvukové techniky phased array pro nedestruktivní zkoušení nátrubku HRK u reaktoru VVER 440* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137115>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Martin Juliš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Využití ultrazvukové techniky phased array pro nedestruktivní zkoušení nátrubku HRK u reaktoru VVER 440 vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Jan Nováček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Martinu Julišovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a odborné vedení, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Houfkovi a Ondřeji Sýkorovi za jejich cenné rady.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Jaderný reaktor VVER 440.....	10
1.1 Regulační kazety HRK.....	13
1.1.1 Nátrubek HRK.....	14
1.1.2 Předpokládané necelistvosti	16
2 Současné možnosti využití ultrazvukové NDT techniky phased array	17
2.1 Charakteristiky sond phased array	18
2.2 Princip fungování phased array sondy	20
3 Návrh zkušebního systému.....	22
3.1 Ultrazvukový přístroj	22
3.2 Ultrazvuková sonda	23
3.3 Manipulátor	25
3.4 Softwarové nastavení přístroje	26
3.5 Předpokládaná citlivost kontroly	28
4 Ověření systému na zkušebních vzorcích.....	31
4.1 Kalibrace citlivosti systému	33
4.2 Provedení zkoušky na vzorcích.....	36
4.3 Vyhodnocení naměřených dat	37
4.4 Shrnutí výsledků.....	38
ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	42

ÚVOD

Na jaderných elektrárnách je nutné pro zajištění jaderné bezpečnosti a správného fungování jednotlivých součástí energetického systému provádět pravidelné nedestruktivní kontroly, které zajistí zdokumentování aktuálního stavu dílčích zařízení. Při periodických nedestruktivních kontrolách se sledují registrované přípustné výrobní vady nebo se hledají nově vzniklé vady způsobené provozním namáháním dané komponenty. Záměrem je stvrzení další provozuschopnosti zařízení.

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku možného poškození rozhraní dvou materiálů a následného šíření defektu do základního materiálu nátrubku HRK u reaktoru VVER 440 umístěného v jaderné elektrárně Dukovany. Zkoušení zmiňované oblasti musí být zajištěno na základě zkušeností provozovatelů daného typu reaktoru po celém světě, kdy u jednoho z nich bylo detekováno takovéto poškození s následnou opravou.

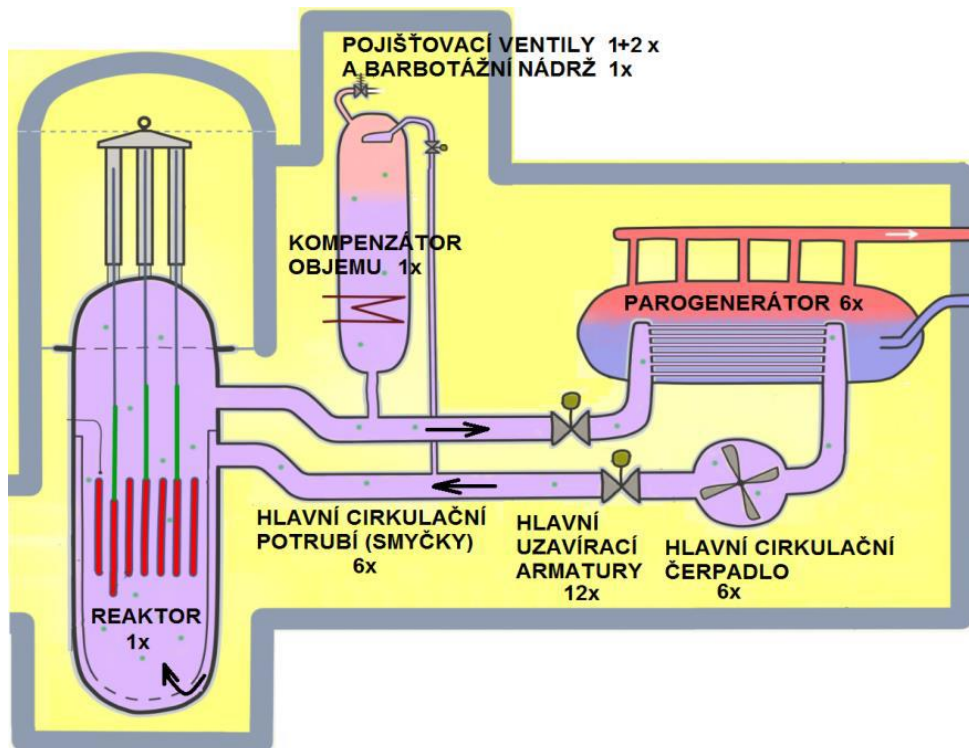
Cílem bakalářské práce je teoretický návrh zkušebního systému s využitím pokročilé ultrazvukové techniky Phased Array, ověření funkčnosti a citlivosti celého systému na etalonech s uměle vytvořenými defekty a s následnou analýzou naměřených dat.

1 JADERNÝ REAKTOR VVER 440

V jaderných elektrárnách s tlakovodním reaktorem (typu VVER resp. PWR) je přenos tepla od jaderného reaktoru k turbíně (na rozdíl od jednookruhových varných reaktorů, kde pára pro turbínu vystupuje přímo z reaktoru a je radioaktivní) rozdělen do dvou okruhů: primárního okruhu, viz obr. 1, jehož médium je radioaktivní (a stále v kapalném skupenství kvůli lepšímu přenosu tepla) a sekundárního okruhu, odděleného přes teplosměnnou plochu tepelných výměníků (parogenerátor), jehož médium (pára vstupující do turbíny) už radioaktivní není. [1, 2]

Primární okruh se skládá ze základních zařízení vzájemně propojených potrubím. Pro zajištění své funkčnosti a bezpečnosti primární okruh potřebuje další systémy, s nimiž dohromady tvoří primární část jaderné elektrárny. [1, 2]

Primární část se rozděluje na základní zařízení primárního okruhu (ve kterých probíhají přeměny a předávání energií), pomocné systémy (které umožňují správnou funkci základních zařízení nebo celého primárního okruhu) a havarijní (resp. bezpečnostní) systémy (které v případě problému bezpečně odstaví reaktor, odvádějí náhradním způsobem teplo z reaktoru a minimalizují únik radioaktivních látek z elektrárny). [1, 2]



Obr. 1 Zjednodušené schéma primárního okruhu [1].

Smyslem jaderného reaktoru je řízenou štěpnou řetězovou reakcí bezpečně transformovat jadernou energii obsaženou v jaderném palivu na tepelnou energii, přenášet tuto tepelnou energii z paliva do chladiva primárního okruhu (které do reaktoru vstupuje studenými větvemi cirkulačních smyček) a tuto tepelnou energii vyvádět chladivem ven z reaktoru do horkých větví cirkulačních smyček. [1, 2]

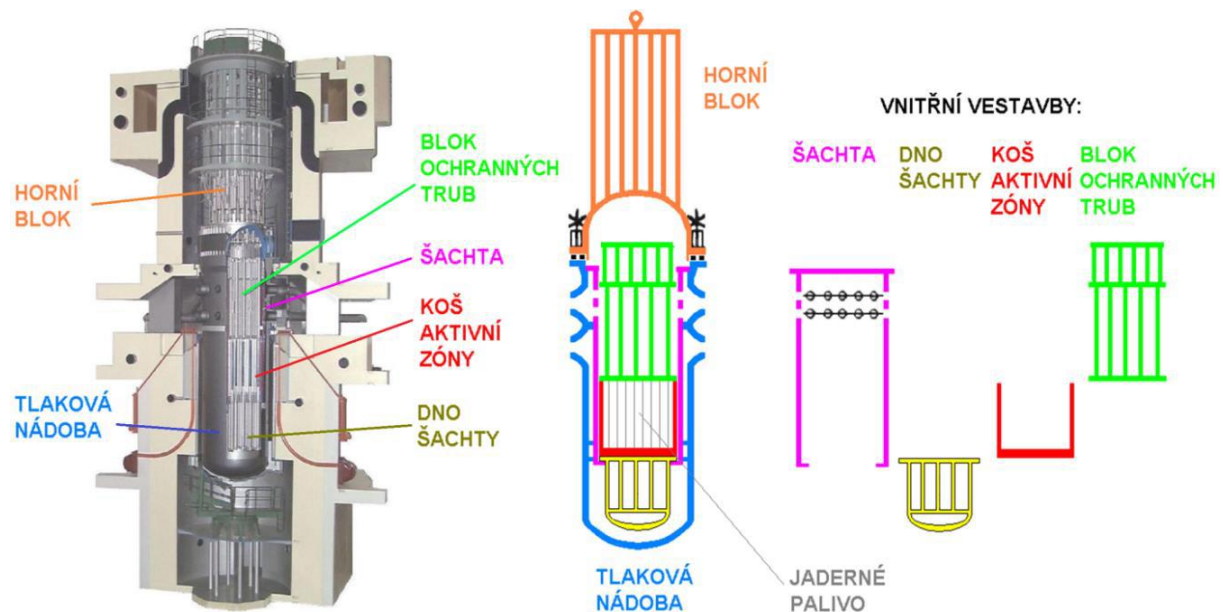
Složení reaktoru je znázorněno na obr. 2. Při provozu je tlak uvnitř reaktoru cca 12,25 MPa. Proto musí být reaktor zkonstruován tak, aby vlivu vysokého tlaku (ale i teploty a radioaktivního záření) dlouhodobě odolával. Proto je všechno zařízení reaktoru uloženo v tělese tlakové nádoby reaktoru (vysokém cca 11,8 m), které je na všechny tyto vlivy dimenzované. Těleso tlakové nádoby reaktoru je vyrobené z vysokopevnostní oceli s vnitřní

nerozovou výstelkou. Tlaku však odolává až po nahřátí nad tranzitní přechodovou oblast, tj. nad teplotu, pod kterou může daný materiál vykazovat křehkolomové chování. Až při takové teplotě se před náběhem bloku dělá těsnostní zkouška celého primárního okruhu tlakem cca 13,7 MPa. [1, 2]

Aby bylo možno provádět výměnu paliva, musí být tlaková nádoba reaktoru uzavíratelná a otevíratelná. K tomu slouží víko tlakové nádoby (spolu s uzlem těsnění se čtyřmi niklovými těsnicími kroužky). Víko tlakové nádoby reaktoru nefiguruje jako samostatná část reaktoru, ale jako hlavní součást horního bloku, kde je dále umístěna ještě nosná konstrukce s pohony regulačních kazet (HRK). [1, 3, 4]

Nejdůležitější a nejnebezpečnější částí reaktoru je jaderné palivo, umístěné v místě, kterému se říká aktivní zóna reaktoru. Ta musí být v reaktoru umístěna organizovaně ve vnitřních vestavbách vyrobených z korozivzdorné oceli. Účelem vestaveb je správné umístění a zafixování paliva a také správné nasměrování toku chladiva od studených smyček dolů mimo aktivní zónu a dále nahoru přes aktivní zónu do horkých větví smyček. [1, 3, 4]

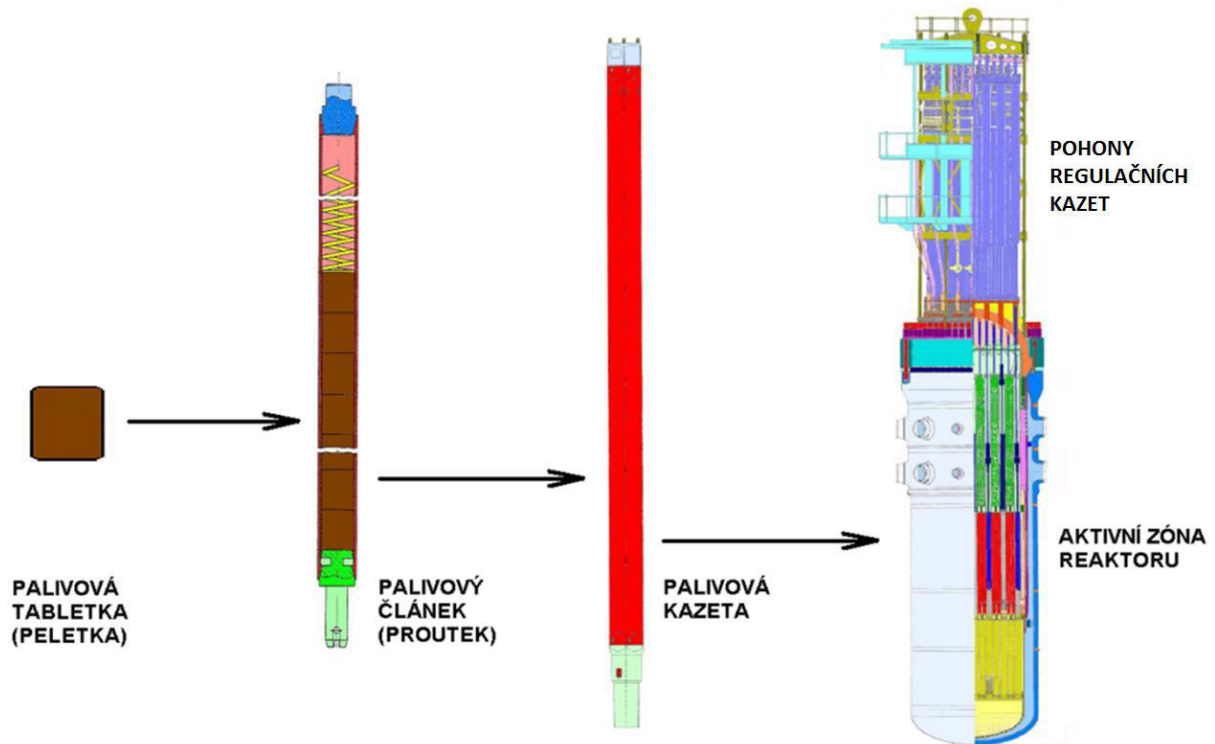
Hlavní vnitřní vestavbou je šachta, v níž je zavěšeno dno šachty, do kterého se mohou podsunout pod aktivní zónu palivové části regulačních kazet. Uvnitř šachty je umístěn koš aktivní zóny s jaderným palivem, které je zafixováno blokem ochranných trub, v jehož trubkách jsou „chráněny“ absorpční části regulačních kazet při vytažení z aktivní zóny. [1, 3]



Obr. 2 Složení reaktoru VVER 440 [1].

