

# Razlučivanje orijentacije linijskih indikacija pri ispitivanju ultrazvukom

---

**Majher, Sonja**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:146947>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Sonja Majher**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentori:

Prof. dr. sc. Josip Stepanić, dipl. ing.

Student:

Sonja Majher

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Josipu Stepaniću na iskazanom razumijevanju i stručnim savjetima kroz izradu ovog rada. Također se zahvaljujem dipl. Ing. Miroslavu Omeliću te svim djelatnicima Katedre za nerazorna ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Posebnu zahvalu bih željela uputiti svojim roditeljima, bratu, dečku i prijateljima koji su mi pružali podršku tijekom mog školovanja.

Sonja Majher



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Sonja Majher** Mat. br.: 1194021308

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **RAZLUČIVANJE ORIJENTACIJE LINIJSKIH INDIKACIJA PRI ISPITIVANJU ULTRAZVUKOM**

Naslov rada na engleskom jeziku: **RESOLVING THE ORIENTATION OF LINEAR INDICATIONS WITHIN ULTRASONIC TESTING**

Opis zadatka:

Uvodno opisati sustav za nerazornu metodu ispitivanja ultrazvukom s naglaskom na metodi koherentnog ultrazvučnog polja. Navesti i analizirati glavne karakteristike uobičajenih tehnika ispitivanja metodom koherentnog ultrazvučnog polja.

Postaviti sustav za nerazorno ispitivanje metalnih objekata jednostavne geometrije primjenom ultrazvuka u tehnici odjeka i primjenom koherentnog ultrazvučnog polja. Izdvojiti značajke sustava i diskutirati njihove uobičajene raspone.

Pripremiti skup uzoraka s linijskim indikacijama jednake visine a različite orijentacije u odnosu na referentnu, kontaktnu plohu primopredajnika i ispitivanog objekta. Provesti ultrazvučna ispitivanja pripremljenih uzoraka, analizirati i međusobno usporediti dobivene rezultate.

Zaključno, izdvojiti mjeru razlučivanja orijentacije linijskih indikacija u korištenim ultrazvučnim ispitivanjima. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
13. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
15. siječnja 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
21., 22. i 23. siječnja 2015.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Josip Stepanić

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA .....	3
3. UVOD O METODI ULTRAZVUČNIM ISPITIVANJEM .....	8
4. ISPITIVANJE ULTRAZVUČNOM METODOM.....	17
5. METODA ISPITIVANJA KOHERENTNIM ZVUČNIM POLJEM.....	25
6. PLAN EKSPERIMENTA .....	35
7. REZULTATI ISPITIVANJA .....	46
8. ZAKLJUČAK I DALJNJA RAZMATRANJA .....	63
LITERATURA.....	64
PRILOZI.....	65

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1	Priprema uzorka i metalografska analiza .....	2
Slika 2.1	Primjeri metoda vizualne kontrole: vizualno (izvor: spectrum.ndt.com), boroskopom (izvor: iprt.iastate.edu) i pomoću profil projektora .....	3
Slika 2.2	Instrumenti za provedbu dimenzionalne kontrole: koordinatni mjerni uređaj (lijevo), pomično mjerilo (desno).....	4
Slika 2.3	Ispitivanje penetrantima: UV penetrant (lijevo) (izvor: technologyplusinc.com), nanošenje razvijača (desno).....	5
Slika 2.4	Shematski prikaz funkcioniranja metode ispitivanja magnetskim česticama .....	5
Slika 2.5	Ispitivanje magnetskim česticama .....	6
Slika 2.6	Uređaj za radiografiju (lijevo), obrada radiograma na računalu (desno) .....	7
Slika 3.1	Frekvencijski spektar zvučnih valova .....	9
Slika 3.2	Longitudinalni i transverzalni val.....	10
Slika 3.3	Rayleighovi valovi .....	10
Slika 3.4	Karakteristike vala.....	11
Slika 3.5	Atenuacija.....	14
Slika 3.6	Refleksija.....	15
Slika 3.7	Refrakcija .....	15
Slika 3.8	Zakon transmisije .....	16
Slika 4.1	Zvučni snop .....	18
Slika 4.2	Žarište pretvornika .....	19
Slika 4.3	Princip puls-eho metode .....	20
Slika 4.4	A-prikaz.....	21
Slika 4.5	B-prikaz .....	22
Slika 4.6	C-prikaz .....	23
Slika 5.1	Snimka medicinskog ultrazvuka .....	25
Slika 5.2	Koherentni pretvornici (izvor: <a href="http://olympus-ims.com">http://olympus-ims.com</a> ) .....	26
Slika 5.3	Usporedba konvencionalnog ultrazvuka i koherentne sonde .....	27
Slika 5.4	Slikoviti prikaz koherentnog pretvornika.....	27
Slika 5.5	Piezokompozitni element – piezoelektrični elementi u polimernoj matrici.....	28
Slika 5.6	Shematski prikaz koherentnog pretvornika .....	28
Slika 5.7	Različiti načini slaganja piezoelektričnih elemenata u koherentnom pretvorniku	29
Slika 5.8	Polimerni klinovi (izvor: <a href="http://olympus-ims.com">http://olympus-ims.com</a> ).....	30
Slika 5.9	A-prikaz zvučnog snopa koji se reflektira od dvije indikacije na različitim dubinama i B-prikaz uzorka s tri indikacije dobiven pregledom sondom koherentnog ultrazvučnog polja (desno)(izvor: <a href="http://olympus-ims.com">http://olympus-ims.com</a> ).....	31
Slika 5.10	Smjer skeniranja i prikaz dobiven konvencionalnim ultrazvukom (izvor: <a href="http://olympus-ims.com">http://olympus-ims.com</a> ) .....	32
Slika 5.11	Smjer skeniranja i prikaz dobiven koherentnom sondom (izvor: <a href="http://olympus-ims.com">http://olympus-ims.com</a> ).....	32
Slika 5.12	S-prikaz .....	33
Slika 6.1	Odbijanje valova ultrazvučnog snopa od indikacije u ovisnosti od njenog oblika i položaja .....	35
Slika 6.2	CAD model uzorka za ispitivanje .....	36
Slika 6.3	Računalna obrada radiograma uzoraka .....	37
Slika 6.4	Specifikacije uređaja Phasor XS (izvor: <a href="http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/portable-flaw-detectors/phasor-series.html">http://www.ge- mcs.com/en/ultrasound/portable-flaw-detectors/phasor-series.html</a> ) .....	39
Slika 6.5	Specifikacije pretvornika 2,25 MHz, 16 elemenata .....	40
Slika 6.6	Postavke za mjerenje, sonda GE 115-500-017 2,25 MHz, 16 elemenata .....	40

Slika 6.7	Specifikacije pretvornika 4 MHz, 16 elemenata .....	41
Slika 6.8	Postavke za mjerenje, sonda GE 115-500-013 4 MHz, 16 elemenata .....	41
Slika 6.9	Kontaktno sredstvo korišteno u eksperimentu .....	42
Slika 6.10	Tehničke specifikacije kontaktnog sredstva (izvor: <a href="http://www.ge-mcs.com/download/ultrasound/transducers/GEIT-20117EN_ultrasonic-transducer-catalog.pdf">http://www.ge-mcs.com/download/ultrasound/transducers/GEIT-20117EN_ultrasonic-transducer-catalog.pdf</a> ) .....	42
Slika 6.11	Plan mjerenja .....	43
Slika 6.12	Položaj i nagib linijskih indikacija u uzorcima .....	44
Slika 6.13	Preliminarno ispitivanje i pripremanje opreme .....	44
Slika 6.14	Postavljeni eksperiment – uređaj, sonda i graničnik za pozicioniranje sonde .....	45
Slika 6.15	Ispitivanje uzoraka .....	45
Slika 7.1	Definiranje kuta nagiba indikacije s obzirom na položaj sonde i površinu na kojoj se vrši ispitivanje .....	46
Slika 7.2	Usporedba odaziva pri 4 MHz, kut indikacije 20° .....	51
Slika 7.3	S-prikaz indikacije pod kutom od 10° sniman pretvornikom 2,25 MHz (lijevo) i 4 MHz (desno) .....	54
Slika 7.4	Prikazi uzoraka sa kutovima indikacija po redu s lijeva na desno: 0°, 10°, 20°, 30° .....	58
Slika 7.5	Specifikacije pretvornika 5 MHz, 64 elementa .....	59
Slika 7.6	Postavke za mjerenje, sonda GE 115-100-007 5 MHz, 64 elemenata .....	59
Slika 7.7	Osciloskop .....	61
Slika 7.8	Signal za nagib indikacije +20° .....	61
Slika 7.9	Nagib indikacije +30°, vidljiv obrtaj u fazi na RF signalu .....	62
Slika 7.10	Nagib indikacije +10°, udvostručenje signala .....	62



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 6-1 Kutovi indikacija u uzorcima .....	38
Tablica 7-1 Sonda 4 MHz, kut 60°, 3 pozicije .....	47
Tablica 7-2 Sonda 4 MHz, kut 64°, 3 pozicije .....	47
Tablica 7-3 Sonda 2,25 MHz, kut 60°, 3 pozicije .....	48
Tablica 7-4 Sonda 2,25 MHz, kut 64°, 3 pozicije .....	49
Tablica 7-5 Sonda 4 MHz, kutovi.....	50
Tablica 7-6 Sonda 2,25 MHz, kutovi.....	50
Tablica 7-7 Kut 60°, frekvencije .....	52
Tablica 7-8 Kut 64°, frekvencije .....	52
Tablica 7-9 S-prikazi za sondu 4 MHz, kut 60° .....	55
Tablica 7-10 S-prikazi za sondu 2,25 MHz, kut 60° .....	56
Tablica 7-11 Zavisnost odaziva od indikacije od raspršenja snopa .....	57



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\lambda$	[m]	<i>valna duljina</i>
$c$	[m/s]	<i>brzina širenja zvuka kroz materijal</i>
$f$	[Hz]	<i>frekvencija</i>
$T$	[s]	<i>period</i>
$Z$	[kg/m <sup>2</sup> s]	<i>akustička impedancija</i>
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	<i>gustoća medija</i>
$A_0$	[dB]	<i>amplituda vala u određenoj točki</i>
$A$	[dB]	<i>reducirana amplituda nakon što je val prešao udaljenost z o</i>
$\alpha$	[dB/MHz * m]	<i>koeficijent atenuacije vala u z – smjeru</i>
$z$	[m]	<i>točka u kojoj se promatra val</i>
$I_0$	[W/m <sup>2</sup> ]	<i>intenzitet vala u određenoj točki</i>
$I$	[W/m <sup>2</sup> ]	<i>reducirani intenzitet nakon što je val prešao udaljenost z od početne točke</i>
$R$	-	<i>koeficijent refleksije</i>
$Z_1$	[kg/m <sup>2</sup> s]	<i>akustička impedancija materijala upadnog vala</i>
$Z_2$	[kg/m <sup>2</sup> s]	<i>akustička impedancija materijala reflektiranog vala</i>
$I_r$	[W/m <sup>2</sup> ]	<i>intenzitet reflektiranog vala</i>
$I_i$	[W/m <sup>2</sup> ]	<i>intenzitet upadnog vala</i>
$\alpha_1$	[°]	<i>kut upadnog vala</i>
$\alpha_2$	[°]	<i>kut reflektiranog vala</i>
$l_{ind}$	[mm]	<i>duljina indikacije</i>
$x$	[mm]	<i>Širina indikacije na radiogramu</i>
$D_{eff}$	[mm]	<i>efektivni radijus virtualne sonde</i>
$\gamma_6$	[°/rad]	<i>kut divergencije zvučnog snopa</i>

**SAŽETAK**

Cilj ovog rada je provesti ultrazvučna ispitivanja pripremljenih uzoraka te izdvojiti zaključak o mjeri razlučivanja orijentacije linijskih indikacija u uzorcima.

Na početku rada je opisan sustav za nerazornu metodu ispitivanja ultrazvukom s naglaskom na metodi koherentnog ultrazvučnog polja. Navedene su i analizirane glavne karakteristike uobičajenih tehnika ispitivanja ultrazvukom te su pobliže opisani sustavi za ispitivanje primjenom koherentnog ultrazvučnog polja.

Pripremljen je skup od četiri uzorka sa linijskim indikacijama jednake visine, a različite orijentacije u odnosu na referentnu, kontaktnu plohu primopredajnika i ispitivanog objekta. Provedena su ultrazvučna ispitivanja te je ponuđen zaključak o razlučivanju orijentacije indikacija u uzorcima, te prednostima i nedostacima korištenja metode koherentnog ultrazvučnog polja u odnosu na konvencionalne metode ispitivanja ultrazvukom.

Ključne riječi:

Nerazorna ispitivanja, ispitivanje bez razaranja, ndt, ultrazvuk, metoda koherentnog polja, ufazirano polje, phased array, koherentno polje, koherentni pretvornik

## 1. UVOD

Kako bi se osigurala ispravnost i sigurnost konstrukcijskih komponenti i sustava, pratilo stanje i otkrile nepravilnosti nastale uslijed tehnoloških ili eksploatacijskih uvjeta, potrebno je provoditi ispitivanja pojedinih svojstava komponenata i materijala tih sustava kako u proizvodnji, tako i tokom eksploatacije. Ispitivanjima se želi postići otkrivanje i sprječavanje kvarova i nedostataka koji mogu dovesti do katastrofalnih posljedica poput prometnih nesreća, eksplozija cjevovoda, rušenja građevina, zatajenja komponenti u sklopovima i sl. Različite vrste ispitivanja se provode u različitim stadijima izrade.

### 1.1. O ISPITIVANJU MATERIJALA

Za utvrđivanje određenih svojstava materijala nije moguće zadržati integritet početnog uzorka. U tom slučaju govorimo o ispitivanjima s razaranjem. Razaranje ili oštećivanje početnog uzorka nam je nužno potrebno za ispitivanje slijedećih svojstava:

- Vlačno ispitivanje na kidalici (granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, prekidna čvrstoća, kontrakcija, izduženje,...)
- Tvrdoća (tvrdoća po Brinellu, tvrdoća po Vickersu, tvrdoća po Rockwellu, tvrdoća po Shoreu, Mohsova ljestvica tvrdoće, Poldijeva metoda, sklerometar ili Schmidtov čekić, ispitivanje tvrdoće po Knoopu, ispitivanje mikrotvrdoće po Grozdinskom)
- Ispitivanje udarne žilavosti (Charpyjev bat, ispitivanje udarnog rada loma po Izodu, temperatura nulte duktilnosti po Pelliniju, dinamička sila loma po Bruggeru, tehnološka ispitivanja udarom)
- Ispitivanja iz područja mehanike loma (COD, CTOD, JIC, KIC)
- Korozijska ispitivanja (opća korozija, korozija uz naprezanje pri djelovanju različitih agresivnih medija, pitting, odnosno rupičasta korozija, selektivna korozija)
- Raznovrsna statička i dinamička ispitivanja (puzanje, ispitivanje dinamičke izdržljivosti, zamor materijala)
- Tlačne probe s razaranjem (ispitivanje na uvijanje ili torziju, ispitivanje savijanjem, ispitivanje na smicanje ili odrez)
- Različite probe i probe zavarljivosti (ispitivanje limova i traka izvlačenjem, ispitivanje limova i traka savijanjem, ispitivanje limova i traka uvijanjem, ispitivanje cijevi

- proširivanjem, ispitivanje cijevi priljubljanjem, ispitivanje cijevi savijanjem, ispitivanje cijevi spljoštavanjem, ispitivanje cijevi razvlačenjem prstena do loma, ispitivanje cijevi izvijanjem, ispitivanje žice previjanjem, ispitivanje zavarenih spojeva)
- Ispitivanje sadržaja kemijskih elemenata (spektroskopija, kemijska metoda na temelju strugotine metala)
  - Metalografska ispitivanja



**Slika 1.1** Priprema uzorka i metalografska analiza

S druge strane, nerazorna ispitivanja imaju izrazito širok spektar primjene. Ona predstavljaju skup metoda kojima je cilj utvrđivanje svojstava materijala ili stanja komponenata sustave, te otkrivanje raznovrsnih grešaka, odnosno defekata, a da se pritom ne dovodi do oštećivanja ili mijenjanja ispitivanog materijala, odnosno funkcionalnost ispitivanog dijela ostaje kakva je i bila. Upravo iz tog razloga, ispitivanja nerazornim metodama predstavljaju odličan balans između što većeg stupnja kontrole kvalitete i isplativosti.

Glavna svrha nerazornih ispitivanja je utvrđivanje kvalitete i usklađenosti osnovnog materijala i zavarenih spojeva sa zahtjevima tehničkih specifikacija i standarda. Ovim metodama se najčešće kontroliraju stavke na terenu, i to posude i cjevovodi pod pritiskom, noseće konstrukcije, te industrijski proizvodi i poluproizvodi.

Normalno, nisu sve NDT metode jednako pogodne za otkrivanje svih vrsta grešaka, tako da se prije donošenja konačnog suda o stanju ispitivanog materijala najčešće koristi kombinacija više različitih vrsta kontrole.

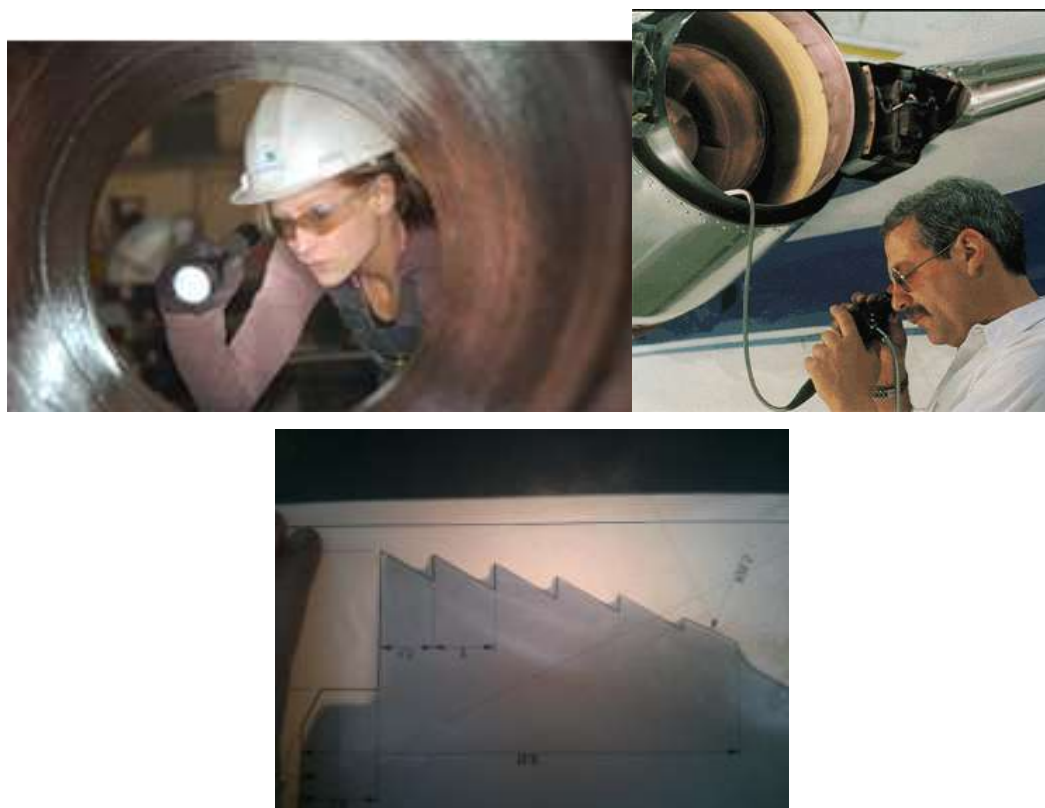
## 2. ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA

Postoji više metoda ispitivanja bez razaranja, različitih prema fizikalnim načelima iz njih i načinima primjene. To su vizualni pregled, dimenzionalna kontrola, penetrantsko ispitivanje, ispitivanje magnetnim česticama, ultrazvučno ispitivanje, radiografsko ispitivanje, akustička emisija, ispitivanje nepropusnosti i ostale metode. <sup>[3]</sup>

### 2.1. VIZUALNI PREGLED

Prvi vid kontrole koji se izvodi bi trebala uvijek biti vizualna kontrola. To je najjeftiniji oblik kontrole, potrebna je minimalna obuka za korištenje ove metode, minimalna priprema objekta, daje trenutno rezultate, a može dati korisne rezultate kako o stanju promatrane površine, tako i o potrebi ispitivanja nekom drugom metodom. Tehnike kontrole vizualnom metodom se dijele na direktne i indirektne. Oku nedostupnim mjestima se pristupa indirektno pomoću posebne opreme i vrši se vizualna kontrola.

Nedostatak ove metode jest što je nju u principu moguće primjenjivati samo na velike površinske diskontinuitete. Također postoji veliki rizik od pogrešne interpretacije ogrebotina.



**Slika 2.1** Primjeri metoda vizualne kontrole: vizualno (izvor: spectrum.ndt.com), boroskopom (izvor: iprt.iastate.edu) i pomoću profil projektora

## 2.2. DIMENZIONALNA PROVJERA

Dimenzionalna provjera je usko povezana uz vizualnu kontrolu. Ona se vrši pomoću različitih uređaja za mjerenje geometrije i dimenzija (pomično mjerilo, CMM i sl.)



**Slika 2.2 Instrumenti za provedbu dimenzionalne kontrole: koordinatni mjerni uređaj (lijevo), pomično mjerilo (desno)**

## 2.3. ISPITIVANJE PENETRANTIMA

Kod ispitivanja penetrantima se na prethodno pripremljenu površinu nanosi sredstvo (penetrant). Vrijeme prodiranja penetranta u pukotinu zavisi od veličine pukotine i svojstva penetranta, nakon čega se na odgovarajući način uklanja višak penetranta. Nakon toga se nanosi razvijlač, najčešće bijele boje, koji izvlači zaostali penetrant iz pukotine i ostaje jasno vidljiva crta od penetranta iz pukotine.

Ispitivanje penetrantima je naročito pogodno uslijed niske cijene i brzine samog procesa ispitivanja - rezultati su trenutno vidljivi i nije potrebna kompleksna obuka radnika. Međutim, otežano je ispitivanje hrapavih površina, metoda je pogodna samo za površinske defekte i potrebne su prethodne pripreme ispitivane površine koja mora biti u zadovoljavajućem stanju - očišćena i odmašćena. Također je potreban direktan vizualni kontakt i posebni su zahtjevi što se tiče adekvatnog osvjetljenja za obojane penetrante i posebnog osvjetljenja za fluorescentne penetrante.





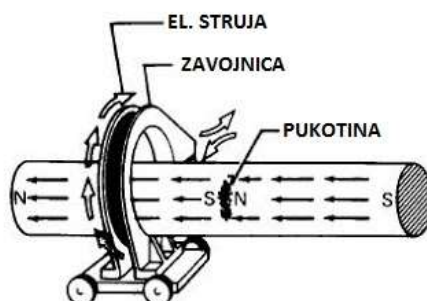
**Slika 2.3 Ispitivanje penetrantima: UV penetrant (lijevo) (izvor: technologyplusinc.com), nanošenje razvijaa (desno)**

## 2.4. ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA

Kontrola magnetskim česticama se zasniva na principu magnetske indukcije. Električna struja prolazi kroz vodič i oko njega se stvara magnetsko polje istosmjerne ili izmjenične struje, čije silnice prolaze i kroz feromagnetični materijal koji se ispituje, tj. koji je u dodiru sa magnetskim jarmom ili magnetskim elektrodama.

Za otkrivanje pukotine je potrebno da smjer silnica bude što je moguće okomitiji na pukotinu. Po površini ispitivanog materijala se posipaju magnetske čestice, suhe ili u suspenziji, i one će se okupiti oko pukotine okomite na smjer silnica magnetskog polja.

Metodu ispitivanja pukotina magnetskim česticama odlikuju niska cijena i brzina. Njome je moguće otkriti površinske defekte, kao i one ispodpovršinske (približno do 6 mm dubine). Metoda je jednostavna za upotrebu, odnosno potreban je umjeren stupanj obuke za njeno korištenje.



**Slika 2.4 Shematski prikaz funkcioniranja metode ispitivanja magnetskim česticama**

Ograničavajući faktor ove metode je to što je moguće ispitivati samo feromagnetske materijale i detekcija defekta uvelike ovisi o njegovoj orijentaciji u odnosu na magnetske silnice. Površinu nad kojom se vrši kontrola je potrebno detaljno pripremiti, mora biti dostupna i poželjno je da bude glatka, s obzirom da je otežana detekcija na hrapavim površinama. Također je nakon provedene kontrole potrebno površinu demagnetizirati.



Slika 2.5 Ispitivanje magnetskim česticama

## 2.5. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE

Pri radiografskom ispitivanju koriste se rendgenske zrake ili gama zrake. Prema EN standardima ova se metoda koristi za ispitivanje čeličnih uzoraka do 40 mm debljine. Prodornost gama i rendgenskih zraka je drugačija. Rendgenske zrake u pravilu daju kvalitetnije radiograme, međutim, gama zrake imaju veću prodornost te se one u pravilu koriste za ispitivanje uzoraka debljine preko 20 mm.

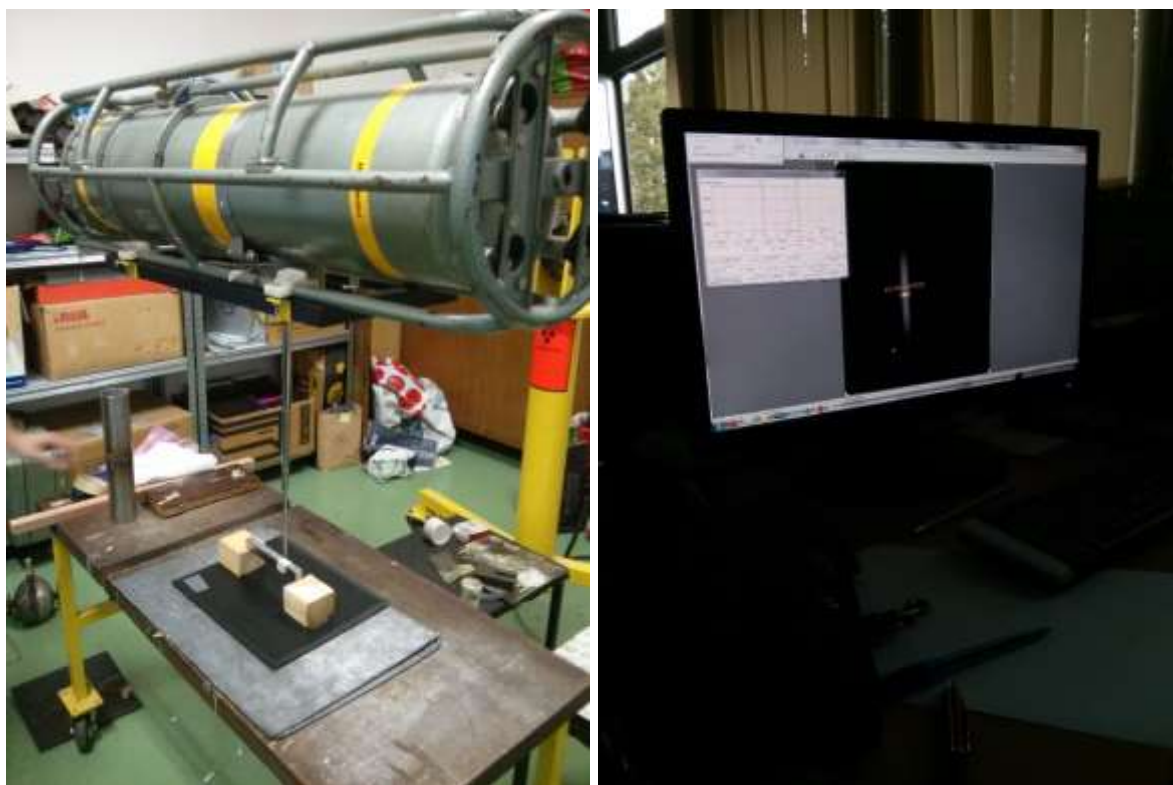
Rendgenske zrake nastaju naglim kočenjem ubrzanog elektronskog snopa na metalnoj ploči (anodi/antikatodi u rendgenskoj cijevi). S druge strane, gama zrake nastaju prilikom spontanog raspada nestabilnih atomskih jezgri - radioaktivnih izotopa i prirodnih radioaktivnih materijala.

Obje vrste zračenja su elektromagnetska zračenja i ostavljaju trag na industrijskoj foliji - filmskoj emulziji. Na tako dobivenom radiogramu se i zasniva radiografsko ispitivanje unutrašnjih grešaka u materijalu.

Nisu potrebne ekstenzivne pripreme uzorka za ispitivanje i moguće je otkriti površinske, ali i defekte unutar materijala. Metoda je pogodna za inspekciju teško dostupnih dijelova. Dobiveni zapis je trajan.

Ograničenja ove metode su velika opasnost po zdravlje prilikom nepravilnog rukovanja, dosta visoka cijena opreme i mala brzina ispitivanja. Također, detekcija indikacije ovisi o njenoj orijentaciji unutar materijala. Potrebna je i ekstenzivna obuka za rad ovom metodom.

Ispitivanje gama zrakama ima nešto nižu cijenu od ispitivanja rendgenskim zrakama, ali i manju kvalitetu radiograma.



**Slika 2.6** Uređaj za radiografiju (lijevo), obrada radiograma na računalu (desno)

---

### **3. UVOD O METODI ULTRAZVUČNIM ISPITIVANJEM**

Uz radiografska ispitivanja, najviše korištena metoda za otkrivanje unutrašnjih defekata u materijalu su ispitivanja ultrazvukom.

Temelj ispitivanja materijala ultrazvučnom metodom jest svojstvo širenja ultrazvučnih valova kroz homogene materijale te njihovog odbijanja, refleksije, na granicama materijala različitih akustičkih osobina, tj. od „greški“ odnosno nehomogenosti u materijalu.

Prednost ispitivanja ultrazvučnim valovima jest da takvim ispitivanjem ne dolazi do narušavanja integriteta ispitivanog sustava; ono spada u područje nerazornih ispitivanja.

Začetak metode ispitivanja ultrazvukom datira oko 1930. g. Tada je sovjetski znanstvenik, Sergei Y. Sokolov predstavio svoju teoriju, a nekoliko godina kasnije i demonstrirao tehniku detektiranja indikacija u metalu. Kada je začeo svoju ideju, potrebna tehnologija još nije bila dostupna, no on je smatrao kako bi se takvom tehnologijom mogle otkrivati nepravilnosti u krutinama poput metala. Kroz naredno desetljeće su mnogi nastavili njegov rad, većinom i u tajnosti i neovisni jedni od drugih te je 1940. predan, a kasnije i odobren, prvi zahtjev za patent za uređaj kojime je moguće pomoću ultrazvuka detektirati nepravilnost u materijalu i njegov nosilac je Floyd Firestone.<sup>[4]</sup>

### 3.1. FIZIKALNE OSNOVE ULTRAZVUKA

U fizici, zvuk predstavlja mehaničko titranje čestica kroz neki medij. Frekvenzijski raspon zvuka koji je čujan ljudskom uhu jest od 20 Hz do 20 000 Hz. Osim zvuka, zvučni spektar čine još i infrazvuk i ultrazvuk.

Ultrazvukom se smatra titranje s frekvencijom višom od one koju ljudsko uho može detektirati, odnosno frekvencijama iznad 20 kHz. Većina ultrazvučnih uređaja radi na frekvencijama od 0,1 do 25 MHz.

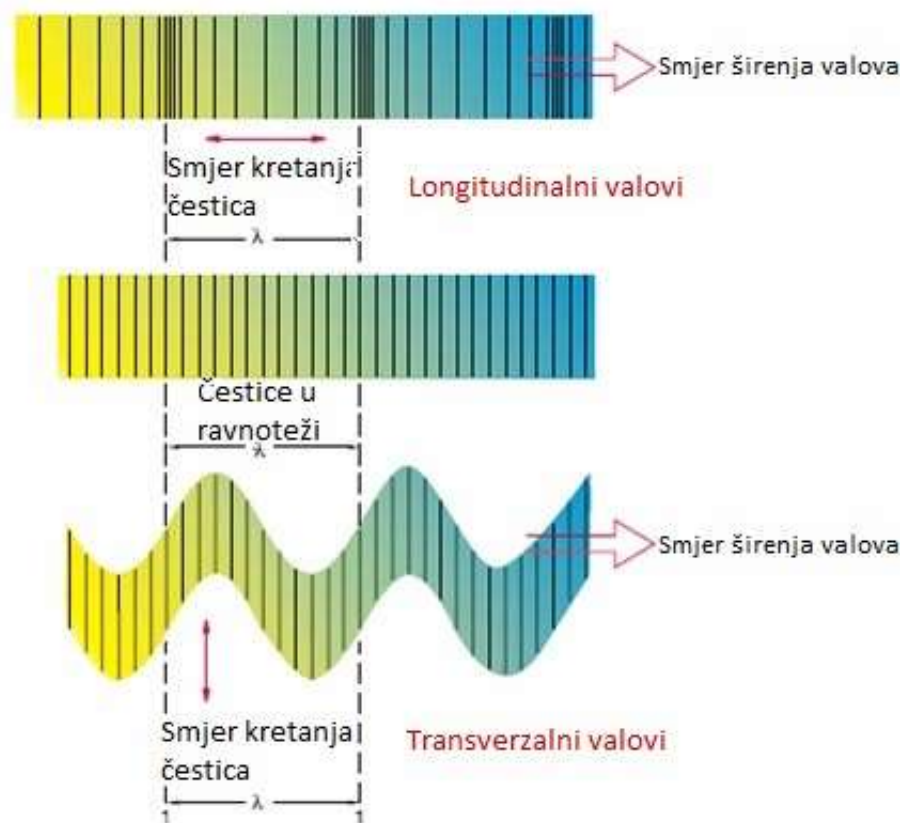


Slika 3.1 Frekvenzijski spektar zvučnih valova

Kada se radi o korištenju ultrazvučnih valova za ispitivanje materijala, proučava se njihovo rasprostiranje kroz krute medije.

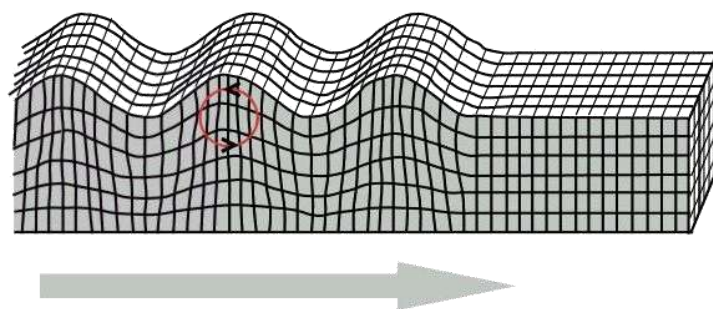
U krutim materijalima, zvučni valovi se mogu širiti na četiri osnovna načina, ovisno od načina oscilacije čestica u materijalu. Zvuk se tako može širiti u obliku longitudinalnih valova, transverzalnih valova, površinskih valova i u tankim materijalima kao pločni valovi. Za potrebe ispitivanja materijala ultrazvukom, većinom se kao načini prijenosa zvuka koriste longitudinalni i transverzalni valovi.

**Longitudinalne valove** karakterizira osciliranje čestica u smjeru širenja valova, dok kod **transverzalnih valova**, čestice osciliraju okomito na smjer širenja valova.



Slika 3.2 Longitudinalni i transverzalni val

**Površinski (Rayleighovi) valovi** se prenose površinom debljih, krutih materijala. Kretanje čestica kod ovakvog tipa vala je eliptično. Samim time, brzina širenja iznosi otprilike 90% brzine širenja transverznog vala i dubina prodiranja je približno jednaka valnoj duljini.



Slika 3.3 Rayleighovi valovi

**Pločni valovi** su slični površinskim valovima, uz razliku što oni nastaju samo u materijalima koji su debljine do nekoliko valnih duljina.

Brzina širenja zvučnih valova kroz materijal ovisi o svojstvima materijala i temperaturi i ona se razlikuje za različite materijale.

### 3.2. VALNA DULJINA, BRZINA I FREKVENCIJA

Zvučne se vibracije šire prostorom u obliku valova, na sličan način kao i svjetlost. No za razliku od svjetlosnih valova koji se mogu širiti kroz vakuum, zvučnim valovima je za njihovo širenje potreban medij: krutina ili fluid.

Osnovne karakteristike valova koji se šire kroz krute, izotropne materijale su valna duljina, frekvencija i brzina širenja vala.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

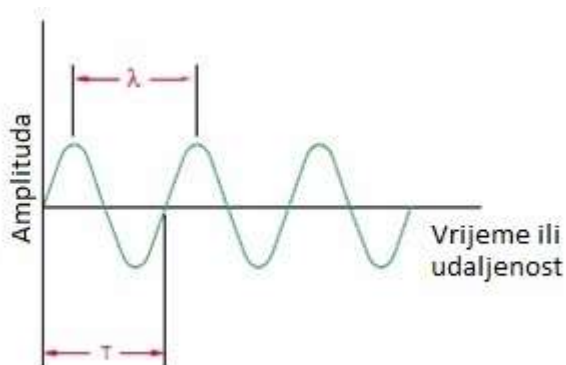
$\lambda$  – valna duljina [m]

$c$  – brzina širenja zvuka kroz materijal [m/s]

$f$  – frekvencija [Hz]

$$f = \frac{1}{T}$$

$T$  – period [s]



Slika 3.4 Karakteristike vala

Kako je vidljivo iz izraza valna duljina je proporcionalna sa brzinom širenja vala i obrnuto proporcionalna sa frekvencijom. Budući da je brzina širenja ultrazvuka kroz određeni materijal konstanta za zadane uvjete, veličine na koje je moguće utjecati su frekvencija i valna duljina.

Uzima se da kako bi indikacija u materijalu mogla biti uočena, potrebno je da bude veća od jedne polovice valne duljine ultrazvučnih valova kojima se vrši ispitivanje. Što je viša frekvencija ultrazvuka viša, to je veća razlučivost i moguće je otkriti manje defekte. No isto tako, sa višom frekvencijom dolazi do šuma, odnosno većeg rasipanja ultrazvučnih valova, budući da se odbijaju od samog materijala (npr. granica zrna u lijevanim materijalima) te je teže odrediti što je defekt, a što utjecaj same strukture materijala. Valovi većih valnih duljina, s

druge strane prodiru dublje u materijal, međutim, razlučivost je manja. Tako da prilikom određivanja parametara ispitivanja treba paziti na ravnotežu između potrebne razlučivosti i dubine na kojoj tražimo defekte.

### 3.3. AKUSTIČKA IMPEDANCIJA

Produkt gustoće materijala i brzine širenja ultrazvuka kroz određeni materijal se naziva akustičnom impedancijom.

Računa se prema izrazu:

$$Z = \rho * c$$

Gdje su:

$Z$  – akustička impedancija [ $kg/m^2s$ ]

$c$  – brzina širenja zvuka kroz medij [ $m/s$ ]

$\rho$  – gustoća medija [ $kg/m^3$ ]

Akustička impedancija je važna za određivanje akustičke transmisije i refleksije na granici dva sredstva različitih akustičnih impedancija, prilikom konstruiranja ultrazvučnih pretvornika, te pri procjeni apsorpcije zvuka unutar nekog medija.

Akustička impedancija dva medija je karakteristika koja određuje stupanj refleksije. U slučaju dva materijala sa istom akustičnom impedancijom, refleksije nema.



### 3.4. ATENUACIJA

Prilikom širenja zvuka kroz medij, njegov intenzitet se smanjuje sa udaljenosti. U idealnom materijalu bi jedini faktor koji utječe na smanjenje intenziteta, bila sam propagacija kroz sredstvo. Međutim, u realnim materijalima dolazi još i do smanjenja intenziteta uslijed raspršenja i apsorpcije.

Raspršenje jest refleksija zvuka u smjerovima mimo originalnog smjera propagacije zvuka. Apsorpcija je pretvaranje u druge oblike energije. Kombinirani efekt ova dva utjecaja se naziva atenuacijom (prigušenjem).

Iz slijedećeg izraza je vidljiva eksponencijalna karakteristika atenuacije zvučnog signala:

$$A = A_0 * e^{-\alpha z}$$

Gdje su:

$A_0$  – amplituda vala u određenoj točki [dB]

$A$

– reducirana amplituda nakon što je val prešao udaljenost  $z$  od početne točke [dB]

$\alpha$  – koeficijent atenuacije vala u  $z$  – smjeru [dB/MHz \* m]

$z$  – točka u kojoj se promatra val [m]

Na sličan se način može pisati i za intenzitet zvučnog vala:

$$I = I_0 * e^{-\alpha z}$$

Gdje su:

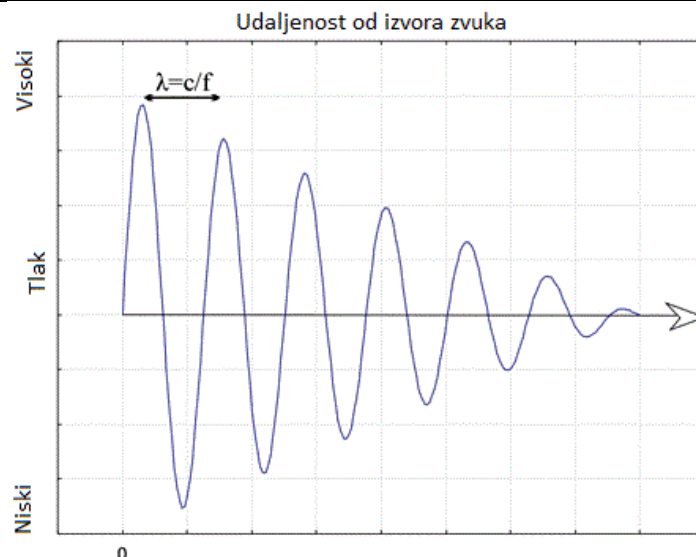
$I_0$  – intenzitet vala u određenoj točki [W/m<sup>2</sup>]

$I$  – reducirani intenzitet nakon što je val prešao udaljenost  $z$  od početne točke [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha$  – koeficijent atenuacije vala u  $z$  – smjeru [dB/MHz \* m]

$z$  – točka u kojoj se promatra val [m]

Atenuacijski koeficijent  $\alpha$  može se definirati kao mjera prigušenja prilikom prolaska ultrazvuka kroz određeni materijal.



Slika 3.5 Atenuacija

### 3.5. ZAKON REFLEKSIJE

Ultrazvučni impulsi se reflektiraju od granice dva sredstva različitih akustičkih impedanci. Što je veća razlika u akustičkim impedancama  $Z$ , to je veći postotak energije koja će biti reflektirana na granici dvaju medija i to je definiramo koeficijentom refleksije,  $R$ .

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

Gdje su:

$R$  – koeficijent refleksije

$Z_1$  – akustička impedancija materijala upadnog vala [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]

$Z_2$  – akustička impedancija materijala reflektiranog vala [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]

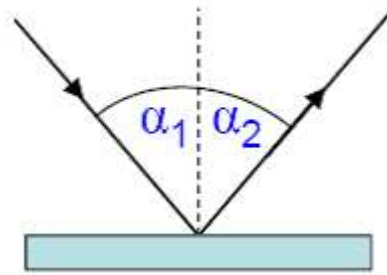
Kada je poznat koeficijent refleksije, moguće je izračunati i intenzitet reflektiranog vala:

$$I_r = I_i * R$$

Gdje su:

$I_r$  – intenzitet reflektiranog vala [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$I_i$  – intenzitet upadnog vala [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]



Slika 3.6 Refleksija

### 3.6. ZAKON REFRAKCIJE

Refrakcija je promjena u smjeru širenja nekog vala uslijed promjene medija kroz koji se val propagira.

Snellov zakon:

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

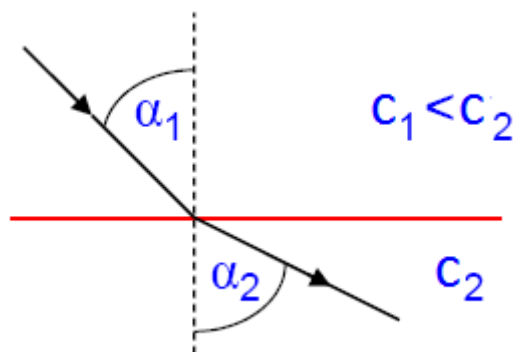
Pri čemu su:

$\alpha_1$  – kut upadnog vala

$\alpha_2$  – kut reflektiranog vala

$c$  – brzina širenja vala

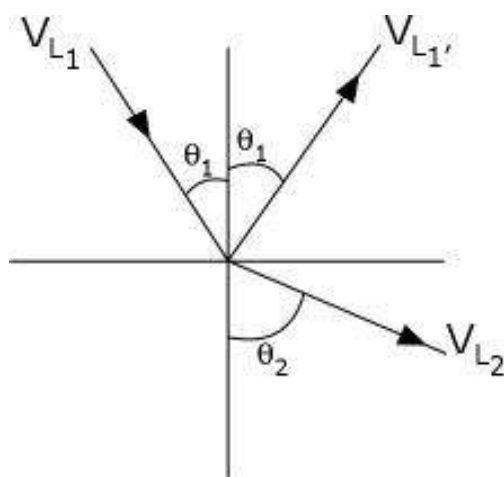
$n$  – indeks loma



Slika 3.7 Refrakcija

### 3.7. ZAKON TRANSMISIJE

Pri prijelazu ultrazvučnog vala iz jednog sredstva u drugo, dolazi do djelomične refleksije ultrazvučnog vala ako su akustičke impedancije medija različite, dok se dio ultrazvučne energije prenosi u drugo sredstvo.



Slika 3.8 Zakon transmisije

### 3.8. ZAKON APSORPCIJE

Prilikom prolaska ultrazvučnog impulsa kroz neko sredstvo, dolazi do njegovog slabljenja. To se dešava stoga što se dio energije u nekom materijalu apsorbira i pretvori u neki drugi oblik energije (toplinsku). Odnos apsorbirane i upadne akustičke energije se naziva koeficijentom apsorpcije ( $\alpha$ ) i on se određuje za različite materijale.

## 4. ISPITIVANJE ULTRAZVUČNOM METODOM

Postoje različite tehnike uz ispitivanja. no najčešće se ispitivanje vrši na jedan od tri osnovna principa na kojima se bazira ispitivanje ultrazvučnom metodom:

- metoda prozvučavanja (transmisije)
- puls-eho metoda odjeka
- metoda rezonancije

Izraz indikacija se koristi prilikom ispitivanja kada se nešto nade sve dok se ne ustanovi o kakvoj se vrsti indikacije radi, odnosno dok se ne ustanovi radi li se o grešci, odnosno nedopuštenoj nepravilnosti.

### 4.1. PRINCIP RADA ULTRAZVUČNE METODE

Princip rada ultrazvučne metode je zapravo vrlo jednostavan. Svodi se na to da je potreban uređaj koji će s jedne strane generirati i emitirati ultrazvučni impuls, a s druge strane prihvatiti reflektirani impuls, pretvornik te uređaj za prikaz odziva.

Ukoliko je u materijalu prisutna ikakva indikacija ili pukotina, ultrazvučni valovi će se odbiti od nje i to će biti uočljivo na povratnom signalu.

U ultrazvučnom pretvorniku se električna energija pretvara u mehaničku – titranje visoke frekvencije koje stvara ultrazvučne valove koji se dalje šire kroz ispitivani materijal. Kada signal dođe do postojeće indikacije (pukotine ili granice materijala različitih akustičkih impedancija), dio tih valova se reflektira natrag od površine te indikacije. Reflektirani ultrazvučni signal se pretvara nazad u električni signal i kao takav se šalje dalje na obradu signala i na uređaj za prikaz odaziva. Za ultrazvučne pretvornike se koriste materijali koji imaju piezoelektrična svojstva, odnosno pretvaraju električnu energiju u mehaničku i obrnuto.

Osnovni dijelovi opreme za ultrazvučno ispitivanje:

- Elektronički generator signala
- Sonda za emitiranje ultrazvučnih valova
- Kontaktno sredstvo za prijenos energije na relaciji sonda-ispitivani materijal
- Sonda za prihvaćanje reflektiranih valova
- Pojačalo
- Uređaj za prikaz signala (računalo, osciloskop)

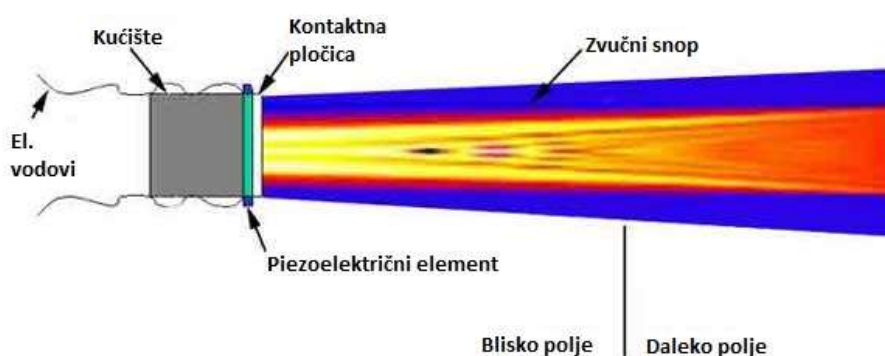
## 4.2. SONDA

Osnovni element uređaja za ultrazvučnu kontrolu jest sonda.

"Srce" sonde je piezoelektrični element koji pretvara električnu energiju u mehaničke vibracije (generator signala) te mehaničke vibracije natrag u električni impuls (primatelj signala).

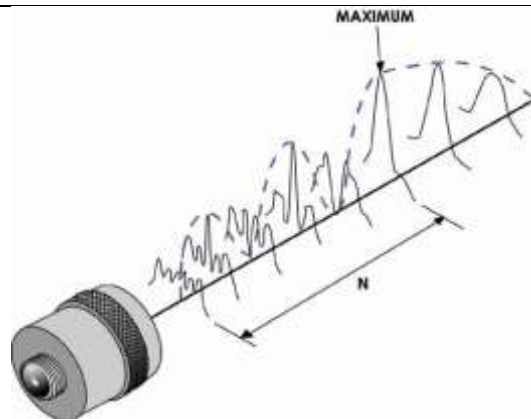
Svaka sonda ima određeno usmjerenje. Drugim riječima, ultrazvučni valovi pokrivaju samo određeni dio ispitivanog objekta.

Zvučni snop se grubo može podijeliti na konvergentno (fokusirano) područje i odvojeno (široko) područje, daleko polje. Kut divergencije ovisi od više faktora kao npr. promjera elementa, frekvencije i brzine zvuka u materijalu koji će se ispitivati.



Slika 4.1 Zvučni snop

Izvor ultrazvuka nije jedna točka, već se stvara u više točaka na glavi pretvornika. Svaki taj izvor generira ultrazvučne valove koji onda međusobno interferiraju. Ta interferencija dovodi do snažnih fluktuacija u ultrazvučnom polju što može dovesti do poteškoća sa točnosti u otkrivanju indikacija koje se nalaze u bliskom, konvergentnom polju. Kako zvučno polje u zvučnome snopu postaje homogeno sa udaljenosti, tu prestaje blisko polje i prelazi u područje dalekog polja. Taj prijelaz iz bliskog polja u daleko se odvija na udaljenosti "N" i njega se još naziva i fokusom, odnosno žarištem pretvornika. Područje odmah iza ove točke jest područje maksimalne snage zvučnog snopa, gdje će biti optimalni rezultati detekcije indikacija.

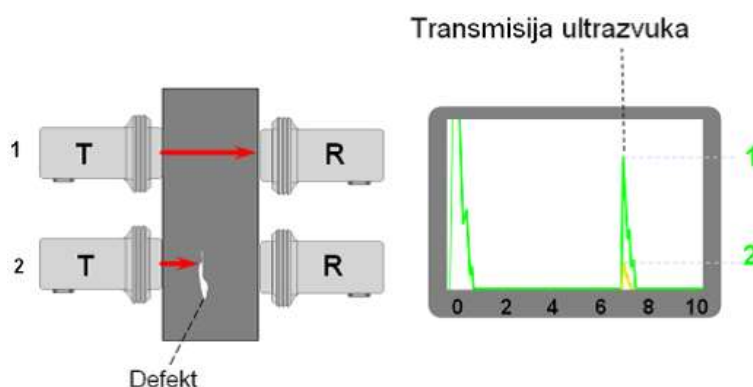


Slika 4.2 Žarište pretvornika

### 4.3. METODA TRANSMISIJE

Osnovni princip iza ove metode jest apsorpcija ultrazvuka u nehomogenostima u materijalu. Koriste se dvije ultrazvučne sonde. Pomoću jedne se ultrazvučni valovi usmjeravaju u ispitivani uzorak, ti valovi prolaze kroz uzorak i na drugoj ih strani prima druga sonda koja ih prikuplja i analizira se i mjeri energija primljenog vala.

Kroz homogeni uzorak, bez pukotina, uključina ili drugih nehomogenosti, signal na izlaznom prijemu bi trebao biti jednak ulaznom signalu. Ako pak postoji kakva indikacija u materijalu, dio zvučne energije će biti odbijen na granici tih materijala. Ovom se metodom mogu otkriti samo krupnije greške, a naročito je pogodna za otkrivanje slojevitih indikacija u tankim uzorcima (do 50 mm debljine).



#### 4.4. PULS-EHO METODA (METODA ODAZIVA)

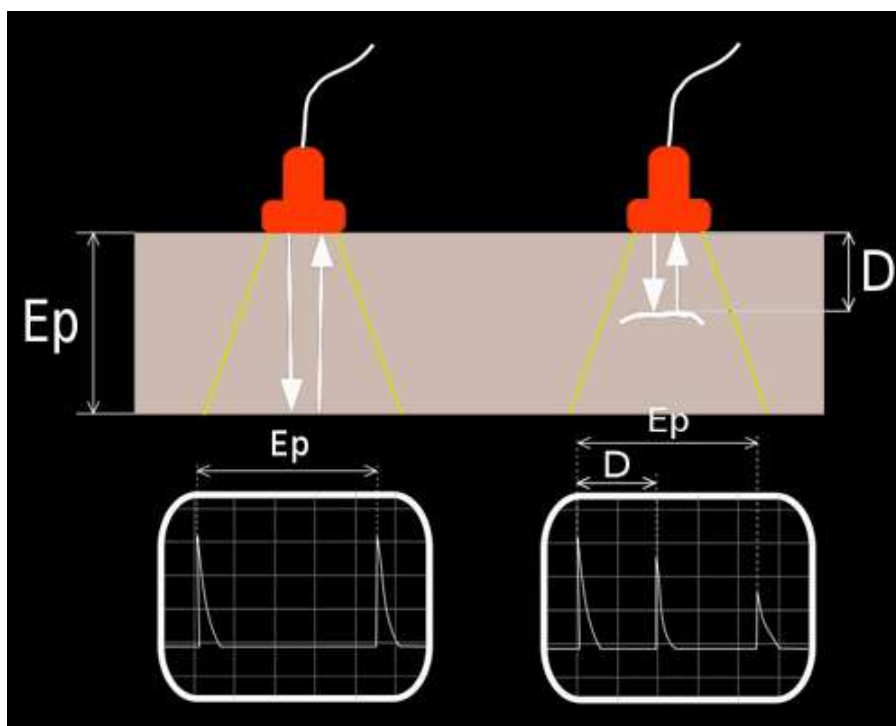
Princip ove metode jest odbijanje ultrazvučnih valova od nehomogenosti u ispitivanom uzorku. Jedna ultrazvučna sonda služi i kao generator i kao prijamnik ultrazvučnih valova. Mjeri se reflektirani signal.

Ovom metodom se osim lociranja grešaka, može mjeriti i debljina uzorka i dubina indikacije. Dubinu indikacije (kao također i debljinu materijala) se određuje na način da se izmjeri vrijeme od početnog impulsa i odjeka od indikacije.

Prijamnik prima reflektirane ultrazvučne valove i prikazuje ih kao proporcionalni signal na ekranu.

Mana ove metode je što na mjestu ulaska ultrazvučnog snopa u materijal postoji tzv. "mrtva zona". Odnosno, emitirani impulsi ne mogu biti toliko male dužine da odmah otkriju indikaciju u samoj blizini ultrazvučne sonde.

Za razliku od metode transmisije gdje se mjeri samo slabljenje signala, kod puls-eho metode se mjeri i vrijeme prolaza i slabljenje signala.



Slika 4.3 Princip puls-eho metode



#### 4.5. METODA REZONANCIJE

Metoda rezonancije se zasniva na principu stojnih valova. Kada se ultrazvučni valovi reflektiraju sa donje površine ispitivanog komada i vraćaju u prijammnik, oni interferiraju sa dolazećim valovima. Ukoliko je debljina materijala jednaka zbroju polovina valne duljine, postignuta je rezonancija.

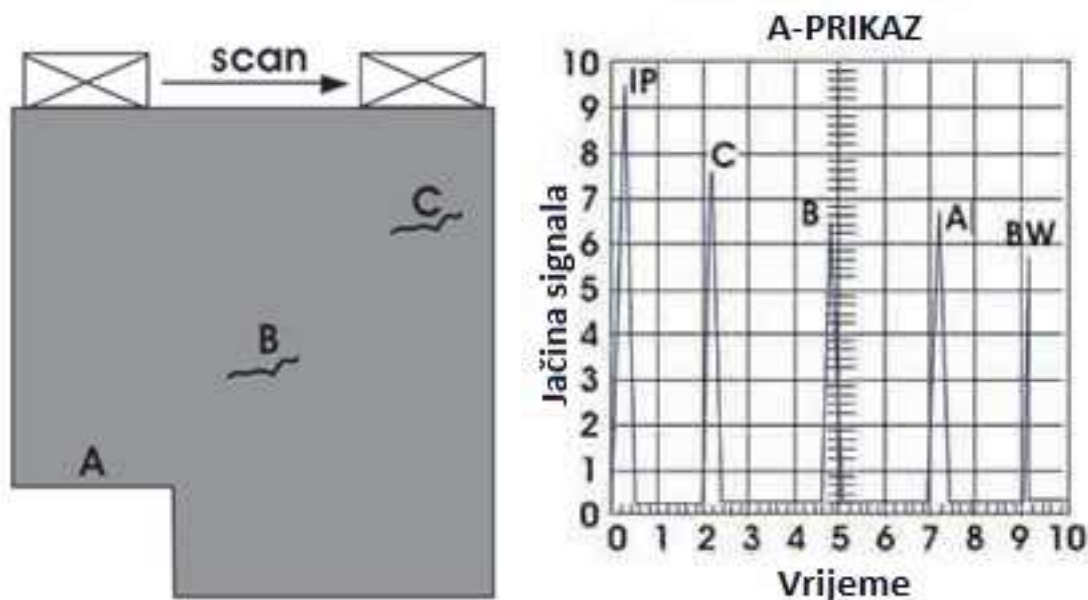
#### 4.6. NAČINI PRIKAZA SIGNALA

Postoji mnogo načina prikaza signala. Tip prikaza ovisi od uređaja kojim se vrši ispitivanje, vrste ispitivanja, zahtjeva na prikaz rezultata, zahtjeva za pohranjivanjem rezultata,...

Najznačajnije vrste prikaza su A-prikaz, B-prikaz i C-prikaz.

##### 4.6.1. A-PRIKAZ

A-prikazom se prikazuje količina primljene ultrazvučne energije kao funkcija vremena. Amplituda primljenog signala je prikazana duž vertikalne osi, dok je na horizontalnoj osi postavljeno vrijeme odaziva.



Slika 4.4 A-prikaz

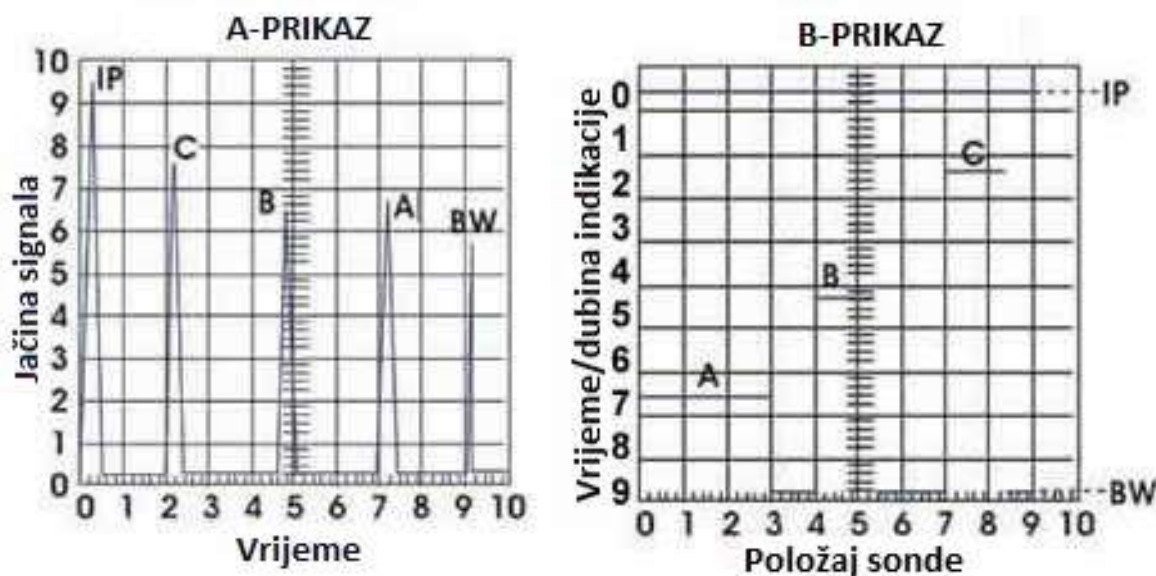
Na slici je prikazan jedan uzorak na kojemu se vrši ispitivanje i pripadajući a-prikaz za takav uzorak. Uzorak ima jednu stepenicu, označenu sa A i dvije indikacije B i C unutar sebe. U trenutku početka skeniranja, sonda je iznad stepenice A i na zaslonu će biti prikazan vrh IP,

odnosno inicijalni signal i vrh označen sa A. Pomicanjem sonde, doći će u položaj između A i B, gdje će na zaslonu biti samo IP i BW odazivi, odnosno odazivi inicijalnog signala (od prednje stjenke) i od druge strane uzorka. Daljnjim pomicanjem sonde, vidjet će se odazivi od B i C indikacija. Iz položaja odaziva na horizontalnoj (vremenskoj) osi, moguće je odrediti njihov položaj u uzorku.

#### 4.6.2. B-PRIKAZ

B-prikaz je grafički, dvodimenzionalni prikaz. Na horizontalnoj osi je prikazano linearno gibanje sonde, dok je na vertikalnoj osi prikazano vrijeme putovanja ultrazvučnih impulsa. Time se dobije poprečni presjek ispitivanog uzorka, odnosno iz prikaza je moguće očitati dubinu indikacije, njen položaj i približne dimenzije duž osi ispitivanja.

B-prikaz se dobiva na način da se postavi okidač, "trigger" na amplitudu u A-prikazu. Kada god je amplituda odaziva veća od "triggera", stvara se prikaz na zaslonu. Nedostatak ovakvog prikaza jest mogućnost da veća indikacija bliže površini po kojoj se ispituje zasjeni neku indikaciju dublje u materijalu.



Slika 4.5 B-prikaz

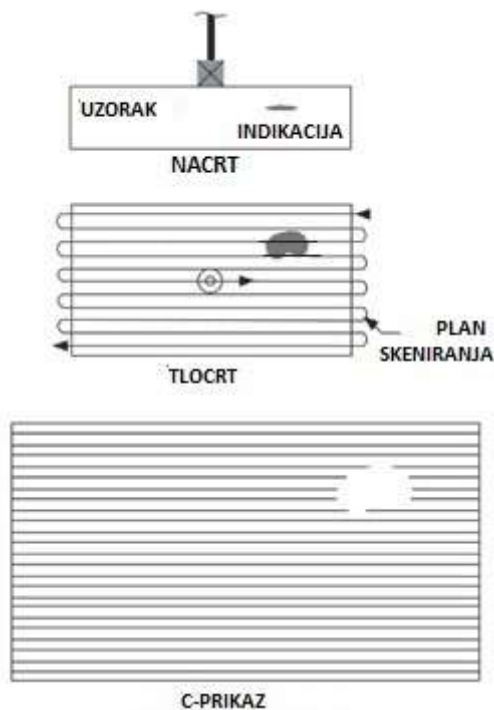
### 4.6.3. C-PRIKAZ

C-prikaz predstavlja tlocrt uzorka, odnosno ispitivanog dijela uzorka. Njime se dobivaju podaci o položaju indikacija po x i y pravcu te njihove približne dimenzije. C-prikaz je nalik na radiografski snimak.

Kako bi se dobio C-prikaz, potrebno je provesti mapiranje uzorka, odnosno automatizirati skeniranje kako bi se dobili ujednačeni rezultati koje je moguće pretvoriti u realnu sliku uzorka.

Snimci visoke rezolucije mogu producirati izrazito detaljne slike. Na slici je prikazan C-prikaz snimke novčića uronjenog u sredstvo i snimanog puls-eho tehnikom. Određuje se visina amplitudi odaziva koje će sudjelovati u generiranju slike.

Tako je na slici desno, ta amplituda niža kako bi se ulovila i stražnja strana novčića, dok je na lijevoj slici samo prednja strana.



Slika 4.6 C-prikaz

---

**4.7. PREDNOSTI I NEDOSTACI METODE ULTRAZVUČNOG ISPITIVANJA****Prednosti:**

- preciznost u određivanju lokacije i veličine indikacije
- preciznost u otkrivanju orijentacije i oblika indikacije
- detaljnost prikaza
- jednostavna obrada signala
- rezultati ispitivanja su trenutačno dostupni
- oprema je prijenosna

**Nedostaci:**

- osjetljivost na nečistoće
- dosta visoki zahtjevi na ispitivanu površinu što se tiče hrapavosti i pristupačnosti
- poteškoće sa ispitivanjem uzoraka nepravilnih oblika, malih dimenzija i tankih pločastih materijala
- potrebno je kontaktno sredstvo radi održavanja kontakta između sonde i ispitivanog uzorka
- potrebna stalna kalibracija testne opreme - potreba za probnim uzorcima i etalonima

## 5. METODA ISPITIVANJA KOHERENTNIM ZVUČNIM POLJEM

Prvih nekoliko desetljeća komercijalne primjene uređaja za ultrazvučno ispitivanje, korištene su samo konvencionalne sonde; tj. one sa po jednim piezoelektričnim elementom za odašiljanje i primanje ultrazvučnih valova, dvostruke sonde te sonde za ispitivanje tehnikom prozvučavanja. Glavnina ispitivanja ultrazvučnom metodom se i dalje provodi takvim konvencionalnim sondama. Međutim, u posljednje vrijeme su u području nerazornih ispitivanja sve zastupljeniji uređaji koji se baziraju na principu ispitivanja koherentnim ultrazvučnim poljem (ufaziranim poljem, engl. Phased array).

U svojem začetku, tehnologija ispitivanja materijala koherentnim ultrazvučnim poljem se koristila većinom samo u medicinske svrhe, s obzirom da je snimke ljudskog tijela relativno lako za interpretirati. Primjena u industrijske svrhe, s druge strane, predstavlja daleko veći izazov uslijed velikog broja različitih ispitivanih materijala (razni metali, kompozitni materijali, keramika, polimeri,...) različitih akustičkih svojstava te različitih geometrijskih karakteristika uzoraka za ispitivanje – oblik, dimenzije, debljina materijala,...



Slika 5.1 Snimka medicinskog ultrazvuka

Prvi takvi sustavi za industrijsku upotrebu se pojavljuju 1980-ih. Odlikovale su ih velike dimenzije i nezgrapnost radi čega nije postojala niti mogućnost njihovog prijenosa. Takvi uređaji su primjenu našli većinom za ispitivanje elemenata nuklearnih reaktora, velikih kovanih vratila i turbina.

Prijenosna verzija uređaja za ispitivanje koherentnim ultrazvučnim poljem se pojavljuje 1990-ih. Njihov razvoj je krenuo razvojem računalne opreme potrebne za upravljanje takvim uređajima te razvojem prijenosnih baterija što je omogućilo smanjenje dimenzija uređaja.

## 5.1. KOHERENTNO POLJE (UFAZIRANO POLJE)

Koherentni pretvornik (pretvornik sa faznim poljima, koherentni pretvornik, ufazirani pretvornik, engl. phased array transducer) je najjednostavnije rečeno pretvornik koji sadrži više zasebnih elemenata (piezoelektričnih kristala) u jednom kućištu. Glavna odlika takvog principa jest da ti elementi imaju mogućnost stvarati ultrazvučne valove (pulsirati) neovisno jedni od drugih.

Sonda za ispitivanje koherentnim poljem (u daljnjem tekstu PA sonda) se sastoji od pretvorničkog sklopa koji sadrži od 16 pa sve do 256 pojedinačnih elemenata koji mogu svaki zasebno i neovisno generirati ultrazvučne impulse. Takve sonde se mogu koristiti za sve vrste ispitivanja kao i konvencionalne sonde – kontaktna, beskontaktna ispitivanja, kao ravne sonde, u kombinaciji sa različitim klinovima,... Mogu biti različitih oblika i funkcioniraju u širokom spektru radnih frekvencija. Za rad takvog sustava, potrebna je i adekvatna softverska i hardverska podrška kako bi bilo omogućeno upravljanje i analiza primljenog signala.

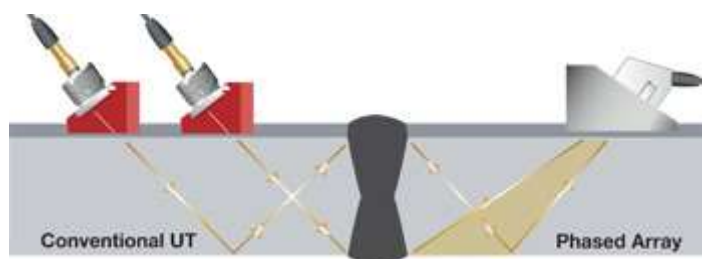


**Slika 5.2 Koherentni pretvornici (izvor: <http://olympus-ims.com>)**

Specifičnost uređaja koherentnog ultrazvučnog polja jest mogućnost usmjerenja i oblikovanja zvučnog snopa kojim se vrši ispitivanje. To se postiže na način da pojedinačni elementi u pretvorniku stvaraju ultrazvučne impulse koji međusobno interferiraju i stvara se jedinstveni zvučni snop određenih karakteristika koji putuje u željenom smjeru. Pojedinačni elementi se grupiraju u skupine koje odašilju istovremeno kako bi se smanjilo neželjeno proširivanje zvučnog snopa i kako bi se omogućilo preciznije fokusiranje snopa.

Računalo upravlja aktivacijom pojedinačnih skupina elemenata, uzimajući pritom u obzir karakteristike sonde kojom se vrši ispitivanje, klina na koji je spojena kao i geometrijskih i akustičkih svojstava uzorka koji se ispituje. Zvučni snop koji nastaje na taj način se širi kroz ispitivani materijal, odbija od indikacija, pukotina, rubova materijala i svih ostalih granica kako bilo koji zvučni snop nastao u konvencionalnoj ultrazvučnoj sondi.

Na sličan način kako i nastaje, tako se računalno analizira i primljeni reflektirani signal – računalno analizira i kombinira u jedinstvenu sliku reflektirane signale koje su primili različiti elementi u pretvorniku uzimajući u obzir njihove upadne kutove i vremena kada su primljeni. Tehnologija ispitivanja koherentnim ultrazvučnim poljem omogućava obavljanje jednom sondom, bez mijenjanja sonde, različitih vrsta mjerenja i skeniranja. To je stoga što je moguće računalno upravljati kutom zvučnog snopa, njegovim promjerom i žarišnom udaljenosti. Na taj način se omogućava veća fleksibilnost prilikom ispitivanja kompleksnih oblika i teže dostupnih mjesta na ispitivanom uzorku.



**Slika 5.3 Usporedba konvencionalnog ultrazvuka i koherentne sonde**

Neka od područja primjene takvog ispitivanja su

- Ispitivanja cijevi i zavara gdje se uvelike povećava vjerojatnost otkrivanja indikacije u materijalu
- Kovani metalni dijelovi kod kojih je prilikom ispitivanja konvencionalnim ultrazvučnim metodama potrebno koristiti više različitih sondi kako bi se otkrile možebitne indikacije na različitim dubinama u materijalu.

## 5.2. KONSTRUKCIJA KOHERENTNOG PRETVORNIKA

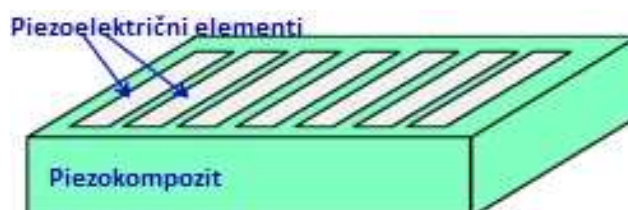
Sam naziv sonde govori o uređenom rasporedu pojedinačnih objekata. Najjednostavnija vizualizacija ovakvog pretvornika bio bi linearni niz nekoliko konvencionalnih koje su međusobno povezane u jedan sklop, i čijim bi simultanim radom upravljalo računalo. Na taj se način postiže veća pokrivenost ispitivanog područja i/ili brzina samog ispitivanja.



**Slika 5.4 Slikoviti prikaz koherentnog pretvornika**

U stvarnosti, piezoelektrični elementi u koherentnom pretvorniku su višestruko manji od elemenata u konvencionalnom pretvorniku ti se elementi mogu pobuđivati grupno ili individualno kako bi se upravljalo valnom frontom koju stvaraju.

Postoji široki spektar različitih izvedbi koherentnih pretvornika. Međusobno se razlikuju brojem elemenata, frekvencijskim rasponom, oblikom, veličinom,... No osnovna konstrukcija im je svima jednaka. Osnovica svakog pretvornika je piezoelektrični element podijeljen u niz sitnijih segmenata.

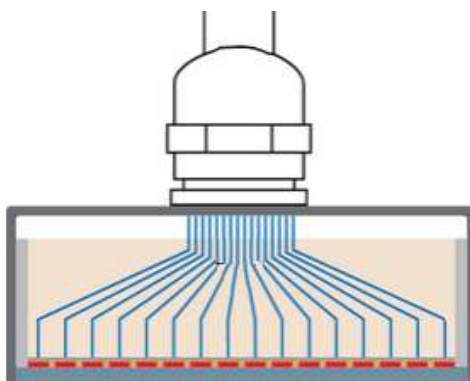


**Slika 5.5 Piezokompozitni element – piezoelektrični elementi u polimernoj matrici**

Funkcionalni element u današnjim koherentnim pretvornicima su elementi uobičajeno od piezokompozitnog materijala: polimerna matrica, najčešće epoksidna smola, koja sadrži sitne štapiće od piezoelektrične keramike. Takva izvedba je pokazala izuzetno dobra svojstva u pogledu osjetljivosti.

Piezokompozitni element je podijeljen u više segmenata (električki nezavisnih) kako bi oni mogli titrati nezavisno jedan od drugoga. Takav segmentirani element se umeće u sklop pretvornika.

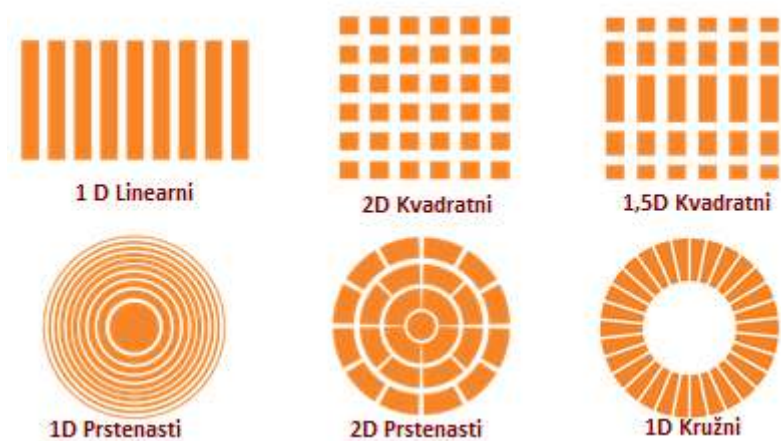
Shematski presjek jedne sonde koherentnog polja je prikazan na slici 5.6. Vidljivo je na slici kako piezokompozitni elementi na dnu imaju svaki svoju naponsku žicu za dovod električne energije.



**Slika 5.6 Shematski prikaz koherentnog pretvornika**



Postoji više različitih izvedbi slaganja piezoelektričnih elemenata u koherentnim pretvornicima. Najjednostavniji je linearni raspored, no za različite primjene postoje i pretvornici sa drugačijim rasporedom. Drugačijim rasporedom se dobivaju drugačije karakteristike zvučnog snopa, no to također i poskupljuje izradu.



**Slika 5.7** Različiti načini slaganja piezoelektričnih elemenata u koherentnom pretvorniku

Parametri prema kojima se kategoriziraju koherentni pretvornici:

- **Tip:** Najčešći tip sonde su ravne sonde, postavljene na polimerni klin. Klin može biti ravni ili pod kutom. Na taj se način dobije izvedba koja bi bila ekvivalentna konvencionalnoj kutnoj sondi. Također je moguća izvedba sonde za ispitivanje uranjanjem ili za ispitivanje direktnim kontaktom.
- **Frekvencija:** Većina ispitivanja ultrazvučnom metodom se dovija pri frekvencijama ultrazvuka između 2 MHz i 10 MHz, tako da je i većina sondi radi na tom frekvencijskom području, no moguće su i drugačije izvedbe. Kao i kod konvencionalnih sondi, dubina prodiranja se povećava sa manjom frekvencijom, dok se rezolucija povećava višim frekvencijama.
- **Broj elemenata:** Najčešće su izvedbe sondi koherentnog ultrazvučnog polja sa od 16 do 128 elemenata, no moguće su i izvedbe do 256 elemenata. Većim brojem elemenata se povećava površina koju sonda pokriva i mogućnosti upravljanja i fokusiranja zvučnim snopom, međutim, znatno se povećava i cijena izrade takve sonde i opreme koja je potrebna za njeno funkcioniranje.
- **Veličina elemenata:** Što je širina pojedinačnih elemenata manja, to su veće mogućnosti upravljanja i podešavanja zvučnog snopa, no povećava se i potreban broj elemenata za veće područje pokrivanja, što za sobom povlači i veću cijenu.

### 5.3. POLIMERNI KLIN

Koherentni pretvornici se obično smještaju na polimerni klin. Njegova funkcija je ista kao i kod primjene kod konvencionalnih sustava za ispitivanje ultrazvukom: provođenje ultrazvučne energije iz pretvornika u ispitivani materijal, odnosno pomažu usmjeravanju zvučnog snopa.

Klinovi mogu biti konvencionalni kutni ili ravni. Ravni klinovi služe prvenstveno kao zaštita pretvornika od mehaničkih oštećenja i kao sredstvo za prijenos ultrazvučnih valova.



Slika 5.8 Polimerni klinovi (izvor: <http://olympus-ims.com>)

### 5.4. UPRAVLJANJE ZVUČNIM SNOPI

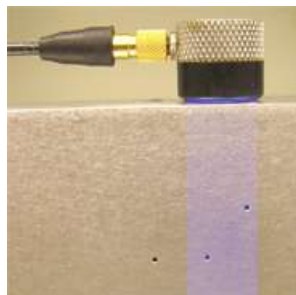
Zvučni snop nastaje pulsiranjem individualnih elemenata ili grupa elemenata u sondi određenim redoslijedom. Kojim će se to redoslijedom odvijati, ovisi od informacija o sustavu koje korisnik mora unijeti prije svakog ispitivanja.

Kako bi računalo moglo odrediti optimalan redoslijed pulsiranja elemenata u sondi određenim redoslijedom, potrebno je unijeti informacije o sondi kojom se vrši ispitivanje, geometriji i svojstvima klina na koji je sonda postavljena, te obliku i akustičkim svojstvima materijala ispitivanog objekta.

Budući da računalo upravlja oblikom i karakteristikama zvučnog snopa, moguće je jednom sondom vršiti više različitih načina ispitivanja.

## 5.5. NAČINI PRIKAZA KOD SUSTAVA ZA ISPITIVANJE KOHERENTNIM ULTRAZVUČNIM POLJEM

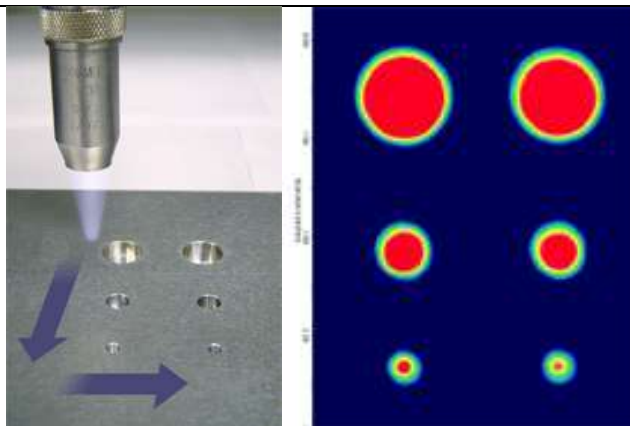
Informacije dobivene iz odjeka i analizirane u uređaju je moguće prikazati na bilo koji od konvencionalnih metoda prikaza: A, B ili C.



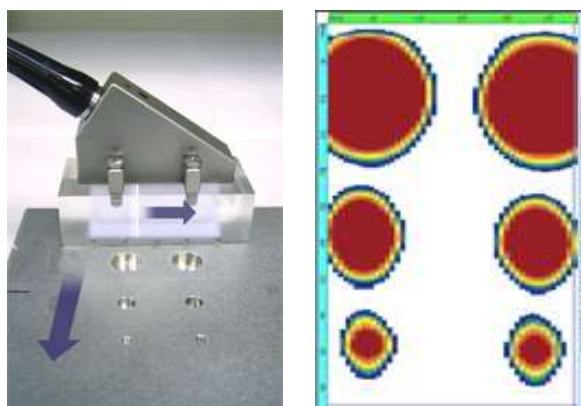
**Slika 5.9** A-prikaz zvučnog snopa koji se reflektira od dvije indikacije na različitim dubinama i B-prikaz uzorka s tri indikacije dobiven pregledom sondom koherentnog ultrazvučnog polja (desno)(izvor: <http://olympus-ims.com>)

Snimanjem uređajem za ispitivanje koherentnim ultrazvučnim poljem moguće je dobiti B-prikaz bez pomicanja same sonde. Kod ispitivanja konvencionalnim ultrazvučnim sondama, dobivanje B-prikaza je funkcija povlačenja sonde duž uzorka – dobiveni snimak predstavlja poprečni presjek uzorka. Prilikom ispitivanja uređajima sa koherentnim poljem, pomicanje sonde nije potrebno.

Prednost koherentnih sondi je još izraženija kod snimanja C-prikaza. Za snimak konvencionalnom metodom, potrebno je napraviti raster skeniranje površine uzorka kako bi se pokrila čitava površina uzorka. Sa koherentnom sondom je dovoljno provesti snimanje duž samo jedne osi.



**Slika 5.10 Smjer skeniranja i prikaz dobiven konvencionalnim ultrazvukom (izvor: <http://olympus-ims.com>)**

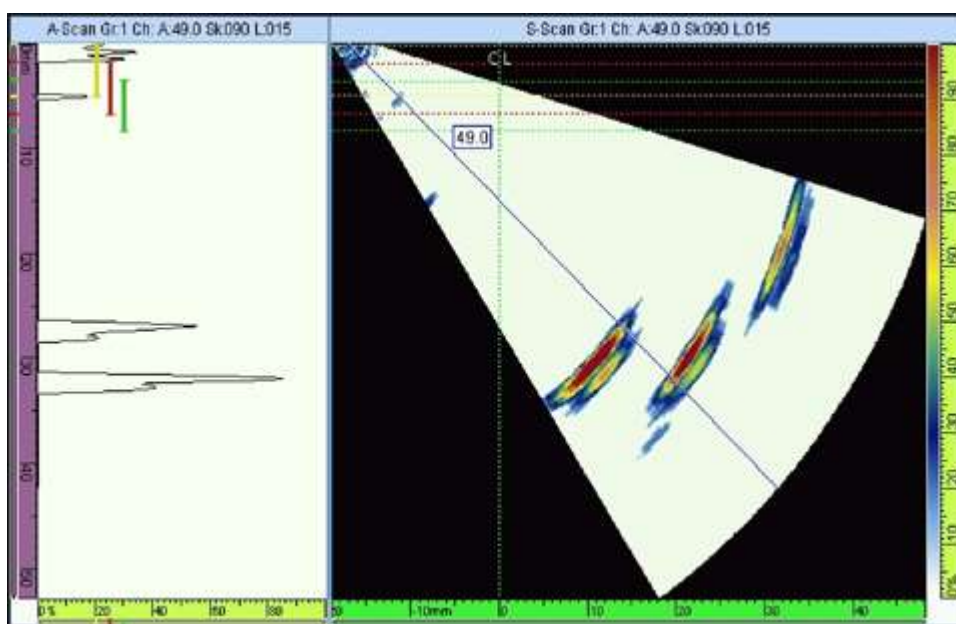


**Slika 5.11 Smjer skeniranja i prikaz dobiven koherentnom sondom (izvor: <http://olympus-ims.com>)**

Na slikama 5.10 i 5.11 su prikazani dobiveni C-prikazi nakon snimanja konvencionalnim ultrazvukom, metodom uranjanjem, i sustavom sa koherentnim poljem. Grafički, ljepša je slika dobivena konvencionalnim ultrazvukom. No potrebno je uzeti u obzir i neke druge kriterije. Prvo, sustav za ispitivanje koherentnim ultrazvučnim poljem je za razliku od konvencionalne metode uranjanjem prijenosan, što ga u ovom slučaju čini ekonomski isplativijim. Osim toga, vrijeme skeniranja koherentnom sondom je kraće.

### 5.5.1. S- PRIKAZ

Kod uređaja za ispitivanje metodom koherentnog ultrazvučnog polja postoji još jedan oblik prikaza koji se često koristi i specifičan je za ove uređaje. To je tzv. S-prikaz (engl. S-scan, sectorial scan). S-prikaz predstavlja 2D prikaz dobiven iz niza A-prikaza s obzirom na kut i dubinu odaziva. Njime se prikazuje poprečni presjek promatranog uzorka duž kutova skeniranja. Slika koja se dobije na zaslonu jest slika presjeka u realnom vremenu.



Slika 5.12 S-prikaz

## **5.6. PREDNOSTI I NEDOSTACI SUSTAVA ZA ISPITIVANJEM PRIMJENOM KOHERENTNOG ULTRAZVUČNOG POLJA**

Tehnologija ispitivanja metodom koherentnog ultrazvučnog polja je u širokoj primjeni u industriji uslijed svojih brojnih prednosti nad konvencionalnim ultrazvučnim metodama nerazornih ispitivanja. Međutim, ima i svojih nedostataka. Je li prikladno koristiti ovu metodu za određeno ispitivanje, treba odrediti uzimajući u obzir i prednosti i nedostatke ove metode.

### **Prednosti:**

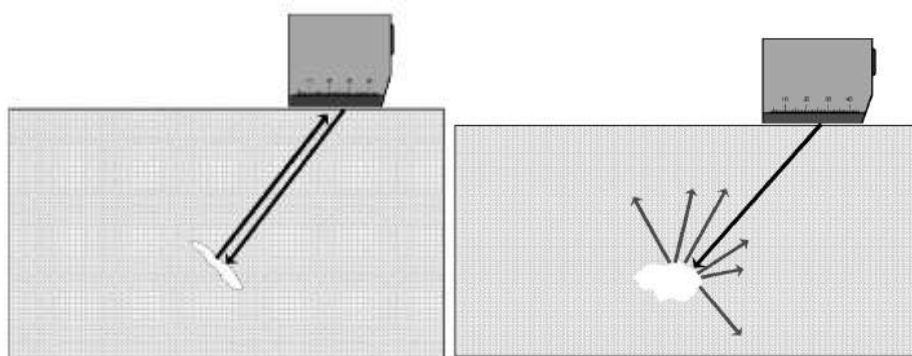
- Može se koristiti u skoro svim slučajevima ispitivanja kada i konvencionalne metode. Naročito je pogodna za ispitivanje zavara i traženje pukotina i grešaka u materijalu te za određivanje debljine uzoraka materijala
- Sa pojedinačnom sondom je moguće odraditi više tipova skeniranja – snimanje pod različitim kutovima, upravljanje snopom, određivanje dubine indikacija, određivanje indikacija na različitim dubinama
- Puno veća brzina obavljanja pregleda, pogotovo za dužinske preglede – npr. zavara
- Jednostavnija inspekcija kompleksnih geometrija uzoraka
- S-prikaz izrazito olakšava otkrivanje pukotina te indikacija i pregled zavara
- Elektroničko fokusiranje zvučnog snopa. Optimizira se zvučni snop za otkrivanje indikacija na očekivanoj dubini, čime se povećava vjerojatnost pronalaska indikacije u materijalu
- Brže i jednostavnije dobivanje C-prikaza
- Jednostavnije arhiviranje rezultata ispitivanja

### **Nedostaci:**

- Visoka cijena uređaja
- Potrebna zahtjevnija obuka i iskustvo operatera
- Priprema za samo ispitivanje je opsežnija
- Sonde su veće od onih za konvencionalno ispitivanje što može rezultirati poteškoćama sa pozicioniranjem sonde i ostvarivanjem dodira sonde i ispitivanog uzorka

## 6. PLAN EKSPERIMENTA

Položaj i geometrija indikacija te njihova orijentacija u uzorku imaju veliki utjecaj na njihovu detektabilnost. Ultrazvučnim ispitivanjem otkrivaju se indikacije sakrivene unutar volumena uzorka. Budući da je za otkrivanje indikacije, potrebno indikaciju obuhvatiti zvučnim snopom, koji se od nje mora i odbiti, logično je da će na detektabilnost dane indikacije veliki utjecaj imati dimenzije indikacije, dubina u materijalu na kojoj se nalazi i sama orijentacija indikacije.



**Slika 6.1** Odbijanje valova ultrazvučnog snopa od indikacije u ovisnosti od njenog oblika i položaja

Cilj ovog istraživanja jest otkriti kako se ponaša odjek od indikacije u ovisnosti od njene orijentacije na određenoj dubini, te je li moguće predvidjeti orijentaciju indikacije na poznatoj dubini na temelju odjeka.

### 6.1. PRIPREMA EKSPERIMENTA

Za provedbu eksperimenta, potrebno je izraditi nekoliko uzoraka za ispitivanje ultrazvučnom metodom. Uzorci trebaju sadržavati indikacije poznatog oblika, dimenzije i orijentacije. Na uzorcima treba provesti kontrolu ultrazvučnim ispitivanjem, sa različitim sondama i postavkama te zabilježiti dobivene trendove. Iz dobivenih podataka treba vidjeti je li moguće izvući zakonitosti što se tiče odaziva od indikacije i je li moguće te zakonitosti ekstrapolirati u podatke za indikacije na određenom uzorku. Potom treba obaviti mjerenja i na tom uzorku i ustanoviti poklapaju li se pretpostavljene vrijednostima sa onima stvarno izmjerenima.

Mjerenje se vrši sondama koherentnog zvučnog polja, i to sa sondom 2,25 MHz, 16 elemenata i sondom 4 MHz, 16 elemenata. Prednost koherentnih sonda se ovdje očituje u mogućnosti

prilagodbe kuta snimanja uzorka i usporedbe rezultata. Rezultati mjerenja se potom uspoređuju i očekuje se dobiti isti trend u dobivenim rezultatima za sve sonde.

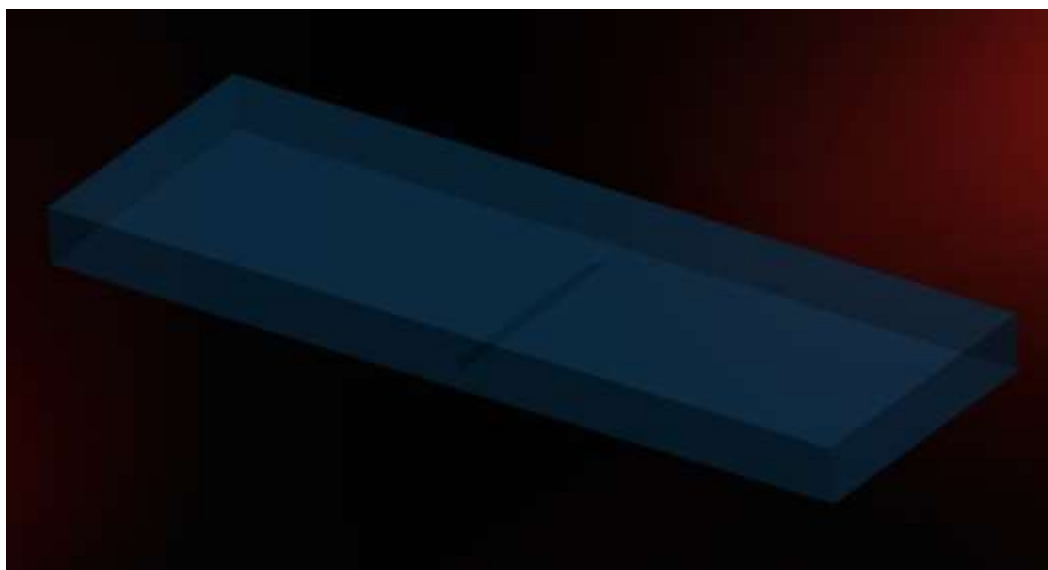
Očekuje se najveći odaziv od indikacije koja se nalazi pod kutom od 30° od okomice, iz razloga što je kao takva okomita na upadni kut zvučnog snopa pri pregledu sondom od 60°. Promjenom tog nagiba, odaziv bi se trebao smanjivati jer se smanjuje i poprečni presjek na koji zvučni snop upada, a mijenja se i kut pod kojim se upadne zrake reflektiraju.

## 6.2. TIJEK EKSPERIMENTA

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu su izrađena četiri uzorka za ispitivanje. Uzorci su izrađeni iz čeličnog lima debljine 20 mm.

Njihove dimenzije su 300mm x 100 mm x 20 mm.

Svaki uzorak sadrži linijsku indikaciju jednake visine a različite orijentacije u odnosu na referentnu, kontaktnu plohu primopredajnika i ispitivanog objekta.



**Slika 6.2 CAD model uzorka za ispitivanje**

Kutovi pod kojima se nalaze indikacije su, obzirom na okomicu, 0°, 10°, 20° i 30°. Indikacije su na svim uzorcima dubine 5 mm. Dužina indikacija iznosi 50 mm. Kao mjera kontrole, po izradi je napravljen radiogram uzoraka u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju za radiografsko ispitivanje

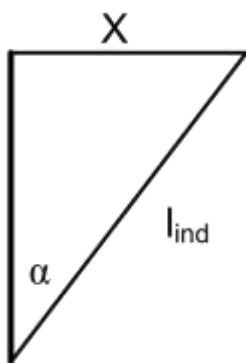
Tip: Balteau 300 kV, Proizvođač: Balteau.





Slika 6.3 Računalna obrada radiograma uzoraka

Iz širine indikacije na radiogramu, jednostavnim izračunom se dođe do kuta indikacija u uzorcima:



$$\sin(\alpha) = \frac{x}{l_{ind}}$$

$$l_{ind} = 5 \text{ mm}$$

Uzorak br.	Širina indikacije na radiogramu [mm]	$\alpha$ [°]
1.	1,8	21,1°
2.	-	0°
3.	2,47	29,6°
4.	0,9	10,37°

**Tablica 6-1 Kutovi indikacija u uzorcima**

Iz čega je vidljivo da kutovi indikacija odgovaraju zahtijevanima.

Za ispitivanje je korišten uređaj GE Technologies Phasor XS. Njegove specifikacije su dane na slici 6.4.

# Technical Specifications

Physical Specifications	
Internal Memory	Set-up files
Removable Memory	On 512 MB SD Card for report and set-up files
Documentation Format	JPEG – 80 KB/image
Weight	3.8 kg (8.2 lbs) with battery
Dimensions	282 mm W x 171 mm H x 159 mm D (11.1 in. W x 6.8 in. H x 6.3 in. D)
Battery	Custom Li Ion battery pack – 356P configuration
Battery Life	6 hrs minimum
Battery Charging	External charger
External Power Supply	Universal input 85 to 260 V AC / 50 to 60 Hz
Probe Connectors	Conventional – 00 lemo/BNC adapters provided - Phased Array – Custom ZIF
VGA Output	Yes
Dialog Languages	Chinese, English, French, German, Italian, Japanese, and Spanish
Display Size	165 mm (6.5 in.) diagonal
Display Resolution	VGA color TFT 640H x 480V pixel

Conventional / Phased Array Channel Specifications		
	Conventional	Phased Array
Pulsar	Spike	Bi-Polar Square Wave
Pulse Repetition Frequency	15 to 2000 Hz	15 to 7680 Hz
Pulsar Voltage	300 V rms	+ 25 V to + 75 V (1 V steps)
Pulsar Energy	Low or High (selectable)	
Pulsar Rise Time	< 15 nsec	< 15 nsec
Damping	50 or 1000 Ohms (selectable)	
Mode of operation	single, dual	single
Receiver Input Capacitance	< 50 pF	
Receiver Input Resistance	1000 Ohms in dual mode	220 Ohms
Maximum Input Voltage	40 V peak-to-peak	200 mV peak-to-peak
Bandwidth/Amplifier Bandpass	0.3 to 15 MHz @ -3dB	0.6 to 6.3 MHz @ -3dB
Filter Selection	1.0, 2.0, 2.25, 4.0, 5.0, 10 and 13 MHz + BB	2.0, 3.0, 4.0, 5.0 MHz, Low Pass 4 MHz, High Pass 5 MHz and Broadband (0.6 to 6.5 MHz)
Rectification	Pos HW, Neg HW, FW, and RF	Pos HW, Neg HW, FW and RF
Analog Gain	0 to 110 dB	0 to 40 dB
Digital Gain		15.8 to 39.9 dB (depending on aperture size)
Focal Laws		User selectable - 128 max
Physical Probe		1 to 64
Virtual Probe		1 to 16
Number of Cycles		1 to 128
Pulsar Width @ 1/2 Cycle		20 to 500 nsec
Pulsar Delay		0 to 10.24 µ-sec
Receiver Delay		0 to 10.24 µ-sec
Acoustic Velocity	1000 to 16000 m/s 0.0393 to 0.5905 in./µ-sec	1000 to 16000 m/s 0.0393 to 0.5905 in./µ-sec
Minimum Range (steel long)	0 - 14 mm (0.55 inch)	0 - 7.6 mm (0.3 inch)
(steel shear)	0 - 7.5 mm (0.3 inch)	0 - 4.2 mm (0.17 inch)
Maximum Range (steel long)	0 - 14060 mm (553 inch)	0 - 1073 mm (42 inch)
(steel shear)	0 - 7626 mm (300 inch)	0 - 2073 mm (82 inch)
Display Delay	2.5 m (88.5 inch)	1 m (39.4 inch)
Auto Timebase Calibration	Yes	
Reject	0 to 80%	0 to 80%
TCG	15 points @ 6 dB/µ-sec	15 points @ 6 dB/µ-sec
Gates	A and B	A, B and IF
Gate Threshold	5 to 95%	5 to 95%
Gate Start	0 mm - full range	0 mm - full range
Gate Width	1 mm - full range	1 mm - full range
Gate Logic	Off, Positive, and Negative (Off, Coincidence, and Anticoincidence)	Off, Positive, and Negative (Off, Coincidence, and Anticoincidence)
TOF Modes	Flank/Peak	Flank/Peak
Scan Type		Linear and Sector
Available Views	A-Scan	A-Scan, B-Scan and Sector
Displayed Readings	Amplitude, Sound Path, and Trig	Beam, Amplitude, Sound Path, Trig for displayed and for all beams
Measurement Resolution	5 nsec	3 nsec
Displayed Units of Measurements	mm or inch (selectable)	mm or inch (selectable)

Environmental Tests	
<b>Per Mil-Std-810F</b>	
Cold Storage	-20°C for 72 hrs, 502.4 Procedure I
Cold Operation	0°C for 16 hrs, 502.4 Procedure II
Heat Storage	+70°C for 48 hrs, 501.4 Procedure I
Heat Operation	+30°C for 16 hrs, 501.4 Procedure II
Damp Heat / Humidity (storage)	30 Cycles: 10 hrs at +65°C down to +30°C, 10 hrs at +30°C up to +65°C, transitions within 2 hrs, 507.4
Temperature Shock	3 Cycles: 4 hrs at -20°C up to +70°C, 4 hrs at +70°C, transitions within 5 mins, 503.4 Procedure II
Vibration	514.5-5 Procedure I, Annex C, Figure 6, general exposure: 1 hr each axis
Shock	6 cycles each axis, 15g, 11ms half sine, 516.5 Procedure I
Loose Cargo	514.5 Procedure II
Transit Drop (packaged for shipment)	516.5 Procedure IV, 26 drops
IP54 / IEC529 ... dust proof / dripping water proof as per IEC 529 specifications for IP54 classification	

Specifications subject to change without notice.



www.gesensinginspection.com

GEIT-20047EN (11/09)

© 2009 General Electric Company. All Rights Reserved. Specifications are subject to change without notice. GE is a registered trademark of General Electric Company. Other company or product names mentioned in this document may be trademarks or registered trademarks of their respective companies, which are not affiliated with GE.

**Slika 6.4** Specifikacije uređaja Phasor XS (izvor: <http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/portable-flaw-detectors/phasor-series.html>)

Mjerenja su vršena sa dvije phased array sonde.

**Sonda I: GE 115.500-017 16 elemenata, 2,25 MHz**

- Part number: **115-500-017**
- Lead Time: 5 days
- Connector Type: Phasor
- Frequency [MHz]: 2.25
- Element Count: 16
- Pitch[mm]: 1
- Aperture[mm]: **16x13**
- Elevation[mm]: 13
- Case Style: C2
- Cable[m]: 3



**Dimensions**

- A: 22
- B: 37
- C: 36
- D: 29

**Slika 6.5** Specifikacije pretvornika 2,25 MHz, 16 elemenata

Parameter Table				
Probe	PART NUM	SERIAL NUM	FREQUENCY	NUM ELEMENTS
	115-500-017	01WPWR	2.3 MHz	16
	PITCH	ELEVATION	ORIGIN OFFSET	
	1.00 mm	13.00 mm	0.00 mm	
Wedge	PART NUM	SERIAL NUM	ANGLE	ELEM 1 POS
	118-350-024	000000	36.0 deg	HIGH END
	VELOCITY	FRONT	OFFSET 2	
	2337 m/s	28.94 mm	15.86 mm	
Scan	MAT THICKNESS	LEG	DISPLAY DELAY	PROBE DELAY
	20.00 mm	1.0	0.00 mm	-0.263 us
	MATERIAL	WAVE TYPE	VELOCITY	DISPLAY START
	CUSTOM	SHEAR	3278 m/s	MATERIAL
	D-CAL MODE	CAL TYPE	D-REF 1	D-REF 2
	OFF	2-POINT	12.50 mm	25.00 mm
	SCAN TYPE	FOCAL POINT	ANG CORRECTED	ASCAN MODE
	SECTOR	UNFOCUSED	ON	NORMAL
	ANGLE START	ANGLE STOP	ANGLE STEP	
	45.0 deg	75.0 deg	0.5 deg	
	FIRST ELEMENT	APERTURE SIZE	APERTURE STEP	NUM OF STEPS
	1	6	1	11
	ANALOG GAIN	DIGITAL GAIN	OFFLINE GAIN	REF GAIN
	5.0 dB	2.0 dB	N/A	OFF
	ANALOG DB REF	DIGITAL DB REF		
	OFF	OFF		
FILE	LAST DATASET	LOADED		
	225-16E-MAJH01			
Setup	PLSR VOLTAGE	PLSR WIDTH	PRF	FRAME RATE
	72 V	160 ns	550 Hz	7 Hz
	RECTIFY	TCG MODE	FREQUENCY	TTL #1
	FULLWAVE	OFF	BB 0.6-6.5 MHz	GATE A
	VIEW MODE	DATA SOURCE		
	FRAME	AMP A		
	CLOCK	ENCODER	SAMPLE INTERVL	DISPLAY LENGTH
	ENCODED	0.0568 mm/tick	0.6818 mm	(218.79 mm)
Gate	GATE SHAPE	GATE A LOGIC	GATE B LOGIC	GATE IF LOGIC
	DEPTH BASED	POSITIVE	POSITIVE	OFF
	GATE A START	GATE A WIDTH	GATE A TRSH	TOF MODE
	11.00 mm	15.00 mm	50 %	PEAK
	GATE B START	GATE B WIDTH	GATE B TRSH	TOF MODE
	68.84 mm	5.49 mm	40 %	PEAK
	IF GATE START	IF GATE WIDTH	IF GATE TRSH	TOF MODE
	12.70 mm	25.40 mm	30 %	FLANK

**Slika 6.6** Postavke za mjerenje, sonda GE 115-500-017 2,25 MHz, 16 elemenata

**Sonda II: 6 elemenata, 4 MHz**

- Part number: 115-100-002
- Lead Time: 5 days
- Connector Type: Phasor
- Frequency [MHz]: 4
- Element Count: 16
- Pitch[mm]: 0.5
- Aperture[mm]: 8 x 9
- Elevation[mm]: 9
- Case Style: C2
- Cable[m]: 3

**Dimensions**

- A: 15
- B: 28
- C: 27
- D: 21

**Slika 6.7** Specifikacije pretvornika 4 MHz, 16 elemenata

Parameter Table				
Probe	PART NUM	SERIAL NUM	FREQUENCY	NUM ELEMENTS
	115-500-013	01X97H	4.0 MHz	16
	PITCH	ELEVATION	ORIGIN OFFSET	
	0.50 mm	9.00 mm	0.00 mm	
Wedge	PART NUM	SERIAL NUM	ANGLE	ELEM 1 POS
	118-350-024	000000	36.0 deg	HIGH END
	VELOCITY	FRONT	OFFSET Z	
	2337 m/s	18.68 mm	10.61 mm	
Scan	MAT THICKNESS	LEG	DISPLAY DELAY	PROBE DELAY
	20.00 mm	0.5	0.00 mm	0.539 us
	MATERIAL	WAVE TYPE	VELOCITY	DISPLAY START
	CUSTOM	SHEAR	3234 m/s	MATERIAL
	D-CAL MODE	CAL TYPE	D-REF 1	D-REF 2
	OFF	1-POINT	25.40 mm	N/A
	SCAN TYPE	FOCAL POINT	ANG CORRECTED	ASCAN MODE
	SECTOR	UNFOCUSED	ON	NORMAL
	ANGLE START	ANGLE STOP	ANGLE STEP	
	44.0 deg	80.0 deg	0.5 deg	
	FIRST ELEMENT	APERTURE SIZE	APERTURE STEP	NUM OF STEPS
	1	16	1	32
	ANALOG GAIN	DIGITAL GAIN	OFFLINE GAIN	REF GAIN
	10.0 dB	3.4 dB	N/A	OFF
ANALOG DB REF	DIGITAL DB REF			
OFF	OFF			
FILE	LAST DATASET LOADED			
	MAJHER1-1A#001			
Setup	PLSR VOLTAGE	PLSR WIDTH	PRF	FRAME RATE
	74 V	110 ns	1210 Hz	15 Hz
	RECTIFY	TCG MODE	FREQUENCY	TTL #1
	FULLWAVE	OFF	4 MHz	GATE A
	VIEW MODE	DATA SOURCE		
	FRAME	AMP A		
Gate	CLOCK	ENCODER	SAMPLE INTERV	DISPLAY LENGTH
	TIMED	N/A	60 Hz	(28.1 sec)
	GATE SHAPE	GATE A LOGIC	GATE B LOGIC	GATE IF LOGIC
	DEPTH BASED	POSITIVE	OFF	OFF
	GATE A START	GATE A WIDTH	GATE A TRSH	TOF MODE
	15.00 mm	8.00 mm	16 %	PEAK
	GATE B START	GATE B WIDTH	GATE B TRSH	TOF MODE
	9.06 mm	9.95 mm	22 %	PEAK
IF GATE START	IF GATE WIDTH	IF GATE TRSH	TOF MODE	
12.70 mm	25.40 mm	30 %	FLANK	

**Slika 6.8** Postavke za mjerenje, sonda GE 115-500-013 4 MHz, 16 elemenata

Za ostvarivanje kontakta između podloge i sonde za ispitivanje ultrazvukom, korišteno je kontaktno gel sredstvo opće primjene GE Inspection Technologies ZG-F. Specifikacije su dane na slici 6.10.



**Slika 6.9** Kontaktno sredstvo korišteno u eksperimentu

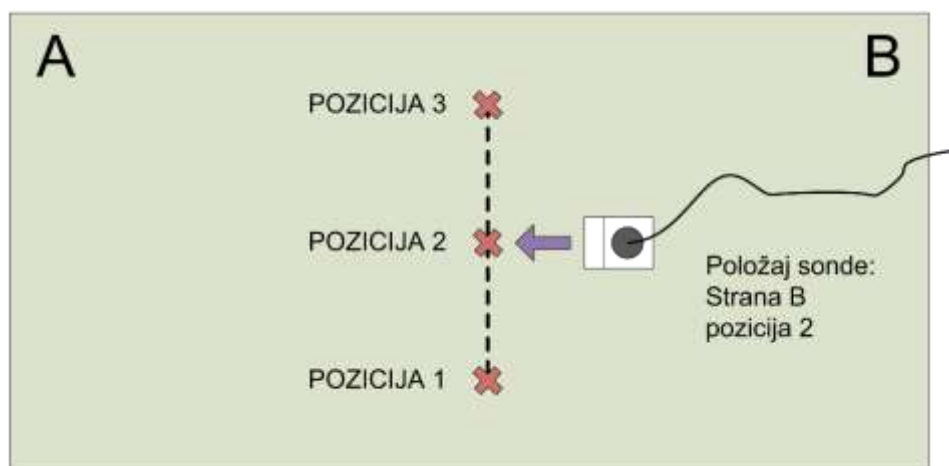
#### General Purpose Couplants

Couplant Type	Container Size	Description	Order Code	Features
ZG-F	2.5 kg (5.5 lb)	General Purpose	50469	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thixotropic paste</li> <li>• Non-drip, washable, non-corrosive</li> <li>• Temperature range -4°F to 212°F (-20°C to 100°C)</li> <li>• Safety data sheet per 91/155/EEC</li> </ul>
	5 bottles 250 ml (8.5 fl oz)	General Purpose	54558	

**Slika 6.10** Tehničke specifikacije kontaktnog sredstva (izvor: [http://www.ge-mcs.com/download/ultrasound/transducers/GEIT-20117EN\\_ultrasonic-transducer-catalog.pdf](http://www.ge-mcs.com/download/ultrasound/transducers/GEIT-20117EN_ultrasonic-transducer-catalog.pdf))

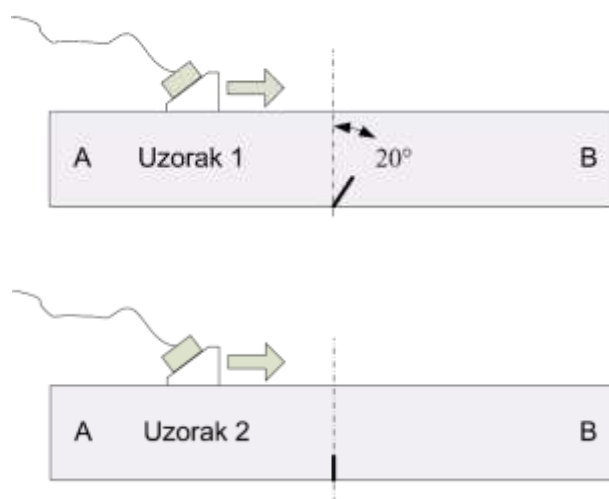
### 6.3. ISPITIVANJE

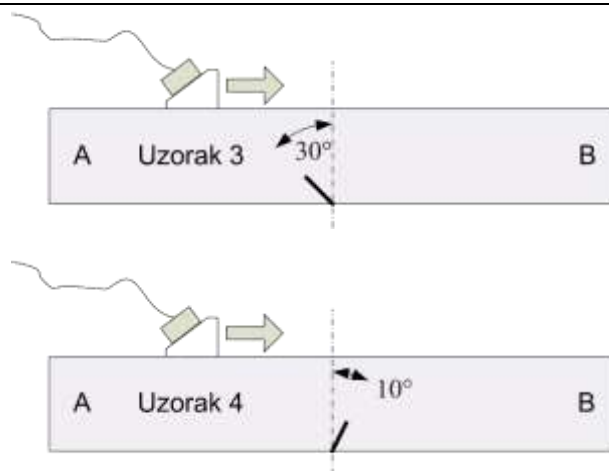
Mjerenja se vrše na 4 uzorka. Linijske indikacije u uzorcima se nalaze u sredini, te je moguće sondom pristupiti sa obje strane: A i B. Mjerenja se sa svake strane vrše na tri pozicije prema slici 6.7: u sredini indikacije i na njenim rubovima. Mjerenje u sredini indikacije je relevantno za daljnja razmatranja, no vrše se i na rubu radi usporedbe rezultata. S obzirom da se radi o phased array sondi, ona omogućava promatranje uzorka pod različitim kutovima. No za potrebe ovog istraživanja, u obzir će biti uzeti samo kutovi zvučnog snopa od  $60^\circ$  i  $64^\circ$ . U oba se slučaja promatra pojačanje pri kojemu amplituda odaziva iznosi 80% visine ekrana.



Slika 6.11 Plan mjerenja

Shematski prikaz nagiba indikacija u pojedinim uzorcima je dan na slici 6.12.





Slika 6.12 Položaj i nagib linijskih indikacija u uzorcima



Slika 6.13 Preliminarno ispitivanje i pripremanje opreme



Mjerenje i pozicioniranje sonde se vrši ručno. No kako bi uvjeti bili kontrolirani i sonda uvijek postavljena u isti položaj (indikacije se nalaze na svim uzorcima na istoj poziciji) izrađeni su i graničnici za pozicioniranje sonde kako bi zvučni snop na svim uzorcima iz istog položaja obuhvaćao indikaciju. Na graničniku su također označene tri pozicije za mjerenje na krajevima i u sredini indikacije.



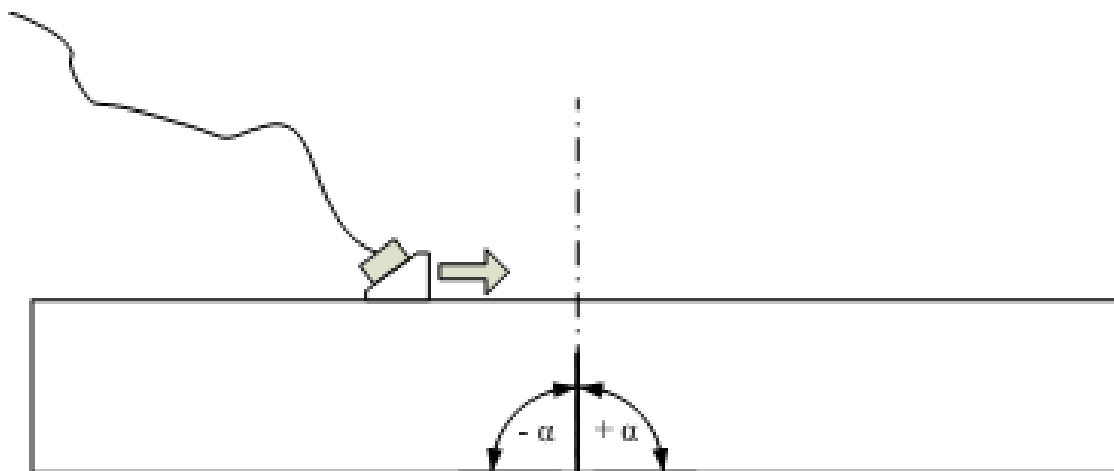
**Slika 6.14** Postavljeni eksperiment – uređaj, sonda i graničnik za pozicioniranje sonde



**Slika 6.15** Ispitivanje uzoraka

## 7. REZULTATI ISPITIVANJA

Na svakom uzorku su izvršena mjerenja na 6 pozicija (Slika 6.11). Predznak kuta nagiba indikacija u odnosu na položaj sonde sa kojom je vršeno mjerenje i okomicu na kontaktnu površinu primopredajnika je definiran prema slici 7.1.



Slika 7.1 Definiranje kuta nagiba indikacije s obzirom na položaj sonde i površinu na kojoj se vrši ispitivanje

### 7.1. SONDA GE 115-500-013; 4 MHz, 16 elemenata

Prvo mjerenje je obavljeno sa koherentnom sondom GE 115-500-013;4MHz, 16 elemenata.

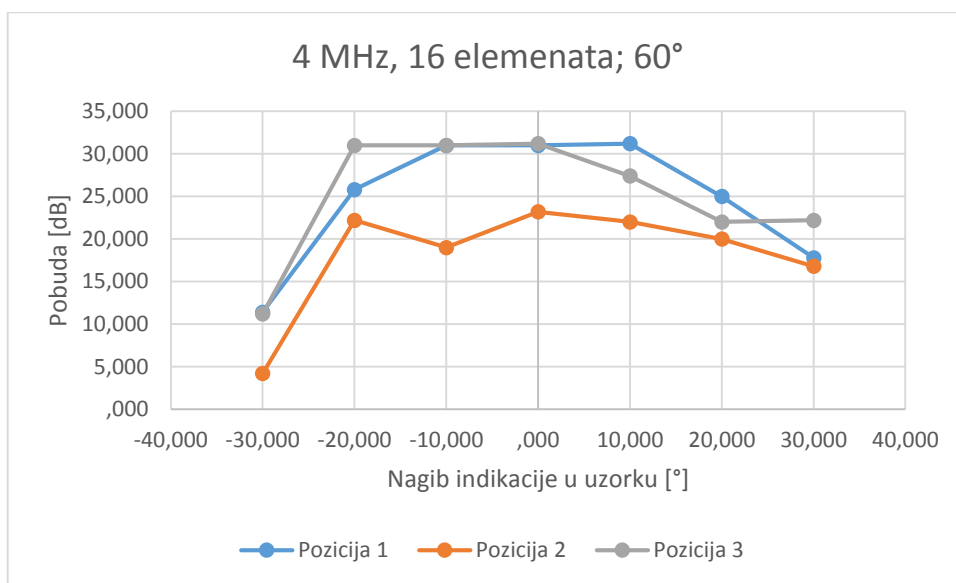
Rezultati mjerenja su prikazani na dijagramu. Na vertikalnoj osi je prikazana pobuda [dB] pri kojoj je amplituda primljenog signala iznosila 80% visine ekrana. To je amplituda signala pri kojoj se smatra da je signal indikacije jasan i nedvosmislen.

Visina/iznos pobude predstavlja pojačanje koje je bilo potrebno dodati kako bi se amplituda signala reflektiranog od indikacije dosegla prag od 80% visine ekrana. Drugim riječima, manja vrijednost pobude predstavlja jasniju refleksiju signala, odnosno govori o većoj količini reflektirane energije koja se vratila natrag u pretvornik.

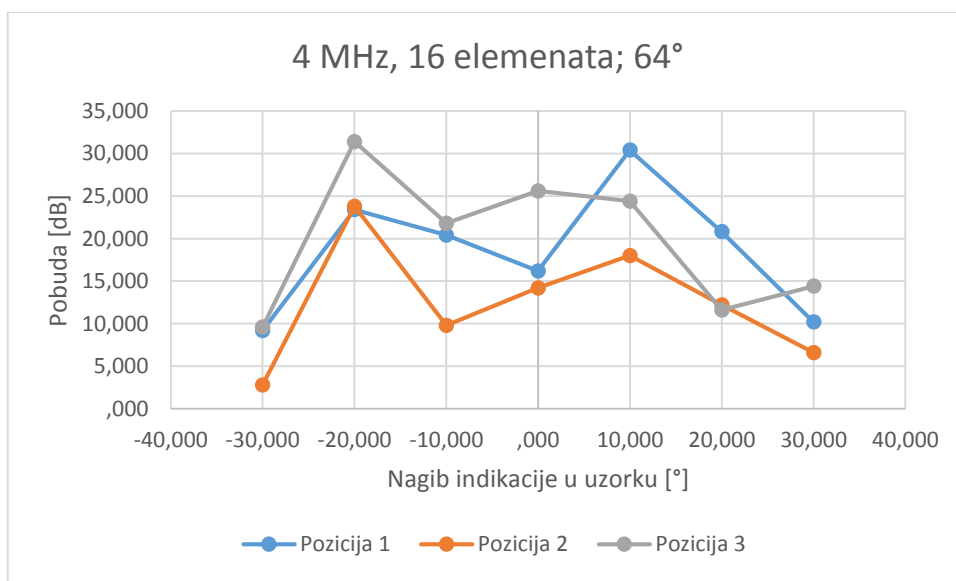
Na horizontalnoj se pak osi nalaze kutovi nagiba indikacija u uzorku u odnosu na njihov položaj i nagib prema položaju sonde kojom se vrši mjerenje. Predznak kuta nagiba indikacije je definiran prema slici 7.1.

Ovisnost pobude signala u odnosu na nagib indikacije je iskazana na dijagramima za tri pozicije na kojima je vršeno mjerenje: pozicije 1, 2 i 3. Pozicije su već prethodno definirane na slici 6.11.

Pozicije 1 i 2 predstavljaju točke mjerenja na rubovima indikacija. Također je mjereno na sredini indikacije (pozicija 2) kako bi se isključio utjecaj rubnih uvjeta.



**Tablica 7-1 Sonda 4 MHz, kut 60°, 3 pozicije**



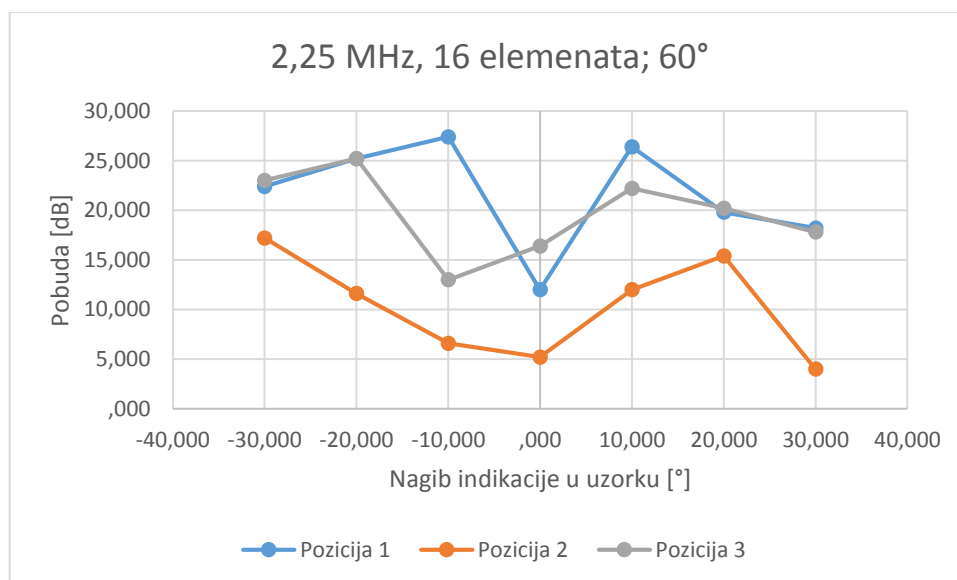
**Tablica 7-2 Sonda 4 MHz, kut 64°, 3 pozicije**

Iz dijagrama se može primijetiti kako je jači odaziv signala od sredine indikacije nego od njenih rubova. To je bilo sukladno pretpostavkama, s obzirom da na rubu indikacije samo dio snopa pada na indikaciju, zbog čega je potrebno dovesti i više energije kako bi se dovoljna količina energije mogla vratiti u sondu.

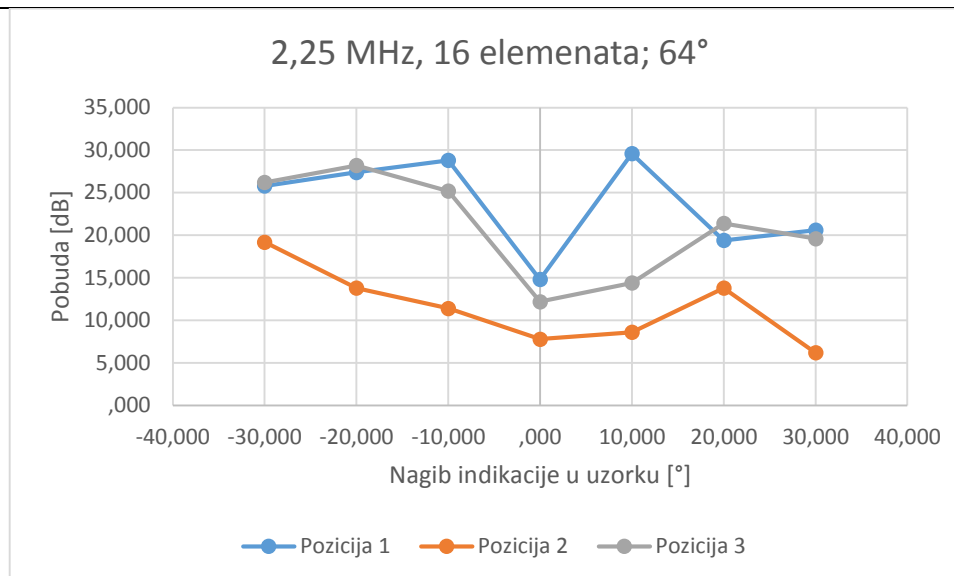
Drugi utjecaj je sama nesavršenost izrade uzorka. Indikacija je izrađena kao tanki duboki utor. Veoma je vjerojatno da konačni oblik indikacije nije idealan. Bilo da rubovi indikacije nisu idealnog oblika ili da ima nesavršenosti u samom obliku i položaju indikacije.

## 7.2. SONDA GE 115-500-07; 2,25 MHz, 16 elemenata

Drugo mjerenje je obavljeno sa koherentnom sondom GE 115-500-007; 2,25MHz, 16 elemenata.



**Tablica 7-3 Sonda 2,25 MHz, kut 60°, 3 pozicije**



**Tablica 7-4 Sonda 2,25 MHz, kut 64°, 3 pozicije**

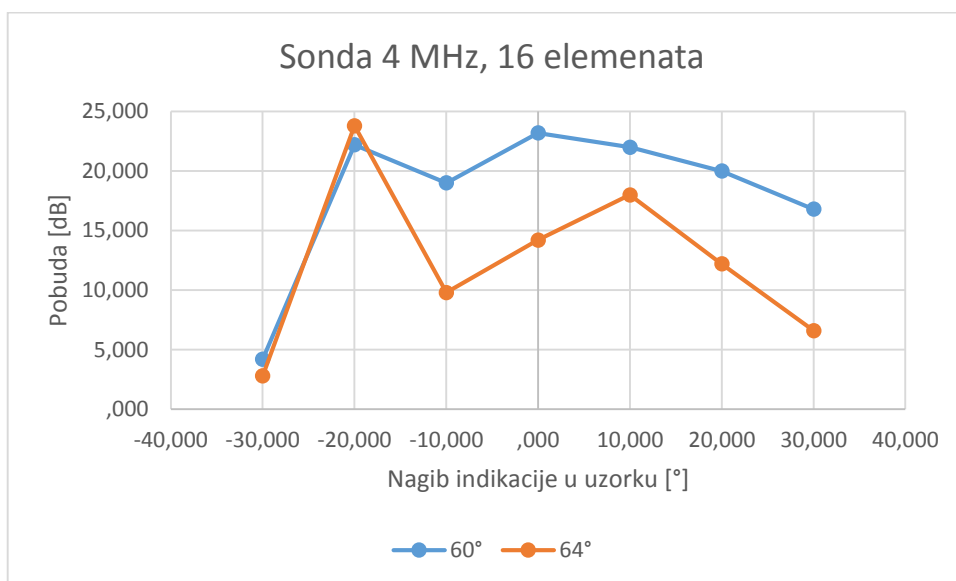
Iz dijagrama 7-3 i 7-4 je također vidljivo kako je reflektirani signal od indikacije na pozicijama 2 i 3 slabiji od signala na sredini indikacije. Time se potvrđuje pretpostavka o mjeranju na rubu indikacije.

Na ovim dijagramima se također može primijetiti veće rasipanje podataka za pozicije 1 i 3. Kako isto nije prisutno i na poziciji u sredini indikacije, to se također pripisuje utjecaju ruba indikacije. Kako se mjerenja vrše ručno i sonda se pozicionira ručno. Premda se nastojalo isključiti što više utjecaja prilikom pozicioniranja korištenjem graničnika, i dalje je dovoljan razmjerno mali pomak ili zakret sonde da bi došlo do razlike u rezultatima mjerenja.

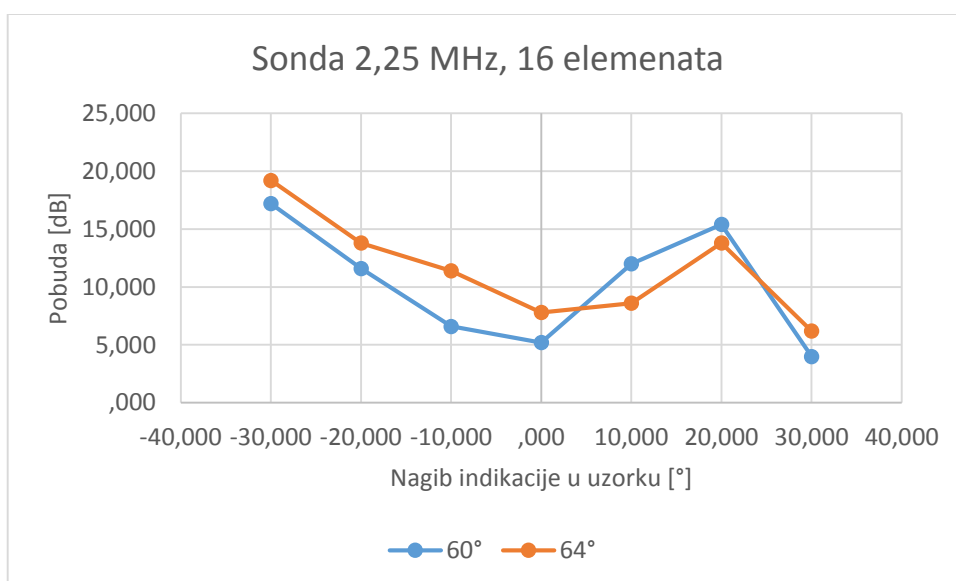
Uslijed velikih rasipanja na mjerenjima na rubovima indikacije, za daljnje razmatranje će se u obzir uzimati samo mjerenja na sredini indikacije (pozicija 2 u gornjim dijagramima). U nastavku će se razmatrati usporedba podataka o odazivu od indikacije na poziciji 2 na dva načina. Prvo će se usporediti podaci dobiveni istom sondom, odnosno korištenjem iste frekvencije ultrazvuka, ali za različite kutove izlaznog ultrazvučnog snopa. Podaci su očitavani za vrijednost kutova zvučnog snopa od 60° i 64°.

Nakon toga će se usporediti odaziv od indikacije za isti kut ultrazvučnog snopa, ali za različite vrijednosti frekvencije ultrazvuka.

### 7.3. USPOREDBA ODAZIVA OD INDIKACIJE ZA RAZLIČITE KUTOVE ZVUČNOG SNOVA



**Tablica 7-5 Sonda 4 MHz, kutovi**

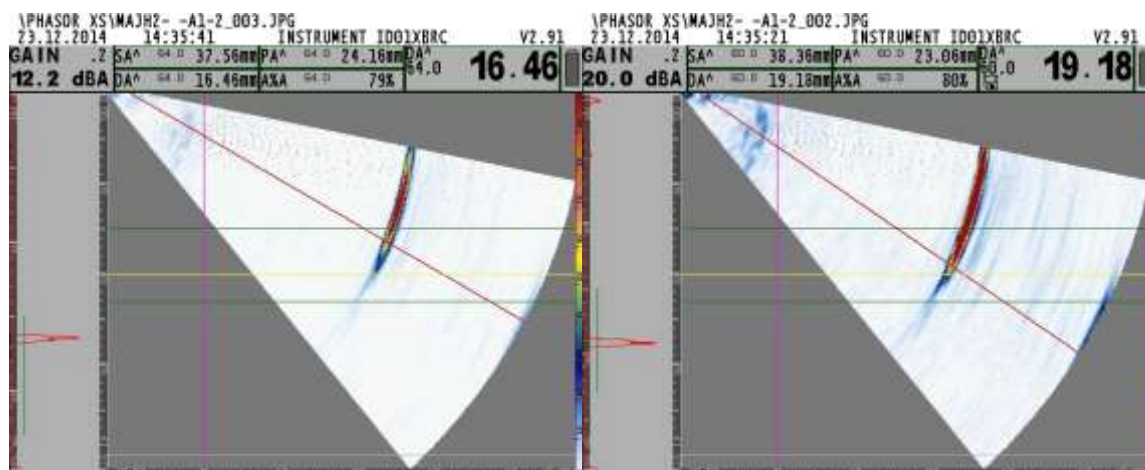


**Tablica 7-6 Sonda 2,25 MHz, kutovi**

Iz dijagrama se vidi razlika u odazivu od indikacije za malu promjenu kuta emitiranog zvučnog snopa kojim se vrši ispitivanje. Prilikom ispitivanja istom sondom, u istom položaju postoji razlika u odazivu za različiti kut zvučnog snopa. Do toga dolazi uslijed refleksije ultrazvučnog snopa i puta koji emitirani ultrazvuk mora preći kako bi se reflektirani signal vratio i bio zabilježen u sondi.

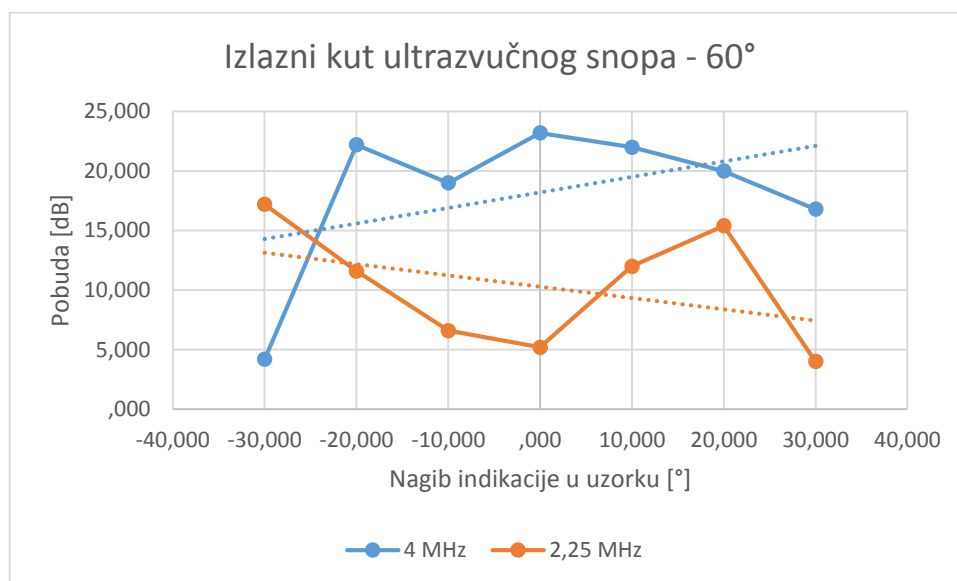
Na slici 7.2 se nalaze dva S-prikaza na kojima je jasno vidljiva indikacija u materijalu. Indikaciju smatramo vidljivom kada je visina amplitude reflektiranog signala veća od zadane granice. U ovom slučaju smo zadali granicu od 80% visine ekrana.

Obje slike su snimljene na istoj poziciji istog uzorka uz isti položaj sonde. Na slici lijevo promatramo odaziv za kut emitiranog zvučnog snopa od  $64^\circ$ . Kako bismo istu indikaciju mogli otkriti sa kutom od  $60^\circ$  bilo je potrebno dodati pojačanje kako bi se dovoljna količina reflektirane energije vratila u sondu. Iz S-prikaza je vrlo jasno vidljivo postojanje indikacije. Međutim, vrlo je lako moguće da ju sa konvencionalnom sondom za ispitivanje ultrazvukom, iz tog položaja, ne bismo uspješno detektirali, što je odličan prikaz prednosti uređaja za ispitivanje koherentnim ultrazvučnim poljem.

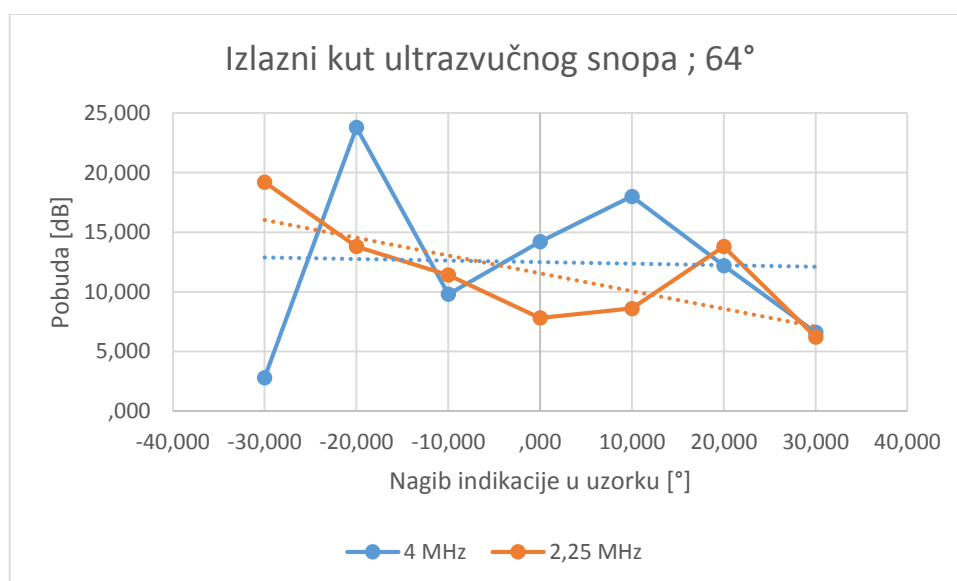


Slika 7.2 Usporedba odaziva pri 4 MHz, kut indikacije  $20^\circ$

#### 7.4. USPOREDBA ODAZIVA OD INDIKACIJE ZA ISPITIVANJE RAZLIČITIM FREKVENCIJAMA ULTRAZVUKA



Tablica 7-7 Kut 60°, frekvencije



Tablica 7-8 Kut 64°, frekvencije

U dijagramima je prikazana razlika u odazivu od indikacije pod određenim kutom za ispitivanje različitim frekvencijama ultrazvuka. Na dijagramu 7-7 su podaci za izlazni kut emitiranog snopa od 60° dok su na dijagramu 7-8 podaci za kut od 64°.

Trend kretanja krivulja se za ispitivanje različitim frekvencijama pokazao zrcalnim. I to i za slučaj oba kuta, 60° i 64°. Kao nastavak istraživanja je moguće ispitati uzorke metodom



konvencionalnog ultrazvuka, i to istim frekvencijama ultrazvuka (2,25 MHz i 4 MHz) i sondama sa istim kutom ( $60^\circ$ ), usporediti podatke i potvrditi postojanje takvog trenda podataka.

Također bi bilo interesantno ispitati ponašanje odaziva od indikacija u slučaju ispitivanja metodom koherentnog ultrazvučnog polja sa nižom i višom frekvencijom od ovih korištenih u ovome radu i ustanoviti postoji li konstantni trend u kretanju podataka.

Prilikom ispitivanja ultrazvukom, važnu ulogu ima rasipanje ultrazvučnog snopa kojim se vrši mjerenje, o čemu je već bilo riječi ranije.

Mjera rasipanja zvučnog snopa je kut divergencije. Njega se računa prema izrazu:

$$\sin(\gamma_6) = \frac{0,5 * c}{f * D_{eff}}$$

Gdje je

$D_{eff}$  – efektivni radijus virtualne sonde [mm]

$\gamma_6$  – kut divergencije zvučnog snopa

Za  $\sin(\gamma_6) \ll$  vrijedi  $\sin(\gamma_6) = \gamma_6$

Iz čega proizlazi

$$\gamma_6 = \frac{0,5 * c}{f * D_{eff}} \text{ [rad]}$$

Za pretvornike kojima su vršena ispitivanja, imamo slijedeće podatke:

#### **GE 115-500-013 PA sonda 4 MHz, 16 elemenata**

Veličina virtualne sonde: 8 x 9 mm

Brzina širenja zvuka u materijalu uzoraka  $c = 3228 \text{ m/s}$

$$D_{eff} = \sqrt{8^2 + 9^2} = 12 \text{ mm}$$

Računanjem se dobije:

$$\gamma_6 = 1,9^\circ$$

#### **GE 115-500-007 PA sonda 2,25 MHz, 16 elemenata**

Veličina virtualne sonde: 16 x 13 mm

Brzina širenja zvuka u materijalu uzoraka  $c = 3228 \text{ m/s}$

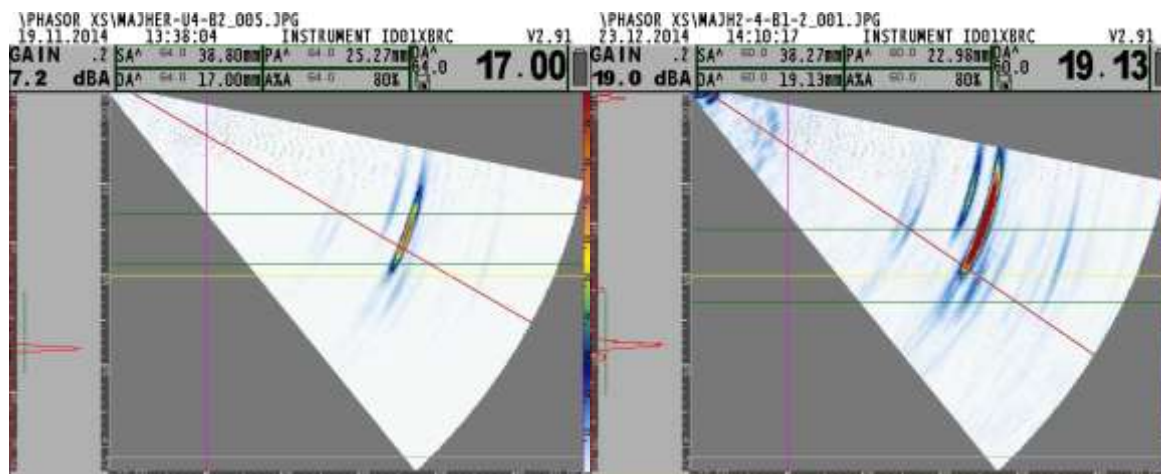
$$D_{eff} = \sqrt{13^2 + 16^2} = 20 \text{ mm}$$

Računanjem se dobije:

$$\gamma_6 = 2,1^\circ$$

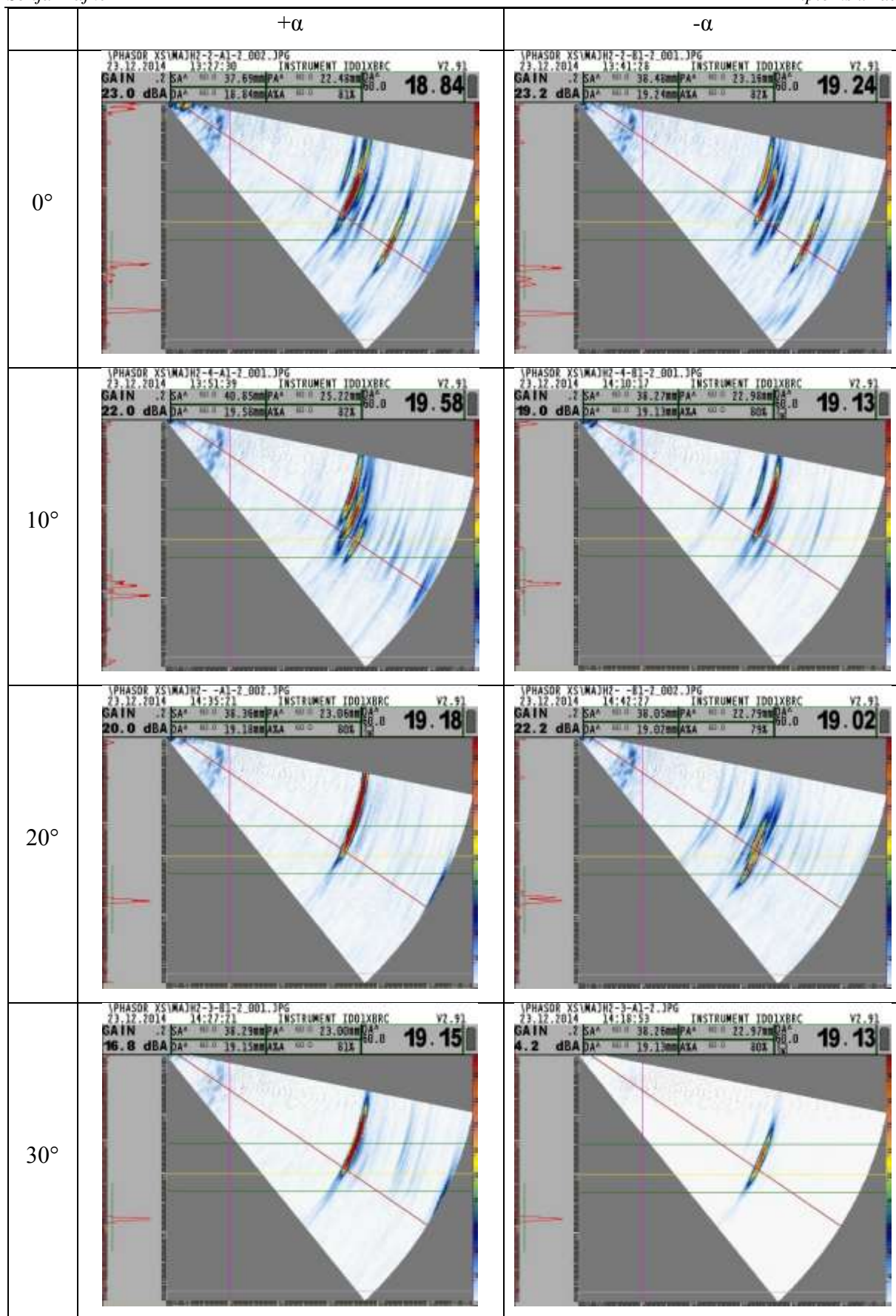
Premda su korišteni različiti pretvornici (različitih frekvencija), dobiveni kutovi divergencije zvučnog snopa su približno jednaki. To je zbog razlike u veličini virtualnih sonde; pretvornik 2,25 MHz je znatno veći.

Slijedom toga, zaključuje se da je do izmjenjenih razlika u odazivu od indikacija došlo zbog utjecaja različitih frekvencija ultrazvuka u mjerenju. Kao što je već ranije bilo riječi, korištenjem ultrazvučnih valova više frekvencije, postiže se veća osjetljivost i razlučivost indikacija u materijalu. No također, kako se zvučni snop odbija od više reflektora, moguće je otkriti sitnije indikacije te dolazi i do pojave šuma i zagušenja.

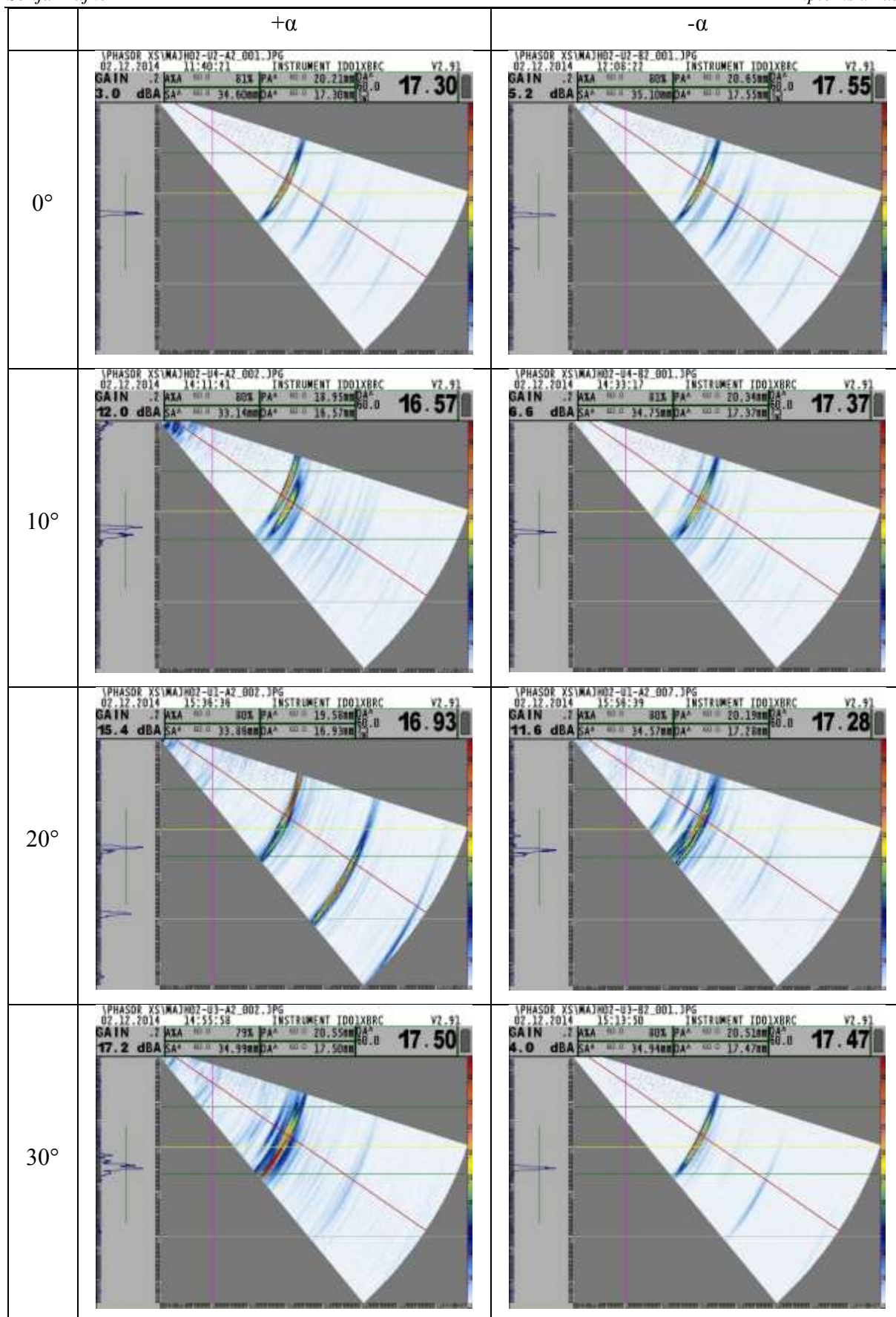


**Slika 7.3 S-prikaz indikacije pod kutom od  $10^\circ$  sniman pretvornikom 2,25 MHz (lijevo) i 4 MHz (desno)**

Na slici 7.3 su prikazana dva S-prikaza. Na slici lijevo, za snimanje uzorka je korištena frekvencija 2,25 MHz, dok je na desnoj slici korištena frekvencija 4 MHz. Na drugom je potrebno bilo dodati veće pojačanje za postizanje jednake amplitude reflektiranog signala. Zbog veće osjetljivosti, dolazi do odbijanja ultrazvučnih valova od više reflektora te se na taj način raspršuje energija.



Tablica 7-9 S-prikazi za sondu 4 MHz, kut  $60^\circ$

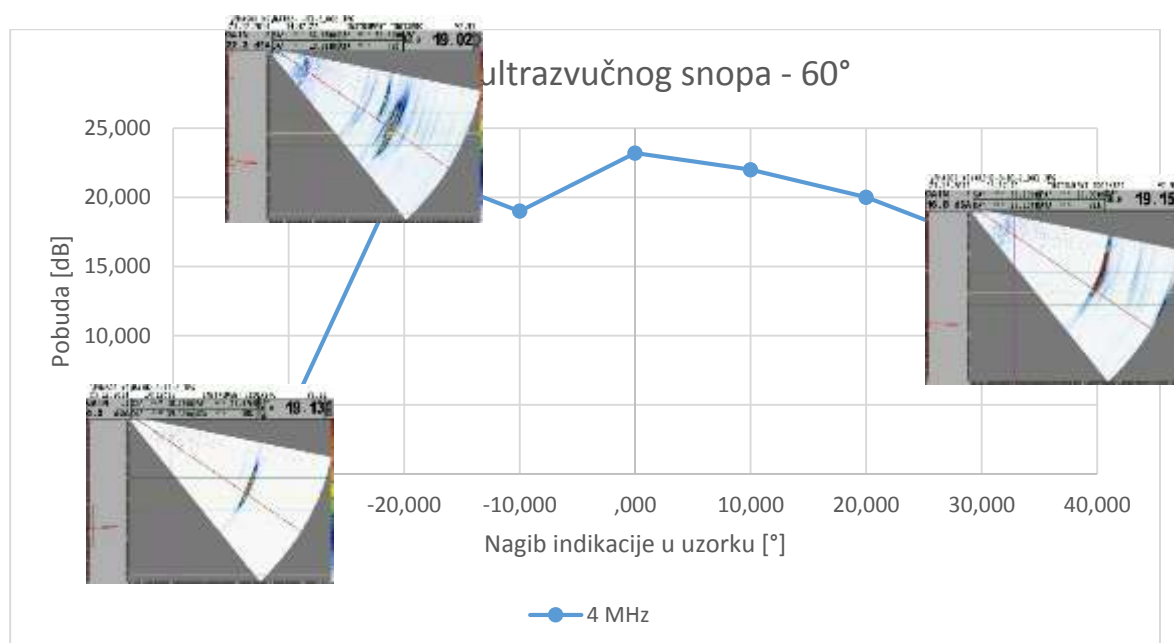


Tablica 7-10 S-prikazi za sondu 2,25 MHz, kut  $60^\circ$

U tablicama 7-9 i 7-10 su dani S-prikazi snimaka sondama 4 MHz i 2,25 MHz. Prikazi su dani za sve odazive od indikacije u sredini linijske indikacije na uzorku (pozicija 2).

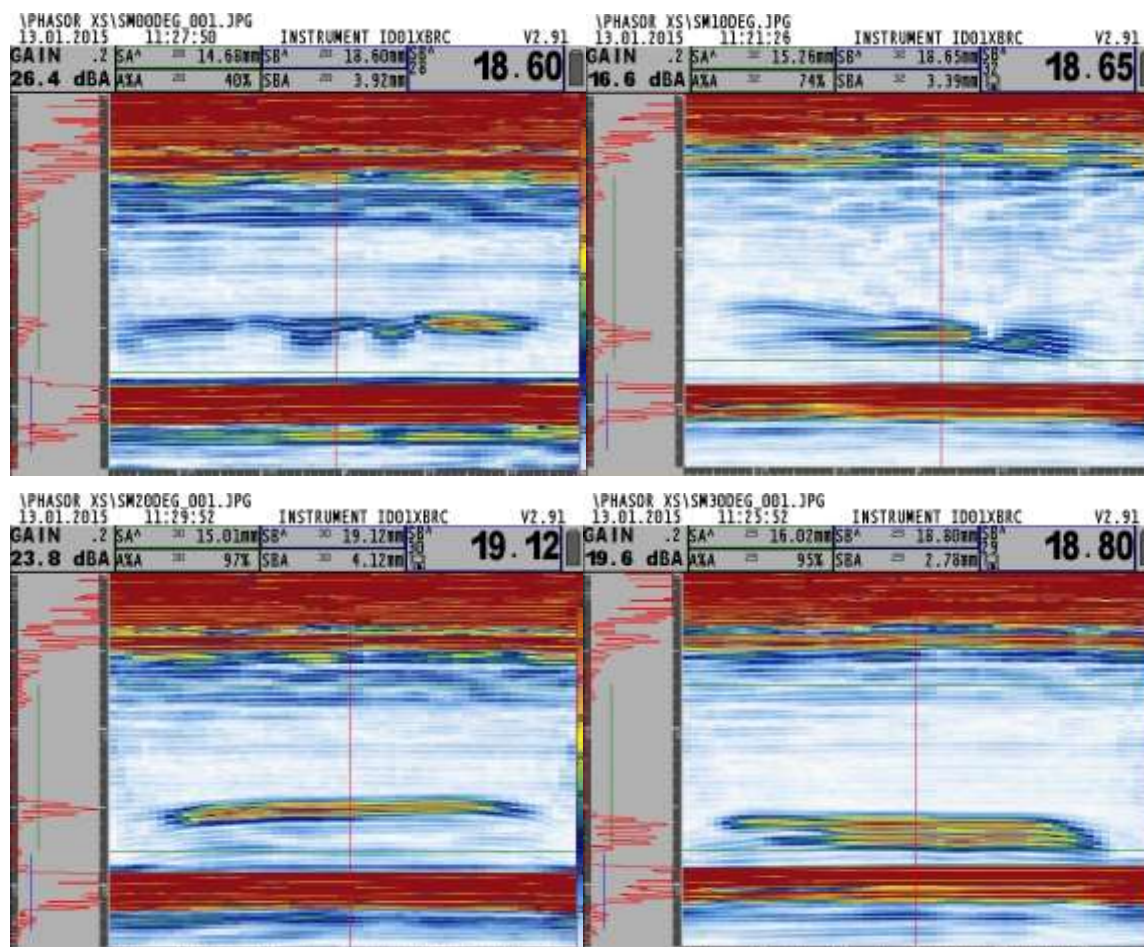
Kada ih se uspoređi sa dijagramima zavisnosti pobude od kuta indikacije, može se primijetiti kako u slučajevima kada je došlo do višestruke refleksije ultrazvučnog vala, došlo je i do većeg rasipanja energije, odnosno bilo je potrebno dati veću pobudu kako bi visina amplitude dosegla zadanih 80% ekrana.

Radi lakšeg snalaženja, to je prikazano na slici 7-11. S-prikazi za pojedine nagibe indikacija u uzorcima su pridruženi dijagramu ovisnosti jačine reflektiranog signala o nagibu indikacije u uzorku.



**Tablica 7-11 Zavisnost odaziva od indikacije od raspršenja snopa**

## 7.5. SONDA GE 115-100-007; 5 MHz, 64 elementa



Slika 7.4 Prikazi uzoraka sa kutovima indikacija po redu s lijeva na desno: 0°, 10°, 20°, 30°

Napravljena su i kontrolna ispitivanja uzoraka sa ravnom sondom. Korištena je koherentna sonda GE 115-100-007. Parametri ispitivanja su dani na slici 7.6.

### 115-100-007

- Part number: 115-100-007
- Lead Time: 5 days
- Connector Type: Phasor
- Frequency [MHz]: 5
- Element Count: 64
- Pitch[mm]: 1
- Aperture[mm]: 64 x 10
- Elevation[mm]: 10
- Case Style: C4
- Cable[m]: 3



#### Dimensions

- A: 84
- B: 36
- C: 32
- D: 36
- E: 71
- F: 28

Slika 7.5 Specifikacije pretvornika 5 MHz, 64 elementa

Parameter Table				
Probe	PART NUM	SERIAL NUM	FREQUENCY	NUM ELEMENTS
	115-100-007	14C0126E	5.0 MHz	64
	PITCH	ELEVATION	ORIGIN OFFSET	
	1.00 mm	10.00 mm	0.00 mm	
Wedge	PART NUM	SERIAL NUM	ANGLE	ELEM 1 POS
	118-350-024	000000	0.0 deg	HIGH END
	VELOCITY	FRONT	OFFSET Z	
	2337 m/s	0.00 mm	20.00 mm	
Scan	MAT THICKNESS	LEG	DISPLAY DELAY	PROBE DELAY
	30.00 mm	0.8	0.00 mm	0.465 us
	MATERIAL	WAVE TYPE	VELOCITY	DISPLAY START
	CUSTOM	LONGITUDINAL	5948 m/s	MATERIAL
	D-CAL MODE	CAL TYPE	D-REF 1	D-REF 2
	OFF	1-POINT	25.40 mm	N/A
	SCAN TYPE	FOCAL POINT	ANG CORRECTED	ASCAN MODE
	LINEAR	UNFOCUSED	ON	NORMAL
	ANGLE START	ANGLE STOP	ANGLE STEP	
	0.0 deg	0.0 deg	0.5 deg	
	FIRST ELEMENT	APERTURE SIZE	APERTURE STEP	NUM OF STEPS
	1	8	1	57
	ANALOG GAIN	DIGITAL GAIN	OFFLINE GAIN	REF GAIN
	26.4 dB	1.4 dB	N/A	OFF
	ANALOG DB REF	DIGITAL DB REF		
OFF	OFF			
FILE	LAST DATASET LOADED			
	02-64-05-30MM			
Setup	PLSR VOLTAGE	PLSR WIDTH	PRF	FRAME RATE
	74 V	110 ns	1210 Hz	15 Hz
	RECTIFY	TCG MODE	FREQUENCY	TTL #1
	FULLWAVE	OFF	5 MHz	GATE A
	VIEW MODE	DATA SOURCE		
FRAME	AMP A			
CLOCK	ENCODER			
TIMED	N/A	SAMPLE INTERVL	DISPLAY LENGTH	
		60 Hz	(21.4 sec)	
Gate	GATE SHAPE	GATE A LOGIC	GATE B LOGIC	GATE IF LOGIC
	N/A	POSITIVE	POSITIVE	OFF
	GATE A START	GATE A WIDTH	GATE A TRSH	TOF MODE
	7.18 mm	10.58 mm	30 %	PEAK
	GATE B START	GATE B WIDTH	GATE B TRSH	TOF MODE
	18.02 mm	4.91 mm	22 %	PEAK
	IF GATE START	IF GATE WIDTH	IF GATE TRSH	TOF MODE
12.70 mm	25.40 mm	30 %	FLANK	

Slika 7.6 Postavke za mjerenje, sonda GE 115-100-007 5 MHz, 64 elemenata

Iz prikaza je moguće primijetiti kako nisu svi utori idealnog oblika, kako je već i pretpostavljeno iz rezultata ispitivanja sa prethodnim sondama.

Na uzorku sa okomitom linijskom indikacijom (slika 7.4 – gore lijevo) moguće je primijetiti nešto jači odaziv sa jednog kraja indikacije. Dok je indikacija postavljena u smjeru upadnog ultrazvučnog vala, odaziv od nje bi trebao biti minimalan. Međutim, vidljivo je kako to ovdje nije posve slučaj. Iz toga se može pretpostaviti kako indikacija nije idealno ravno izrađena, već postoji bilo skošenje, bilo neki drugi način odstupanja od idealne forme indikacije.

Kod uzorka sa indikacijom od  $10^\circ$  (slika 7.4 desno gore), nepravilnosti u izradi su izražene. Odaziv od indikacije bi u ovom pogledu trebao biti jednoličan po cijeloj dužini indikacije, međutim, očito je kako ovdje to nije slučaj.

Na prikazu uzorka sa indikacijom pod kutom od  $20^\circ$  (slika 7.4 dolje lijevo) je moguće očitati konstantni odaziv cijelom dužinom indikacije. Grupiranje rezultata ispitivanja na pozicijama kuta indikacije od  $20^\circ$  na dijagramima 7-1 do 7-4 to i potvrđuje.

Odaziv od indikacije koja je pod kutom od  $30^\circ$  je većinom također konstantan. Jedino se može primijetiti nepravilnost kod ruba gdje se nalazi pozicija 1.



## 7.6. SIGNAL U VREMENSKOJ I FREKVENCIJSKOJ DOMENI

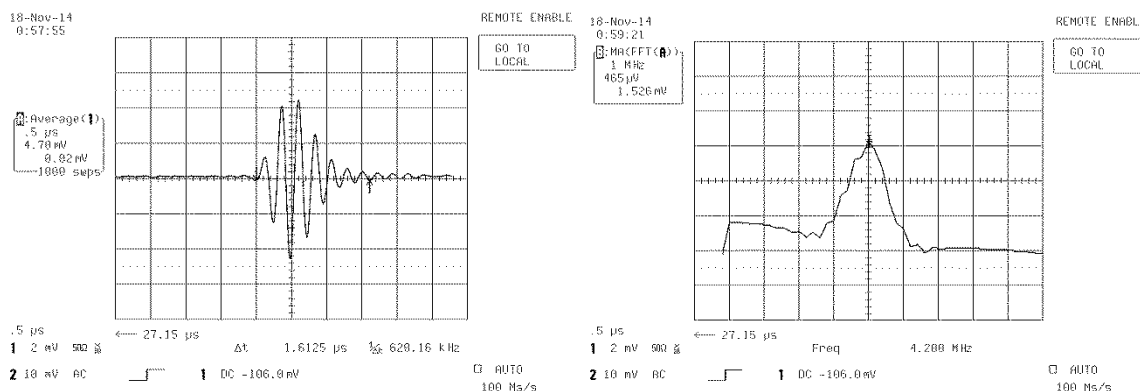
Provedena su mjerenja konvencionalnom kutnom sondom 4 MHz, kut  $60^\circ$ . Na osciloskopu su zabilježeni dobiveni signali u frekvencijskoj domeni i FFT.

Na RF prikazu je ustanovljeno da je u nekoliko slučajeva došlo do obrtaja faze – kod signala za kutove indikacije  $+30^\circ$ ,  $-30^\circ$  i odaziva od okomite indikacije, međutim samo sa jedne strane. Također je kod indikacije sa nagibom  $+10^\circ$  došlo do udvostručavanja signala.

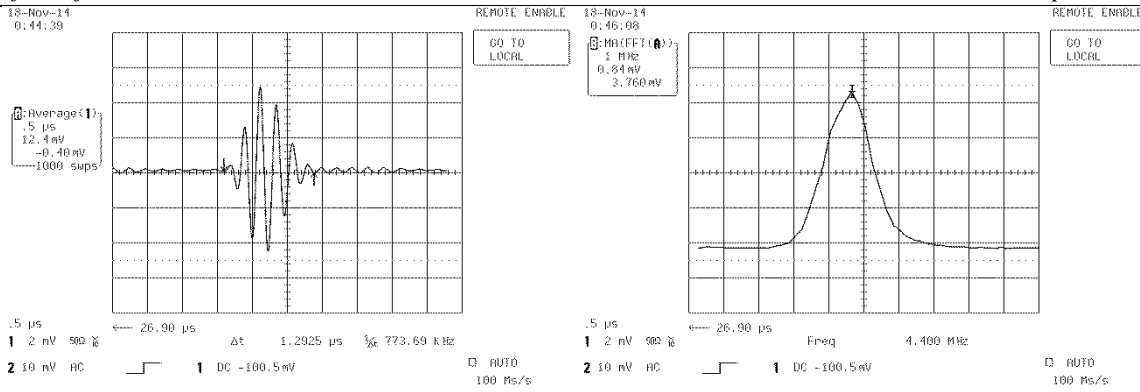
Za kvalitetnu analizu dobivenih podataka, moguće je usporediti dobivene signale sa onima dobivenima uređajem za ispitivanje koherentnim ultrazvučnim poljem.



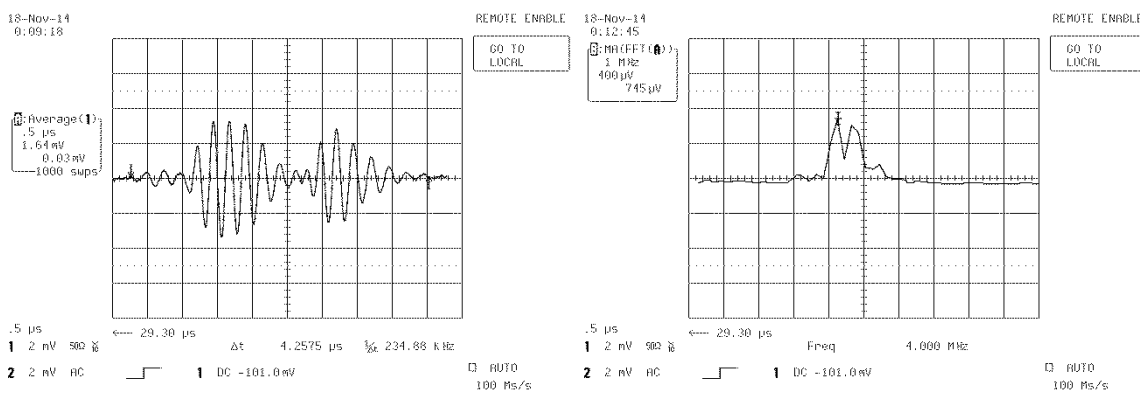
Slika 7.7 Osciloskop



Slika 7.8 Signal za nagib indikacije  $+20^\circ$



Slika 7.9 Nagib indikacije +30°, vidljiv obrtaj u fazi na RF signalu



Slika 7.10 Nagib indikacije +10°, udvostručenje signala

## 8. ZAKLJUČAK I DALJNJA RAZMATRANJA

Metoda ispitivanja primjenom koherentnog ultrazvučnog polja je izrazito moćan alat u domeni nerazornih ispitivanja. Uređaj pruža veliku slobodu i mogućnosti prikaza i obrade podataka kakva nije moguća uz konvencionalne metode ispitivanja ultrazvukom. Posljedica je veća brzina provođenja ispitivanja, veća pouzdanost i jednostavnije arhiviranje i kasnija obrada rezultata ispitivanja.

Izvršeno je ispitivanje skupa uzoraka koji sadrže linijske indikacije različitih orijentacija ne bi li se izdvojila mjera razlučivanja orijentacije indikacija u uzorku.

Ispitivanje i pozicioniranje sonde se vršilo ručno, odnosno uz pomoć graničnika radi postizanja istih uvjeta na svim pozicijama ispitivanja. Međutim, pokazalo se kako već i minimalni pomak ili zakret sonde prilikom mjerenja može imati znatan utjecaj na rezultat mjerenja.

Također je ustanovljeno da indikacije u uzorcima nisu idealnog oblika, već je prilikom izrade došlo do pojave neravnina koje utječu na rezultate mjerenja.

Dogodio se zanimljiv obrat u trendu podataka dobivenih ispitivanjem različitim frekvencijama ultrazvuka. Za neko daljnje istraživanje bi bilo interesantno istražiti dešava li se, odnosno nastavlja li se takav trend i pri drugim frekvencijama ispitivanja. Ispitivanje je rađeno sa frekvencijama 2,25 MHz i 4 MHz. U daljnjem radu se može ispitati ponašanje odaziva od pukotine pri višim i nižim frekvencijama.

Također bi bilo zanimljivo ponoviti ispitivanje pri istim uvjetima ali sa konvencionalnim ultrazvučnim ispitivanjima i usporediti dobivene podatke.

Analiza signala u vremenskoj domeni i analiza promjena u frekvencijskom odazivu za konvencionalni ultrazvuk nisu polučili značajne rezultate, otvorena je mogućnost analize signala za koherentno ultrazvučno polje.

Primijećene su određene zakonitosti, no do konačne mjere razlučivanja ovim radom se nije došlo. No kao što je već napomenuto, istraživanje je otvorilo mnoga vrata za daljnje smjerove istraživanja.

---

**LITERATURA**

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Nondestructive Testing (NDT); Georgia Institute of Technology; <http://www-old.me.gatech.edu/jonathan.colton/me4793/ndt.pdf>
- [3] <http://www.ob-ultrasound.net/ndt.html>
- [4] <https://www.nde-ed.org/>
- [5] dr.sc. D. Markučić, Metode nerazornih ispitivanja: podloge za predavanja; FSB, 2003.
- [6] [http://www.ge-mcs.com/en/ult\\_rasound/portable-flaw-detectors/phasor-series.html](http://www.ge-mcs.com/en/ult_rasound/portable-flaw-detectors/phasor-series.html)
- [7] I. Guliš, Radne karakteristike ultrazvučnih sondi, diplomski rad, 2012.
- [8] V. Mihljević, Detekcija zavora u metalnim šavnim cijevima, diplomski rad, FSB, 2007.
- [9] Phased Array Technical Guidelines, R/D Tech Corp, 2005
- [10] <http://www.fsb.unizg.hr/ndt/term/ut/iso-TOCw.htm>
- [11] [www.olympus-ims.com/en/](http://www.olympus-ims.com/en/)
- [12] K. Deutsch, S. Kierspel, Manual Weld Inspection with Ultrasound – Conventionally or with Phased Arrays, Germany, [http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/560\\_wcndtfinal00560.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/560_wcndtfinal00560.pdf)
- [13] S. Anandamurugan, Manual Phased Array Ultrasonic Technique for Weld Application. GE Inspection Technologies, JFWTC, Bangalore, India, <http://www.ndt.net/article/nde-india2009/pdf/12-A-2.pdf>
- [14] <http://www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke4.htm>
- [15] [http://www.academia.edu/8136436/Understanding\\_Ultrasonic\\_Testing\\_of\\_Steel\\_Structure-My\\_Preparatory\\_notes\\_for\\_ASNT\\_examination\\_Part-5](http://www.academia.edu/8136436/Understanding_Ultrasonic_Testing_of_Steel_Structure-My_Preparatory_notes_for_ASNT_examination_Part-5)

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc