

UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET

Mirjana F. Opačić

PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH
SPOJEVA SA NEPRIHVATLJIVIM
GREŠKAMA

DOKTORSKA DISERTACIJA

BEOGRAD, 2023

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Mirjana F. Opačić

**INTEGRITY ASSESSMENT OF WELDED
JOINTS WITH UNACCEPTABLE DEFECTS**

DOCTORAL DISSERTATION

BELGRADE, 2023

Komisija za pregled i odbranu:

Mentor:

dr Aleksandar Sedmak, prof. emeritus, mentor

Mašinski fakultet u Beogradu

Članovi komisije:

Dr Gordana Bakić, redovni profesor

Mašinski fakultet u Beogradu

Dr Aleksandar Grbović, redovni profesor

Mašinski fakultet u Beogradu

Dr Zoran Radaković, redovni profesor

Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

Dr Simon Sedmak, naučni saradnik

Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

Datum odbrane: _____.____. 2023. godine

PREDGOVOR

Doktorska disertacija je nastala nakon višegodišnjeg istraživanja na projektima tehnološkog razvoja finansiranim od strane Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Ovim putem se zahvaljujem resornom ministarstvu na održavanju pomenutog programa. Zahvaljujem se profesoru dr Aleksandru Sedmaku, što nije odustao od mene, što mi je pomogao pri pronalaženju teme u specifičnoj oblasti kojom se bavim, davao ključne smernice u toku izrade, sve do završetka doktorske disertacije. Profesore hvala Vam veliko od srca. Na strpljenju, na oblikovanju teme, stručnim savetima i celokupnoj podršci tokom svih godina moje profesionalne karijere.

Dole navedenim i mnogim drugima, zahvaljujem se na neposrednoj pomoći i angažovanju. Bez vas ova doktorska disertacija ne bi bila realizovana u ovom obimu i u kvalitetu u kome se danas nalazi.

Zahvaljujem se svojim dragim kolegama iz Inovacionog centra Mašinskog fakulteta u Beogradu: Branislavu Đorđeviću na nesebičnoj pomoći u oblasti mehanike loma kao i Simonu Sedmaku u oblasti numeričke analize.

Zahvalnost dugujem Nerminu Trobradoviću kao i ostalim kolegama iz frime Trokut Test Group na nesebičnoj podršci, prilici za stručno usavršavanje i korišćenju opreme za ispitivanje.

Tokom izvođenja ispitivanja neizmerno zahvalnost dugujem svim stručnjacima koji su mi pomogli da zajednički izvedemo ispitivanja na RHE BB: Davoru Gruberu, DG NDT - Niš; Milošu Panteliću i Filipu Pavloviću, IMW Institut - Kragujevac; Milošu Pavloviću i Milanu Kozlovačkom, Zavod za zavarivanje – Beograd; Milanu Ostojinu, Naftagas – Tehnički servisi – kancelarija Pančevo.

Neizmerno sam zahvalna kompaniji Sonatest Ltd. iz Engleske na obezbeđivanju najsavremenijih ultrazvučnih konvencionalnih i naprednih defektoskopa. Veliko hvala kolegama Harry Brittin, David Deeney, Mike Ennis i Mike Dempsey na praktičnim treninzima UT tehnika ispitivanja.

Zahvalnost za neizmeru podršku, nesebično deljenje znanja i stručne savete u oblasti ultrazvučne metode ispitivanja dugujem mom dugogodišnjem kolegi i dragom prijatelju Urošu Lukiću. Takođe veliku zahvalnost dugujem dragim kolegama, „ultrazvukašima” Vedranu Matiću i Zoranu Markešiću, NDT Master - Zagreb, koji su svojim teorijskim predavanjima i praktičnim treninzima doveli rezultate svih naprednih UT ispitivanja do zavidnog naučnog nivoa.

Zahvalnost dalje iskazujem:

Bobanu Nikoliću, Flamma Systems - Švedska, prijatelju i saradniku za stručnu podršku u radu.

Jovanu Milojeviću, inženjeru iz firme Tatravagonka, Subotica na doprinosu u oblasti zavarivanja.

Mini Maksimović, beskrajno zahvaljujem na drugarstvu i pomoći, volji da uči o zavarenim spojevima i grafički podrži izradu ove doktorske disertacije.

Mojoj Dragani Aleksić zahvaljujem se na svestranoj pomoći, podršci, ljubavi i razumevanju.

Svojim najvećim herojima, majci Zorici, ocu Filipu i bratu Milanu koji zauvek živi u mom srcu, posvećujem ovaj rad da im služi na čast i hvalu.

U Beogradu, leta 2023.

PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH SPOJEVA SA NEPRIHVATLJIVIM GREŠKAMA

REZIME

Tema ove doktorske disertacije je procena rizika cilindričnih posuda pod pritiskom sa prslinom za komprimovani vazduh primenom osnovnih principa mehanike loma i naprednih metoda ispitivanja bez razaranja (NMIBR), kao što su ultrazvuk faznog niza (Phased Array Ultrasound Testing - PAUT) i vreme preleta difrakcije (Time of Flight defraction - ToFD). Primenom naprednih metoda ultrazvučnog ispitivanja sa većom verovatnoćom detekcije moguće je pronaći većinu indikacija grešaka unutar zavarenog spoja. Detektovane indikacije je moguće precizno locirati i dimenzionisati te dobijene vrednosti iskoristiti kao pouzdane ulazne podatke za dalju analizu integriteta zavarenog spoja i procenu rizika.

Korišćeni su osnovni principi mehanike loma za izračunavanje faktora intenziteta naprezanja, KI, i dobijanje odnosa KI/KIc, prema minimalno izmerenim vrednostima žilavosti loma zavarenih spojeva, kao tipičnih zona u kojima se nalaze greške tipa prsline. Heterogenost zavarenih spojeva je uzeta u obzir, jer se minimalna žilavost loma nalazi najčešće u zoni pod uticajem toplote (ZUT), ili metalu šava.

Odnos Snet/Sc, gde je Snet neto napon u poprečnom preseku sa prslinom, a Sc kritični napon, je izračunat da bi se definisala radna tačka u dijagramu procene otkaza (FAD), kako bi se na taj način procenila verovatnoća otkaza. U kombinaciji sa procenjenom posledicom, ovo omogućava primenu matrice rizika, kao jednostavnog alata za procenu rizika. U ovoj doktorskoj disertaciji fokus je na ulozi NMIBR-a, jer je od najveće važnosti koristiti što precizniju i pouzdaniju metodu za otkrivanje indikacija grešaka u zavarenim spojevima.

U ovom radu korišćene su napredne ultrazvučne metode PAUT i TOFD za dobijanje precizne slike grešaka u posudama pod pritiskom za komprimovani vazduh u reverzibilnoj hidroelektrani Bajina Bašta (RHEBB), koje su prethodno otkrivene i ocenjene kao neprihvatljive konvencionalnim metodama ispitivanja bez razaranja (IBR). Pokazano je da je upotreba NMIBR, PAUT i TOFD od najveće važnosti za proces donošenja odluka na osnovu procene integriteta i rizika.

Na taj način je postignut osnovni cilj doktorske disertacije da se dokaze da primenom NMIBR u kombinaciji sa osnovnim principima mehanike lome dobija pouzdana procena integriteta zavarenog spoja sa neprihvatljivim greškama. Kombinacija proračuna faktora intenziteta naprezanja koristeći konzervativne principe mehanike loma i unosa polaznih parametara vrednosti indikacije grešaka dobijenih ispitivanjima NMIBR, omogućuju primenu na različitim slučajevima procene integriteta zavarenih spojeva kako bi se izbegle nepotrebne i skupe popravke tamo gde je to moguće.

KLJUČNE REČI:

Integritet zavarenog spoja, mehanika loma, metoda konačnih elemenata, napredne ultrazvučne metode, Phased Array (PA), time of flight defraction (TOFD), neprihvatljive greške, ispitivanje bez razaranja

Naučna oblast: Mašinsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Mehanika loma

UDK 621.791.052:620.179(043.3)

INTEGRITY ASSESSMENT OF WELDED JOINTS WITH UNACCEPTABLE DEFECTS

Abstract

The subject of this doctoral dissertation is the risk assessment of cylindrical pressure vessels with a compressed air crack using the basic principles of fracture mechanics and advanced non-destructive testing methods (ANDTM), such as Phased Array Ultrasound Testing (PAUT) and time-of-flight diffraction (TOFD). Using advanced ultrasonic testing methods with a higher probability of detection, it is possible to find all indications of faults within the welded joint. The detected indications can be precisely located and dimensioned, and the obtained values can be used as reliable input data for further analysis of the integrity of the welded joint and risk assessment.

The basic principles of fracture mechanics were used to calculate the stress intensity factor, K_I , and obtain the ratio K_I/K_{Ic} , according to the minimum measured values of the fracture toughness of welded joints, as typical zones where there are crack-type errors. The heterogeneity of welded joints is taken into account, because the minimum fracture toughness is most often found in the heat affected zone (HAZ), or weld metal.

The ratio S_{net}/S_c , where S_{net} is the net stress in the cross-section with the crack and S_c is the critical stress, is calculated to define the operating point in the failure assessment diagram (FAD), thereby estimating the probability of failure. Combined with the estimated consequence, this enables the application of the risk matrix, as a simple risk assessment tool. In this doctoral dissertation, the focus is on the role of ANDTM, because it is of the utmost importance to use the most accurate and reliable method for detecting indications of errors in welded joints.

In this work, advanced ultrasonic methods PAUT and TOFD were used to obtain a precise image of defects in compressed air pressure vessels in the Bajina Bašta Reversible Hydropower Plant (RHPBB), which were previously detected and assessed as unacceptable by conventional non-destructive testing (NDT) methods. It has been shown that the use of ANDTM, PAUT and TOFD is of utmost importance for the decision-making process based on integrity and risk assessment.

In this way, the main goal of the doctoral dissertation was achieved, to prove that by applying ANDTM in combination with the basic principles of fracture mechanics, a reliable assessment of the integrity of the welded joint with unacceptable errors is obtained. The combination of stress intensity factor calculation using conservative principles of fracture mechanics and input of initial parameters of fault indication values obtained from ANDTM tests, allow application to different cases of evaluating the integrity of welded joints in order to avoid unnecessary and expensive repairs where possible.

KEYWORDS

Weld integrity, fracture mechanics, finite element method, advanced ultrasonic methods, Phased Array (PA), time of flight diffraction (TOFD), unacceptable defects, non-destructive testing

Scientific Field: Mechanical Engineering

Subfield: Fracture Mechanics

UDC 621.791.052:620.179(043.3)

Sadržaj

1. UVOD	12
2. Pregled dosadašnjih istraživanja iz relevantnih oblasti integriteta konstrukcija i ultrazvučnih ispitivanja	17
2.1. Nesigurnosti interpretacije rezultata UT ispitivanja - „lažne indikacije”	17
2.1.1. Lažna indikacija zbog geometrije spoja (zavar sa duplim V žlebom)	17
2.1.2. Nedovoljno odbijanje UT talasa (nedovoljna refleksija) - nepovoljna orijentacija greške	17
2.1.3. „Lažne” indikacije - zaključci	19
2.2. Primena naprednih UT tehnika za procenu integriteta konstrukcije posuda pod pritiskom.....	20
2.3. Primena parametara mehanike loma na procenu integriteta konstrukcije	22
2.4. Zamenska rešenja za proces reparature posuda pod pritiskom	23
2.5. Analiza rizika posuda pod pritiskom u slučaju havarije	25
3. Osnovni principi ultrazvučnog ispitivanja.....	27
3.1 Ispitivanje bez razaranja uopšteno	27
3.2 Počeci ispitivanja bez razaranja - IBR.....	28
3.3 Istorija ultrazvuka.....	29
3.4 Osnovni principi ultrazvučnog ispitivanja	30
3.5 Prednosti i nedostaci ultrazvučne metode ispitivanja.....	31
3.6 Stanje ultrazvuka današnjice.....	32
3.7 Budući pravac ultrazvučne inspekcije	35
4. Objašnjenje ultrazvučnih tehnika ispitivanja (konvencionalni UT, PA, TOFD i definisanje predmeta ispitivanja)	37
4.1 Osnovni principi konvencionalne impuls eho tehnike UT ispitivanja.....	37
4.1.1 Osnovni principi rada UT konvencionalnih aparata Impuls – eho tehnikom.....	38
4.2 UT tehnika faznog niza PA (eng. <i>Phased Array</i>)	42
4.2.1 Istorijski razvoj i industrijski zahtevi PAUT tehnike (tehnike faznih nizova).....	42
4.2.2 Osnovni principi tehnike faznog niza, eng. <i>Phased Array</i> PAUT	44
4.2.3 Šeme pretraživanja (skeniranja), PAUT.....	47
4.2.4 Osnovni principi skeniranja i kreiranja slike.....	49
4.2.5 Ograničenja i dalji razvoj ultrazvučne tehnologije faznog niza PAUT.....	50
4.3 UT Tehnika vremena preleta difrakcije ToFD (eng. <i>Time of Flight Defraction</i>).....	53
4.3.1 Istorijski razvoj UT tehnike vremena preleta difrakcije (ToFD)	53
4.3.2 Ispitivanje prema UT tehnici vremena preleta defrakcije ToFD (eng. <i>Time of Flight defraction</i>)	54
4.3.3 ToFD tumačenje signala.....	55
4.3.4 Ograničenja i dalji razvoj UT tehnologije vremena preleta defrakcije, ToFD.....	56
4.4 Prednosti PA i TOFD tehnika ispitivanja u odnosu na konvencionalu Puls- eho tehniku	58
4.4.1 Primer tačnije karakterizacije indikacije greške primenom PAUT i ToFD tehnike	58
4.4.2 Verovatnoća detekcije i pouzdanost dobijenih rezultata razčičitim IBR metodama.....	64

5. Rezultati primenjenih metoda ultrazvučnih ispitivanja posuda pod pritiskom za komprimovani vazduh u reverzibilnoj hidroelektrani Bajina Bašta (RHEBB), Srbija i upoređivanje sa kriterijumima prihvatljivosti	65
5.1 Ultrazvučna ispitivanja sudova pod pritiskom u RHE BB - uopšteno.....	65
5.2 Ulazni parametri ispitivanja i kriterijumi ocenjivanja za konvencionalno ultrazvučno ispitivanje.....	68
5.3 Ulazni parametri ispitivanja i kriterijumi ocenjivanja za PAUT napredno ultrazvučno ispitivanje.....	70
5.4 Ulazni parametri ispitivanja i kriterijumi ocenjivanja za ToFD napredno ultrazvučno ispitivanje.....	72
6. Formiranje merodavnih numeričkih proračunskih modela.....	73
6.1 Trodimenzionalni model posude sa prslinom.....	74
6.2 Rezultati numeričke simulacije napona u zavarenom spoju SP 970	77
6.2.1 Naponska analiza modela sa obostrano fiksiranim graničnim uslovima	77
6.2.2 Naponska analiza modela sa delimično relaksiranim graničnim uslovom.....	80
6.2.3 Diskusija i zaključak analize naponskog stanja	82
7. Procena integriteta i veka zavarenih spojeva primenom parametara mehanike loma, a na osnovu rezultata ultrazvučnog ispitivanja	83
7.1 Primena osnovnih principa mehanike loma za procenu integriteta konstrukcije	83
7.2 Primena osnovnih principa mehanike loma za procenu integriteta konstrukcije na dobijene rezultate ispitivanja SP u RHE BB	86
7.2.1 Sud pod pritiskom SP 970 - defekt 5.6 – primena mehanike loma.....	86
7.2.2 Sud pod pritiskom SP 971 - defekt 1.1 – primena mehanike loma	86
7.2.3. Proračun prema parametrima mehanike loma za vrednosti dobijene konvencionalnim UT ispitivanjem	87
7.2.4 Proračun prema parametrima mehanike loma za vrednosti dobijene naprednim PA i ToFD UT ispitivanjima	87
7.3 Prikaz rezultata u dijagramu analize loma - FAD dijagramu	88
8. Sveobuhvatna analiza i diskusija dobijenih rezultata UT ispitivanjima, numeričkom simulacijom i analizom parametra mehanike loma	89
8.1 Analiza rizika i diskusija na osnovu podataka indikacija defekata dobijenih UT izpitivanjem.....	89
8.1.1 Analiza rizika i diskusija dobijenih rezultata na osnovu dobijenih parametara mehanike loma – defekt 5.6 u SP 970.....	89
8.1.2 Analiza rizika i diskusija dobijenih rezultata na osnovu dobijenih parametara mehanike loma – defekt 1.1 u SP 971.....	91
8.2 Analiza i diskusija dobijenih rezultata prema numeričkom proračunskom modelu, a na osnovu ulaznih podataka indikacija defekata dobijenih UT ispitivanjem.....	93
9. Zaključak	94

Spisak relevantnih skraćenica i oznaka u doktorskoj disertaciji

1. Sonda - pretvarač
2. IBR - ispitivanje bez razaranja
3. VT – vizualno ispitivanje
4. MT – ispitivanje magnetima
5. NMIBR – napredne metode ispitivanja bez razaranja
6. UT – ultrazvučno
7. PAUT – Phased Array ultrazvučno ispitivanje – tehnika faznog niza
8. TOFD – (eng. Time of Flight Defraction) – tehnika vremena preleta difrakcije
9. TFM - (eng. Total focusing method) - tehnika totalnog fokusa
10. NDE – nedestruktivna evaluacija
11. KNDE - kvantitativna nedestruktivna evaluacija
12. ZUT – zona uticaja toplote
13. SP – sud pod pritiskom
14. MKE – metode konačnih elemenata
15. Defekt - reflektor
16. Diskontinuitet u materijalu - defekt u materijalu
17. VD - verovatnoća detekcije
18. Verovatnoća otkaza – eng. Likelihood of Failure (LoF)
19. FAD – Failure assessment diagram – diagram analize otkaza
20. Termička obrada nakon zavarivanja – Post weld heat treatment (PWHT)
21. LOF –eng. lack of fusion
22. LOP – eng. lack of penetration
23. EPP - elektrolučnog zavarivanja pod praškom
24. OPP – oprema pod pritiskom
25. FFP – eng. Fitness for purpose assessments
26. FFS – eng. fitness for service assessments
27. OM – osnovni materijal
28. MŠ - metal šava
29. Pretraživanje – skeniranje
30. BW, eng. back wall - zadnji zid
31. Sken - rezultat pretraživanja
32. Apertura – otvor
33. GZ - gornji zid
34. DD – donji zid

1. UVOD

Početkom osamdesetih godina prošlog veka, da bi se sprečio otkaz, uvedena je u praksu primena principa mehanike loma za procenu strukture integriteta komponente ili konstrukcije, na osnovu opsežnog istraživanja za rešavanje problema izuzetno velikog broja neprihvatljivih defekata u zavarenom cevovodu Aljaske, [1]. Osnovna ideja je bila da se izbegnu nepotrebne i skupe popravke, ako je moguće, koje bi u mnogim slučajevima takođe napravile više štete nego koristi. Kako bi se to omogućilo, prvo je bilo na istraživačima da dokažu da je to moguće, a zatim na vlastima da prihvate takvo izuzeće od pravila, ako se prilože razumni argumenti i konzervativni zaključci. U doktorskoj disertaciji koja sledi se isto razmišljanje koristi za predstavljanje inženjerskog pristupa koji se može primeniti na jednostavan način kako bi se dobio pouzdan i brz odgovor šta učiniti u situaciji kada se na već operativnoj opremi pronađu neprihvatljive indikacije grešaka metodama ispitivanja bez razaranja, što može biti presudno u postrojenju (npr. sud pod pritiskom u RHE Bajina Bašta), gde nije pogodno i dostupno za popravku pronađenih indikacija grešaka.

Ako neko traži jednostavnu inženjersku proceduru za procenu integriteta konstrukcije visoko napregnute tanke komponente jednostavne geometrije (stanje naprezanja u ravni membrane posude pod pritiskom), verovatno je najbolja opcija primena dijagrama procene otkaza FAD (eng. the Failure Assessment Diagram), kao što je prikazano u [2-4]. Dalje, rezultati FAD-a se mogu koristiti za procenu verovatnoće otkaza, što u kombinaciji sa posledicom otkaza omogućava analizu zasnovanu na riziku, kako je nedavno uvedena i primenjena [4-12]. Na ovaj način inženjeri mogu da obezbede sve potrebne informacije za menadžere, koji su odgovorni za proces donošenja odluka u vezi sa neprihvatljivim defektima.

Još jedan važan aspekt ovde je ispitivanje bez razaranja (IBR), posebno ako se primenom konvencionalnog ultrazvučnog testiranja (UT) pronađu neprihvatljivi nedostaci, pošto njihova veličina može biti prekonzervativno procenjena, smatra se da je pouzdanost rezultata dobijena konvencionalnom metodom UT ispitivanja, nije vića od 50%, pa se često veličina otkrivenog defekta udvostručuje u daljoj analizi da bi se dobila konzervativna procena integriteta konstrukcije. Da bi se prevazišli neki od konvencionalnih nedostataka UT, nedavno je uvedeno nekoliko novih naprednih tehnika, kao što su PA, ToFD i TFM. [6].

Pouzdanost naprednih tehnika UT ispitivanja, ukoliko se koriste u kombinaciji, je čak i veća od tradicionalne radiografske, konvencionalne manuelne UT i automatizovane tehnike UT ispitivanja zavarenih spojeva. Treba primetiti da PAUT daje preciznije informacije o lokaciji defekta, dok ToFD tehnika daje precizniju informaciju o samoj prirodi defekta, označava dužinu i dubinu defekta, što ovu kombinaciju čini optimalnom za dimenzionisanje i pozicioniranje defekta. Nakon identifikacije ključnih defekata, oni se dalje mogu ispitati metodom totalnog fokusa (eng. total focusing method TFM), kako bi se izvršila još preciznija karakterizacija pronađenih indikacija defekta.

U ovom radu razmatramo zavarene spojeve u posudama pod pritiskom u reverzibilnoj hidroelektrani Bajina Bašta (RHE BB) u Srbiji, gde je konvencionalnom UT tehnikom ispitivanja otkriveno nekoliko neprihvatljivih defekata, a najkritičniji su bile analize u okviru procene integriteta konstrukcije, [9]. Neki od njih su popravljeni, ali je većina ostavljena jer

nisu ugrozila integritet posude. Iako nisu postojali mehanizmi za njihov rast, ovi nedostaci su često praćeni kako bi se nivo bezbednosti održao. Kako se ispostavilo, konvencionalna UT tehnika detektovala je manje promene u veličini nekoliko defekata, što je dovelo do zaključka da treba uvesti u redovno ispitivanje naprednije tehnike UT ispitivanja. U tom cilju korišćena je kombinacija PAUT-a i ToFD-a, naprednih tehnika ispitivanja.

Prilikom procesa zavarivanja, odnosno nastanka zavarenog spoja, u istom se mogu generisati različiti tipovi grešaka u metalu šava. Pomenute greške definisane su standardom a kao najčešće mogu se javiti nepotpuna penetracija korena; poroznost - pojedinačne pore, pore u gnezdu, pore u nizu, izdužene i cevaste pore; nespojena mesta (nalepljivanja), na ivici žleba, između susednih zavara; smaknuće limova i profila koji mogu biti praćeni zajedima, nadvišenjima lica metala šava; mogu se naći uključci šljake, pore, prsline i mnoge druge greške. Kao takva, pojava grešaka u metalu šava predstavlja jedan od najbitnijih uticajnih faktora na dalje ponašanje zavarenog spoja u realnim uslovima eksploatacije. U zavisnosti od tipa greške, njene veličine, pozicije i orijentisanosti u metalu šava, one mogu i ne moraju bitno ugroziti (narušiti), integritet konstrukcije. Kako bi se potvrdila ispravnost određenog zavarenog spoja pre puštanja u rad u realnim eksploatacionim uslovima, kao i tokom redovnog održavanja eksploatisanih zavarenih spojeva, koriste se metode ispitivanja bez razaranja praćene odgovarajućim pravosnažnim standardima koji tačno definišu način i učestalost ispitivanja konkretnog zavarenog spoja u zavisnosti od njegove funkcije unutar konstrukcije. Ultrazvučna metoda ispitivanja predstavlja jednu od najzastupljenijih metoda ispitivanja bez razaranja zavarenih spojeva.

Primena odgovarajućih standarda iz oblasti ultrazvučnog ispitivanja kao i nivoa prihvatanja, pružaju odgovarajuće ulazne podatke za sprovođenje numeričkih i eksperimentalnih ispitivanja i simulacija zavarenih spojeva. Korišćenjem naprednih metoda ultrazvučnog ispitivanja i savremenim pristupom istraživanja primenjujući numeričke metode, moguće je izvršiti modelovanje pronađenih indikacija nesavršenosti u vidu konkretne greške i na taj način predvideti ponašanje zavarenih spojeva, kao i celokupne konstrukcije u prisustvu identifikovanih grešaka.

Jasno je, stoga, da je preciznost metode i tehnike ispitivanja bez razaranja od suštinskog značaja za dalju analizu otkrivenih grešaka u zavarenim spojevima. U tom cilju su razvijene nove, napredne tehnike ultrazvučnog ispitivanja: metoda faznog niza - „*Phased Array* (PA)“ i metoda vremena preleta difrakcije - „*Time of Flight Diffraction* (ToFD)“. Primenom ovih naprednih tehnika ultrazvučnih ispitivanja dobijaju se znatno precizniji podaci o geometriji, orijentaciji i položaju otkrivenih grešaka u odnosu na konvencionalnu tehniku ultrazvučnog ispitivanja. Ovi podaci se dalje koriste za modelovanje zavarenih spojeva koji sadrže greške primenom metode konačnih elemenata (MKE). Metoda konačnih elemenata primenjuje se za numeričku analizu pomeranja, deformacija i napona u cilju simulacije ponašanja zavarenih spojeva na posudama pod pritiskom u radnim uslovima. Promenom parametara modela moguće je dobiti rezultate za različite režime rada, a primenom metode konačnih elemenata moguće je numerički analizirati i ponašanje komponenti tokom eksploatacije sa unetim greškama koje su prethodno otkrivene ultrazvučnim ispitivanjima.

Za ispitivanje zavarenih spojeva na posudama ulje-vazduh u reverzibilnoj hidroelektrani (RHE) „Bajina Bašta”, korišćena je konvencionalna ultrazvučna metoda ispitivanja bez razaranja. Konvencionalnom tehnikom ultrazvučnog ispitivanja detektovane nesavršenosti u zavarenom spoju ocenjene su kao neprihvatljive (u skladu sa kriterijumima prihvatljivosti definisanim u standardu SRPS EN ISO 11666). Rezultat ovog ispitivanja navodi na zaključak da je zavarene spojeve potrebno reparirati. Kako bi se omogućila dalja analiza otkrivenih nesavršenosti u zapremini zavarenih spojeva i da bi se prikupili detaljniji podaci o stvarnim dimenzijama i položajima indikacija defekta, dodatno su primenjene napredne tehnike ultrazvučnog ispitivanja PA i ToFD. Na osnovu prikupljenih podataka izvršena je karakterizacija nesavršenosti i podela na tipove grešaka (kako je definisano u standardima EN ISO 23279 i EN ISO 6520-1). Indikacije nesavršenosti detektovane naprednim tehnikama ultrazvučnog ispitivanja u skladu sa važećim SRPS EN ISO standardima takođe su ocenjene kao neprihvatljive.

Na osnovu rezultata PA i ToFD ispitivanja, dobijaju se približne vrednosti dimenzija, odnosno planarne površine i tačne koordinate položaja indikacije defekata. Ove vrednosti će se dalje koristiti za modelovanje zavarenog spoja koji sadrži defekat primenom metode konačnih elemenata (MKE).

Greške otkrivene u zavarenom spoju konvencionalnom tehnikom ultrazvučnog ispitivanja mogu da budu ocenjene kao neprihvatljive, u skladu sa kriterijumima prihvatljivosti definisanim u standardu SRPS EN ISO 11666, što bi navodilo na zaključak da je takve zavarene spojeve potrebno reparirati, odnosno otkloniti neprihvatljive greške. Međutim, u praksi je čest slučaj da je popravka ili gotovo nemoguća, ili se ne isplati, ili da postoji rizik da popravka napravi veću štetu nego korist. Takođe je potrebno detaljnije razmotriti tehničku neophodnost popravke, a dovodi se u pitanje i sama pouzdanost rezultata dobijenih konvencionalnom metodom ultrazvučnog ispitivanja. Cilj istraživanja je da se uporede kriterijumi prihvatljivosti za indikacije grešaka definisani u EN ISO standardima sa kriterijumima prihvatljivosti koji proističu iz analize rezultata MKE simulacija i mehanike loma. Kriterijumi prihvatljivosti koji proističu iz MKE analiza zasnivaju se na kritičnim uslovima radnih režima koji dovode do porasta veličine prisutnih grešaka u zavarenim spojevima, nastanka prslina iz tih grešaka i njihovom daljem rastu, što dovodi do narušavanja integriteta konstrukcije i smanjenja njenog veka. Novi kriterijumi prihvatljivosti biće definisani na osnovu graničnih vrednosti veličina grešaka koje ne utiču na integritet konstrukcije. U radu će takođe biti tumačeni rezultati dobijeni različitim tehnikama ultrazvučnog ispitivanja a daće se osvrn na pouzdanost dobijenih rezultata.

Doktorska disertacija, pre svega, ima za cilj da pokaže da primenom naprednih metoda ultrazvučnog ispitivanja radi karakterizacije indikacija, numeričkih metoda i analizom mehanike loma možemo dobiti prihvatljivu osnovu za dopušteni izuzetak od postojećih standarda, ako takva analiza daje ubedljivu i konzervativnu procenu integriteta konstrukcije. Prateća ideja rada jeste da se pokaže da oslanjanjem na napredne tehnike ispitivanja možemo dobiti preciznije podatke na osnovu kojih će procena integriteta konstrukcije značajno doprineti na povećanju pouzdanosti dobijenih rezultata. Disertacija doprinosi boljem razumevanju ponašanja zavarenih spojeva sa postojećim greškama u metalu šava zavarenog spoja. Drugi aspekt značajne promene u inženjerskoj praksi je prelazak sa klasičnog principa konstruisanja

komponenti koje rade u uslovima zamora, tzv. '*safe-life*' princip u okviru koga se primenom Velerove krive određuje vek komponente bez prsline) na princip konstruisanja sa sigurnošću od loma kod koga se vek određuje kao period rasta prsline od neke početne veličine do veličine prsline koja je kritična u odnosu na krti lom. U skladu sa tim, čak i najodgovornije komponente ne zamenjuju se pre nego što se redovnim kontrolama upotrebljavajući metode ispitivanja bez razaranja otkriju prsline ili slične neprihvatljive greške. Pri tome je komponenta konstruisana tako da u slučaju postojanja greške manje od minimalne veličine koju može da otkrije primenjena metoda ispitivanja bez razaranja, njen vek bude veći od perioda vremena do sledeće kontrole.

Izrada disertacije biće zasnovana na sledećim pretpostavkama:

- Konvencionalna tehnika ultrazvučnog ispitivanja nije dovoljno precizna u određivanju veličine defekta i ne može dovoljno precizno da odredi lokaciju defekta;
- Napredne tehnike ultrazvučnog ispitivanja (PAUT i ToFD) mogu dovoljno precizno da odrede veličinu i lokaciju defekta u materijalu;
- Na osnovu rezultata ispitivanja mogu da se odrede parametri mehanike loma i na osnovu njih proceni integritet zavarenog spoja, pri čemu je od bitnog značaja što veća preciznost ispitivanja bez razaranja.

Doktorska disertacija zasniva se na naprednim metodama ultrazvučnih ispitivanja i korišćenjem istih za karakterizaciju indikacija grešaka kao ulaznih parametara za dalju analizu uticaja konkretne greške na zavareni spoj i njegov uticaj na integritet konstrukcije primenom metode konačnih elemenata u korelaciji sa važećim standardom prihvatljivosti indikacija prilikom ultrazvučnog ispitivanja zavarenih spojeva. Konkretno, koristiće se konvencionalna ultrazvučna tehnika ispitivanja zavarenih spojeva, i sledeće napredne tehnike: metoda faznog niza (*Phased Array*, PA) i Metoda vremena preleta difrakcije (*Time of Flight Defraction* - ToFD).

Metoda konačnih elemenata biće primenjena u cilju simulacije ponašanja konkretnih grešaka unutar zavarenog spoja u realnim uslovima opterećivanja i dalje analize uticaja grešaka na integritet konstrukcije zaključno sa definisanjem njene prihvatljivosti sa ili bez uslova praćenja i određivanja periodičnosti praćenja, ili neprihvatljivosti i obavezne sanacije.

Metode mehanika loma će biti primenjene na procenu integriteta konstrukcija sa zavarenim spojevima u kojima su utvrđene neprihvatljive greške.