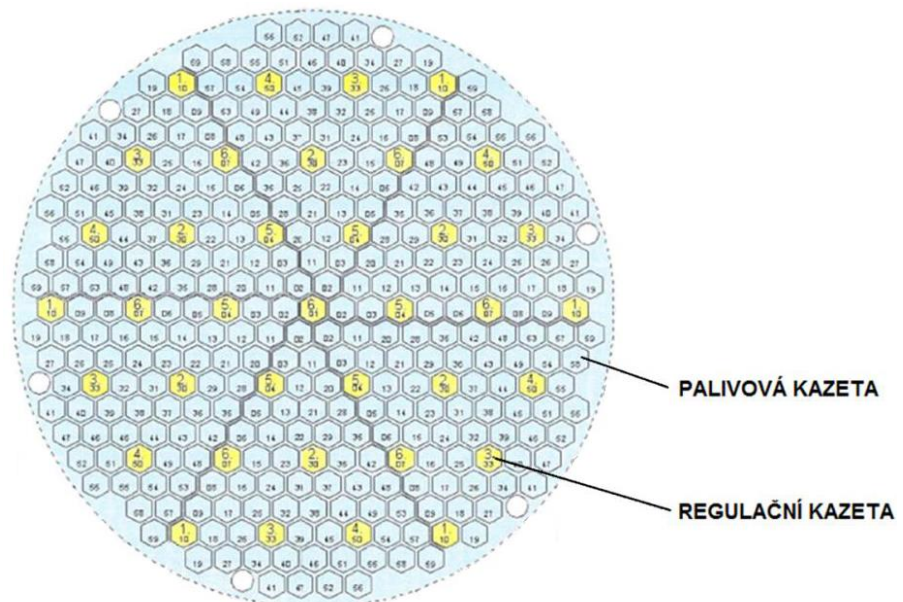
Palivem reaktoru je uran U^{238} obohacený více jak 4 % uranu U^{235} (jeho jádra jsou štěpena) v keramické formě UO_2 ve tvaru válcových tabletek. Jejich výška je více jak 1 cm, průměr cca 0,6 cm a mají (až na poslední zdokonalený typ paliva, viz obr. 3) centrální otvor. Tabletky se vkládají na sebe (sloupec cca 2,5 metru vysoký + pružina) do pokrytí ze zirkoniové slitiny (ve tvaru trubičky naplněné héliem, která je nahoře i dole hermeticky uzavřena), čímž tvoří palivový článek. [1, 3]

V palivové kazetě je 126 palivových článků. Kromě nich se palivová kazeta skládá také z dolní koncovky (kterou je kazeta umístěna v koši aktivní zóny), z horní hlavice (přes kterou je palivo „zatlačeno“ do koše AZ blokem ochranných trub) a šestihřanné obálky ze zirkoniové slitiny. Palivová kazeta nemůže být bariérou proti úniku radioaktivních látek, protože naopak chladivo musí kazetou proudit (kolem jednotlivých palivových článků) a odvádět teplo z paliva. V aktivní zóně reaktoru je celkem 312 palivových kazet. [1, 3]



Obr. 3 Palivová tabletky, palivový článek, palivová kazeta a aktivní zóna reaktoru [1, 4].

Regulování zadaného výkonu reaktoru, jeho zvyšování, snižování i rychlé odstavení reaktoru umožňují regulační kazety (tzv. kazety HRK). V reaktoru je jich celkem 37 a jsou rozděleny do šesti skupin. První až pátá skupina má každá šest regulačních kazet. Šestá, tzv. regulační skupina obsahuje sedm regulačních kazet (vč. centrální kazety), jak je znázorněno na obr.4. [1, 4]



Obr. 4 Rozmístění HRK a palivových kazet v reaktoru [1].

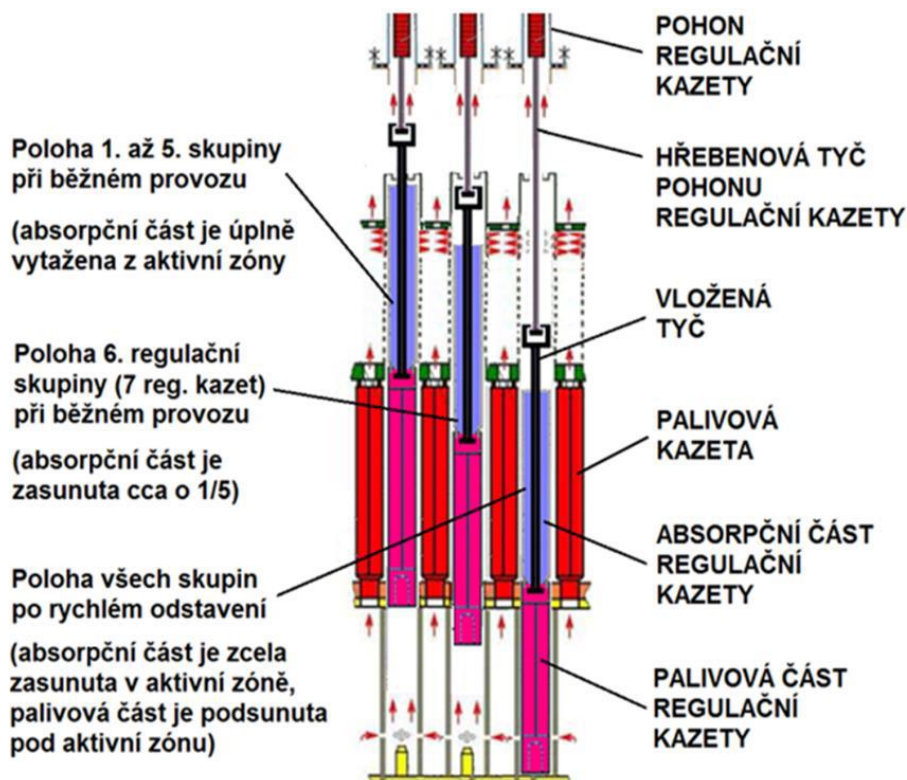
1.1 Regulační kazety HRK

Regulační kazety jsou provedeny v tandemovém uspořádání, každá kazeta se skládá z absorpční části (horní část, která obsahuje bórovou ocel s absorbatorem neutronů) a palivové části (dolní část, která stejně jako palivová kazeta obsahuje 126 palivových článků). Liší se hlavně koncovkou, která funguje jako hydraulický tlumič pádu regulační kazety. Každá regulační kazeta je přes vloženou tyč spojena s hřebenovou tyčí pohonu regulační kazety, který je umístěn nad regulační kazetou v horním bloku, viz obr. 5. [1, 5]

Při běžném provozu reaktoru jsou první až pátá skupina regulačních kazet vytaženy do horní polohy. Absorpční část je úplně vytažena nad aktivní zónu a před účinky proudícího chladiva ji chrání ochranná trubka bloku ochranných trub. Palivová část regulační kazety HRK se účastní štěpení v aktivní zóně spolu s palivovými kazetami. Šestá, regulační skupina regulačních kazet, je při provozu reaktoru částečně (asi o pětinu rozsahu) zasunuta absorpčními částmi do aktivní zóny a „vychytává“ jen „nadbytečné“ neutrony a udržuje tak kritický stav reaktoru. [1, 5]

Při mírném vytažení regulačních kazet regulační skupiny je v aktivní zóně (AZ) méně absorbátoru, reaktor je proto mírně nadkritický a výkon reaktoru se mírně zvyšuje. Při mírném zasunutí regulačních kazet regulační skupiny je v AZ více absorbátoru, reaktor je mírně podkritický a výkon reaktoru se mírně snižuje. [1, 5]

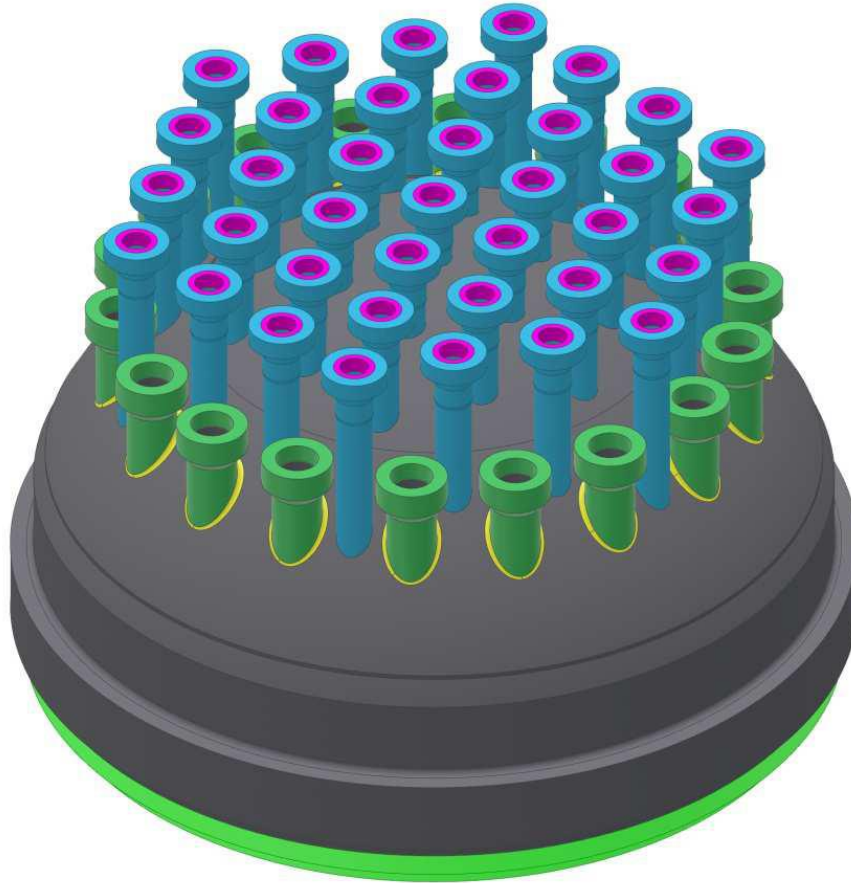
Pokud stav bloku vyžaduje rychlé odstavení reaktoru (okamžité zastavení řetězové štěpné reakce), tak automatické systémy bezpečným způsobem „vypnou“ napájení všech 37 pohonů regulačních kazet a všechny regulační kazety „spadnou“ do spodní polohy. Všechny absorpční části při tom „spadnou“ do aktivní zóny, kde „vychytají“ všechny volné neutrony a tím zastaví štěpnou reakci. Palivové části se zároveň „podsunou“ pod aktivní zónu do ochranných trubek umístěných ve dně šachty. Pád těžkých tandemů regulačních kazet je ztlumen hydraulickými tlumiči pádu jednorázovým stlačením chladiva (mezi pouzdrem v koncovce palivové části a trnem ve spodní části dna šachty). [1, 5]



Obr. 5 Možné polohy regulačních kazet v reaktoru [1].

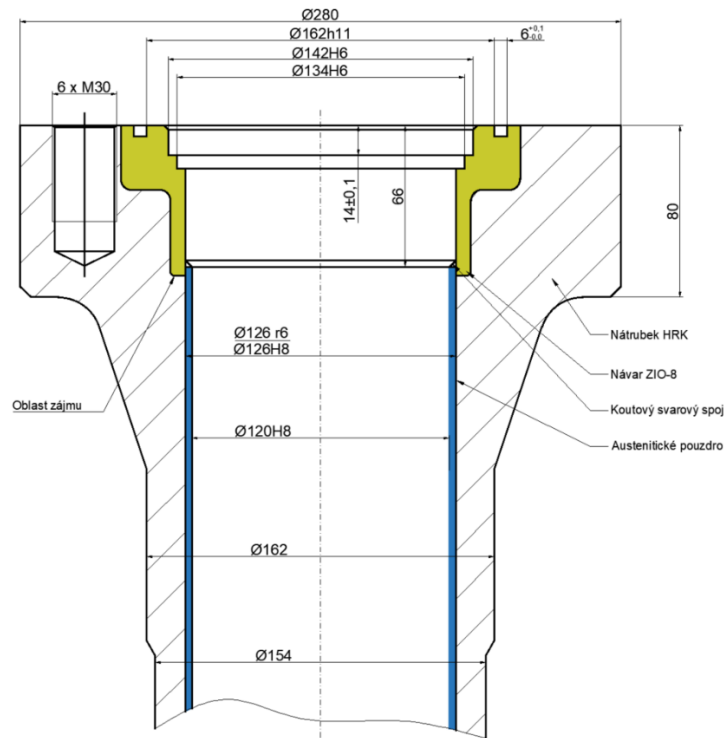
1.1.1 Nátrubek HRK

Na víku reaktoru VVER-440, který je součástí horního bloku je 37 nátrubků pro havarijní, regulační a kompenzační orgány HRK, 12 nátrubků které slouží na měření teplot (nátrubky TK) a 6 nátrubků pro měření neutronového toku. Všechny nátrubky jsou ukončené přírubovými spoji. Celé víko je zobrazeno na obr. 6.



Obr. 6 Víko reaktoru VVER 440 s nátrubky HRK (modré) a TK (zelené).

Nátrubek HRK je vyrobený z uhlíkové oceli 22K. Osazení v horní části nátrubku je vyplněno austenitickým návarem ZIO-8. Vnitřní povrch nátrubku chrání před korozi vložka z austenitické oceli 08CH18N10T s tloušťkou stěny 3 mm. Tato vložka slouží ke zmírnění vlivu změny teploty primárního chladiva na těleso nátrubku a jako ochrana vnitřního povrchu nátrubku před účinky primárního média. V tělese nátrubku je vložka nalisovaná a je přivařená koutovým svarem na přechodové návary na každém konci nátrubku. Těleso nátrubku je ve víku reaktoru nalisované a po nalisování je nátrubek v dolní části přivařený na přechodový návar víka. Mezi přírubou nátrubku HRK a přírubou pouzdra se nachází hlavní niklové těsnění a pomocné měkké těsnění z grafitu, které jsou stlačené 6 šrouby se závitem M30. Celé provedení nátrubku je zobrazeno v řezu na obr. 7 a reálná podoba celého víka s nátrubky je zobrazena na obr. 8.



Obr. 7 Náčrtek nátrubku HRK.



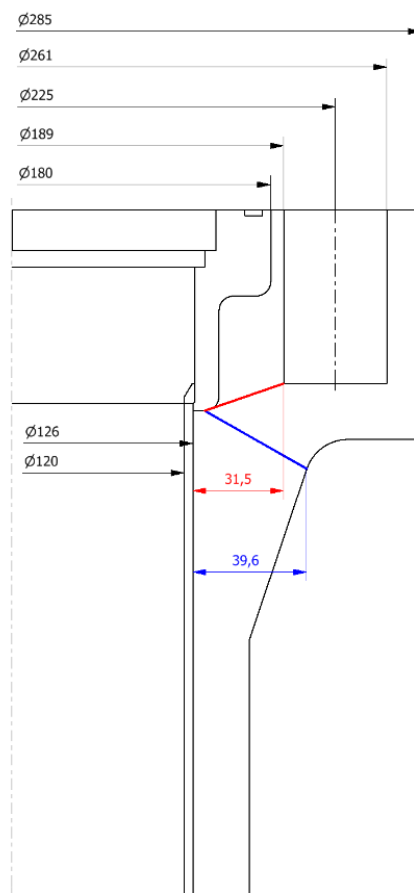
Obr. 8 Fotografie nátrubků HRK na víku reaktoru VVER 440.

1.1.2 Předpokládané necelistvosti

Jednotlivé materiály nátrubku HRK mají rozdílné hodnoty součinitele roztažnosti, což zejména při ohřevu nátrubku ze studeného stavu na provozní teplotu způsobí vznik teplotních napětí. Austenitická ochranná vložka má snahu prodloužit se více než těleso nátrubku, avšak je s nátrubkem pevně spojená svary v horní a dolní části, takže napětí se potom koncentruje v těchto svarech. Návar ZIO-8 nátrubku v horní přírubové části má taktéž větší roztažnost jako základní materiál nátrubku 22K, jehož důsledkem při ohřevu jsou tlakové osová napětí v tomto návaru.

Z tohoto důvodu je potřeba preventivně kontrolovat rozhraní návaru ZIO-8 a základního materiálu 22K. Mohou zde vznikat trhliny šířící se od vnitřního povrchu po rozhraní až do základního materiálu - vada klasifikovaná dle ČSN EN ISO 6520-1 pod referenčním číslem 100 (trhlina). Necelistvost vzniklá místním poškozením v tuhém stavu, která může vzniknout vlivem teploty, napětí, chemickým vlivem nebo jejich kombinací [6].

Trhlina se od vodorovného rozhraní může šířit buď šikmo dolů nejkratší cestou k vnějšímu povrchu nebo směrem k závitovým hnízdům. V prvním případě kolmá vzdálenost od vnitřního povrchu základního materiálu 22K (bez uvažování tloušťky ochranné austenitické vložky t.j. od $\varnothing 126$ mm) nátrubku HRK po vnější povrch je 39,6 mm a v druhém případě jenom 31,5 mm, viz obr. 9.



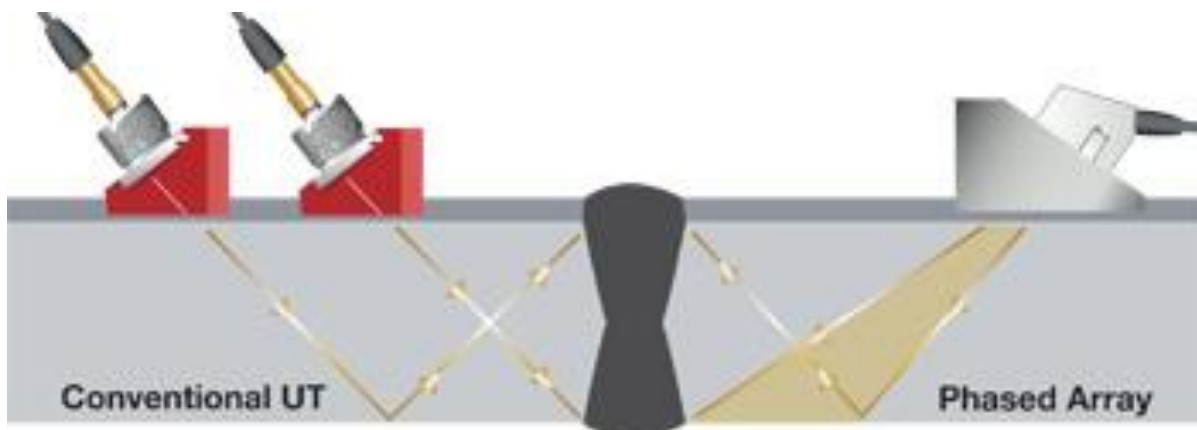
Obr. 9 Možné směry šíření trhliny.

V základním materiálu nátrubku, zejména v jeho horní přírubové části, jsou napětí relativně malá, protože tloušťka stěny v této části je velká a v určité vzdálenosti od svislé hranice návaru ZIO-8 a základního materiálu 22K už nevznikají přídatná napětí z důvodu rozdílných roztažností materiálů.

2 SOUČASNÉ MOŽNOSTI VYUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ NDT TECHNIKY PHASED ARRAY

Ultrazvukové systémy phased array mohou být potenciálně použity téměř při jakémkoli zkoušení, kde se tradičně používají konvenční ultrazvukové defektoskopy. Kontrola svarů a detekce trhlin jsou nejdůležitějšími aplikacemi a tyto zkoušky se provádějí v širokém spektru průmyslových odvětví, včetně leteckého průmyslu, výroby energie, petrochemie, dodavatelů kovových polotovarů a trubkových výrobků, výstavby a údržby potrubí, konstrukčních kovů a obecné výroby. Techniku phased array lze také efektivně použít ke zjištění zbývající tloušťky stěny v aplikacích sledování koroze. [7, 8, 9]

Výhody technologie phased array oproti konvenčnímu ultrazvukovému zkoušení pochází z její schopnosti používat více prvků k řízení, fokusaci a skenování svazkem pomocí jediné sestavy sondy, viz obr. 10. Řízení svazku, běžně označené jako S-skenování (sektorové skenování) může být použito pro mapování komponent pod vhodnými úhly. To může výrazně zjednodušit kontrolu komponent se složitou geometrií. Malá stopa sondy a schopnost rozmítat svazek bez pohybu sondy také napomáhá při kontrole komponent v situacích, kdy je v oblasti zkoušení omezen prostor pro pohyb sondy (např. při kontrole zámků lopatek parní turbíny). Sektorové skenování se také obvykle používá pro kontrolu svarů. Schopnost zkoušet svary pod několika úhly pomocí jediné sondy značně zvyšuje pravděpodobnost detekce defektů. Elektronická fokusace optimalizuje tvar a velikost svazku v místě předpokládané vady a zároveň dále optimalizuje pravděpodobnost detekce. Schopnost zaměřit se na více hloubek také zlepšuje schopnost určení velikosti kritických vad při objemových kontrolách. Fokusace může významně zlepšit poměr signálu k šumu v náročných aplikacích, a elektronické skenování napříč mnoha skupinami prvků umožňuje rychle vytvářet zobrazení „C-scan“ (půdorys). Schopnost současně zkoušet pod více úhly nebo skenovat větší oblast zkušebního tělesa pomocí lineárního skenování zvyšuje rychlost kontroly. Rychlost zkoušení technikou phased array může být až desetkrát větší ve srovnání s konvenčním ultrazvukovým zkoušením, což lze považovat za jednu z hlavních výhod. [7, 8, 9]



Obr. 10 Rozdíl mezi konvenčním ultrazvukovým zkoušením a phased array [7].

2.1 Charakteristiky sond phased array

Array (pole) je organizované uspořádání velkého množství měničů. Nejjednodušší formou ultrazvukového pole pro nedestruktivní zkoušení by byla série několika jednoměničových sond uspořádaných tak, aby se zvýšilo pokrytí zkoušení nebo rychlost konkrétní kontroly. Například kontroly trubek, kde se často používá více sond pro detekci trhlin, nalezení laminárních vad a měření celkové tloušťky. Dále takové uspořádané pole můžeme využít u kontrol kovaných kovových součástí, které často vyžadují více sond fokusovaných do různých hloubek, aby bylo možné detekovat malé vady zónovým způsobem. Dalším příkladem je zkoušení kompozitních materiálů a kovů, kde je vyžadováno lineární uspořádání sond podél povrchu pro zvýšení detekce laminárních vad v kompozitech nebo koroze v kovech. [10, 11]

V nejjednodušší formě lze uvažovat o sondě phased array jako o sérii jednoměničových sond v jednom pevně svázaném pouzdře, viz. obr. 11. Zatímco jednotlivé prvky phased array sondy jsou ve skutečnosti mnohem menší než běžné měniče u jednoměničových sond, mohou být tyto prvky buzeny jako skupina tak, aby generovaly směrově ovladatelné vlnoplochy. Toto „elektronické tvarování svazku“ umožňuje naprogramovat a analyzovat více kontrolních zón při velmi vysokých rychlostech bez pohybu sondy. [10, 11]

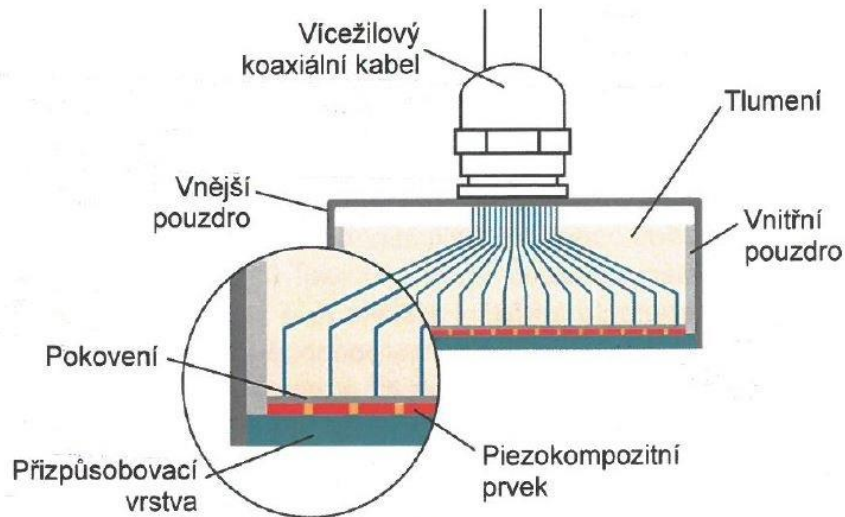


Obr. 11 Znárodnění složení phased array sondy pomocí jednoměničových sond [10].

Phased array sondy existují v širokém rozmezí velikostí, tvarů, frekvencí a počtu prvků (příklady viz obr. 12). Z hlediska konstrukce mají společné to, že piezoelektrický měnič je rozdělen na řadu segmentů, které lze samostatně ovládat. Současné jsou phased array sondy pro průmyslové aplikace NDT typicky konstruovány kolem piezokompozitních materiálů, které jsou tvořeny mnoha drobnými tenkými tyčemi z piezoelektrické keramiky uloženými v polymerní matrici. Přestože mohou být náročnější pro výrobu, kompozitní sondy obvykle nabízejí o 10 dB až 30 dB vyšší citlivost než piezokeramické sondy jinak podobného provedení. Segmentované pokovování se používá k rozdělení kompozitního pásu do mnoha elektricky oddělených prvků, které mohou být buzeny jednotlivě. Tento segmentovaný měnič je pak zabudovaný do sestavy sondy, která obsahuje ochrannou přizpůsobovací vrstvu, tlumení, kabelová spojení a pouzdro, viz obr. 13. [10, 11]



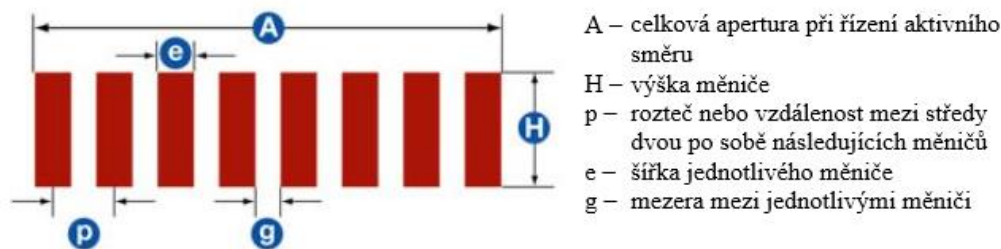
Obr. 12 Sondy phased array [12]



Obr. 13 Příčný řez phased array sondou [13].

Rozdělení phased array sond dle následujících parametrů [14]:

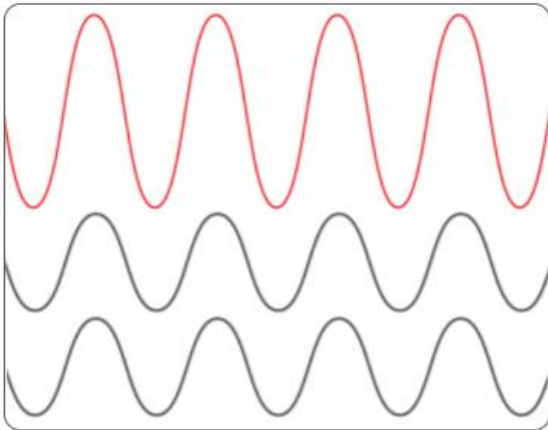
- Typ – největší množství phased array sond jsou typu s úhlovým svazkem, které jsou určeny pro využití s plastovým klínem (předsádkou) anebo s plochou plastovou botičkou (klín s úhlem nula stupňů). K dostání jsou také imerzní a přímé kontaktní sondy.
- Frekvence – většina dnes používaných phased array sond má frekvenci v rozmezí 2MHz až 10MHz. Samozřejmě jsou vyráběny i sondy s nižší a vyšší frekvencí, ale ty už nejsou tak obvyklé. Tak jak je tomu u klasického konvenčního ultrazvuku, tak i u techniky phased array se prozvučitelnost zvyšuje s nižší frekvencí, a naopak s vyšší frekvencí se zvyšuje rozlišitelnost a ohnisková ostrost.
- Počet měničů – nejčastěji phased array sondy obsahují 16 až 128 měničů a pro speciální případy lze využít sondu s 256 měniči. Větší počet prvků zvyšuje schopnost fokusace a směřování, což také zvyšuje plošné pokrytí, avšak se zvyšujícím se počtem měničů rostou náklady na sondu a přístrojové vybavení. Každý z těchto prvků je buzen nezávisle, aby se vytvořila požadovaná vlnoplocha. Proto je podélný rozměr tohoto seskupení měničů nazýván jako směr natočení nebo aktivní směr.
- Velikost měničů – se zmenšující se šířkou jednotlivých měničů roste schopnost řízení svazku, avšak čím větší je požadováno plošné pokrytí, tím je potřeba větší počet měničů (obr. 14). Se snižující se velikostí měniče také razantně rostou náklady na pořízení sondy.



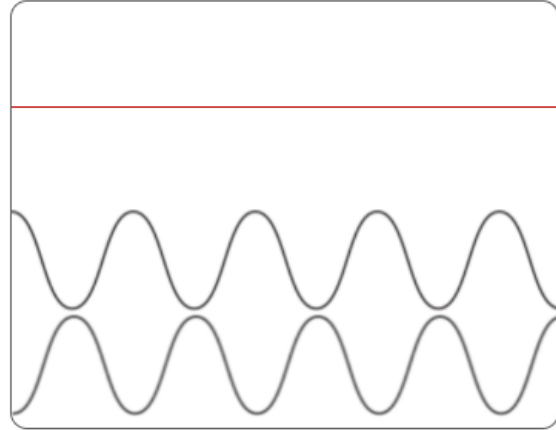
Obr. 14 Rozměrové parametry phased array sondy [14].

2.2 Princip fungování phased array sondy

Ultrazvukové vlny pocházející ze dvou a více zdrojů na sebe vzájemně působí. Dochází k účinkům fázování vedoucích ke zvýšení nebo snížení vlnové energie v místě kombinace. Když se elastické vlny stejné frekvence setkávají tak, že jejich fázové posuny jsou přesně synchronizovány (jsou ve stejné fázi), vlnové energie se sčítají a vytváří interferenční vlnu s energií obou těchto vln, viz obr. 15. Pokud se setkají tak, že jejich fázové posuny jsou přesně opačné, pak se energie těchto vln vzájemně vyruší, viz obr. 16. Změnou časování vln z velkého množství zdrojů je možné využít tyto efekty jak pro řízení, tak pro fokusaci výsledné kombinované vlnoplochy. Na tomto principu je založena technika phased array. [15, 16]

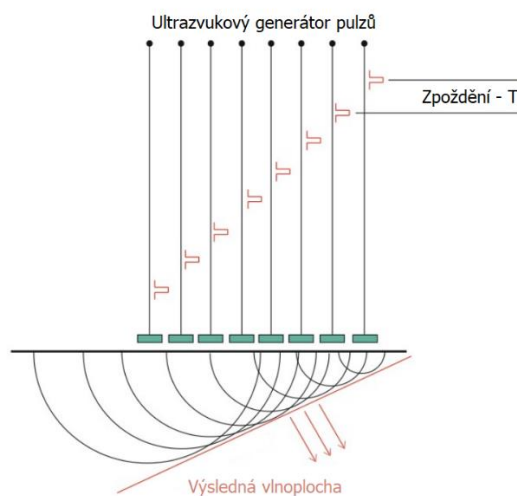


Obr. 15 Vlny ve fázi [16].



Obr. 16 Vlny v opačné fázi [16].

Při zkoušení se předvídatelné účinky vzájemného zesilování a rušení způsobené fázováním používají k řízení a tvarování výsledného ultrazvukového svazku. Pulzující jednotlivé prvky nebo skupiny prvků s různými zpožděními vytváří řadu vln bodových zdrojů, které se skládají do jediné vlnoplochy, která se šíří ve zvoleném úhlu, viz obr. 17. Při konstruktivní interferenci může být amplituda této kombinované vlny značně silnější než amplituda jakékoli z jednotlivých vln, které ji vytváří. Podobně se proměnná zpoždění uplatňují na echa přijímaná každým prvkem sondy. Echa se sčítají pro reprezentaci jedné úhlové, ohniskové nebo obojí složky celého svazku. Kromě změny směru primární vlnoplochy, tato kombinace jednotlivých složek svazku umožňuje fokusovat svazek v libovolném bodě v blízkém poli. [16]

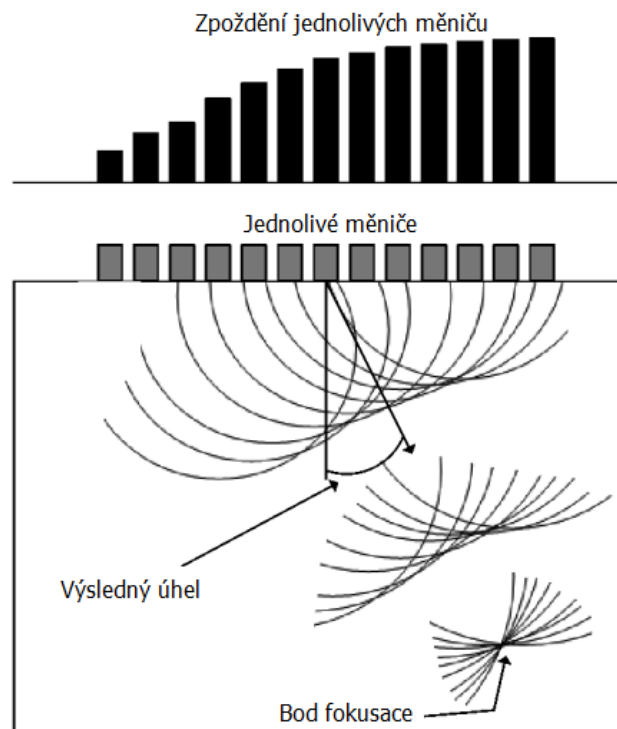


Obr. 17 Vlnoplocha uhlové vlny [17].

Jednotlivé měniče jsou obvykle buzeny ve skupinách po 4 až 32 prvcích, aby se zvýšila efektivní citlivost zvětšením apertury, což snižuje nežádoucí rozbíhání svazku a umožňuje ostřejší fokusaci. [16]

Různé měniče nebo skupiny měničů přijímají vrácená echa a posouvají je, jak je potřeba pro kompenzování proměnlivých zpoždění v klínu a poté se sčítají. Oproti konvenční jednoměničové sondě, která všechny složky svazku dopadající na její plochu účinně slučuje, phased array sonda je schopna prostorově uspořádat vrácenou vlnoplochu podle času příchodu a amplitudy každého měniče. Každý vrácený ohniskový zákon při zpracování softwarem představuje odraz od určité úhlové složky svazku, určitého bodu podél lineární dráhy nebo odraz z určité ohniskové hloubky. Následně lze vybrat z několika formátů zobrazení, jak bude informace echa zobrazena. [16]

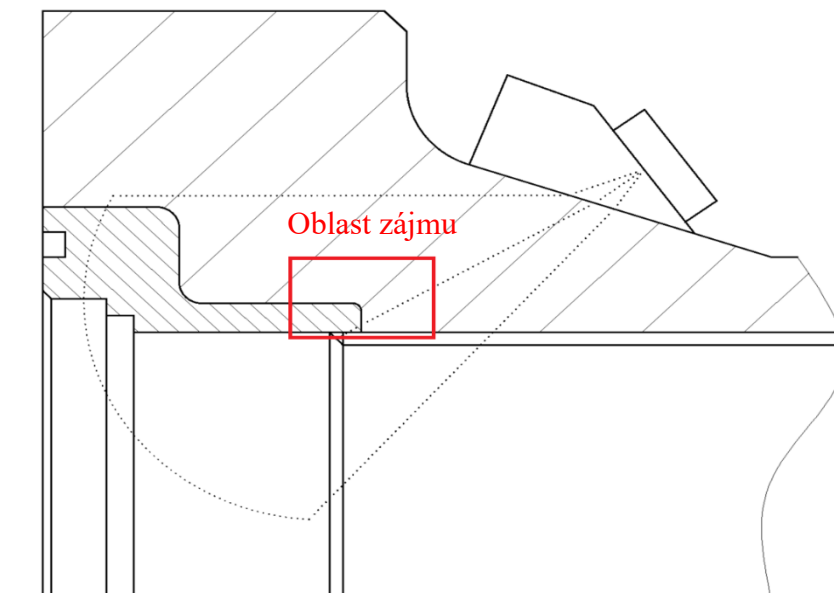
Pomocí softwaru, který bývá známý jako kalkulátor ohniskových zákonů (focal law calculator), se pro jednotlivé měniče nebo skupiny měničů stanoví časy zpoždění se záměrem generovat požadovaný tvar svazku prostřednictvím vlnové interakce. V úvahu se při tom berou vlastnosti sondy a klínu, vlastnosti zkoušeného materiálu a geometrie zkoušeného předmětu. Naprogramovaná pulsní sekvence vybraná operačním softwarem přístroje pak spouští ve zkoušeném materiálu řadu jednotlivých vlnoploch. Skládáním těchto vlnoploch vznikne jedna primární vlnoplocha, která prostupuje materiálem a odráží se od možných nečelivostí, geometrických reflektorů nebo od rozhraní jednotlivých materiálů, viz obr. 18. Svazek může být dynamicky řízen s různými úhly, ohniskovými vzdálenostmi a velikostmi ohniska tak, že jedno složení sondy je schopno prozkoumat oblast zájmu v celé řadě různých perspektiv. Toto řízení svazků se děje tak rychle, že zkoušení celé požadované oblasti proběhne ve zlomcích sekundy. [16]



Obr. 18 Fokusace phased array sondy do určitého bodu pod určitým úhlem [18].

3 NÁVRH ZKUŠEBNÍHO SYSTÉMU

Zkouška je zaměřena na předpokládané místo vzniku necelistvostí (oblast zájmu), kterým je rozhraní základního materiálu 22K a návaru ZIO-8. Jediná možnost zkoušení zmiňované oblasti zájmu je přiložení sondy na kónus nátrubku jak je zobrazeno na obr. 19. Před zahájením navrhování zkušebního systému je nutné pevně definovat ovlivňující parametry a podmínky zkoušeného tělesa. Zkušební povrch musí být rovný a před zkouškou zbaven ochranného nátěru, očištěný, zbavený anorganických nečistot, bez povrchových nerovností a požadovaná drsnost povrchu by měla dosahovat minimálně Ra 6,3 v celé šířce kónusu. Aby byla zabezpečena uspokojivá akustická vazba, a byl vyloučen výskyt falešných indikací. Povrchu nesmí bránit volnému pohybu ultrazvukových sond a způsobit chybnou interpretaci a hodnocení výsledků ultrazvukového zkoušení. Teplota zkoušeného objektu musí být v rozmezí 5 °C až 45 °C, kdyby teplota překročila stanovené rozmezí, bylo by nutné požit vysokoteplotní sondu a vazební prostředek na vysoké teploty. V blízkosti místa kontroly nesmí být prováděny svářečské práce, které způsobují rušení UZ signálu.



Obr. 19 Plán skenu.

3.1 Ultrazvukový přístroj

Přístroj pro ultrazvukovou kontrolu metodou phased array byl zvolen TOPAZ 32 (obr. 20), který je v dnešní době jeden z nejlepších a nejvýkonnějších ultrazvukových defektoskopů na trhu. Velmi robustní konstrukce a pouzdro s gumovými prvky dělá přístroj dostatečně odolný, aby zvládl kontroly ve velmi náročných podmínkách. Nízká hmotnost zajišťuje dobrou manipulaci v těžce přístupných místech. Integrovaný dotykový display je dostatečně velký pro zobrazení veškerých potřebných zobrazení v reálném čase, jako jsou například:

- A-sken
- S-sken
- D-sken
- B-sken
- C-sken

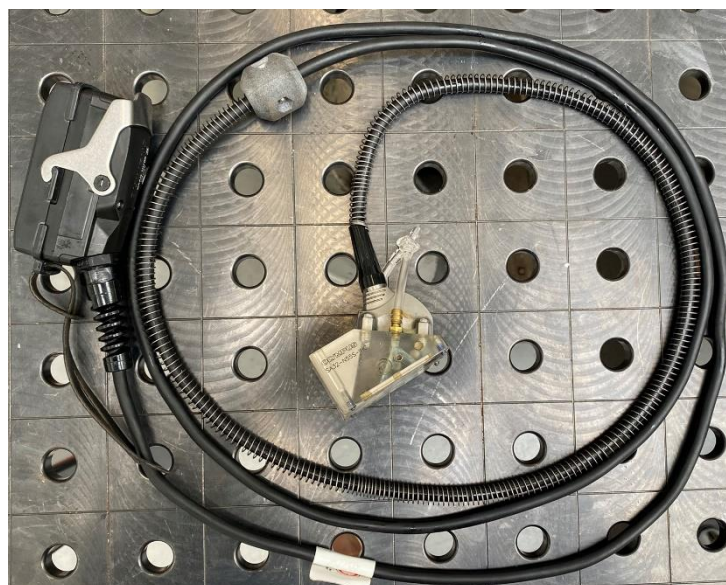
Přístroj TOPAZ 32 umožňuje ovládat v jeden okamžik až 32 elementů z celkového množství až 128 připojených. Což nabízí velké množství konfigurací zkušebního systému. V kombinaci s vhodnou sondou lze elektronicky řízeným spouštěním jednotlivých měničů dosáhnout velkého rozpětí uhlů, různých druhů nastavení fokusací a velmi vysoké citlivosti systému.



Obr. 20 Topaz 32 [19].

3.2 Ultrazvuková sonda

Jako nejvhodnější byla zvolena phased array sonda 5L64-A32 osazená klínkem SA32-N55S-IHC (obr. 21). Tato PA sonda se zkušební frekvencí 5 MHz a optimální velikostí měničů zajišťuje dostatečnou prozvučitelnost materiálu 22K a více než dobrou rozlišitelnost potenciálních defektů. Velký počet měničů v kombinaci s jejich malou velikostí, umožňuje dostatečné řízení svazku, nastavení vhodného místa s vhodným směřováním fokusace. S těmito výhodami, ale bohužel také velmi rostou pořizovací náklady na tuto kombinaci sondy s klínkem.



Obr. 21 Sonda 5L64-A32 osazená klínkem SA32-N55S-IHC

Tab. 1 Parametry sondy 5L64-A32.

Výrobce	Olympus
Tvar sondy	Obdélníkový
Konfigurace	Linear
Frekvence	5 MHz
Počet měničů	64
Šířka měniče	0,42 mm
Výška měniče	10 mm
Rozteč měničů	0,5 mm
Mezera mezi měniči	0,08 mm
Délka kabelu	2 m
Konektor	Omniscan

Tab. 2 Parametry klínku SA32-N55S-IHC.

Výrobce	Olympus
Typ sondy	SA32
Nominální výstupní úhel	55°
Typ vlny	příčná
Doporučený rozsah úhlů	40° až 70°
Orientace	normal
Délka	61,5 mm
Šířka	40 mm
Výška	33 mm
Úhel	36°
Rychlost šíření ultrazvuku v klínku	2330 m/s
Výška prvního elementu	6 mm

3.3 Manipulátor

Aby bylo možné zaznamenávat polohy a přesné souřadnice případných defektů, je nutné uchytit pevně sondu do manipulátoru, který umožní sondě pouze pohyb po obvodu nátrubku. Tímto je docíleno přesného a neměnného směřování ultrazvukového svazku do oblasti zájmu po celém obvodu. S ohledem na velikost, geometrii a materiál nátrubku je nejlepší možnost použít manipulátor od firmy JIREH. Firma nabízí prvotřídní nabídku manipulátoru s širokými možnostmi použití. Jednotlivé konstrukce lze velmi jednoduše přizpůsobovat a kombinovat. Pro zkoušení reálného nátrubku na provozovaném reaktoru VVER 440 je ideální manipulátor ROTIX (obr.22), který lze pevně upnout po obvodu celého nátrubku. O snímání obvodové souřadnice se stará enkodér zabudovaný v takzvaném “autíčku“ (na obr.22 je zobrazeno v levém spodním rohu). Hlavní a zároveň jediný důležitý parametr enkodéru je jeho rozlišení. Udává počet impulzů vyslaných do přístroje na jeden milimetr. Každý enkodér má svoji předepsanou hodnotu, která je napsána přímo na jeho těle. Enkodér v “autíčku“ má rozlišení 19,13 pulzů na jeden milimetr. Pro zkoušení vzorku s vytvořenými umělými vadami je spíše vhodný manipulátor STIX (obr. 23) od stejné firmy JIREH. Protože vzorky většinou nebývají úplně jako reálný nátrubek a jsou tvořeny pouze polovinou obvodu na která nelze upnout ROTIX za celý obvod. STIX disponuje velmi silnými magnetickými kolečky, které poskytují dostatečný přítlak k tělesu. Enkodér zde lze samostatně připnout na potřebné místo. Rozlišení je v tomto případě 9,05 pulzů na jeden milimetr.



Obr. 22 Manipulátor ROTIX.



Obr. 23 Manipulátor STIX.

3.4 Softwarové nastavení přístroje

Pro správnou funkci a následné zobrazování naměřených dat je zapotřebí celý zkušební systém nakonfigurovat tak, aby všechny jeho jednotlivé součásti fungovaly jako celek. Měřicí přístroj musí dávat v přesně stanovený čas povely jednotlivým měničům sondy, kdy mají vysílat signál a následně kdy ho přijímat zpět. Od enkodéru přejímá informace o obvodové poloze sondy. Následně veškeré údaje přepočítá a zobrazí v požadovaném zobrazení. Jednotlivé kroky nastavení jsou následující:

- Vybrání zkušebního materiálu z databáze s předdefinovanými rychlostmi šíření zvuku pro podélnou vlnu a příčnou vlnu, viz obr. 24. Ocel 22K má rychlost šíření podélné vlny 5920m/s a příčné vlny 3230m/s.



Obr. 24 Nastavení rychlosti šíření ultrazvukové vlny

- Vybrání sondy a klínku z databáze (obr. 25):



Obr. 25 Volba sondy a klínku

- Kontrola parametrů sondy dle Tab. 1 (obr. 26) a klínku dle Tab. 2 (obr. 27)

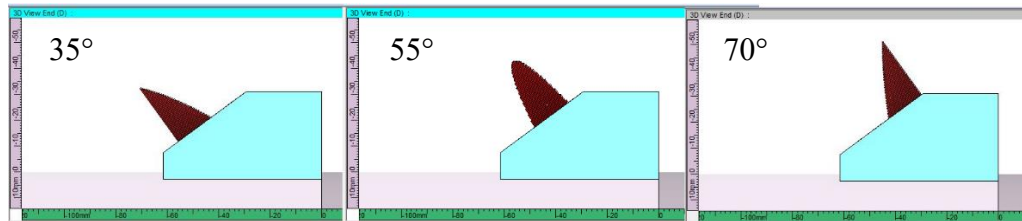
Probe Editor	
Name	5L64-A32
Serial Number	-
Type	Linear
Frequency	5,00 MHz
Element Quantity	64
Pitch	0,50 mm
Primary Axis Element Size	0,50 mm
Secondary Axis Element Size	10,00 mm
Element numbering	Regular
Primary Gap	0,00 mm
Primary Total Size	32,00 mm
Cable Length	2,0 m
Connector Model	Zpac
<input type="button" value="Accept"/>	

Obr. 26 Nastavení sondy.

Wedge Editor	
Wave Type	Longitudinal
Length	61,50 mm
Width	40,00 mm
Height (Legacy)	33,77 mm
Wedge Angle	36,1 deg
Roof Angle	0,0 deg
First Element Height (Legacy)	14,64 mm
First Element Primary Axis Offset	5,98 mm
First Element Secondary Axis Offset	20,00 mm
Primary Axis Position of Wedge Reference	-61,50 mm
Secondary Axis Position of Wedge Reference	-20,00 mm
Material Name	Rexolite
Velocity	2330 m/s
<input type="button" value="Accept"/>	

Obr. 27 Nastavení klínku.

- Nastavení phased array sondy (obr. 29):
 - Typ vlny (Wave Type) – shear (příčná)
 - Způsob skládání svazku (Sweep) – compound, pro vytvoření jedné vlnoplochy nepoužívá všechny měniče obsažené v sondě, viz obr. 28 (například úhel 35° vytváří měniče 1-32, úhel 55° vytváří měniče 19-51 a úhel 70° vytváří měniče 33-64), tímto nastavením docílíme roztáhnutí zkoušené zóny.



Obr. 28 Tvoření vlnoploch pomocí vzájemného zpoždění jednotlivých měničů.

- Rozevření svazku – od 35° do 70° s rozlišením po 1°, poskytne velmi vysoký rozsah zkoumané oblasti)
- Počet elementů podílejících se na jedné vlnoploše (Aperture) – 32 elementů
- Rozsah podílejících se elementů (First Element, Last Element) – od 1 po 64 s posunem o 1 element (Probe Connection)
- Typ fokusace (Focal Point) – Half Path (fokusace do určité vzdálenosti na časové základně)
- Vzdálenost fokusace (Position) – 60 mm (fokusováno do vzdálenosti 60 mm)
- Typ časové základny (Timebase Type) – Half Path (všechny vlnoplochy mají stejnou délku časové základny)
- Začátek zobrazované časové základny (Timebase Start) – 15 mm (začíná zobrazovat svazek 15 mm od vstupu do materiálu, tímto je oříznuto zbytečné zobrazení blízkého pole)
- Délka časové základny (Timebase Range) – 200 mm, musí být dostatečná, pro zobrazení celé oblasti zájmu.

Calculator

Wave Type	Shear	Focal Point	Half Path
Sweep	Compound	Position	60,00 mm
Start Angle	35,0 deg	Timebase Type	Half Path
Stop Angle	70,0 deg	Timebase Start	15,00 mm
Resolution	1,0 deg	Timebase Range	200,00 mm
Aperture	32		
First Element	1		
Last Element	64		
Reverse Probe	No		
Probe Connection	1		

Obr. 29 Nastavení phased array sondy.

- Nastavení záznamu (obr. 30), zde je zapotřebí nastavit od které obvodové souřadnice bude záznam začínat a kterou souřadnicí bude končit. Když není z jistých důvodů zapotřebí jinak, tak záznam začíná v pevně vyznačeném nulovém bodě a končí po objetí celého obvodu nátrubku s překrytím cca 10 %. Rozlišení skenu nám určuje po jakých úsecích nám bude přístroj ukládat záznam. Například hodnota 1 mm znamená, že každý jeden milimetr se uloží jeden snímek. Čím větší je toto rozlišení, tím přesněji lze určit délku případných indikací. Ale čím větší rozlišení je, tím větší je velikost naměřených dat. Proto určení velikosti indikace s přesností na 1 mm je více než dostačující.



Obr. 30 Nastavení rozsahu a rozlišení skenu.

- Nastavení enkodéru (obr. 31), zde je nejdůležitější zadat rozlišení, které je přesně dáno výrobcem. Rotix má hodnotu 19,13 pulzů na jeden milimetr a Stix má 9,05 pulzů na jeden milimetr. Při nedodržení tohoto rozlišení by přístroj špatně počítal obvodové souřadnice. Pokud enkodér nesnímá souřadnice ze stejného povrchu po kterém jede i sonda, tak lze toto rozlišení manuálně nakalibrovat, aby přístroj ukazoval správně. Dále je nutné nastavit směr otáčení a hodnotu obvodové souřadnice na které bude záznam při spuštění začínat.



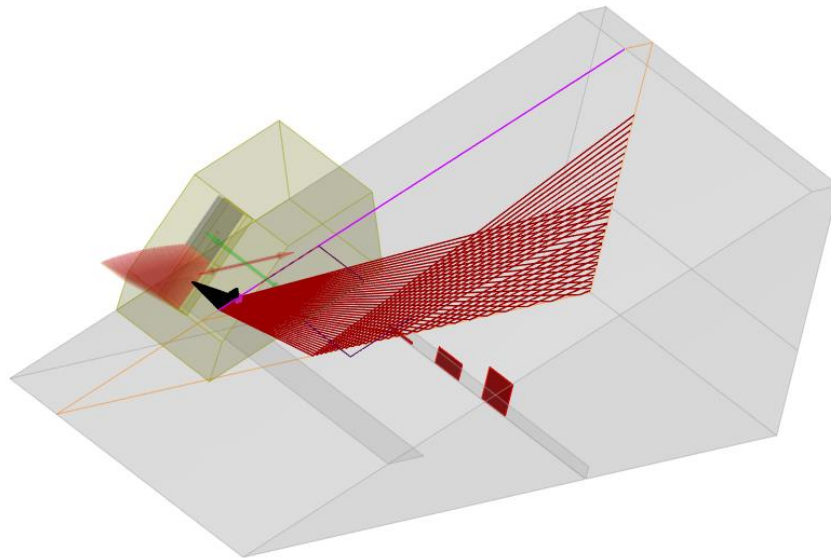
Obr. 31 Nastavení enkodéru.

Takto nastavený přístroj bude po následné kalibraci citlivosti schopný správně řídit jednotlivé měniče sondy, vysílat správně jednotlivé vlnoplochy do zkoušeného materiálu a následně je zase zpět odražené přijímat v sondě. Velké množství výstupů, které zařízení poskytuje, je dopočítáváno. Proto nám přístroj zobrazí výsledky podle toho, jak ho nakonfigurujeme.

3.5 Předpokládaná citlivost kontroly

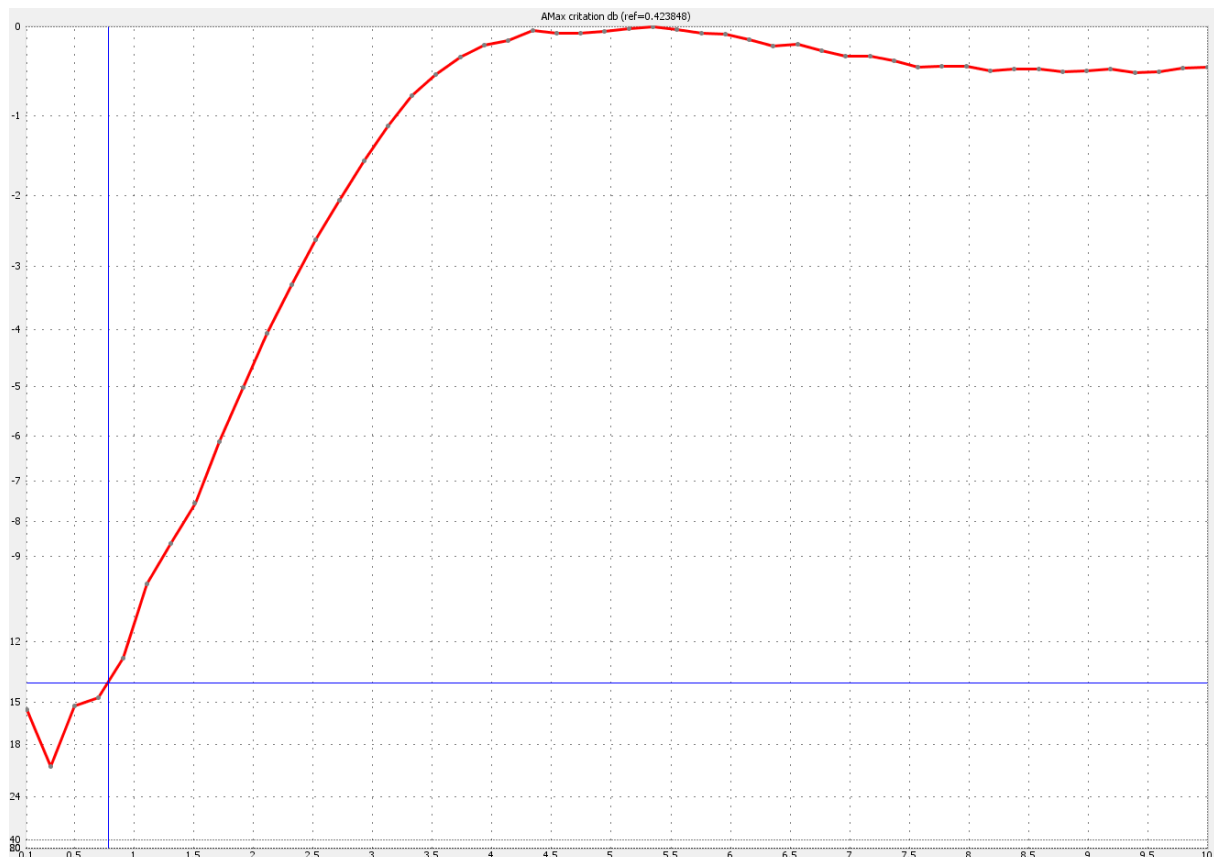
Citlivost zkoušky byla nastavena na drážce 5 x 10 mm vyrobené v referenčním etalonu. Registrační úroveň byla nastavena na hodnotu +14 dB od referenční úrovně. Předpokládaná citlivost zkoušky byla stanovena na základě simulací v SW CIVA 2020. Simulací ultrazvukového zkoušení byla analyzována citlivost zkoušky v závislosti na velikosti kalibrační drážky a předpokládané velikosti reflektoru. Simulace byla provedena na zjednodušeném modelu, kde nebyla brána v úvahu plná geometrie komponenty. Pro simulaci by zhotoven model (Obr. 32), který reprezentuje:

- Dráhu ultrazvukového svazku k reflektoru
- Uhel dopadu na reflektor



Obr. 32 Zjednodušený model použitý pro simulaci podmínek UT zkoušky

Zjednodušený model byl vytvořen pouze za účelem predikce nastavení citlivosti zkoušky. Během simulace nebyly brány v úvahu faktory útlumu ultrazvukového svazku v materiálu. Vliv útlumu by měl být ověřen na umělých nečistostech.

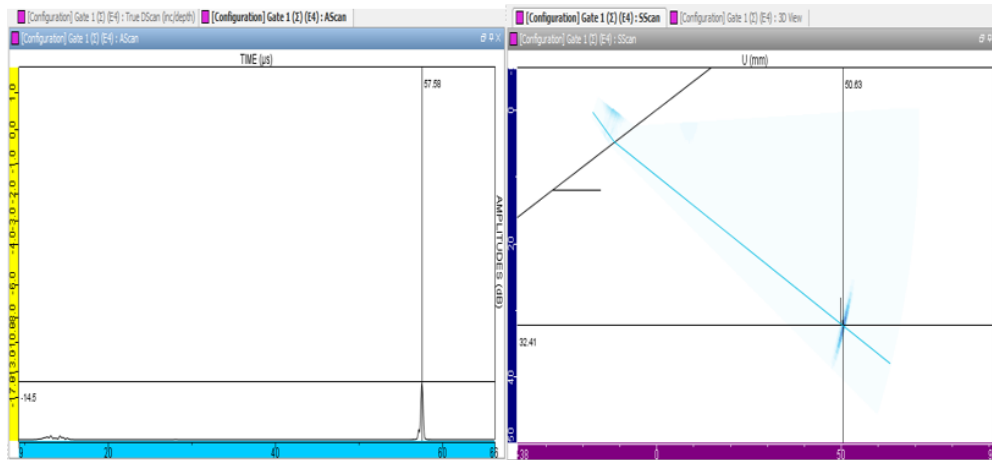


Obr. 33 Vliv výšky reflektoru na amplitudu echa.

Při nastavení registrační úrovně +14 dB nad referenční úroveň, je předpokládána citlivost kontroly nastavena na drážku o výšce 0,7 mm, viz obr. 33. Maximální amplituda echa, při které je patrný vliv výšky kalibračních reflektorů se pochybuje v rozmezí 4,5 a 5,5 mm. U vyšších reflektorů je rozevření svazku vyšší než výška vady, a tak nemá vliv na amplitudu echa.

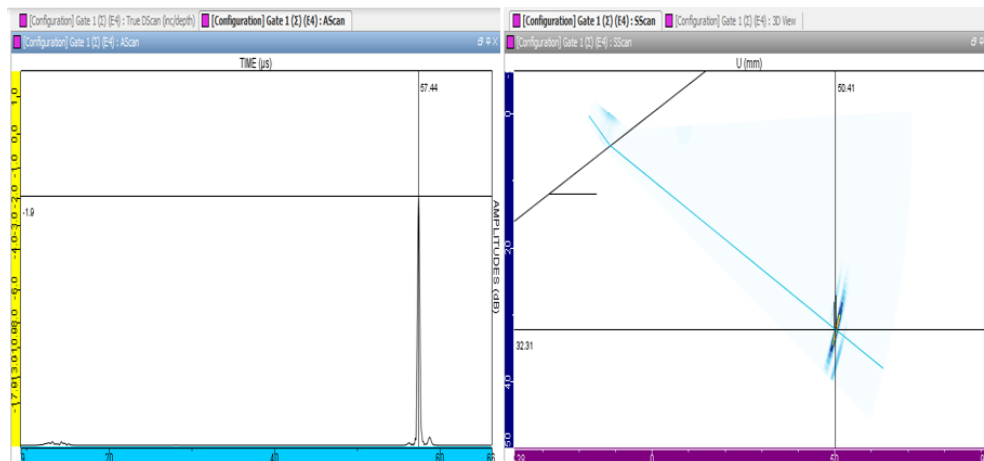
Na základě grafu závislosti amplitudy echa na výšce kalibračního reflektoru (Obr. 33) byla provedena pro názornost simulace ultrazvukového zkoušení s následujícími výškami reflektorů:

- reflektor s výškou 0,7 mm (Obr. 34)



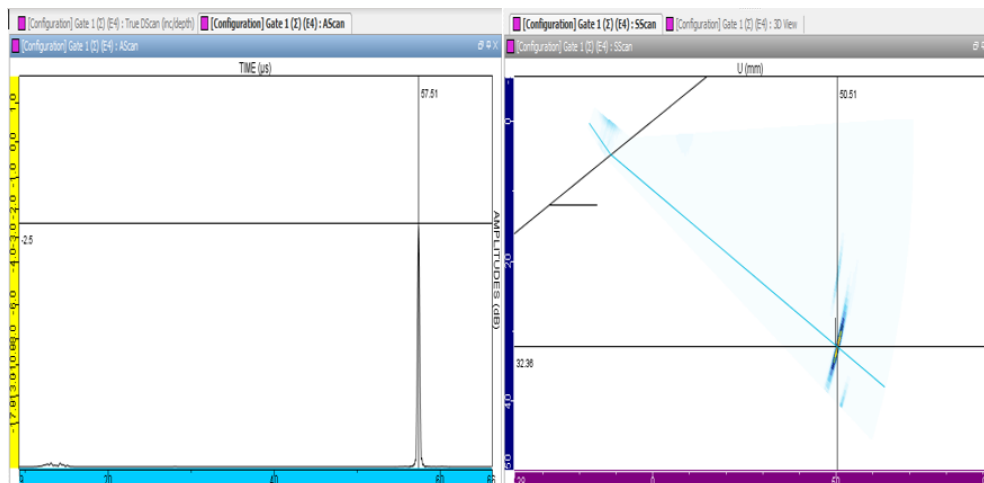
Obr. 34 Simulace ultrazvukového zkoušení reflektoru s výškou 0,7 mm.

- reflektor s výškou 5 mm (Obr. 35)



Obr. 35 Simulace ultrazvukového zkoušení reflektoru s výškou 5 mm.

- reflektor s výškou 10 mm (Obr. 36)



Obr. 36 Simulace ultrazvukového zkoušení reflektoru s výškou 10 mm.

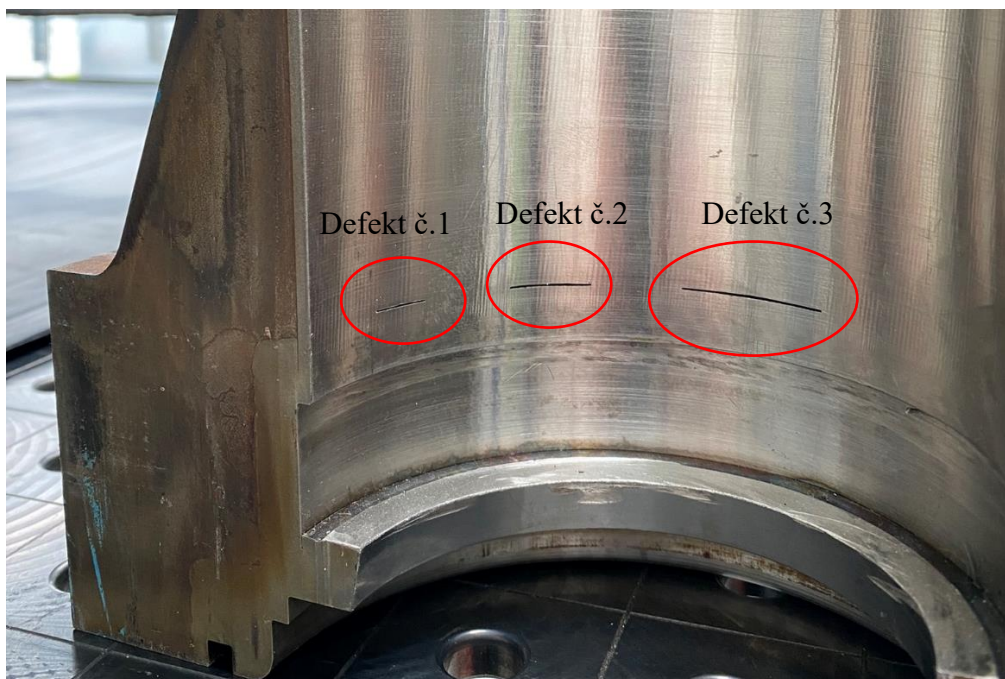
4 OVĚŘENÍ SYSTÉMU NA ZKUŠEBNÍCH VZORCÍCH

Každý navržený zkušební systém je nutné před nasazením na reálně provozované zařízení vhodným způsobem prověřit, zda je schopný detekovat předpokládané necelistvosti. Ověření probíhá na zkušebních etalonech, které musí být ze stejného materiálu a stejné konstrukce (obr. 37) jako reálná součást. Do etalonu se nechají pomocí elektrod vyjiskřit umělé vady různých velikostí a tvarů.



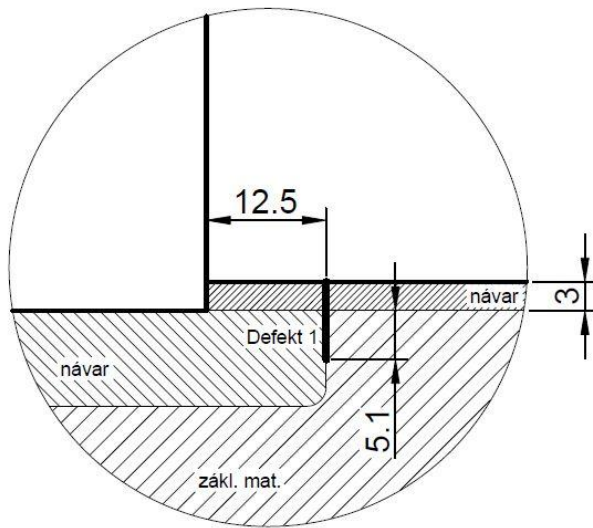
Obr. 37 Etalon vyrobený z reálného nátrubku HRK.

Ověření se provede na následujících 3 uměle vytvořených defektech (Obr. 38):



Obr. 38 Etalon s uměle vyrobenými defekty.

- Defekt č.1 – Semieliptická drážka o rozměrech 12,5x5,1 mm (Obr. 39 a 40)

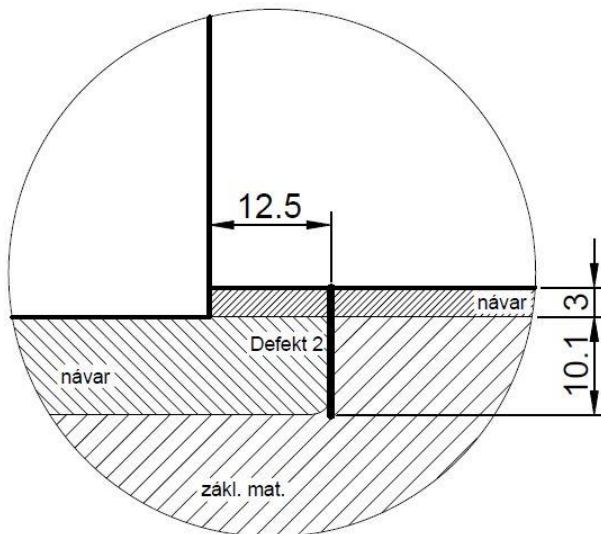


Obr. 39 Náčrt umístění defektu č.1.

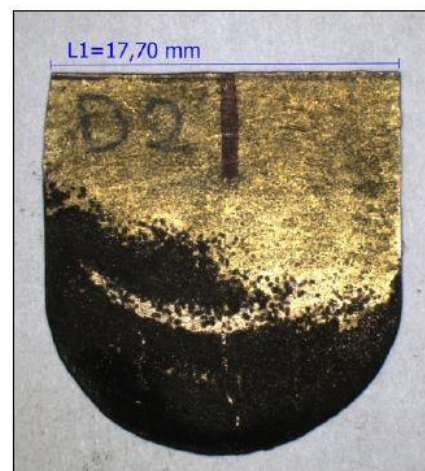


Obr. 40 Elektroda po výrobě defektu č.1.

- Defekt č.2 – Semieliptická drážka o rozměrech 18,1x10,1 mm (Obr. 41 a 42)

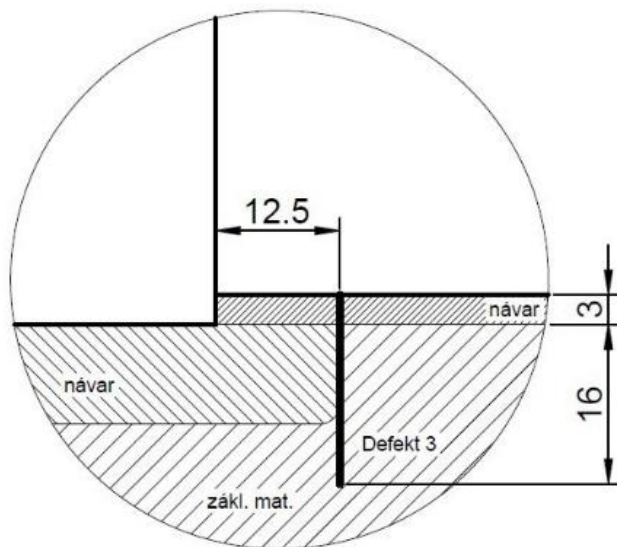


Obr. 41 Náčrt umístění defektu č.2.

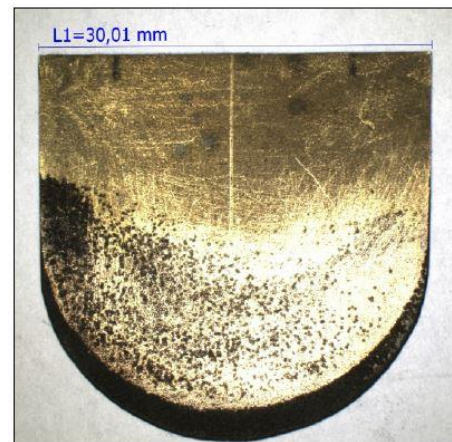


Obr. 42 Elektroda po výrobě defektu č.2.

- Defekt č.3 – Semieliptická drážka o rozměrech 30,4x16 mm (Obr. 43 a 44)



Obr. 43 Náčrt umístění defektu č.3.

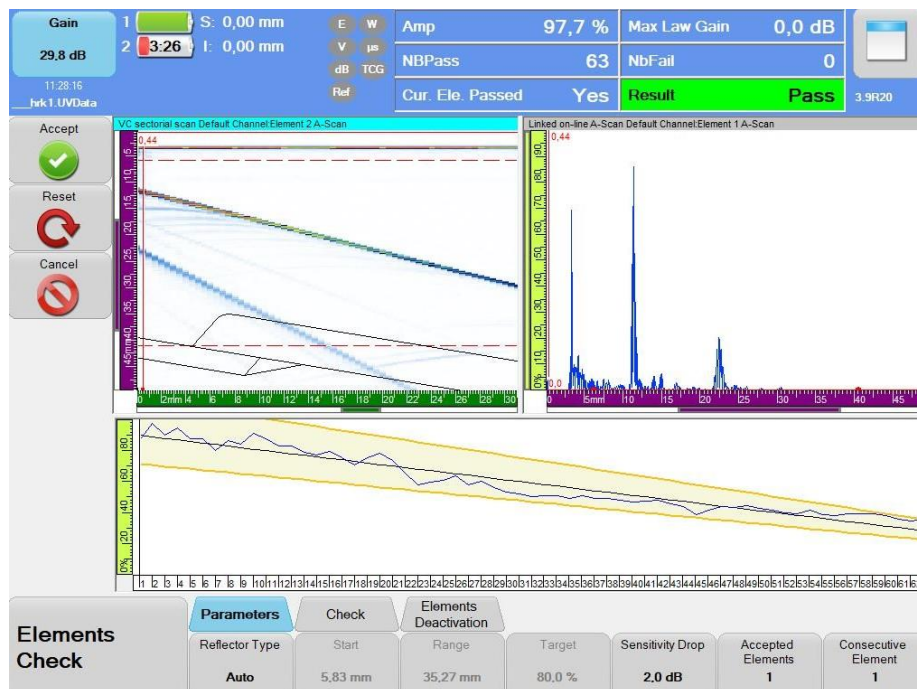


Obr. 44 Elektroda po výrobě defektu č.3.

4.1 Kalibrace citlivosti systému

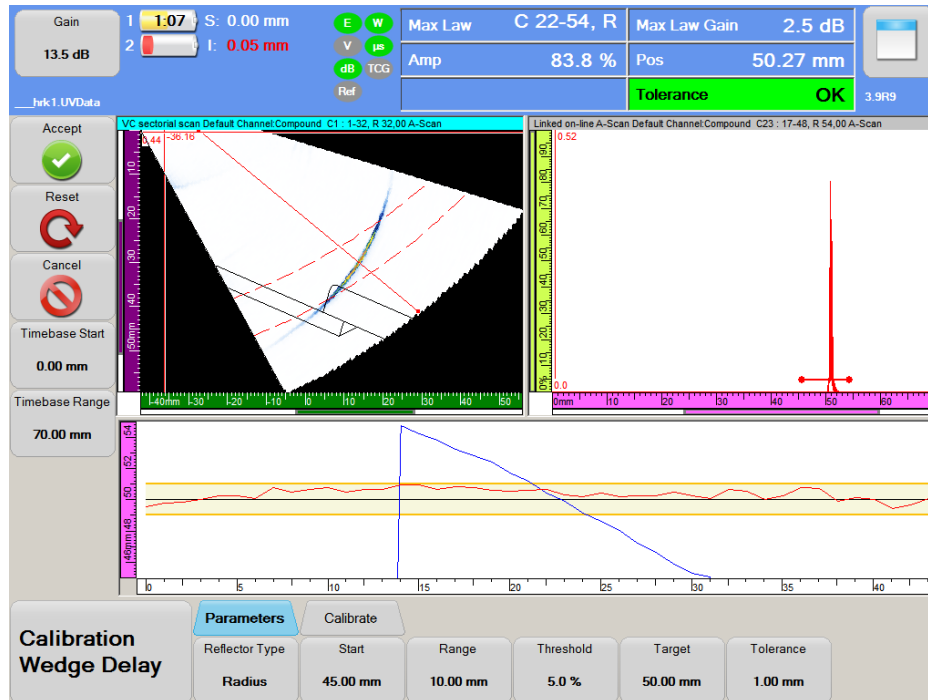
Před zahájením každého zkoušení je nutné provést kalibraci zkušebního systému, abychom dosáhli požadované citlivosti a přesnosti. Jednotlivé kroky kalibrace jsou popsány v následujících bodech:

- Ověření funkčnosti elementů (Obr. 45) – každý element sondy musí být funkční s tolerancí 2 dB aby docházelo ke správnému tvoření vlnoploch. Nefunkčnost elementů může způsobovat špatný kontakt v konektoru nebo přerušovaný kabel.

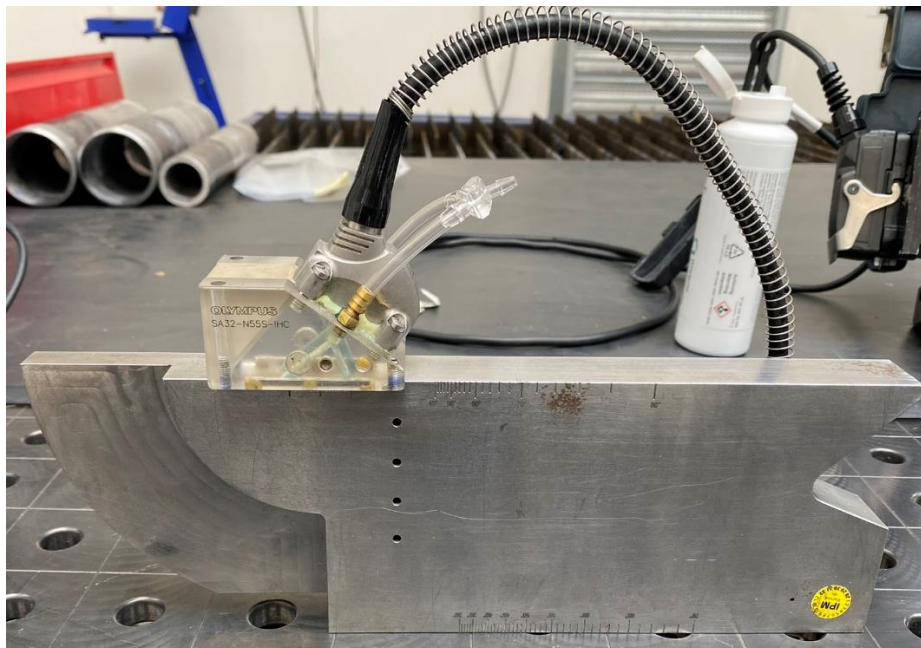


Obr. 45 Ověření funkčnosti elementů.

- Kalibrace zpoždění v klínu (Obr. 46) – provádí se na rádiu 50 mm kalibrační měřky dle normy ISO 19675 (Obr. 47). Dosáhne se toho, že koncové echo od rádiu 50 mm bude opravdu v každém úhlu zkoušení ve vzdálenosti 50 mm s tolerancí 1mm.

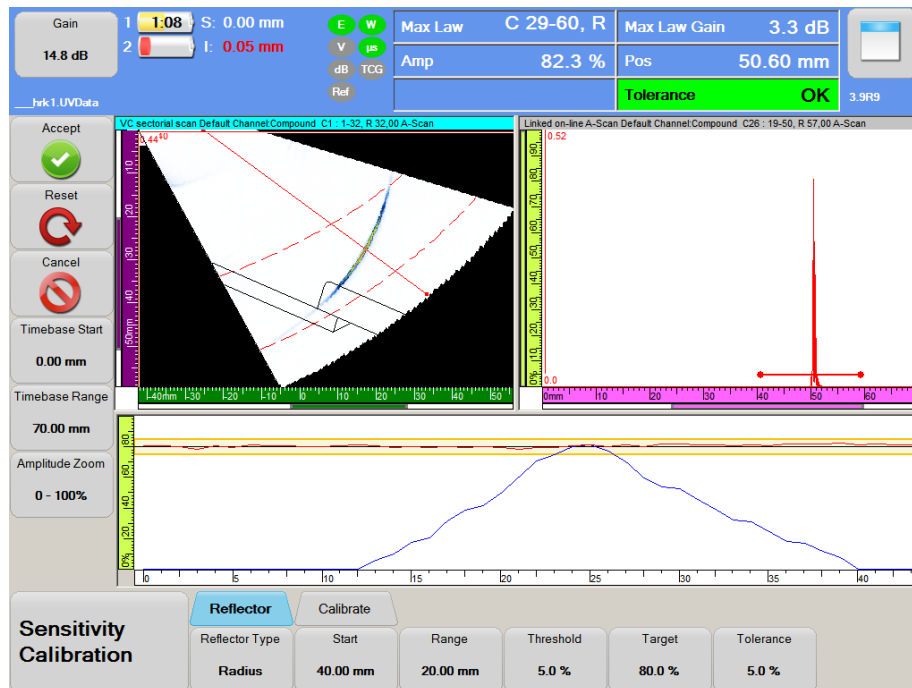


Obr. 46 Kalibrace zpoždění v klínu



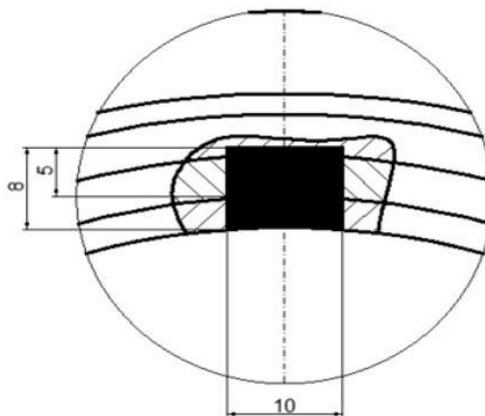
Obr. 47 Kalibrace zpoždění v klínu na kalibrační měřce

- Kalibrace citlivosti (Obr. 48) – provádí se také na rádiu 50 mm kalibrační měrky dle normy ISO 19675 (Obr. 47). Ve všech úhlech zkoušení je dosaženo stejně silného koncového echa od rádiu s tolerancí 5 %.

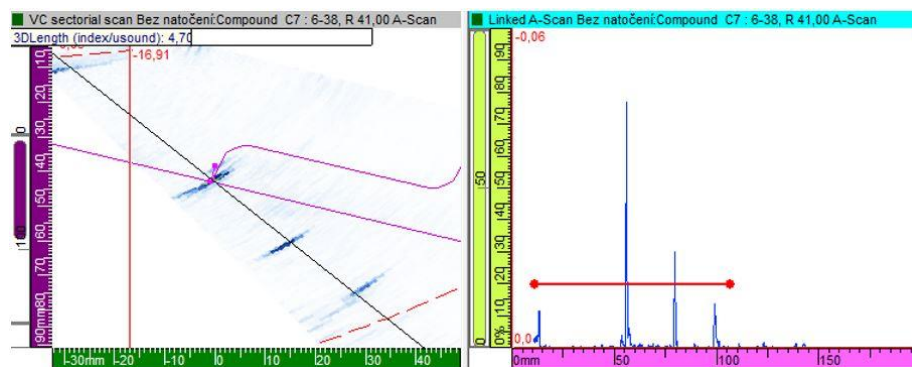


Obr. 48 Kalibrace citlivosti.

- Nastavení referenčního zesílení (obr. 50) – dle provedených simulací v kapitole 4.5, nastaveno referenční zesílení na pravoúhlé drážce o rozměrech 5x10mm (Obr. 49).

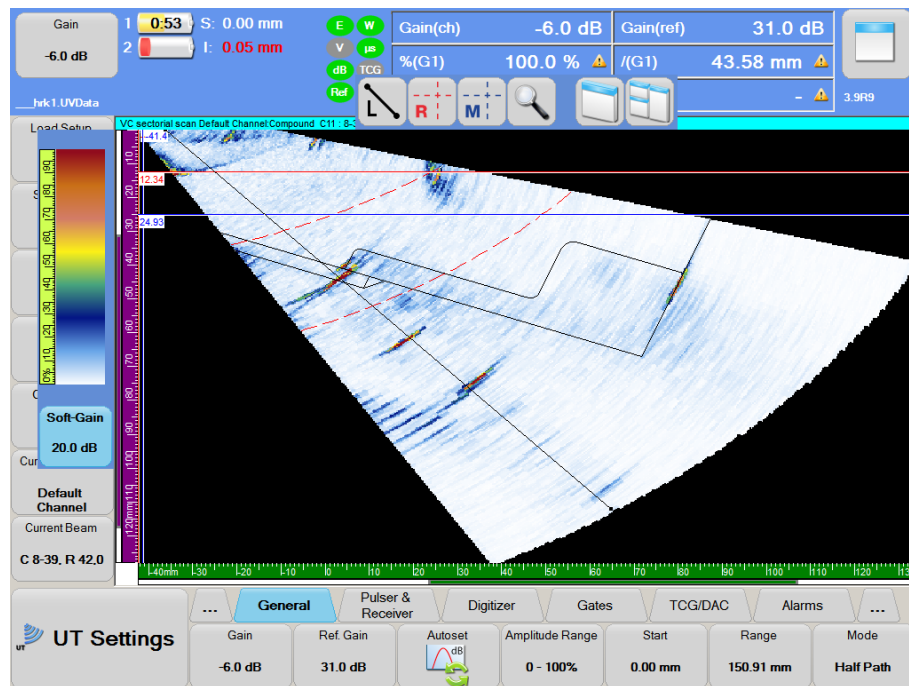


Obr. 49 Náčrt referenční drážky.



Obr. 50 Nastavení echa od referenční drážky na 80 % obrazovky.

- Nastavení registrační úrovně (Obr. 51) – aby nevznikala saturovaná echa (echa přes 100 % obrazovky, která následně nelze vyhodnotit), je sníženo hardwarové zesílení o 6 dB a přidáno softwarové zesílení 20 dB (6 dB co bylo ubráno a 14 dB pro dosažení registrační úrovně).



Obr. 51 Nastavení registrační úrovně.

4.2 Provedení zkoušky na vzorcích

Sestavený manipulátor STIX (Obr. 52) byl pomocí magnetických koleček připnut ke zkoušenému vzorku a do čelistí manipulátoru byla uchycena sonda tak, aby dokonale seděla na kónusu nátrubku. Po celé zkoušené délce je zapotřebí nanést dostatečné množství vazelíny, aby byl dosažen kvalitní přenos ultrazvukových vln do vzorku a zase zpět do sondy. Po nastavení sondy do nulového bodu je spuštěn záznam a jsou vynulovány obvodové souřadnice. Plynulým pohybem se objede celý rozsah zkoušení a na obrazovce přístroje se kontroluje, jestli nejsou v záznamu vynechávky a jestli je zajištěn přenos ultrazvukových vln do vzorku.

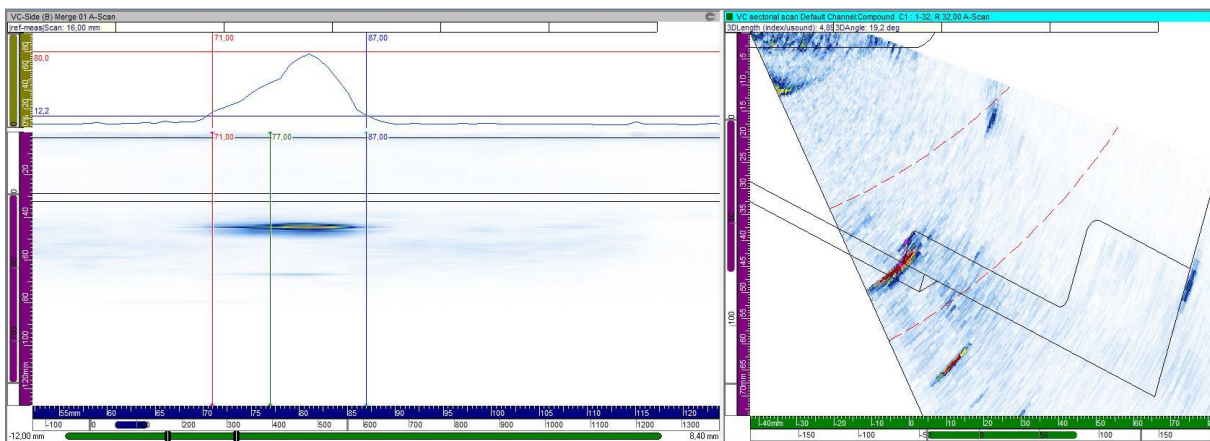


Obr. 52 Zkušební systém v nulové pozici.

4.3 Vyhodnocení naměřených dat

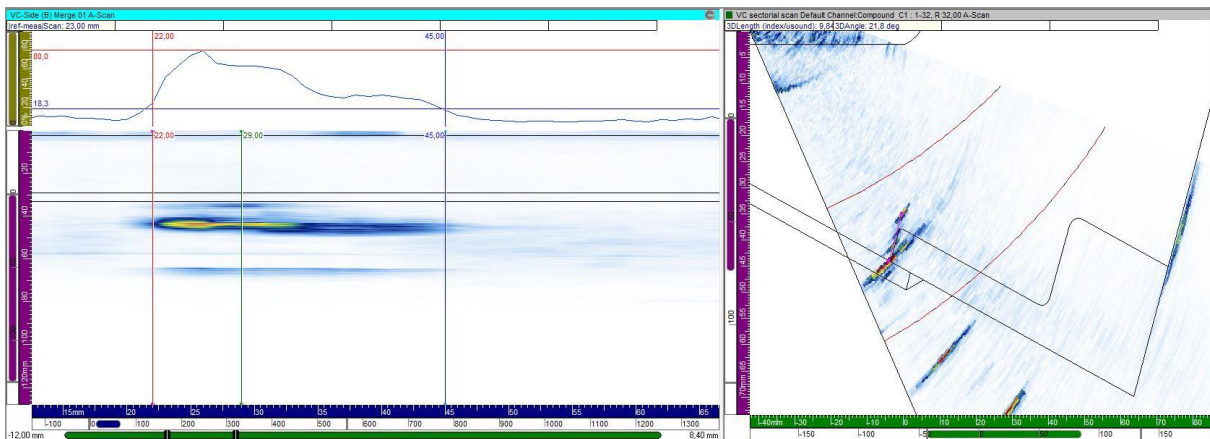
Z důvodu velké náročnosti vyhodnocení je nutné naměřená data z měření přenést do počítače a podrobit je důkladné analýze v programu UltraVision. Pro vyhodnocení délkových rozměrů indikace je použito zobrazení B-Scan, ale pro vyhodnocení výškových rozměrů je použito zobrazení D-Scan. Vyhodnocení délky indikace je provedeno metodou rozdílu signálu o 6 dB nad šum materiálu a výška indikace je určena pomocí difrakčního echa. Jelikož enkodér snímá obvodovou souřadnici na průměru 154 mm a vyjiskřené vady jsou na průměru 126 milimetrů, vyhodnocená délka bude vždy větší než reálná vada. Pro určení reálné délky vady je zapotřebí vynásobit délku indikace poměrem těchto dvou průměrů, který odpovídá hodnotě cca 0,8.

Indikace od defektu č.1 byla vyhodnocena 4,9 mm vysoká a 16 mm dlouhá (Obr.53). Po přepočítání délky indikace na průměr vnitřního povrchu je reálná délka indikace 12,8 mm.



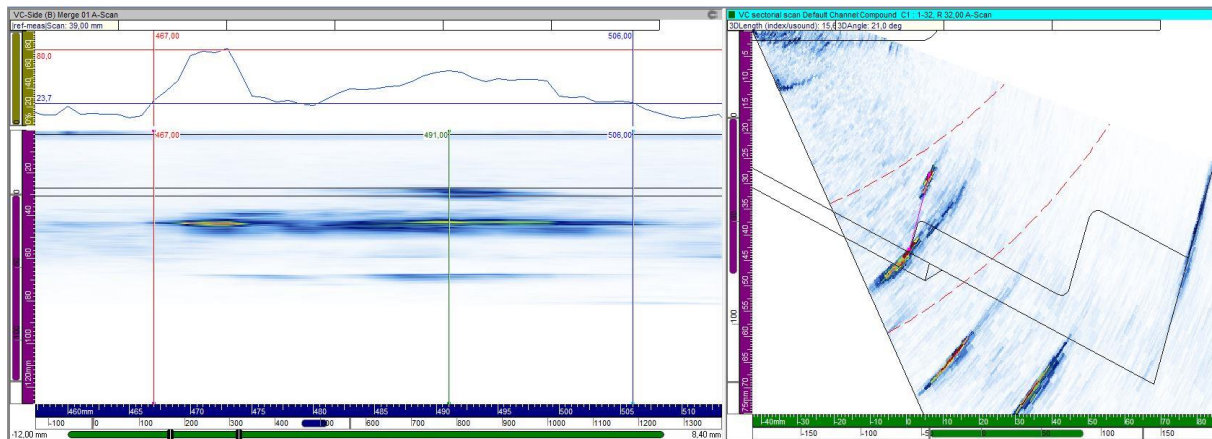
Obr. 53 Vyhodnocení indikace od defektu č.1.

Indikace od defektu č.2 byla vyhodnocena 9,8 mm vysoká a 23 mm dlouhá (Obr.54). Po přepočítání délky indikace na průměr vnitřního povrchu je reálná délka indikace 18,4 mm.



Obr. 54 Vyhodnocení indikace od defektu č.2.

Indikace od defektu č.3 byla vyhodnocena 15,6 mm vysoká a 39 mm dlouhá (Obr.55). Po přepočítání délky indikace na průměr vnitřního povrchu je reálná délka indikace 31,2 mm.



Obr. 55 Vyhodnocení indikace od defektu č.3.

4.4 Shrnutí výsledků

Experimentálním měřením byla prokázána funkčnost celého zkušebnímu systému, který dosahuje velmi přesných výsledků (viz Tab. 3). Odchyłka reálné výšky defektu od výšky indikace je v rozmezí 0,2 až 0,4 mm a odchyłka reálné délky defektu od přepočítané délky indikace je od 0,3 až 0,8 mm. Zjištěné odchyłky jsou hodnoceny jako velmi malé s ohledem na přesnost techniky Phased array. Je však třeba brát v úvahu, že v provozních podmínkách a na reálných vadách způsobených provozem zařízení, které nejsou takového dokonalého tvaru, nebude zkušební systém dosahovat takovéto velké přesnosti. Proto je konzervativně stanovena odchyłka velikosti indikace od reálných rozměrů defektu následovně:

- Naměřená výška indikace ± 1 mm
- Naměřená délka indikace ± 5 mm

Tab. 3 Shrnutí naměřených výsledků.

	Výška indikace [mm]	Délka indikace [mm]	Přepočítaná délka indikace [mm]	Reálná výška defektu [mm]	Reálná délka defektu [mm]
Indikace č.1	4,9	16	12,8	5,1	12,5
Indikace č.2	9,8	23	18,4	10,1	18,1
Indikace č.3	15,6	39	31,2	16	30,4

ZÁVĚR

V bakalářské práci byly popsány veškeré potřebné vstupní informace pro navržení zkušebního systému pro nedestruktivní ultrazvukovou kontrolu nátrubku HRK na reaktoru VVER 440. Vstupní informace zahrnovaly popis zkoušeného nátrubku, určení oblasti zájmu na rozhraní základního materiálu 22K s návarem ZIO-8 a byly definovány dvě možné varianty šíření potenciálního defektu.

Na základě předem definovaných vstupů byl navržen zkušební systém, který za pomoci zařízení TOPAZ 32 v kombinaci se sondou 5L64-A32 pokrývá celou oblast zájmu i s širokým okolím. Citlivost zkoušení byla pomocí simulací v softwaru CIVA 2020 navržena na výšku drážky 0,7 mm. Klasickým konvenčním ultrazvukem by z důvodu geometrie nátrubku nebylo možné prozkoušet celou oblast zájmu. Kónus je tak malý, že by nebylo možné zabezpečit dostatečný pohyb sondy. Tento pohyb sondy nám nahrazuje použitá elektronicky řízená phased array sonda.

Praktickým ověřením na třech zkušebních etalonech byla dokázaná celková funkčnost a dostatečná spolehlivost navrženého zkušebního systému. Největší odchylka velikosti naměřených indikací oproti reálným rozměrům uměle vyrobených vad byla 0,8mm na délce a 0,4 mm na výšce indikace. Na základě zkušeností s touto metodou byla konzervativně určena maximální možná odchylka výšky indikace ± 1 mm a délka indikace ± 5 mm.

Odstup signálu od šumu je v základním materiálu velmi dobrý. Při přechodu do austenitického návaru lze pozorovat zvýšený šum. Jelikož v oblasti zájmu je pouze rozhraní se základním materiálem, tak zvýšený šum je ku prospěchu, protože lze přesně vidět kde se nachází rozhraní.

Celá konfigurace splňuje potřebné požadavky na citlivost a prozvučitelnost materiálu při kontrole tohoto rozhraní na nátrubku HRK u reaktoru VVER 440.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ČEZ, a.s. *Primární část JE VVER 440 M1* – kolektiv autorů, Brno 2019 základní příprava zaměstnanců – skripta [cit. 20.12.2021]
2. ČEZ – Typy reaktorů [online] 28.12.2021, dostupné na https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/typy_2.html
3. ČEZ – Jaderný reaktor [online] 30.12.2021, dostupné na <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k35.htm>
4. SVĚT ENERGIE – Reaktor [online] 30.12.2021, dostupné na <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/reaktor/vyklad>
5. KROPÍK, Martin. *Bezpečnostní systémy jaderných reaktorů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05907-4.
6. ČSN EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*. 01/2008.
7. OLYMPUS – *The advantages of phased array* [online] 2.1.2022, dostupné na <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/intro/advantages/>
8. PTS – *Ultrazvuková technika zkoušení phased array* [online] 9.1.2022, dostupné na <https://www.ptsndt.com/cs/pts-josef-solnar-ndt-skoleni-vzdelavani/ut-ndt-zkouseni-ultrazvukem/ut-zkouseni-phased-array>
9. REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-466-8.
10. OLYMPUS – *What is an Array?* [online] 15.1.2022, dostupné na <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/what-array/>
11. NDT SERVIS – *Ultrazvukové metody* [online] 16.1.2022, dostupné na <http://www.ndtservis.cz/web/index.php/cz/nedestruktivni-zkouseni/ultrazvukova-metoda-ut-emat>
12. OLYMPUS – *Advancements in Phased Array Probes for Weld Inspection* [online] 19.1.2022, dostupné na <https://www.olympus-ims.com/en/resources/webinars/advancements-in-phased-array-probes-for-weld-inspection/>
13. OLYMPUS – *Inside a Phased Array Transducer* [online] 20.1.2022, dostupné na <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/inside/>
14. OLYMPUS – *Phased Array Transducer Characteristics* [online] 24.1.2022, dostupné na <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/>
15. SLÁDEK, Petr a Jan KUČÍREK. *Kmity*. 2. vydání. Brno: Masarykova univerzita, 2014. ISBN 978-80-210-6756-1.
16. OLYMPUS – *Phased Pulsing and Its Effects* [online] 25.1.2022, dostupné na <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/generating/>
17. NOVOTEST – *Phased Array Ultrasonic Flaw Detector* [online] 29.1.2022, dostupné na <http://novotest.biz/phased-arrays-ultrasonic-flaw-detector/>

18. CVŘ – *Nedestruktivní testování kovů* [online] 5.2.2022, dostupné na <http://cvrez.cz/komercni-sluzby/ndt-laborator-plzen/ndt-rozsah-cinnosti/ndt-kovu/>
19. ZETEC – *Low total cost* [online] 15.2.2022, dostupné na <https://www.zetec.com/products/ultrasound/instrumentation/topaz32/topaz32-lower-cost-of-ownership/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
A	celková apertura	[mm]
H	výška měniče	[mm]
e	šířka jednoho měniče	[mm]
f	frekvence	[MHz]
g	mezera mezi měniči	[mm]
l	vzdálenost	[mm]
p	vzdálenost mezi středy dvou měničů	[mm]

Zkratky

Označení	Legenda
AZ	aktivní zóna
HRK	havarijní, regulační a kompenzační kazety
UT-PA	ultrazvuková technika phased array