

# Dizajn radnog etalona za podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava

---

**Kožić, Karlo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:235:026641>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Karlo Kožić**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Morana Mihaljević, dipl. ing.

Student:

Karlo Kožić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se doc.dr.sc. Morani Mihaljević na odabiru teme diplomskog rada te na korisnim savjetima, stručnom vodstvu, prenesenom znanju i nesebičnoj pomoći tijekom izrade ovoga rada. Također zahvaljujem se i tehničkom suradniku Tomislavu Kezeleu na suradnji tijekom odrađivanja eksperimentalnog dijela, kao i drugim kolegama na pruženoj pomoći.

Veliku zahvalu dugujem svojoj obitelji, prijateljima i djevojci za pruženu podršku tijekom cjelokupnog studiranja.

Karlo Kožić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
 inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KARLO KOŽIĆ** Mat. br.: 0035204761

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dizajn radnoga etalona za podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of reference block for calibration of ultrasonic testing system**

Opis zadatka:

S ciljem potvrđivanja integriteta konstrukcije odnosno ispitivanih komponenti često se primjenjuje ultrazvučna metoda ispitivanja. Uspješnost ultrazvučnog ispitivanja ovisi o specifičnim karakteristikama odabranog ispitnog sustava kojeg je potrebno uskladiti i odgovarajuće podesiti prethodno ispitivanju. Etaloni za podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava definirani su materijalom, toplinskom obradom, geometrijom i kvalitetom površinske hrapavosti.

Za podešavanje osjetljivosti ultrazvučnog ispitnog sustava najčešće se koriste bočni provrti, utori i uvti koji predstavljaju referentne reflektore za dobivanje referentnih visina amplituda signala odjeka od odgovarajućih površina reflektora. Procjenom relativne veličine indikacija pronađenih tijekom ispitivanja određuje se u kolikoj je mjeri realna indikacija veća, manja ili ekvivalentna referentnoj.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- Osmisliti geometriju površine reflektora i konstruirati etalon za podešavanje osjetljivosti ultrazvučnog ispitivanja kutnim sondama nazivnih vrijednosti 45°, 60° i 75°.
- Izraditi etalon s osmišljenom geometrijom površine reflektora korištenjem 3D aditivnih tehnologija.
- Na izrađenom etalonu istražiti relevantna akustička svojstva s obzirom na ishode procjene veličine reflektora.
- Provesti usporedbu procjene veličine reflektora na etalonu ultrazvučnom tehnikom odjeka (PE – Pulse-Echo) pomoću DGS dijagrama i konstruirane nazivne vrijednosti veličine reflektora.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
24. rujna 2020.

Rok predaje rada:  
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:  
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc.  Morana Mihaljević

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc.  Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Ultrazvučna tehnika odjeka.....	2
2. POTREBNA OPREMA ZA PROVOĐENJE ULTRAZVUČNIH ISPITIVANJA .....	7
2.1. Ultrazvučni uređaj.....	8
2.2. Ultrazvučne sonde.....	9
2.2.1. Kutna sonda .....	10
2.2.2. Snellov zakon.....	12
2.2.3. Zone ultrazvučnog snopa .....	18
3. ETALONI ZA PODEŠAVANJE ULTRAZVUČNOG SUSTAVA.....	21
4. PODEŠAVANJE ULTRAZVUČNOG ISPITNOG SUSTAVA .....	23
4.1. Referentni reflektori.....	23
4.2. Procjena veličine reflektora DGS dijagramom .....	24
5. KONSTRUIRANJE I IZRADA ETALONA ZA PODEŠAVANJE ULTRAZVUČNOG SUSTAVA.....	30
5.1. Izrada referentnog etalona izravnim laserskim srašćivanjem metala - DMLS .....	32
5.2. Prednosti i nedostaci DMLS postupka.....	35
6. SNIMANJE ETALONA NA CT-u .....	36
6.1. Princip rada CT uređaja .....	37
6.2. Primjena CT-a u strojarstvu .....	37
6.3. Rezultati CT snimanja etalona .....	39
7. PROCJENA VELIČINE REFLEKTORA POMOĆU ULTRAZVUČNOG SUSTAVA .	42
7.1. Procjena veličine reflektora pomoću DGS dijagrama.....	42
7.1.1. Procjena veličine reflektora pod kutom 60°.....	45
7.1.2. Procjena veličine reflektora pod kutom 45°.....	47
7.1.3. Procjena veličine reflektora pod kutom 70°.....	49
7.2. Procjena veličine reflektora pomoću ultrazvučnog uređaja.....	51
7.2.1. Procjena veličine reflektora pod kutom 60°.....	51
7.2.2. Procjena veličine reflektora pod kutom 45°.....	52
7.2.3. Procjena veličine reflektora pod kutom 70°.....	53
7.3. Usporedba rezultata dobivenih pomoću DGS dijagrama i ultrazvučnog uređaja .....	54
8. ZAKLJUČAK.....	55

---

LITERATURA.....	56
PRILOZI.....	58

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Određivanje položaja i veličine nehomogenosti u materijalu ultrazvučnom tehnikom odjeka [4].....	3
Slika 2.	Ispitivanje zavarenog spoja ultrazvučnom tehnikom odjeka [1].....	3
Slika 3.	Prikaz mrtve zone [6] .....	4
Slika 4.	Longitudinalni val .....	5
Slika 5.	Transverzalni val .....	5
Slika 6.	Najčešće korišteni uređaji za provođenje ultrazvučnih ispitivanja [8].....	8
Slika 7.	Ravna i kutna sonda [1].....	10
Slika 8.	Shema kutne sonde [6] .....	10
Slika 9.	Kutne sonde [9] .....	11
Slika 10.	Snellov zakon [11].....	12
Slika 11.	Snellov zakon u ultrazvučnim ispitivanjima [13].....	15
Slika 12.	Određivanje donjeg graničnog kuta .....	16
Slika 13.	Određivanje gornjeg graničnog kuta .....	17
Slika 14.	Zone ultrazvučnog snopa [15].....	18
Slika 15.	Etalon V1 [17] .....	21
Slika 16.	Etalon V2 [18] .....	21
Slika 17.	FBH i SDH disk reflektori [19].....	24
Slika 18.	Zaslon ultrazvučnog uređaja za beskonačni i referentni reflektor [20].....	25
Slika 19.	DGS dijagram kutne sonde (70°) .....	27
Slika 20.	DGS dijagram kutne sonde (45°) .....	28
Slika 21.	DGS dijagram kutne sonde (60°) .....	29
Slika 22.	Etalon.....	31
Slika 23.	Presjek etalona uz detalj reflektora .....	31
Slika 24.	Faze aditivnih postupaka [22] .....	32
Slika 25.	Metalna tvorevina izrađena aditivnim postupkom DMLS [21] .....	33
Slika 26.	Shematski prikaz 3D tiskanja [21] .....	34
Slika 27.	Primjena CT uređaja u medicini [25].....	36
Slika 28.	Shema CT uređaja [24].....	37
Slika 29.	Primjer analize mehaničkog ponašanja metala pod pritiskom uz CT snimku [24].....	38
Slika 30.	CT snimka etalona.....	39
Slika 31.	Prikaz referentnih reflektora unutar etalona.....	39
Slika 32.	CT snimka referentnog reflektora pod kutom 45°.....	40
Slika 33.	CT snimka referentnog reflektora pod kutom 70°.....	41
Slika 34.	Ultrazvučni uređaj korišten u eksperimentalnom dijelu diplomskog rada (Krautkramer USM 36) .....	42
Slika 35.	Ultrazvučne sonde .....	44
Slika 36.	Referentni etalon V2 .....	44
Slika 37.	Postupak određivanja veličine referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama (60°).....	46
Slika 38.	Postupak određivanja veličine referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama (45°).....	48
Slika 39.	Postupak određivanja veličine referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama (70°).....	50
Slika 40.	Prikaz veličine referentnog reflektora za sondu MWB 60° .....	51
Slika 41.	Prikaz veličine referentnog reflektora za sondu MWB 45° .....	52



---

Slika 42. Prikaz veličine referentnog reflektora za sondu MWB 70° ..... 53

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Brzine ultrazvučnih valova [12] .....	14
Tablica 2. Donji i gornji granični kut .....	18
Tablica 3. Usporedba ostvarenih i dobivenih dimenzija referentnih reflektora .....	41
Tablica 4. Usporedba USM ultrazvučnih uređaja [26].....	43
Tablica 5. Parametri potrebni za određivanje referentne veličine reflektora (60°) .....	45
Tablica 6. Parametri potrebni za određivanje referentne veličine reflektora (45°) .....	47
Tablica 7. Parametri potrebni za određivanje referentne veličine reflektora (70°) .....	49
Tablica 8. Rezultati mjerenja veličine referentnih reflektora. ....	54

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

**BROJ CRTEŽA**      Naziv iz sastavnice

**6112020**              Etalon za podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\theta_1$	°	Kut upadne zrake svjetlosti
$\theta_2$	°	Kut loma
$v_1$	m/s	Brzina zrake
$v_2$	m/s	Brzina zrake
$n_1$	-	Indeks loma materijala
$n_2$	-	Indeks loma materijala
$v_{L\check{c}}$	m/s	Brzina ultrazvučnog longitudinalnog vala u čeliku
$v_{Lp}$	m/s	Brzina ultrazvučnog longitudinalnog vala u pleksistaklu
$v_{T\check{c}}$	m/s	Brzina ultrazvučnog transverznog vala u čeliku
$v_{Tp}$	m/s	Brzina ultrazvučnog transverznog vala u pleksistaklu
$\theta_3$	°	Kut refleksije
$\theta_4$	°	Kut loma
$v_{L1}$	m/s	Brzina upadne ultrazvučne longitudinalne zrake
$v_{L1'}$	m/s	Brzina reflektirane ultrazvučne longitudinalne zrake
$v_{T1}$	m/s	Brzina reflektirane ultrazvučne transverzne zrake
$v_{L2}$	m/s	Brzina transmitirane ultrazvučne longitudinalne zrake
$v_{T2}$	m/s	Brzina transmitirane ultrazvučne transverzne zrake
$\theta_{DG}$	°	Donji granični kut
$\theta_{GG}$	°	Gornji granični kut
$N$	mm	Duljina bliskog polja
$D$	mm	Promjer pretvarača
$f$	MHz	Frekvencija pretvarača
$v$	km/s	Brzina ultrazvuka u materijalu
$\gamma$	°	Kut divergencije

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu konstruiran je i dizajniran radni etalon koji se koristi za podešavanje ultrazvučnog sustava. U uvodu su navedene nerazorne metode ispitivanja uz detaljan opis ultrazvučne metode te tehnike odjeka. Objašnjene su prednosti i nedostaci tehnike odjeka te su opisani ultrazvučni valovi.

Opisana je oprema za ultrazvučno ispitivanje uz prikaz osnovnih dijelova ultrazvučnog uređaja s posebnim osvrtom na kutne ultrazvučne sonde. Uz način rada kutne ultrazvučne sonde objašnjena je pojava lomljenja ultrazvučne zrake na granici sredstva (Snellov zakon) uz proračun donjeg i gornjeg graničnog kuta odabrane ultrazvučne sonde. Nadalje, navedene su zone ultrazvučnog snopa te način izračuna osnovnih parametara ultrazvučnog snopa. Uz sistematizaciju etalona koji su najšire primjenjivi za podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava, razrađeno je i podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava pomoću poznate površine referentnih reflektora, te je opisano kako se procjenjuje veličina referentnog reflektora korištenjem DGS dijagrama. Detaljno je prikazan osmišljeni radni etalon koji je konstruiran za podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava uz objašnjenje aditivne tehnologije njegove izrade. Uz razradu tehničkog crteža etalona navedene su faze aditivne tehnologije, te je izrađeni etalon snimljen na CT uređaju u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina (LFSB) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB) s ciljem dobivanja točnijih dimenzionalnih vrijednosti konstruiranih referentnih reflektora.

Zadnji dio ovog diplomskog rada (uz zaključak) prikazuje procjenu veličine reflektora primjenom ultrazvučnog sustava i to pomoću DGS dijagrama, a zatim i pomoću ultrazvučnog uređaja.

Ključne riječi: tehnika odjeka, ultrazvučni ispitni sustav, DGS dijagram.

## **SUMMARY**

In this master's thesis a reference block for calibration of an ultrasonic system is designed. In the introduction, non destructive methods with detailed description of the ultrasonic method and echo technique are listed. Advantages and disadvantages of the echo technique and the description of ultrasonic waves are given.

Equipment for ultrasonic testing is presented, along with a short description of basic parts of an ultrasonic device with a special reference to an angular ultrasonic probe. In addition to the mode of operation of the angular probe, the phenomenon of ultrasonic beam refraction between two materials (Snell's law) is explained with the calculation of first and second critical angle of the chosen angular probe. The zones of the ultrasonic beam and the method of calculating the basic parameters of it are listed. In addition to the systematization of standards that are most widely applicable for the calibration of the ultrasonic system, the calibration of ultrasonic test system using a known surface of the reference reflectors is developed, with stated estimatization of the size of the reference reflector using DGS diagrams is stated. The reference block designed for calibration of an ultrasonic system is shown in detail with an explanation of its additive manufacturing. With the elaboration of a technical documentation of the reference block, the phases of additive technology are listed. The CT scan of the reference block has been made in a Laboratory for Precision Length measurements (LFSB) at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture with the aim of obtaining more accurate dimensional values of the constructed reference reflectors.

The final part of this thesis (with conclusion) presents an estimate of the size of the reflector with an ultrasonic system using the DGS diagram, and then the estimate via the ultrasonic device.

Keywords: echo technique, ultrasonic testing system, DGS diagram

## 1. UVOD

Nerazorna ispitivanja su vrlo značajna za praćenje kvalitete u proizvodnji (zavarivanje, odljevci, otkivci, strojne i toplinske obrade) te eksploatacije u svrhu pronalaženja volumnih i površinskih nepravilnosti nastalih uslijed tehnoloških ili eksploatacijskih uvjeta. S obzirom na fizikalne principe nerazorne metode dijelimo na [1]:

- Radiografsku metodu (RT),
- Vizualnu metodu (VT),
- Metodu vrtložnih struja (EC),
- Magnetsku metodu (MT),
- Ultrazvučnu metodu (UT),
- Penetransku metodu (PT),
- Metodu ispitivanja propusnosti (LT), itd.

Ultrazvučna metoda kao alat za procjenu kvalitete temelji se na fizikalnom principu ultrazvučnih valova koji se propagacijom kroz homogene materijale odbijaju na granicama dvaju sredstava, a koji su različitih akustičkih svojstava (impedancija). Također se ultrazvučni valovi odbijaju i od granica nastalih uslijed postojanja nehomogenosti u materijalu, a koje mogu biti karakterizirane i kao pogreške. Princip ultrazvuka temelji se na prostiranju ultrazvučnih valova od prijemnika (ultrazvučna sonda) kroz materijal koji se ispituje. Kada ultrazvučni valovi naiđu na nehomogenost (pogrešku) u materijalu, dio energije će se odbiti od te nehomogenosti i vratiti u sondu, dok će ostatak ultrazvučne energije nastaviti propagirati kroz ispitivani materijal. Frekvencija ultrazvučnih valova nalazi se u rasponu od 20 kHz do 10 GHz, a tijekom ultrazvučnog ispitivanja materijala koristi se raspon frekvencija između 0,5 MHz i 10 MHz. Ultrazvučno ispitivanje ima vrlo važnu ulogu pri praćenju kvalitete i ocjenjivanju integriteta pojedinih komponenti, konstrukcija i postrojenja temeljem unaprijed određenih kriterija prihvatljivosti pri čemu se ispituje volumen komponente.

Ultrazvučno ispitivanje primjenjuje se kod ocjenjivanja kvalitete osnovnog materijala kod zavarivanja (rubovi cijevi, rubovi limova), kod utvrđivanja preostale debljine materijala komponenti izloženog eksploatacijskim uvjetima (korozija, erozija), kod održavanja pomorskih konstrukcija (plovila, platforme) te kod određivanja debljine stijenki cjevovoda (petrokemijska i energetska postrojenja, farmaceutska i prehrambena industrija) [2].

Najčešće korištene ultrazvučne tehnike su [3]:

- Tehnika prozvučavanja,
- Tehnika odjeka,
- Tehnika rezonancije.

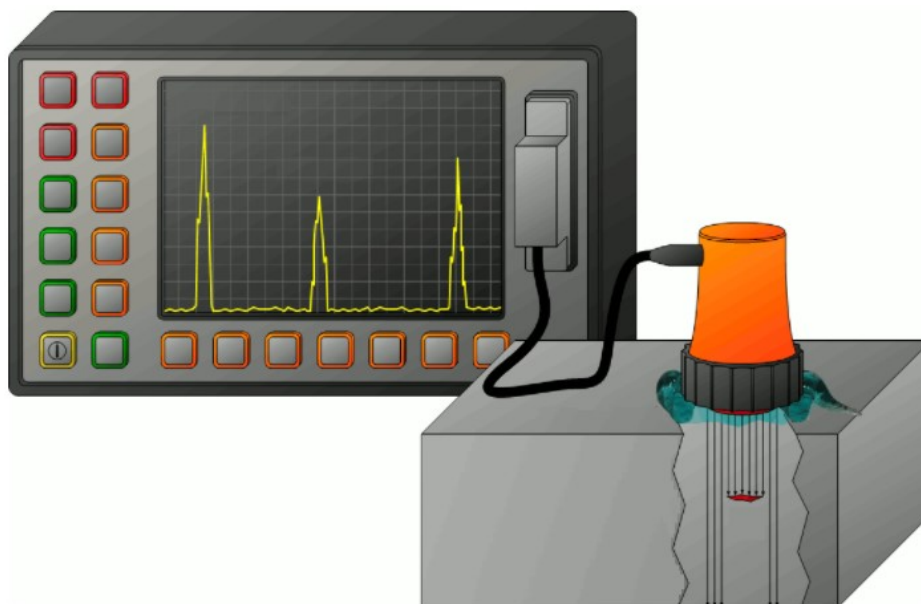
### **1.1. Ultrazvučna tehnika odjeka**

Temelj ultrazvučne tehnike odjeka (engl. *Pulse Echo* – PE) je svojstvo ultrazvuka da se odbija od različitih nehomogenosti u materijalu. Jedna ultrazvučna sonda služi kao odašiljač i prijatelj. Umjesto propuštenog dijela ultrazvučnog impulsa, mjeri se njegov odbijeni (reflektirani) dio. Funkcija prijatelja je da sve ultrazvučne impulse koji se reflektiraju prikazuje na ekranu ultrazvučnog uređaja [3].

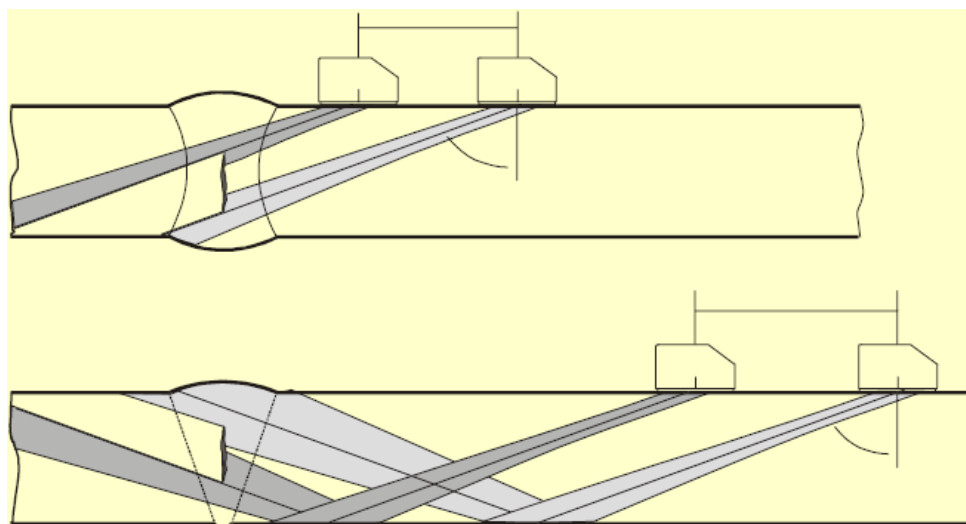
Ultrazvučnom tehnikom odjeka moguće je:

- Odrediti položaj, veličinu i učestalost pogrešaka unutar materijala (slika 1),
- Detektirati dijelove ispitivanog materijala koje nije odgovarajuće toplinski obrađeno (karakterizacija materijala),
- Provjeriti zavarene spojeve (prikazano na slici 2.)





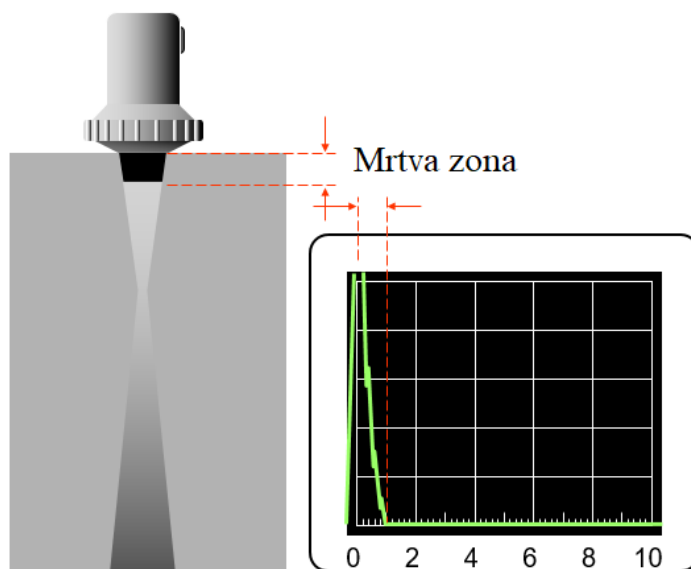
Slika 1. Određivanje položaja i veličine nehomogenosti u materijalu ultrazvučnom tehnikom odjeka [4]



Slika 2. Ispitivanje zavarenog spoja ultrazvučnom tehnikom odjeka [1]

Najvažniji nedostatak ultrazvučne tehnike odjeka je takozvana mrtva zona koju prikazuje slika 3. Zbog fizikalnih principa širenja ultrazvučnih valova emitirani impuls ne može otkriti pogreške u materijalu u blizini ultrazvučne sonde. Mrtva zona je udaljenost između prvog prepoznatljivog odjeka i mjesta gdje ultrazvuk ulazi u ispitivani materijal. Ona ovisi o ultrazvučnom uređaju i o širini emitiranog impulsa, koji ovisi o tipu ultrazvučne sonde. Što je frekvencija ultrazvuka viša, to je mrtva zona kraća, iz razloga što povećanjem frekvencije smanjujemo valnu duljinu. Međutim, više frekvencije se i više prigušuju što onemogućava provođenje ispitivanja grubozrnatih struktura kao i većih debljina [5].

Korištenjem blokova za kašnjenje mrtva zona u materijalu ispitne komponente se može znatno smanjiti, te se svakako izborom vrste ultrazvučne sonde može utjecati na smanjenje mrtve zone, budući da je to parametar koji je svojstven svakoj sondi. Ultrazvučnom tehnikom odjeka određujemo poziciju nehomogenosti tako da se mjeri potrebno vrijeme propagacije ultrazvučnog impulsa do pozicije nehomogenosti i nazad [3].



Slika 3. Prikaz mrtve zone [6]

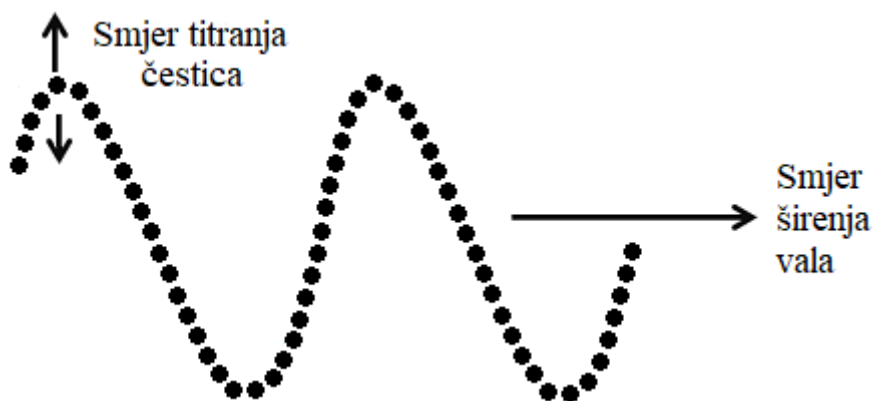
Ultrazvučno ispitivanje najčešće se provodi sa dvije osnovne vrste ultrazvučnih valova:

1. longitudinalni ili uzdužni valovi,
2. transverzalni ili poprečni valovi.

Osnovna razlika između longitudinalnih i transverzalnih valova je u načinu njihova propagiranja: longitudinalni val prostire se titranjem čestica u smjeru propagiranja vala (slika 4), dok se transverzalni val prostire titranjem čestica okomito na smjer propagiranja vala (slika 5). Također je bitno spomenuti da se longitudinalni valovi mogu prostirati kroz sva tri agregatna stanja, a transverzalni samo u materijalima krutog stanja.



Slika 4. Longitudinalni val



Slika 5. Transverzalni val

Longitudinalne ultrazvučne valove generira ravna ultrazvučna sonda, dok transverzalne valove koristimo za ispitivanje sa kutnom sondom. Pri tome, kutna sonda također generira longitudinalne ultrazvučne valove, ali korištenjem principa Snellovog zakona, u ispitnoj komponenti će se za ispitivanje koristiti transverzalna komponenta koja je nastala iz upadne longitudinalne komponente.

Generiranje longitudinalnih valova u ispitivani materijal pod kutom  $0^\circ$  je princip rada ravne ultrazvučne sonde. U tom slučaju ne primjenjuje se Snellov zakon. Slijedom navedenog u ispitnom uzorku biti će prisutna odaslana longitudinalna komponenta iz ultrazvučne sonde.

Longitudinalna i transverzalna brzina ultrazvuka u materijalu nisu jednake. Brzina longitudinalnog vala otprilike je duplo veća od brzine transverzalnog vala. Brzina ultrazvučne zrake, kao i kutovi lomljenja prikazani su u potpoglavlju 2.2.2.

## 2. POTREBNA OPREMA ZA PROVOĐENJE ULTRAZVUČNIH ISPITIVANJA

Postoji više različitih oprema za ultrazvučno ispitivanje zbog njezine široke primjene. Razlikuje se ultrazvučna oprema za procjenu strukture materijala i/ili otkrivanje nehomogenosti, mjerenje dimenzija i fizikalnih svojstava materijala. Postoji oprema za ručnu ultrazvučnu kontrolu sa ili bez računarske podrške, poluautomatska oprema i automatski sustavi. [7]

Ultrazvučni sustav čine:

- Ultrazvučni uređaj,
- Ultrazvučne sonde,
- Etaloni i referentni uzorci,
- Kontaktno sredstvo,
- Druga pomoćna oprema.

Za svaki ultrazvučni ispitni sustav potrebno je sustav provjeriti prije ispitivanja kako bi zadovoljio traženu osjetljivost. Pojedini dijelovi se moraju provjeravati i tijekom ispitivanja. Frekventnost provjera i način ispitivanja su definirani vrstom ispitivanja i korištenom opremom te su propisani tehničkom dokumentacijom i normama. Materijal ispitivanja direktno utječe na odabir ultrazvučnog sustava zbog toga što se svaki dio sustava bira prema ispitivanom materijalu. Time je osigurana veća vjerojatnost pronalaženja pogreške u materijalu. Ukoliko se zamjeni bilo koji element u tijeku ispitivanja (čak i sa istovrsnim elementom), dolazi do promjene u sustavu te je sustav potrebno ponovno podesiti [7].

## 2.1. Ultrazvučni uređaj

Ultrazvučni uređaj omogućava generiranje ultrazvučne zrake iz sonde te primanje elektronskih impulsa u sondu. Ultrazvučni uređaj omogućuje prikaz djelovanja između ultrazvučnih valova i ispitivanog materijala [7]. Najčešće korištene uređaje za ultrazvučna ispitivanja prikazuje slika 6.



Slika 6. Najčešće korišteni uređaji za provođenje ultrazvučnih ispitivanja [8]

Elementarni elementi ultrazvučnog uređaja su [7]:

1. Elektronski sklopovi odgovorni za napajanje, kreiranje električnih impulsa, pojačanje, sinkronizaciju te ostale funkcije pomoću kojih je osigurano uporaba opreme na razini zahtjeva;
2. Sklopovi izlaznih jedinica koji osiguravaju da rezultate slanja i prijema ultrazvuka prikazuje korisniku u određenom obliku za obradu, a mogu i uključivati mogućnost obrade signala.

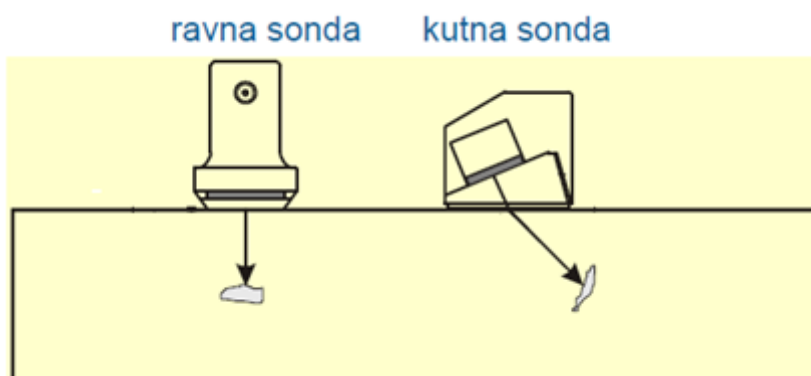
## 2.2. Ultrazvučne sonde

Ultrazvučne sonde najvažniji su element ultrazvučnog sustava. Tijekom konfiguracije sonde u obzir se uzima [7]:

- Materijal pretvarača,
- Konfiguracija elektroda,
- Značajke prigušivača
- Prizma i/ili maske za odašiljanje ultrazvuka,
- Kućište,
- Zaštitni elementi.

Materijal pretvarača zavisi o namjeni sonde. Srebrne metalne elektrode koje se nalaze na pretvaraču služe za dovođenje električnog signala. Rub pločice pretvaračkog materijala sadrži prstenasti izolator koji sprječava proboj. Nepoželjne titraje koji su u pravilu popraćeni s mnogo refleksija prigušivač prigušuje svojim oblikom i materijalom. Prigušenje je veće što su akustičke impedancije prigušivača i pretvarača usklađenije [7].

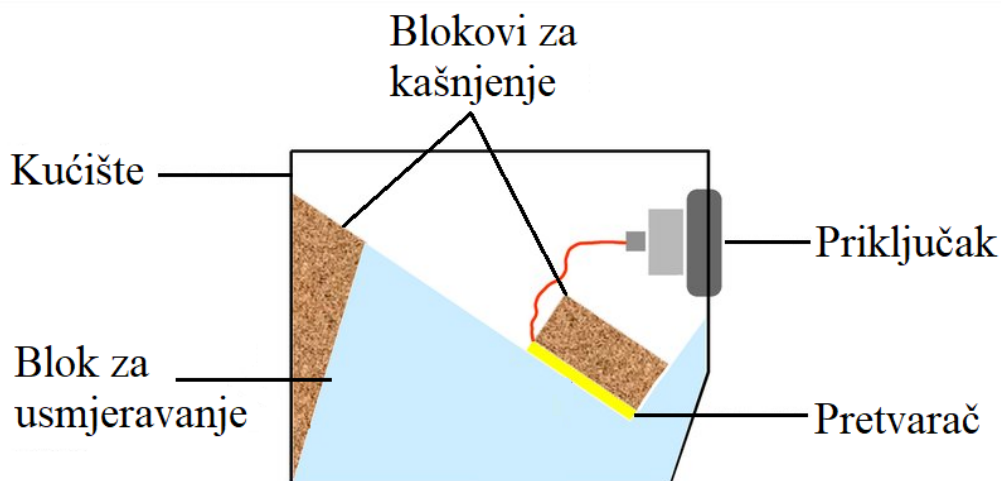
Uobičajena podjela ultrazvučnih sondi je prema pravcu emitiranja i prijema ultrazvučnih valova u odnosu na materijal ispitivanja. Ultrazvučne sonde dijele se na standardne i specijalne. Standardne se uglavnom koriste u ručnoj ultrazvučnoj kontroli, a s obzirom na pravac emitiranja ultrazvučnih valova dijele se na ravnu i kutnu sondu [7]. Ravna, dvostruka i kutna sonda prikazane su na slici 7.



Slika 7. Ravna i kutna sonda [1]

### 2.2.1. Kutna sonda

Sam naziv ultrazvučne sonde označava pravac emitiranja i prijema ultrazvučnih valova pod određenim kutom na normalu. Kutne sonde najčešće su izrađene pod kutom od  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  i  $80^\circ$  [7]. Shema kutne sonde prikazana je na slici 8.



Slika 8. Shema kutne sonde [6]

Način kako kutna sonda radi je sljedeći: ulaz ultrazvučnih valova pod kutom u materijal ispitivanja ostvaren je nagibom pretvarača kod konfiguracije sonde. Blok za usmjeravanje prenosi titraje, tj. ultrazvučne valove od pretvarača pa do ispitivanog materijala. Blok za usmjeravanje najčešće je izrađen od pleksistakla te je većinom prizmatičnog oblika.



Sukladno sa Snellovim zakonom moguće je za svaku vrstu materijala odrediti koliko iznose granični kutovi (gornji i donji) s obzirom na konstrukciju sonde [7]. Na slici 9. prikazane su kutne sonde.

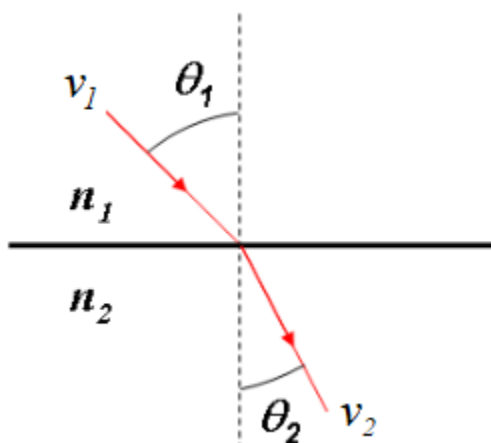


Slika 9. Kutne sonde [9]

Oznake kutnih sondi se razlikuju, tj. ovise o proizvođaču. Većina sondi (uz osnovnu oznaku) na sebi sadrži dodatna svojstva, kao npr. frekvencija, veličina, i dr. Svaka kutna sonda sadrži skalu za izlaznu točku pomoću koje se lakše određuje izlazna točka, odnosno mjesto s kojeg izlazi središnja ultrazvučna zraka. Kutna sonda generira longitudinalne, transverzalne i površinske valove te valne forme koji su njihova kombinacija. Za ispitivanja kutnom sondom se koriste isključivo transverzalni ultrazvučni valovi dobiveni s točno određenom konfiguracijom ultrazvučne sonde [7].

### 2.2.2. Snellov zakon

Snelliusov ili Snellov zakon odnosi se na pojavu refrakcije svjetlosti (lomljenja) na granici različitih sredstava. On kaže da svjetlost koja udara u granicu dvaju sredstava lomi tako da upadni i kut lomljene zrake zadovoljavaju Snellov zakon. Također je bitno naglasiti da se sve zrake te okomica na granicu sredstava nalaze u istoj ravnini [10]. Snellov zakon prikazuje slika 10.



Slika 10. Snellov zakon [11]

Matematički zapis Snellovog zakona glasi: [11]

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

gdje su:

$\theta_1$  - kut upadne zrake svjetlosti, °

$\theta_2$  - kut loma, °

$v_1, v_2$  - brzine zrake, m/s

$n_1, n_2$  - indeksi loma.

Ovisno o indeksima loma medija kroz koji se prostire val, upadni val će se lomiti pod većim ili manjim kutom u odnosu na normalu. Dio upadnog vala će se transmitirati u drugi medij, dok će se dio vala reflektirati prema natrag.

Pomoću Snellovog zakona možemo izračunati koliko iznose ranije spomenuti gornji i donji granični kutovi. Kako je prethodno spomenuto, ultrazvučne sonde su konstruirane na način da generiraju ultrazvučne valove, a s obzirom na vrstu ispitivanja najčešće se koriste longitudinalne i transverzalne komponente ultrazvučnih valova. Ravne ultrazvučne sonde najčešće u svojoj pobudi generiraju longitudinalne ultrazvučne valove. Transverzalne valove za ispitivanje kutnom ultrazvučnom sondom dobivamo primjenom Snellovog zakona loma.

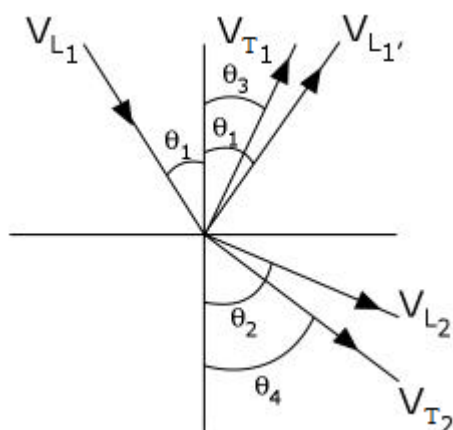
Nadalje, izborom upadnog kuta ultrazvučnih longitudinalnih valova na granici dvaju sredstava (pleksistaklo – čelik) moguće je odrediti gornji i donji granični kut između kojih se postiže propagacija isključivo transverzalnih valova. Gornji kritični kut je najveći mogući kut upada ultrazvučne longitudinalne valne komponente u ispitni objekt, a da pritom ispitni objekt sadrži jedino transverzalnu komponentu ultrazvučnog vala, a donji granični kut je najmanji mogući kut upada ultrazvučne valne komponente u ispitni objekt, a da pritom ispitni objekt sadrži jedino transverzalnu komponentu ultrazvučnog vala.

Tablica 1. Brzine ultrazvučnih valova [12]

	Longitudinalni, m/s	Transverzalni, m/s
Aluminij	6375	3130
Bakar	4648	2260
Bronca	3531	2235
Cink	4216	2410
Čelik	5918	3240
Magnezij	5842	3050
Mesing	4394	2120
Molidben	6248	3350
Nikal	5639	2970
Olovo	2159	700
Platina	3692	1670
Pleksistaklo	2692	1270
PVC	2388	1060
Srebro	3607	1590
Staklo	5766	3430
Titan	6096	3120
Voda	1473	-
Zlato	3251	1194
Željezo	5893	3230
Živa	1448	-

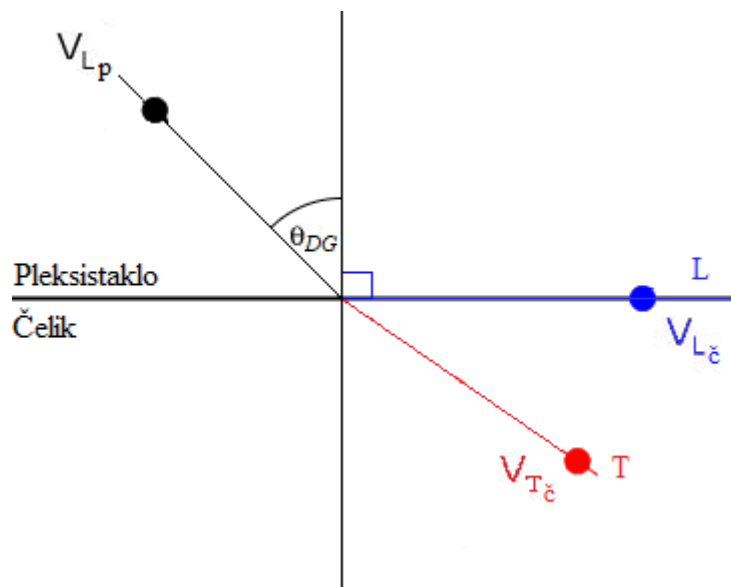
U tablici 1. prikazane su brzine ultrazvučnih valova za razne materijale. Brzine longitudinalnog vala u čeliku ( $v_{L\check{c}}$ ) i pleksistaklu ( $v_{LP}$ ) iznose 5920 m/s i 2690 m/s, a brzine transverzalnog vala u čeliku ( $v_{T\check{c}}$ ) i pleksistaklu ( $v_{Tp}$ ) iznose 3420 m/s i 1270 m/s.

Snellov zakon loma za slučaj generiranja transverzalne komponente koju koristimo prilikom ispitivanja sa kutnom ultrazvučnom sondom prikazan je na slici 11. Ultrazvučna sonda generira longitudinalnu upadnu komponentu ultrazvučnog vala pod kutom  $\theta_1$ . Longitudinalni val prostire se kroz kruti medij ultrazvučnom brzinom  $v_{L1}$ . Nailaskom opisanog vala na granicu dvaju krutih materijala doći će do refleksije i transmisije. Prilikom refleksije nastati će dvije komponente, longitudinalna i transverzalna koje će se reflektirati pod kutovima  $\theta_1$  i  $\theta_3$  (longitudinalna reflektirana komponenta reflektira se pod jednakim kutom upada longitudinalnog vala). Brzine tih valova su  $v_{L1}'$  i  $v_{T1}$  pri čemu je  $v_{L1}' = v_{L1}$ . Prilikom transmisije također će nastati dvije komponente, longitudinalna i transverzalna koje će se transmitirati u drugi materijal pod kutovima  $\theta_2$  i  $\theta_4$ . Brzine opisanih valova su  $v_{L2}$  i  $v_{T2}$ .



Slika 11. Snellov zakon u ultrazvučnim ispitivanjima [13]

Donji granični kut računamo za slučaj kada se longitudinalna komponenta transmitiranog ultrazvučnog vala prostire po površini ispitnog objekta pri čemu zatvara kut od  $90^\circ$  s okomicom na objekt ispitivanja. Upadna longitudinalna komponenta tada s okomicom zatvara donji granični kut. Opisani kut upada prikazan je na slici 12. pri čemu nisu prikazane longitudinalne i transverzalne komponente reflektiranih valova.



Slika 12. Određivanje donjeg graničnog kuta

Uvrštavanjem kuta te brzina valova u Snellov zakon dobivamo:

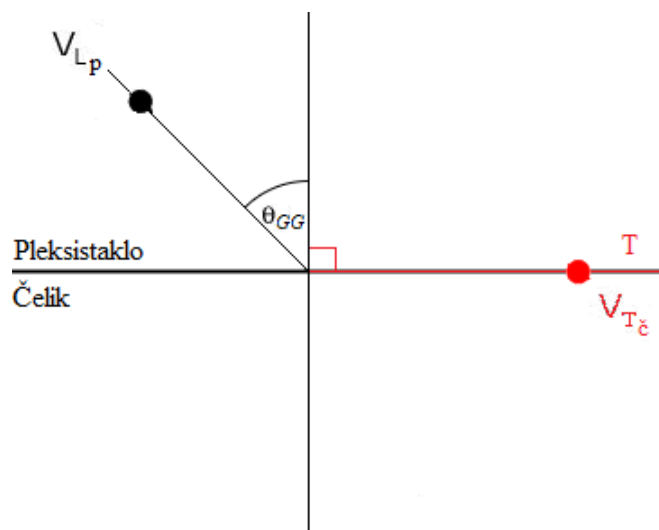
$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_{DG}} = \frac{v_{Lč}}{v_{Lp}} \quad (2.2)$$

$$\sin \theta_{DG} = \sin 90^\circ \frac{v_{Lp}}{v_{Lč}} \quad (2.3)$$

$$\sin \theta_{DG} = \sin 90^\circ \frac{2690}{5920} \quad (2.4)$$

$$\theta_{DG} = 27,03^\circ \quad (2.5)$$

Izračun gornjeg graničnog kuta određuje se za slučaj kada se transverzalna ultrazvučna komponenta transmitiranog vala prostire po površini ispitnog objekta. Opisani slučaj prikazan je na slici 13., pri čemu nisu prikazane longitudinalne i transverzalne komponente reflektiranih valova.



Slika 13. Određivanje gornjeg graničnog kuta

Uvrštavanjem kuta te brzina valova u Snellov zakon dobivamo:

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_{GG}} = \frac{v_{T\check{c}}}{v_{Lp}} \quad (2.6)$$

$$\sin \theta_{GG} = \sin 90^\circ \frac{v_{Lp}}{v_{T\check{c}}} \quad (2.7)$$

$$\sin \theta_{GG} = \sin 90^\circ \frac{2690}{3240} \quad (2.8)$$

$$\theta_{GG} = 56,12^\circ \quad (2.9)$$

Za kut manji od donjeg graničnog kuta u objekt ispitivanje ulaze i longitudinalna i transverzalna komponenta lomljenog transmitiranog vala, a za kut veći od gornjeg graničnog kuta su obje komponente reflektirane od objekta ispitivanja te nemamo niti jedan val u objektu ispitivanja.

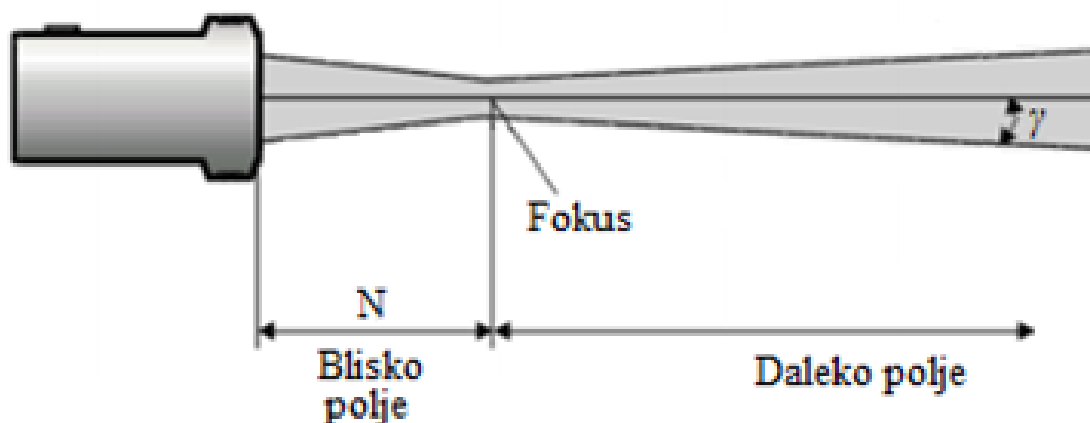
Tablica 2. Donji i gornji granični kut

Materijal	Brzina longitudinalnog vala, m/s	Brzina transverzalnog vala, m/s	Donji granični kut, °	Gornji granični kut, °
Čelik	5920	3420	27,03	56,12
Pleksistaklo	2690	1270		

Tablica 2. prikazuje sve potrebne parametre za izračun graničnih kutova. Možemo zaključiti da s obzirom na vrstu materijala kroz koju se ultrazvuk prostire u materijal (pleksistaklo) i materijal koji se najčešće ispituje (čelik), procijenjeni gornji granični kut je  $56,12^\circ$  te donji granični kut  $27,03^\circ$ , kako je prikazano u tablici 2.

### 2.2.3. Zone ultrazvučnog snopa

Ultrazvučni snop dijeli se na tri zone: zonu bliskog polja (Fresnelova zona), tranzitnu zonu i zonu dalekog polja (Fraunhoferova zona). U zoni bliskog polja ultrazvučni snop se sužava, dok se u tranzitnoj zoni i zoni dalekog polja ultrazvučni snop širi [14]. Presjek ultrazvučnog snopa prikazan je na slici 14.



Slika 14. Zone ultrazvučnog snopa [15]



Zonom bliskog polja započinje ultrazvučni snop. Ultrazvučne zrake emitiraju se kao zasebni izvori šireći se u obliku sfernih valova. Kako se valovi šire prema van, oni međusobno utječu jedan na drugog. Postoje dvije vrste mogućeg utjecanja: konstruktivni i destruktivni. Do konstruktivnog utjecaja dolazi kada 2 vala dolaze u neku točku istovremenu (u fazi) te jedan drugoga pojačavaju. Do destruktivnog utjecaja dolazi kada 2 vala dolaze u neku točku u različitim vremenima te tada jedan drugoga poništavaju. Varijacije faza uzrokuje varijacije valnih amplituda. Zbog tih varijacija u amplitudi teško je procijeniti veličinu nehomogenosti u zoni bliskog polja [14].

U fokusu valovi stvaraju jedan sferni valni oblik te tu točku smatramo granicom između zone bliskog polja i tranzitne zone [14].

Duljinu bliskog polja možemo približno izračunati izrazom:

$$N = D^2 f / 4v \quad (2.10)$$

gdje su:

$N$  - duljina bliskog polja, mm

$D$  - promjer pretvarača, mm

$f$  - frekvencija pretvarača, MHz

$v$  - brzina ultrazvuka u materijalu, km/s.

Nakon bliskog polja, odnosno nakon fokusa, slijedi zona dalekog polja. U zoni dalekog polja intenzitet ultrazvučnog snopa je obrnuto proporcionalan kvadratu udaljenosti i putuje u ravnim linijama. Širenje ultrazvučnog snopa u dalekom polju popraćeno je s predvidivim smanjenjem zvučnog tlaka uz povećanje udaljenosti od pretvarača. Ultrazvučni snop širi se za konstantni kut divergencije koji se može približno izračunati izrazom [14]:

$$\sin \gamma = 1,22 \frac{v}{D x f} \quad (2.11)$$

gdje su:

$\gamma$  - kut divergencije,

$v$  - brzina ultrazvuka materijalu, km/s

$D$  - promjer pretvarača, mm

$f$  - frekvencija pretvarača, MHz.

Za izračun duljine bliskog polja i kuta divergencije koriste se iste varijable: promjer i frekvencija pretvarača te brzina ultrazvuka u materijalu. Povećanje promjera i/ili frekvencija uzrokuje povećanje duljine bliskog polja i smanjenje kuta divergencije, stoga promjer i frekvencija pretvarača imaju velik utjecaj na provođenje ultrazvučnog ispitivanja. Suženjem ultrazvučne zrake dolazi do povećanja zvučnog tlaka, odnosno povećanja amplitude [14].

### 3. ETALONI ZA PODEŠAVANJE ULTRAZVUČNOG SUSTAVA

Za analizu značajki opreme te za pripremu ultrazvučnog sustava za provedbu ispitivanja te pomoć za elaboraciju detektiranih indikacija, koriste se etaloni i referentni uzorci. Etalon je izradak striktno određenog sastava materijala, toplinske obrađenosti, geometrijskog oblika i kvalitete površinske obrade. Etaloni su obvezno popraćeni certifikatom, odnosno dokumentacijom kojom mjerodavna organizacija potvrđuje propisana svojstva. Etaloni V1 i V2 su najšire primjenjivi etaloni za podešavanje ultrazvučnog mjernog/ispitnog sustava. Razvijeni su u Međunarodnom institutu za zavarivanje (engl. *International Institute for Welding*) te se uslijed toga nerijetko javljaju pod terminom IIW-etaloni. Sve važne karakteristike i specifikacije spomenutih etalona propisane su normama i standardima kako bi se mogla osigurati sljedivost rezultata mjerenja/ispitivanja. Dvije su norme koje se odnose na izradu spomenutih etalona V1 i V2, a to su HRN EN 12223 i HRN EN 27963 [7]. Etalon V1 prikazuje slika 15., a etalon V2 slika 16.



Slika 15. Etalon V1 [17]



Slika 16. Etalon V2 [18]

Najčešća primjena etalona je za pripremu sustava za provođenje ispitivanja, a koriste se i za sljedeće svrhe [7]:

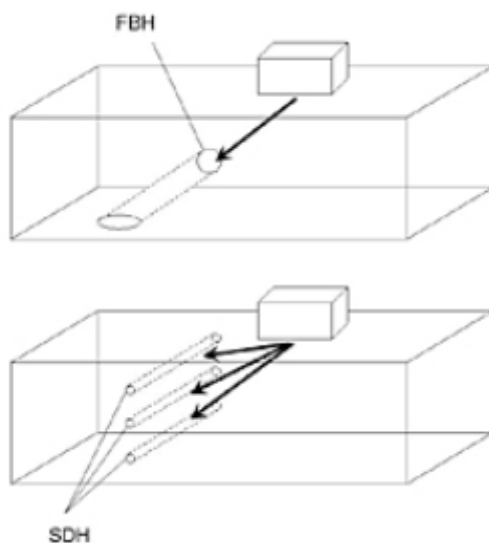
- Provjeru linearnosti sustava,
- Određivanje točke izlaska ultrazvuka na sondi,
- Provjeru i određivanje kuta sonde,
- Baždarenje ultrazvučnog sustava,
- Provjeru i nadgledanje osjetljivosti sustava,
- Odnosa signal/šum,
- Provjeru razlučivosti.

## 4. PODEŠAVANJE ULTRAZVUČNOG ISPITNOG SUSTAVA

Za uspješnu procjenu veličine detektirane indikacije potrebno je odgovarajuće podesiti odabrani ispitni sustav. Procjena relativne veličine detektirane indikacije provodi se usporedbom s poznatom površinom referentnog reflektora. Rezultat spomenutog pristupa je određivanje koliko je realna detektirana indikacija veća, jednaka ili manja od površine referentnog reflektora. S tim ciljem podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava sastoji se od podešavanja relevantnih parametara ispitivanja u ovisnosti o odabranim referentnim reflektorima. Za takav način pripreme potrebni su nam etaloni koji imaju konstruirane umjetne reflektore poznate geometrije i dimenzije kako bismo što točnije mogli odrediti uvjetnu veličinu indikacije. Najčešće se za podešavanje kutne sonde prilikom provođenja ispitivanja zavarenih spojeva koriste bočni provrti, te za podešavanje ravne ultrazvučne sonde uvrti s ravnim dnom.

### 4.1. Referentni reflektori

Postoje dvije osnovne vrste referentnih reflektora koji se konstruiraju i odabiru sukladno odabranom ispitnom sustavu, a to su bočni provrt (engl. *Side Drilled Hole* – SDH) i provrt ravnog dna (engl. *Flat Bottomed Hole* – FBH). FBH ima provrt takav da donja ravna ploha predstavlja disk reflektor okomit na ultrazvučnu upadnu zraku. FBH predstavlja glatki disk reflektor koji ima praktičnu primjenu za konstruiranje DGS (engl. *Distance – Gain – Size*), odnosno AVG (njem. *Abstand – Verstärkung – Grosse*) dijagrama pomoću kojih procjenjujemo veličinu pogreške koju detektiramo u materijalu i to primjenom ravne ultrazvučne sonde. Konstrukcija FBH ovisit će o putu ultrazvuka i mjestu na kojem dijelu ultrazvučnog snopa se želi podesiti ultrazvučni ispitni sustav. Za razliku od FBH referentnih reflektora, za podešavanje kutnih ultrazvučnih sondi koriste se SDH referentni reflektori koji su izbušeni paralelno sa skenirajućom površinom i predstavljaju jednake reflektore za sve kutove ultrazvučne sonde, ali na različitim ultrazvučnim putovima [19]. Reflektori FBH i SDH prikazani su na slici 17.



Slika 17. FBH i SDH disk reflektori [19]

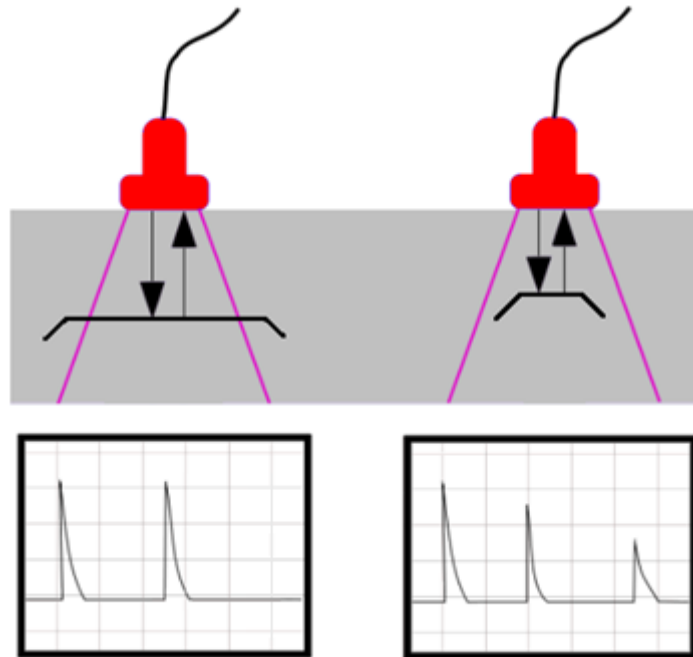
#### 4.2. Procjena veličine reflektora DGS dijagramom

Izmjeriti veličinu reflektora (pogreške) pomoću DGS dijagrama znači odrediti veličinu kružnog reflektora na već izrađenom dijagramu, koji bi proizveo istu amplitudu signala odjeka s iste udaljenosti kao i detektirana pogreška na temelju ponuđenih vrijednosti u dijagramu. Promjer tako određenog referentnog reflektora je mjera površine reflektiranja i izražava se kao ekvivalentna veličina detektirane pogreške [6].

Ekvivalentna veličina reflektora je jasno definirani parametar te ona omogućuje osiguravanje ponovljivosti rezultata ispitivanja i prikladna je osnova za definiranje kriterija prihvatljivosti. Princip mjerenja DGS tehnikom najlakše je razumjeti ako se počne od oblika ultrazvučnog polja sonde. Amplituda signala odjeka ovisi o veličini reflektirajuće površine reflektora, pojačanju u sustavu (dB) i položaju reflektora unutar ultrazvučnog snopa. Kada je opisani odnos poznat, visina amplitude na zaslonu ultrazvučnog uređaja može poslužiti za procjenu veličine reflektirajuće površine. Promatranjem geometrije ultrazvučnog snopa može se zaključiti o promjeni amplitude signala s obzirom na udaljenost reflektora unutar ultrazvučnog snopa [6].

Na slici 18. prikazana je amplituda na zaslonu ultrazvučnog uređaja za dvije vrste pogrešaka:

1. Pogreška koja presijeca snop (beskonačni reflektor)
2. Pogreška koja se nalazi unutar snopa (reflektor).



Slika 18. Zaslone ultrazvučnog uređaja za beskonačni i referentni reflektor [20]

Za reflektor koji presijeca ultrazvučni snop vrijedi [6]:

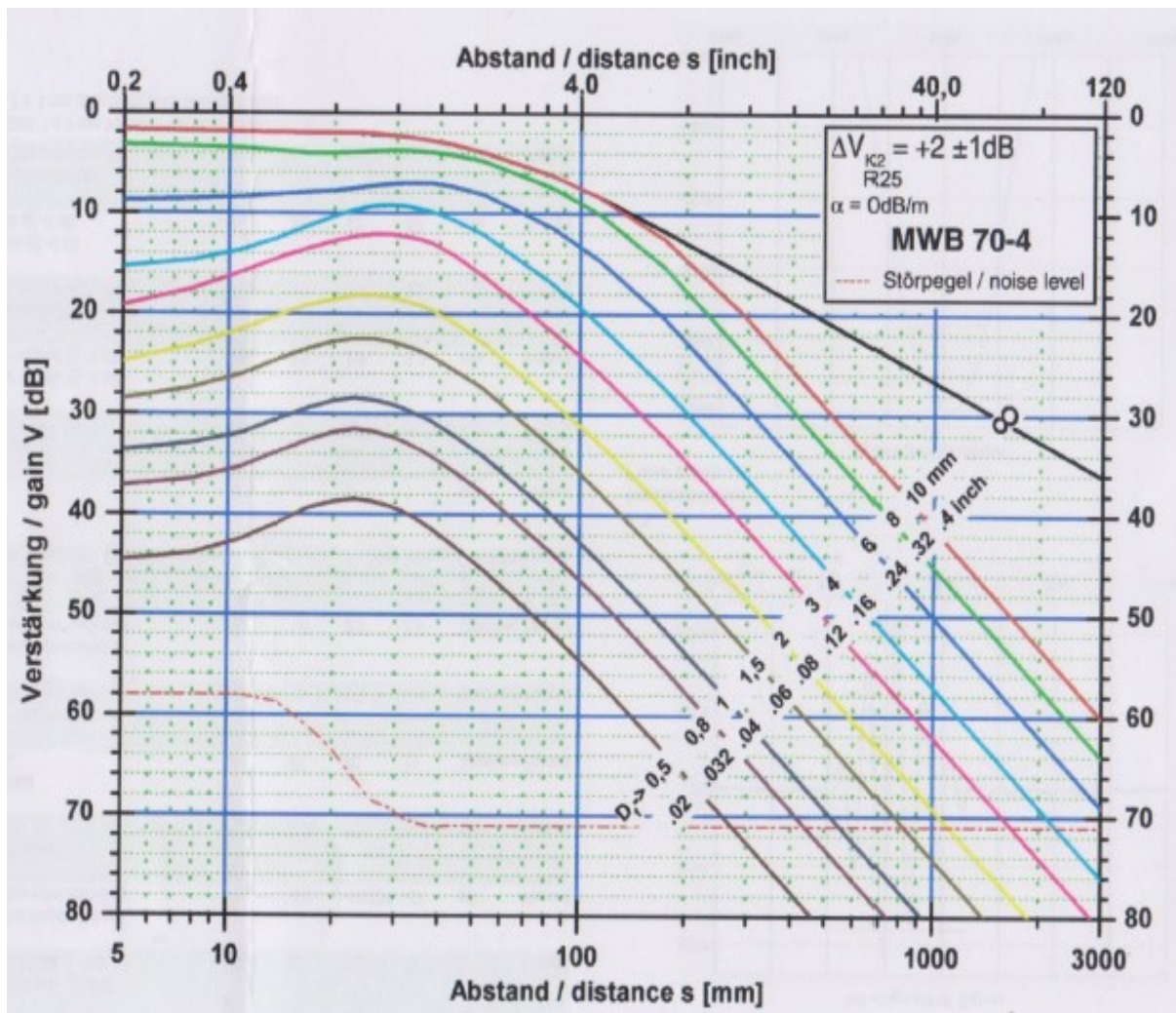
- Unutar mrtve zone amplituda signala odjeka je gotovo konstantna, jer se osim prigušene energije, gotovo sva ultrazvučna energija reflektira od površine reflektora i vraća natrag u ultrazvučnu sondu;
- Povratna energija je manja kada je reflektor u dalekom polju, gdje radi širenja snopa dio reflektiranih valova ne zahvaća sondu;
- Sonda kao prijemnik mjeri svoje polje.

Za reflektor koji je u snopu vrijedi [6]:

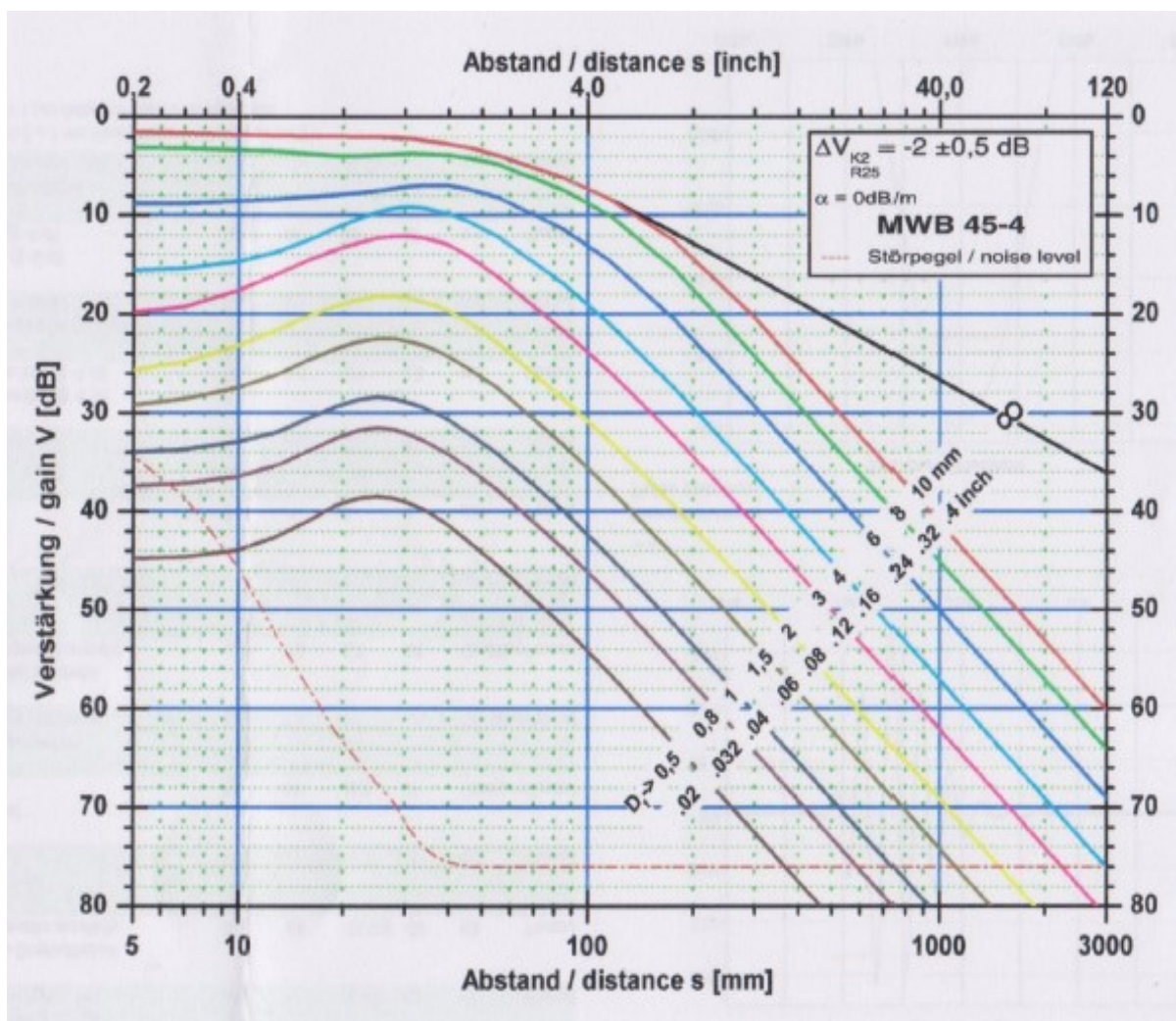
- Reflektor obuhvaćen ultrazvučnim snopom reflektira dio energije snopa, te je važno gdje se duž ultrazvučnog snopa nalazi reflektor, odnosno koji dio energije u odnosu na ukupnu energiju se reflektira u tom presjeku;
- Maksimalni signal će se javiti kada se reflektor nalazi na granici bliskog polja, radi fokusiranja snopa u tom dijelu;
- Amplituda signala postupno pada s približavanjem sonde kroz blisko polje;
- Udaljavanjem od sonde u daleko polje, amplituda signala snopom obuhvaćenog reflektora pada jače nego amplituda signala odjeka od dna zbog toga što se reflektor unutar ultrazvučnog snopa ponaša kao izvor ultrazvučnog snopa.

DGS dijagram prikazuje se u logaritamskoj skali tako da je put ultrazvuka na horizontalnoj osi, a pojačanje na vertikalnoj osi. Za ultrazvučne sonde DGS dijagram je unaprijed definiran te je sastavni dio tehničkih podataka o sondi. Na slikama 19., 20. i 21. prikazani su DGS dijagrami za sonde čiji su deklarirani kutovi  $70^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $60^\circ$ .



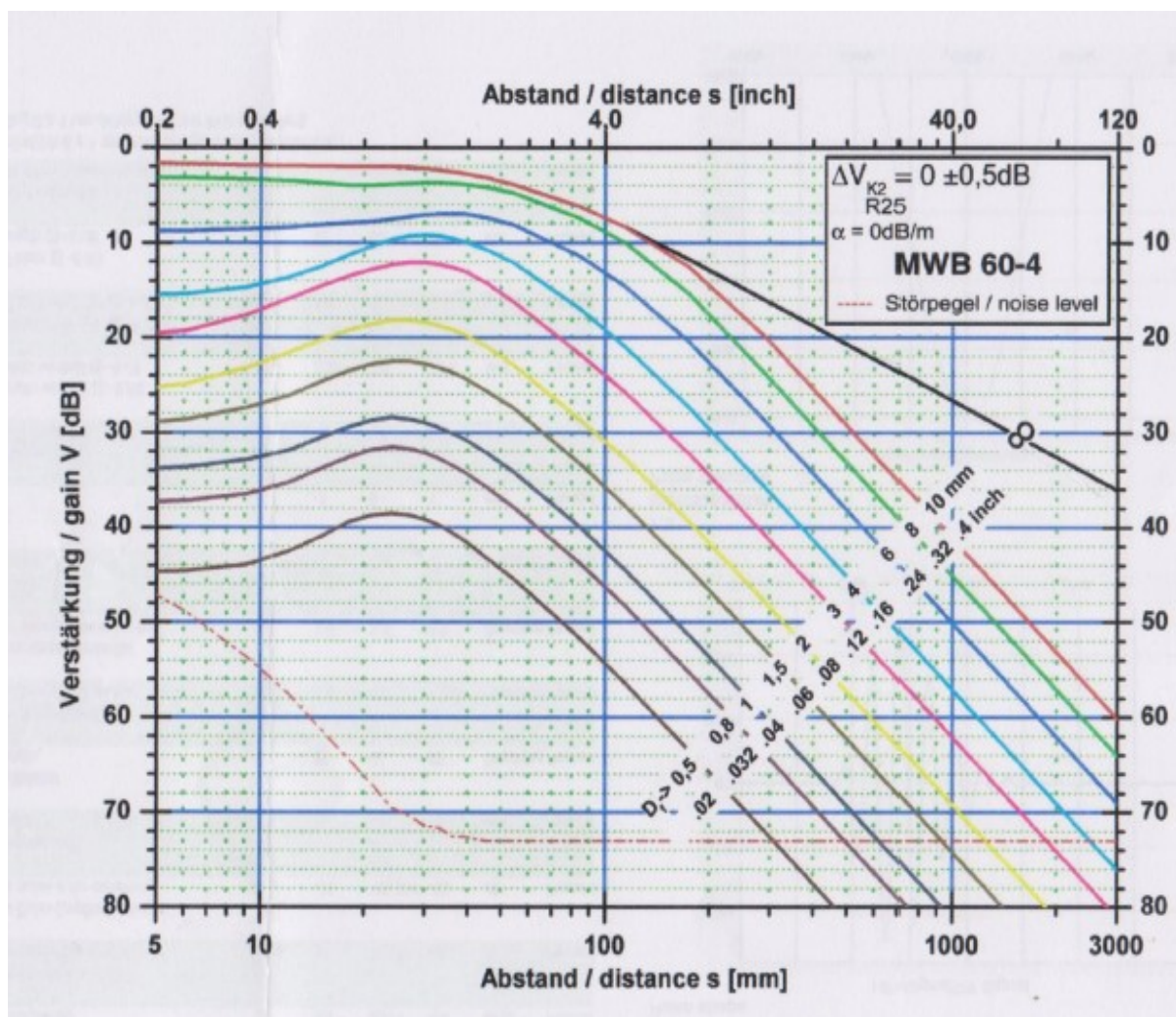


Slika 19. DGS dijagram kutne sonde (70°)



Slika 20. DGS dijagram kutne sonde (45°)





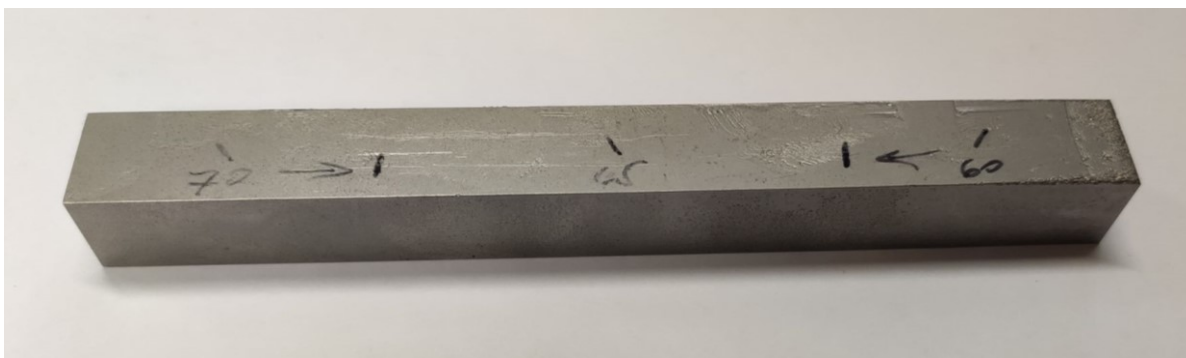
Slika 21. DGS dijagram kutne sonde ( $60^\circ$ )

## 5. KONSTRUIRANJE I IZRADA ETALONA ZA PODEŠAVANJE ULTRAZVUČNOG SUSTAVA

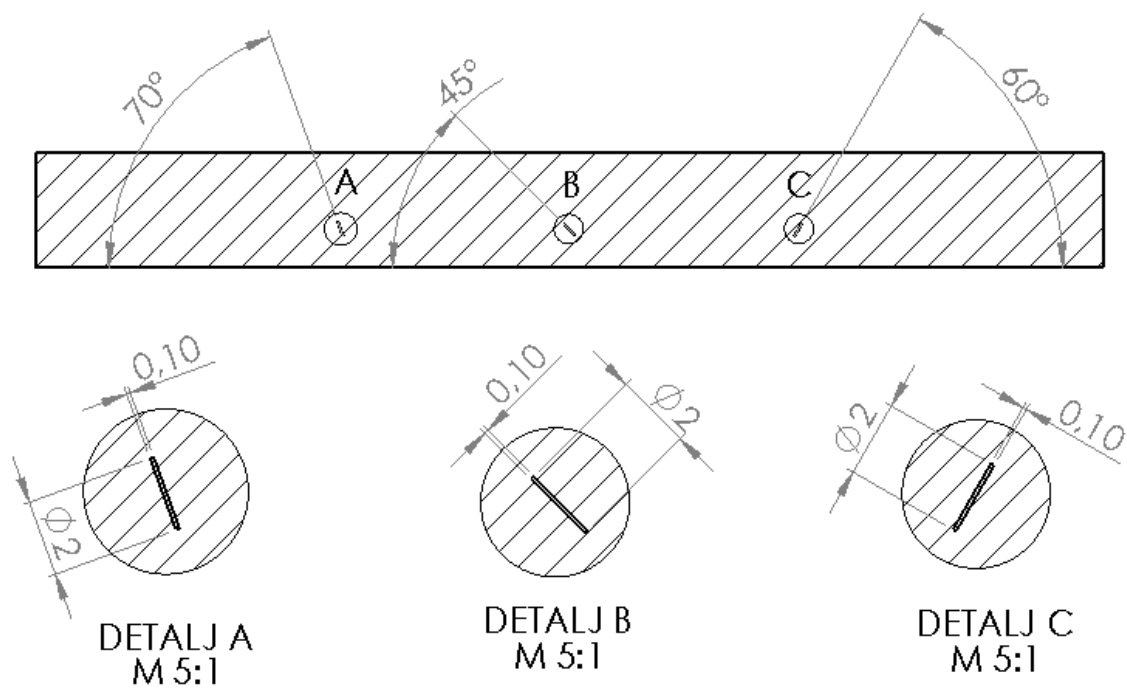
Danas se primjenjuju referentni etaloni za podešavanje osjetljivosti ultrazvučnog ispitnog sustava konstruiranjem referentnih reflektora kako je opisano u poglavlju 4. Za procjenu stvarne veličine reflektora upotrebljava se usporedna metoda pri čemu se odziv od pogreške u decibelima uspoređuje s onim dobivenim od disk reflektora na istoj udaljenosti. Međutim, svi referentni reflektori za podešavanje kutne sonde svojom površinom ne predstavljaju disk reflektor već se radi o drugačijim reflektiranim površinama koje u konačnici uspoređujemo s disk reflektorom pomoću DGS dijagrama. Rezultat koji se dobije opisanom usporedbom izražava se kao veličina ekvivalentnog disk reflektora na istom mjestu s idealnom glatkom površinom. Međutim, u stvarnosti je takve reflektore teško proizvesti i do sada su se referentni reflektori izrađivali zabušivanjem određenog promjera paralelno sa skenirajućom površinom.

U okviru ovog diplomskog rada konstruiran je i izrađen referentni etalon za podešavanje osjetljivosti ultrazvučnog ispitnog sustava primjenom kutne sonde. Etalon za podešavanje ultrazvučnog sustava je dimenzija  $140 \times 15 \times 15$  mm i sadrži 3 reflektora pod kutovima  $70^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $60^\circ$ . Odabrani su spomenuti kutovi tako da kutne sonde koje se najčešće primjenjuju emitiraju ultrazvučni snop okomito na referentni reflektor. Do sada su referentni etaloni konstruirani tako da predstavljaju zakrivljenu referentnu površinu (tj. SDH utori). Međutim, refleksija ultrazvučnih valova od zakrivljene površine razlikuje se od one reflektirane ultrazvučne energije nastale od ravne površine. Izrađeni etalon sastoji se od ugrađenih disk reflektora, odnosno ravne referentne površine, po jedan za svaku kutnu sondu. Odabrani referentni reflektori promjera su  $\varnothing 2$  mm i širine 0,10 mm.

Etalon je izrađen od alatnog čelika X3NiCoMoTi 18-9-5 na 3D pisaču EOSINT M280 proizvođača *EOS GmbH*. Oznaka X3NiCoMoTi18-9-5 znači da čelik sadrži 0,003 % ugljika, 18 % nikla, 9 % kobalta, 5 % molibdena, 0,7 % titana i 0,1 % aluminija. Izrađeni etalon prikazan je na slici 22., a poprečni presjek etalona na kojem su vidljivi položaj i orijentacija referentnih reflektora prikazuje slika 23.



Slika 22. Etalon



Slika 23. Presjek etalona uz detalj reflektora

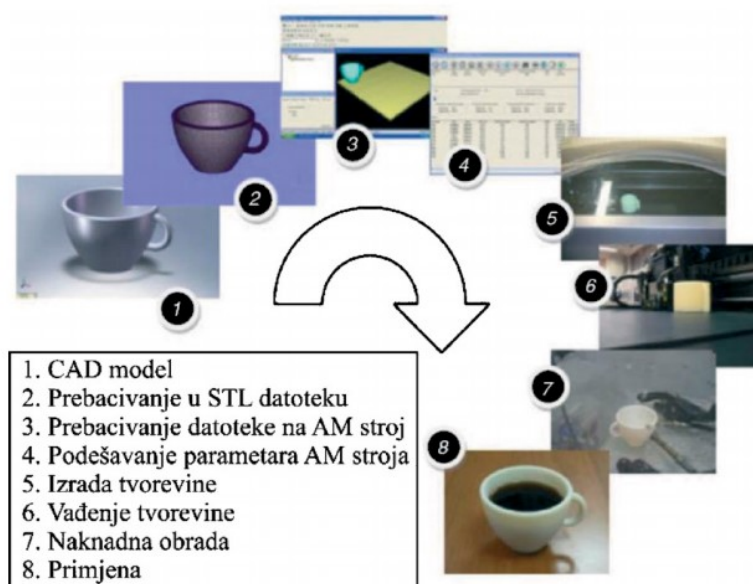
### 5.1. Izrada referentnog etalona izravnim laserskim srašćivanjem metala - DMLS

Postupci aditivne tehnologije (engl. *Additive manufacturing* - AM) sve više i više postaju popularni i primjenjuju se u industriji. Danas se aditivna proizvodnja za izradu metalnih dijelova primjenjuje u velikom broju industrija (posebice zrakoplovstvo i zdravstvo) zbog velike slobode konstruiranja, pojednostavljenja ili integriranja komponenata, smanjenih lanaca opskrbe te proizvodnje po narudžbi ili maloserijske proizvodnje [21].

U svim aditivnim postupcima faze izrade su jednake i sastoje se od [22]:

- Izrada CAD modela,
- Pretvaranje CAD modela u STL datoteku,
- Prebacivanje STL datoteke na stroj,
- Podešavanje parametara AM stroja,
- Izrada tvorevine,
- Vađenje tvorevine,
- Naknadna obrada (ako je potrebna),
- Primjena.

Faze aditivnih postupaka prikazane su na slici 24.



Slika 24. Faze aditivnih postupaka [22]

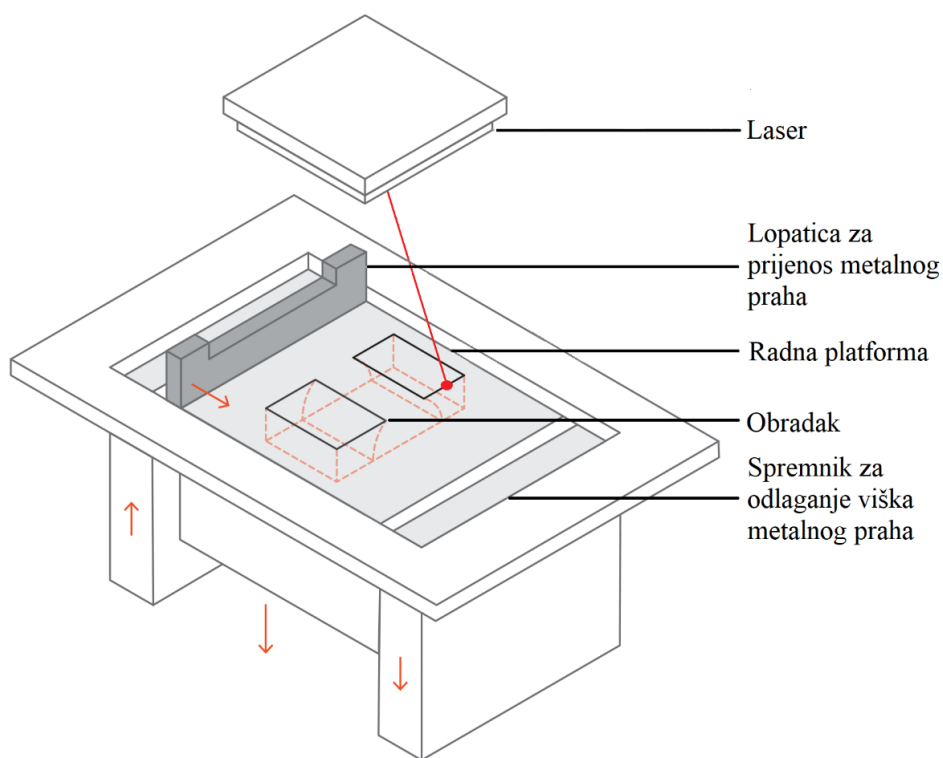
Na slici 25. prikazan je metalna tvorevina vrlo kompleksne geometrije koju bi vrlo zahtjevno bilo izraditi uobičajenim postupcima prerade (glodanje, tokaranje i slično), ali pomoću aditivnih postupaka proces izrade je relativno jednostavan.



**Slika 25. Metalna tvorevina izrađena aditivnim postupkom DMLS [21]**

Izravno lasersko srašćivanje metala (engl. *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS) i selektivno lasersko taljenje (engl. *Selective Laser Melting* - SLM) su tehnologije spajanja praha koje primjenjuju lasersku zraku za spajanje metalnog praha sloj po sloj. Razlika je u tome što se kod postupka SLM metalni prah tali, dok kod postupka DMLS metalni prah se ne rastali, pa je utrošak energije manji. Zbog toga se DMLS primjenjuje kod metalnih legura, dok se SLM upotrebljava kod rada s čistim metalima. Mogućnost izrade metalnih tvorevina čini postupak DMLS vrlo popularnim ne samo u strojarstvu, nego i u drugim industrijama, kao naprimjer medicina, stomatologija i zrakoplovstvo [23].

Postupkom DMLS izrađen je referentni etalon, a postupak izrade je sljedeći: 3D pisac laserskom zrakom prvo izrađuje donji sloj proizvoda. Kada je prvi sloj izrađen, radna platforma se spušta za visinu debljine sloja, a novi metalni prah dolazi na mjesto izrade pomoću lopatice za prijenos metalnog praha. Proces se ponavlja dok svi slojevi nisu izrađeni. Nakon toga potrebno je odvojiti obradak od radne platforme te se on po potrebi može kaliti, strojno obrađivati, prevlačiti i slično. 3D pisac cijelo vrijeme upotrebljava inertni plin za zaštitu metalnog praha i obratka. Shematski prikaz 3D tiskanja prikazan je na slici 26.



Slika 26. Shematski prikaz 3D tiskanja [21]



## 5.2. Prednosti i nedostaci DMLS postupka

Kao i svaki postupak prerade, pa tako i aditivna proizvodnja, a u ovom slučaju postupak DMLS, ima svoje prednosti i nedostatke. Prednosti postupka DMLS su [23]:

- Kod postupka DMLS tijekom izrade ne mijenjaju se svojstva materijala
- Širok raspon materijala,
- Dobra mehanička svojstva u svim smjerovima
- Neiskorišteni metalni prah može se ponovno iskoristiti (recikličnost)

Nedostaci postupka DMLS su [23]:

- Još uvijek relativno skupa tehnologija, strojevi i materijali su skupi, a proces izrade je dugotrajan
- Većina DMLS 3D pisaača može izrađivati samo relativno malene proizvode
- DMLS proizvodi su porozni, ovisno o materijalu koji se koristi
- Potrebna je naknadna obrada.

## 6. SNIMANJE ETALONA NA CT-U

Izrađeni etalon snimljen je na CT (računalna tomografija, engl. *computed tomography* - CT) uređaju kako bi vidjeli stvarni položaj i oblik reflektora. Snimanje je odrađeno na uređaju Nikon XT H 225 u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina (LFSB) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB).

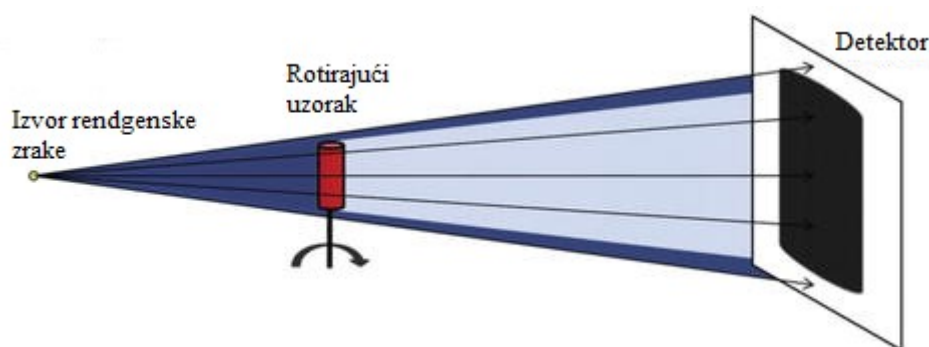
Računalna tomografija je nerazorna tehnika ispitivanja temeljena na apsorbirajućim rendgenskim zrakama koje omogućuje vizualizaciju unutarnje mikrostrukture materijala. Njezina primjena je vrlo široka. Najpoznatija primjena je u medicini, ali zbog velikih prednosti koristi se u mnogim područjima [24]. CT uređaj korišten u medicinske svrhe prikazan je na slici 27.



Slika 27. Primjena CT uređaja u medicini [25]

## 6.1. Princip rada CT uređaja

CT je nerazorna tehnika ispitivanja unutarnje mikrostrukture materijala koja se temelji na svojstvima rendgenskih zraka. Tipična tomografska oprema sastoji se od izvora, koji emitira konusnu zraku određenog intenziteta, i ravnog 2D detektora, koji snima intenzitet zrake. Tijekom procesa snimanja, uzorak se zakreće ispred izvora zrake te se za svaki zakret snima projekcija. Naknadnom obradom tako prikupljenih informacija dobivaju se trodimenzionalni (tomografski) podaci o gustoći svake točke mjerenog uzorka [24]. Shema CT uređaja prikazana je na slici 38.



Slika 28. Shema CT uređaja [24]

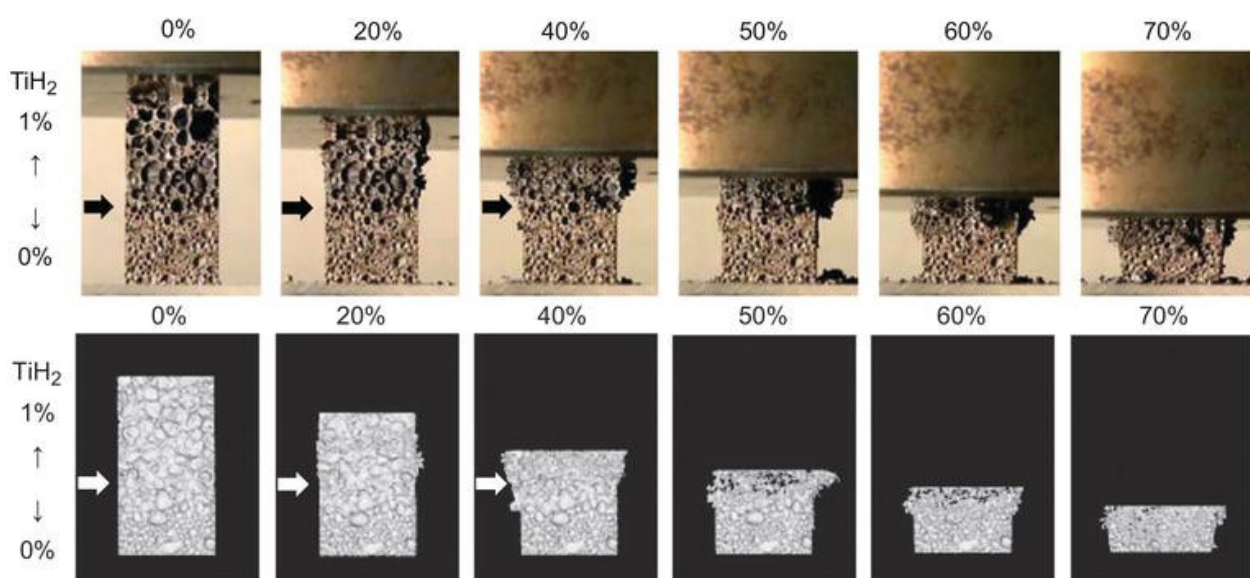
Rezultat CT mjerenja je 3D slika s rasponom sivih tonova (engl. *grayscale*) u kojoj svako sivo područje odgovara određenoj vrijednosti gustoće. Svjetliji tonovi predstavljaju nisku gustoću, a tamniji tonovi predstavljaju visoku gustoću [24].

## 6.2. Primjena CT-a u strojarstvu

Primjena tehnologije CT snimanja je raširena u industriji, posebice u odjelima koji razvijaju proizvode visoke dodane vrijednosti (zrakoplovstvo, automobilska industrija i sl). Jedan zajednički dio proizvodnje, u kojem CT snimanje ima važnu ulogu, je uočavanje grešaka do kojih dolazi tijekom proizvodnog procesa s ciljem njihovih poboljšanja. Svaka greška, odnosno promjena u mikrostrukтури materijala, mijenja njegova mehanička svojstva. Podaci prikupljeni CT snimanjima koriste se za stvaranje trodimenzionalnih modela za numeričku simulaciju očekivanih rezultata i njihovih kasnijih usporedbi za provedbom raznih testova (npr. tvrdoće).

Prednost CT snimanja je ta da dopušta konstrukciju točnih numeričkih modela, koji ne samo da uključuju različite faze od kojih se sastoji materijal nego također i pore, greške, pukotine itd. u točno određenoj lokaciji [24]. Na slici 29. prikazano je CT snimanje tijekom tlačnog opterećenja materijala.

U posljednje vrijeme CT se počinje primjenjivati i za dimenzionalna mjerenja unutrašnje i vanjske geometrije dijelova, pri čemu se postižu mikrometarske rezolucije. Osnovni problem u ovoj vrsti primjene je teško ostvarivanje sljedivosti mjernih rezultata, odnosno osiguravanje njihove točnosti.

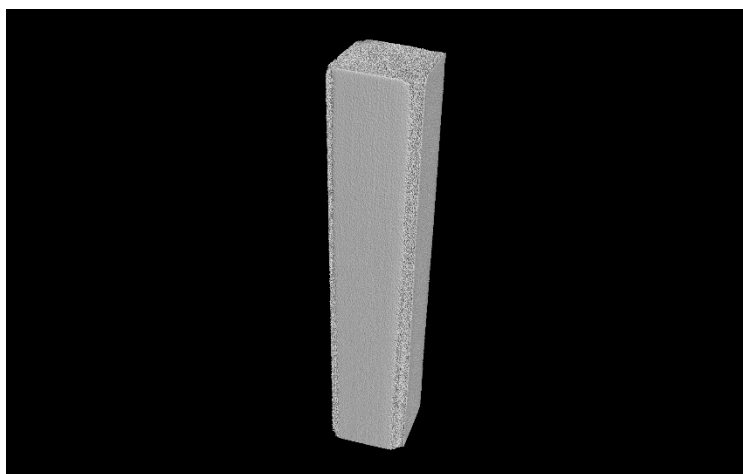


**Slika 29. Primjer analize mehaničkog ponašanja metala pod pritiskom uz CT snimku [24]**

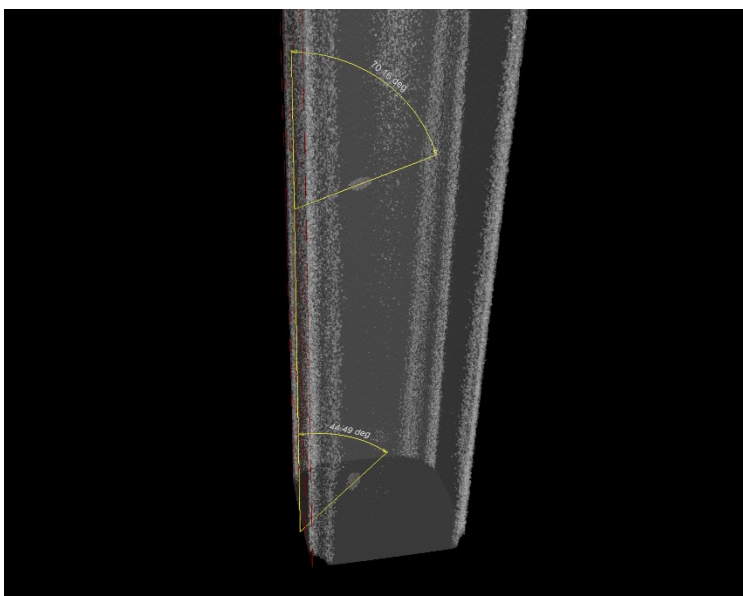
Velik broj osnovnih metala i legura koristi se u industriji. Svaki od njih ima specifična svojstva, korisna za funkciju koja im je potrebna: čvrstoća, tvrdoća, vodljivost itd. Proizvodnja metala je vrlo raznolika i ona obuhvaća proizvodne procese od taljenja i lijevanja do modernih sustava, poput injekcijskog prešanja, aditivnih tehnologija i slično. CT snimanje omogućuje prikaz mikrostrukture materijala što omogućuje prikaz promjene njegovih mehaničkih svojstava. [24]

### 6.3. Rezultati CT snimanja etalona

Izrađeni etalon snimljen je na CT uređaju kako bi vidjeli stvarni položaj i oblik referentnih reflektora. Odabrani su i prikazani rezultati snimanja odnose se na referentne reflektore pod kutovima  $45^\circ$  i  $70^\circ$ . CT snimka etalona prikazana je na slici 30., a prikaz referentnih reflektora unutar etalona prikazani su na slici 31. Iz slike 31. vidljivo je da su referentni reflektori pod približno jednakim kutovima kako je konstruirano ( $70,16^\circ$  i  $44,49^\circ$  prema  $70^\circ$  i  $45^\circ$ ).

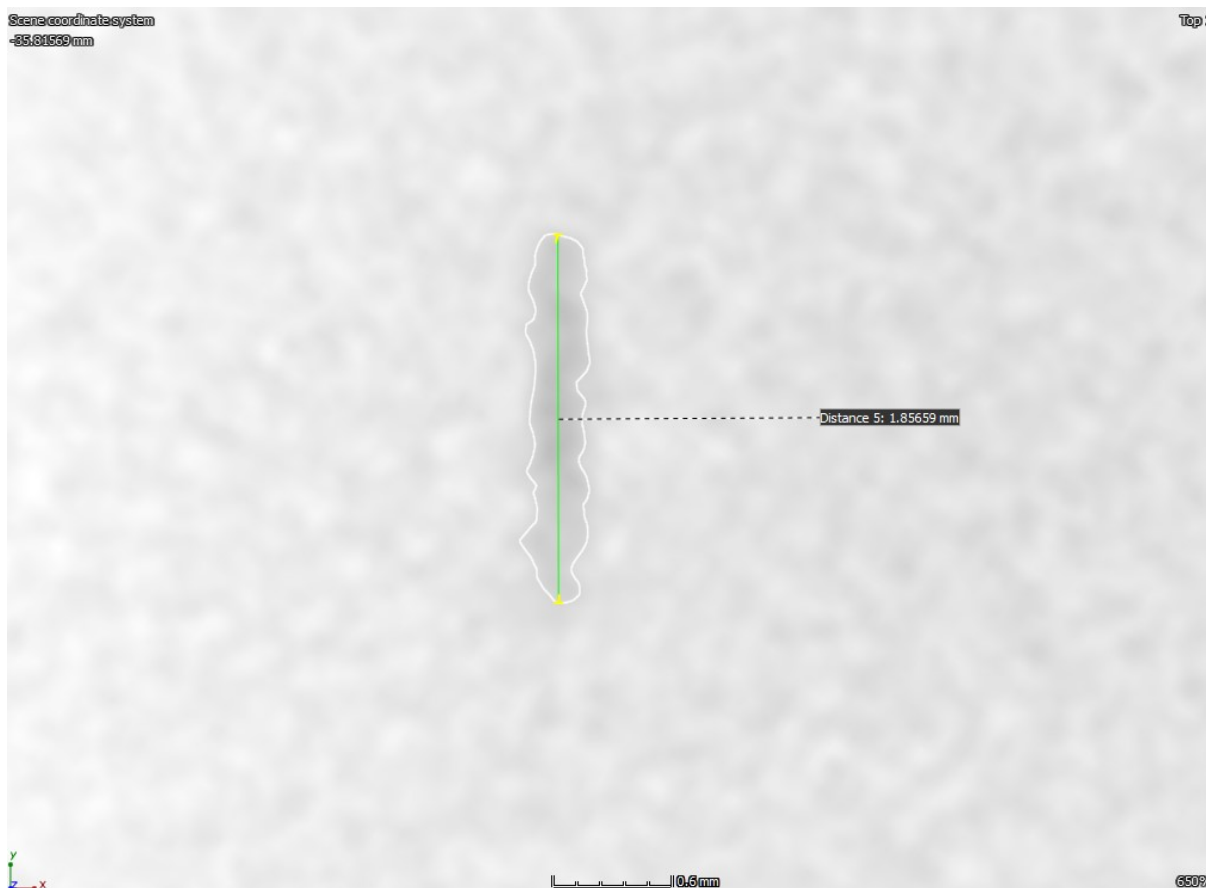


Slika 30. CT snimka etalona



Slika 31. Prikaz referentnih reflektora unutar etalona

Referentni reflektor pod kutom  $45^\circ$  konstruiran je tako da je promjera  $\varnothing 2$  mm te širine 0,10 mm. Međutim, CT snimanje prikazuje da je izrađeni referentni reflektor promjera  $\varnothing 1,86$  mm te širine 0,25 mm. Snimka reflektora pod kutom  $45^\circ$  prikazana je na slici 32.



Slika 32. CT snimka referentnog reflektora pod kutom  $45^\circ$

Referentni reflektor pod kutom  $70^\circ$  konstruiran je tako da je promjera  $\varnothing 2$  mm te širine 0,10 mm. CT snimanje pokazuje da je izrađeni referentni reflektor promjera  $\varnothing 2$  mm te širine 0,5 mm. Također možemo vidjeti kako se unutar referentnog reflektora nalaze tri zrna praha, što je posljedica DMLS postupka izrade. Snimka reflektora pod kutom  $70^\circ$  prikazana je na slici 33.



Slika 33. CT snimka referentnog reflektora pod kutom 70°

Tablica 3. Usporedba ostvarenih i dobivenih dimenzija referentnih reflektora

Konstruirani nagib, °	45	70
Vrijednost nagiba dobiven pomoću CTa, °	44,49	70,16
Konstruirani promjer, mm	Ø2	Ø2
Vrijednost promjera dobiven pomoću CTa, mm	Ø1,86	Ø2
Konstruirana širina, mm	0,10	0,10
Vrijednost širine dobivene pomoću CTa, mm	0,25	0,50

Tablica 3 prikazuje usporedbu konstruiranih i ostvarenih dimenzija referentnih reflektora pod kutovima 45° i 70°.



## 7. PROCJENA VELIČINE REFLEKTORA POMOĆU ULTRAZVUČNOG SUSTAVA

U ovom poglavlju prvo će biti prikazana procjena veličine reflektora preko DGS dijagrama, a nakon toga procjena veličine reflektora preko ultrazvučnog uređaja. Današnji ultrazvučni uređaji čija je primarna namjena ispitivanje volumena određenog objekta najčešće imaju integrirane dijagrame za procjenu veličine reflektora. Integrirani dijagrami odnose se na specifične ultrazvučne sonde i svojstvene su samo njima s obzirom na geometriju snopa i karakteristične vrijednosti ultrazvučnog polja.

### 7.1. Procjena veličine reflektora pomoću DGS dijagrama

Za procjenu veličine integriranih reflektora odabran je ultrazvučni sustav kako slijedi:

- Ultrazvučni uređaj: USM 36 (slika 34.)
- Ultrazvučne sonde: MWB 60°, MWB 45° i MWB 70° (slika 35.)
- Referentni etalon: V2 (slika 36.)
- Kontaktno sredstvo: gel



Slika 34. Ultrazvučni uređaj korišten u eksperimentalnom dijelu diplomskog rada (Krautkramer USM 36)



Tablica 4. Usporedba USM ultrazvučnih uređaja [26]

Značajka	USM 35	USM Go+	USM 36	USN 60L	USN 60
Veličina zaslona, cm	14,2	12,5	17,8	16,8	16,8
Frekvencija, Hz	1 – 10	15 – 2k	15 – 2k	15 – 2k	15 – 6k
Raspon debljine ispitnog materijala (čelika), mm	255 - 1000	850 - 1400	850 - 1400	100 - 1220	100 - 2800
Trajanje baterije, h	14	5,5	14	11	11
Težina, kg	2,2	0,8	2,2	2,9	2,9
Video snimanje	Ne	Da	Da	Ne	Da
VGA priključak	Da	Ne	Da	Da	Da
Raspon radne temperature, °C	-20 – 55	0 – 55	-10 – 55	-20 – 55	-20 – 55

Usporedba ultrazvučnog uređaja USM 36 sa ostalim ultrazvučnim uređajima iste serije prikazana je u tablici 4. Ultrazvučni uređaj USM 36 može biti korišten kao stacionarni ili prijenosni uređaj, što ima veliku prednost u terenskim ispitivanjima. Također njegova mala masa od 2,2 kg, dugotrajan vijek baterije od 14 h i robusno kućište sa čvrstim podesivim postoljem čini ga idealnim za terenski rad. VGA izlaz koristan je za dijeljenje prikaza te je tako jednostavno omogućena primjena uređaja u edukacijske svrhe [26].



Slika 35. Ultrazvučne sonde



Slika 36. Referentni etalon V2

### 7.1.1. Procjena veličine reflektora pod kutom 60°

Postupak procjene veličine reflektora pod kutom 60° DGS dijagramom je sljedeći: prvo moramo odrediti iz koje točke sonda emitira ultrazvučni snop pomoću mjerne skale na njeznom dnu. Zatim ultrazvučni snop usmjerimo prema radijusu 50 mm na etalonu V2 koji nam predstavlja beskonačni reflektor (reflektor koji u potpunosti presijeca snop). Kada postavimo signal na 80 % VE (visine ekrana), dobivamo referentno pojačanje koje u ovom slučaju iznosi 15,2 dB (očitanu s ultrazvučnog uređaja).

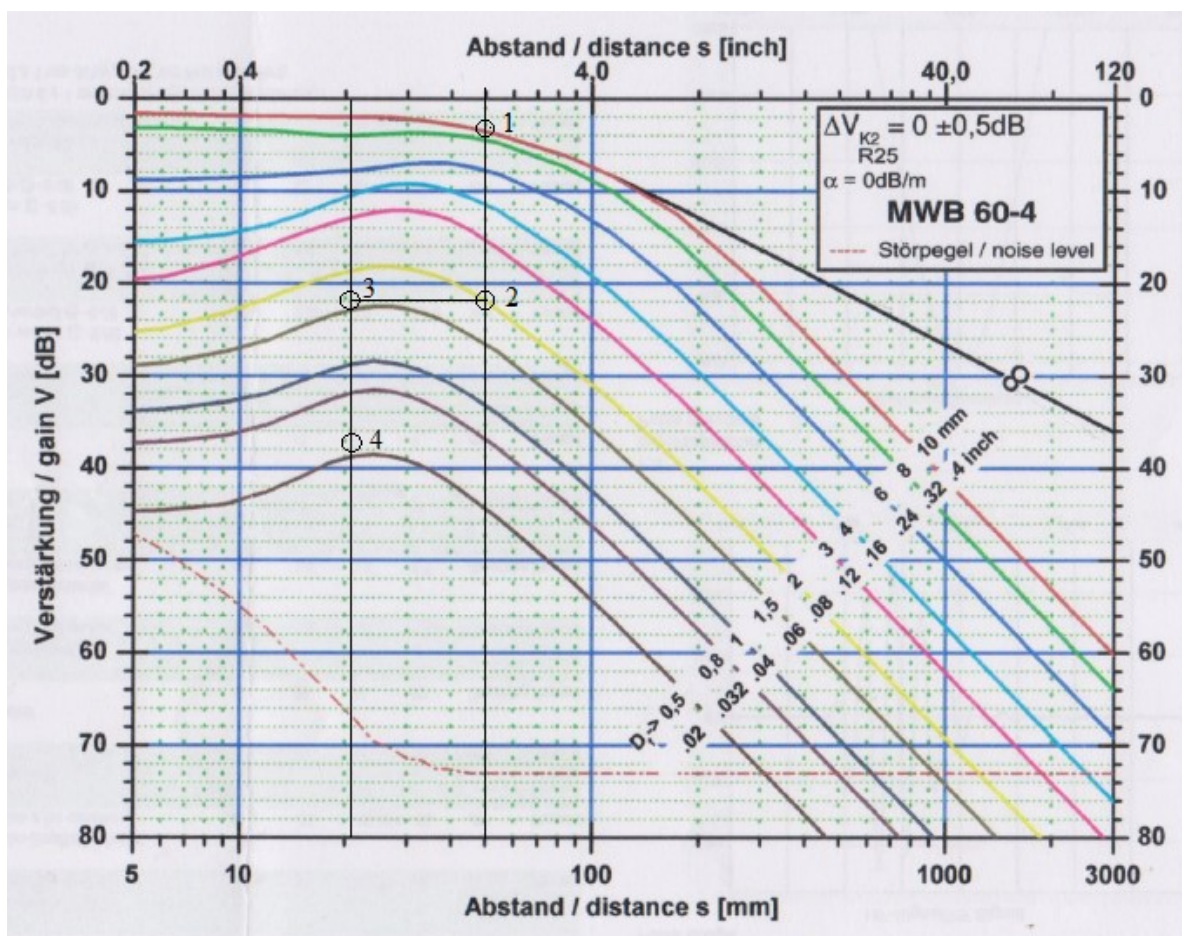
Nakon toga potreban nam je pripadajući DGS dijagram. Na njemu je potrebno iščitati razliku pojačanja na putu ultrazvuka 50 mm za beskonačni i referentni reflektor Ø2 mm (referentni reflektori u izrađenom etalonu su veličine 2 mm). Na slici 37. to prikazuju točka 1 i točka 2. U ovom slučaju to pojačanje iznosi 19 dB. Suma ovog i referentnog pojačanja daje nam iznos radnog pojačanja, koje u ovom slučaju iznosi 34,2 dB.

Zatim ultrazvukom snimamo izrađeni etalon te očitamo put ultrazvuka na ultrazvučnom uređaju koji u ovom slučaju iznosi 20,12 mm. Ako je odjek od referentnog reflektora veći ili manji od 80 % VE, tu razliku pojačanja dodajemo ili oduzimamo od točke 3 koja predstavlja horizontalni pomak od točke 2 do puta ultrazvuka. U ovom slučaju razlika pojačanja iznosi 15,4 dB. Dodavanjem tog pojačanja dolazimo do točke 4 koja nam ona predstavlja referentnu veličinu reflektora koja u ovom slučaju iznosi Ø0,58 mm.

**Tablica 5. Parametri potrebni za određivanje referentne veličine reflektora (60°)**

Sonda	MWB 60°
Referentno pojačanje, dB	15,2
Razlika pojačanja, dB	19
Radno pojačanje, dB	34,2
Put ultrazvuka, mm	20,12
Razlika pojačanja za reflektor, dB	15,4
Veličina referentnog reflektora, mm	Ø0,58

Svi potrebni parametri za određivanje referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama prikazani su u tablici 5.



Slika 37. Postupak određivanja veličine referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama ( $60^\circ$ )

### 7.1.2. Procjena veličine reflektora pod kutom 45°

Postupak procjene veličine reflektora pod kutom 45° DGS dijagramom je sljedeći: prvo moramo odrediti iz koje točke sonda emitira ultrazvučni snop pomoću mjerne skale na njeznom dnu. Zatim ultrazvučni snop usmjerimo prema radijusu 50 mm na etalonu V2 koji nam predstavlja beskonačni reflektor. Kada postavimo signal na 80 % VE, dobivamo referentno pojačanje koje u ovom slučaju iznosi 14,6 dB (očitano s ultrazvučnog uređaja).

Nakon toga potreban nam je pripadajući DGS dijagram. Na njemu je potrebno iščitati razliku pojačanja na putu ultrazvuka 50 mm za beskonačni i referentni reflektor Ø2 mm. Na slici 38. to prikazuju točka 1 i točka 2. U ovom slučaju to pojačanje iznosi 19 dB. Suma tog i referentnog pojačanja daje nam iznos radnog pojačanja koje u ovom slučaju iznosi 33,6 dB.

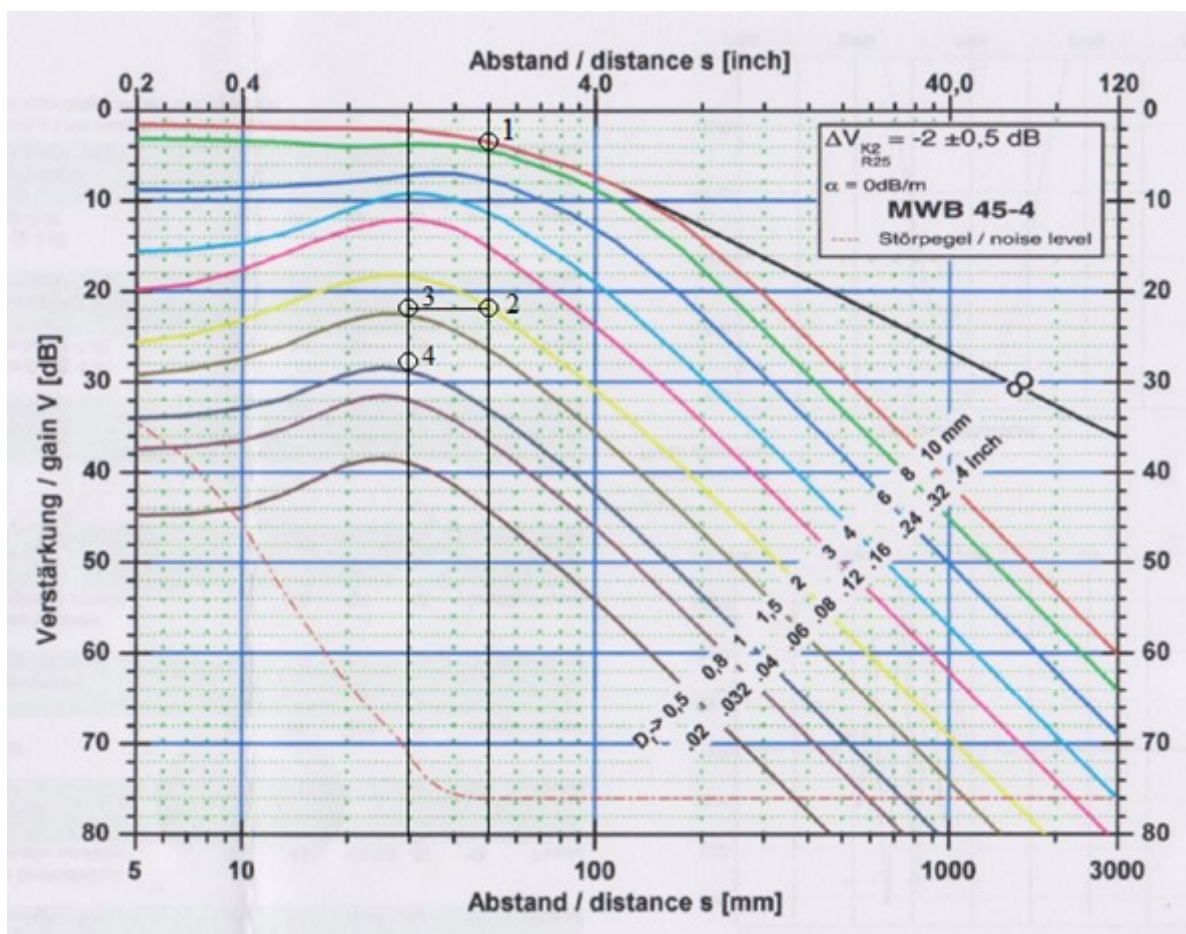
Zatim ultrazvukom snimamo izrađeni etalon te očitamo put ultrazvuka na ultrazvučnom uređaju koji u ovom slučaju iznosi 29,75 mm. Ako je odjek od referentnog reflektora veći ili manji od 80 % VE, tu razliku pojačanja dodajemo ili oduzimamo od točke 3 koja predstavlja horizontalni pomak od točke 2 do puta ultrazvuka. U ovom slučaju razlika pojačanja iznosi 5,8 dB. Dodavanjem tog pojačanja dolazimo do točke 4 te nam ona predstavlja referentnu veličinu reflektora koja u ovom slučaju iznosi Ø1,1 mm.

**Tablica 6. Parametri potrebni za određivanje referentne veličine reflektora (45°)**

Sonda	MWB 45°
Referentno pojačanje, dB	14,6
Razlika pojačanja, dB	19
Radno pojačanje, dB	33,6
Put ultrazvuka, mm	29,75
Razlika pojačanja za reflektor, dB	5,8
Veličina referentnog reflektora, mm	Ø1,1

Svi potrebni parametri za određivanje referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama prikazani su u tablici 6.





Slika 38. Postupak određivanja veličine referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama (45°)

### 7.1.3. Procjena veličine reflektora pod kutom 70°

Postupak procjene veličine reflektora pod kutom 70° DGS dijagramom je sljedeći: prvo moramo odrediti iz koje točke sonda emitira ultrazvučni snop pomoću mjerne skale na njeznom dnu. Zatim ultrazvučni snop usmjerimo prema radijusu 50 mm na etalonu V2 koji nam predstavlja beskonačni reflektor. Kada postavimo signal na 80 % VE, dobivamo referentno pojačanje koje u ovom slučaju iznosi 18,4 dB (očitano s ultrazvučnog uređaja).

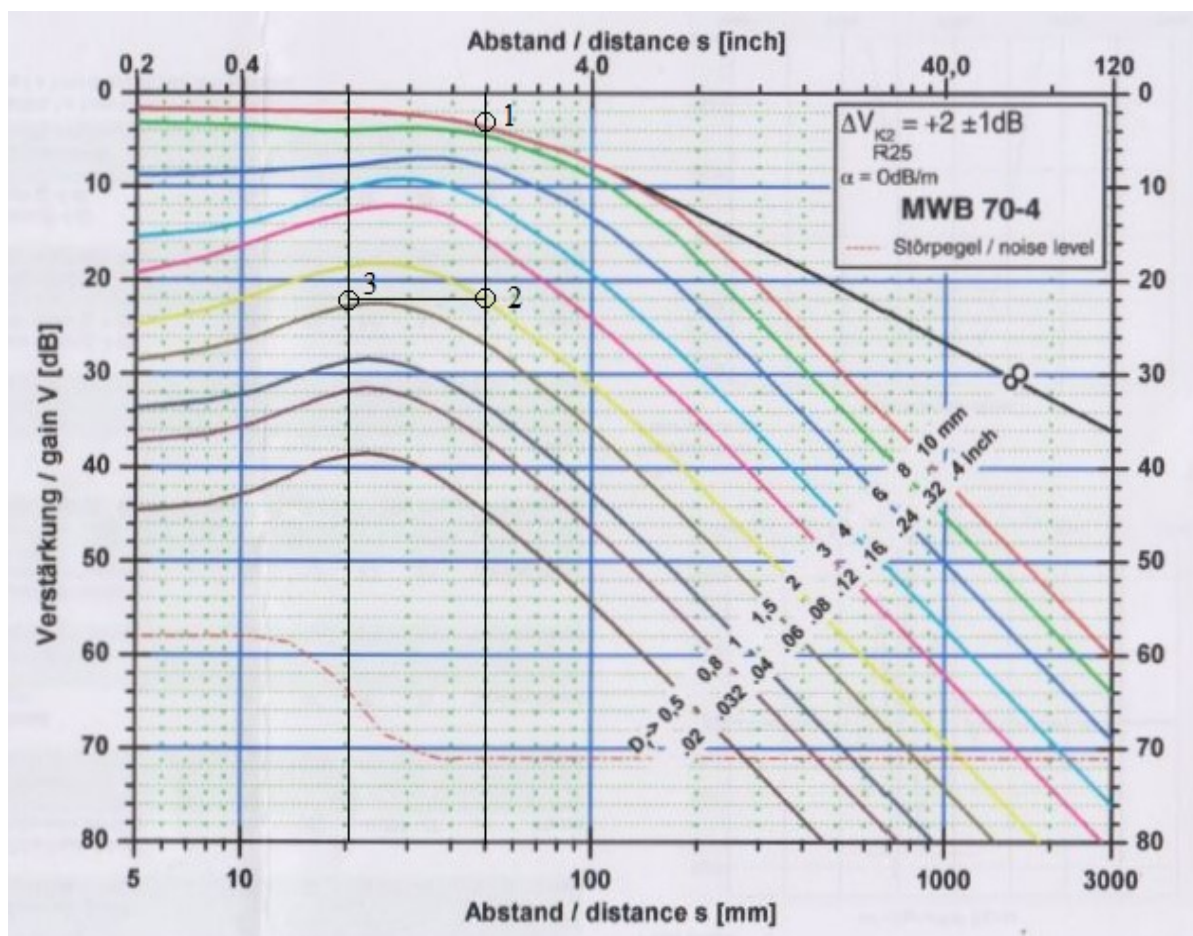
Nakon toga potreban nam je pripadajući DGS dijagram. Na njemu je potrebno iščitati razliku pojačanja na putu ultrazvuka 50 mm za beskonačni i referentni reflektor Ø2 mm. Na slici 39. to prikazuju točka 1 i točka 2. U ovom slučaju to pojačanje iznosi 19 dB. Suma tog i referentnog pojačanja daje nam iznos radnog pojačanja koje u ovom slučaju iznosi 37,4 dB.

Zatim ultrazvukom snimamo izrađeni etalon te očitamo put ultrazvuka na ultrazvučnom uređaju koji u ovom slučaju iznosi 20,66 mm. Ako je odjek od referentnog reflektora veći ili manji od 80 % VE, tu razliku pojačanja dodajemo ili oduzimamo od točke 3 koja predstavlja horizontalni pomak od točke 2 do puta ultrazvuka. U ovom slučaju odjek od referentnog reflektora nalazi se točno na 80 % VE, tako da ne postoji razlika pojačanja te nam točka 3 predstavlja veličinu referentnog reflektora koji u ovom slučaju iznosi Ø1,6 mm.

**Tablica 7. Parametri potrebni za određivanje referentne veličine reflektora (70°)**

Sonda	MWB 70°
Referentno pojačanje, dB	18,4
Razlika pojačanja, dB	19
Radno pojačanja, dB	37,4
Put ultrazvuka, mm	20,6
Razlika pojačanja za reflektor, dB	0
Veličina referentnog reflektora, mm	Ø1,6

Svi potrebni parametri za određivanje referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama prikazani su u tablici 7.



Slika 39. Postupak određivanja veličine referentnog reflektora pomoću DGS dijagrama ( $70^\circ$ )

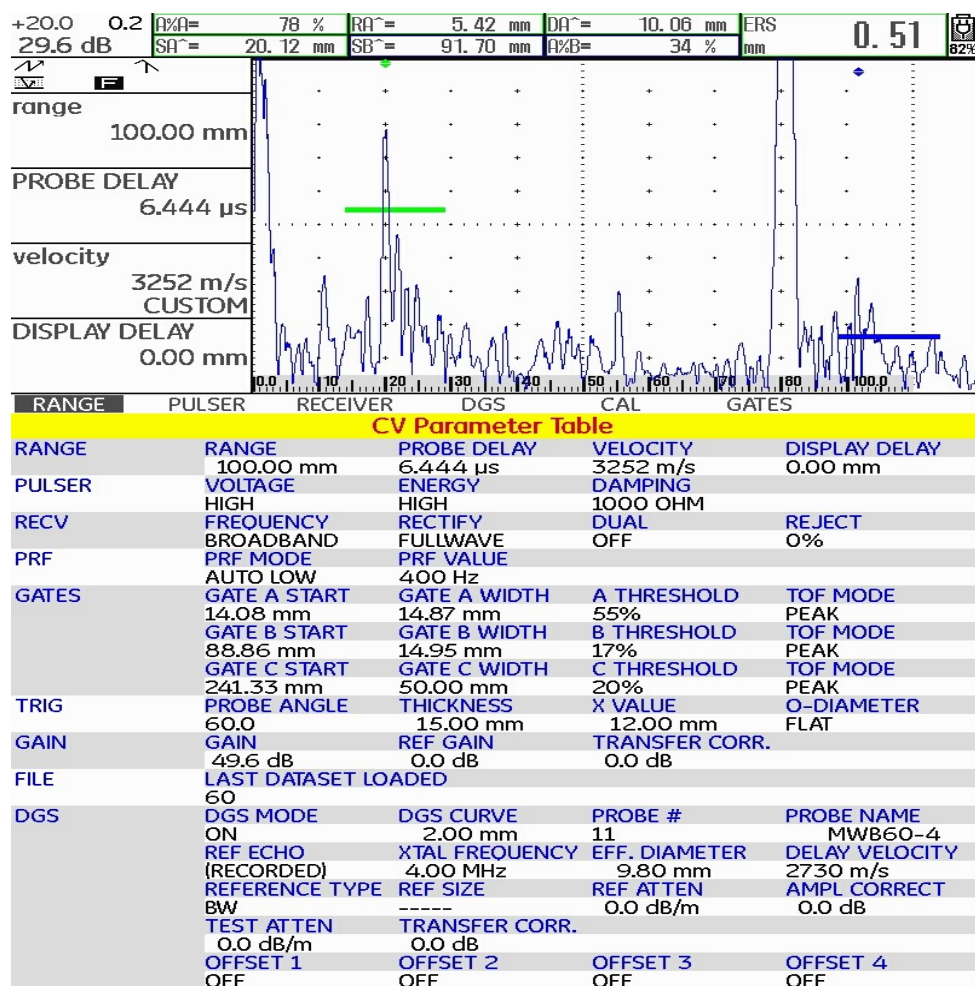


## 7.2. Procjena veličine reflektora pomoću ultrazvučnog uređaja

Procjena veličine reflektora pomoću uređaja provedena je na jednakom ultrazvučnom sustavu kao i za procjenu veličine reflektora pomoću DGS dijagrama. U tom smislu za procjenu veličine reflektora minimizirani su utjecaji odabranih postavki parametara ultrazvučnog sustava.

### 7.2.1. Procjena veličine reflektora pod kutom 60°

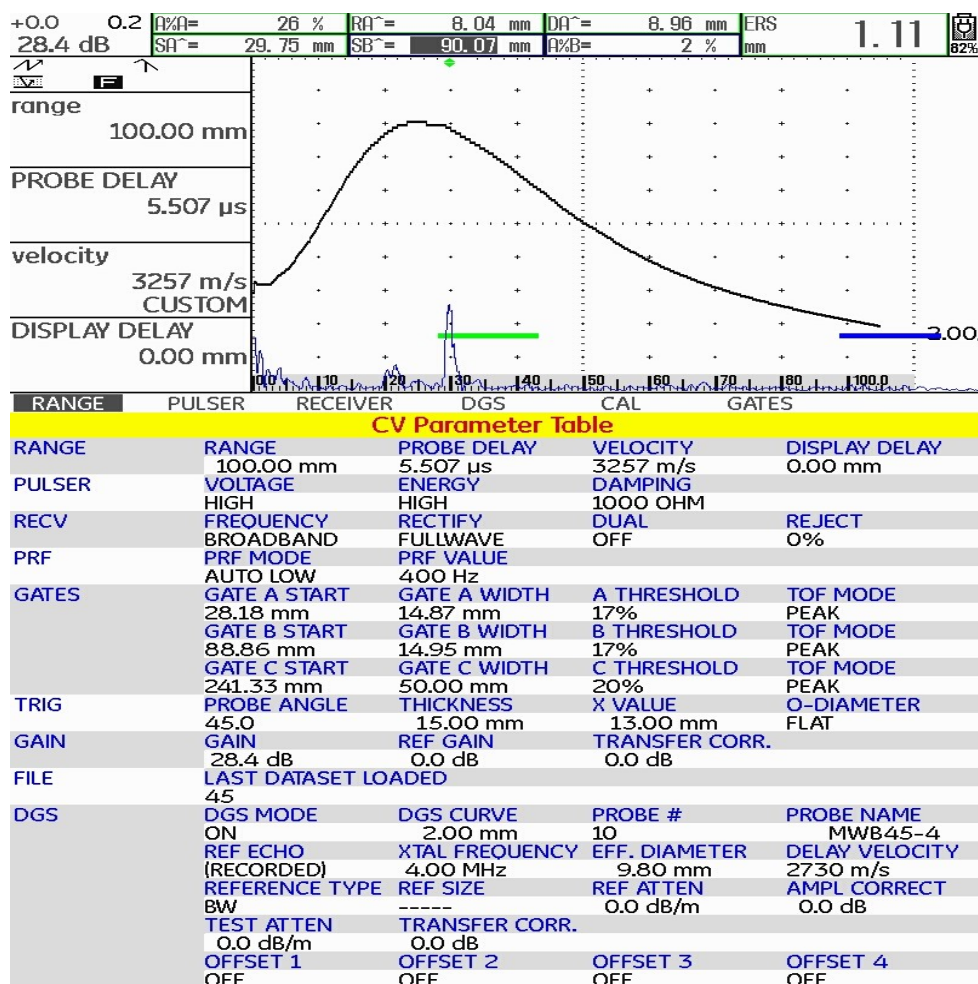
Na slici 40. prikazan je odjek od referentnog reflektora za upadni kut 60° te procijenjena veličina referentnog reflektora ERS (engl. *Equivalent Reflector Size*) iznosi  $\varnothing 0,51$  mm.



Slika 40. Prikaz veličine referentnog reflektora za sondu MWB 60°

### 7.2.2. Procjena veličine reflektora pod kutom 45°

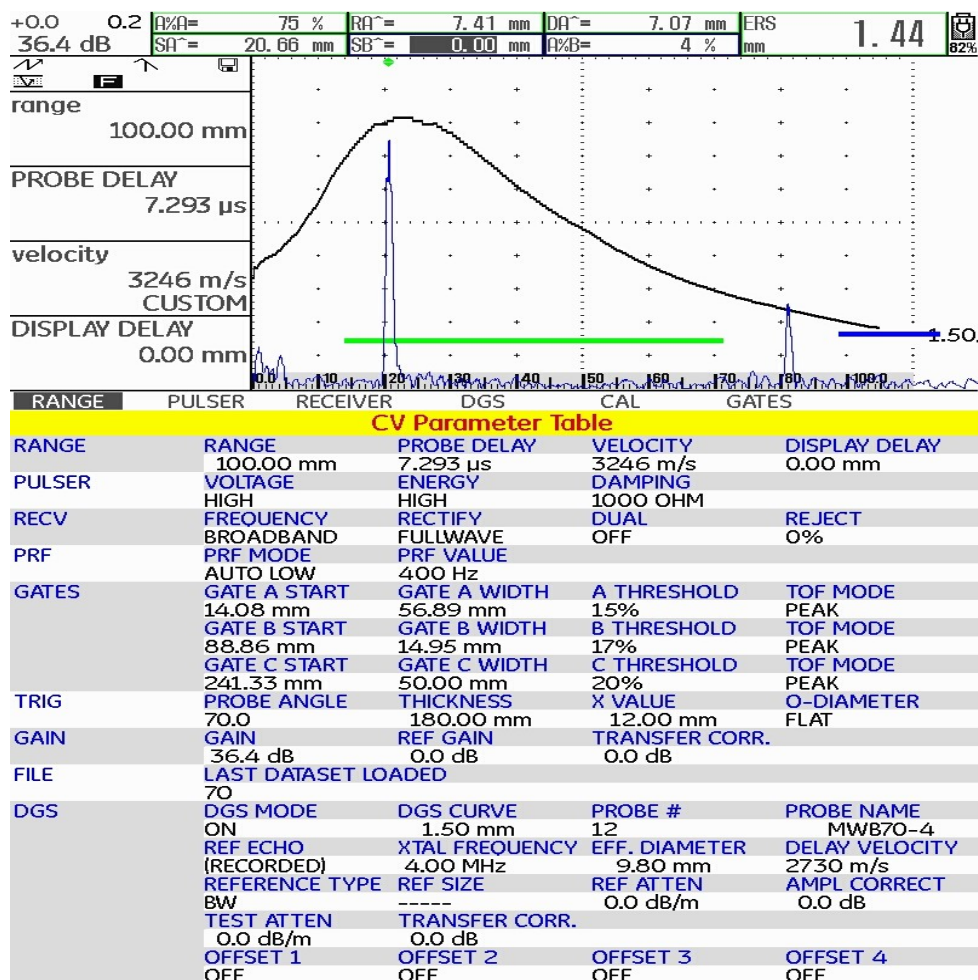
Na slici 41. prikazan je odjek od referentnog reflektora za upadni kut 45° te procijenjena veličina referentnog reflektora ERS iznosi Ø1,11 mm.



Slika 41. Prikaz veličine referentnog reflektora za sondu MWB 45°

### 7.2.3. Procjena veličine reflektora pod kutom 70°

Na slici 42. prikazan je odjek od referentnog reflektora za upadni kut 70° te procijenjena veličina referentnog reflektora ERS iznosi Ø1,44 mm.



Slika 42. Prikaz veličine referentnog reflektora za sondu MWB 70°

### 7.3. Usporedba rezultata dobivenih pomoću DGS dijagrama i ultrazvučnog uređaja

Vidljivo je da za niti jedan reflektor nisu izmjerene jednake vrijednosti, odnosno da se vrijednosti dobivene pomoću DGS dijagrama i vrijednosti dobivene pomoću ultrazvučnog uređaja razlikuju od veličina koje su dobivene CT snimanjem. Usporedbe rezultata mjerenja za reflektore pod kutovima 45° i 70° prikazani su u tablici 8.

**Tablica 8. Rezultati mjerenja veličine referentnih reflektora.**

Izmjerena vrijednost referentnog reflektora	Konstruirana vrijednost, mm	CT uređaj, mm	DGS dijagram, mm	Ultrazvučni uređaj, mm
Reflektor 45°	Ø2	Ø1,86	Ø1,1	Ø1,11
Reflektor 70°	Ø2	Ø2	Ø1,6	Ø1,44

Razlike u mjerenjima su značajne zato što će se izrađeni etalon koristiti za podešavanje ultrazvučnog sustava, odnosno za procjenu. Rezultat takvog ispitivanja je određivanje koliko je pogreška u materijalu veća, manja ili jednaka od površine referentnog reflektora u etalonu.

## 8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je izraditi etalon za podešavanje ultrazvučnog sustava kutnim sondama. Nakon prikazanog principa tehnike odjeka te potrebne opreme za ultrazvučno ispitivanje, prikazana je važnost etalona u podešavanju ultrazvučnog ispitnog sustava. Najčešće se za podešavanje kutne sonde prilikom provođenja ispitivanja zavarenih spojeva koriste bočni provrti (SDH) koji su izbušeni paralelno sa skenirajućom površinom. Oni predstavljaju jednake reflektore za sve kutove ultrazvučne sonde, ali na različitim ultrazvučnim putovima. Međutim, refleksija ultrazvučnih valova od zakrivljene površine razlikuje se od refleksije ultrazvučnih valova od ravne površine. S obzirom na spomenutu činjenicu konstruiran je etalon s tri referentna reflektora ravne površine, po jedan za svaku odabranu ultrazvučnu sondu čiji je nazivni kut  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $70^\circ$ . Tako konstruirani etalon izrađen je DMLS aditivnom tehnologijom. S ciljem usporedbe procijenjene veličine disk reflektora u ultrazvučnom snopu, referentne dimenzije i orijentacija odabranih referentnih reflektora dobivene su snimanjem etalona na CT uređaju.

Ultrazvučnim ispitivanjem i procjenom pomoću DGS dijagrama i ultrazvučnog uređaja određene su ekvivalentne veličine referentnih reflektora. Navedeni etalon će se koristiti kao referenca u odnosu na eventualne pogreške u ispitivanom materijalu. To znači da će se ultrazvučni sustav podesiti prema izrađenom etalonu, a prilikom ispitivanja materijala sve će se greške prikazivati u odnosu na referentne reflektore u etalonu. Rezultat takvog ispitivanja je određivanje koliko je greška u materijalu veća, manja ili jednaka od površine referentnog reflektora u etalonu. Za konstruirani etalon ustanovljeno je da se vrijednosti razlikuju od dimenzija prikazanih CT snimanjem. Etalon će se koristiti za podešavanje ultrazvučnog sustava kako bi se što točnije procjenile detektirane pogreške, a s obzirom na to potrebno je dalje razvijati mogućnost točnije konstrukcije etalona i disk reflektora.

## LITERATURA

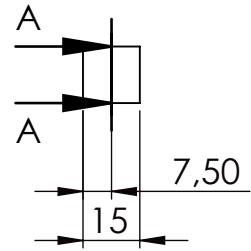
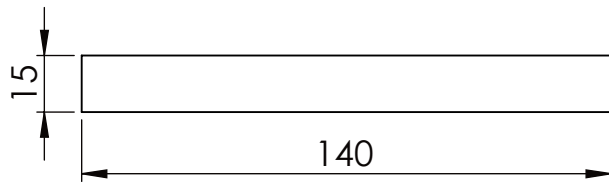
- [1] D. Markučić, Metode nerazornih ispitivanja (ppt), Zagreb, 2003.
- [2] M. Mihaljević, Princip ultrazvučne metode nerazornog ispitivanja (ppt), Zagreb, 2018.
- [3] S. Rešković, Ispitivanje materijala, Zagreb, 2009.
- [4] <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/ultrasonic-testing-ut/>,  
Pristup 10.11.2020
- [5] M. M. Goodsitt, P. L. Carson, S. Witt, D. L. Hykes, J. M. Kofler, Real-time B-mode ultrasound quality control test procedures, Medical Physics, Vol. 25, No. 8, 1998.
- [6] M. Berke, Introduction to ultrasonic testing SD 218, Agfa NDT GmbH, Hürth, 2002.
- [7] V. Krstelj, Ultrazvučna kontrola, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb (2002)
- [8] <https://www.arorandt.com/ultrasonic-testing-ut/>, Pristup 28.09.2020
- [9] <https://www.jwjndt.com/product/small-angle-beam-transducers-european-standards-mwbmwk-styles/>, Pristup 27.10.2020
- [10] Kruz, V, Tehnička fizika za tehničke škole, Školska knjiga, Zagreb, 1969.
- [11] [https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-Snells-law-where-n2-n1-The-angle-th1-is-measured-between-the-incident\\_fig9\\_235132960](https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-Snells-law-where-n2-n1-The-angle-th1-is-measured-between-the-incident_fig9_235132960), Pristup 23.10.2020
- [12] <https://dakotaultrasonics.com/reference/>, Pristup 23.10.2020
- [13] <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/modeconversion.htm>, Pristup 23.10.2020
- [14] Nondestructive Examination (NDE) Technology and Codes Student Manual, Volume 2, Chapter 8
- [15] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1546596224-0-nde-km-ut\\_v5.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1546596224-0-nde-km-ut_v5.pdf), Pristup 10.11.2020
- [16] <https://sites.google.com/site/roshnisphysicseportfolio/sound-beams>, Pristup 30.10.2020
- [17] [https://www.alibaba.com/product-detail/V1-V2-V3-Ultrasonic-Testing-or\\_60776415236.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_title.5668151e3GkYsG](https://www.alibaba.com/product-detail/V1-V2-V3-Ultrasonic-Testing-or_60776415236.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.5668151e3GkYsG), Pristpu 30.09.2020
- [18] [https://www.alibaba.com/product-detail/V2-A4-Calibration-Block-BS-2704\\_50035629591.html](https://www.alibaba.com/product-detail/V2-A4-Calibration-Block-BS-2704_50035629591.html), Pristup 30.09.2020

- [19] <https://www.bindt.org/What-is-NDT/Index-of-acronyms/S/SDH-and-FBH/>, Pristup 09.09.2020
- [20] [http://www.wermac.org/others/ndt\\_ut.html](http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html), Pristup 21.10.2020
- [21] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-metal-3d-printing/#material>, Pristup 05.10.2020
- [22] Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, SAD, 2010
- [23] <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/#:~:text=The%20difference%20between%20these%20two,fully%20melts%20into%20a%20liquid.&text=Because%20it%20does%20not%20melt,works%20best%20with%20pure%20metals.>, Pristup 06.10.2020
- [24] <https://www.intechopen.com/books/computed-tomography-advanced-applications/the-use-of-computed-tomography-to-explore-the-microstructure-of-materials-in-civil-engineering-from->, Pristup 01.10.2020
- [25] <https://lifescanimaging.sg/services/computed-tomography-ct-scan/>, Pristup 27.10.2020
- [26] [http://idef.hr/aploads/files/USM\\_36-HRV\\_prezentacija.pdf](http://idef.hr/aploads/files/USM_36-HRV_prezentacija.pdf), Pristup 07.11.2020

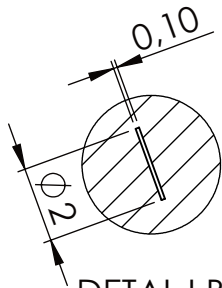
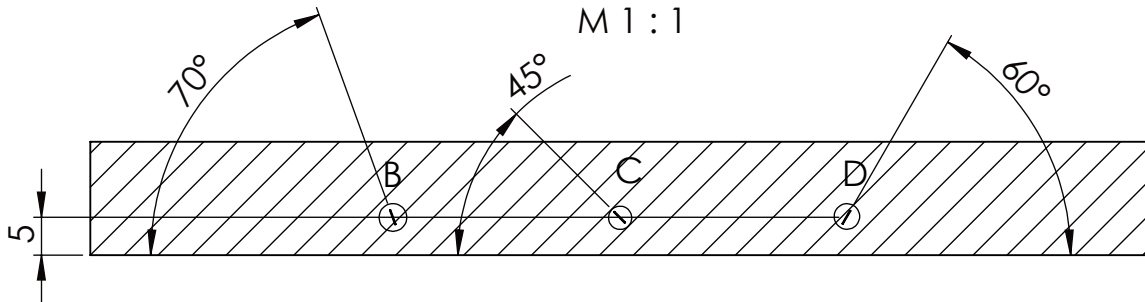
## **PRILOZI**

### I. Tehnička dokumentacija

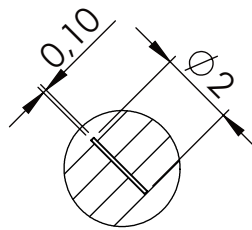




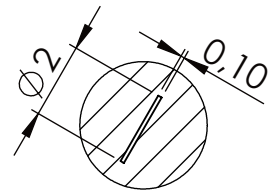
PRESJEK A-A  
M 1 : 1



DETALJ B  
M 5 : 1



DETALJ C  
M 5 : 1



DETALJ D  
M 5 : 1

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	13.10.2020	Karlo Kožić	K. Kožić	
Razradio	13.10.2020	Karlo Kožić		
Crtao	13.10.2020	Karlo Kožić		
Pregledao	15.10.2020	Morana Mihaljević		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: X3NiCoMoTi 18-9-5		Masa:		
	Naziv: Etalon za podešavanje ultrazvučnog ispitnog sustava			Pozicija:
	Mjerilo originala	Crtež broj: 6112020		
M 1:2				Listova: 1
				List: 1