Prilikom izrade doktorske disertacije uz pomoć gore pomenutih naučnih metoda, rad se može podeliti u osam celina:

- U prvom delu rada prikazana je i ukratko analizirana celokupna problematika ove doktorske teze
- U drugom delu prikazana je analiza odgovarajuće referentne literature relevantne za ovu studiju
- U trećem delu objašnjeni su istorijat i generalni principi ultrazvuka kao metode ispitivanja
- U četvrtom delu teorijski su pojedinačno objašnjene različite tehnike ultrazvučnih ispitivanja, njihove prednosti i nedostaci
- U petom delu dat je prikaz ultrazvučnih ispitivanja zavarenih spojeva u RHE BB dobijenih različitim tehnikama UT ispitivanja
- U šestom delu urađena je numerička simulacija zavarenog spoja sa dimenzionisanim najkritičnijim pronađenim defektom u SP 970, u RHE BBB
- U sedmom delu urađena je procena integriteta zavarenih spojeva primenom parametara mehanike loma, a na osnovu rezultata ultrazvučnog ispitivanja za najkritičnije pronađene defekte
- U 8 delu predstavljena je sveobuhvatna diskusija i analiza dobijenih rezultata UT ispitivanjima, numeričkom simulacijom i parametrima mehanike loma, na osnovu koje će biti izvedeni zaključci vezani za ponašanje zavarenih spojeva sa prisustvom neprihvatljivih grešaka;
- U devetom delu dati su zaključci na osnovu urađene predmetne studije

2. Pregled dosadašnjih istraživanja iz relevantnih oblasti integriteta konstrukcija i ultrazvučnih ispitivanja

2.1. Nesigurnosti interpretacije rezultata UT ispitivanja - „lažne indikacije”

Iako daleko rasprostranjena, UT ispitivanja konvencionalnom metodom ostavljaju iza sebe mnoga pitanja. Verovatnoća detekcije indikacije defekta korišćenjem konvencionalnog ultrazvuka iznosi svega 52.3%[13].

Tumačenje ručnog ultrazvučnog ispitivanja zavarenih spojeva zahteva visoku kvalifikaciju i iskustvo operatera, kao i poznavanje konfiguracije zavarenog spoja. Prilikom obavljanja ručnog ultrazvučnog ispitivanja, često se zabeleže brojne nerelevantne indikacije defekata.

2.1.1. Lažna indikacija zbog geometrije spoja (zavar sa duplim V žlebom)

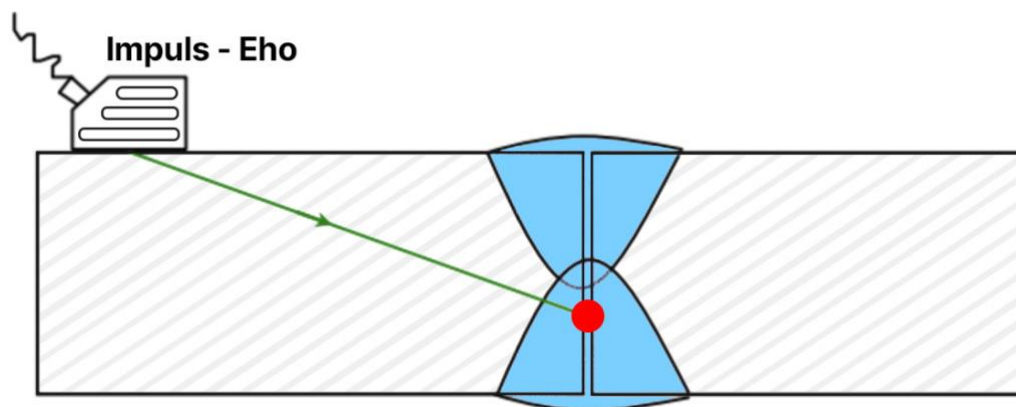
UT konvencionalna ispitivanja sučeonog zavarenog spoja koja su rađena na dužini od 200m, kao rezultat su pokazala na ukupnoj dužini od 60m indikaciju greške klasifikovanu kao 4013: nedostatak spajanja u korenu prema EN ISO 6520-1 (eng. Lack of fusion (LOF)). Zavarivanje je izvršeno postupkom elektrolučnog zavarivanja pod praškom (EPP), tako da su dobijeni rezultati ukazivali da nađena indikacija greške može biti tipska duž predmetnog zavarenog spoja. Pronađene indikacije bile su sa unutrašnje strane zavarenog spoja, 3mm ispod površine. Poznavajući fiziku UT talasa i principe funkcionisanja ultrazvučnih aparata [14], možemo osnovano posumnjati u nalaze konvencionalnih UT ispitivanja na malim dubinama ispod površine materijala. Imajući u vidu gore navedeno, pronadene indikaciju su proglašene ne relevantnim i uređena su dopunska ispitivanja radiografijom kao i naprednim ultrazvučnim tehnikama ispitivanja. Dodatna ispitivanja potvrdila su nerelevantnost pronadenih indikacija greške konvencionalnom UT metodom. Izvršena je detaljna analiza sprovedenih dodatnih naprednih UT ispitivanja, radiografije, kao i ispitivanja površinskom metodom (magnetna ispitivanja (MT)) [15]. Dokazano je da su indikacije greške dobijene konvencionalnom UT tehnikom „lažne” zbog geometrije, odnosno konveksnosti korena zavarenog spoja. Dobijena indikacija greške bila je rezultat sinergije odbijenih ehoa ultrazvučnih talasa zbog konveksnog profila korena zavarenog spoja. Predmetna indikacija je usvojena kao „lažna”, a zavareni spoj prihvatljiv.

2.1.2 Nedovoljno odbijanje UT talasa (nedovoljna refleksija) - nepovoljna orijentacija greške

Tokom testiranja zavarenog spoja (sučeoni zavareni spoj, X šav), dužine preko 20m, identifikovana je greška sa amplitudom od 25% do 40% od DAC krive. Na nekoliko lokacija amplituda je dostigla do 50% linije ali je konstantno ostala na nivou prihvatljivosti. Indikacija

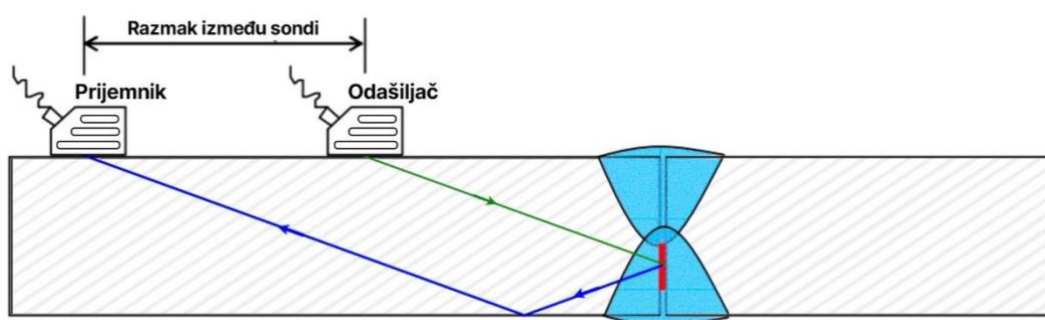
greške se konstantno pojavljivala na ekranu aparata u različitim dužinama (napominjemo da su svi zapisi bili u nivou prihvatljivosti), tokom dužine ispitivanja od preko 20m.

Na kraju ispitivanja, akumulirana dužina indikacije greške bila je u iznosu od 75% totalne dužine zavarenog spoja, a bila je prihvatljiva prema kriterijumima prihvatljivosti standarda SRPS EN ISO 11 666. Nacrt indikacije greške prikazan je na slici 1.[15]



Slika 1. Indikacija greške dobijena konvencionalnom impuls – eho tehnikom

Ostvarni rezultati su izazvali sumnju i odlučeno je da se problemu pristupi ponovnim ispitivanjem koristeći napredne tehnike UT ispitivanja kao i tandem tehniku UT ispitivanja (slika. 2). Izvršeno je ponovno ispitivanje zavarenog spoja koje je za rezultat dalo da se radi o gršci koja je bila 5 do 8 puta veća od veličine greške detektovane konvencionalnom UT tehnikom. Zavareni spoj je na kraju apsolutno odbijen sa višestrukim neprihvatljivim indikacijama.



Slika 2: tandem tehnika UT ispitivanja

Objašnjenje za gore pomenuti slučaj je u tome da prilikom konvencionalnih UT ispitivanja može doći do pojave smanjene refleksije UT talasa. To se dešava kada je greška u materijalu nepovoljno orijentisana u odnosu na upadni ugao talasa. Položaj indikacije može biti takav da se ona poklapa sa upadnim uglom talasa, te je refleksija od ovako nepovoljno orijentisane indikacije defekta znatno niža. U drugom slučaju nepovoljne orijentisanosti greške dolazi do toga da se reflektujući talas na vraća u sondu, pa samim tim ne može biti registrovan.

Za ovakve slučajeve idelna je primena TOFD tehnike, koja meri vreme preleta zvuka od početka do kraja indikacije greške. Razlog više zašto se u ovoj doktorskoj disertaciji dalo na

značaju upotrebe naprednih UT tehnika i interpretaciji dobjenih vrednosti naprednim UT tehnikama.

2.1.3 „Lažne” indikacije - zaključci

Na osnovu gore razmatranih primera, jasno je da su verovatnoće detekcije različitih defekata na nezadovoljavajućem nivou, kao i da u velikoj meri zavise od znanja i iskustva opratera za pojedinačni slučaj i vode nas ka sledećim zaključcima:

- indikacije grešaka dovoljno blizu površine materijala zahtevaju dalju procenu kako bi se njihova validnost potvrdila. To dalje implicira prokuženje vremena ispitivanja i rast troškova ispitivanja
- tehničar koji vrši ispitivanja mora da bude visoko obučen i iskusan operater u konvencionalnom UT ispitivanju, da dobro poznaje moguće probleme za različite geometrije zaverenog spoja i da redovno konsultuje i traži mišljenje UT nivoa III za sve „neuobičajene” nalaze
- tehničaru koji vrši ispitivanja, po pravilu, ne sme da promakne ni jedna indikacija defekta, dok sa druge strane u obavezi je da ne inicira nepotrebne popravke

Jasno je da gore navedeni zaključni značajno produžuju vreme trajanja ispitivanja i znatno povećavaju visinu troškova ispitivanja, dok pouzdanost samog ispitivanja i dalje ostaje upitna. Upravo, sve gore navedeno bila je još jedna od inspracija za ovu doktorsku disertaciju. Kao jasan zaključak proizilazi nepouzdanost konvencionalnog UT ispitivanja i rastuća potreba da se napredne metode UT ispitivanja usvoje kao osnovne i uvedu u redovnu praksu ispitivanja.

2.2. Primena naprednih UT tehnika za procenu integriteta konstrukcije posuda pod pritiskom

U naučnoj studiji [16], dat je prikaz uporednih rezultata konvencionalnog UT ispitivanja i naredne tehnike PAUT ispitivanja za iste indikacije defekata za posudu pod pritiskom za komprimovani vazduh u RHEE BB. Fokus ispitivanja je na najkritičnijim mestima, zavarenim spojevima nazivne debljine (50 mm), cilindrične posude za skladištenje vazduha od čelika (Nioval 50). U prvoj fazi ovog istraživanja korišćene su konvencionalne UT tehnike, koje su ukazale na postojanje indikacija defekata neprihvatljivim prema važećim kriterijumima prihvatljivosti. U drugoj fazi studije, za isti objekat ispitivanja primenjena je napredna tehnika UT ispitivanja PA, kako bi se dobili precizniji podaci za pronađene defekte konvencionalnom UT tehnikom. Studija je rađena kako bi se pouzdanije procenio rizik od okaza, što je od najveće važnosti za posude pod pritiskom gde je verovatnoća otkaza relativno niska, ali su posledice otkaza potencijalno katastrofalne. Ispitivanja bez razaranja (IBR), zavarenih spojeva igraju veoma važnu ulogu tokom inspekcije posuda pod pritiskom pre i tokom eksploatacije, kako bi se procenio njihov integritet konstrukcije, pošto životni vek bilo koje posude pod pritiskom zavisi od odsustva štetnih defekata [17-22]. Stoga je lako prepoznati značaj ispitivanja bez razaranja komponenti, posebno onih kritičnih, kao što su zavareni spojevi u posudama pod pritiskom [22].

Važno je primetiti da se rezultati dužina defekata dobijenih naprednom PAUT (slika 3) tehnikom dobro slažu sa rezultatima dobijenim konvencionalnim UT ispitivanjem. Sa druge strane Velika su odstupanja u vrednostima dubine greške i dužine greške po dubini pomenutim tehnikama UT ispitivanja. Takođe, veoma bitna razlika je u tome što PAUT ispitivanje nije otkrilo prisusvo indikacija defekata na unutrašnjoj strani posude, što je u skladu nalazima drugih metoda IBR ispitivanja kao što su penetrantska ispitivanja (PT) i ispitivanje magnetnim česticama (MT).



Slika 3- Defect 1.4

U prikazanoj studiji slučaja, može se videti da konačna odluka o eventualnim popravkama za obezbeđivanje bezbednog rada posude pod pritiskom sa neprihvatljivim defektima otkrivenim u zavarenim spojevima, u velikoj meri zavisi od nivoa tačnosti metode primenjene za IBR. Kako se ispostavilo, primena napredne PAUT tehnike i njeni rezultati ispitivanja, značajno su smanjili nivo rizika, od veoma visokog do niskog, što omogućava dalju upotrebu posude pod pritiskom bez ikakvih popravki. Ne samo dimenzije, već i podjednako važna lokacija defekta

bila je odlučujući argument, jer se pokazalo da defekti nisu prisutni na unutrašnjoj strani posude. Na osnovu predstavljenih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Za procenu integriteta konstrukcije je od najveće važnosti da se koriste ne samo konvencionalne UT tehnike ispitivanja, već i napredne tehnike UT ispitivanja, kao što je PAUT.
- Jednostavni inženjerski alati su efikasni u proceni integriteta konstrukcije posuda pod pritiskom sa defektima u zavarenim spojevima
- Analiza zasnovana na riziku korisna je za premošćavanje jaza između inženjera i menadžera i može značajno pomoći u procesu donošenja odluka kako postupiti, da li i šta preduzeti kada se neprihvatljive indikacije defekata pojave unutar zavarenog spoja

2.3. Primena parametara mehanike loma na procenu integriteta konstrukcije

Za procenu integriteta konstrukcije, u praksi je široko primenjen pristup zasnovan na proceni rizika preko parametara mehanike loma. Ovakav pristup ima focus na zavarne spojeve, kao najkritičnije komponente. Prikazana je jednostavna inženjerska metoda, zasnovana na dijagramu analize otkaza (eng. Failure Assessment Diagram (FAD)), za objašnjenje procene parametara mehanike loma i njihovih kritičnih vrednosti u cilju procene strukturalnog integriteta zavarenih spojeva [23]. Kao praktičan primer, predstavljene su posude pod pritiskom za komprimovani vazduh u RHE Bajina Bašta, Srbija, pomoću FAD-a i matrice rizika za procenu rizika dalje eksploatacije posuda sa otkrivenim defektima nalik na prsline, označenim kao neprihvatljivim prema važećim standardima.

Metodologija primene mehanike loma zavisi od raspoloživih podataka o svojstvima materijala, uticaju okolnih medija i spoljašnjem opterećenju konstrukcije. U slučaju statičkog opterećenja, ponašanje materijala opisano kao linearno - elastično („relativno malo istezanje“) treba prepoznati po ponašanju materijala čija se plastična svojstva ne smeju zanemariti. U prvom slučaju se primenjuje linearna elastična mehanika loma (eng. Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)), dok se u drugom, u zavisnosti od oblika plastičnog istezanja, primenjuju različite metode elasto - plastične mehanike loma (eng. elastic plastic fracture mechanics (EPFM)).

Primena LEFM se zasniva na faktoru intenziteta napona, K_I , koji s jedne strane predstavlja opterećenje i geometriju konstrukcije, uključujući dimenzije prsline, a sa druge, njegova kritična vrednost, K_{Ic} , predstavlja svojstvo materijala. Na osnovu ove interpretacije LEFM parametara i Griffithovog energetskog kriterijuma, mogu se uspostaviti jednostavne zavisnosti za procenu integriteta konstrukcije.

$K_I \leq K_{Ic}$ – integritet konstrukcije nije ugrožen

$K_I > K_{Ic}$ – integritet konstrukcije je ugrožen zbog mogućeg krtoq loma

Analiza rizika predstavlja novi pristup rešavanju problema procene integriteta konstrukcije. Upravljanje rizikom u okviru poslovnog procesa predstavlja izazov za svako savremeno preduzeće, posebno u industrijskim procesima gde određeni rizici mogu biti na izuzetno visokom nivou, a njihove posledice su značajne.

Takođe, procena rizika integriteta zavarenih konstrukcija sa prslinom, poput posuda pod pritiskom, može se izvršiti primenom novog koncepta zasnovanog na matrici rizika za procenu nivoa rizika prema verovatnoći i posledicama otkaza. Procena se može izvršiti na osnovu table koja prikazuje nivo rizika u odnosu na posledice i verovatnoću, [24].

Zaključeno je da je analiza mehanike loma prihvatljiva osnova za dozvoljeno izuzeće od postojećih standarda pod određenim okolnostima, ukoliko takva analiza daje ubedljivu i konzervativnu (sigurnu) procenu integriteta konstrukcije. U praksi, nakon primene parametara mehanike loma i matrice rizika, obim popravke je drastično smanjen, izbegnuti su nepotrebni troškovi i rizici od nastanka novih kvarova izazvanih reparaturnim zavarivanjem.

2.4. Zamenska rešenja za proces reparature posuda pod pritiskom

Prikazana je popravka posude pod pritiskom, jer je rizik bio veoma visok, blizu najgoreg slučaja i verovatnoće i posledica. Kako položaj greske nije bio pogodan za žljebljenje i reparaturno zavarivanje, odlučeno je da se napravi ukrutni prsten, kako bi se smanjio napon u zavarenom spoju, tako da se i faktor intenziteta napona i neto napon(napon u ravni prsline), značajno smanjuju.



Slika 4. Sud pod pritiskom pre reparacije

Popravka opreme pod pritiskom je veoma odgovoran posao i zahteva kako praktična tako i teorijska znanja. Danas su ove popravke veoma precizne, zahvaljujući savremenim uređajima za ispitivanje bez razaranja i preciznom određivanju veličine i položaja defekta, [25]. Na slici 5. prikazana je posuda pod pritiskom 970, nakon reparacije kada je na nju postavljen ukrutni prsten.



Slika 5. Posuda pod pritiskom nakon postavljanja ukrutnog prsten

2.5. Analiza rizika posuda pod pritiskom u slučaju havarije

Za slučaj rezervoara za vazduh u RHEE BB, analiziran je rizik u slučaju havarije. Određena je matrica rizika koja predstavlja kombinaciju verovatnoće (učestanosti) događaja i posledice po ljude, okolinu, i po samo postrojenje.

Prilikom unutrašnjih pregleda prijavljena je pojava tačkaste korozije na unutrašnjim površinama rezervoara SP 970 u koji je direktno spojena cev od potiska kompresora. Pomenutu koroziju generiše sistem komprimovanog vazduha koji ulazi u rezervoar pri temperaturi od 50°C. Poznato je da ulazni vazduh sadrži vlagu iz vazduha kao i kiseline nastale raspadanjem i sagorevanjem ulja za podmazivanje kompresora tokom kompresije. Nakon registrovanja nedeozvoljenih grešaka, inspektor za opremu pod pritiskom (OPP) je propisao radiografsko snimanje svih zavarenih spojeva na pomenutom rezervoaru.

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu bio je angažovan kao stručna institucija da da ocenu podobnosti za dalju upotrebu rezervoara SP 970. Na osnovu izveštaja produkovanog od strane Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu a prema principima mehanike loma, zajedno sa rezultatima izveštaja prethodnih ispitivanja, inspektor za opremu pod pritiskom je dao saglasnost za dalju upotrebu rezervoara. Takođe je propisan češći periodičan pregled suda pod pritiskom. Prateći principe inženjerske dobre prakse kao i prema nalogu inspektora za OPP u skladu sa pravilima struke i naloga inspektora OPP, prate se greške da bi se predupredila havarija, odnosno, eksplozija posude, koja bi imala katastrofalne posledice.

U slučaju razmatranja eksplozije posude pod pritiskom (rezervoara za komprimovani vazduh), kao neželjenog događaja, posmatramo jačinu mogućih posledica na ljude, imovinu, životnu sredinu kao i na reputaciju preduzeća. Za slučaj da posude eksplodiraju, svi koji se u tom trenutku nalaze u kompresorskoj stanici izgubili bi život (od posledica vazdušnog udara). Šteta bi bila totalna na rezervoarima za komprimovani vazduh, oprema za upravljanje kompresorima delimično bi bila uništena kao i sami kompresori i oprema za upravljanje hidroagregatom R1. Pored direktne, RHE BB bi pretrpela i indirektnu štetu u vidu totalnog zastoja. Važno je napomenuti i da jedan sat rada RHE BB u vršnom opterećenju iznosi 180 000 eura.

Analiza je pokazala sledeće:

Ljudi: 5B - srednji rizik – (potencijalne posledice (za ljude), je da neko pogine ili se jako ozbiljno povredi.

Učestalost: B – mala (desilo se da eksplodira rezervoar vazduha u svetu)

Potencijalne posledice na reputaciju preduzeća: 4B – srednji rizik

Potencijalna šteta po životnu sredinu: 1B (nema rizika)

Ukupan rizik se određuje kao najveći uočeni rizik, što je u posmatranom slučaju 5B.

Sumiranjem gore navdenog, za slučaj relativno male verovatnoće događaja i velikih posledica, postoji srednji rizik. Srednji rizik zahteva učestalo i odgovorno, dokumentom periodično i kvalitativno propisano praćenje stanja rezervoara kao i preduzimanje maksimalnih mera bezbednosti za predupređenje havarije posuda pod pritiskom u RHE BB [26].

3. Osnovni principi ultrazvučnog ispitivanja

3.1 Ispitivanje bez razaranja uopšteno

Ispitivanje bez razaranja IBR, je metoda pronalaženja defekta na objektu bez oštećenja objekta ispitivanja. Često je pronalaženje ovih defekata veoma važan zadatak. U industriji aviona, IBR se koristi za traženje unutrašnjih promena ili znakova habanja na avionima. Železnička industrija takođe koristi ispitivanje bez razaranja za ispitivanje železničkih šina i traži znakove oštećenja. Unutrašnje prisline u šini, mogle bi da slome i izbace iz šina voz koji nosi pšenicu, ugalj ili čak ljude. Ako bi avion ili šina morali da se iseku na komade da bi se ispitali, to bi uništilo njihovu korisnost. Kod IBR ispitivanja, defekti se mogu otkriti pre nego što postanu opasni.

3.2 Počeci ispitivanja bez razaranja - IBR

Ispitivanja bez razaranja su praktikovana tokom mnogih decenija ali je Drugi svetski rat podstaknuo brzi razvoj instrumenata i tehnologija za pomenuta ispitivanja. Tokom ranijih dana, otkrivanje nedostataka odnosno detekcija grešaka u strukturama je bila primarna svrha upotrebe ispitivanja bez razaranja. Kao deo dizajna “bezbednog životnog veka”, bilo je predviđeno da konstrukcija ne sme razviti mikroskopske defekte tokom svog životnog veka odnosno perioda eksploatacije [27]. Otkrivanje ovakvih grešaka, tehnikama ispitivanja bez razaranja, predstavljalo je razlog za uklanjanje komponente iz upotrebe. Kao odgovor na ovu potrebu, pojavile su se sofisticirane tehnike ispitivanja bez razaranja koje koriste ultrazvuk, vrtložne struje, penetrantsko ispitivanje, magnetne čestice, vizuelne tehnike ispitivanja i mnoge druge. Tokom ranih sedamdesetih godina, dva događaja su prouzrokovala značajne promene u oblasti ispitivanja bez razaranja. Prvo je napredak tehnologije ispitivanja vodio ka detektovanju manjih defekata i odbacivanju komponenti u kojima su defekti pronađeni, bez obzira na činjenicu da verovatnoća otkaza komponente nije bila promenjena. Kao odgovor na gore navedeno, značajno se razvila naučna disciplina mehanike loma koja je omogućila predviđanja u smislu da li će defekt date veličine dovesti do loma usled opterećenja ako nam je poznata žilavost materijala. Razvijeni su i drugi zakoni za potrebe predviđanja stope rasta prsline pod dinamičkim opterećenjem (zamor). Sa pojavom ovih alata, postalo je moguće prihvatiti strukture koje sadrže određene defekte pod uslovom da su veličine defekata poznate i da su ti defekti prihvatljivi prema pomenutim zakonima. Ovo je formiralo osnovu za novu filozofiju dizajna prihvatljiva oštećenja (eng. damage tolerant). Komponente sa poznatim defektima mogle su ostati u eksploataciji sve dok je bilo moguće sa sigurnošću utvrditi da ti defekti neće porasti do kritične veličine koja može prouzrokovati lom. Novi izazov je predstavljen za drštvo ispitivanja bez razaranja. Sama po sebi detekcija nije bila dovoljna. Potrebno je bilo dobiti kvantitativne informacije o veličinama defekata koje bi služile kao ulaz u mehaniku loma radi predviđanja preostalog radnog veka. Potreba za kvantitativnim informacijama bila je posebno izražena u industriji odbrane i nuklearne energije i dovela je do pojave kvantitativne nedestruktivne evaluacije (KNDE), kao nove inženjersko/istraživačke discipline. Pokrenut je niz istraživačkih programa širom sveta, kao što je Centar za nedestruktivnu evaluaciju na Državnom univerzitetu u Ajovi, Institut za istraživanje električne energije u Šarlotu, Severna Karolina; Fraunhofer institut za ispitivanje bez razaranja u Zabrukenu, Nemačka; i ispitivanje bez razaranja Centar u Harvelu, Engleska.

3.3 Istorija ultrazvuka

Sonar kao tehnika slanja ultrazvučnih talasa kroz vodu i posmatranje povratnih odjeka (ehoa), kako bi se dobila preciznija slika i više informacija o potopljenim objektima koristila se još pre Drugog svetskog rata. Kao takva, inspirisala je rane ultrazvučne istraživače u pokušaju primene pomenute tehnike na pronalaznju koncepta za dobijanje medicinskih dijagnoza. Sokolov je proučavao primenu ultrazvučnih talasa za detekciju metala u periodu od 1929 – 1935. godine. Mulhauser je dobio patent za tehniku korišćenja dva pretvarača za detekciju defekata u čvrstim materijalima 1931. godine. Razvoj puls-echo tehnike beleži se 1940. godine Firestone i 1945. godine Simons. Japanci su počeli da istražuju upotrebu ultrazvuka u medicinske svrhe nakon Drugog svetskog rata. Prvi su napravili uređaj koji je koristio A – modul za prikazivanje signala na ekranu osciloskopa. Razvili su test koji koristi ultrazvučne talase za prikazivanje unutrašnjosti objekta. Rad Japanaca je bio relativno nepoznat Evropi i Sjedinjenim Američkim državama sve do pedesetih godina dvadesetog veka. Oni su širokoj međunarodnoj medicinskoj zajednici predstavili svoja otkrića o korišćenju ultrazvuka za otkrivanje tumora, kamena u žuči i drugih. Japanski istraživači su takođe bili prvi u primeni Doplerovog ultrazvuka. Dopler ultrazvuk detektuje unutrašnje „pokretne objekte”, kao što je na primer krv koja prolazi kroz srce i kardiovaskularni sistem. Bitne inovacije i otkrića doneli su pioniri ultrazvuka u narednim decenijama radeći u Sjedinjenim Američkim Državama. Istraživači su naučili kako da koriste ultrazvuk za praćenje trudnoći, potrebe otkrivanja raka i vizualizaciju tumora kod živih subjekata.



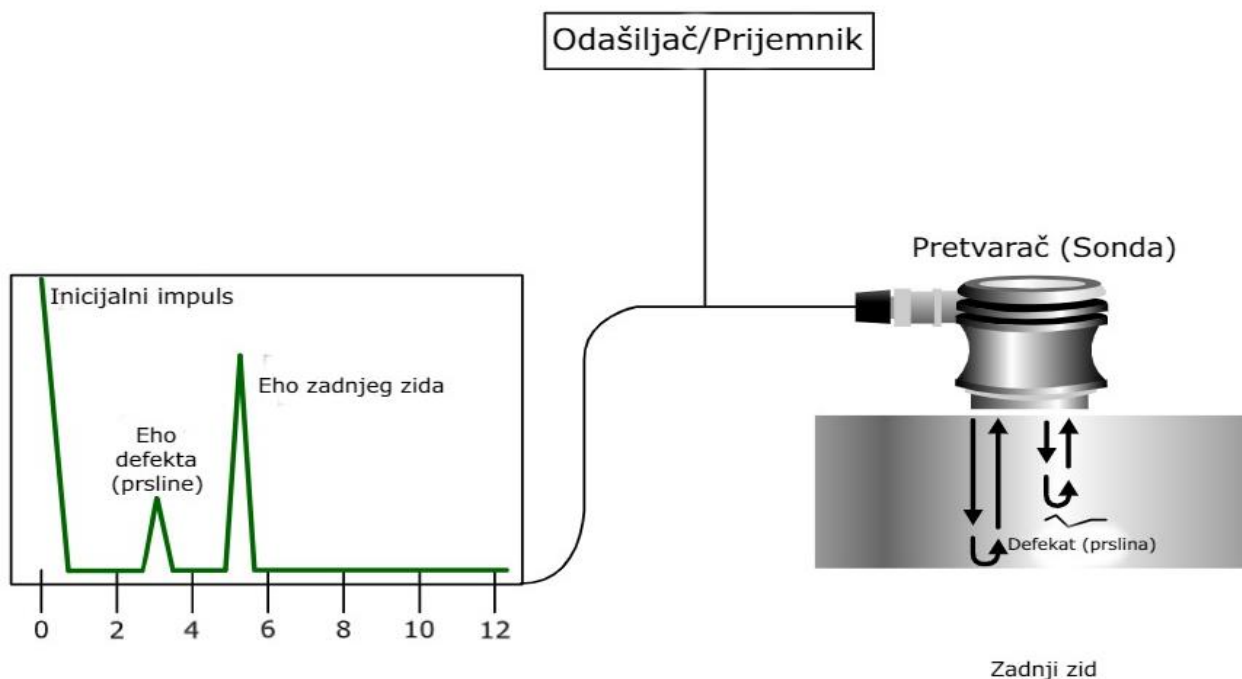
Slika 6. Snimljena UT slika u realnom vremenu [Dr. Zorica Opačić, Dom zdravlja „Dr. Dragan Funduk” Pećinci]

Na slici 6. prikazan je i razvijeni dijagnostički alat koji prikazuje ultrazvučne slike u realnom vremenu na ekranu uređaja za vreme skeniranja. Dalje je razvijen spektralni Dopler, praćen „kolor Doplerom”, koji prikazuje krv u različitim bojama kako bi se identifikovala brzina i pravac kretanja krvi. Sjedinjene Američke Države takođe preuzimaju zasluge za razvoj prvog ručnog kontaktnog ultrazvučnog skenera za kliničku upotrebu.

3.4 Osnovni principi ultrazvučnog ispitivanja

Ultrazvučno ispitivanje (UT), koristi zvučnu energiju visoke frekvencije kako bi se izvršila ispitivanja i prateća merenja. Ultrazvučna inspekcija se široko koristi za detekciju indikacija nesavršenosti (grešaka), kao i njihovu ocenu, merenje dimenzija, karakterizaciju materijala i još mnogo toga. Važno je napomenuti da su tehnike ispitivanja metode ultrazvučnog ispitivanja u stalnom razvoju novih i usavršavanju postojećih. Za ilustraciju opšteg principa ultrazvučne inspekcije, koristiće se tipična konfiguracija za izvođenje ispitivanja prema impuls-eho tehnici, kao što je objašnjeno u nastavku. Tipičan ultrazvučni inspeksijski sistem, (uređaj za ultrazvučno ispitivanje), sastoji se od nekoliko funkcionalnih jedinica kao što su odašiljač (generator impulsa)/prijemnik, pretvarač i uređaj za prikazivanje rezultata. Odašiljač/prijemnik je elektronski uređaj koji može proizvesti električne impulse visokog napona. Pobuđen odašiljačem, kroz pretvarač uređaj generiše ultrazvučnu energiju visoke frekvencije.

Kada se energija zvuka uvede u materijal (kada „prozvučimo materijal”), objekat ispitivanja, ultrazvučni talas se širi kroz materijal u obliku talasa. Kada talas naiđe na diskontinuitet u materijalu (kao što na primer može biti prslina), na putu talasa, deo energije će se reflektovati sa površine defekta (on postaje naš reflektor). Reflektovani zvučni signal se pretvara u pretvaraču u električni signal i biva prikazan na ekranu aparata. Jačina reflektovanog signala je prikazana u zavisnosti od vremena kada je početni talas generisan. Vreme putovanja signala je direktno proporcionalno pređenom putu signala. Iz signala se mogu dobiti informacije o lokaciji reflektora, veličini, orijentaciji i drugim karakteristikama. Slika 7.



Slika 7. Šema funkcionisanja UT ispitivanja

3.5 Prednosti i nedostaci ultrazvučne metode ispitivanja

Ultrazvučna inspekcija važi za korisnu i višenamensku metodu ispitivanja bez razaranja. Često navođene prednosti ultrazvučne inspekcije su sledeće:

- Metoda osetljiva na površinske i podpovršinske diskontinuitete (greške), u materijalu;
- Visoka osetljivost, omogućava otkrivanje veoma malih grešaka u materijalu;
- Dubina dijagnostikovanja i merenja grešaka je superiorinija u odnosu na druge metode ispitivanja bez razaranja;
- U određenim slučajevima može biti dovoljan pristup samo se jedne strane ispitivanog uzorka materijala;
- Preciznost u detekciji, pozicioniranju i proceni veličine i oblika reflektora (greške u materijalu) ;
- Zahtevna priprema uzorka ispitivanja nije potrebna;
- Ultrazvučna metoda u sprezi sa elektronskom opremom za ispitivanje daje trenutne rezultate;
- Sa naprednim metodama moguće je proizvesti detaljne slike i dokumentovati nalaze (rezultate ispitivanja) ;
- Pored detekcije grešaka u materijalu, ultrazvučna metoda ima i druge primene kao što su precizno merenje debljine materijala, mapiranje korozije i druge;
- Bezopasna za osoblje, opremu ili materijale u blizini.

Ultrazvučna tehnika ima i svoja ograničenja, od kojih možemo pomenuti najznačajnija:

- Ispitivani materijal mora biti pogodan za prenos ultrazvuka;

- Obuke za ispitivače su skupe i dugtrajnije. Veština ispitivanja ultrazvukom se stiče daljim radom nakon zvanične sertifikacije;
- Prilikom ispitivanja potrebno je konstantno korišćenje medijuma (gel, ulje, voda), za osiguranje prenosa ultrazvuka kroz ispitivani materijal;
- Materijali neravnih površina, nepravilnih oblika, materijali ispod 8mm debljine kao i nehomogeni materijali su zahtevni za izvođenje ultrazvučnog ispitivanja;
- Liveno gvožđe i drugi krupnozrnasti materijali su takođe zahtevni za ispitivanje zbog lošeg prenosa zvuka i visokog šuma signala;
- Linearni defekti orijentisani paralelno sa ultrazvučnim signalom mogu ostati nedetektovani;
- Referentni standardi se moraju koristiti kako za kalibraciju opreme, tako i za karakterizaciju defekta.

Gornji uvod pruža pojednostavljeno objašnjenje tehnike ultrazvučnog ispitivanja materijala. Međutim, da bi se efikasno izvršila inspekcija pomoću ultrazvuka, potrebno je znati mnogo više o metodi. Sledeće stranice predstavljaju informacije o nauci koja se bavi ultrazvučnom inspekcijom, opremi koja se obično koristi, nekim od korišćenih tehnika merenja, kao i druge informacije. Bitno je napomenuti da postoje različite metode ultrazvučnog ispitivanja koje se aktuelno usavršavaju i smanjuju ograničenja tehnike ispitivanja ultrazvukom. Uporedo sa metodama se razvijaju i prateći standardi za upotrebu naprednih metoda ultrazvučnog ispitivanja.

3.6 Stanje ultrazvuka današnjice

Kao što je već napomenuto, ultrazvučna ispitivanja se praktikuju već više decenija. Inicijalni brzi razvoj instrumentacije podstaknut tehnološkim napretkom pedesetih godina prošlog veka nastavlja se i danas. Tokom hiljadudevetstoosamdesetih godina, nastavljajući kroz sadašnjost, računari su tehničarima pružili instrumente sa sve većim mogućnostima čiji se razvoj i dalje nastavlja. Precizna merenja debljine, jeste primer ultrazvučnog testiranja gde su uređaji prerađeni da prikupljaju podatke, brže, kvalitetnije i lakše za operatera za ovu vrstu primene. Ugrađeni su sistemi za sakupljanje podataka u same instrumente, takozvani „data logeri”, koji omogućavaju hiljadama merenja da budu snimljena i skladištena. Napredak tehnologije u potpunosti je izbacio iz upotrebe uređaje starije generacije koji su sadržali pisace koji su na papirnoj traci prikazivali rezultate. Gotovi svi ultrazvučni aparati novije generacije imaju kapacitet da pored prijema i obrade oblika ultrazvučnih talasa u funkciji ispitivanja materijala, daju i precizna očitavanja debljina materijala. Opcija skladištenja oblika ultrazvučnog talasa omogućava ultrazvučnom operateru da pregleda A-sken signal merenja debljine u bilo kom trenutku nakon samog sekeniranja materijala. Savremeni instrumenti imaju mogućnost da promene rezultate u zavisnosti od površinskog stanja ispitivanog materijala. Na primer, signal koji se odbije sa erodirane površine, ili površine zahvaćene pitingom, biće obrađivan drugačije u softveru ultrazvučnog aparata nego povratni signal koji bi se registrovao sa glatke površine ispitivanog materijala. Ovo je dovelo do preciznijih i merenja sa višim stepenom ponovljivosti na terenu.

Postao je standard današnjice da ultrazvučni detektori nedostataka (defektoskopi), imaju trigonometrijsku funkciju koja omogućava brzo i tačno određivanje lokacije defekta prilikom vršenja inspekcije transverzalnim talasima. LED i LCD ekrani koji su vidljivi u širokom spektru ambijentalnih uslova su u širokoj upotrebi svih aparata novije generacije. Kod svih ekrana se može podešavati osvetljenost, kontrast, boja ekrana, signala i mnogi drugi parametri koje tehnologija dvadeset prvog veka podržava kao standardni paket. Pretvarači se takođe mogu podešavati i predefinisati preko opcija upravljanja uređaja. Obaveze operatera za postavku i kolibraciju same mašine za ultrazvučno ispitivanje su u mnogome napredovale u korist lakšeg rukovanja.

Uz kompjutere, napretku ultrazvučnih inspekcija doprineli su kontrola pokreta i robotika. U početku je prednost stacionarne platforme prepoznata i korišćena u industriji. Računari se mogu programirati da pregledaju velike komponente složenog oblika, sa jednim ili više sonde (pretvarač se nalazi unutar sonde), koji prikupljaju informacije. Automatizovani sistemi su se obično sastojali od rezervoara za uranjanje, sistema za pretraživanje i sistema za snimanje i za ispis rezultata skeniranja. Rezervoar za uranjanje (imerziona tehnika), se može zameniti sistemom za prskanje, koji omogućava prenos zvuka kroz vodeni stub. Dobijeni C-sken daje plan ili pogled odozgo na komponentu. U automatizovanim industrijskim sistemima, pretraživanje komponenti je znatno brže od kontaktnog „ručnog”. Informacije o skeniranju se prikupljaju od strane računara za evaluaciju i skladištenje dobijenih rezultata skeniranja.

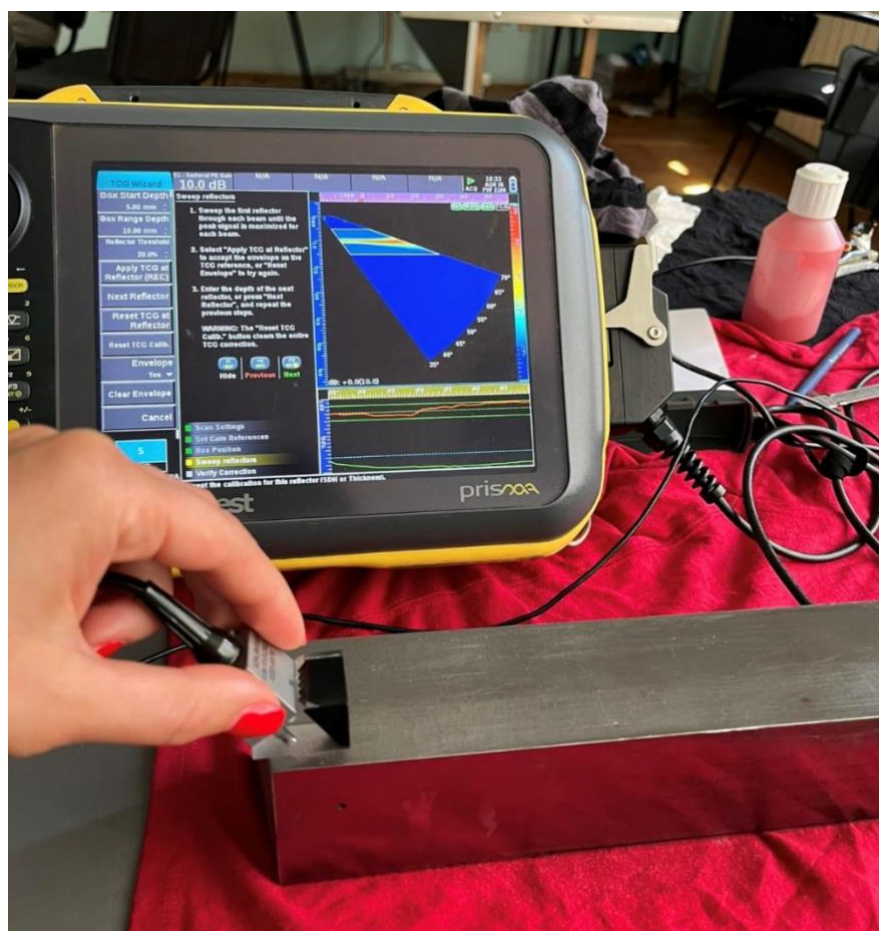


Slika 8. Savremeni ultrazvučni aparat; model: Wave; proizvođač: Sonatest Ltd, Engleska

Danas, razvijene su kvantitativne teorije koje opisuju interakciju ispitivanih polja sa indikacijama defekata (nedostataka u materijalu). Modeli koji uključuju rezultate su integrisani sa opisima čvrstih modela geometrija realnih delova radi simulacije praktičnih inspekcija. Povezani alati omogućavaju da se ispitivanje bez razaranja razmatra tokom procesa projektovanja na ravnopravnoj osnovi sa drugim inženjerskim disciplinama. Kvantitativni opisi performansi ispitivanja bez razaranja (IBR), kao što je verovatnoća detekcije (VD), postali su sastavni deo statističke procene rizika. Procedure merenja koje su prvobitno bile razvijene za metale, proširene su na druge inženjerske materijale kao što su kompoziti, gde su anizotropija i nehomogenost postali važna pitanja. Brzi napredak u digitalizaciji i računarskim mogućnostima potpuno je promenio izgled mnogih instrumenata i vrste algoritama koji se koriste u obradi dobijenih podataka.

3.7 Budući pravac ultrazvučne inspekcije

Gledajući u budućnost, ultrazvučna ispitivanja se tretiraju kao ispitivanja buduće mogućnosti, odnosno kao tehnika koja nije dostigla maksimum svog razvoja i mogućnosti koje pruža. Industrija odbrane i nuklearne energije odigrale su glavnu ulogu u usavršavanju tehnike ultrazvučnog ispitivanja kao i drugih tehnika ispitivanja bez razaranja. Sve veća globalna konkurencija dovela je do dramatičnih promena u razvoju proizvoda, priuštivosti i primeni širokom spektru drugih industrija, Slika 9. U isto vreme, zastarela infrastruktura, od puteva do zgrada i aviona, predstavlja novi skup izazova merenja i praćenja za inženjere kao i za tehničare.



Slika 9. Savremeni ultrazvučni aparat sa naprednim tehnikama ispitivanja; model: Prisma; proizvođač: Sonatest Ltd, Engleska

Među novim primenama nedestruktivne evaluacije (NDE), koje su nastale promenama vođenim povećanom upotrebom evaluacije bez razaranja, jeste poboljšanje produktivnosti proizvodnih procesa. Kvantitativna nedestruktivna evaluacija (KNDE), istovremeno povećava količinu informacija o načinima kvara i brzinu kojom se informacije mogu dobiti. Sveobuhvatno olakšava razvoj sistema merenja ugrađenih na liniju proizvodnje, eng. in-line merenja za kontrolu procesa.

Fraza, „ne možete da kontrolišete kvalitet, morate ga ugraditi“ ilustruje fokus industrije na filozofiju proizvodnje „prvi deo – dobar deo“. Bez obzira na to, mane u proizvodnji nikada neće biti u potpunosti eliminisane i materijalna šteta će nastaviti da se javlja tokom rada, tako da je neophodan kontinuirani razvoj tehnika detekcije grešaka i njihove karakterizacije kao jedan od glavnih fokusa razvoja naprednih metoda ultrazvučnog ispitivanja.

Napredni alati za simulaciju koji su dizajnirani za inspekciju i njihovu integraciju u kvantitativne strategije za upravljanje životnim vekom („life management“), doprineće povećanju broja i tipova inženjerskih upotreba nedestruktivne evaluacije (NDE). Sa porastom inženjerskih aplikacija za NDE, postojaće potreba da se proširi baza znanja tehničara koji vrše procene. Napredni alati za simulaciju koji se koriste u dizajnu za mogućnost inspekcije mogu se koristiti da bi studentima tehnike pružili bolje razumevanje ponašanja ultrazvuka u materijalima.

Kako se globalizacija nastavlja, kompanije će sve češće nastojati da razviju harmonizovane međunarodne prakse. U oblasti NDE-a, ovaj trend će dovesti do sveobuhvatnog ubrzanog daljeg razvoja standarda, poboljšane obrazovne ponude i simulacije koje se mogu prenositi elektronskim putem. Godine koje dolaze će biti ključne za razvoj NDE-a, jer on kao takav ulazi i pojavljuje se kao punopravna inženjerska disciplina.

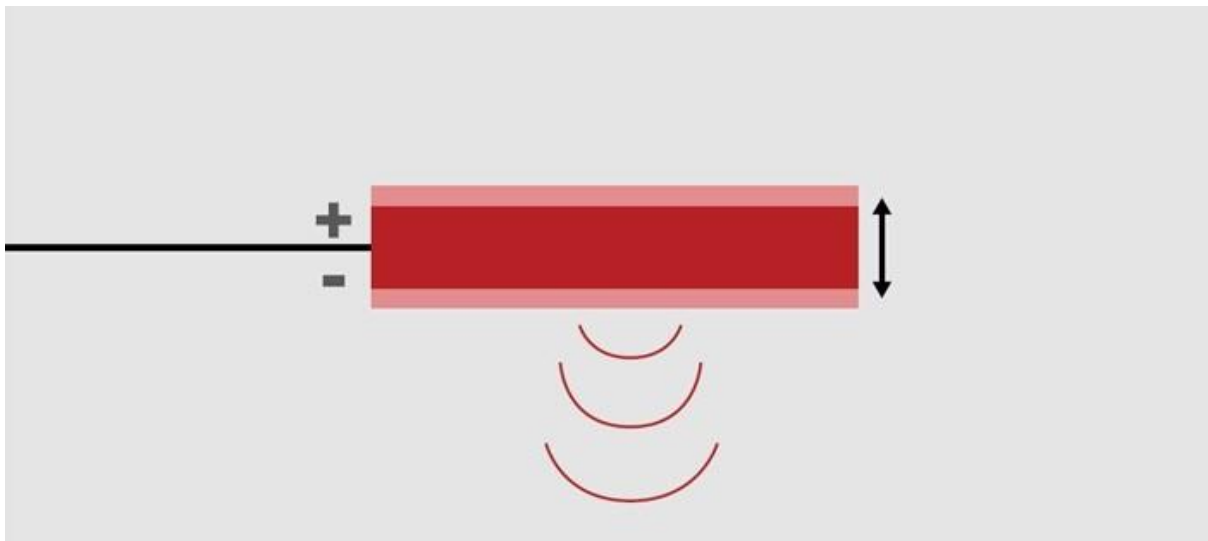
4. Objašnjenje ultrazvučnih tehnika ispitivanja (konvencionalni UT, PA, TOFD i definisanje predmeta ispitivanja)

4.1 Osnovni principi konvencionalne impuls eho tehnike UT ispitivanja

Zvuk je čujni mehanički talas čija je frekvencija oscilovanja čestica između 20 Hz i 20 kHz. Infrazvuk je, za ljude nečujan, mehanički talas čija je frekvencija oscilovanja čestica manja od 20 Hz. Ultrazvuk je, za ljude takođe nečujan, mehanički talas čija je frekvencija oscilovanja čestica veća od 20 kHz. Infrazvuk i ultrazvuk se po svojstvima u odnosu na čujni zvuk razlikuju samo po frekvencijama oscilovanja čestica, izuzimajući činjenicu da prosečno ljudsko biće ne poseduje sposobnost da čuje infrazvuk i ultrazvuk [14].

Konvencionalni jednoelementni ultrazvučni pretvarači longitudinalnih talasa rade kao klipni izvor visokofrekventnih mehaničkih vibracija, odnosno zvučnih talasa. Kako se primenjuje napon (povećava voltaža), piezoelektrični element pretvarača (često se naziva i kristal), deformiše se kompresijom u pravcu koji je upravan na njegovu površinu. Kada se napon ukloni, obično manje od mikrosekunde kasnije, element se vraća nazad, generišući puls mehaničke energije koji se sastoji od ultrazvučnog talasa. Grafik ispod prikazuje konceptualizovan primer kako piezoelektrični element reaguje na kratak električni impuls.

Piezoelektrični odgovor na ekscitaciju (pobudu) slika 10.



Slika 10. Piezoelektrični odgovor na ekscitaciju (pobudu)

Kod puls - eho tehnike, isti pretvarač emituje i prima energiju zvučnog talasa. Ovaj metod koristi eho signale na ekranu aparata, kao što je zadnji zid ispitivanog objekta ili defekt (nesavršenost u materijalu), kako bi reflektovao talase nazad do sonde. Rezultati su prikazani

kao linijski grafikon, sa amplitudom na y-osi koja predstavlja intenzitet refleksije i rastojanje ili vreme na x-osi, pokazujući dubinu signala kroz materijal.

4.1.1 Osnovni principi rada UT konvencionalnih aparata Impuls – eho tehnikom

Uređaj za ultrazvučno ispitivanje materijala, koji se naziva još i ultrazvučni defektoskop, proizvodi (generiše), kratkotrajne električne naizmenične visokonaponske impulse šiljatog ili pravougaonog oblika. Ovi električni impulsi se putem priključaka (konektora), na ultrazvučnom uređaju i ispitnoj sondi i koaksijalnog kabla prenose do pretvarača, izrađenog od materijala koji poseduje svojstvo piezo-električnosti, smeštenog u kućištu ispitne sonde. Pretvarač dovedene električne impulse konvertuje u mehaničke oscilacije, tako što pod dejstvom električnih impulsa osciluje oko ravnotežnog položaja. Oscilovanje pretvarača predstavlja naizmenično smanjivanje i povećanje njegove debljine u odnosu na nominalnu debljinu, sve dok dejstvo električnih impulsa ne prestane i dok se oscilacije potom u potpunosti ne priguše. Pri tome je frekvencija oscilovanja pretvarača veća od 20 kHz i zapravo iznosi od nekoliko stotina kilo Herca do nekoliko desetina mega Herca. Oscilacije pretvarača se putem kontaktnog sredstva, koje se pre početka ispitivanja nanosi između ispitne sonde i površine objekta ispitivanja po kojoj se sprovodi pretraživanje, prenose u materijal koji se ispituje i dalje se prostiru kroz njega u vidu ultrazvučnih talasa [14].

Kontaktno sredstvo služi da popuni mikroskopska udubljenja koja postoje između ispitne sonde i površine objekta ispitivanja po kojoj se izvodi pretraživanje, te da potisne vazduh iz njih, kako bi bio omogućen prenos ultrazvučnih talasa sa površine ispitne sonde u materijal koji se ispituje. Kontaktno sredstvo je neophodno s obzirom na to da u tehnici ne postoje idealno glatke površine, te se kontakt između ispitne sonde i površine objekta ispitivanja po kojoj se izvodi pretraživanje zapravo ostvaruje na relativno maloj dodirnoj površini, odnosno u sveukupno malom broju dodirnih tačaka. Kao kontaktno sredstvo može biti upotrebljen ultrazvučni gel, ulje, mast, voda, celulozni lepak ili tečni detardžent. Treba voditi računa o kompatibilnosti ispitnog sredstva sa materijalom koji se ispituje, kako ono ne bi agresivno delovalo na površinu materijala i potpomoglo odvijanje procesa korozije. Preporuka je da se koriste fabrički gelovi, namenski napravljeni da potpomognu kontakt između sonde i ispitne površine prilikom pretraživanja, a ujedno ne prouzrokuju stvaranje korozije u ispitnom materijalu kao ni stvrdnjavanje kontaktnog sredstva. Ukoliko se ispituje objekat čije su površine zagrejane na temperaturu višu od sobne temperature treba voditi računa o isparljivosti i zapaljivosti kontaktnog sredstva [14], takođe je preporuka da se koriste fabrički gelovi namenski napravljeni za ispitivanja na povišenim temperaturama.

Ultrazvučni talasi koji se prostiru kroz objekat ispitivanja poseduju određenu početnu vrednost akustičnog (zvučnog), pritiska. Početna vrednost akustičkog pritiska ultrazvučnih talasa odmah po prodiranju u materijal koji se ispituje zavisi od amplituda oscilacija pretvarača, dužine trajanja odašiljanja ultrazvučnih talasa i kvaliteta kontakta ostvarenog između ispitne sonde, kontaktnog sredstva i površine objekta ispitivanja po kojoj se izvodi pretraživanje (eng. skeniranje). Akustički pritisak predstavlja lokalnu promenu pritiska u materijalu koji se ispituje izazvanu prostiranjem ultrazvučnih talasa kroz njega u odnosu na statički pritisak koji inače vlada u tom materijalu pod dejstvom atmosferskog pritiska, međuatomskih veza i dejstva

spoljašnjih sila na objekat ispitivanja. Prilikom prostiranja ultrazvučnih talasa kroz materijal njihov akustički pritisak se smanjuje sa povećanjem pređenog puta ultrazvučnih talasa [14]. Odmah posle početka odašiljanja (emitovanja) ultrazvučnih talasa, ultrazvučni uređaj počinje da meri vreme potrebno da ultrazvučni talasi dospeju do neke geometrijske granične površine objekta ispitivanja ili makroskopske nehomogenosti (nesavršenosti) u materijalu, da se odbiju (reflektuju) od nje i vrte nazad do pretvarača smeštenog u ispitnoj sondi [14].

Geometrijske granične površine, kao što je na primer zadnji zida objekta ispitivanja – spoljašnja površina objekta ispitivanja koja je naspramna i paralelna sa površinom po kojoj se izvodi pretraživanje (engleski: back wall, engleska skraćenica: BW) i makroskopske nesavršenosti u materijalu jednom rečju nazivaju se reflektori zbog toga što usled svojih akustičkih svojstava reflektuju (odbijaju), deo snopa odaslatih ultrazvučnih talasa koji su dospeli na njihovu graničnu površinu, a koji se zatim vraćaju nazad u pravcu i smeru ka ispitnoj sondi. Odbijeni ultrazvučni talasi nazivaju se odjek ili eho. U praksi se kod operatera ustalila upotreba termina eho koji potiče iz engleskog jezika od reči eng. echo [14].

Nakon što se umiri posle odašiljanja ultrazvučnih talasa pretvarač se nalazi u režimu osluškivanja. Pretvarač u režimu osluškivanja registruje ultrazvučne talase odbijene od reflektora koji su se posle određenog vremena prostiranja kroz materijal objekta ispitivanja vratili nazad do ispitne sonde. Odbijeni ultrazvučni talasi koji se vrte do ispitne sonde izazivaju oscilovanje pretvarača smeštenog u njoj oko njegovog ravnotežnog položaja. Oscilovanje pretvarača odvija se pod dejstvom akustičkog pritiska ultrazvučnih talasa. Dejstvo akustičkog pritiska po površini pretvarača predstavlja pritisnu silu koja deluje na pretvarač i izaziva njegove oscilacije. Oscilovanje pretvarača i u ovom slučaju predstavlja naizmenično smanjivanje i povećanje njegove debljine u odnosu na nominalnu vrednost, a odvijaju se sve dok dejstvo akustičkog pritiska ne prestane i dok se oscilacije potom u potpunosti ne priguše. S obzirom da je akustički pritisak ultrazvučnih talasa koji se odbiju od reflektora i vrte do ispitne sonde poseduje mali intenzitet i intenzitet pritisne sile koja deluje na pretvarač je mala. Zbog toga oscilacije pretvarača koje ova sila izaziva imaju male vrednosti amplituda. Oscilacije pretvarača izazivaju pojavu električnog naizmeničnog niskog napona između naspramnih površina pretvarača. Ovaj električni napon se u vidu impulsa putem priključaka na ispitnoj sondi i ultrazvučnom uređaju i koaksijalnog kabla provodi do ultrazvučnog uređaja, gde se filtrira, elektronski obrađuje i pojačava [14].

U zavisnosti od vremenskog perioda koji je protekao između odašiljanja i prijema ultrazvučnih talasa na odgovarajućoj poziciji ekrana kalibrisanog ultrazvučnog uređaja prikazuje se naponski signal koji predstavlja amplitude oscilacija pretvarača. Signali na ekranu ultrazvučnog uređaja predstavljaju indikacije reflektora u materijalu koji se ispituje ili indikacije površina objekta ispitivanja. Signali koji se tokom ultrazvučnog ispitivanja pojavljuju na ekranu ultrazvučnog defektoskopa u praksi se nazivaju odjeci ili ehoi zbog toga što se pojavljuju kao posledica registrovanja ultrazvučnih talasa odbijenih od reflektora pomoću pretvarača smeštenog u ispitnoj sondi. Položaj signala na horizontalnoj osi ekrana predstavlja rastojanje između ispitne sonde i reflektora, koje se naziva još i zvučni put. Stvarni put koji su ultrazvučni talasi prešli je zapravo dvostruko duži od zvučnog puta prikazanog na ekranu ultrazvučnog uređaja i jednak je zbiru pređenog puta ultrazvučnih talasa od ispitne

sonde do reflektora i pređenog puta od reflektora nazad do ispitne sonde. Međutim, ultrazvučni uređaj automatski deli vreme prostiranja ultrazvučnih talasa sa dva tako da se na ekranu prikazuje rastojanje između ispitne sonde i reflektora, koje se naziva još i zvučni put, a ne stvarni pređeni put ultrazvučnih talasa [14].

Najveća visina, odnosno maksimalna amplituda naponskog signala na ekranu ultrazvučnog uređaja zavisi od zvučnog pritiska ultrazvučnih talasa koji su se odbili od reflektora i vratili do ispitne sonde. To je zbog toga što od vrednosti zvučnog pritiska zavise amplitude oscilacija pretvarača smeštenog u ispitnoj sondi, koje se konvertuju u električne naizmenične niskonaponske impulse i prosleđuju nazad ka uređaju putem priključaka i koaksijalnog kabla. Zvučni pritisak ultrazvučnih talasa koji su se odbili od reflektora zavisi od mnogobrojnih faktora koji će biti razmatrani u daljem tekstu. Na osnovu visine signala ehoa na ekranu ultrazvučnog uređaja, na kome je podešena osetljivost ispitnog sistema za potrebe konkretnog slučaja ispitivanja, moguće je odrediti ekvivalentnu (uporednu), veličinu reflektora.

Na ovaj način ultrazvučnim ispitivanjem moguće je odrediti tačan položaj i uporednu veličinu nesavršenosti koje se nalaze u zapremini materijala objekta ispitivanja i nisu vidljive spolja, bez narušavanja integriteta konstrukcije i bez promene mikrostrukture materijala.

Opisana tehnika ultrazvučnog ispitivanja naziva se manuelna kontaktna impuls–eho tehnika. Ova tehnika ispitivanja u današnje vreme predstavlja najčešće primenjivanu tehniku ispitivanja u okviru metode ultrazvučnog ispitivanja. Naziv impuls–eho tehnike ispitivanja potiče od načina odašiljanja i prijema ultrazvučnih talasa pomoću ultrazvučnog sistema. Ultrazvučni sistem odašilje impulse ultrazvučnih talasa i potom registruje odjeke tih ultrazvučnih talasa koji potiču od reflektora [14].

4.1.2 Ocena relevantnih indikacija prema kriterijumima prihvatljivosti

Ocena relevantnih indikacija koje ukazuju na postojanje nesavršenosti u materijalu sprovodi se u skladu sa kodovima ili standardima. Što se tiče nacionalnih, Evropskih i međunarodnih standarda konvencionalno ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva sprovodi se u skladu sa zahtevima SRPS EN ISO 17640, a ocena indikacija na osnovu kriterijuma prihvatljivosti definisanih u standardu SRPS EN ISO 11666. Kriterijumi prihvatljivosti zasnivaju se na nivou prihvatljivosti, koji zavisi od zahtevanog nivoa kvaliteta zavarenih spojeva (nivo prihvatljivosti 2 za nivo kvaliteta B u skladu sa SRPS EN ISO 5817, odnosno nivo prihvatljivosti 3 za nivo kvaliteta C u skladu sa SRPS EN ISO 5817; navedeni nivoi se primenjuju na opremi pod pritiskom), debljini osnovnog materijala, dužini indikacija, maksimalnoj amplitudi signala odjeka (ehoa) i tehnici podešavanja osetljivosti (DGS/AVG ili DAC/TCG ili referentni nivo definisan na osnovu referentnog reflektora u obliku žleba).

4.2 UT tehnika faznog niza PA (eng. *Phased Array*)

4.2.1 Istorijski razvoj i industrijski zahtevi PAUT tehnike (tehnike faznih nizova)

Razvoj i primena ultrazvučnih faznih nizova, kao samostalne tehnologije, dostigla je zrelo status tek početkom dvadesetprvog veka. Ultrazvučna tehnologija faznog niza prešla je iz oblasti medicine u industrijski sektor početkom 1980-ih.[28-29].

Do sredine 1980-ih, piezokompozitni materijali su razvijeni i stavljeni na raspolaganje za proizvodnju sonde sa faznim nizom složenog oblika.[30-37].

Do početka 1990-ih, tehnologija faznog niza je ubačena kao nova IBR tehnika (nedestruktivne evaluacije) u ultrazvučne priručnike za obuku inženjera i operatera[38-40].

Većina primene od 1985. do 1992. odnosila se na nuklearne posude pod pritiskom (mlaznice), velika kovana vratila i komponente turbine niskog pritiska.

Novi napredak u tehnologiji piezokompozita [41-42], mikro-mašinska obrada, mikroelektronika i računarska snaga (uključujući simulacione pakete za dizajn sonde i interakciju snop-komponenta), svi su doprineli revolucionarnom razvoju tehnologije faznih nizova do kraja 1990-ih. Funkcionalni softver je takođe razvijen kako su se računarske mogućnosti povećale.

Ultrazvučna tehnologija faznog niza za ispitivanja bez razaranja pokrenuta je sledećim opštim i specifičnim zahtevima za inspekciju proizvodnje električne energije: [43-50],

1. Smanjeno vreme pripreme za ispitivanje i samog trajanja ispitivanja (tj. povećana produktivnost)
2. Povećana pouzdanost dobijenog snimka
3. Povećan pristup teško dostupnim komponentama reaktora sa vodom pod pritiskom / reaktora sa ključalom vodom (eng. pressurized water reactor / boiling water reactor components (PWR/BWR))
4. Smanjena izloženost zračenju
5. Kvantitativni zahtevi za izveštavanje koji se lako tumače (eng. “Engineering Critical Assessment”—ECA)
6. Detekcija nasumično orijentisanih pukotina na različitim dubinama korišćenjem iste sonde u fiksnoj položaju
7. Poboljšan odnos signal-šum (eng. signal-to-noise ratio (SNR)), i mogućnost dimenzionisanja za različite metalne zavarene spojeve i zavarene spojeve od nerđajućeg čelika livenog centrifugalno (eng. centrifugal-cast stainless-steel welds)
8. Detekcija i dimenzionisanje malih prslina od naponske korozije (eng. stress-corrosion cracks, SCC), u komponentama turbine složene geometrije
9. Povećana tačnost u detekciji, dimenzionisanju, lokaciji i orijentaciji kritičnih defekata, bez obzira na njihovu orijentaciju. Ovaj zahtev je iziskivao višestruke fokusirane snopove sa mogućnošću promene njihove fokalne dubine i ugla skretanja (promena ugla pretraživanja).

Druge industrije (kao što su vazduhoplovstvo, odbrana, petrohemija i proizvodnja) zahtevale su slična poboljšanja, mada se specifični zahtevi razlikuju za svaku industrijsku primenu. [51-55].

Ultrazvučna tehnologija faznog niza razvija se više od jedne decenije. Počevši od ranih 1990-ih, R/D Tech1 je implementirao koncepte standardizacije i transfera tehnologije. Ultrazvučna tehnologija faznog niza dostigla je komercijalno održivu prekretnicu do 1997. godine kada je prenosivim instrumentom sa faznim nizom, Tomoscan FOCUS, mogla upravljati na terenu jedna osoba, a podaci su se mogli prenositi i daljinski analizirati u realnom vremenu.

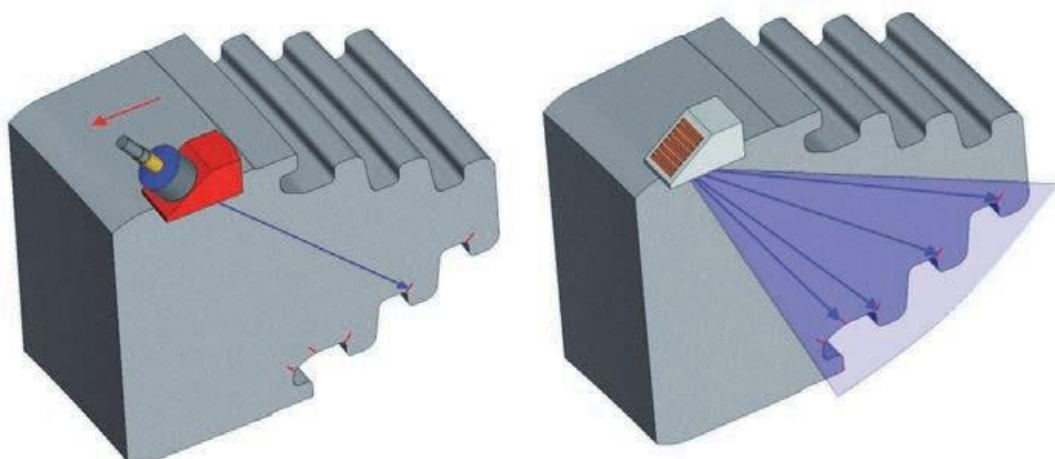
4.2.2 Osnovni principi tehnike faznog niza, eng. Phased Array PAUT

Ultrazvučni talasi su mehaničke vibracije izazvane u elastičnom medijumu (komadu za ispitivanje) piezokristalnom sondom pobuđenom električnim naponom. Tipične frekvencije ultrazvučnih talasa su u opsegu od 0,1 MHz do 50 MHz. Većina industrijskih aplikacija zahteva frekvencije između 0,5 MHz i 15 MHz. [56].

Konvencionalne ultrazvučne inspekcije koriste monokristalne sonde sa divergentnim snopovima. U svim slučajevima, ultrazvučno polje se širi duž akustične ose sa jednim prelomljenim uglom.

Obrazac pretraživanja (skeniranja), pod jednim uglom ima ograničenu mogućnost detekcije (otkrivanja) i dimenzionisanja indikacija defekata.

Problemi inspekcije postaju teži ako komponenta ima složenu geometriju i veliku debljinu i/ili nosač sonde ima ograničen pristup pretraživanju. Da bi se rešili zahtevi inspekcije, uvedena je višekristalna sonda faznog niza sa fokusiranim snopovima koji se aktiviraju namenskom komadom hardvera (slika 11).

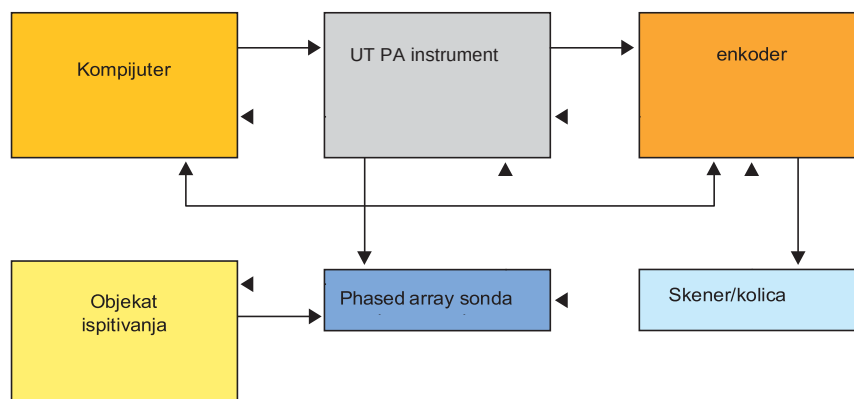


Slika 11 Primer primene ultrazvučne tehnologije faznih nizova na komponenti složene geometrije. Levo: monokristalna inspekcija pod jednim uglom koja zahteva pretraživanje iz više uglova i kretanje sonde; desno: sonda faznog niza koja može poslati fokusirani snop kroz odgovarajući region komponente bez pomeranja sonde

Pretpostavimo da je monoblok kristal isečen na mnogo identičnih elemenata, svaki sa korakom mnogo manjim od njegove dužine. Svaki mali kristal ili element može se smatrati linijskim izvorom cilindričnih talasa. Talasni frontovi novog akustičnog bloka će interferisati, stvarajući ukupni talasni front sa konstruktivnim i destruktivnim regionima interferencije.

Mali talasni frontovi mogu biti vremenski odloženi i sinhronizovani u fazi i amplitudi, na takav način da stvaraju snop. Ovaj talasni front je zasnovan na konstruktivnoj interferenciji i proizvodi ultrazvučni fokusirani snop sa mogućnošću upravljanja.

Glavne komponente potrebne za osnovni sistem za pretraživanje sa instrumentima sa faznim nizom prikazane su na slici 12.



Slika 12. Osnovne komponente sistema faznih nizova i njihova međusobna povezanost

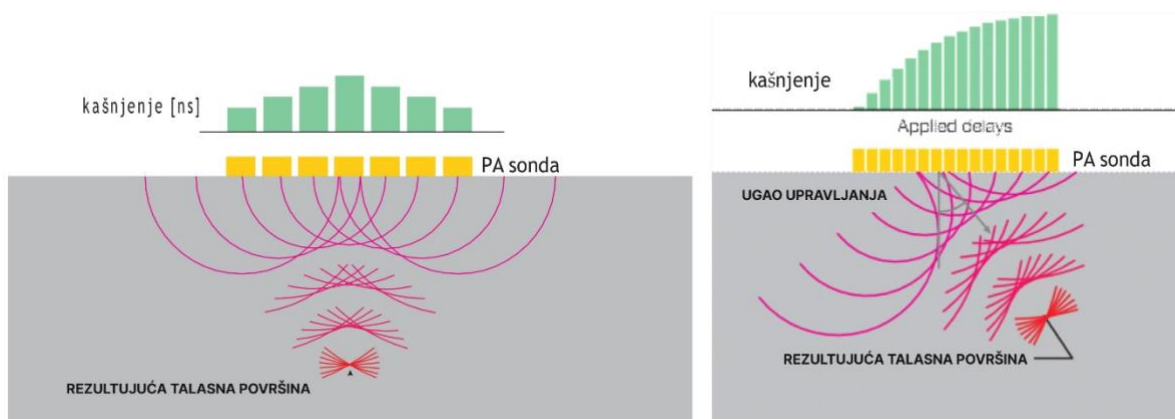
Glavna karakteristika ultrazvučne tehnologije faznih nizova je kompjuterski kontrolisana pobuda (amplituda i kašnjenje) pojedinačnih elemenata u višeelementnoj sondi. Pobuđivanje piezokompozitnih elemenata može da generiše snopove sa definisanim parametrima kao što su ugao, žižna udaljenost i veličina fokalne tačke putem softvera.

Da bi se generisao snop u fazi i sa konstruktivnom interferencijom, višestruki talasni frontovi moraju imati isti globalni dolazak vremena leta na tačku interferencije. Ovaj efekat se može postići samo ako se različiti aktivni elementi sonde pulsiraju u neznatno različitim i koordinisanim vremenima. Kao što je prikazano na slici 13., eho iz željene fokusne tačke pogađa različite elemente pretvarača sa izračunatim vremenskim razmakom. Eho signali primljeni na svakom elementu pretvarača se vremenski pomeraju pre nego što se zbroje. Dobijeni zbir je A-sken koji naglašava odziv iz željene fokusne tačke i prigušuje razne druge ehoe iz drugih tačaka u materijalu.

Na prijemnik signali stižu sa različitim vrednostima vremena preleta, zatim se vremenski pomeraju za svaki element, prema fokalnom zakonu prijema. Zatim se sabiraju svi signali iz pojedinačnih elemenata zajedno da formiraju jedan ultrazvučni impuls koji se šalje instrumentu za akviziciju.

Princip fokusiranja snopa za normalne i uglove upada ilustrovan je na slici 13.

Tokom prenosa, instrument za akviziciju šalje „okidač” signal instrumentu sa faznom rešetkom. Donji pretvara signal u visokonaponski impuls sa unapred programiranom širinom i vremenskim kašnjenjem definisanim u fokalnim zakonima. Svaki element prima samo jedan impuls. Višeelementni signali stvaraju snop sa određenim uglom i fokusom na određenu dubinu. Snop pogađa defekt i odbija se, što predstavlja princip rada ultrazvučnog testiranja.



Slika 13. Princip fokusiranja snopa za (a) normalne i (b) ugaone sonde

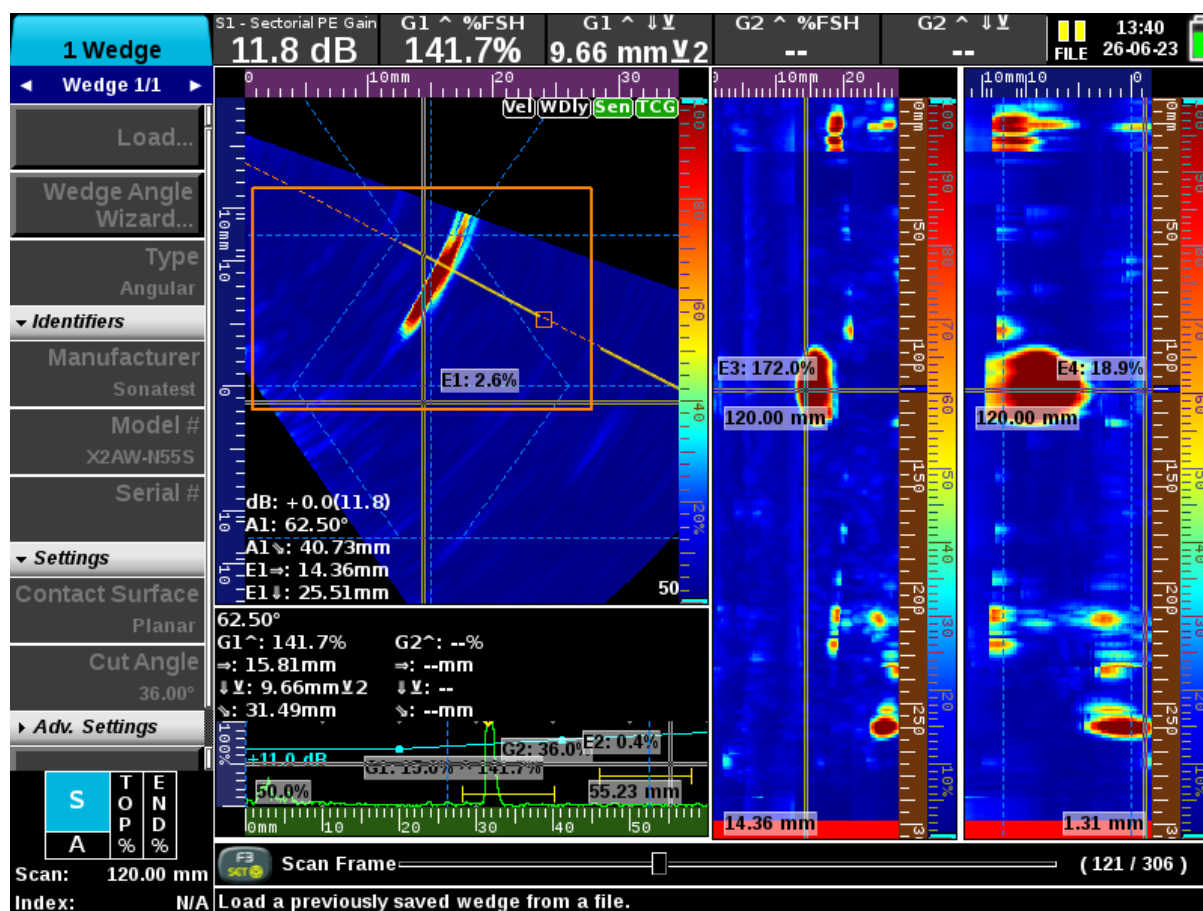
Vrednost kašnjenja za svaki element zavisi od aperture aktivnih elemenata sonde faznog niza (PA sonda), tipa talasa, prelomljenog ugla i dubine fokusa. Fazni nizovi ne menjaju fiziku ultrazvuka, oni su samo metod generisanja i primanja.

4.2.3 Šeme pretraživanja (skeniranja), PAUT

Postoje tri glavne šeme skeniranja sa kompjuterski kontrolisanim snopom UT talasa:

- Elektronsko pretraživanje/linearno pretraživanje (E-sken)
- Sektorsko pretraživanje/azimutno ili ugaono pretraživanje (S-sken)
- Dinamičko fokusiranje dubine, (Dynamic depth focusing, DDF)

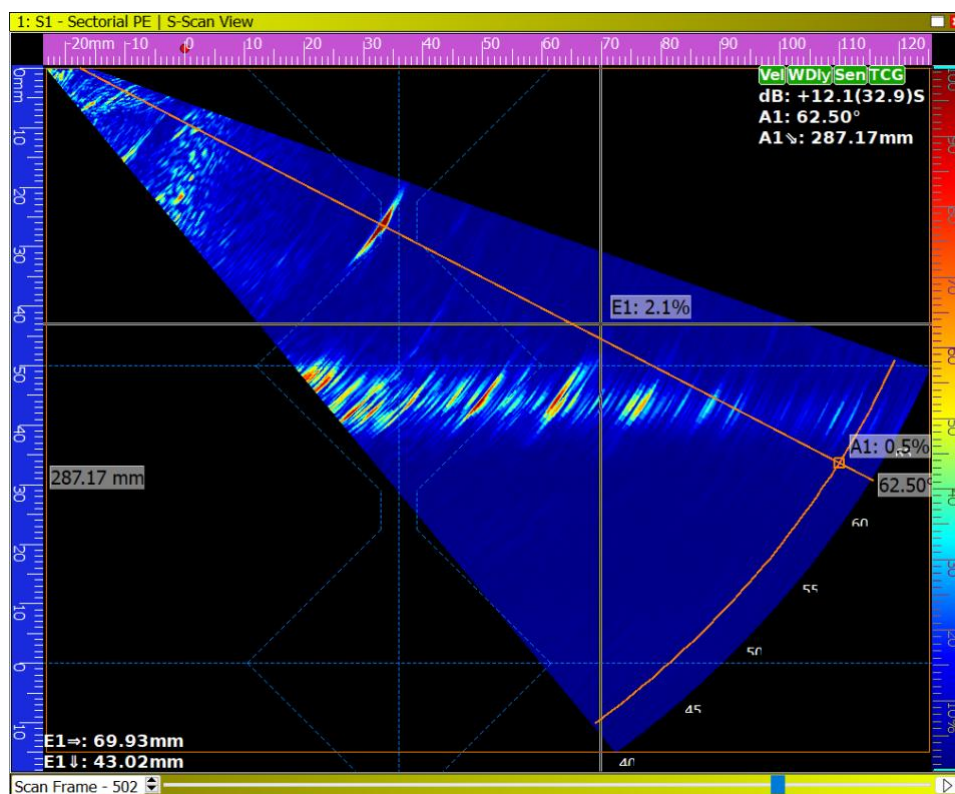
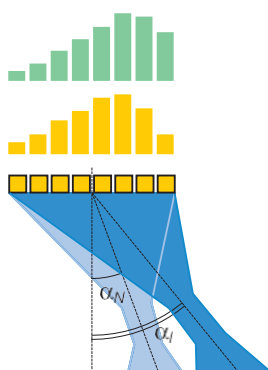
Sektorsko pretraživanje primenjeno u ovom radu: slika 14.



Slika 14: sektorski PAUT sken

Sektorsko pretraživanje (S-pretraživanje), se izvodi na način da se snop provlači kroz ugaoni opseg za određenu žižnu (fokusnu) dubinu, koristeći iste elemente. Mogu se dodati i drugi opsezi skretanja sa različitim fokusnim dubinama; ugaoni sektori mogu imati različite vrednosti zamaha (eng. sweep), videti sliku 15. Opseg početnog i krajnjeg ugla zavisi od dizajna sonde, povezanog klina i tipa talasa; opseg je diktiran zakonima fizike.

SEKTORSKI SKEN



Slika 15. gore: princip sektorskog skeniranja. Dole: primer ultrazvučnog prikaza podataka u sektorskom skeniranju sa korekcijom zapremine (S-scan), koji detektuje grupu prslina od korozije napona (eng. stress-corrosion cracks), opseg: 33° do 58° [56].

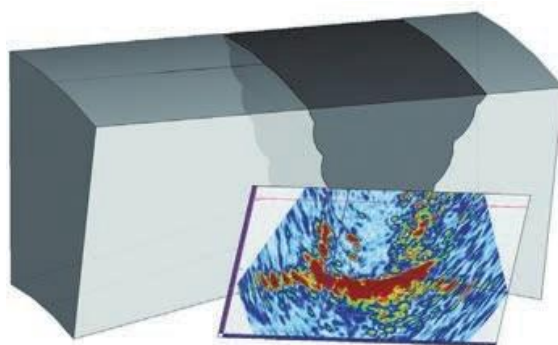
4.2.4 Osnovni principi skeniranja i kreiranja slike

Tokom mehaničkog skeniranja, podaci se prikupljaju na osnovu položaja enkodera. Podaci se prikazuju u različitim prikazima radi interpretacije.

Tipično, fazni nizovi koriste višestruke naslagane A-skenove (koji se nazivaju i ugaoni B-skenovi), sa različitim uglovima, vremenom preleta i vremenskim kašnjenjima na svakom malom piezokompozitnom kristalu (ili elementu), sonde faznog niza.

Informacije u realnom vremenu iz ukupnog broja A-skenova, koje se ispaljuju na određenoj poziciji sonde, prikazuju se u sektorskom skeniranju ili S-skenu.

Sektorsko pretraživanje pruža globalnu sliku i brze informacije o ispitivanom objektu i mogućim diskontinuitetima otkrivenim u ultrazvučnom opsegu pod svim uglovima i pozicijama (pogledati sliku 16., [56]).



Slika 16. Detekcija pukotina usled termičkog zamora u zoni kontra-provrta i ucrtavanje podataka u 3-D uzorak.

Ucrtavanje podataka u 2-D izgled uzorka, koji se naziva ispravljeni (eng. corrected) S-skenovi, ili S-skenovi tačne dubine (eng. true-depth S-scans), čini tumačenje i analizu ultrazvučnih rezultata jednostavnijim. S-skenovi nude sledeće prednosti:

- Prikaz slike tokom skeniranja
- Predstavljanje tačne dubine
- 2-D volumetrijska rekonstrukcija

4.2.5 Ograničenja i dalji razvoj ultrazvučne tehnologije faznog niza PAUT

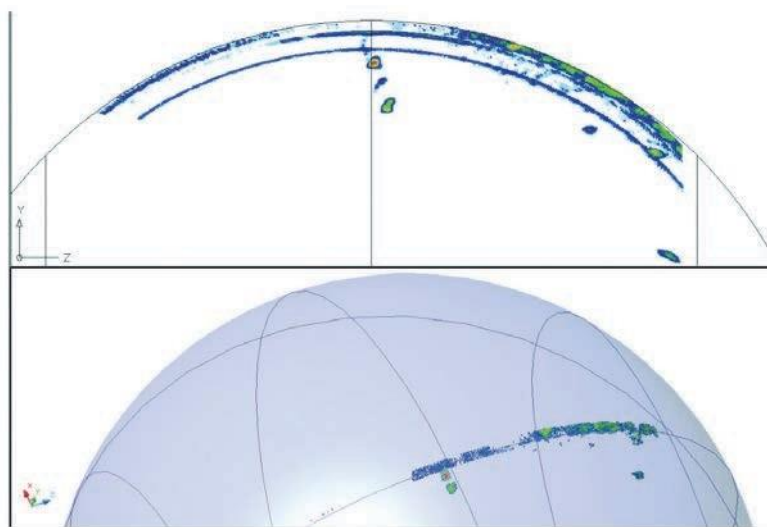
Ultrazvučna tehnologija faznog niza PAUT, pored brojnih prednosti pomenutih na početku ovog poglavlja, ima specifična pitanja navedena u tabeli 1, koja mogu ograničiti implementaciju PA tehnologije u velikoj razmeri [57].

Tabela 1. Ograničenja ultrazvučne tehnologije faznih nizova PA

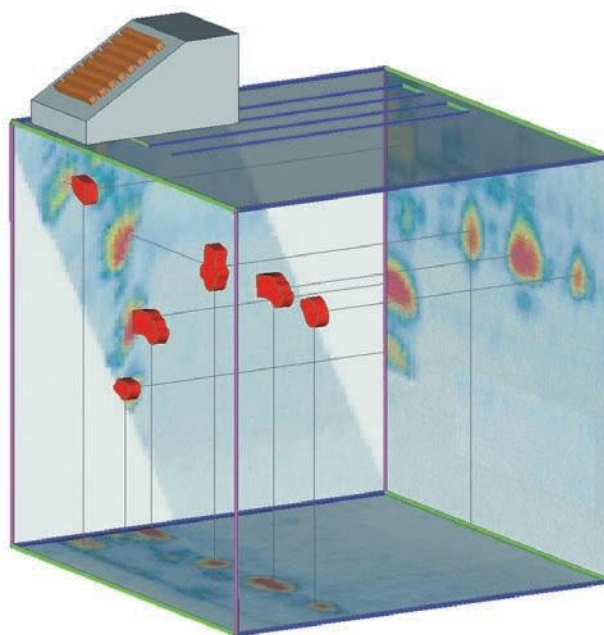
problem	detalji problema
Visoka cena opreme	Hardver je višestruko skuplji nego hardver konvencionalnog ultrazvučnog aparata. Rezervni delovi su takođe skuplji kao i godišnje kalibracije uređaja.
Visoka cena sonde	Sonde za PAUT su 12 do 20 puta skuplje nego sonde za konvencionalni UT aparat.
Zahteva visokokvalifikovanog operatera s naprednim znanjem	Multidisciplinarna tehnika sa programskim delom, mehaničko izvođenje skenova, ultrazvučna postavka sistema pre skeniranja samo su neki od zahteva za pravilno izvođenje pretraživanja i naknadno tumačenje rezultata. Pronalaženje adekvatne kvalifikovane radne snage je takođe veliki problem.
Vreme trajanja kalibracije i njena složenost	Različite kalibracije su zahtevane (za sondu, za sistem, za enkoder, za osetljivost). Svakih 4 sata prema standardu mora se izvršiti provera svih radnih parametara. Sve navedeno oduzima dosta vremena, zahteva spretnog i visokokvalifikovanog tehničara.

problem	detalji problema
dodatna sertifikacija UT tehničara	Za ispitivanje tehnikom PAUT potrebno je da tehničar ima položeno UT nivo II kao preduslov i godine iskustva. Nakon toga potrebno je završi dodatni, standardom uređeni, sertifikovani kurs za PAUT.
analiza podataka i sačinjavanje izveštaja je vremenski zahtevno	Redundantnost (suvišan broj), podataka o greškama čini interpretaciju/analizu dugotrajnom. Brojni signali zbog višestrukih A-skenova mogli bi da zahtevaju analizu i dispoziciju. Crtanje i akvizicija podataka je vremenski zahtevno.

Na sledećim ilustracijama mogu se videti primeri budućih mogućih komercijalnih prikaza rezulta PAUT snimanja [56;58]:



Slika 17a. Primer 3-D ultrazvučne vizuelizacije podataka bočno izbušene rupe na sferi. [56;58]



Slika 17b. Izometrijski prikaz Olympus kocke i veze između ultrazvučnih podataka, unutrašnjih defekata i uzorka skeniranja sondom [56]

4.3 UT Tehnika vremena preleta difrakcije ToFD (eng. *Time of Flight Defraction*)

4.3.1 Istorijski razvoj UT tehnike vremena preleta difrakcije (ToFD)

UT tehnika vremena preleta defrakcije, TOFD, je tehnika koja je razvijena za nuklearnu industriju Velike Britanije tokom 1970-ih godina. Razvoj je započet kao bi se obezbedio precizniji ultrazvučni metod za merenje visine planarnih indikacija defekata (npr. pukotine, nedostatak fuzije itd.), koje leže upravno u odnosu na površinu posude ili cevi. Tokom poslednje decenije opšte povećanje razumevanja ove tehnike dovelo je do njene upotrebe za inspekciju zavarenih spojeva u širem spektru industrija, posebno nafte, gasa i petrohemije. Dalje, upotreba TOFD-a za početno otkrivanje indikacija grešaka, kao i precizno određivanje veličine indikacija grešaka, postala je uobičajena zbog brzine prikupljanja podataka. Ovo je rezultiralo objavljivanjem britanskih i privremenih evropskih standarda za primenu TOFD tehnike [59].

U sistemima vremena preleta defrakcije ToFD, koristi se dve ultrazvučne sonde u paru, koje se nalaze na suprotnim stranama zavarenog spoja ili oblasti od interesa. Sonda predajnika (odašiljača), emituje ultrazvučni impuls koji prijemna sonda hvata na suprotnoj strani. U neoštećenom delu, signali koje prima sonda prijemnika potiču od dva talasa: jednog koji putuje duž površine (lateralni/bočni talas) i jednog koji se odbija od udaljenog zida (odbijanje od zadnjeg zida; eng. back wall, BW). Kada je prisutan diskontinuitet kao što je prslina, dolazi do difrakcije ultrazvučnog zvučnog talasa od gornjeg i donjeg vrha prsline. Koristeći izmereno vreme preleta impulsa, dubina vrhova prsline se može automatski izračunati primenom trigonometrije. Ova metoda je čak pouzdanija od tradicionalnih metoda radiografskog, pulsog - eho konvencionalnog/ručnog UT i automatizovanog UT testiranja zavarenih spojeva.

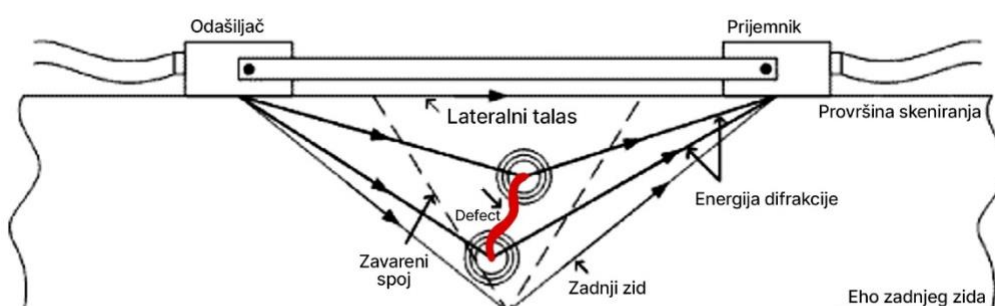
ToFD nudi veliku preciznost za merenje kritične veličine/dužine indikacije defekta kao što su prsline. Tačnost veća od ± 1 mm može se postići u širokom opsegu debljina materijala od kojih su konstruisana oprema pod pritiskom.

ToFD je prvobitno razvijen kao metod za tačno praćenje i dimenzionisanje indikacija defekata za komponente koje su u radu u nuklearnoj industriji. Savremeni ToFD je nezavisno potvrđena kao jedna od najefikasnijih tehnika za lociranje i dimenzionisanje diskontinuiteta (indikacije defekata), u feritnim zavarenim spojevima.

ToFD je tehnika čija su se istraživanju i razvoj odigrali na terenu u primeni prvenstveno za praćenje rasta defekata, inspekciju zavarenih spojeva u „cigareti” za skladištenje gasa (cilindričan gasni rezervoar), inspekciju mlaznica, ToFD primenu za nadoknađivanje nedostataka radiografskog ispitivanja (RT) za zavarene posude pod pritiskom i cevovode (npr. radiografija ne vidi defekt tipa - nalepljivanje), detekciju pukotina od termičkog zamora, inspekciju komponenti turbina i generatora, inspekcija u radu za detekciju indikacija grešaka i dimenzionisanje kao deo FFS (eng. fitness – for – service assessments), procene.

4.3.2 Ispitivanje prema UT tehnici vremena preleta defrakcije ToFD (eng. *Time of Flight diffraction*)

Većina ultrazvučnih tehnika se oslanja na primanje refleksije defekta, u obzir dolazi i refleksija od samo određenih delova defekta. ToFD tehnika detektuje pukotine koristeći signale koji su difraktiraju sa ekstremiteta, gornjeg i donjeg vrha defekta. Dve ugaone talasne sonde (obično između 2 i 10MHz frekvencije), se koriste u režimu odašiljanje-prijem, po jedna sonda sa svake strane zone od interesa (npr. po jedna sonda sa svake strane zavarenog spoja). Divergencija snopa je takva da se proverava većina debljine materijala, iako za deblje objekte ispitivanja može biti potrebno više od jednog odvajanja sonde. Kada zvuk udari u vrh prsline, ovo deluje kao sekundarni odašiljač (emiter), koji rasipa zvuk u svim pravcima (a neki i u pravcu prijemne sonde), sl.18. [59].



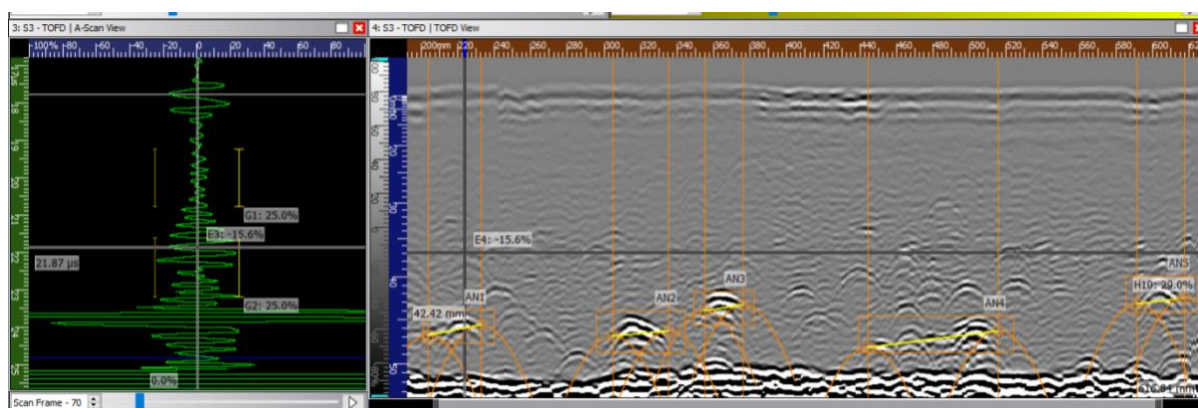
Slika 18 Osnovna konfiguracija ToFD postavke sistema skeniranja sa dve sonde

Bočni talas koji putuje istom brzinom kao i talasi kompresije (longitudinalni talas), putuje direktno od predajnika do prijemnika. Vremenska razlika između lateralnog (bočnog), talasa i difraktovanog signala od greške, daje meru njegove udaljenosti od skenirane površine. Ako je defekt dovoljno velik, biće moguće da se primi i difraktovani signal sa donjeg vrha defekta (signal sa dna defekta), koji će nam omogućiti merenje visine defekta.

4.3.3 ToFD tumačenje signala

Zbog niske amplitude difraktovanih signala, ToFD se obično izvodi pomoću pretpojačala i hardvera dizajniranog da poboljša performanse signal-šum. Kako sonde skeniraju duž metal šava, A-Scan signali se digitalizuju.

Signali su prikazani kao slika u „sivoj-skali” sa defektima kao naizmeničnim belim i crnim resama, sl.19. Difraktirani signali sa ekstremiteta pojavljuju se kao signali koji dolaze u različito vreme na prijemnik. Izvođenjem geometrijskih proračuna može se dobiti procena dimenzije defekta kroz debljinu.



Slika 19: Digitalni ToFD snimak, , Kragujevac

ToFD takođe može da koristi sintetičku aperturu (otvor), za fokusiranje i/ili softver za modeliranje snopa kako bi sveo na minimum efekte divergencije talasa. Ovo može pružiti preciznije informacije o lokaciji i veličini defekta.

4.3.4 Ograničenja i dalji razvoj UT tehnologije vremena preleta defrakcije, ToFD

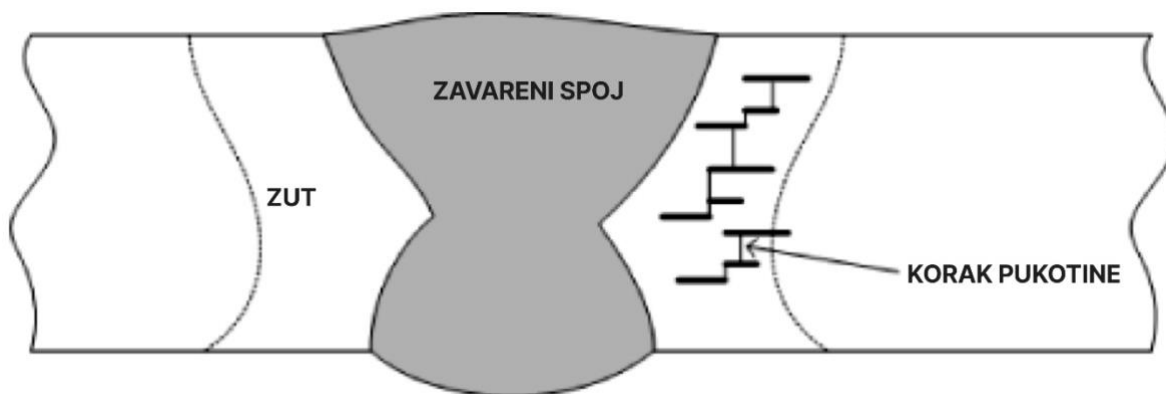
Inženjeri treba da budu svesni da tehnika postaje manje pouzdana kada:

- Materijal sadrži rasute uključke (npr. inkluzije u čelicima);
- Postoji visoka gustina defekata zbog npr. vodoničnih oštećenja;
- Ispitivanje krupnozrnih materijala (npr. ispitivanje zavarenih spojeva od austenitnog nerđajućeg čelika).

Detekcija malih nedostataka u blizini površine skeniranja može biti otežana zbog prisustva odziva lateralnog (bočnog), talasa koji često zauzima nekoliko milimetara ose dubine na slikama. ToFD je ograničen tamo gde su vremenske razlike signala male tako da se različiti signali ne mogu razrešiti u vremenu, npr. za male defekte blizu zadnjeg zida.

Koren sučelnog V šava cevi ima specifične poteškoće za UT inspekciju uopšte, zbog činjenice da sama geometrija korena može biti izvor ultrazvučnih signala. Druga poteškoća se javlja kada postoje sučeono zavareni spojevi visokog i niskog nivoa (zbog varijacije debljine i/ili neusklađenosti). To može značiti da su mali defekti skriveni u ehoima uglova i postoji potencijal za lažne indikacije defekta.

Zbog poteškoća u tumačenju slike, takođe treba očekivati da TOFD pretraživanje možda neće moći da pouzdano dimenzioniše SOHIC (posebno sadržane prsline, tokom najranijih faza razvoja prsline), sl.20. SOHIC se obično primećuje u zavarenim spojevima u osnovnom metalu u blizini zone uticaja toplote (ZUT), orijentisane u pravcu kroz debljinu. SOHIC opisuje niz prsline, poređanih upravno na zaostali napon zavarivanja, koje su formirane spajanjem malih pukotina izazvanim vodonikom u čeliku. Najgori slučaj SOHIC-a bi bile prsline povezane (stepeno) kroz zid, upravne na jedno od glavnih naprezanja membrane od, na primer, opterećenja pod pritiskom.



Slika 20: Šema SOHIC oštećenja na zavarenom spoju, koji može a ne mora biti spojen

Dalje, ToFD se u velikoj meri oslanja na ispravnu interpretaciju slika podataka, što ponekad može biti teško. U slučaju inspekcije u radu radi otkrivanja SOHIC-a, indikacije brojnih uključaka (inkluzija), „bezopasnog čelika” (tipično za čelik lošeg kvaliteta podložnog vlažnom H₂S oštećenju), mogu izuzetno otežati identifikaciju ozbiljnijih nedostataka

(povezanih SOHIC prslina). Inženjeri inspekcije treba da budu svesni da to može dovesti do konzervativnih „lažnih poziva” i nepotrebnih popravki.

Potreban je visok stepen veštine i iskustva operatera da bi se pravilno tumačili i izveštavali nalazi ToFD inspekcije.

4.4 Prednosti PA i TOFD tehnika ispitivanja u odnosu na konvencionalu Puls-echo tehniku

Treba jasno imati u vidu da kod konvencionalnog UT ispitivanja prilikom dimenzionisanja i evaluacije indikacije defekta, dimenzija indikacije uveliko zavisi i od samog operatera (pritisak sonde, zaokretanje sonde). Samim time dolazi do grešenja u dimenzionisanju što za posledicu ima manju tačnost ponovljivosti ispitivanja (naknadni pregledi u eksploataciji, razlike u povećanju greške kroz radno vremensko razdoblje – rezultati izazivaju zbunjenost pri tumačenju i praćenju). Takođe je veća mogućnost lažne interpretacije kao i pogrešna karakterizacija indikacije što je ilustrovano u primeru koji sledi.

4.4.1 Primer tačnije karakterizacije indikacije greške primenom PAUT i ToFD tehnike

BR./№ 910/01-UT/23

Fotografije broj 2	Plan zavarijanja	Završni spoj
1	Broj	
50X	Oznaka	
AVG	Metoda poravnjavanja	
WB70-2	Oznaka ispitne sonde	
O_1	Referentna tačka (0)	
108	Zvučni put [mm]	
4360	x [mm]	Podaci o oštećenju i radijaciji
15	y [mm]	Udaljenost od od ref. tačke
25-50	spoljašnje strane šava [mm]	
-	unutrašnje strane šava [mm]	
x	Uzdužna	
-	Poprečna	
+4,9	Prekoračenje granice registracije [dB]	Naziv
Ravanski defekt 10x25mm	Dubina ili površina registrirane indikacije [mm, mm ²]	
	Prilagačivo sa dovoljnim defektima	Ocjena
x	Neprihvatljivo	
Indikacija broj 1.3	Komentar	
Fotografije broj 11-14		
Skice 1 i 2		

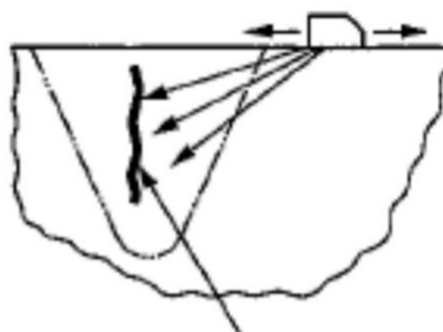
Tabela broj 1



Fotografija broj 11-Indikacija 1.3-Položaj indikacije

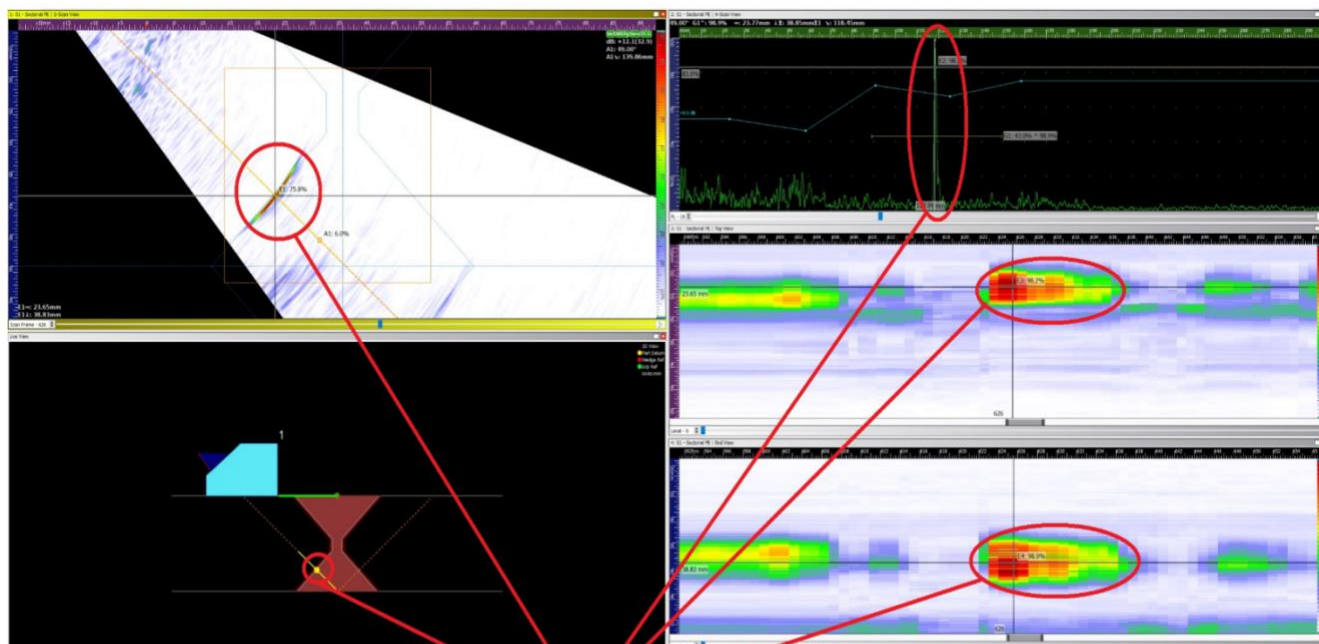


Fotografija broj 13-Indikacija 1.3-Rezultat ispitivanja-Zona maksimalnog ehoa



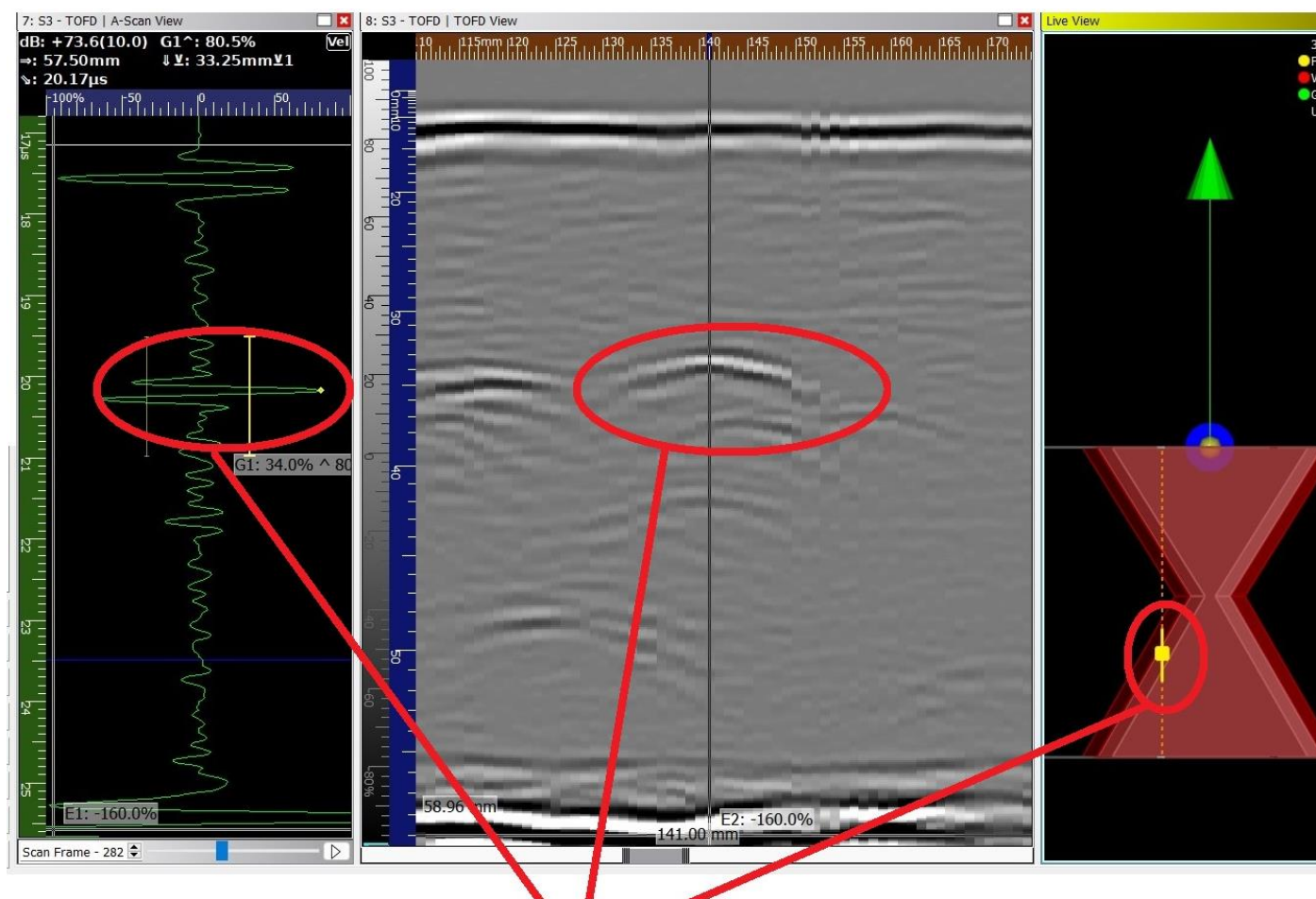
Skica broj 1-Prostiranje reflektora u pravcu kroz
debljinu zavarenog spoja

Slika 21: Rezultati dobiveni konvencionalnim UT ispitivanjem (UT Pulse-Echo Technique) za indikacija br 1.3 (SP 970)



Indikacija broj 1.3

Slika 22: Rezultati dobijeni tehnikom faznog niza PAUT (eng. Phased Array Ultrasonic Technique) za indikacija br 1.3 (SP 970)



Indikacija broj 1.3

Slika 23: Rezultati dobijeni tehnikom vremena preleta defrakcije TOFD (eng. Ultrasonic Time Of Flight Diffraction Technique) za indikaciju br 1.3 (SP 970)

Indikacija broj 1.3 pogrešno je karakterizovana konvencionalnom metodom-orijentacija.

PAUT tehnikom tačnije se može definisati orijentacija indikacije i signali ehoa koji su jasno definisani kako bi se mogli uporediti prema standardu SRPS EN ISO 23279 (Slika 24).

English Version

Non-destructive testing of welds - Ultrasonic testing - Characterization of indications in welds (ISO 23279:2010)

Contrôle non destructif des assemblages soudés - Contrôle
par ultrasons - Caractérisation des indications dans les
assemblages soudés (ISO 23279:2010)

Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen -
Ultraschallprüfung - Charakterisierung von Anzeigen in
Schweißnähten (ISO 23279:2010)

C.3 Pattern 3

There are two variants of an extended rough reflector response, depending upon the angle of incidence of the probe beam on the reflector.

One variant, at near normal incidence, is shown in Figure C.3. At any probe position, the A-scan shows a single but ragged echo. As the probe is moved, this may undergo large (greater than ± 6 dB) random fluctuations in amplitude. The fluctuations are caused by reflection from different facets of the reflector, and by random interference of waves scattered from groups of facets.

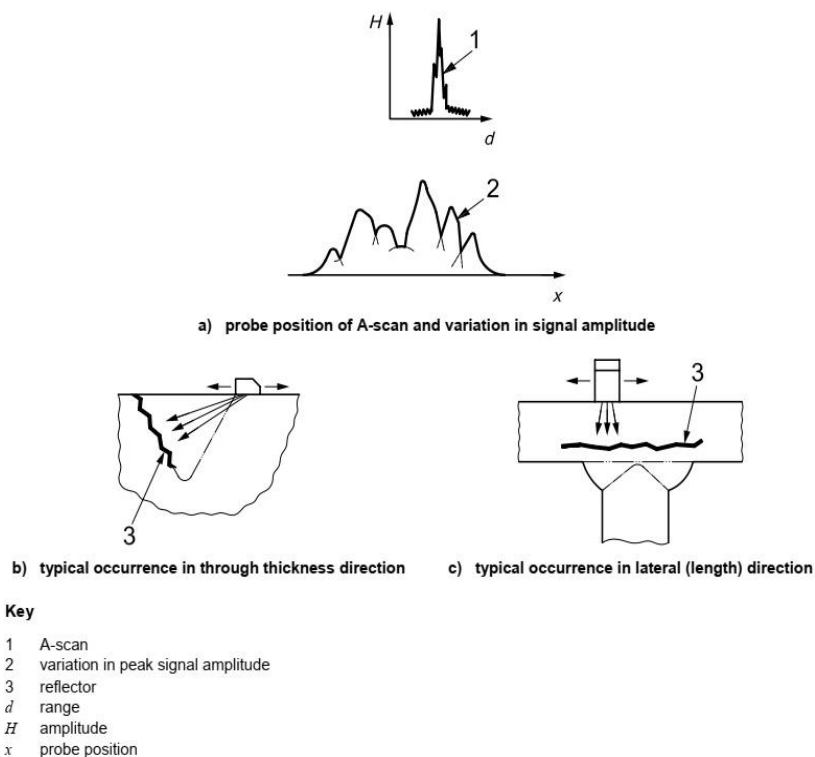
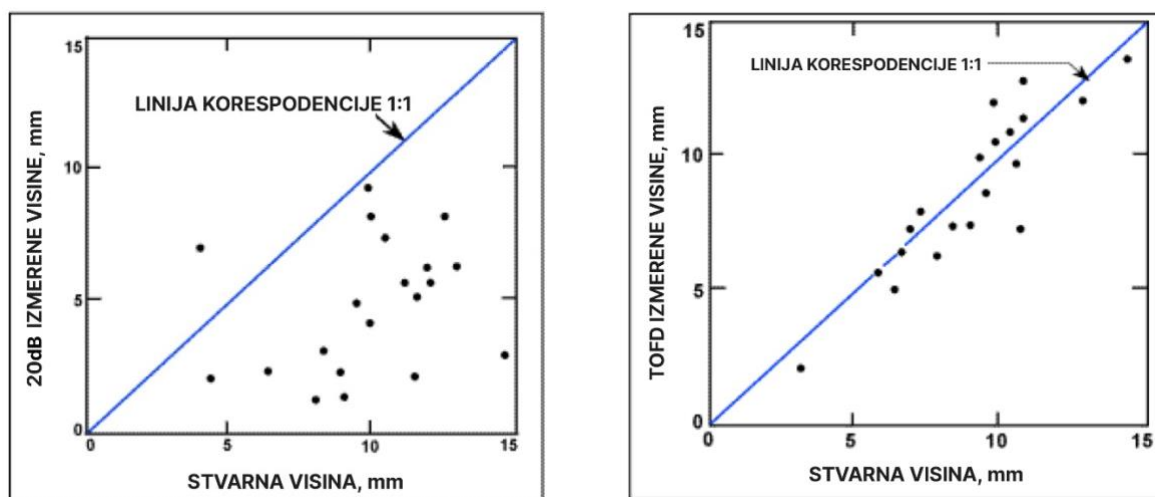


Figure C.3 — Pattern 3 ultrasonic response

Prilikom same evaluacije promene kriterijuma, kao i pri naknadnim ispitivanjima u eksploataciji kod naprednih metoda olakšana je komparacija dobijenih kao i primena trenutno zahtevanog kriterijuma prihvatljivosti. Pošto za sva ispitivanja kao i naknadni monitoring postoje akvizicijski podaci koji se čuvaju, lako ih je moguće ponovno interpretirati tj. evaluirati i usporediti sa novo dobijenim podacima. Ova vrsta poređenja nam daje egzaktnije podatke u smislu propagacije ili rezignacije praćenih dozvoljenih defekata i samim tim olakšava eventualne proračune integriteta konstrukcije.

Kada pričamo konkretno o dimenzionisanju visine indikacije greške, u prošlosti, sprovedena konvencionalna UT ispitivanja otkrila su da se tipične greške pri merenju visine, koristeći tehniku decibelskog pada, kreću od -1,0 mm do 3mm (slika 25).

Tehnika dimenzionisanja ToFD obezbeđuje bolju korelaciju između izmerenih i stvarnih visina prslina od tehnike decibelskog pada, slika 25. uporedna ispitivanja konvencionalnom i ToFD UT tehnikom.



Slika 25: Levo:Konvencionalna UT tehnika; Desno: ToFD tehnika

Konvencionalna UT tehnika umanjuje stvarnu veličinu defekta u poređenja sa preciznijim rezultatima koje daje ToFD tehnika.

ToFD tehnika je veoma korisna za ispitivanje zavarenih spojeva i druge inspekcije. U poslednjih nekoliko godina, upotreba ToFD-a brzo je rasla za mnoge primene, kao što su inspekcije cevovoda i posuda pod pritiskom.

ToFD je veoma moćna tehnika i omogućava precizno određivanje veličine defekata. Određivanje veličine se zasniva na vremenu dolaska „defekata”, a ne na amplitudi; vreme dolaska signala može se vrlo precizno izmeriti.

TOFD takođe nudi dobru verovatnoću detekcije (eng. probability of detection – POD), defekata srednjeg zida, uključujući i nepogodno orijentisane defekte. ToFD pokrivenost može biti oko 90% debljine zida. Oko 10% se gubi u dve mrtve zone (GZ i DD), ali stvarna cifra zavisi od ToFD konfiguracije, frekvencije i prigušenja. Ove dve mrtve zone se nalaze u blizini bočnog talasa i refleksije zadnjeg zida.

Zaključno, ToFD i PA su komplementarne tehnike UT ispitivanja; slaba tačka ToFDA je otkrivanje površinskih defekata (defekata blizu površine), dok to predstavlja jaču stranu PA tehnike. Široko rasprostranjena preporuka je da se ove dve napredne tehnike ispitivanja koirste istovremeno zarad dobijanja što preciznijih informacija o indikaciji defekta.

4.4.2 Verovatnoća detekcije i pouzdanost dobijenih rezultata razčičitim IBR metodama

Kod primene naprednih UT tehnika ispitivanja (PAUT i ToFD), dobijeni rezultati nakon analize podataka su egzaktniji u smislu kvalitetnijeg dimenzionisanja indikacije defekta. Indikacije defekta se lakše mogu detektovati te je mogućnost lažne interpretacije smanjena u odnosu na konvencionalnu UT tehniku ispitivanja. Prilikom evaluacije indikacija, na raspolaganju su nam različiti programi za obradu podataka koji nam daju mogućnost preciznijeg (tačnijeg), dimenzionisanja indikacije korišćenjem naprednih programskih alata koji predstavljaju prateću komponentu savremenih UT uređaja. U praksi se pokazalo da je ToFD daleko najpreciznija tehnika za ocenu veličine indikacije defekta.

Evaluacijom ukupne delotvornosti različitih IBR tehnika na strukturalnim komponentama, pod nadzorom JRC-a (eng. Joint Research Center), pokazala se sposobnost ToFD tehnike da obavi većinu neophodnog posla prilikom skeniranja i da u kombinaciji sa drugim tehnikama potigne visoke performanse.

Istraživanja su pokazala da ToFD tehnika ima najveću verovatnoću detekcije indikacija grešaka (eng. POD) i najveću pouzdanost kao što je prikazano u tabeli 2. [13].

Tabela 2 - prореđenje verovatnoća detekcije, lažni poziv i pouzdanosti rezultata za različite metode IBR ispitivanja

UT TEHNIKA	VEROVATNOĆA DETEKCIJE	LAŽNI POZIV	POUZDANOST
TOFD	82.4%	11.1%	73.3%
PAUT	83.6%	13.7%	72.2%
RADIOGRAFIJA (X- RAY)	66.2%	15.5%	55.9%
RADIOGRAFIJA (GAMA- RAY)	60.1%	10.8%	53.6%
KONVENCIONALNI UT	52.3%	22.7%	40.4%

Pomenute tehnike UT naprednih ispitivanja daju najbolje rezultate kada se koriste zajedno tokom ispitivanja. Savemena oprema, pored mogućnosti korišćenja više sonde istovremeno (eng. „in one go”), nudi i brojne skenere sa enkoderima koji u isto vreme mogu „nositi” više sonde za pretraživanje različitim tehnikama (PAUT i ToFD). U toku jednog pretraživanja, savremeni aparati mogu istovremeno davati rezultate prema različitim tehnikama pretraživanja. Ove funkcije nam nude brže i jednostavnije podešavanje, lakšu interpretaciju rezultata i preciznije određivanje veličine indkacije defekta što dovodi do ukupnog povećanja produktivnosti.

5. Rezultati primenjenih metoda ultrazvučnih ispitivanja posuda pod pritiskom za komprimovani vazduh u reverzibilnoj hidroelektrani Bajina Bašta (RHEBB), Srbija i upoređivanje sa kriterijumima prihvatljivosti

Dat je prikaz ključnih rezultata ultrazvučnog ispitivanja zavarenih spojeva korišćenjem konvencionalne tehnike i naprednih tehnika PA i TOFD.

5.1 Ultrazvučna ispitivanja sudova pod pritiskom u RHE BB - uopšteno

Za proizvodnju potrebnog vazduha pod pritiskom u reverzibilnoj hidroelektrani na koti 220 m.n.v. u Mašinskoj zgradi je urađena kompresorska stanica dimenzija $14 \times 13 \times 5,5$ m. U njoj su smeštena četiri kompresora snage 130 kW koji proizvode vazduh pritiska 80 bara, koji se skladišti u dva rezervoara zapremine po 13m³ fabričkih oznaka 970 i 971 [60]. Integritet sudova pod pritiskom u RHE BB je analiziran od kada su radiografijom 1998. godine otkriveni neprihvatljivi zapreminski defekti, a kasnije potvrđeni konvencionalnim ultrazvučnim ispitivanjima, prema EN ISO 11666 2018. Posude su pregledane 100% ultrazvučnim ispitivanjem na dva vertikalna zavarena spoja i tri kružna zavarena spoja, pomoću USM 36KSL Kraut-kramer uređaja. Potrebno je napomenuti da su pregledane posude pod pritiskom izrađene od materijala NIOVAL 50 (mikrolegirani čelik), sa istorijom problema pucanja u zavarenim spojevima. Ispitano je ukupno 9 posuda pod pritiskom za komprimovani vazduh u reverzibilnoj hidroelektrani (RHE) Bajina Bašta, Srbija, sa oznakom 970-978; U međuvremenu, posle 2019. godine, vršena su redovna konvencionalna UT ispitivanja koja su ukazala, promene nekoliko dimenzija pronađenih indikacija defekata.

Nakon završnog konvencionalnog UT ispitivanja svih sudova, za detaljnija ispitivanja naprednim metoda UT ispitivanja su izabrane dve posude, SP 970 – sa defektom 5.6 i SP 971 - sa defektom 1.1. Pomenuti SP su ponovo testirani metodom konvencionalnog UT kao i sa naprednim metodama ultrazvučnog testiranja PA i TOFD (slika 26 a, b). Rezultati slede.



Slika 26(a). Ispitvanje SP 970 naprednim metoda PAUT i ToFD; Ispitivači: Filip Pavlović, Miloš Pantelić (IMW Institut – Kragujevac), Mirjana – F. Opačić (Inovacioni Centar Mašinski Fakultet UB); uređaj: Sonatest Veo +



Slika 26(b). Ispitivanje SP 970 naprednim metoda PAUT i ToFD; Ispitivači: Milan Kozlovački (Zavod za zavarivanje), Stefan Kutlača (Trokut Test), Mirjana – F. Opačić (Innovacion Centar Mašinski Fakultete UB); uređaj: Sonatest Veo +

5.2 Ulazni parametri ispitivanja i kriterijumi ocenjivanja za konvencionalno ultrazvučno ispitivanje

Pozicija ispitivanja : zavareni spojevi	Materijal: Nioval 50	Termička obrada : DA	Stanje površine: zaštićena AKZ
Obim ispitivanja: Konvencionalno UT ispitivanje vertikalnog zavarenog spoja (podužnog) i kružnog zavarenog spoja (slika 27 i 28)			
Ispitivanje prema:	Kriterijum prihvatljivosti: SRPS EN ISO 11666:2012	Uređaj za ispitivanje: USM 36XL, Krautkramer	Kontaktno sredstvo: tapetol
Sonda: WB 2MHz 70°	Merno područje: 250mm	Metod ocenjivanja: AVG	Nivo registracije: Ø3
Kalibracioni blok: K1	Osnovno pojačanje: 28.1 dB	Dodatno pojačanje: 25.5 dB	



Slika 27: posuda 970/indikacija 5.6



Slika 28: posuda 971/indikacija 1.1

a) Tabela 3: rezultati konvencionalnih ispitivanja za SP 970 na defektu oznake 5.6

Zavareni spoj	
Plan zavarivanja:	Broj
	5

Položaj i orijentacija indikacije						
Referentna tačka (0)	Udaljenost od referentne tačke		Dubina merena od z (mm)		Poprečna	Uzdužna
	x (mm)	y (mm)	spoljašnje strane šava	unutrašnje strane šava		
O5	1070	0	18-38	-	-	x

Nalaz	Ocena		Komentar
Prekoračenje granice registracije (dB)	Prihvatljivo sa dozvoljenim defektima	Neprihvatljivo	Indikacija broj 5.6
+12.3	-	X	

b) Tabela 4: rezultati konvencionalnih ispitivanja za SP 971 na defektu oznake 1.1

Zavareni spoj	
Plan zavarivanja:	Broj
Slika	1

Položaj i orijentacija indikacije						
Referentna tačka (0)	Udaljenost od referentne tačke		Dubina merena od z (mm)		Poprečna	Uzdužna
	x (mm)	y (mm)	spoljašnje strane šava	unutrašnje strane šava		
O1	1220	20	18-50	-	-	x

Nalaz	Ocena		Komentar
Prekoračenje granice registracije (dB)	Prihvatljivo sa dozvoljenim defektima	Neprihvatljivo	
+12.3	-	X	Indikacija broj 1.1

5.3 Ulazni parametri ispitivanja i kriterijumi ocenjivanja za PAUT napredno ultrazvučno ispitivanje

Pozicija ispitivanja : zavareni spojevi	Materijal: Nioval 50	Termička obrada : DA	Stanje površine: zaštićena AKZ
Obim ispitivanja: PAUT ispitavnje vertikalnog zavarenog spoja (podužnog) i kružnog zavarenog spoja (slika 27 i 28)			
Ispitivanje prema: SRPS EN ISO 13588	Kriterijum prihvatljivosti: SRPS EN ISO 19 285	Uređaj za ispitivanje: Veo+, Sonatest	Kontaktno sredstvo: UT gel
Sonda: X2AW-16E5M	Merno područje: 250mm	Metod ocenjivanja: TCG	Nivo registracije: Ø3
Kalibracioni blok: PACS	Osnovno pojačanje: 7.4 dB	Dodatno pojačanje: 24.6 dB	Skener/tip: Phoenix/MagMan

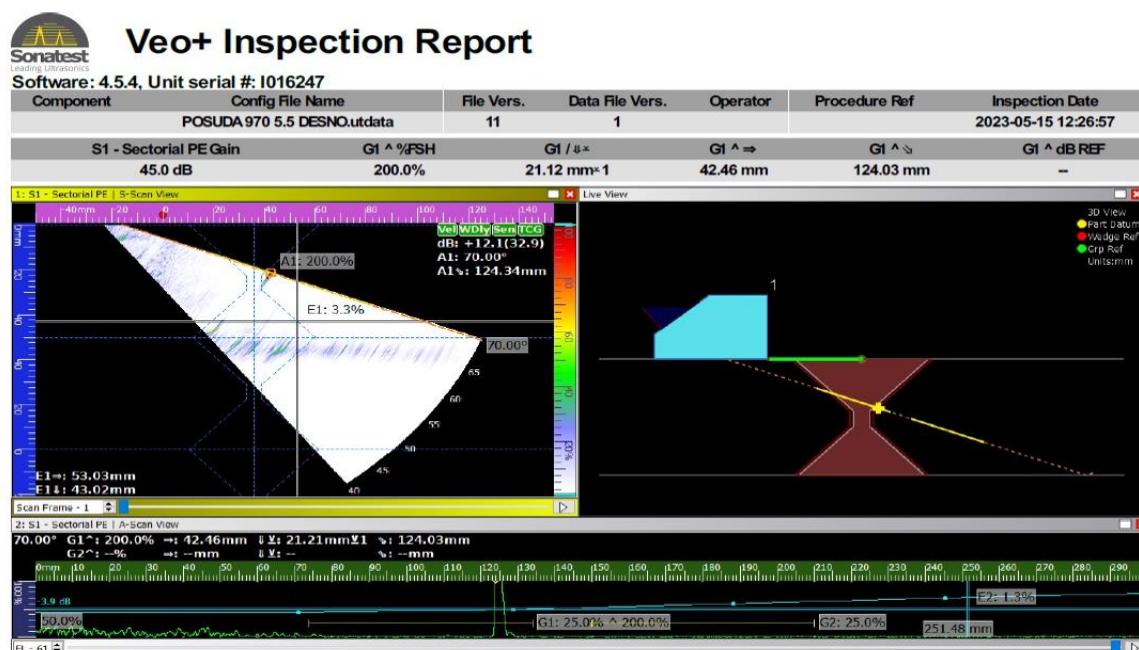
c) Tabela 5: rezultati PA ispitivanja za SP 970 sa defektom 5.6

Ispitano	Materijal	Dimenzije (mm)	Nalaz br.	Parametri nalaza					Zadovoljava	Nezadovoljava	Napomena
				Visina ehoa	Pozicija	Dužina	Dubina	Položaj			
				dB	mm	mm	mm	*)			
*2. Z.S. 5.6(970)	/	/	/	-4,1	930	25	21-49	SŽ	/	X	/

*) OM-osnovni materijal/ base material; ZUT-zona uticaja toplote/ HAZ: K-koren zavora/ Root; MŠ-metal šava/ weld metal ;

SŽ-stranica žljeba/ side of the groove

Tabela 6. Nalazi sektorske pretrage PAUT za SP 970 sa defektom 5.6



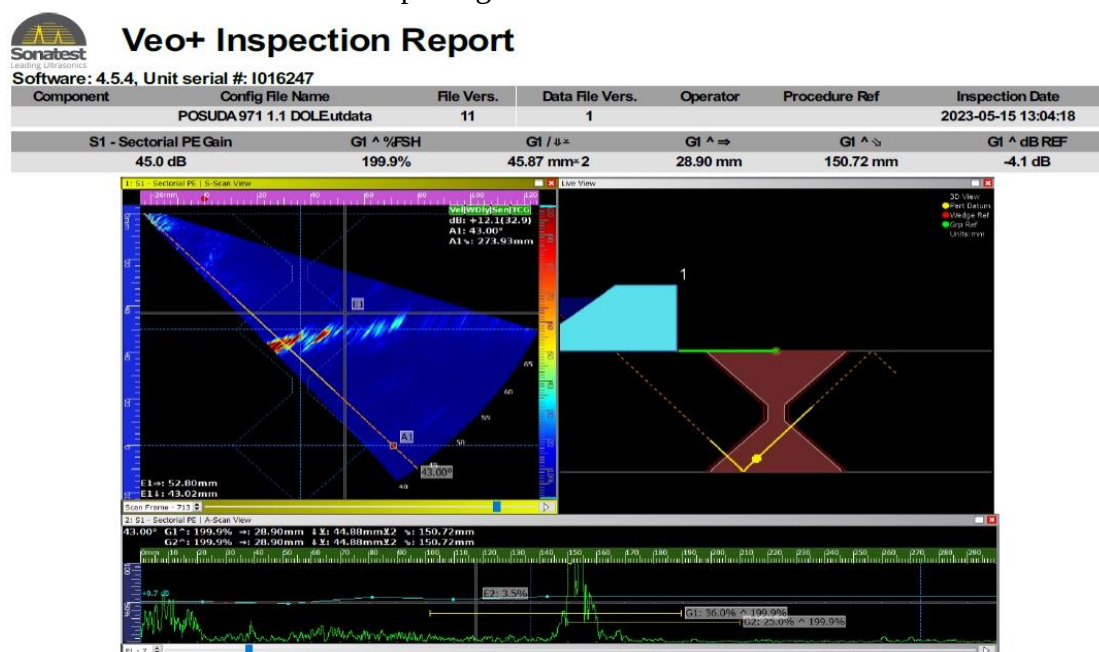
d) Tabela 7: rezultati PA ispitivanja za SP 971 sa defektom 1.1

Ispitano	Materijal	Dimenzije (mm)	Nalaz br.	Parametri nalaza					Zadovoljava	Nezadovoljava	Napomena
				Visina ehoa	Pozicija	Dužina	Dubina	Položaj			
				dB	mm	mm	mm	*)			
*1. Z.S. 1.1(971)	/	/	/	+1,3	1150	195	20-50	MŠ	/	X	/

*) OM-osnovni materijal/ base material; ZUT-zona uticaja toplote/ HAZ: K-koren zavora/ Root; MŠ-metal šava/ weld metal ;

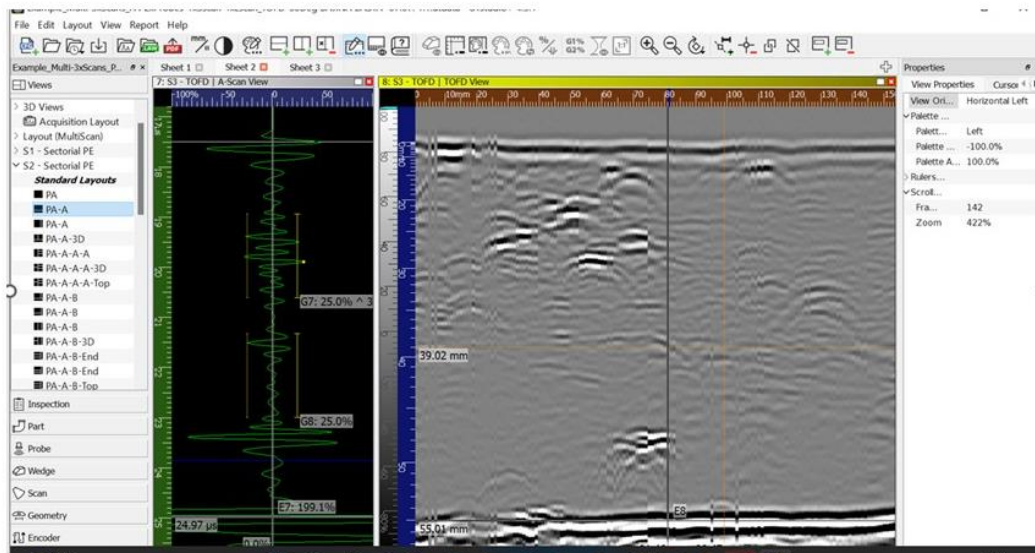
SŽ-stranica žljeba/ side of the groove

Tabela 8. Nalazi sektorske pretrage PAUT za SP 971 sa defektom 1.1



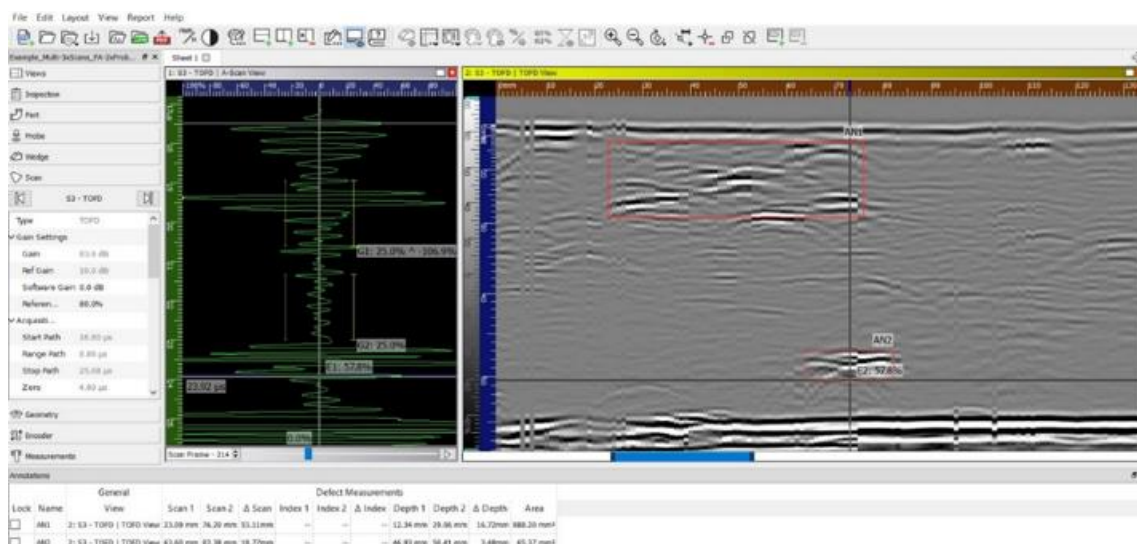
5.4 Ulazni parametri ispitivanja i kriterijumi ocenjivanja za ToFD napredno ultrazvučno ispitivanje

g) Tabela 9. rezultati TOFD ispitivanja za SP 970 sa defektom 5.6



h) Tabela 10. rezultati TOFD ispitivanja za SP 971 sa defektom 1.1

General			Defect Measurements									
Lock	Name	View	Scan 1	Scan 2	Δ Scan	Index 1	Index 2	Δ Index	Depth 1	Depth 2	Δ Depth	Area
☐	AN1	2: S3 - TOFD TOFD View	23.09 mm	76.20 mm	53.11mm	--	--	--	12.34 mm	29.06 mm	16.72mm	888.20 mm ²
☐	AN2	2: S3 - TOFD TOFD View	63.60 mm	82.38 mm	18.77mm	--	--	--	46.93 mm	50.41 mm	3.48mm	65.37 mm ²



6. Formiranje merodavnih numeričkih proračunskih modela

Izrađeni su numerički modeli zavarenih spojeva sa dimenzijama grešaka izmerenih metodama bez razaranja iz prethodnog poglavlja (kao ulazni podaci). Za modelovanje indikacija nesavršenosti unutar metal šava na sudu SP 970, defekt 5.6 u RHE BB, koristimo softverski paket Abakus (eng. Abaqus, softver koji koristi osnovne principe metode konačnih elemenata). Geometrijski podaci dobijeni UT ispitivanjima i mehanički podaci dobijeni u [61], bili su osnova za numeričke simulacije rasta prsline primenom zakona linearno-elastične mehanike loma.

Cilj ove numerički simulacije jeste da se pokaže kompletno naponsko stanje u delu gde je indikacija greške (prsline) najveća, a nalazi se u vertikalnom zaverenom spoju SP 970 i može imati najveći uticaj na integritet zavarenog spoja odnosno integritet konstrukcije. U numeričkom modelu uzet je u razmatranje zavareni spoj pod rednim bojem 5, koji je rađen postupkom elektro-lučnog zavarivanja pod praškom (EPP).

Cilj je da se dobije numerički model koji će pokazati detaljnije ponašaje predmetne prsline unutar zavarenog spoja i koji će odgovarati realnom ponašanju. Mehaničke karakteristike koje su korišćene za numerički proračun za osnovni materijal (OM) i metal šava (MŠ) nalaze se u tabeli 9. Numerički model koji će biti ovde prikazan je postepeno razvijan, kako bi se dobila verzija koja dovoljno realno predstavlja stvarno stanje - što je i postignuto nakon nekoliko iteracija tokom kojih su menjani granični uslovi.

Parametri posude 970

Prečnik: Ø 2200 mm,

Visina: 4485 mm,

Zapremina: 13 m³

Debljina zida: 50 mm,

Radni pritisak: 7.3-7.7 MPa (73-77 bar)

Projektni pritisak: 8.1 MPa (81 bar)

Tabela 11. Mehaničke karakteristike materijala Nioval 50

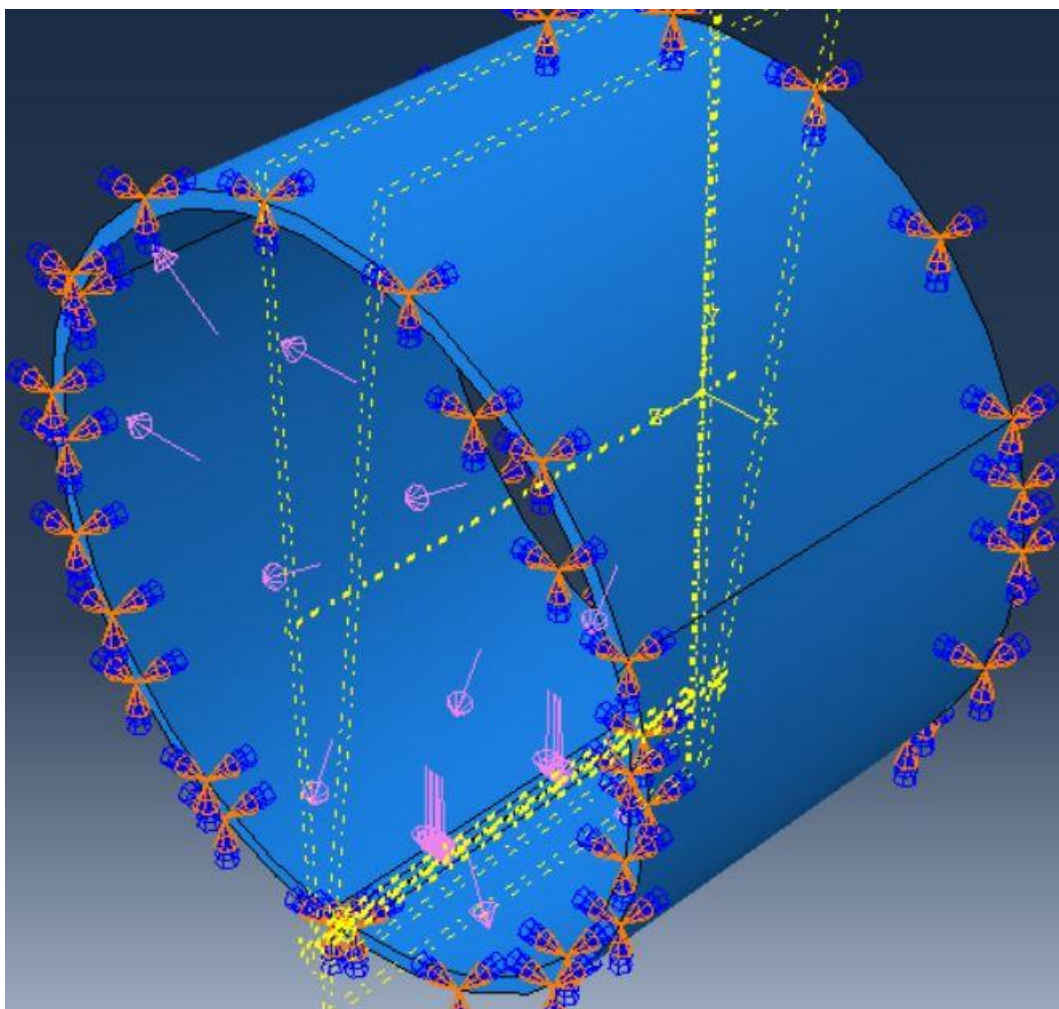
Materijal	Napon tečenja [MPa]	Zatezna čvrstoća [MPa]	Izduženje [-]
OM	500	796.25	0.225
MŠ	560	840	0.183

6.1 Trodimenzionalni model posude sa prslinom

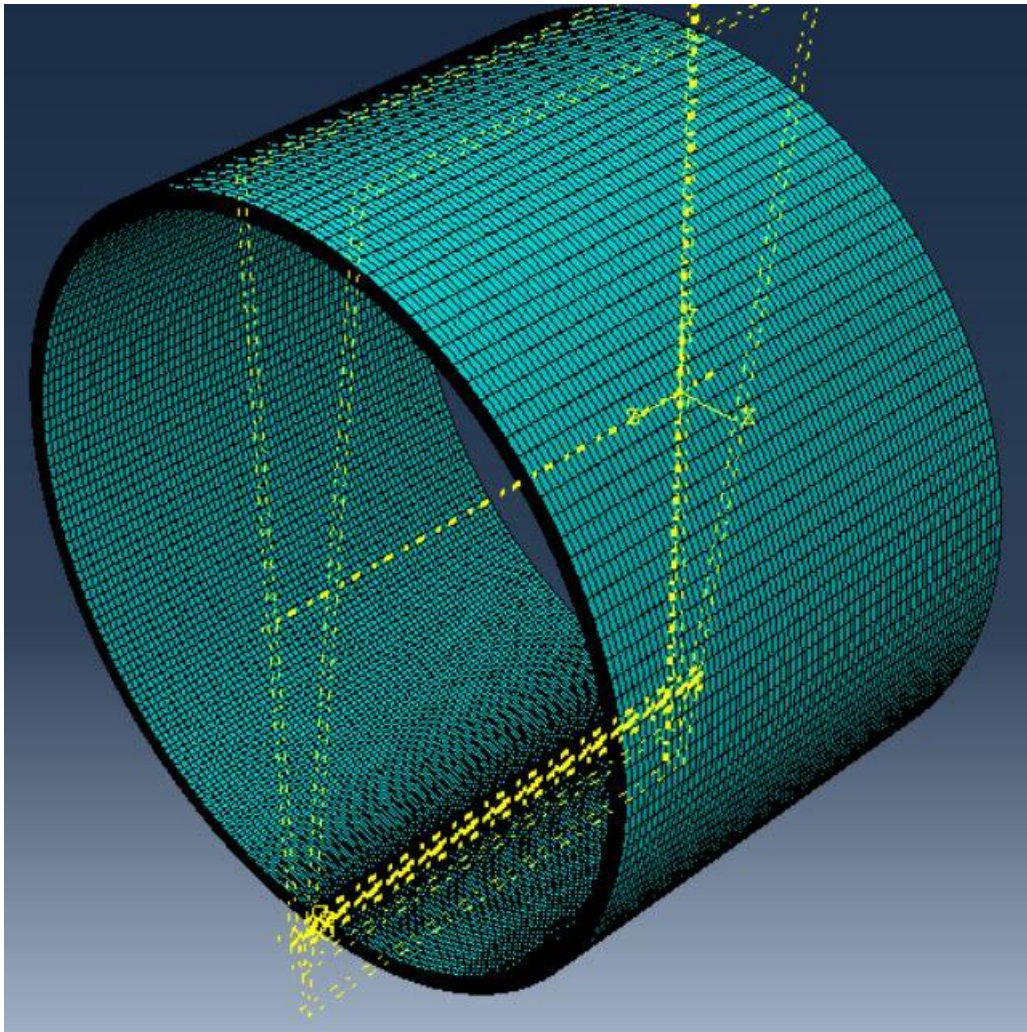
Geometrija posude preuzeta je iz tehničke dokumentacije suda SP 970, a geometrija i položaj prsline su definisani na osnovu rezultata UT ispitivanja dobijenih naprednim tehnikama ultrazvunih ispitivanja.

Granični uslovi, opterećenje zadato kao unutrašnji pritisak i mreža konačnih elemenata prikazani su na slikama 29 i 30. Donja i gornja površina prstena je fiksirana da simulira uticaj ukrucenja. Kao što se može videti, usvojen je samo jedan segment posude, onaj u kome se prsline nalazi, dok je uklonjen deo posude zamenjen graničnim uslovima.

U oblasti oko zavarenog spoja, mreža je kreirana od manjih elemenata kako bismo dobili preciznije rezultate. U ostatku modela su korišćeni veći elementi iz razloga što delovi posude dovoljno daleko od zavrenog spoja nisu predmet našeg interesovanja. Za simulaciju posude napravljena su dva modela, jedan sa prslinom gde je korišćeno je 403706 čvorova, drugi bez prsline gde je korišćeno 350740 čvorova.



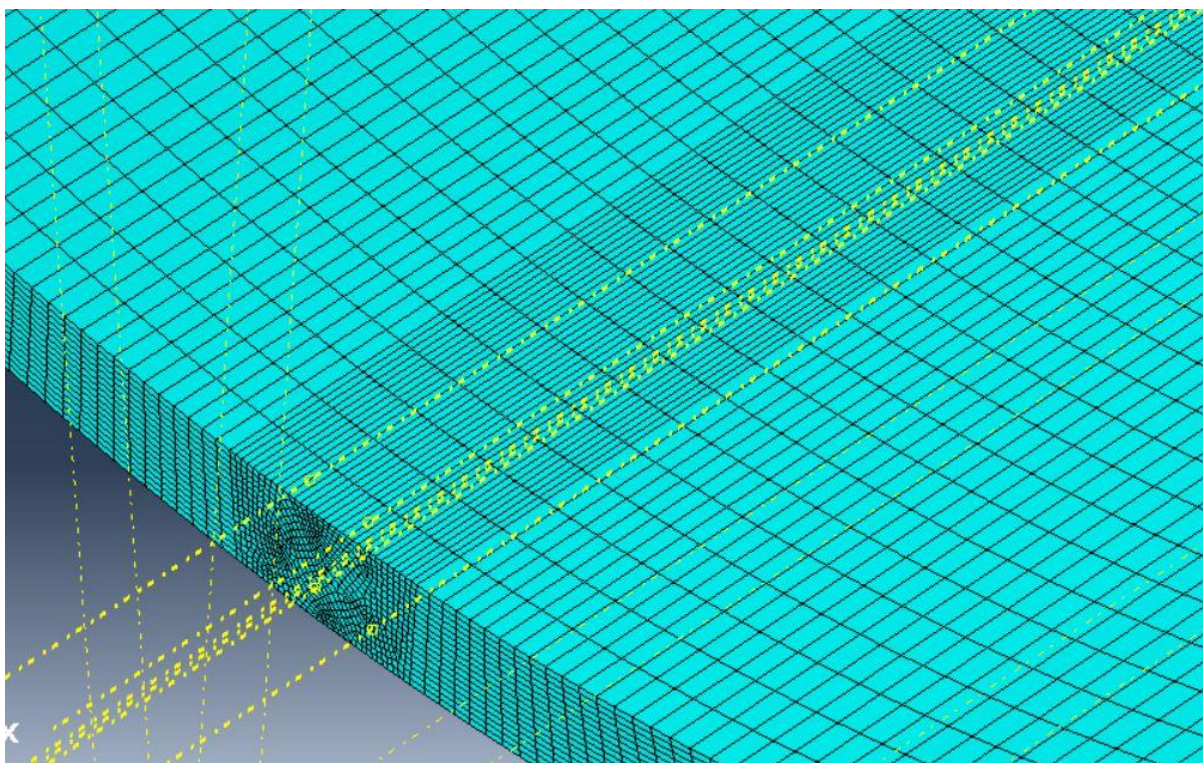
Slika 29. Model i granični uslovi prototipa dela posude SP 970



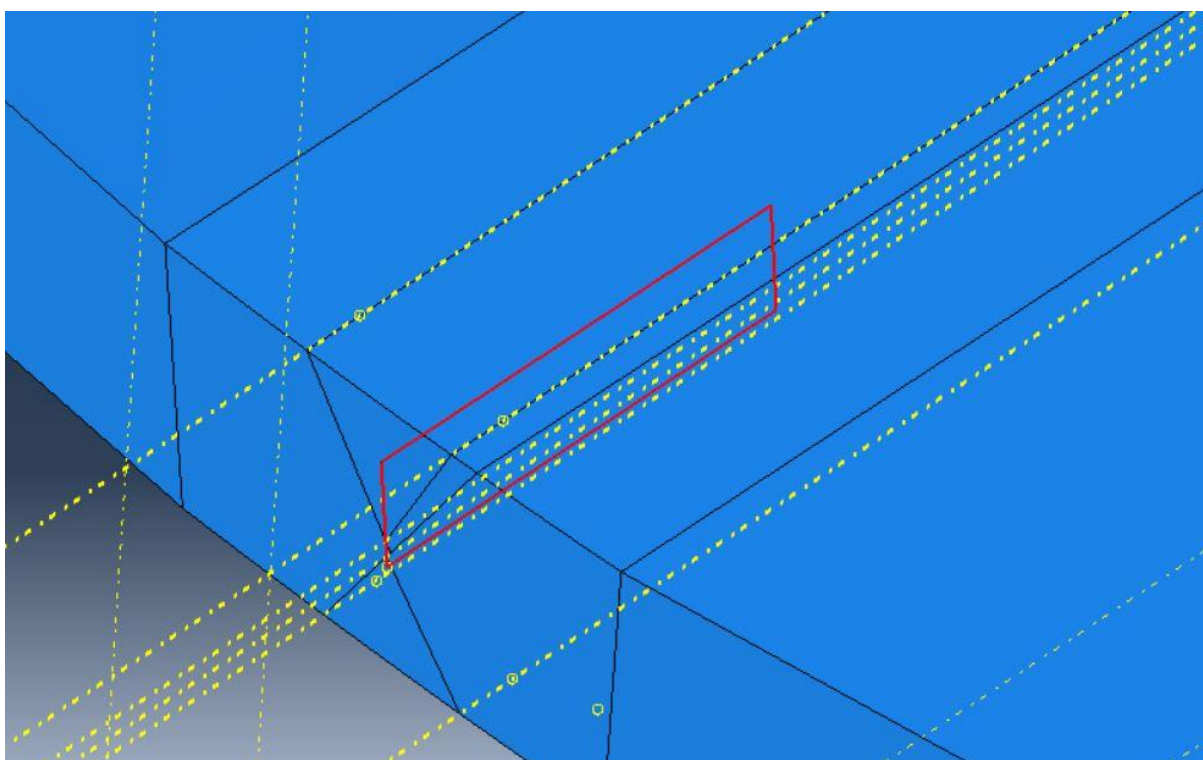
Slika 30. Mreža konačnih elemenata prototipa dela posude SP 970

Nakon definisanja mreže konačnih elemenata i graničnih uslova, sledeći korak je bio definisanje opterećenja. Opterećenje je definisano kao pritisak na unutrašnje strane posude, a za vrednost je usvojen najveći radni pritisak posude SP 970 koji iznosi 7.7 Mpa. Potrebno je napomenuti da u sudu ne postoje zaostali naponi usled termičke obrade nakon postupka zavarivanja.

Na sl. 31 i 32 prikazna je detaljnija mreža konačnih elemenata u zavarenom spoju za oba modela, kao i položaj prsline u modelu.



Slika 31. Detaljniji prikaz mreže konačnih elemenata u zavarenom spoju za oba modela



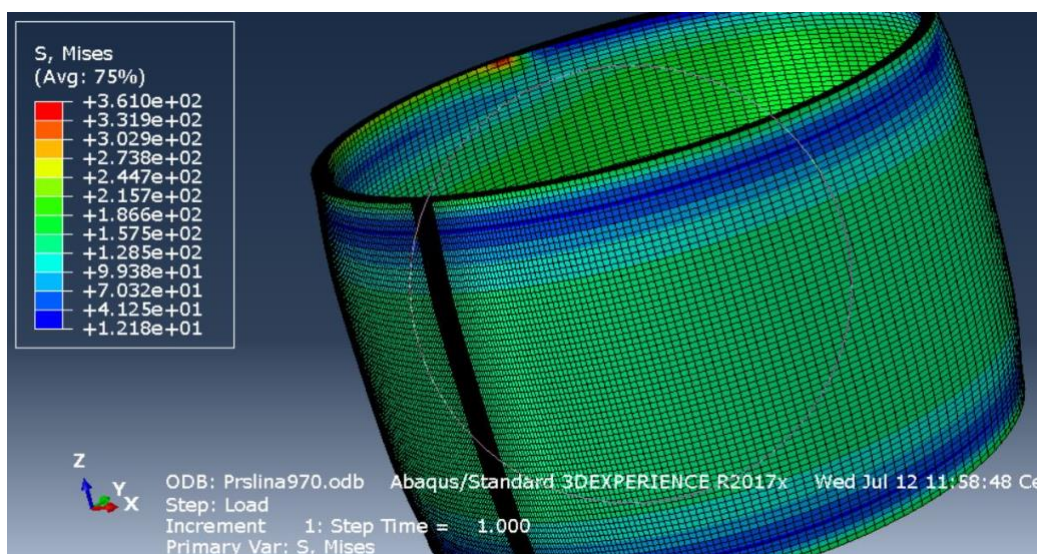
Slika 32. Tačan položaj prsline u numeričkom modelu

6.2 Rezultati numeričke simulacije napona u zavarenom spoju SP 970

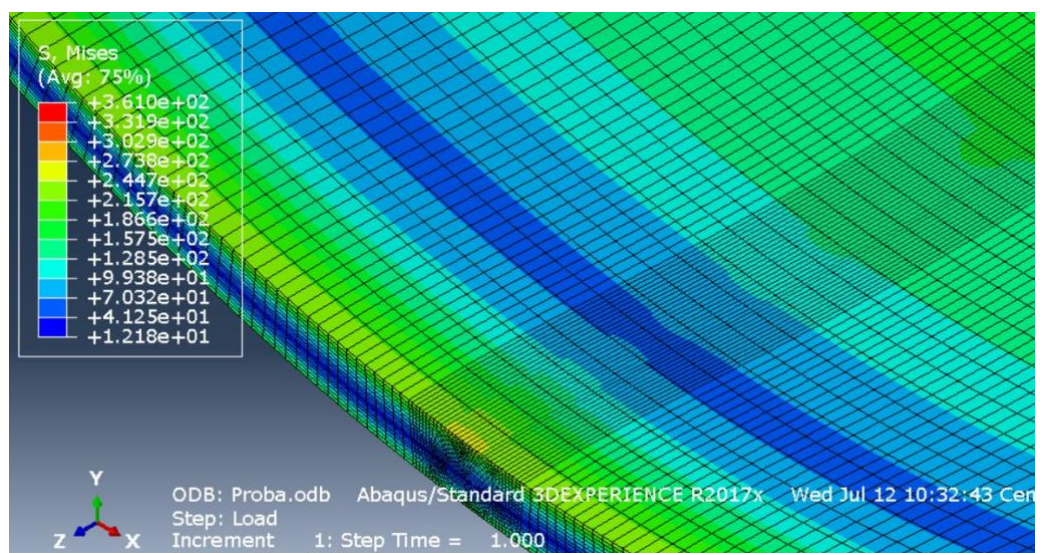
6.2.1 Naponska analiza modela sa obostrano fiksiranim graničnim uslovima

Detaljan prikaz rezultata numeričke simulacije modela bez prsline dat je na slikama 33, 34 i 35, a modela sa prslinom na slikama 36, 37 i 38.

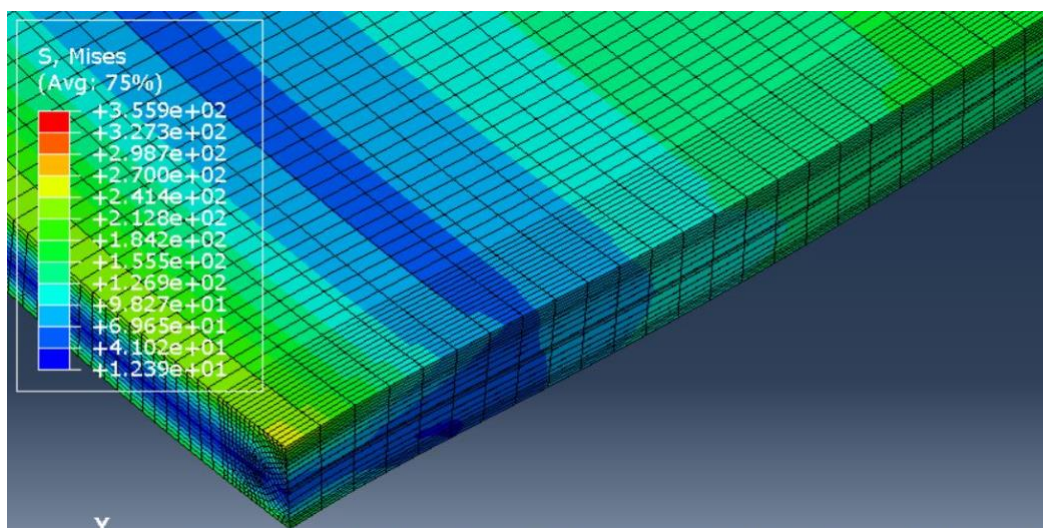
Slika 33 prikazuje naponsko stanje u celoj posudi, dok je na slici 34 dat prikaz napona u neposrednoj blizini zavarenog spoja. Slika 35. prikazuje raspodelu napona u samom zavrenom spoju po poprečnom preseku.



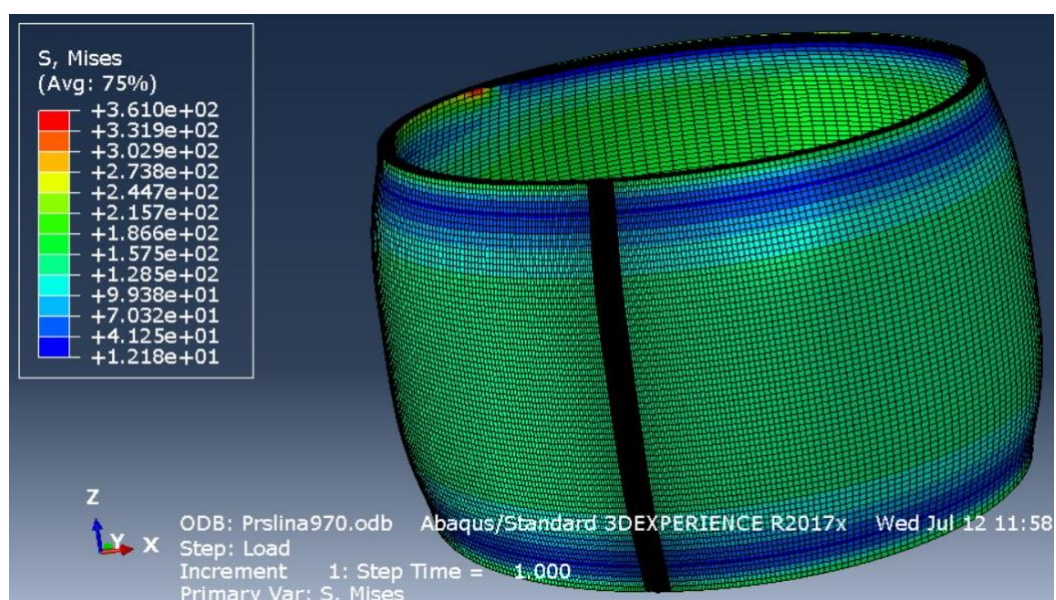
Slika 33: Numerički rezultati naponske analize za kompletan model bez prisline



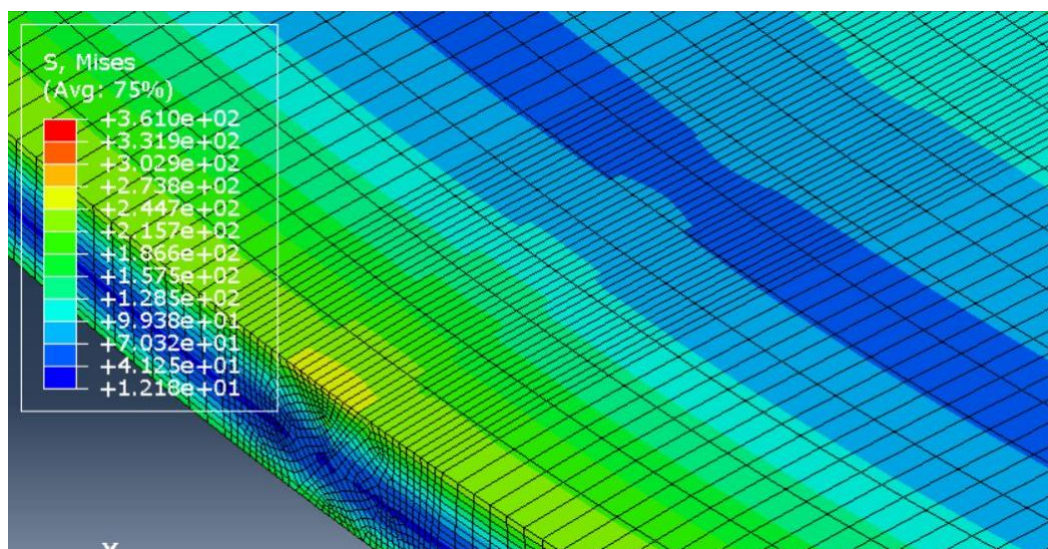
Slika 34: Detaljniji prikaz napona u neposrednoj blizini zavarenog spoja



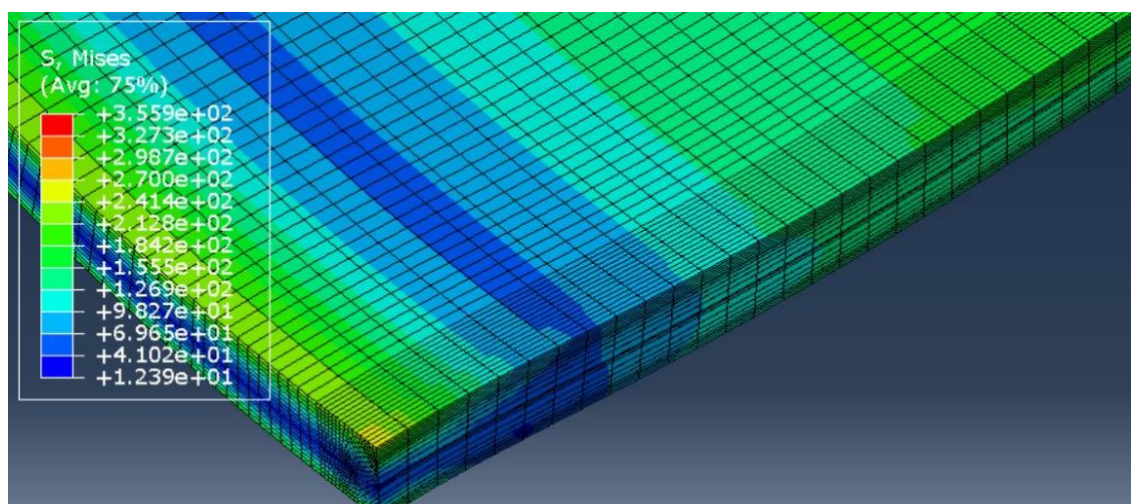
Slika 35: Prikaz naponskog stanja duž zavarenog spoja bez prisline



Slika 36. Numerički rezultati naponske analize za kompletan model sa prslinom



Slika 37: Detaljniji prikaz napona u neposrednoj blizini zavarenog spoja za model sa prslinom



Slika 38. Prikaz naponskog stanja duž zavarenog spoja sa prslinom

Kao što se može videti na prethodnim slikama, vrednosti napona u posudi su se kretale oko 240-250 MPa u osnovnom materijalu, odnosno do 270 MPa u metalu šava. Ovde je potrebno napomenuti da su vrednosti od preko 300 MPa odbačene, pošto se javljaju na mestu oslonaca (graničnih uslova). Sve ove vrednosti su приметно niže od granice tečenja oba materijala (500 MPa za OM, 560 za MŠ). Usled pomenutog i deformacije koje su se javile u modelu su zanemarljive (reda veličine 0.1%), a takođe je utvrđeno da se nigde nisu javile plastične deformacije, što je i očekivano, s obzirom na dobijene vrednosti napona. Vrednosti duž zavarenog spoja su bile u rasponu od 70 do oko 245 MPa, tako da ni u ovom slučaju nije bilo nikakvog izraženog uticaja na njegov integritet.

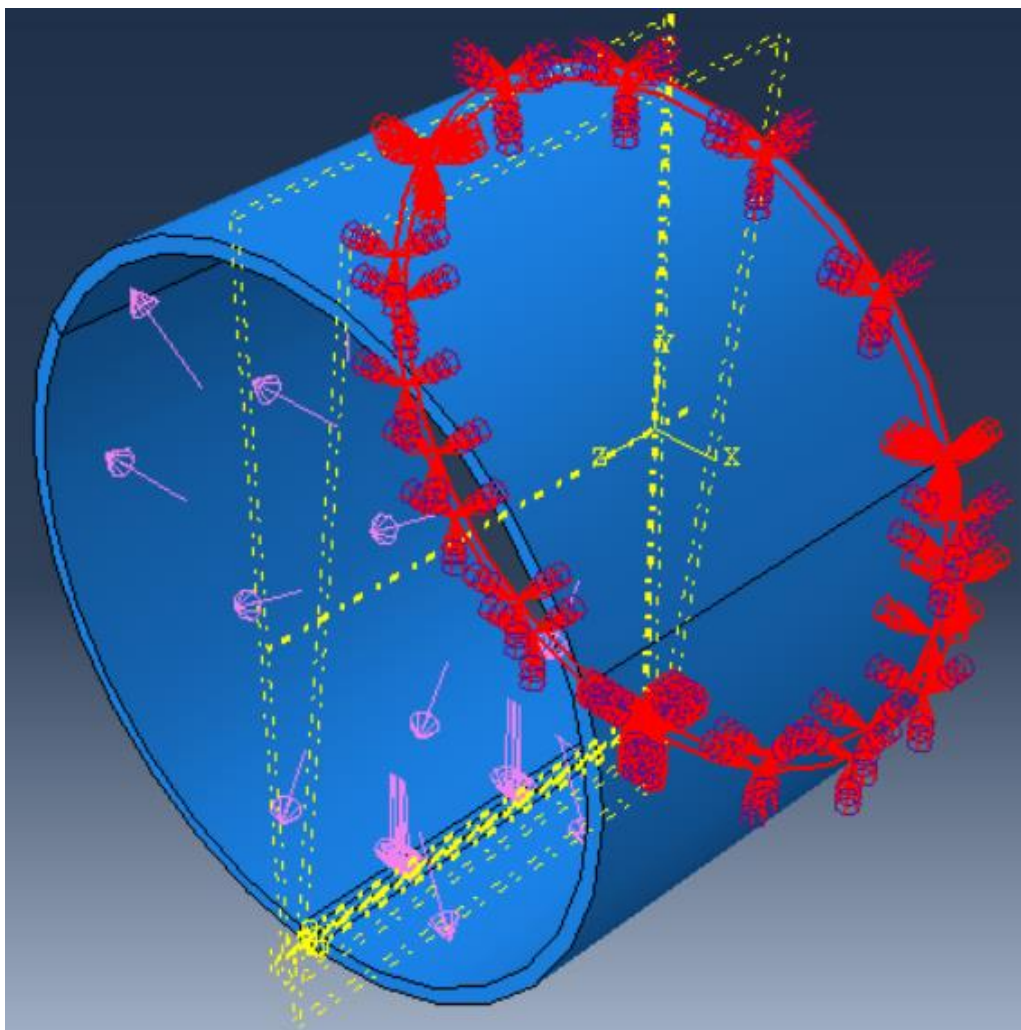
Kao što se može videti na osnovu rezultata za model sa prslinom u zavarenom spoju, vrednosti napona (i njihova raspodela) u posudi su gotovo identične kao u slučaju modela bez prsline (240-250 MPa u OM, oko 270 MPa u MŠ). Ovo znači da su i vrednosti za slučaj sa prslinom značajno niže od granice tečenja oba materijala. Budući da ni u ovom slučaju nije bilo plastične deformacije, nisu se ni stekli uslovi za rast prsline u zavarenom spoju.

6.2.2 Naponska analiza modela sa delimično relaksiranim graničnim uslovom

Iako je ovaj model za rezultat imao ponašanje posude koje je u skladu sa stvarnim stanjem u RHE “Bajina Bašta”, ipak je postojala određena sumnja u verodostojnost rezultata, budući da nije bilo nikakve značajne promene u naponima u okolini prsline. Sa jedne strane, male vrednosti napona nisu mogle da prouzrokuju deformaciju koja bi dovela do rasta prsline, bez obzira na to, bilo je očekivana da se u tom delu zavarog spoja javi nekakva koncentracija napona, što je u ovom slučaju izostalo.

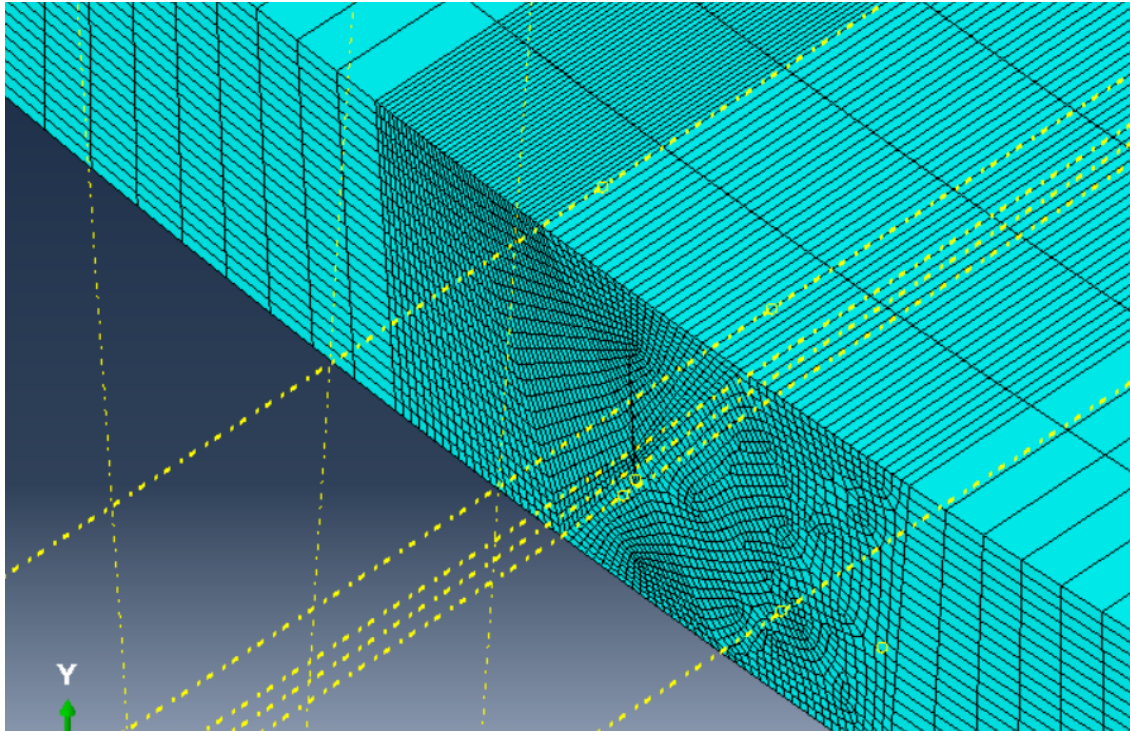
Kako bismo bili sigurni u tačnost modela, odlučeno je da se napravi još jedna verzija modela, u kojoj bi granični uslov sa donje strane posude, gde se nalazi prsline, bio uklonjen. Ovime bi se obezbedilo realnije deformisanje posude, i eliminisao uticaj graničnog uslova koji se u prethodnoj varijanti nalazio odmah uz fiksiran deo posude. Upravo iz ovog razloga je i odlučeno da se napravi još jedan model i utvrdi da li je blizina prsline i graničnog uslova takođe imala uticaj na raspodelu napona, odnosno u kojoj meri.

Na slici 39 je prikazan izmenjeni model sa gore pomenutim relaksiranim graničnim uslovom. Geometrija i opterećenje su ostali isti kao i u prethodno definisanom modelu.



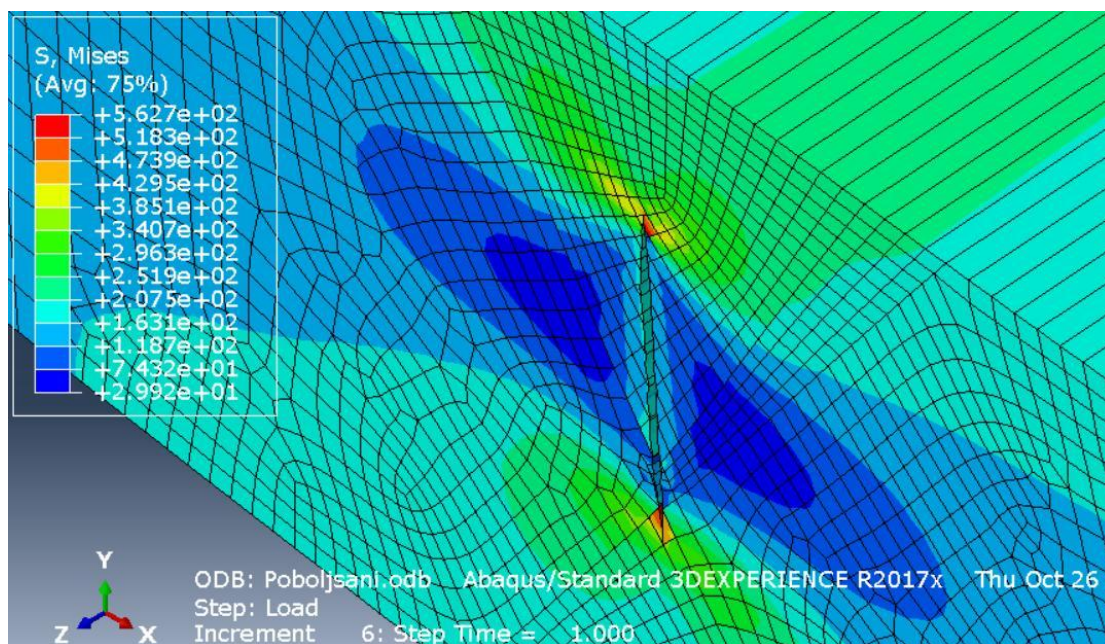
Slika 39: Granični uslovi i opterećenje na novom numeričkom modelu posude 970

U ovom slučaju je prvobitno usvojena ista mreža konačnih elemenata kao i u početnom modelu. Sa druge strane, bilo je neophodno uvesti i sitniju (precizniju), mrežu u samom zavarenom spoju, budući da su u ovom slučaju očekivani veći naponi i deformacije, pa je bila potrebna i veća preciznost na potencijalno kritičnim mestima. Iako ovo ne mora uvek da bude slučaj, kod ovog modela je za konvergenciju rezultata ipak bilo neophodno dodatno usitniti mrežu, pre svega da bi se dobila realnija raspodela napona u vrhovima prsline. Nova mreža konačnih elemenata koja je generisana za model se može videti na slici 40.



Slika 40: Detalj mreže konačnih elemenata u zavarenom spoju u okolini prsline

Na slici 41 je prikazano naponsko stanje u okolini same prsline nakon simulacije modela sa relaksiranim graničnim uslovima. Mogu se uočiti razlike u odnosu na prvobitni model – maksimalne vrednosti napona od oko 563MPa u vrhovima unutrašnje prsline su veće u odnosu na rezultate prvobitnog modela i dostigli su granicu tečenja dodatnog materijala od 560 MPa. Takođe se može primeniti da se prslina u određenoj meri deformisala - na slici se vidi neznatno širenje u pravcu upravnom na samu prslinu. Ono što je za ovu analizu bitnije je ipak rast prsline u podužnom pravcu - u ovom slučaju ga nije bilo, što se uklapa u realnu situaciju, određenu IBR metodama (PA i ToFD). Na osnovu svega navedenog, možemo zaključiti da je zavareni spoj sa defektom 5.6 konzervativno usvojen kao prslina, na samoj granici ulaska u plastičnost. Ukupna plastična deformacija je iznosila 0.8%.



Slika 41. Naponsko stanje u okolini defekta 5.6

6.2.3 Diskusija i zaključak analize naponskog stanja

U slučaju greške 5.6 sa fiksnim graničnim uslovima, naponsko stanje je znatno povoljnije, kao posledica fiksiranih graničnih uslova koja sprečavaju deformiciju i otvaranje prsline, a time bitno smanjuju naponsko stanje. Kako je na posudi izvedeno ukrućenje u vidu prstenova, na mestima graničnih uslova u realnosti postoji ukrutni prsten. Ovo ukrućenje delimično utiče i na naponsko stanje greške 5.6, koje je u stvarnosti dodatno povoljnije od ovde prikazanog, uz već navedene razloge za njegovo povoljnije stanje u odnosu na izračunato. Ukrućenje u stvarnosti je uzrok malog napona i beznačajne razlike napona kod modela sa prslinom i onog bez nje.

U slučaju greške 5.6 sa delimično relaksiranim graničnim uslovima, prslina se u određenoj meri otvorila u pravcu upravnom na njenu osu, ali nije bilo podužnog rasta ni na jednom kraju. Treba imati u vidu da je u prikazanom modelu prslina bila otvorena na samom kraju, gde je posuda 970 "isečena" u cilju pojednostavljenja modela, s obzirom da je ceo model bio previše zahtevan za proračun, u smislu vremena i dostupnih resursa. Ovo znači da je prikazani jednostavniji model još konzervativniji, jer bi prslina koja je sa svih strana ograničena naišla na još veći otpor svom širenju. Treba napomenuti da je defekt 5.6 u stvarnosti indikacija, i da ne mora da se radi o prslini koja je usvojena kao najgori mogući slučaj. Stoga se može zaključiti da je realna prslina (u kojoj bi se javili nešto manji naponi od numerički određenih) i dalje u sigurnoj oblasti što se integriteta posude tiče.

Na osnovu svega iznetog može da se zaključi da je posuda 970 bezbedna za dalju upotrebu, a da treba nastaviti sa čestim proverama stanja grešaka naprednim metodama ispitivanjima bez razaranja.

7. Procena integriteta i veka zavarenih spojeva primenom parametara mehanike loma, a na osnovu rezultata ultrazvučnog ispitivanja

7.1 Primena osnovnih principa mehanike loma za procenu integriteta konstrukcije

Termin „integritet konstrukcija”, nam govori o tome kako se principi mehanike loma mogu koristiti u sprečavanju otkaza [62]. Ona se u velikoj meri oslanja na mehaniku loma kao naučnu i inženjersku disciplinu, prvo uvedenu da opiše otkaz u radu [63], a zatim primenjenu da spreči otkaz, što dovodi do pojma integriteta konstrukcije. Kao inženjerska disciplina obuhvata analizu strukture, njeno ponašanje i dijagnostiku otkaza, procenu životnog veka kao i revitalizaciju konstrukcije. Primenom metoda definisanih ovom naučnom disciplinom, moguće je utvrditi „slaba” mesta u konstrukciji, pre pojave prsline u konstrukcijama koje su izložene različitim vrstama opterećenja.

Metodologija primene principa mehanike loma zavisi od dostupnih podataka o svojstvima materijala, geometriji komponente ili konstrukcije, geometriji defekta, i uslovima opterećenja. U slučaju statičkog opterećenja, deformacija materijala se može odvijati u linearno-elastičnoj ili elasto-plastičnoj oblasti. U prvom slučaju se primenjuje linearno-elastična mehanika loma (eng. linear elastic fracture mechanics (LEFM)), dok se u drugom, primenjuju različite metode elastično-plastične mehanike loma (eng. elastic plastic fracture mechanics (EPFM)).

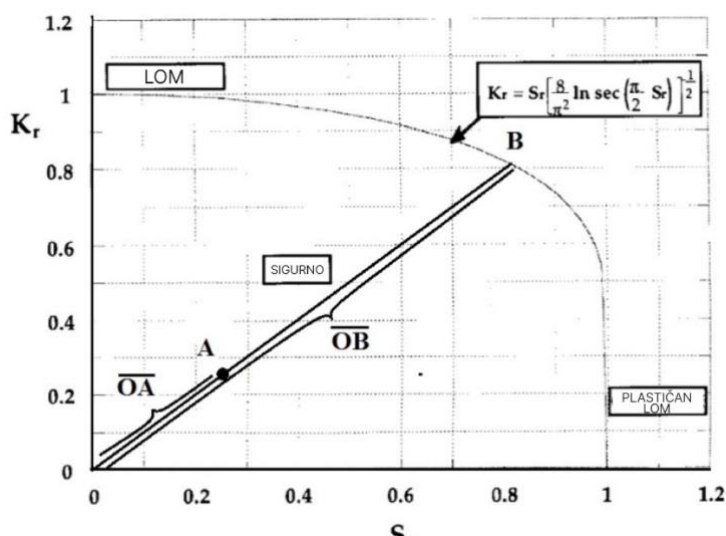
Konstrukcije napravljene od duktilnih materijala, uključujući zavarene spojeve, nisu podložne krtom lomu. U slučaju velike posude pod pritiskom, koja je tipično tanka komponenta u ravnom stanju napona, dijagram analize loma (eng. Failure assessment diagram (FAD)), se može koristiti, kao jednostavan inženjerski postupak za procenu njegovog integriteta konstrukcije. Ovaj dijagram predstavlja graničnu krivu, konstruisanu prema modifikovanom modelu popuštanja trake za prolaznu prslinu na beskonačnoj ploči:

$$\frac{K_{eff}}{K_I} = \frac{\sigma_c}{\sigma} \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_c} \right]^{1/2}$$

gde je $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$, K_{eff} je uveden umesto δ ($K_{eff}^2 = \delta \sigma_Y E$) i napon tečenja σ_Y je zamenjen naponom plastičnog kolapsa σ_c kao pogodnijim kriterijumom za konstrukcije kao sto su posude pod pritiskom. Kao poslednji korak, definisane su bezdimenzionalne promenljive $S_r = \sigma/\sigma_c$ i $K_r = K_I/K_{Ic}$, gde se pretpostavlja da je K_{eff} jednak žilavosti materijala na lom, tako da se granična kriva dobija na sledeći način:

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Ako je materijal potpuno duktilan, struktura propada usled plastičnog kolapsa, pri $S_r = 1$, dok je kod loma potpuno krto materijala $K_r = 1$. U svim ostalim slučajevima postoji interakcija između plastičnog kolapsa i krto loma; ako je tačka (K_r, S_r) ispod granične krive, konstrukcija je bezbedna, slika 39.



Slika 42. Dijagram analize loma (eng. FAD) [64]

FAD pruža više informacija o integritetu konstrukcije, a ne samo opciju DA/NE. Ispravno je razmišljati da je verovatnoća otkaza proporcionalna poziciji radne tačke u FAD dijagramu. Očigledno, ako je tačka blizu 0, verovatnoća je takođe blizu 0, dok je za tačku blizu granične linije verovatnoća blizu 1. Stoga, ovde usvajamo definiciju verovatnoće otkaza (eng. Likelihood of Failure (LoF)), kako je opisano i objašnjeno u [65-66]:

$LoF = OA/OB$.

Analiza rizika naprskih zavarenih konstrukcija, kao što su posude pod pritiskom, može se izvršiti primenom matrice rizika za procenu nivoa rizika prema verovatnoći i posledicama otkaza, kao što je prikazano u tabeli 10. Dat je kratak opis kategorija posledica. u tabeli 11.

Tabela 12. Nivoi rizika u odnosu na posledice i verovatnoću u obliku matrice rizika

RIZIK		KATEGORIJA POSLEDICE				
		VN	N	S	V	VV
KATEGORIJA VEROVATNOĆE	VV	Srednje	Srednje visoko	Srednje visoko	Visoko	Veoma visoko
	V	Srednje nisko	Srednje	Srednje visoko	Visoko	Visoko
	S	Nisko	Srednje	Srednje	Srednje visoko	Srednje visoko
	N	Nisko	Nisko	Srednje	Srednje	Srednje visoko
	VN	Vrlo nisko	Vrlo nisko	Nisko	Srednje	Srednje

Tabela 13. Posledice kategorija otkaza

	A	B	C	D	E
ZDRAVLJE (dugoročna vidljivost)	Upozorenje izdato Bez uticaja	Upozorenje izdato Mogući uticaj	Trenutni zdravstveni problemi, izlečivo	Ograničen efekat na javno zdravlje, pretnja od hroničnih bolesti	Ozbiljni efekat na javno zdravlje, pretnja od bolesti opasnih po život
SIGURNOST (trenutna vidljivost)	Pomoć nije potrebna Prekid rada	Prva pomoć potrebna Nema radne nesposobnosti	Trenutna radna nesposobnost	Trajna radna nesposobnost	Fatalnosti
ŽIVOTNA SREDINA	Zanemarljiv efekat	Efekat postoji (npr. rasutost)	Minorni efekat (npr. rasutost)	Šteta na licu mesta	Šteta van lica mesta Dugoročni uticaj
POSLOVANJE (EUR)	<10k Eur	10-100k Eur	0.1-1M Eur	1-10M Eur	>10M Eur
BEZBEDNOST	Nema	Na licu mesta (lokalno)	Na licu mesta (generalno)	Van lica mesta	Pretnja po društvo
GUBITAK UGLEDA	Nema	Minorni	Loš publicitet	Problemi u vezi sa kompanijom	Politički problemi
UZNEMIRAVANJE JAVNOSTI	Nema	Zanemarljiv	Minorno	Mala zajednica	Velika zajednica

7.2 Primena osnovnih principa mehanike loma za procenu integriteta konstrukcije na dobijene rezultate ispitivanja SP u RHE BB

Na osnovu opsežnih konvencionalnih, PA i TOFD UT testiranja SP, za detaljnu analizu primenom principa mehanike loma odabrani su: SP 970, defekt 5.6 i SP 971, defect 1.1. U pomenutim SP ne postoje zaostali naponi usled termičke obrade nakon postupka zavarivanja (eng. Post-Weld-Heat-Treatment (PWHT)).

- Žilavost metal šava $K_{Ic} = 1580 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ (usvojeno za sve slučajeve), što je minimalna vrednost (u ZUT-u), kao što je prikazano u [67,68].
- Napon tečenja MPa, zatezna čvrstoća 650 MPa, [67,68].

7.2.1 Sud pod pritiskom SP 970 - defekt 5.6 – primena mehanike loma

Osnovni podaci potrebni za analizu rizika SP 970 su:

- Geometrija suda: debljina $t = 50 \text{ mm}$, prečnik suda $D = 2150 \text{ mm}$.
- Pritisak $p = 8.1 \text{ MPa}$.

Kako su rezultati ispitivanja dobijeni različitim tehnikama UT ispitivanja zanemarljivo različiti, uvaja se sledeće:

Najveći defekt koji je pronađen različitim tehnikama UT ispitivanjem u SP 970 je defekt 5.6 dužine $2c=75 \text{ mm}$ i dubine $a=20 \text{ mm}$ (dubina pozicioniranja duž debljine zida SP od 18 do 38 mm), u uzdužnom zavarenom spoju.

Faktor intenziteta napona za centralnu površinsku prslinu, $c=75 \text{ mm}$, $2a=20 \text{ mm}$, može se izračunati kao:

$$K_I = Y(a/W, a/c)(pR/t)\sqrt{\pi a} = 1,1(174)\sqrt{10\pi} = 1075 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}},$$

Gde je $Y(a/W)=1.10$ za $a/W=20/50=0.4$, $a/c=20/75=0,27$, [69].
[17]

Pošto je $K_R = K_I/K_{Ic} = 0.72$, ne postoji opasnost od krtog loma.

Odnos između kritičnog poprečnog preseka i kritičnog napona u ovom slučaju je:
 $S_R = \sigma_n / \sigma_F = 167.7 \times 1.74 / 575 = 0.49$

Koordinate za defekt 5,6 u FAD-u su (0,49; 0,72), sa verovatnoćom otkaza 0,77.

7.2.2 Sud pod pritiskom SP 971 - defekt 1.1 – primena mehanike loma

Osnovni podaci potrebni za analizu rizika SP 971 su:

- Geometrija suda: debljina $t = 50 \text{ mm}$, prečnik suda $D = 2150 \text{ mm}$.
- Pritisak $p = 8.1 \text{ MPa}$.

Kako se rezultati ispitivanja dobijeni različitim tehnikama UT ispitivanja značajno razlikuju, dobijeni rezultati će se odvojeno razmatrati:

7.2.3. Proračun prema parametrima mehanike loma za vrednosti dobijene konvencionalnim UT ispitivanjem

Najveći defekt koji je pronađen konvencionalnim UT ispitivanjem u SP 971 je defekt 1.1 dužine $2c=180$ mm i dubine $a=32$ mm (dubina pozicioniranja duž debljine zida SP od 18 do 50 mm), u kružnom zavarenom spoju donjeg danca.

Faktor intenziteta napona za centralnu površinsku prslinu, $2c=180$ mm, $a=32$ mm, pod dejstvom uzdužnog napona, može se izračunati kao:

$$K_I = Y(a/t, a/c)(pR/2t)\sqrt{\pi a} = 1,83(87)\sqrt{32\pi} = 1520 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}},$$

Gde je $Y(0.64, 0.35) = 1.83$, [xx], što dovodi do odnosa $K_R = K_I/K_{Ic} = 0.96$.

Odnos između kritičnog poprečnog preseka i kritičnog napona u ovom slučaju je:

$$S_R = \sigma_n / \sigma_F = 87 \cdot 2.78 / 575 = 242 / 575 = 0.42$$

Koordinate za defekt 1.1 u FAD-u su (0,42; 0,96), slika 5, sa verovatnoćom otkaza (eng. LoF) 0,99.

7.2.4 Proračun prema parametrima mehanike loma za vrednosti dobijene naprednim PA i ToFD UT ispitivanjima

Na koordinatama jednog defekta pronađenog konvencionalnom UT tehnikom, naprednim metodama PA i ToFD-a pronađene su indikcije dva znatno manja defekta.

Veći defekt (od pronađena dva manja defekta), je dužine $2c=53.1$ mm i dubine $2a=16.7$ mm (dubina pozicioniran duž debljine SP od 12.34 do 29.06 mm), u kružnom zavarenom spoju donjeg danca.

Faktor intenziteta napona za centralnu površinsku prslinu, $2c=53.1$ mm, $2a=16.7$ mm, pod dejstvom uzdužnog napona, može se izračunati kao:

$$K_I = Y(a/t, a/c)(pR/2t)\sqrt{\pi a} = 1,01(87)\sqrt{8.35\pi} = 1520450 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}},$$

Što dovodi do odnosa $K_R = K_I/K_{Ic} = 0.28$.

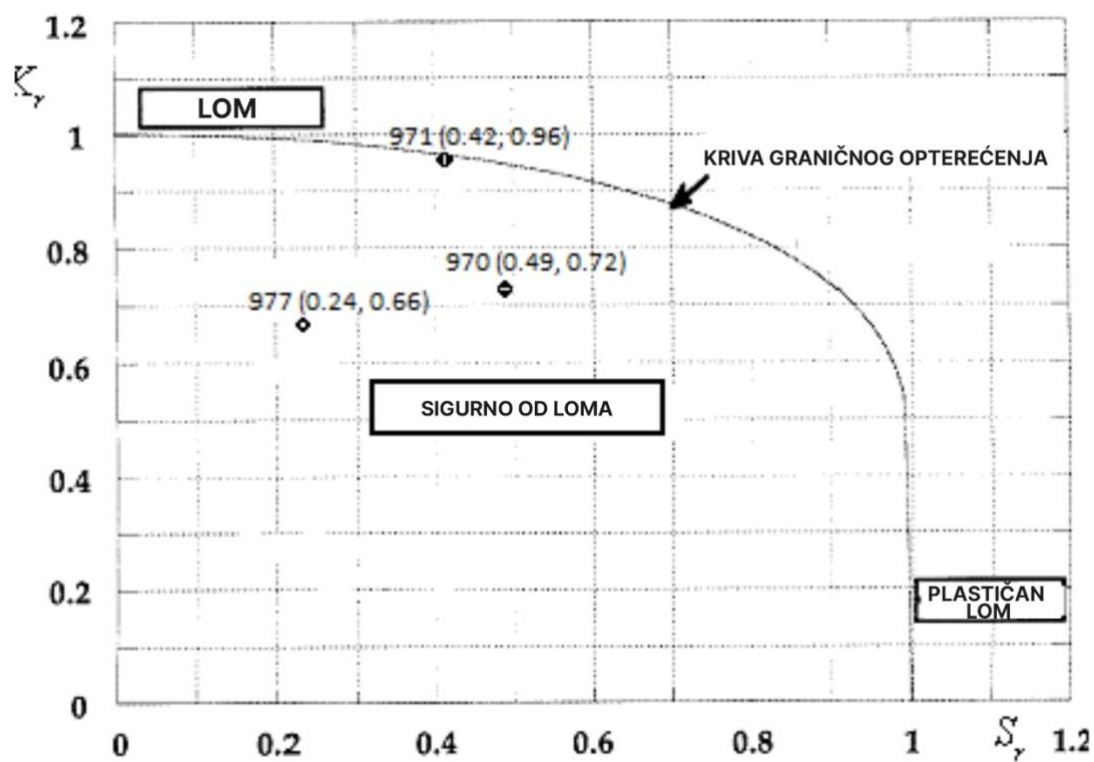
Odnos između kritičnog poprečnog preseka i kritičnog napona u ovom slučaju je:

$$S_R = \sigma_n / \sigma_F = 87 \cdot 1.5 / 575 = 130.5 / 575 = 0.23$$

Koordinate za nov defekt 1.1 u FAD-u su (0,23; 0.28), slika 40, sa verovatnoćom otkaza (eng. LoF) 0.3, a rizik je samo srednji umesto veoma visok.

7.3 Prikaz rezultata u dijagramu analize loma - FAD dijagramu

Izračunate tačke su predstavljene u FAD-u, slika 40, ukazujući na različite nivoe verovatnoće otkaza (LoF-a).



Slika 43. Tačke u FAD za posude pod pritiskom 970 i 971

8. Sveobuhvatna analiza i diskusija dobijenih rezultata UT ispitivanjima, numeričkom simulacijom i analizom parametra mehanike loma

8.1 Analiza rizika i diskusija na osnovu podataka indikacija defekata dobijenih UT ispitivanjem

U predmetnoj doktorskoj disertaciji nivo rizika je određen prema verovatnoći, procenjenoj za najkritičnije defekte (defekt 5.6 u PV 970 i defekt 1.1 u PV 971). Razmatrane su i verovatnoće posedica, ocenjene kao najveće, nakon pažljivog razmatranja sledećih događaja u slučaju otkaza. [70]. Matrica rizika se sada može dobiti na jednostavan način, kao što je prikazano u tabeli 12, što ukazuje na veoma visok nivo rizika za SP 971, kao i visok rizik za SP 970. U oba slučaja su bile potrebne dalje radnje, uzimajući u obzir specifične uslove, kao što sledi:

8.1.1 Analiza rizika i diskusija dobijenih rezultata na osnovu dobijenih parametara mehanike loma – defekt 5.6 u SP 970

Za defekt 5.6 u SP 970, odlučeno je da se ostavi, zato što reparaturno zavarivanje nije bilo praktično rešenje, pa je za SP 970 predloženo posebno dizajnersko rešenje u vidu ukrutnog prstena. Budući da je nivo rizika bio na veoma visokom nivou, a lokacija kvara nije bila pogodna za žljebljenje i reparaturno zavarivanje, odlučeno je da se napravi obodno ukrućenje (ukrutni prsten), kako bi se smanjio napon koji deluje na zavareni spoj, tako da i faktor intenziteta napona i neto napon (napon u ravni prsline), koji deluje na defekt 5.6, značajno su smanjeni, [23, 25]. Jednostavno, ali efikasno rešenje, kao što je prikazano na slikama 44, 45 i 46.



Slika 44. Specijalno dizajnersko rešenje za SP 970: ukrutni prsten oko lokacije defekta 5.6



Slika 45. Specijalno dizajnersko rešenje za SP 970: ukrutni prsten oko lokacije defekta 5.6- stezni alat



Slika 46. Specijalno dizajnersko rešenje za SP 970: ukrutni prsten oko lokacije defekta 5.6

8.1.2 Analiza rizika i diskusija dobijenih rezultata na osnovu dobijenih parametara mehanike loma – defekt 1.1 u SP 971

Za defekt 1.1 u SP 971 dobijeni rezultati FAD dijagrama za ulazne podatke dobijene konvencionalnim ultrazvučnim ispitivanjima pokazali su veoma visok nivo rizika. Kako ni reparaturno zavarivanje ni specijalno dizajnersko rešenje nisu bili opcija, a dodatno IBR isipivanje sa unutrašnje strane posude (vizuelno ispitivanje (VT), magnetno ispitivanja (MT)), nije otkrilo prisustvo ovog defekta, odlučeno je da se usvoje rezultati naprednih UT ispitivanja (PA i ToFD), te da se na osnovu njih definiše nivo rizika. Primenjujući napredne PAUT i ToFD tehnike UT ispitivanja dobili su se precizniji podaci o dimenzijama i lokaciji defekta 1.1. Testiranje je obavljeno na ultrazvučnom aparatu Sonatest Veo+ 32/128 sa softverom Sonatest UT Studio+. Ispitivanje je obavljeno korišćenjem transversalnih talasa, sa brzinom zvuka od 3240 m/s u materijalu. U ovom slučaju je korišćena metoda Impulse-echo, zajedno sa sektorskim pretraživanjem. Ispitno pojačanje je bilo 45,5 dB. Za razliku od konvencionalne UT tehnike, na jednoj su pronađene dve indikacije: prva dužine 53,1 mm i dubine 16,7 mm (od 12,4 do 29,1 mm); druga dužine 18,8 mm i dubine 3,5 mm, od 46,9 do 50,4 mm).

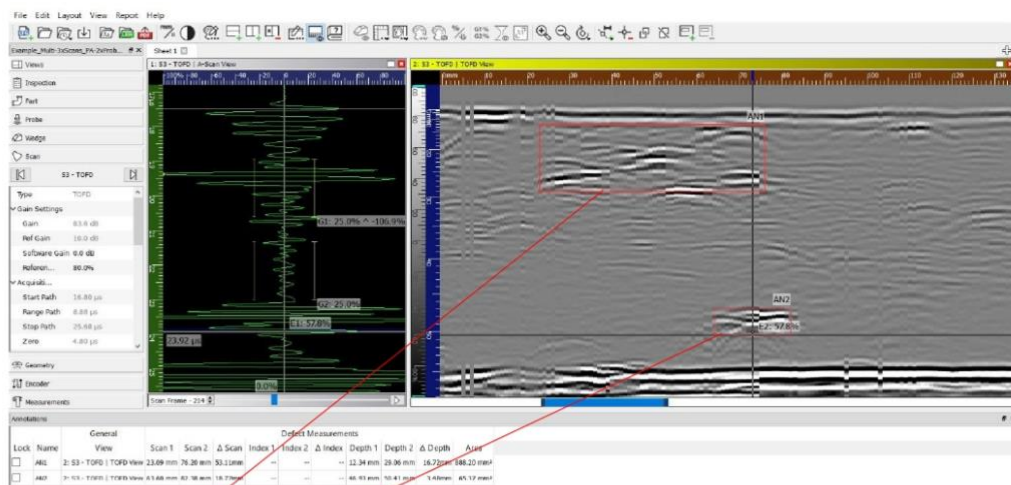
Svi neophodni detalji UT testiranja kombinacijom naprednih PAUT i ToFD tehnika prikazani su na slici 45, gde je prvi defekt označen sa AN1, a drugi sa AN2. Gornji snimak ekrana prikazuje rezultate ispitivanja ToFD tehnikom, dok donji prikazuje rezultate ispitivanja PAUT tehnikom.

Takođe, uzimajući u obzir debljinu materijala, utvrđeno je da je 55 mm (a ne 50 mm kao što je utvrđeno konvencionalnim UT), iako su obe indikacije i dalje neprihvatljive, sasvim je jasno da je rizik od otkaza znatno manji nego što je predviđeno korišćenjem rezultata merenja konvencionalnog UT. Rezultati dobijeni od strane PAUT-a i TOFD-a su takođe u skladu sa činjenicom da na unutrašnjoj strani posude nije pronađena pukotina. Na kraju, treba napomenuti da ove dve indikacije nisu u istoj ravni, pa je malo verovatno da će se spojiti. Na osnovu pomenutog, izvršena je ponovna analiza rizika za defekt 1.1 koja je dala svoje rezultate i svrstala pomenuti rizik u srednji nivo umesto u veoma visok (Tabela 12).

Tabela 14. Matrica rizika za SP 970 i SP 971

RIZIK		KATEGORIJA POSLEDICA				
		VEOMA NISKO	NISKO	SREDNJE	VISOKO	VEOMA VISOKO
KATEGORIJA VEROVATNOĆE	VEOMA VISOKO					971 DEFEKT 1.1
	VISOKO					970 DEFEKT 5.6
	SREDNJE					
	NISKO					971 „NOVI“ DEFEKT
	VEOMA NISKO					

* „novi“ defekt se odnosi na rezultate dodatnih IBR-a korišćenjem naprednog UT-a (PA i ToFD)



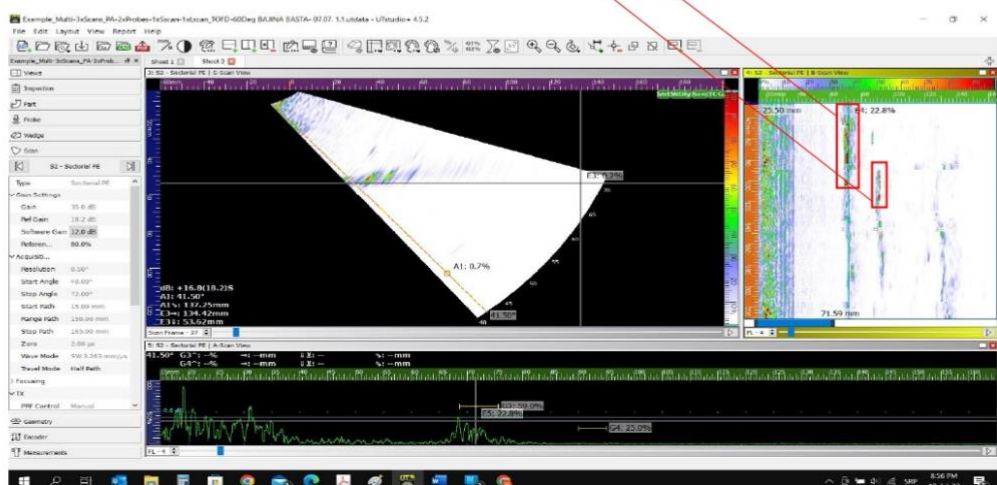
General			Defect Measurements									
Lock	Name	View	Scan 1	Scan 2	Δ Scan	Index 1	Index 2	Δ Index	Depth 1	Depth 2	Δ Depth	Area
☐	AN1	2: S3 - TOFD TOFD View	23.09 mm	76.20 mm	53.11mm	--	--	--	12.34 mm	29.06 mm	16.72mm	888.20 mm²
☐	AN2	2: S3 - TOFD TOFD View	63.60 mm	82.38 mm	18.77mm	--	--	--	46.93 mm	50.41 mm	3.48mm	65.37 mm²

Grupa defekata označena poljem AN1 ima ukupnu dužinu(l)(y)=53,11mm, dubina(z)(h)=16,72mm (a prostire se od 12,34 do 29,06mm)

Defekt označen poljem AN2 ima dužinu (l)(y)=18,77mm, dubina(z)(h)=3,48mm (a prostire se od 46,93 do 50,41mm)

Iz priloženog snimka i tabele se vidi da je:

1. Debljina materijala 55mm (a ne 50)
2. Da po dubini postoje 2 indikacije koja je svaka za sebe ne prihvatljiva
3. Ni jedna od indikacije ne izbija na površinu(koren ili lice)
4. Iz PA snimka se vidi da indikacije nisu u istoj ravni(x) (PREDNOSTI KORIŠĆENJA KOMBINACIJE PA+TOFD)



Slika 47. Rezultati PAUT i ToFD ispitivanja

8.2 Analiza i diskusija dobijenih rezultata prema numeričkom proračunskom modelu, a na osnovu ulaznih podataka indikacija defekata dobijenih UT ispitivanjem

Na osnovu rezultata numeričkih simulacija metodom konačnih elemenata, koji su prikazani u okviru poglavlja 6.2, i koji se obuhvatali naponsko stanje u modelima posude SP 970 sa prslinom, može se zaključiti da modela sa delimično relaksiranim graničnim uslovom pokazala dobro slaganje sa rezultatima dobijenim primenom naprednih tehnika UT ispitivanja, u smislu da je u oba slučaja utvrđeno da indikacija 5.6 ne predstavlja opasnost po integritet zavarenog spoja, a samim tim i posude SP 970.

Numerički rezultati analize naponskog stanja posude sa prslinom su takođe potvrđeni i primenom mehanike loma, u okviru koje je određen dijagram analize loma. Prema ovom proračunu je takođe utvrđeno da se indikacija 5.6 nalazi u bezbednom delu dijagrama.

9. Zaključak

Rezultati eksperimentalnih istraživanja i numeričkih simulacija u okviru ove disertacije pružile su bolji uvid i polaznu osnovu za analizu indikacija nesavršenosti otkrivenih naprednim tehnikama metode ultrazvučnog ispitivanja zavarenih spojeva kao i procena uticaja indikacija koje su neprihvatljive prema važećim kriterijumima prihvatljivosti SRPS EN ISO 11666 i SRPS EN ISO 19 285. Primenom naprednih ultrazvučnih tehnika ispitivanja, numeričke naponske analize i parametara mehanike loma dato je:

- Verovatnoća pronalaženja greške unutar zavarenog spoja povećana je na preko 80% primenom naprednih metoda UT ispitivanja, za razliku od konvencionalnog ispitivanja gde je verovatnoća pronalaženja greške nešto veća od 50%
- Utvrđivanje kritičnih oblasti zavarenog spoja u zavisnosti od konkretnih indikacija grešaka (procene tipa greške, pozicije i orijentacije u zavarenom spoju, preciznije koordinate lokacije greške unutar zavarenog spoja)
- Preciznija i pouzdanija procena integriteta zavarenih spojeva i konstrukcija u prisustvu indikacija grešaka neprihvatljivih prema važećem standardu SRPS EN ISO 11666 i SRPS EN ISO 19 285
- Predviđanje ponašanja zavarenog spoja (i konstrukcije), numeričkim modelima na osnovu koga je preciznije definisan uticaj indikacija grešaka na integritet zaveranog spoja (ili konstrukcije), u zavisnosti od eksploatacionih uslova (u zavisnosti od opterećenja i geometrije). Numerička analiza je pokazala izostanak plastičnih deformacija za zadate uslove, odnosno da vrednosti napona i njihova raspodala ne izazivaju dalji rast prsline.
- Sveobuhvatno razumevanje ponašanja zavarenog spoja (ili konstrukcija) u prisustvu konkretnih indikacija grešaka i predviđanje njegovog ponašanja u eksploatacionim uslovima primenom naprednih metoda ispitivanja za ulaznu preciznu karakterizaciju indikacija grešaka i njihovo ponašanje u realnim uslovima opterećenja primenom kombinovanog numeričkog i eksperimentalnog pristupa

Generalno, procena zasnovana na riziku može biti prilično složena i komplikovana procedura, ali i relativno jednostavna ako se FAD uzme kao inženjersko sredstvo za procenu verovatnoće otkaza i ako je u isto vreme dovoljna deskriptivna procena posledica otkaza. Drugim rečima, ako je očigledno koja je kategorija posledica konkretnog problema, kao što je ovde analiziran slučaj i ako je vreme ograničeno kada je oprema poput SP u RHE dostupna za testiranje i eventualnu popravku ili zamenu, postoji dodatni argument u korist primene jednostavne i efikasne metode za procenu zasnovanu na riziku.

U poređenju sa drugim UT tehnikama, PAUT ima nekoliko važnih prednosti, jer se može sprovesti mnogo brže, na ponovljiv način i može napraviti više pretraživanja odjednom (sektorsko pretraživanje). Takođe, u kombinaciji sa ToFD-om mogu se precizno detektovati dimenzije i lokacije defekta. Obe tehnike su praćene enkoderom, svi podaci se mogu snimiti i sačuvati za buduću analizu i dokaz. PAUT takođe ima višestruke prednosti u odnosu na druge

UT tehnike, ne postoji „mrtva zona“ kao što je to slučaj sa bilo kojom drugom dostupnom UT metodom, pouzdaniji i precizniji podaci o lokalitetu defekta, i dr.

Sve ove metode su pouzdane u proceni stanja konstrukcije i mogu pomoći u prikupljanju tačnih podataka koji mogu opisati postojeće stanje konstrukcije i produžiti radni vek konstrukcije. Oni su ključni za pouzdanu procenu strukturalnog integriteta kritičnih komponenti, kao što su posude pod pritiskom, precizna procena rizika od otkaza, pružajući zdravu osnovu za proces donošenja odluka.

Za kraj zelim da istaknem značajan doprinos naprednih ultrazvučnih metoda koje su omogućile bolji uvid u realno zapreminsko stanje unutar strukture zavarenog spoja (identifikacije svih defekata u zoni interesa – zoni pretrage). Ultrazvučna tehnika beleži konstantni razvoj poslednjih decenija. Postojeće tehnike se usavršavaju i nove dolaze u svakodnevnu primenu. Pojavili su se i sistemi za snimanje visoke rezolucije i višestruki modaliteti merenja za karakterizaciju greške. Interesovanje ne samo za otkrivanje, karakterizaciju i dimenzionisanje nedostataka u materijalu, već i za karakterizaciju materijala se naglo povećalo od strane tržišta. Ciljevi se kreću od određivanja osnovnih mikrostrukturnih karakteristika kao što su veličina zrna, poroznost i tekstura (poželjna i orijentacija zrna), do svojstva materijala povezanih sa mehanizmima loma kao što su zamor, puzanje i žilavost. Kako tehnologija nastavlja da napreduje, primena ultrazvuka takođe napreduje. Napredne metode ultrazvučnih ispitivanja nam donose veću pouzdanost u verovatnoći otkrivanja grešaka i njihovoj pravilnoj karakterizaciji. Poznavajući realno stanje ispitivanog objekta, dobijene vrednosti nakon računске obrade doprinose boljem uvidu i većoj pouzdanosti integriteta konstrukcije. U budućnosti možemo očekivati veće mogućnosti naprednih ultrazvučnih tehnika i njihov doprinos u proceni integriteta konstrukcija.

Kao nastavak istraživanja i dalji rad predlaže se ponavljanje svih ispitivanja na postojećim posudama SP 970 i SP 971, drugim naprednim tehnikama ultrazvučnog ispitivanja. Konkretno se predlaže korišćenje napredne UT tehnike zonske diskriminacije (eng. zonal discrimination inspection), koja bi povećala stepen verovatnoće detekcije svih indikacija defekta u zavarenim spojevima pomenutih posuda pod pritiskom. Kao druga važna napredna UT tehnika preporučuje se tehnika totalnog fokusa (eng. total focusing method), kojom bi se eventualno ostvarila još bolja karakterizacija defekta u smislu njegovog oblika, veličine, orijentacije, te konkretne geometrijske lokacije i orijentacije unutar zavarenog spoja. Sveobuhvatno koristeći dodatne napredne tehnike ultrazvučnog ispitivanja doprineli bi smo konzervativnijoj analizi rizika posuda pod pritiskom u RHEE BB u čiju pouzdanu procenu i očuvanja integriteta konstrukcije.

Referentna literatura:

- [1] Reed, RP, et al. Fitness-for-service criteria for pipeline girth-weld quality, Final Report to the U.S. DOT, NBS, Boulder, CO, USA. 1983
- [2] Neggaz, D, El-Azzizi, A, Hadj Meliani, M, Nateche, T. Failure Assessment Diagram (FAD) and Patch Repairing Index (PRI) on damaged structure reinforced by a composite patch, *Structural integrity and life*, 20(3), 211-218, 2020
- [3] Amara, M, Bouledroua, O, Hadj Meliani, M, Muthanna, BGN, Tahar Abbes, M, Pluvinage, G. Assessment of pipe for CO₂ transportation using a constraint modified CTOD failure assessment diagram, *Structural integrity and life*, Vol. 18(2) 149–153, 2018
- [4] Zaidi, R, Sedmak, A, Kirin, S, Martić, I, Šarkočević, Ž. Structural integrity and life assessment of oil drilling rig pipes using analytical method, *Structural integrity and life*, 22(1), 63-68
- [5] Golubović, T, Sedmak, A, Spasojević Brkić, V, Kirin, S, Rakonjac, I. Novel risk based assessment of pressure vessels integrity. *Technical Gazette* 25(3), 803-807, 2018
- [6] Arandelović, M, Jeremić, L, Đorđević, B, Sedmak, SA, Opačić, M. Integrity Assessment of Ammonia Storage Tank by Non-Destructive Testing, *Structural integrity and life*, 21(3), 295–300, 2021
- [7] Jeremic, L, Sedmak, A, Milovanović, N, Milošević, N. Assessment of structural integrity of pressure vessel for compressed air, *Structural Integrity and Life*, 21(1), 3-6, 2021
- [8] Kirin, S, Sedmak, A, Zaidi, R, Grbović, A, Šarkočević, Ž. Comparison of experimental, numerical and analytical risk assessment of oil drilling rig welded pipe based on fracture mechanics parameters, *Engineering Failure Analysis*, 114, 2020, 104600
- [9] Zaidi, R, Sedmak, A, Kirin, S, Grbovic, A, Li, W, Lazic Vulicevic, L, Sarkocevic, Z. Risk assessment of oil drilling rig welded pipe based on structural integrity and life estimation, *Engineering Failure Analysis*, 112, 2020, 104508
- [10] Medjo, B, Arsić, M, Mladenović, M, Savić, Z, Grabulov, V, Radosavljević, Z, Rakin, M. Influence of defects on limit loads and integrity of the pipeline at hydropower plant ‘Piroć’, *Structural Integrity and Life*, 20(1), 82–86, 2020
- [11] Stanojević, P, Jovanović, A, Kirin, S, Misita, M, Orlić, B, Eremić, S. Some achievements in RBIM implementation according to RIMAP approach, *Structural Integrity and Life*, 15, 79-84, 2015
- [12] Sedmak A, Algool, M, Kirin, S, Rakicevic, B, Bakic, R. Industrial safety of pressure vessels - Structural integrity point of view, *Hemijska industrija* 70(6), 685-694, 2016
- [13] www.epri.com
- [14] Uroš D. Lukić, Skripta za kurs Ultrazvučno ispitivanje – Nivo 1, Revizija 1.5, NDT PRO d.o.o. Beograd, 2021. godine
- [15] K. NACHIMUTHU, S. Kumar BABU, Case studies on uncertainties of ultrasonic weld testing interpretation, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China

- [16] M. Opačić, A. Sedmak, G. Bakić, N. Milošević, N. Milovanovic, *Application of advanced NDT methods to assess structural integrity of pressure vessel welded joints*, 23 European Conference on Fracture - ECF23
- [17] Baldev Raj & T. Jayakumar: NDE methodologies for characterisation of defects, stresses and microstructures in pressure vessels and pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 73(2), 1997, pp 133-146. 10.1016/S0308-0161(97)00042-2
- [18] Sedmak, S., Grabulov, V., Momčilović, D., 2009, Chronology of lost structural integrity initiated from manufacturing defects in welded structures, *Structural Integrity and Life*, Vol. 9, No.1, pp.39-50.
- [19] A.M. Milovanović, T. Mijatović, Lj. Diković, Lj. Trumbulović, B. Drndarević: *Structural Integrity Analysis of a Cracked Pressure Vessel*,
- [20] *Structural Integrity and Life*, Vol.21, No.3, 2021, pp. 285–289
- [21] L. Jeremić, B. Đorđević, I. Šapić, S.A. Sedmak, N. Milovanović: *Manufacturing and Integrity of Ammonia Storage Tanks*, *Structural Integrity and Life*, ISSN 1451-3749, Vol.20, No.2, 2020, pp. 123–129.
- [22] M. Arandjelović, L. Jeremić, B. Đorđević, S. A. Sedmak, M. Opačić: *Integrity Assessment of Ammonia Storage Tank by Non-Destructive Testing*, *Structural integrity and life*, Vol.21, No.3, 2021, pp. 295–300.
- [23] A. Sedmak, L. Jeremić, N. Milovanović, S. Sedmak, N. Milošević, *How to deal with cracked welded structure – Application of Fracture Mechanics parameters to Structural Integrity Assessment*, ASR International Conference ” Welding 2021”
- [24] Stanojević, P.; Jovanović, A.; Kirin, S.; Misita, M.; Orlić, B.; Eremić, S., Some achievements in RBIM implementation according to RIMAP approach, *Structural Integrity and Life* 15, 2015, pp. 79-84TG in TG
- [25] Vučetić, T, Petrovski, B, Marković, Z, Jeremić, L, Milošević, N, Sedmak, A, Milovanović, N. Stiffener as a special design solution for pressure vessel 970, *Structural Integrity and Life*, 22(3), 259-262, 2022
- [26] I. Vučetić, S. Kirin, T. Vučetić, T. Golubović, A. Sedmak, *RISK ANALYSIS IN THE CASE OF AIR STORAGE TANK FAILURE AT RHPP BAJINA BAŠTA*, *STRUCTURAL INTEGRITY AND LIFE* Vol. 18, No 1 (2018), pp. 3–6
- [27] www.nde-ed.org
- [28] Von Ramm, O. T., and S. W. Smith. “Beam Steering with Linear Arrays.” *Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 30, no. 8 (Aug. 1983): pp. 438–452.
- [29] Erhards, A., H. Wüstenberg, G. Schenk, and W. Möhrle. “Calculation and Construction of Phased Array UT Probes.” *Proceedings 3rd German-Japanese Joint Seminar on Research of Structural Strength and NDE Problems in Nuclear Engineering*, Stuttgart, Germany, Aug. 1985.
- [30] Hosseini, S., S. O. Harrold, and J. M. Reeves. “Resolutions Studies on an Electronically Focused Ultrasonic Array.” *British Journal of Non-Destructive Testing*, vol. 27, no. 4 (July 1985): pp. 234–238.
- [31] Gururaja, T. T. “Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications.” Ph.D. thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, May 1984.
- [32] Hayward, G., and J. Hossack. “Computer models for analysis and design of 1-3

- composite transducers.” *Ultrasonic International 89 Conference Proceedings*, pp. 532–535, 1989.
- [33] Poon, W., B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. “Modelling ultrasonic array performance in simple structures.” *Insight*, vol. 46, no. 2 (Feb. 2004): pp. 80–84.
 - [34] Smiths, W. A. “The role of piezocomposites in ultrasonic transducers.” *1989 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, pp. 755–766, 1989.
 - [35] Hashimoto, K. Y., and M. Yamaguchi. “Elastic, piezoelectric and dielectric properties of composite materials.” *1986 IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings*, pp. 697–702, 1986.
 - [36] Oakley, C. G. “Analysis and development of piezoelectric composites for medical ultrasound transducer applications.” Ph.D. thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, May 1991.
 - [37] American Society for Nondestructive Testing. *Nondestructive Testing Handbook*. 2nd ed., vol. 7, *Ultrasonic Testing*, pp. 284–297. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 1991.
 - [38] Krautkramer, J., and H. Krautkramer. *Ultrasonic Testing of Materials*. 4th rev. ed., pp. 194–195, 201, and 493. Berlin; New York: Springer-Verlag, c1990.
 - [39] DGZfP [German Society for Non-Destructive Testing]. *Ultrasonic Inspection Training Manual Level III-Engineers*. 1992.
 - [40] Fleury, G., and C. Gondard. “Improvements of Ultrasonic Inspections through the Use of Piezo Composite Transducers.” *6th Eur. Conference on Non Destructive Testing*, Nice, France, 1994.
 - [41] Ritter, J. “Ultrasonic Phased Array Probes for Non-Destructive Examinations Using Composite Crystal Technology.” DGZfP, 1996.
 - [42] Ritter, J. “Ultrasonic Phased Array Probes for Non-Destructive Examinations Using Composite Crystal Technology.” DGZfP, 1996.
 - [43] Erhard, A., G. Schenk, W. Möhrle, and H.-J. Montag. “Ultrasonic Phased Array Technique for Austenitic Weld Inspection.” 15th WCNDT, paper idn 169, Rome, Italy, Oct. 2000.
 - [44] Wüstenberg, H., A. Erhard, G. Schenk. “Scanning Modes at the Application of Ultrasonic Phased Array Inspection Systems.” 15th WCNDT, paper idn 193, Rome, Italy, Oct. 2000.
 - [45] Engl, G., F. Mohr, and A. Erhard. “The Impact of Implementation of Phased Array Technology into the Industrial NDE Market.” 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, New Orleans, USA, May 2000.
 - [46] MacDonald, D. E., J. L. Landrum, M. A. Dennis, and G. P. Selby. “Phased Array UT Performance on Dissimilar Metal Welds.” EPRI. Proceedings, 2nd Phased Array Inspection Seminar, Montreal, Canada, Aug. 2001.
 - [47] Maes, G., and M. Delaide. “Improved UT Inspection Capability on Austenitic Materials Using Low-Frequency TRL Phased Array Transducers.” EPRI. Proceedings, 2nd Phased Array Inspection Seminar, Montreal, Canada, Aug. 2001.
 - [48] Engl, G., J. Achtzehn, H. Rauschenbach, M. Opheys, and M. Metala. “Phased Array Approach for the Inspection of Turbine Components—an Example for the Penetration of the Industry Market.” EPRI. Proceedings, 2nd Phased Array Inspection Seminar, Montreal, Canada, Aug. 2001.
 - [49] Ciorau, P., W. Daks, C. Kovacshazy, and D. Mair. “Advanced 3D tools used in reverse engineering and ray tracing simulation of phased array inspection of turbine components with complex geometry.” EPRI. Proceedings, 3rd Phased Array Ultrasound Seminar, Seattle, USA, June 2003.
 - [50] Ciorau, P. “Contribution to Detection and Sizing Linear Defects by Phased Array Ultrasonic Techniques.” 4th International NDE Conference in Nuclear Ind.,

- London, UK, Dec. 2004.
- [51] Moles, M., E. A. Ginzal, and N. Dubé. "PipeWIZARD-PA—Mechanized Inspection of Girth Welds Using Ultrasonic Phased Arrays." *International Conference on Advances in Welding Technology '99*, Galveston, USA, Oct. 1999.
 - [52] Lamarre, A., and M. Moles. "Ultrasound Phased Array Inspection Technology for the Evaluation of Friction Stir Welds." *15th WCNDT*, paper idn 513, Rome, Italy, Oct. 2000.
 - [53] Ithurralde, G., and O. Pétillon. "Application of ultrasonic phased-array to aeronautic production NDT." *8th ECNDT*, paper idn 282, Barcelona, Spain, 2002.
 - [54] Pörtzgen, N., C. H. P. Wassink, F. H. Dijkstra, and T. Bouma. "Phased Array Technology for mainstream applications." *8th ECNDT*, paper idn 256, Barcelona, Spain, 2002.
 - [55] Erhard, A., N. Bertus, H. J. Montag, G. Schenk, and H. Hintze. "Ultrasonic Phased Array System for Railroad Axle Examination." *8th ECNDT*, paper idn 75, Barcelona, Spain, 2002.
 - [56] P. Ciorau, N. Dubé, M. D. C. Moles, *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*, Olympos, ISBN 0-9735933-4-2, 2017
 - [57] Gros, X. E, N. B. Cameron, and M. King. "Current Applications and Future Trends in Phased Array Technology." *Insight*, vol. 44, no. 11 (Nov. 2002): pp. 673– 678.
 - [58] Reilly D., J. Berlinger, and G. Maes. "On the use of 3D ray-tracing and beam simulation for the design of advanced UT phased array inspection techniques." *Proceedings, 5th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, San Diego, USA, May 2006.
 - [59] www.twi-global.com/technical-knowledge
 - [60] I. Vučetić, S. Kirin, T. Vučetić, T. Golubović, A. Sedmak, *ANALIZA RIZIKA U SLUČAJU HAVARIJE REZERVOARA ZA VAZDUH U RHE BAJINA BAŠTA*, STRUCTURAL INTEGRITY AND LIFE Vol. 18, No 1 (2018), pp. 3–6
 - [61] Dodatni materijal za zavarivanje, Elektrode Jesenice, Honex, 2015
 - [62] Sedmak, S., Radakovic, Z., Milovic, Lj., Svetel, I., (2012) *Significance and applicability of structural integrity assessment*, Structural Integrity and Life, 12(1), 3-30.
 - [63] Sedmak, S., Grabulov, V., Momčilović, D., (2009) Chronology of lost structural integrity initiated from manufacturing defects in welded structures, Structural Integrity and Life, 9(1), 39-50.
 - [64] Neggaz, D, El-Azzizi, A, Hadj Meliani, M, Nateche, T. Failure Assessment Diagram (FAD) and Patch Repairing Index (PRI) on damaged structure reinforced by a composite patch, Structural integrity and life, 20(3), 211-218, 2020
 - [65] Zaidi, R, Sedmak, A, Kirin, S, Martić, I, Šarkočević, Ž. Structural integrity and life assessment of oil drilling rig pipes using analytical method, Structural integrity and life, 22(1), 63-68
 - [66] Golubović, T, Sedmak, A, Spasojević Brkić, V, Kirin, S, Rakonjac, I. Novel risk based assessment of pressure vessels integrity. Technical Gazette 25(3), 803-807, 2018
 - [67] Gerić, K., Crack initiation and growth in high strength steel welded joints, (in Serbian) Doctoral Thesis, University of Belgrade. (1997)
 - [68] Sedmak, A, Sedmak, S, Milović, Lj. Pressure equipment integrity assessment by elastic-plastic fracture mechanics methods, Monograph, DIVK, Belgrade, 2011

- [69] Newman, JC, Raju, IS. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack, *Engineering Fracture Mechanics* 15(1–2), 185-192, 1981
- [70] Vučetić, I, Kirin, S, Vučetić, T, Golubović, T, Sedmak, A. Risk Analysis in the Case of Air Storage Tank Failure at RHPP Bajina Bašta (in Serbian), *Structural Integrity and Life*, Vol. 18 (1), 3-6, 2018

Biografski podaci

Mirjana F. Opačić, master inženjer mašinstva, rođena je 11.10.1986. godine u Beogradu. Osnovnu školu Slobodan Bajić – Paja završila je u Pećincima, dok je gimnaziju „Branko Radičević“ završila u Staroj Pazovi.

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisala je 2005. godine. Diplomirala je master studije na Mašinskom fakultetu u Beogradu 2010. godine, na smeru Vazduhoplovstvo, sa prosečnom ocenom 9,00. Školske 2010/2011. godine upisuje doktorske studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

2011. godine počinje da radi kao projektni inženjer – saradnik u oblasti industrijskog razvoja i koordinacije projekata, u Inovacionom centru Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

Danas, Mirjana je inženjer sa više od 13 godina iskustva u oblasti održivog razvoja energetske kapaciteta postrojenja na biomasu, kontrole kvaliteta u industrijskim postrojenjima, kao i naprednim tehnologijama ispitivanja bez razaranja.

Takođe je bila uključena u razvojne i implementacione projekte u sektoru obnovljivih izvora energije kao što su: „Biomasa u Srbiji“, „Unapređenje industrijskog postrojenja sa fluidizovanim slojem u okviru razvoja tehnologije za energetske efikasno i tehnološki opravdano sagorevanje različitih otpadnih materija u fluidizovanom ložištu“, „Inovativna upotreba niskotemperaturnih geotermalnih resursa u Jugoistočnoj Evropi“, „Razvoj politike upotrebe solarne energije“, „Zelena tranzicija i implementacija Direktive o industrijskim emisijama u Srbiji 2022-2025. godine“, itd. Radila je i na projektima saradnje sa privredom kao ekspert za potrebe industrijskog sektora u oblasti kontrole kvaliteta, industrijske opreme, opreme za ispitivanje bez razaranja, integracije sistema, inspekcije, sertifikacije itd. Takođe, bila je koordinator prioritetnog domena u izradi Strategije pametne specijalizacije Srbije. Radila je i aktivno učestvuje na nekim od projekata finansiranih od strane EU, Svetske banke, GIZ, JICA, UNDP i drugih.

Prilog 1

Izjava o autorstvu

Potpisana

Mirjana F. Opačić

broj indeksa

D74/2010

Izjavljujem:

da je doktorska disertacija pod naslovom:

PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH SPOJEVA SA NEPRIHVATLJIVIM GREŠKAMA

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktorandkinje



Beograd, 13.07.2023.

Prilog 2

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Mirjana F. Opačić

Broj indeksa: D74/2010

Studijski program: Doktorske Akademske Studije - DAS

Naslov rada: PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH SPOJEVA SA NEPRIHVATLJIVIM GREŠKAMA

Mentor: Prof. dr Aleksandar Sedmak

Potpisana: Mirjana F. Opačić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje na portal Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktorandkinje



Beograd, 13.07.2023.

Prilog 3

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH SPOJEVA SA NEPRIHVATLJIVIM GREŠKAMA

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
- ③. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktorandkinje



Beograd, 13.07.2023.

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda