

Ultrazvučno ispitivanje pukotina u materijalu

Ciglar, Tihana

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:454698>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO

TIHANA CIGLAR

ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE PUKOTINA U
MATERIJALU

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2015.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO

TIHANA CIGLAR

ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE PUKOTINA U
MATERIJALU

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Tihana Kostadin, mag.ing.str.

Karlovac, 2015.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / specijalistički studij:.....STROJARSTVO.....
(označiti)

Usmjerenje:.....PROIZVODNO STROJARSTVO.....Karlovac, 27.11.2015.....

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:.....TIHANA CIGLAR..... Matični broj.: : 0110612101

Naslov: **ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE PUKOTINA U MATERIJALU**

.....
Opis zadatka:

U završnom radu nakon kratkog uvoda, potrebno je u teorijskom dijelu rada obraditi ispitivanje materijala bez razaranja, odnosno osnovne metode defektoskopije. Posebni naglasak treba biti na ultrazvučnom ispitivanju materijala. Nakon postavke zadatka, u eksperimentalnom dijelu obraditi konkretan primjer ultrazvučnog ispitivanja pukotina u materijalu, te napraviti analizu dobivenih rezultata. Na kraju napisati odgovarajući zaključak. Eksperimentalni dio rada odraditi na Katedri za nerazorna ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Završni rad urediti prema Pravilniku o završnim i diplomskim radovima na Veleučilištu u Karlovcu.

Zadatak zadan:
27.11.2015.

Rok predaje rada:
10.12.2015.

Predviđeni datum obrane:
18.12.2015.

.....
Mentor:

.....
Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Izjavljujem da sam Završni rad izradila samostalno, služeći se znanjem stečenim tijekom studija i koristeći navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojoj voditeljici i mentorici Tihani Kostadin, mag.ing.str., na stručnoj pomoći, savjetima i konstruktivnim komentarima pri izradi ovog završnog 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 eksperimenta.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na svojoj pruženoj potpori i pomoći tijekom studija.

Tihana Ciglar

Karlovac, 9.12.2015.

SAŽETAK

U ovom Završnom radu je dan literaturni pregled najčešće korištenih nerazornih metoda ispitivanja. Opisane su karakteristike, prednosti i mane pojedinih metoda. Detaljnije su opisane glavne karakteristike sustava za nerazornu metodu ispitivanja ultrazvukom. U eksperimentalnom dijelu Završnog rada su pripravljena četiri čelična uzorka s namjerno napravljenim linijskim pukotinama, približno jednake visine, a različitog nagiba (orijentacije) u odnosu na vertikalnu ravninu ispitivanih uzoraka. Provedena su ultrazvučna ispitivanja tako pripremljenih uzoraka, jer se željelo na osnovu dobivenih rezultata zaključiti o mjeri razlučivanja orijentacije linijskih pukotina u uzorcima.

KLJUČNE RIJEČI: nerazorna ispitivanja, ultrazvučno ispitivanje, pukotina, ultrazvučna sonda.

SUMMARY

This Final work *Ultrasonic testing of cracks* gives a literature review of the most commonly used non-destructive testing methods. The characteristics, advantages and disadvantages of individual methods are described. More detailed are described the main characteristics of the system for non-destructive ultrasonic testing method. In the experimental part of this Final work, the four steel samples with intentionally made linear cracks of approximately equal height, but with different inclination (orientation) with respect to the vertical plane of the samples, were prepared.

Ultrasound tests of prepared samples were conducted, because, on the basis of the obtained results, the goal was to conclude on the extent of discrimination orientation of linear cracks in the samples.

KEY WORDS: nondestructive testing, ultrasonic testing, crack, ultrasonic probe.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

1. UVOD	1
2. ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA	3
2.1. Općenito o kontroli bez razaranja	3
2.2. Vizualni pregled	4
2.3. Dimenzionalna kontrola	5
2.4. Penetrantsko ispitivanje	5
2.5. Magnetsko ispitivanje	8
2.6. Ispitivanje vrtložnim strujama	10
2.7. Radiografsko ispitivanje	14
2.8. Akustička emisija	17
2.9. Termografija	18
2.10. Ispitivanje nepropusnosti	23
3. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE	24
3.1. Stvaranje ultrazvuka	24
3.2. Parametri ultrazvučne kontrole	25
3.3. Snellov zakon	26
3.4. Oprema	27
3.4.1. Ultrazvučni uređaj	28
3.4.2. Ultrazvučne sonde	29
3.4.2.1. Vrste sondi	29
3.4.3. Etaloni i referentni uzorci	33

4. POSTAVKA ZADATKA	34
5. EKSPERIMENTALNI DIO	35
5.1. Opis postupka	35
5.2. Rezultati eksperimenta	43
5.3. S – prikazi mjerenja i analiza	45
6. ZAKLJUČAK	49
LITERATURA	50

POPIS SLIKA:

Slika 1. Mini USB kamera [1].....	4
Slika 2. Vizualna kontrola pomoću Boroskopa [2].....	5
Slika 3. Shematski princip kontrole penetrantima [3].....	7
Slika 4. Pukotine na brušenom uzorku materijala Č 4150 ustanovljene metodom sa crvenim penetrantom [4].....	8
Slika 5. Prikaz magnetskog ispitivanja [5].....	9
Slika 6. Prikaz Barkhausenovog učinka [6].....	10
Slika 7. Poprečni presjek sonde za ispitivanje vrtložnim strujama [7].....	11
Slika 8. Apsolutna sonda za ispitivanje vrtložnim strujama.....	12
Slika 9. Diferencijalna mjerna sonda Metrix MX 9030-Z [1].....	12
Slika 10. Uređaj Hocking Phasec 2200 [8].....	13
Slika 11. Shematski prikaz radiografske kontrole kvalitete [5].....	15
Slika 12. Prenosivi baterijski uređaj za stvaranje rendgenskih zraka [9].....	15
Slika 13. Rendgenska cijev [10].....	16
Slika 14. Crookesova cijev s početka 20. stoljeća [11].....	17
Slika 15. Elektromagnetski spektar [12].....	19
Slika 16. Termografska kamera [13].....	21
Slika 17. Primjer termograma zgrade [14].....	22
Slika 18. Termogram lokomotive [15].....	22
Slika 19. Shematski prikaz kontrole nepropusnosti vakuumskom komorom [5].....	23
Slika 20. Lom i refleksija ultrazvučnih valova na granici loma [16].....	26
Slika 21. Uređaj za mjerenje ultrazvuka USM Go [17].....	28
Slika 22. Ravna sonda i njezini dijelovi [16].....	30
Slika 23. Kutna sonda i njezini dijelovi [16].....	31
Slika 24. Dvostruka sonda i njezini dijelovi [16].....	32
Slika 25. Detektabilnost pukotine u odnosu na njenu geometriju i dimenzije.....	35
Slika 26. S – prikaz i pripadajuća tablica parametara.....	37
Slika 27. Čelični uzorci.....	38
Slika 28. Čelični uzorak s orjentiranom pukotinom.....	39
Slika 29. Uređaj za ispitivanje GE Inspection Technologies Phasor XS.....	40
Slika 30. Sonda 2,25 MHz, 16 elemenata.....	40
Slika 31. Sonda 2,25 MHz, 16 elemenata.....	41

Slika 32. Sonda 5 MHz, 64 elementa.....	41
Slika 33. Sonda 5 MHz, 64 elementa.....	42
Slika 34. Kontaktni gel.....	42
Slika 35. Dijagramski prikaz rezultata mjerenja za 60°	43
Slika 36. Dijagramski prikaz rezultata mjerenja za 64°	44
Slika 37. Zajednički dijagramski prikaz vrijednosti pobude za kutove zvučnog snopa 60° i 64°	44
Slika 38. Nepravilnost uzorka s indikacijom od 10°	47
Slika 39. Nepravilnost uzorka s indikacijom od 20°	48
Slika 40. Nepravilnost uzorka s indikacijom od 30°	48

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Prikaz obilježja pojedinih sredstava penetrantske kontrole	7
Tablica 2. Rezultati mjerenja kod uzoraka	43
Tablica 3. S – prikazi mjerenja	45

POPIS OZNAKA:

Oznaka	Jedinica	Opis
F	[Hz]	frekvencija
λ	[m]	valna duljina
P	[W]	snaga
U	[V]	napon
P	[Pa]	tlak
α, β	[°]	kutovi koje val zatvara s normalom na granicu sredstva
v_1, v_2	[m/s]	brzina odgovarajućeg vala u sredstvu u kojem se širi

1. UVOD

Svrha svakog pojedinog proizvoda je da ispunjava namijenjenu mu funkcionalnost tijekom određenog vremenskog razdoblja korištenja. Kod toga se očekuje da tu funkcionalnost ispunjava bez kvarova ili smetnji, odnosno kvalitetno. Kvaliteta proizvoda ovisi o mnogo faktora kao što su sama konstrukcija, izbor sirovina za proizvod, načini izrade i slično, a velik broj nedostataka se može javiti i uslijed samog korištenja proizvoda.

Definicija kvalitete prema normi ISO 9000 je „Kvaliteta je stupanj do kojeg skup svojstvenih karakteristika ispunjava zahtjeve“ [19]. S gledišta potrošača povezuje se s korisnošću ili cijenom, s gledišta proizvođača povezuje se s oblikovanjem i izradom proizvoda. Kvalitetu nekog proizvoda ili usluge određuje odnos želja i potreba korisnika i njihove realizacije od proizvođača. Kontrola kvalitete je dio sustava upravljanja kvalitetom fokusiran na ispunjavanje osnovnih zahtjeva vezanih za kvalitetu. Naravno, svrha je povećati kvalitetu proizvoda jer će time biti veća pouzdanost i sigurnost korištenja proizvoda, a time će proizvod biti ekonomski isplativiji. Kvaliteta s gledišta proizvođača je mjera koja pokazuje koliko je određeni proizvod uspio:

- Konceptijski – pokazatelj koliko je ideja pogodila zahtjeve i želje kupaca, zato je važno poznavati potrebe ciljane skupine – optimalno zadovoljenje potreba kupaca;
- Konstrukcijski – kolika mu je kvaliteta izrade, odnosno odnos uporabnih vrijednosti dvaju konceptijsko i jednako kvalitetnih proizvoda;
- Izvedbeno – kolika mu je kvaliteta izrade, odnosno do koje razine je realizirana kvaliteta koncepcije i konstrukcije u redovnoj proizvodnji.

Zato je potrebno kontrolirati kvalitetu proizvoda, a ovisno o vrsti ispitivanja i metodama koje se tijekom ispitivanja koriste, uobičajela podjela je slijedeća:

- **Kontrola ili ispitivanje s razaranjem** (KSR) - *Destructive Testing* – DT;
- **Kontrola ili ispitivanje bez razaranja** (KBR) - *Nondestructive Testing* – NDT.

Kontrola ili ispitivanje s razaranjem predstavlja skup metoda koje su u velikoj mjeri poznate i normizirane, jer su dugo u upotrebi. Osnovna im je namjena utvrditi

svojstva materijala kao što su na primjer čvrstoća, kemijski sastav, dinamička izdržljivost i za sva ta ispitivanja se trebaju izraditi odgovarajući uzorci (epruvete), a time se poskupljuje proizvod. Drugi bitni nedostatak je da se ova ispitivanja ne mogu raditi dok je proizvod još u eksploataciji.

Metode kontrole sa razaranjem su:

- vlačno ispitivanje epruvete (najčešće se traže granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, prekidna čvrstoća, kontrakcija i izduženje, ali se mogu tražiti i neka druga svojstva);
- mjerenja tvrdoće (metoda po Brinellu HB, metoda po Vickersu HV, metoda po Rockwellu HRC i druge metode);
- ispitivanje udarne žilavosti, najčešće na Charpy-evom batu (epruvete sa “U” ili “V” utorom);
- ispitivanja iz područja mehanike loma (mjerenje otvaranja pukotine CTOD, kritične vrijednosti J integrala J_{IC} , postupci određivanja žilavosti loma pri ravnoj defromaciji K_{IC} itd.);
- različita korozijska ispitivanja (opća korozija, korozija uz naprezanje pri djelovanju različitih agresivnih medija, piting, selektivna korozija itd.);
- različita dinamička ispitivanja;
- tlačne probe sa razaranjem;
- različite radioničke probe i probe zavarljivosti;
- ispitivanja sadržaja kemijskih elemenata (kemijska metoda na temelju odvojene čestice metala);
- tlačna proba sa razaranjem;
- ostale metode.

2. ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA

2.1. Općenito o kontroli bez razaranja

Kontrola bez razaranja (KBR) ili nerazorne metode kontrole kvalitete ili ispitivanje materijala bez razaranja (*Nondestructive testing* ili *Non-destructive testing* - NDT) predstavlja skup metoda temeljen na fizikalnim principima sa svrhom utvrđivanja svojstava materijala ili komponenata sustava, te otkrivanja različitih vrsta grešaka (defekata), a da se pritom ne utječe na funkcionalnost materijala koji se ispituje (ispitivani materijal ostaje neoštećen). Osnovna svrha ispitivanja bez razaranja je utvrđivanje kvalitete i usklađenosti osnovnog materijala i zavarenih spojeva sa zahtjevima tehničkih specifikacija i standarda. Ispitivanja se većinom izvode na terenu, a kontrola se može često provesti i bez zaustavljanja proizvodnje, oprema je u većini metoda prijenosna te je olakšan rad na terenu. Ponajprije se ispituje tlačna oprema, cjevovodi, noseće konstrukcije, poluproizvodi i industrijski proizvodi. Cilj je locirati i karakterizirati stanje materijala i ustanoviti eventualne nepravilnosti, odnosno locirati nepravilnost i izmjeriti neku njegovu osobinu kao na primjer veličinu, oblik i orijentaciju.

Sva se ispitivanja mogu provoditi u pojedinom koraku proizvodnje pa se govori o **Procesnom ispitivanju** (*In-process inspection*). Isto tako se može ispitati da li je proizvod spreman za upotrebu i tada se govori o **Završnom ispitivanju** (*Final inspection*). **Ispitivanje u eksploataciji** (*In-service inspection*) zapravo pokazuje da li je objekat koji se već koristi prihvatljiv za daljnju upotrebu.

Naravno da Kontrola ili ispitivanje bez razaranja ima i neke nedostatke, a to su da se svojstva objekta i kvaliteta u većini metoda mjere indirektno, tj. o kvaliteti se zaključuje na temelju postojanja ili nepostojanja pogrešaka ili odstupanja određene fizikalne veličine izvan zadanih granica. Interpretacija dobivenih rezultata često je složena te zahtjeva školovano osoblje i na kraju, pojedine metode kontrole zahtijevaju pojačanu zaštitu na radu.

Najčešće metode ispitivanja bez razaranja prema [19] su:

- Vizualna kontrola,
- Dimenzionalna kontrola,
- Penetrantsko ispitivanje,

- Magnetsko ispitivanje,
- Ispitivanje vrtložnim strujama,
- Radiografsko ispitivanje,
- Akustička emisija,
- Termografija,
- Kontrola nepropusnosti,
- Ultrazvučno ispitivanje.

2.2. Vizualna kontrola

Vizualni pregled je gotovo uvijek prva metoda ispitivanja bez razaranja. Ona se koristi prije bilo koje druge metode ispitivanja, jer je to ispitivanje relativno jeftino, ne oduzima puno vremena, a može dati vrlo korisne informacije kako o kvaliteti ispitivanog materijala npr. zavarenih spojeva, tako i o potrebi ispitivanja nekom drugom metodom. Vizualni pregled je zapravo promatranje koje može biti golim okom ili se za pomoć kod vizualnog pregleda u skućenim i nepristupačnim dijelovima konstrukcije upotrebljavaju različita pomagala. Osim led rasvjete i povećala, često se koriste boroskop kamere. To su zapravo mini USB endoskopi koji služe za vizualni pregled, ali i za snimanje slika ili videa. Kamere su vodootporne i imaju ugrađeno led svjetlo na vrhu kamere za osvjetljavanje istraživanog područja.



Slika 1. Mini USB kamera [1]



Slika 2. Vizualna kontrola pomoću boroskopa [2]

2.3. Dimenzionalna kontrola

Sljedeća po redu je dimenzionalna kontrola ili provjera, kod koje se upotrebljavaju različiti mjerni uređaji. Tako postoje naprave za mjerenje debljine materijala zavara, a mjerenje oblika i dimenzija strojnih dijelova je najpreciznije pomoću 3D mjernog uređaja koji zbog svoje točnosti mora biti smješten u posebno klimatiziranoj prostoriji.

2.4. Penetrantsko ispitivanje

Penetrantska kontrola ili ispitivanje tekućim penetrantima (*Liquid penetrant testing*) je jedna od najstarijih metoda nerazornih ispitivanja. Radi široke mogućnosti primjene i relativno niske cijene provođenja ispitivanja ova metoda ima vrlo široku primjenu. Upotrebljava se za ispitivanje metala, ali i drugih materijala, uz uvjet da su korozijski otporni prema ispitnim medijima, i da nisu suviše porozni (npr. odljevci, otkivci, zavareni spojevi, staklo, keramika itd.)

Kao glavna prednost može se izdvojiti velika osjetljivost na površinske prekidnosti uz relativno jednostavni sustav za ispitivanje, odnosno niske cijene opreme i sredstava za ispitivanja. Mogućnost primjene je neovisna o vrsti materijala, pod uvjetom da su oni kruti, anorganski i neporozni. Ispravnom primjenom metoda penetrantske

kontrole nema posljedica niti na objektu ispitivanja, niti u naknadnom procesu uporabe ispitnoga objekta ili njegovih dijelova.

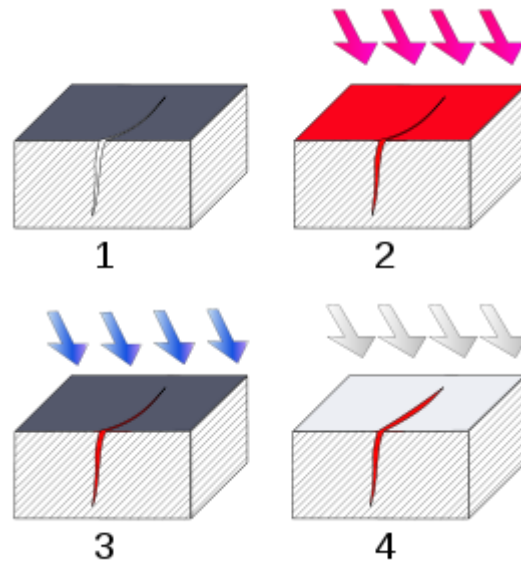
Nedostatak ove metode je ograničenost na otkrivanje samo površinskih pogrešaka i nemogućnost mjerenja dimenzija pogrešaka. Nedostatak mjerenja je lako premostiv primjenom ultrazvučnog ili magnetskog mjerača dubina pukotina, metode replike i drugih tehnika.

Ovisno o namjeni i načinu primjene penetrantski sustavi se dijele [23]:

- Prema tehnici ispitivanja:
 1. obojeni penetrantski sustav,
 2. fluorescentni penetrantski sustav,
 3. obojeno – fluorescentni penetrantski sustav,
- Prema načinu odstranjivanja penetranta s površine:
 1. vodom perivi penetranti,
 2. poslijeemulgirajući penetranti (emulgatorom odstranjivi penetranti),
 3. otapalom odstranjivi penetranti,
- Prema osjetljivosti:
 1. penetrantski sustav standardne osjetljivosti,
 2. penetrantski sustav visoke osjetljivosti,
 3. penetrantski sustav izrazito visoke osjetljivosti.

Na prethodno očišćenu i odmašćenu površinu nanosi se penetrant. Nakon penetriranja u eventualnu pukotinu (vrijeme penetriranja, tj. prodiranja u pukotine ovisi o vrsti penetranta i o dimenzijama pukotine, ali se približno uzima 10 do 15 minuta), uklanja se penetrant na odgovarajući način (vodom, suhom krpom ili otapalom). Kod penetranta koji se uklanjaju vodom treba biti pažljiv i mlaz vode usmjeriti paralelno s površinom ispitivanog uzorka, kako mlaz vode ne bi istisnuo penetrant iz pukotine. Nakon sušenja površine uzorka, nanosi se razvijač koji je obično bijele boje, koji izvlači penetrant iz pukotine, pa je na bijeloj površini uzorka lako uočljiva crvena crta od penetranta iz pukotine (slika 3). Kod tanjih uzoraka na jednu se stranu nanosi penetrant, a na drugu razvijač. Ako postoji pukotina kroz cijelu debljinu uzorka, tada će razvijač izvući penetrant na svoju stranu, što će se otkriti kao lako uočljiva crvena crta od penetranta iz pukotine na bijeloj (od razvijača)

površini uzorka. Ako se pri ispitivanju uzorka koriste fluorescentni penetranti, onda se eventualna pukotina, odnosno penetrant uočava u zamračenoj prostoriji pod UV lampom.



Slika 3. Shematski princip kontrole penetrantima [3]

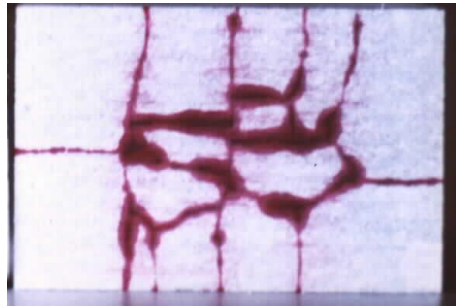
(1. Površinska pukotina, 2. Nanošenje penetranta, 3. Čišćenje penetranta, 4. Nanošenje razvijaa indikacija pukotine)

Temeljna obilježja pojedinih sredstava penetrantske kontrole prikazana su u tablici 1:

Tablica 1. Prikaz obilježja pojedinih sredstava penetrantske kontrole

Penetrant	močivost površine, visoka mogućnost prodiranja-penetracija i dobra uočljivost
Razvijaač	dobar kontrast u odnosu na penetrant, formiranje penetrantskih indikacija
Odstranjivač	kemijska prilagođenost odstranjivanju penetranta
Čistač	prilagođen materijalu ispitivanja, neagresivan prema ispitnoj površini
Emulgator	Kemijsko djelovanje na penetrant koje prethodi odstranjivanju suviška penetranta s površine

Prema [4] ispitivanje pojave pukotina uslijed brušenja (slika 4) na uzorcima materijala pokazuje da su pukotine nastale jedino na površini materijala obratka Č 4150 i to samo kod brušenja uz preveliku vrijednost proizvodnosti brušenja. Te pukotine su uočljive vizualno, promatranjem pod povećalom, a slika 4 pokazuje te pukotine ustanovljene metodom s crvenim penetrantom.

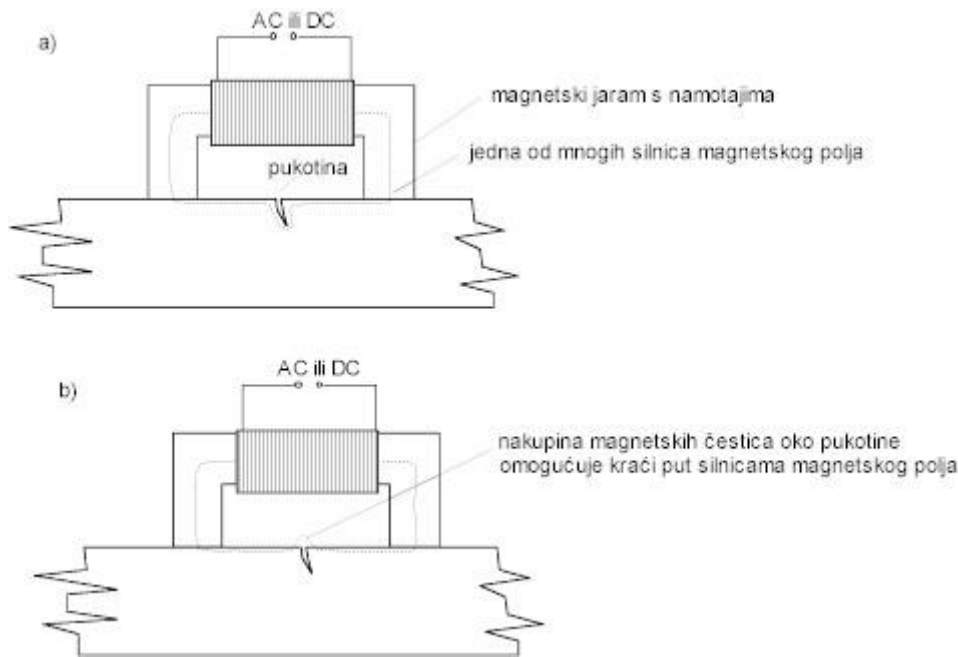


Slika 4. Pukotine na brušenom uzorku materijala Č 4150 ustanovljene metodom sa crvenim penetrantom [4]

2.5. Magnetsko ispitivanje

Magnetska metoda kontrole kvalitete koristi se za otkrivanje površinskih i podpovršinskih grešaka (približno do dubine 6 mm) kod feromagnetičnih materijala. Zasniva se na principu magnetske indukcije. Oko vodiča kroz koji prolazi električna struja (magnetski jaram, magnetske elektrode) stvara se magnetsko polje (istosmjerne ili izmjenične struje), čije silnice, po pravilu desne ruke, prolaze između ostaloga i kroz feromagnetični materijal dijela koji se ispituje, odnosno koji je u dodiru s magnetskim jarmom ili magnetskim elektrodama.

Da bi se otkrila pukotina potrebno je da smjer silnica magnetskog polja bude što više okomito na pukotinu. Pospu li se magnetske čestice (suhe sitne čestice ili čestice pomiješane s vodom) po površini ispitivanog materijala, ako postoji pukotina okomito na smjer prolaska silnica magnetskog polja, sitne čestice će se okupiti oko pukotine (slika 5).



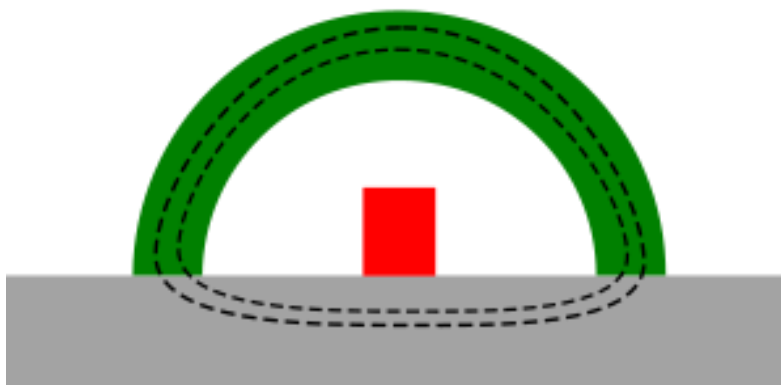
Slika 5. Prikaz magnetskog ispitivanja [5]

Magnetsku metodu se po vrstama pogrešaka koje otkriva i pripadnoj osjetljivosti, može usporediti sa penetrantskom kontrolom, te se radi toga ove dvije metode koji put nadomještaju. U slučaju zamjene penetrantske metode magnetskom treba poštivati postupak magnetske kontrole za ispitivani objekt, a ispitivanje može provoditi osoba koja ima važeći certifikat za magnetska ispitivanja.

Kada zaostali magnetizam može biti štetan po uporabu ispitnog objekta, unatoč pogodnosti zamjene metoda – to se ne smije učiniti, jer zaostali magnetizam nije uvijek moguće poništiti. To je čest slučaj pri ispitivanju zrakoplovnih dijelova, na kojima se zaostali magnetizam ne može ni odstraniti ni tolerirati.

Ova metoda ispitivanja kvalitete je jeftina i brza, ali ima ograničenje s obzirom na ne feromagnetične materijale, greške duboko ispod površine, te nemogućnost određivanja dubine pukotine koja je otkrivena kod feromagnetičnih materijala.

Barkhausenov učinak je naziv za šum u izlazu feromagneta, koji nastaje kada se mijenja magnetna sila primijenjena na njega (slika 6). Dijelovi opreme za ispitivanje su: zeleno - magnetski jaram, crveno – induktivno osjetilo, sivo – uzorak koji se ispituje.



Slika 6. Prikaz Barkhausenovog učinka [6]

2.6. Ispitivanje vrtložnim strujama

Ova metoda se koristi kada pukotine nisu vidljive vizualnim pregledom odnosno, golim okom. Ispitivanjem materijala vrtložnim strujama, moguće je pronaći postojanje pukotina na površini materijala, a postoji mogućnost pronalaženja i potpovršinskih pukotina, ako nisu na dubini većoj od nekoliko milimetara. Ova nerazorna metoda ispitivanja koristi osnovne principe elektromagnetizma za otkrivanje pukotina. Primjenjiva je samo na električni vodljivim materijalima.

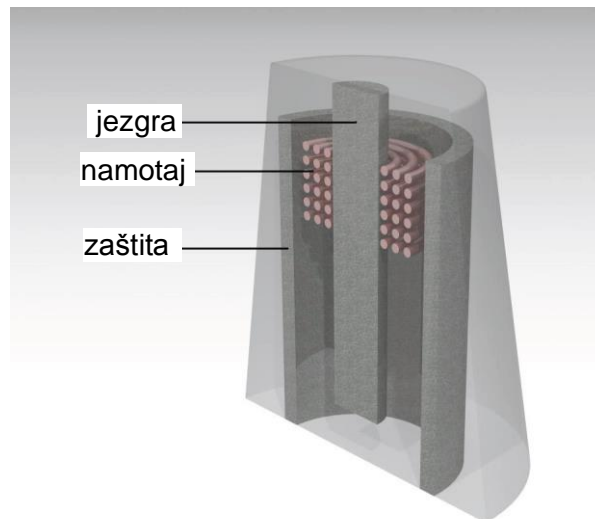
Velika joj je primjena u zrakoplovnoj industriji jer se njome mogu ispitivati aluminijske legure koje su često korišteni materijal u avionima. Naime, aluminijske legure ne mogu se ispitivati magnetskom metodom jer su nemagnetične.

Uzorci materijala se ispituju tako da se sondom polagano prelazi po materijalu i traže se eventualne nepravilnosti koje se očituju na ekranu kao odgovarajući signali.

Unutar sonde se nalazi zavojnica koja stvara magnetsko polje koje inducira vrtložne struje u materijalu uzorka (slika 7). Struje se induciraju u materijalu samo kada je sonda u dodiru s njim ili je u neposrednoj blizini materijala. Pritom uređaj mjeri koliki je otpor u zavojnici zbog induciranja struje u materijalu uzorka koji se ispituje. Signal koji upućuje na promjenu vrijednosti otpora onda znači da na materijalu uzorka ili pod njegovom površinom postoji nepravilnost ili pukotina. Do promjene vrijednosti otpora odnosno signala dolazi i ako se sonda previše udalji od površine materijala što se naziva „lift-off“ signalom.

Sonde se dijele na:

- Apsolutne sonde,
- Diferencijalne sonde,
- Reflektivne sonde,
- Hibridne sonde.



Slika 7. Poprečni presjek sonde za ispitivanje vrtložnim strujama [7]

U praksi se koriste apsolutne sonde koje imaju jednu zavojnicu pomoću koje se stvara magnetsko polje, te se tako mjeri promjena otpora u materijalu (slika 8). Diferencijalna sonda se sastoji od dvije zavojnice pri čemu se javlja razlika u otporima kada je jedna iznad nepravilnosti u materijalu uzorka, a druga iznad „zdravog“ materijala (slika 9). Kod reflektivne sonde jedna zavojnica pobuđuje materijal stvarajući vrtložne struje, a druga mjeri promjenu odziva u materijalu uzorka. Postoje i hibridne sonde koje princip rada temelje na različitim kombinacijama predhodno opisanih sondi.



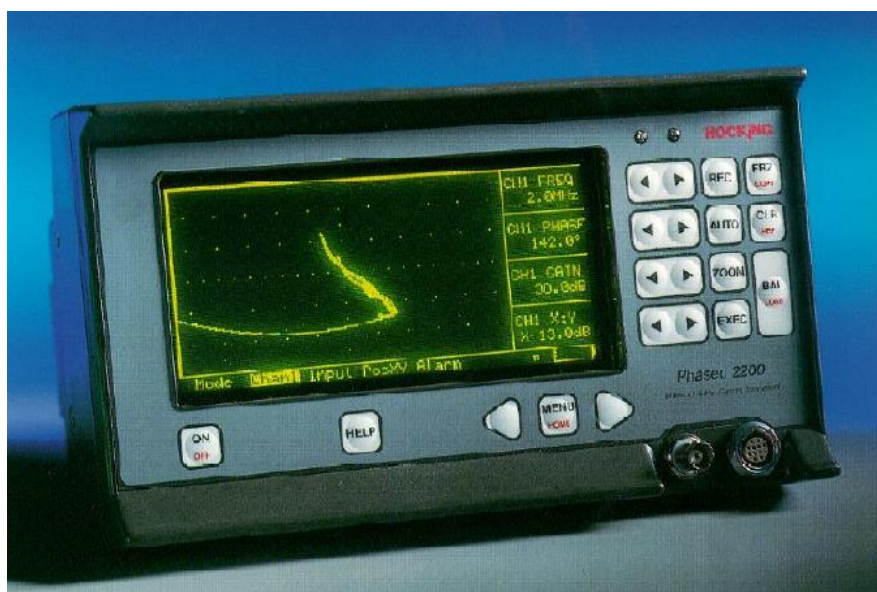
Slika 8. Apsolutna sonda za ispitivanje vrtložnim strujama



Slika 9. Diferencijalna mjerna sonda Metrix MX 9030-Z [1]

Uređaj koji se koristi kod ispitivanja materijala uzoraka vrtložnim strujama, uređaj Hocking Phasec 2200 (slika 10) ima radno područje u rasponu od 60 Hz do 6 MHz u modu rada s jednom frekvencijom i radno područje od 100 kHz do 2 MHz u modu rada s dvije frekvencije. Na zaslonu uređaja je moguće uočiti nekoliko signala. Lagano zakrivljena linija na zaslonu odnosno signal u gotovo horizontalnom smjeru prikazuje „lift-off“ signal. Taj se signal prvi pojavljuje pri podešavanju uređaja na tip ispitivanog materijala (u ovom slučaju aluminijsa), nakon podizanja sonda se vraća u dodir s materijalom što je na ekranu prikazano drugim, malo manje položenim signalom. Nepravilnost je definirana uspravnijim signalom koji se proteže od početne

točke prema gore pa se vraća u početnu točku. Uzorci se ispituju tako da se sondom polagano prelazi po materijalu i traže se nepravilnosti koje se očituju na ekranu kao signali u gotovo vertikalnom smjeru, te su zaokrenuti za 70° u odnosu na „lift-off“ signal koji je više-manje horizontalan. Prema slici se može zaključiti da se radi o pukotini, jer je signal odziva različit od „lift-off“ signala.



Slika 10. Uređaj Hocking Phasec 2200 [8]

2.7. Radiografsko ispitivanje

Radiografska kontrola je vrsta kontrole bez razaranja, koja pri kontroli kvalitete metodama prozračavanja u praksi koristi rendgenske zrake ili gama zrake. Rendgenske zrake nastaju pri naglom kočenju ubrzanog snopa elektrona na metalnoj ploči (anoda u rendgenskoj cijevi), dok gama zrake nastaju prilikom spontanog raspada nestabilnih atomskih jezgri (prirodnih radioaktivnih materijala i radioaktivnih izotopa). Oba su zračenja u biti elektromagnetska zračenja. Rendgenske i gama zrake ostavljaju trag na filmskoj emulziji (industrijske folije), na čemu se i zasniva radiografska kontrola i ispitivanje grešaka u unutrašnjosti materijala (slika 11).

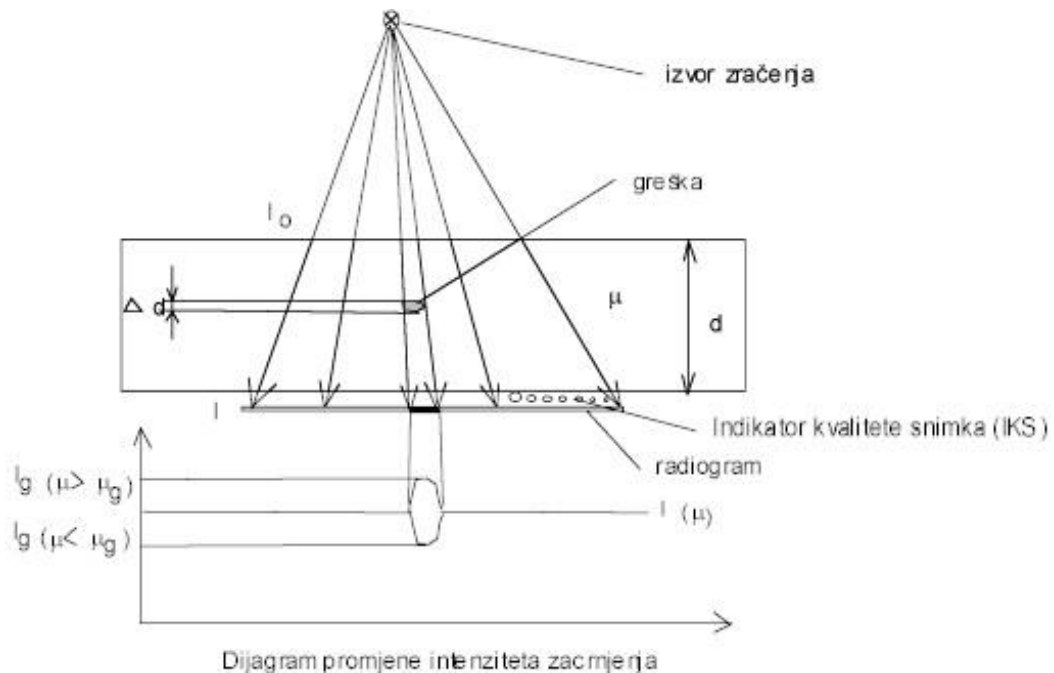
Prema [20] izvor rendgenskog zračenja je rendgenska cijev s vakuumom, priključena na visok napon do 400 kV (za prozračivanje čeličnih predmeta do 70 mm debljine). Radiografska kontrola se obično koristi za otkrivanje pogrešaka zavarenih spojeva, poroznosti, uključaka troske, neprovarenog korijena. Teško je otkrivanje plošnih pogrešaka poput pukotina (mogu se otkriti samo pukotine položene u smjeru zračenja). Ionizirajuće zračenje može uzrokovati štetne posljedice kod ljudi i ostalog živog svijeta, pa je pri radiografiji obvezatno provođenje mjera zaštite na radu s izvorima ionizirajućeg zračenja, te pri transportu i skladištenju radioaktivnih materijala.

Radiografija je vrsta kontrole bez razaranja pri kojem su metali izloženi snopu rendgenskih zraka. Razlike u debljini, gustoći, apsorpciji uzrokovanoj unutarnjim pogreškama ili inkluzijama vide se na sjenovitoj slici koja nastaje na fluorescentnom zastoru ili fotografskom filmu stavljenom iza ispitivanog uzorka. Rendgenske zrake, poznate i kao X-zrake, područje su elektromagnetskog zračenja s valnim duljinama između 10 i 0,01 nm, što približno odgovara području između ultraljubičastog i gama zračenja.

Najpoznatija njihova primjena je u dijagnostičkoj radiografiji i kristalografiji. Zbog svoje energije ubrajaju se u ionizirajuće zračenje.

Rendgenske zrake se dijele na tvrde i meke rendgenske zrake, s obzirom na mogućnost prodiranja kroz razne materijale. Meke rendgenske zrake imaju valnu

duljinu od 0,1 nm do 10 nm (0,12 do 12 keV). Tvrde rendgenske zrake imaju valnu duljinu od 0,01 nm do 0,1 nm (12 do 120 keV). Osnovna razlika između rendgenskih i gama zraka je u načinu njihovog nastajanja. Rendgenske zrake nastaju u vanjskom elektronskom omotaču atoma, dok gama zrake nastaju u jezgri atoma.

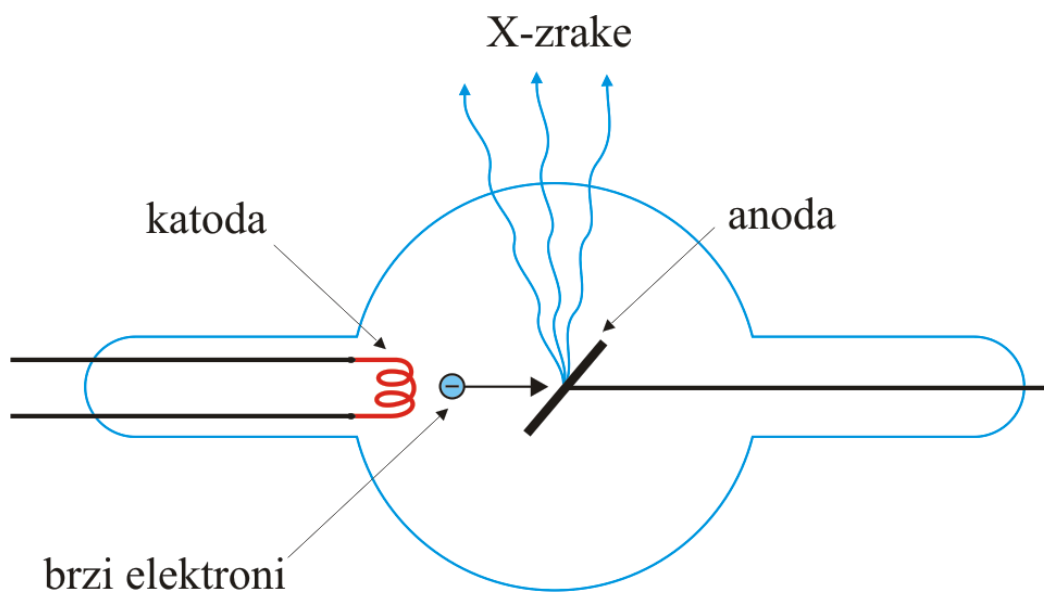


Slika 11. Shematski prikaz radiografske kontrole kvalitete [5]

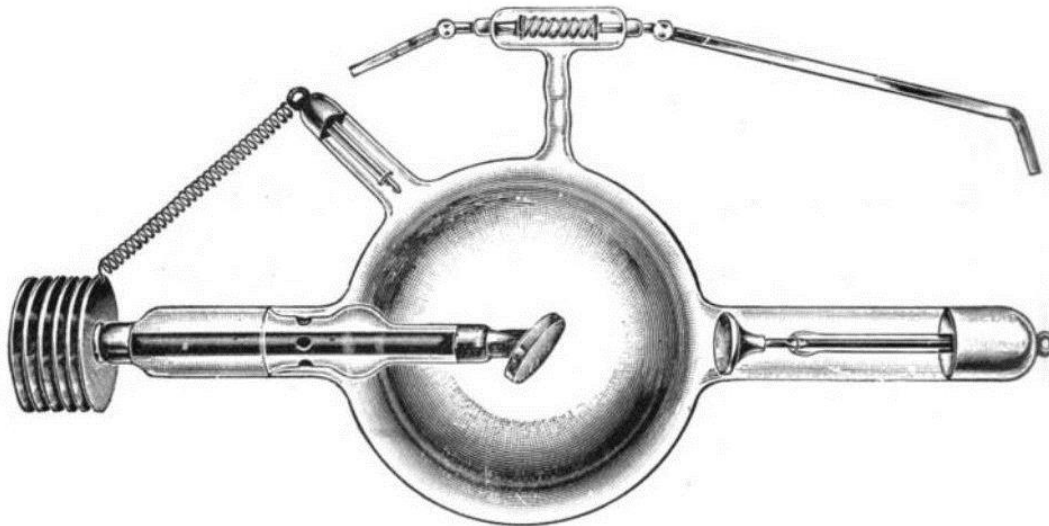


Slika 12. Prenosivi baterijski uređaj za stvaranje rendgenskih zraka [9]

Rendgenska cijev je izvor rendgenskog zračenja u današnjim rendgenskim uređajima i strojevima. Danas se upotrebljavaju rendgenske cijevi (slika 13) s užarenom katodom, koje su mnogo učinkovitije u emitiranju elektrona od hladne katode u ionskim cijevima, kao što su bile Crookesova cijev (slika 14) ili Coolidgeova cijev. 1913. je američki fizičar William David Coolidge usavršio Crookesovu cijev, uvodeći užarenu katodu. Radila je s vakuumom od 0,0001 Pa. Užarena katoda je mnogo učinkovitija u emitiranju elektrona od hladne katode u Crookesovoj cijevi. Coolidgeova cijev je radila sa snagama od 0,1 do 18 kW.



Slika 13. Rendgenska cijev [10]



Slika 14. Crookesova cijev s početka 20. stoljeća.

Katoda je na desno, anoda je u sredini s hladilom topline koje izlazi na lijevu stranu. Elektroda u kosom položaju je antik Katoda. Uređaj na vrhu služi za podešavanje tlaka plina u cijevi. [11]

2.8. Akustička emisija

Kad se čvrsti materijal izloži naprezanju, nesavršenosti unutar materijala emitiraju kratke impulse akustične energije. Kao i kod ultrazvučnog ispitivanja, i te emisije se mogu otkriti specijalnim prijamnicima. Primjenjuju se za otkrivanje izvora energije i lokaciju izvora.

Ispitivanje akustičnom emisijom (AE) je metoda nerazornog ispitivanja i pregleda za pronalaženje eventualnih grešaka i propuštanja opreme pod tlakom. Ispitivanje akustičnom emisijom daje cjelovit pregled fizikalnog stanja i gustoće ispitivane strukture.

Otkrivanje i lociranje eventualno postojećih grešaka i propuštanja vrši se uz pomoć klasičnog fizikalnog principa. Primjenjuje se u industriji zbog prednosti upotrebe današnjeg postupka snimanja i obrade podataka.

Čak su i kovači antičkog svijeta shvatili da metali emitiraju čujne zvučne valove kada su podvrgnuti opterećenju, savijanju, prešanju ili razvlačenju i izbjegavali su preopterećenje materijala. Izvor emisije zvučnih signala su greške materijala ili

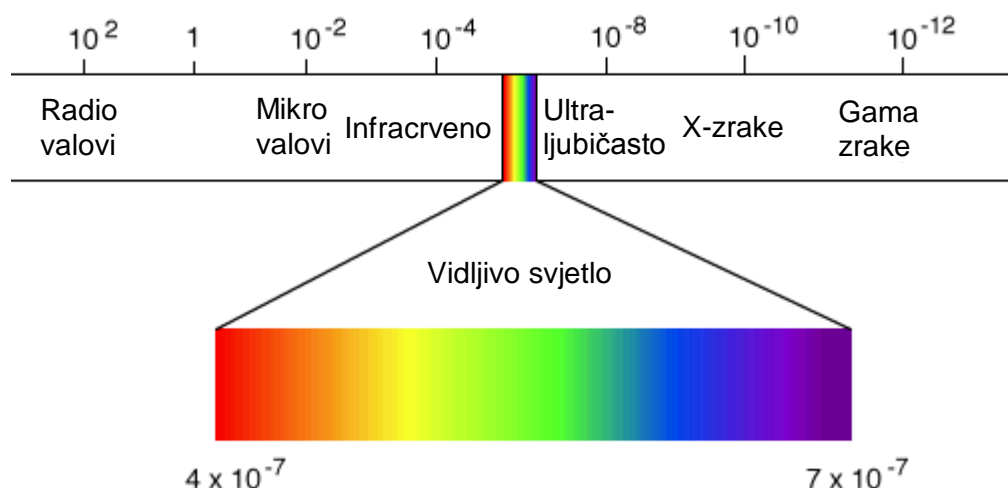
propuštanja spremnika. Kada se oslobađa akumulirana energija uzrokovana naprezanjem, oslobađanje je u obliku zvučnih impulsa. Oslobodena energija bilježi se sensorima postavljenim na površini opreme koja se ispituje.

Izvor zvuka može se locirati pomoću kronoloških mjerenja impulsa uz pomoć algoritma. Stoga je akustična emisija idealna metoda pregleda i ispitivanja za veće posude pod tlakom. Ovisno o rezultatima ispitivanja, samo pojedina odabrana područja moraju biti podvrgnuta dodatnim konvencionalnim nerazornim ispitivanjima. Jedna od najvažnijih prednosti akustične emisije je izvedivost ispitivanja opreme pod tlakom i spremnika na propuštanje i koroziju "on line", tj. tijekom rada ili kratkog zastoja. Spremnik ili cjevovod ne moraju uvijek biti isključeni iz proizvodnog procesa. U mnogim slučajevima pouzdanost informacija dobivenih ispitivanjem akustičnom emisijom veća je od rezultata ispitivanja tlakom ili vizualnih internih pregleda. Ovaj višenamjenski postupak ispitivanja spaja najveću moguću sigurnost sa optimalnom raspoloživosti proizvodnih faktora.

2.9. Termografija

IC termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela. Temelji se na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja s promatrane površine. Rezultat termografskog mjerenja je termogram, koji u sivim tonovima ili nekom kodu boja daje sliku temperaturne raspodjele na površini promatranog objekta. Temperaturna raspodjela posredno daje informaciju o različitim stanjima same površine ili je pak odraz strukture i unutrašnjeg stanja promatranog objekta.

Toplinski efekti su vezani za zračenja u području valnih duljina od 0,1 do 100 μm . Vidljivi dio spektra obuhvaća vrlo usko područje unutar područja toplinskog zračenja, tj. vidljivi je spektar dio toplinskog zračenja kojeg može registrirati ljudsko oko. Nalazi se u području valnih duljina između 0,4 do 0,7 μm . Idući u smjeru porasta valnih duljina područje se toplinskog zračenja tako može podijeliti na tri uzastopne poddomene: ultraljubičasto područje, vidljivi dio i infracrveno područje (slika 15).



Slika 15. Elektromagnetski spektar [12]

Termografski se sustav sastoji od termografske kamere (slika 16) i jedinice za obradu termograma (slika 17 i 18) - osobno računalo. U samoj kameri integrirana je IC optika, osjetnik IC zračenja, jedinica za pretvorbu električnog u video signal, monitor i kartica za pohranu podataka. Računalo služi za obradu termograma prema određenom softveru i u njega se podaci učitavaju s kartice koja se nalazi u kameri. Kako su karakteristike elektromagnetskog zračenja jednake za cijeli elektromagnetski spektar, to je optika koja se koristi u IC uređajima po obliku jednaka onoj kod fotografskih uređaja, no različita po materijalima iz kojih je napravljena.

Materijali koji se koriste za izradu leća moraju biti propusni za IC zračenje, a to su: germanij, cink sulfid, cink selenid za dugovalna IC zračenja te silikon, safir, kvarc ili magnezij za srednjevalna IC zračenja. Osjetnik u termografskoj kameri mjeri količinu energije koja pada na njegovu površinu i koja odgovara intenzitetu zračenja definiranog dijela IC spektra.

Dozračena energija na osjetnik jednaka je sumi energija koje dolaze od promatranog tijela - vlastite emisije i refleksije, energije koja prolazi kroz tijelo i energije koja dolazi od okoline.

Da bi se iz zračenja prispjelog na osjetnik kamere izračunala korektna vrijedost temperature promatranog objekta potrebno je poznavati [21]:

- svojstva površine objekta,
- temperaturu okolišnih objekata,

- udaljenost kamere od promatranog objekta,
- temperaturu,
- relativnu vlažnost zraka.

Sve te podatke potrebno je prethodno podesiti kao ulazne parametre u softveru kamere. Utjecaj zračenja iz okoliša treba svesti na minimum, osobito ako se radi o objektu koji je na temperaturi bliskoj okolišnoj, ili ima nisku vrijednost emisijskog faktora. Osim utvrđivanja temperature objekta poznatog emisijskog faktora, softver u kameri pruža i drugu mogućnost. Na temelju poznavanja temperature objekta i svih prethodno navedenih ulaznih parametara moguće je dobiti vrijednost emisijskog faktora promatrane površine. Kad se pak radi o potrebi anuliranja propusnosti, ispred objektiva kamere stavljaju se različiti filtri čija je zadaća spriječiti prolaz kroz objektiv elektromagnetskih valova onih valnih duljina za koje je promatrani objekt propustan.

Primjena termografskih kamera:

- Takvim kamerama se služi osoblje zračnih luka kako bi otkrilo potencijalno zaražene putnike, koji imaju povišenu temperaturu tijela.
- Termografsko snimanje upotrebljavaju i vatrogasci kod gašenja požara, jer tako bolje vide kroz dim, lakše pronalaze ljude i mogu detektirati i lokalizirati sam izvor vatre, jer je on najsajjniji na snimci.
- Također i tehničari koji održavaju dalekovode mogu uz pomoć termalnog snimanja bolje vidjeti pregrijavajuće spojeve i dijelove i njihovim popravkom izbjeći opasnosti.
- Na mjestima gdje je loša toplinska izolacija, građevinari mogu vidjeti termalne otiske koji upućuju na gubitke topline, a termografijom se služe i u svrhu poboljšanja efikasnosti rashladne ili toplinske klimatizacije.
- Termografske kamere su ugrađene i u neke luksuzne automobile kako bi pomagale vozaču.
- Neke fiziološke aktivnosti primjerice kod toplokrvnih životinja, a naročito reakcije kod ljudi, također mogu biti praćene termografskim kamerama, a termografija se koristi i u istraživanjima.
- Tako je prema [22], termografijom ustanovljena raspodjela temperature kod bušenja kostiju klasičnim spiralnim svrdlom.

Prednosti termografije:

- može se koristiti za mjerenja nepristupačnih i opasnih mjesta,
- prikazuje vidljivu sliku tako da se mogu usporediti temperature na velikoj površini,
- može se koristiti da se pronađu defekti u metalnim dijelovima,
- sposobna je hvatati mete u kretanju u realnom vremenu,
- može se koristiti za bolji vid u mračnim područjima.

Ograničenja i mane termografije:

- termalne kamere su skupe;
- snimke se teško interpretiraju kad se radi o objektima sa nehomogenim temperaturama;
- precizna mjerenja ometa nejednolika emisivnost i refleksije od drugih površina;
- većina kamera ima preciznost $\pm 2\%$ ili lošije, odnosno nisu precizne kao kontaktne metode;
- mogu direktno opažati samo površinsku temperaturu.



Slika 16. Termografska kamera [13]



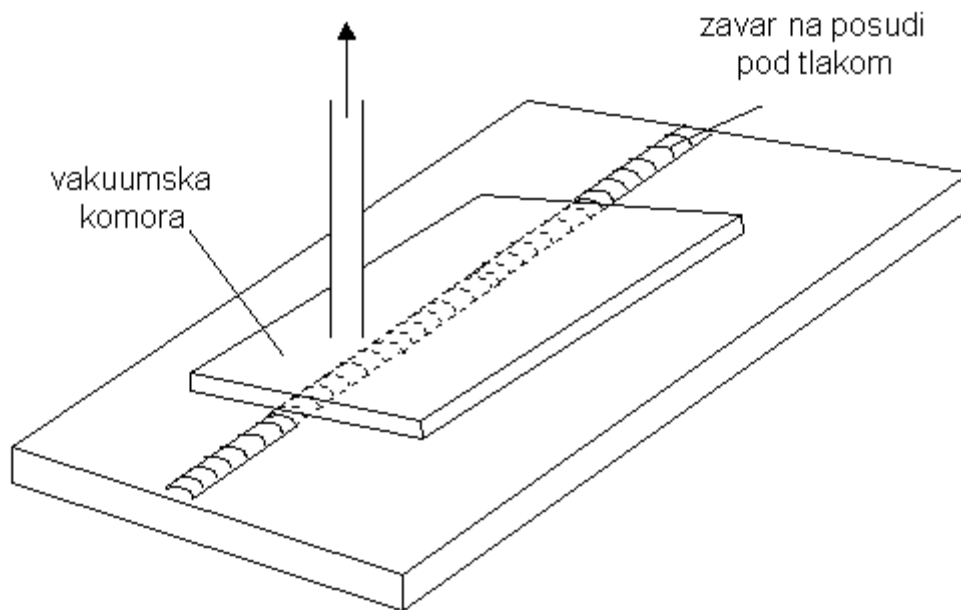
Slika 17. Primjer termograma zgrade [14]



Slika 18. Termogram lokomotive [15]

2.10. Ispitivanje nepropusnosti

Ispitivanje nepropusnosti uglavnom se provodi kod posuda pod tlakom, a ovisno o zahtijevanoj kvaliteti i primijenjenim propisima provodi se tlačenjem zraka ili vode na određenu vrijednost tlaka, ili pomoću vakuumske komore (slika 19).



Slika 19. Shematski prikaz kontrole nepropusnosti vakuumskom komorom [5]

3. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE

3.1. Stvaranje ultrazvuka

Ultrazvučna kontrola kvalitete zasniva se na svojstvu ultrazvuka da se širi kroz homogene materijale i da se odbija na granici materijala različitih akustičkih osobina (otpornosti), odnosno od nehomogenosti (grešaka) u materijalu. Od izvora ultrazvuka šire se ultrazvučni valovi kroz materijal koji se kontrolira. Ako u materijalu postoji greška, iza nje će, ovisno o vrsti greške, ultrazvučni valovi oslabiti ili se neće pojaviti (odbiju se od greške).

Izvori ultrazvuka koji se koriste u metodama nerazornih ispitivanja su sonde koje prislanjanjem na objekt ispitivanja ili uranjanjem u tekućinu prenose titranje u sredstvo s kojim su u dodiru. Unutar sonde je ugrađen aktivni dio – pretvarač. Pretvarač titranjem stvara ultrazvučne valove zbog različitih vanjskih poticaja. Činjenica da se ultrazvučni valovi mogu širiti samo u sredstvu se koristi za otkrivanje pogrešaka u ispitivanom objektu. Ultrazvučni valovi na granici sredstva kao i sve druge vrste valova slijede zakonitost valnog gibanja. Zbog toga će na granici sredstva, bilo da se radi o stijenci ispitnog objekta ili granici ispitnog materijala dolaziti do odraza ultrazvučnih valova i/ili loma, difrakcije odnosno ogiba ili druge vrste međudjelovanja sredstva i odaslane ultrazvučne energije. Pravilnom interpretacijom ultrazvučne energije dobivene prozvučivanjem ispitivanog materijala može se procijeniti stanje materijala i parametri otkrivenih nepravilnosti.

Ovisno o jakosti polja ultrazvuka bitno se razlikuje primjena. Ultrazvuk se dijeli na dvije skupine s obzirom na snagu polja [16]:

- Velike snage do 10 kW,
primjena: čišćenje, zavarivanje, medicina itd.
- Male snage 0,001 – 1 W,
primjena: kontrola i mjerenje u tehnici, medicinska dijagnostika, alarmi itd.

Ultrazvuk se može dobivati na više načina, a najčešće se koristi piezoelektrični efekt za dobivanje ultrazvučne energije. Ukoliko se materijal piezoelektričkog svojstva

izreže na odgovarajući način, najčešće u oblik tankih pločica, dobiva se tzv. aktivni materijal pretvarača koji može proizvoditi ultrazvuk ili registrirati prijem ultrazvuka.

3.2. Parametri ultrazvučne kontrole

Parametri ultrazvučne kontrole uključuju veličine koje se odnose na ultrazvučnu energiju kojom se provodi ispitivanje, ali i niz drugih fizikalnih veličina koje definiraju opremu, tehniku rada i objekt ispitivanja. Većina akustičkih veličina koje treba uzeti u obzir i/ili odabrati pri provođenju ispitivanja, a potom i pratiti, ovisna je o akustičkim svojstvima ispitnog objekta.

Osnovni parametri koji utječu na ispitivanje su [16]:

- Frekvencija ultrazvuka – izrazito utjecajni čimbenik u ispitivanju. Izravna povezanost frekvencije s osjetljivošću metode čini frekvenciju parametrom kontrole koji se mora pažljivo odabrati. Izbor frekvencije određuje duljinu ultrazvučnih valova u ispitivanom materijalu. Povećanjem frekvencije smanjuje se valna duljina.
- Brzina ultrazvuka u sredstvu – brzina vala ovisi o vrsti vala, gustoći i elastičnosti materijala u kojem se val širi, te o temperaturi i naprezanju. Ovisnosti brzine širenja ultrazvuka o temperaturi, te unutarnjem ili vanjskom naprezanju treba uzeti u obzir u onim slučajevima kada promjene brzina ultrazvučnih valova nisu zanemarive u odnosu na primijenjenu tehniku i dopuštenu mjernu netočnost.
- Impedancija sredstva – kompleksna veličina, karakteristična za sredstvo, a izravno ovisi o gustoći materijala i brzini ultrazvučnih valova u određenom materijalu.
- Zvučni tlak – fizička veličina kojom se definira djelovanje sile okomito na površinu objekta, kada u njemu postoji ultrazvučno polje. Ultrazvučni tlak je jedan od najznačajnijih parametara ultrazvučnog polja i određuje količinu energije sadržane u ultrazvučnom valu.
- Intenzitet ultrazvuka – energija koja u jedinici vremena djeluje na jediničnu površinu, okomitu na smjer snopa ultrazvuka.

3.3. Snellov zakon

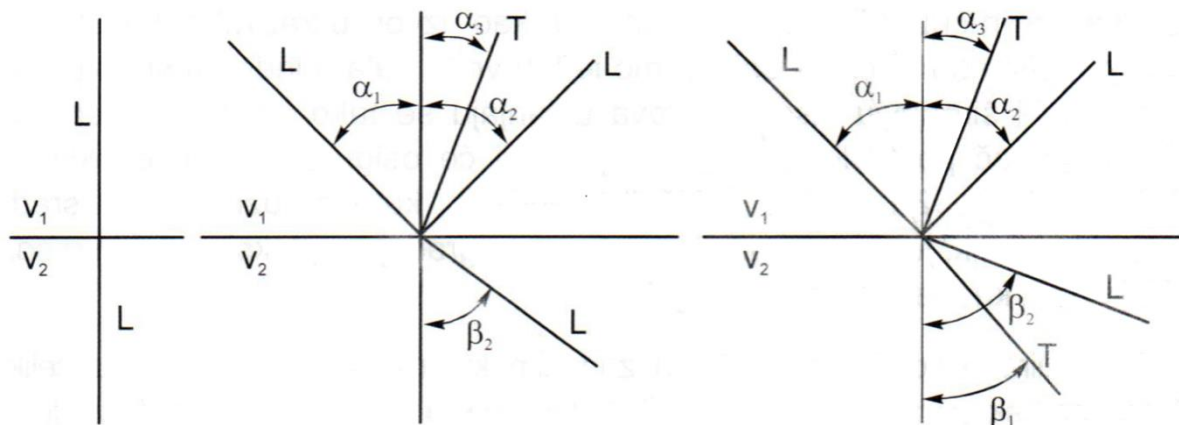
Na smjer daljnjeg širenja ultrazvučnih valova koji dolaze na granicu dvaju sredstava utječe materijal iz kojega ultrazvuk dolazi, i materijal koji graniči s prethodnim, vrsta vala koji dolazi na granicu sredstva, te kut pod kojim ultrazvučni valovi stižu na granicu sredstva. Snellovim zakonom je smjer reflektiranog i lomljenog vala određen brzinom vala u sredstvu (slika 20).

Za sve valove vrijedi Snellov zakon:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

α , β – kutovi koje val zatvara s normalom na granicu sredstva

v_1 , v_2 – brzina odgovarajućeg vala u sredstvu u kojem se širi



Slika 20. Lom i refleksija ultrazvučnih valova na granici loma [16]

Iz Snellova zakona je evidentno da će postojati upadni kut uz kojega je $\beta = 90^\circ$, kada brzina širenja vala u drugom sredstvu bude veća od brzine vala u prvom sredstvu. Upadni kut se tada naziva kritični kut, a svaki veći upadni kut dovođit će u tom slučaju do totalne refleksije. Koristeći se kritičnim kutovima moguće je ukloniti pojedine komponente i u prenesenoj ultrazvučnoj energiji.

Za ručnu ultrazvučnu kontrolu kao izvor ultrazvuka konstruiraju se i najčešće koriste sonde koje daju samo jednu vrstu vala u jednom smjeru. Druge vrste valova i širenje u više smjerova se uklanjaju tako da se pri konstrukciji sonde pretvarač postavlja u

takav smjer koji će osigurati lom i refleksiju pod kritičnim kutem. Za račun kritičnih/graničnih kutova, uzimaju se sredstva pleksistaklo i čelik, jer je ovaj prijelaz ostvaren ugradnjom pleksi - stakla u sonde, a čelik je uzet kao referentni materijal. Tako konstruirane sonde, s unaprijed zadanim kutom ulaza ultrazvuka u čelik, pri korištenju na nekom drugom materijalu koji je anizotropan (fizikalno – mehanička svojstva u različitim smjerovima su različita), neće zadržati isti nazivni kut, već se kut treba unaprijed odrediti.

Uobičajeni kutovi za koje se konstruiraju standardne kutne sonde su: 45°, 60°, 70°, 80° i površinska od 90°. Iz praktičnih razloga kutne sonde se označavaju prema kutu širenja ultrazvuka u čelik i to etalonski čelik poznate brzine širenja ultrazvučnih valova.

3.4. Oprema

Ovisno o području primjene, razlikuje se oprema za:

- otkrivanje pogrešaka i/ili procjenu stanja strukture – oprema treba omogućiti otkrivanje pogrešaka kritičnih parametara, te mjernu netočnost prihvatljivu u procjeni parametara pogreške u granicama zahtjevane točnosti,
- mjerenje fizikalnih svojstava materijala,
- mjerenje dimenzija.

Ovisno o stupnju automatizacije postoji:

- oprema za ručnu ultrazvučnu kontrolu s računalnom podrškom ili bez nje,
- poluautomatska oprema,
- automatski sustavi.

Za svako ispitivanje je potrebno odabrati odgovarajući ultrazvučni sustav. Ultrazvučni sustav se sastoji od:

- ultrazvučnog uređaja,
- ultrazvučne sonde,
- etalona i referentnih uzoraka,
- kontaktnog sredstva,
- druge pomoćne opreme.

3.4.1. Ultrazvučni uređaj

Ultrazvučni uređaj služi za aktiviranje sonde električnim impulsima, primanje elektroničkih impulsa iz sonde, i za davanje prikaza međudjelovanja ultrazvuka i objekta ispitivanja (slika 21). Jedan od osnovnih uvjeta ispravnog rada uređaja je odgovarajuće napajanje električnom energijom.

Stacionarni instrumenti se napajaju iz električne mreže 220 V i frekvencije 50 Hz u Europi, odnosno 110 V i 60 Hz u SAD-u. Uređaj je zaštićen osiguračem, koji može biti tromi (oznaka T), brzi (oznaka F) ili vrlo brzi (oznaka FF).

Osnovni dijelovi ultrazvučnog uređaja:

1. Skup elektronskih sklopova koji omogućuje napajanje, generiranje električkih impulsa, pojačavanje, sinhronizaciju i druge funkcije, koje osiguravaju korištenjeopreme na razini zahtjeva.
2. Elektronski sklopovi izlaznih jedinica, čiji je zadatak prikazati rezultate odašiljanja i prijema ultrazvuka korisniku, u prikladnom obliku za interpretaciju, a mogu dodatno sadržavati i mogućnost obrade signala.

U standardnoj tehnici frekvencija ultrazvučnog impulsa je najčešće u rasponu od 0,5 do 15 MHz. Frekvencija ultrazvučnog impulsa određena je izborom sonde.



Slika 21. Uređaj za mjerenje ultrazvuka USM Go [17]

3.4.2. Ultrazvučne sonde

Sonde su ključni dio ultrazvučnog sustava. Prilikom konstrukcije sonde u obzir se mora uzeti:

- Materijal pretvarača – ovisi o namjeni sonde.
- Konfiguracija elektroda – u većini slučajeva elektrode su izrađene od srebra
- Prigušivač i njegove značajke – prigušuje neželjene titraje s mnogo refleksija. Prigušenje je veće što su usklađenije impedancije pretvarača i prigušivača. Maksimalno prigušenje se postiže kada se izjednači akustički otpor pretvarača i prigušivača.
- Prizma i/ili maske za prijenos ultrazvuka u materijal – materijal prizme i leća je u načelu materijal u kojem je brzina ultrazvuka relativno mala npr. pleksistaklo, polistirol itd.
- Kućište
- Zaštitni elementi, maske – štite pretvarač od mehaničkog oštećenja i trošenja. Izrađuju se od polimera, također mogu biti izrađene od kvarca, keramike, čelika ili nekog drugog materijala, ukoliko se taj materijal može oblikovati u odgovarajući tanki profil, koji ima odgovarajuća svojstva za određenu namjenu. Zaštita se obično ne može ukloniti.

Kut sonde je definiran kutem između središnje osi snopa sonde i normale na kontaktnu plohu sonde. Vrijednost kuta izražava se u podacima o sondi za temperaturu od 20°C, a podaci za promjenu kuta s temperaturom daju se u intervalu od 10°C.

3.4.2.1. Vrste sondi

Uobičajena podjela sondi je prema smjeru odašiljanja i prijema ultrazvučnog snopa u odnosu na materijal ispitivanja. U posljednje vrijeme, paralelno se širenjem primjene ultrazvučne kontrole proširio se i spektar sondi različitih namjena. One se ne razlikuju samo po smjeru odašiljanja i prijema ultrazvuka, već i načinom generiranja ultrazvuka. Postoji niz sondi koje su namijenjene za poluautomatsku i automatsku kontrolu.

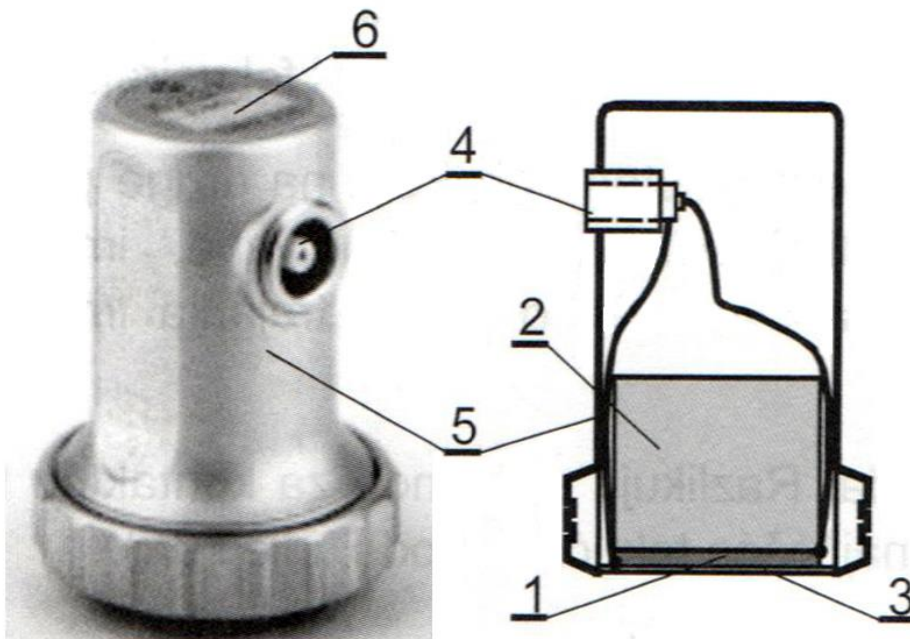
„Gruba“ podjela sonde je na tzv. standardne sonde – koriste se u ručnoj ultrazvučnoj kontroli; i na specijalne sonde kao što su npr. viševalne sonde ili višepretvaračke sonde s pretvaračem sastavljenim od više manjih koji emitiraju s kašnjenjem, na taj način pružaju mogućnost potpunijeg skeniranja objekta.

S obzirom na smjer odašiljanja ultrazvučnog snopa, standardne sonde se dijele na ravne i kutne sonde, a mogu biti izvedene kao dvostruka i fokusirajuća sonda.

Također se razlikuju sonde za kontaktnu tehniku koja kao kontaktno sredstvo najčešće koristi tekućinu (voda, ulje itd.).

Ravna sonda

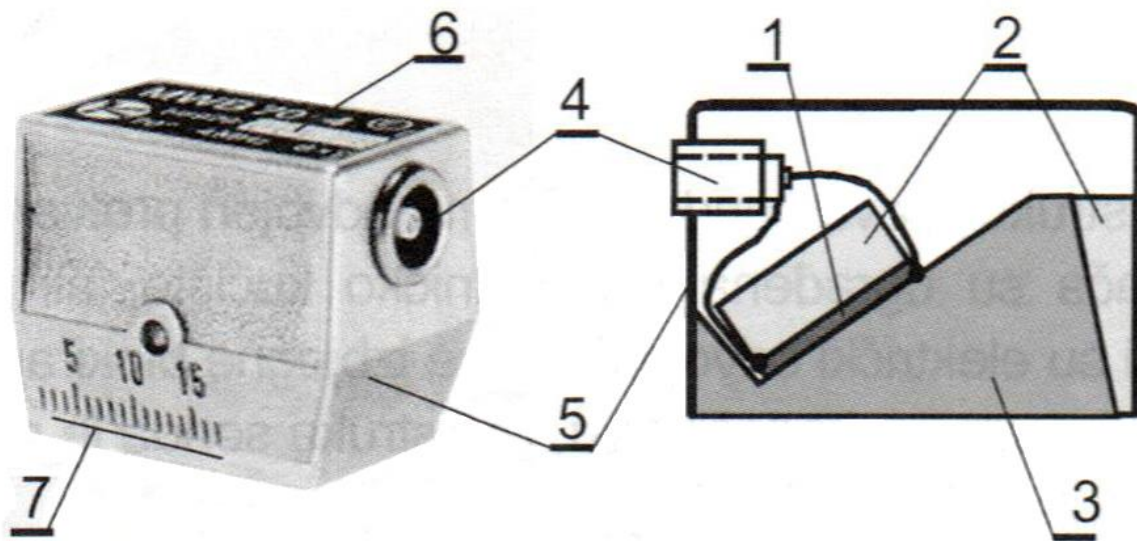
Odašilje i prima ultrazvučne valove okomito na svoju izlaznu plohu. Kut izlaza za ravne sonde je 0° (slika 22).



Slika 22. Ravna sonda i njezini dijelovi [16]
(1. Pretvarač, 2. Blok za prigušenje, 3. Zaštitna folija, 4. Priključnica, 5. Kućište, 6. Oznaka sonde)

Kutna sonda

Naziv sonde označava smjer odašiljanja i prijema ultrazvuka pod kutom prema normalni na plohu pretvarača. Najčešće se kutne sonde izrađuju s kutom ulaza ultrazvuka u etalonski čelik pod kutom od 45°, 60°, 70° i 80°. Na svakoj kutnoj sondi označena je skala za izlaznu točku koja omogućava lakše određivanje izlazne točke, odnosno mjesto na sondi gdje izvire središnja zraka ultrazvučnog snopa (slika 23).

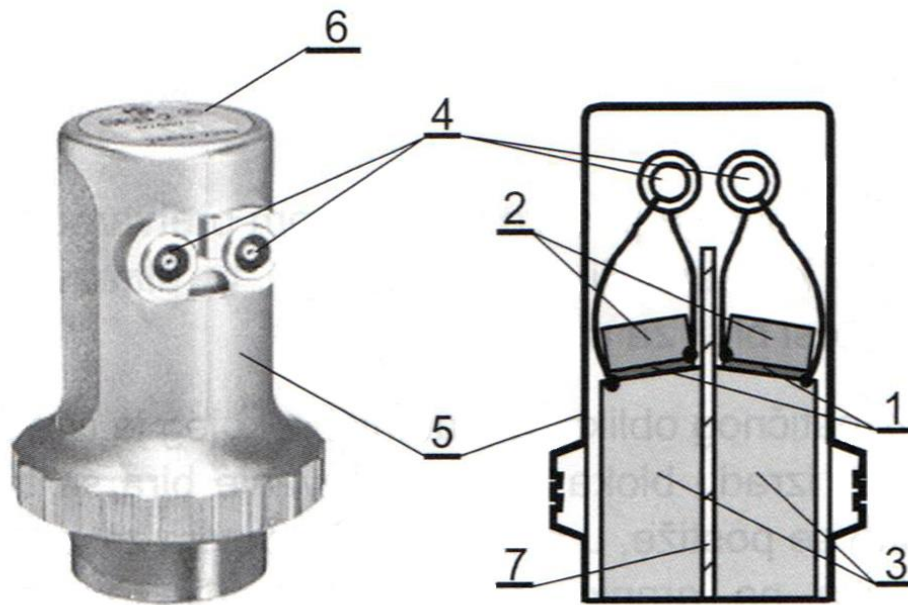


Slika 23. Kutna sonda i njezini dijelovi [16]
(1. Pretvarač, 2. Blok za prigušenje, 3. Blok za prilagodbu, 4. Priključnica, 5. Kućište, 6. Oznaka sonde, 7. Skala za izlaznu točku)

Dvostruka sonda

Sam naziv proizlazi iz konstrukcije sonde, koja ima odvojen pretvarač prijemnika i odašiljača. Oba pretvarača su ugrađena u zajedničko kućište, ali su akustički i električki izolirani. Pretvarači su električki odvojeni, da se izbjegne blokiranje pojačala visokim naponom generatora impulsa pri odašiljanju. Zbog toga je povezana dvostrukim koaksijalnim kabelom. Sonde s većim kutom nagiba će fokusirati ultrazvučni snop bliže površini, dok će manji kut nagiba osiguravati ispitivanje u većoj dubini materijala. Duljinom bloka za kašnjenje regulira se ulazak u materijal ispitivanja onog dijela ultrazvučnog snopa sonde koji je prikladan za ispitivanje. Ultrazvučni snop dvostruke sonde razlikuje se od snopa ravne sonde utoliko što nije

koristan u cijeloj duljini unutar koje ima dovoljan intenzitet. Koristan dio snopa je samo onaj unutar kojega dolazi do preklapanja odašiljačkog i prijemnog snopa dvostruke sonde. Radno područje sonde određeno je konstrukcijom sonde odnosno nagibom pretvarača, presjekom ultrazvučnog snopa pretvarača i materijalom ispitnog objekta (slika 24).



Slika 24. Dvostruka sonda i njezini dijelovi [16]
 (1. Pretvarač, 2. Blok za prigušenje, 3. Blok za kašnjenje, 4. Priključnice, 5. Kućište, 6. Oznaka sonde, 7. Akustička izolacija)

Fokusirajuća sonda

Svaka ultrazvučna sonda je donekle fokusirajuća jer je ultrazvučni snop sonde tako oblikovan da je u jednom dijelu sužen. Taj dio snopa naziva se fokus, a zvučni tlak je u fokusu do dva puta veći nego na površini sonde. Sonde koje osim takvog fokusiranja, zbog načina širenja ultrazvuka, ultrazvučni snop dodatno fokusiraju, nazivaju se fokusirajuće sonde.

Fokusanje ravne sonde se postiže:

- Pomoću leća
- Zakrivljenom plohom pretvarača
- Višepretvaračkom sondom, fazno pobuđivanom

3.4.3. Etaloni i referentni uzorci

Služe za provjeru karakteristika opreme i pripremu ultrazvučnog sustava za provođenje ispitivanja, te kao pomoć za interpretaciju oscilograma.

Etalon je izradak strogo definiranog sastava materijala, toplinske obrade, geometrijskog oblika i kvalitete površinske obrade, koji je prihvaćen dogovorom ili standardom unutar šireg skupa korisnika. Popraćeni su atestom odnosno dokumentacijom kojom mjerodavna organizacija potvrđuje deklarirana svojstva.

Referentni uzorak ili blok je naziv za izradak koji služi za podešavanje sustava za ispitivanje. Izrađuje se iz materijala ispitnog objekta ili materijala u poznatom odnosu prema ispitnom objektu. Često sadrži realne i prethodno karakterizirane pogreške ili umjetno unesene različitog oblika i veličine.

4. POSTAVKA ZADATKA

U ovome završnom radu opisane su nerazorne metode ispitivanja, s posebnim naglaskom na metodu ultrazvučnog ispitivanja. Nakon teorijskog dijela, provest će se eksperimentalni dio u kojem će biti prikazana metoda ultrazvučnog ispitivanja na čeličnim uzorcima. Samo ispitivanje će se odraditi u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

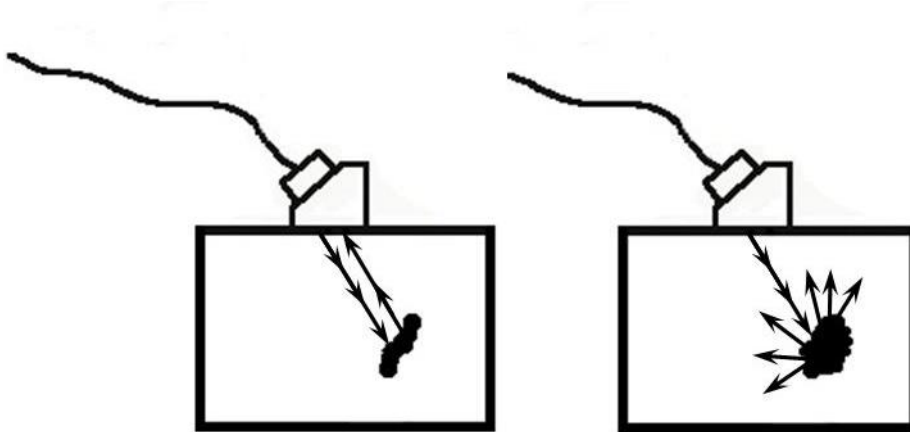
Nakon izvršenih ispitivanja slijedi prikaz i analiza rezultata, te zaključak.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Opis postupka

Ultrazvučnim ispitivanjem otkrivaju se, okom nevidljive, pukotine sakrivene unutar materijala uzorka. Obzirom da je za ultrazvučno otkrivanje pukotina, potrebno pukotinu obuhvatiti zvučnim snopom, koji se od nje mora i odbiti (slika 25), za očekivati je da će na detektabilnost određene pukotine veliki utjecaj imati njen položaj, odnosno dubina u materijalu na kojoj se nalazi, geometrija, dimenzija i sama orijentacija pukotine u uzorku.

Cilj ovog eksperimenta je ustanoviti kako se ponaša ultrazvučni odjek od pukotine u ovisnosti od njene orijentacije u uzorku, te da li je moguće predvidjeti orijentaciju pukotine na poznatoj dubini uzorka na temelju dobivenog odjeka.



Slika 25. Detektabilnost pukotine u odnosu na njenu geometriju i dimenzije

Za ovo ispitivanje su korištene sonde koherentnog zvučnog polja. Većina ispitivanja ultrazvukom se odvija pri frekvencijama između 2 MHz i 10 MHz, tako da većina sonde radi na tom frekvencijskom području.

Najčešće su izvedbe sonde koherentnog ultrazvučnog polja sa 16 do 128 elemenata, ali su moguće izvedbe i 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.

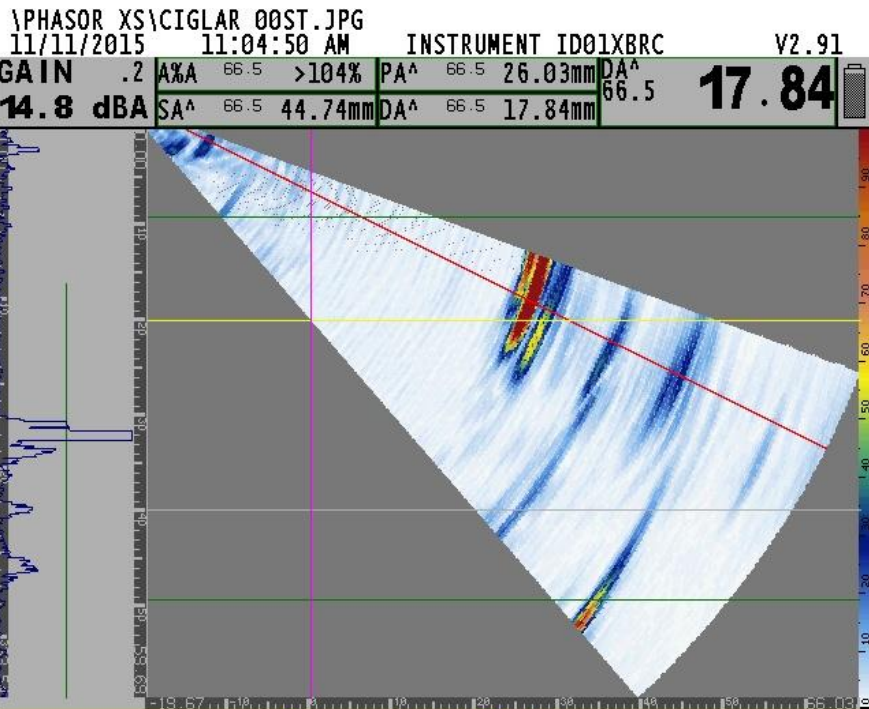
Tehnologija ispitivanja koherentnim ultrazvučnim poljem omogućava obavljanje

jednom sondom, bez mijenjanja sonde, različitih vrsta mjerenja i skeniranja. Moguće je 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. Sam naziv sonde govori o uređenom rasporedu pojedinačnih objekata.

Najjednostavnija vizualizacija ovakvog pretvornika bio bi linearni niz nekoliko konvencionalnih sondi koje su međusobno povezane u jedan sklop, čijim bi simultanim radom upravljalo računalo. Na taj se način postiže veća pokrivenost ispitivanog područja i/ili brzina samog ispitivanja.

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 odziva (slika 26). Njime se prikazuje poprečni presjek promatranog uzorka duž kutova skeniranja. Slika koja se dobije na zaslonu jest slika presjeka u realnom vremenu.

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 odziva.



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	1.3	0.00 mm	1.057 us
	MATERIAL	WAVE TYPE	VELOCITY	DISPLAY START
	CUSTOM	SHEAR	3250 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	72.0 deg	0.5 deg	
	FIRST ELEMENT	APERTURE SIZE	APERTURE STEP	NUM OF STEPS
	1	16	1	11
	ANALOG GAIN	DIGITAL GAIN	OFFLINE GAIN	REF GAIN
	14.8 dB	2.0 dB	N/A	OFF
	ANALOG DB REF	DIGITAL DB REF		
	OFF	OFF		
FILE	LAST DATASET LOADED			
	MIDI22M-45-72A			
Setup	PLSR VOLTAGE	PLSR WIDTH	PRF	FRAME RATE
	100 V	200 ns	550 Hz	8 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 INTERVAL	DISPLAY LENGTH
	ENCODED	0.0568 mm/tick	0.6816 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
	9.15 mm	40.19 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

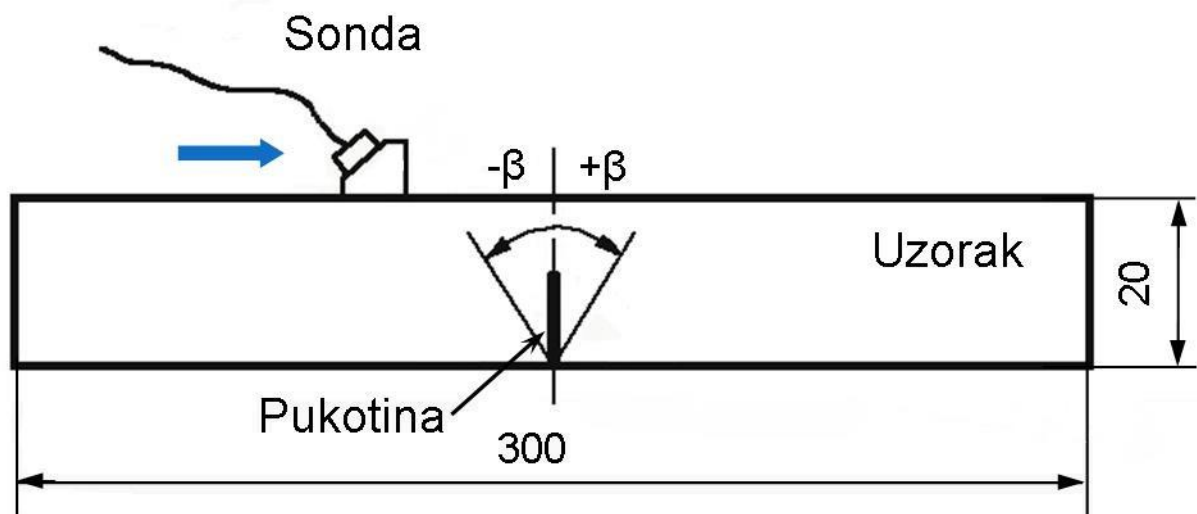
Slika 26. S – prikaz i pripadajuća tablica parametara

Za provedbu eksperimenta, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, izrađena su četiri uzorka za ispitivanje ultrazvučnom metodom (slika 27). Uzorci su od konstrukcijskog čelika, a njihove su dimenzije 300mm x 100mm x 20mm. Gornja površina uzoraka, po kojoj će kliziti ultrazvučna sonda je na svim uzorcima brušena. Elektroerozijskom obradom sa žigom je u svakom uzorku na sredini napravljena umjetna linijska pukotina. Njena dužina iznosi 50 mm, a dubina u uzorku je 5 mm. Izmjerena debljina pukotine je približno 0,3 mm.



Slika 27. Čelični uzorci

Na svakom je uzorku napravljena drugačija orijentacija linijske pukotine, a ona je označena s kutem β (slika 28). Orijetacija pukotine odnosno vrijednosti kuta β su slijedeće: $+30^\circ$, $+20^\circ$, $+10^\circ$ i 0° . Kada se prva tri uzorka s linijskim pukotinama zakrenu za 180 stupnjeva oko vertikalne osi, dobiti će se još vrijednosti kuta β koje iznose -10° , -20° i -30° . Na taj je način dobiveno sedam različitih orijentacija pukotina u uzorcima.



Slika 28. Čelični uzorak s orijentiranom pukotinom

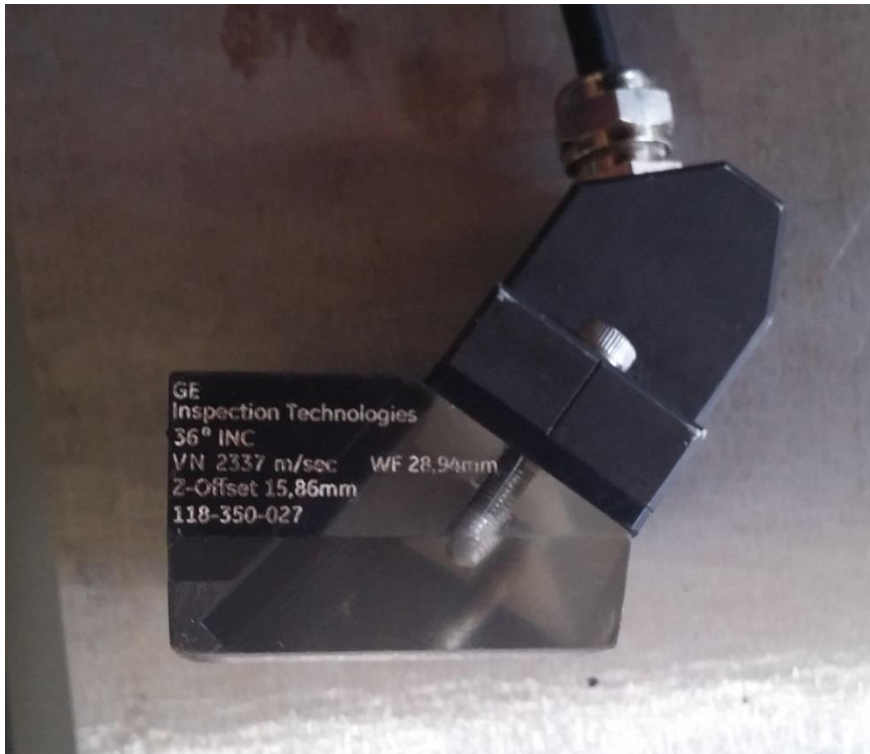
Na ovako pripremljenim uzorcima provedena je kontrola ultrazvučnim ispitivanjem. Uređaj kojim se obavljalo ispitivanje je GE Inspection Technologies Phasor XS (slika 29). Mjerenja su izvršena sondama koherentnog zvučnog polja, sonda 2,25 MHz, 16 elemenata (slike 30 i 31) i sonda 5 MHz, 64 elementa koja je korištena za provjeru (slika 32 i 33). Prednost koherentnih sondi se ovdje očituje u mogućnosti prilagodbe kuta snimanja uzorka i usporedbe rezultata. Naime, očekuje se dobiti sličan trend u dobivenim rezultatima za oba kuta snimanja, ali se također očekuje najveći ultrazvučni odziv od pukotine koja se nalazi pod kutom $\beta = 30^\circ$, iz razloga što je tako orijentirana pukotina približno okomita na upadni kut zvučnog snopa pri pregledu sondom od 60° . Smanjenjem vrijednosti toga kuta odnosno orijentacije pukotine, odziv 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. Drugo je mjerenje rađeno istom sondom, ali je kut ulaznog zvučnog snopa bio 64° . U oba se slučaja promatra pojačanje pri kojemu amplituda odziva iznosi 80% visine ekrana.



Slika 29. Uređaj za ispitivanje GE Inspection Technologies Phasor XS



Slika 30. Sonda 2,25 MHz, 16 elemenata



Slika 31. Sonda 2,25 MHz, 16 elemenata

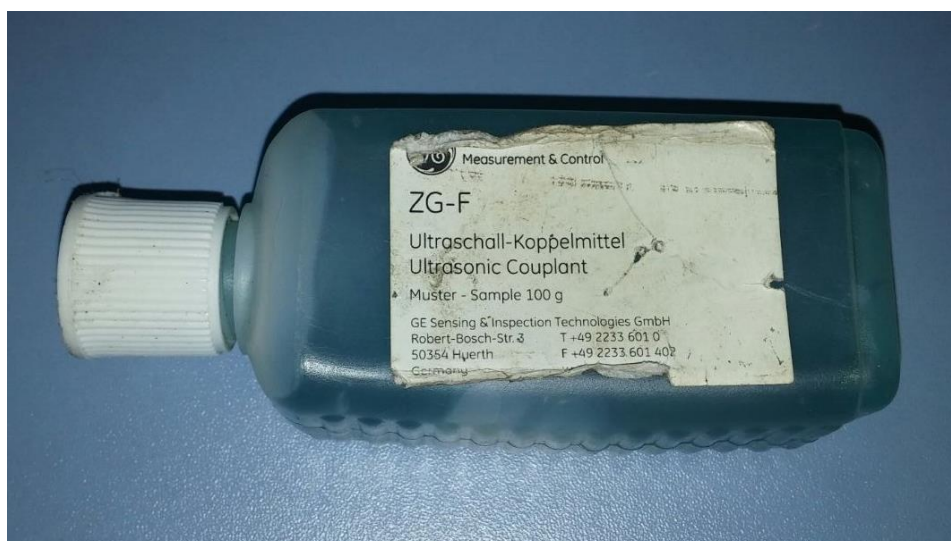


Slika 32. Sonda 5 MHz, 64 elementa



Slika 33. Sonda 5 MHz, 64 elementa

Za ostvarivanje kontakta između sonde za ispitivanje ultrazvukom i metalne podloge uzoraka, korišteno je gel sredstvo opće primjene (slika 34). Sam gel je periv s vodom, nekapajući je i mirovanjem se zgušnjava, a miješanjem opet postaje tekuć (tikotropan je).



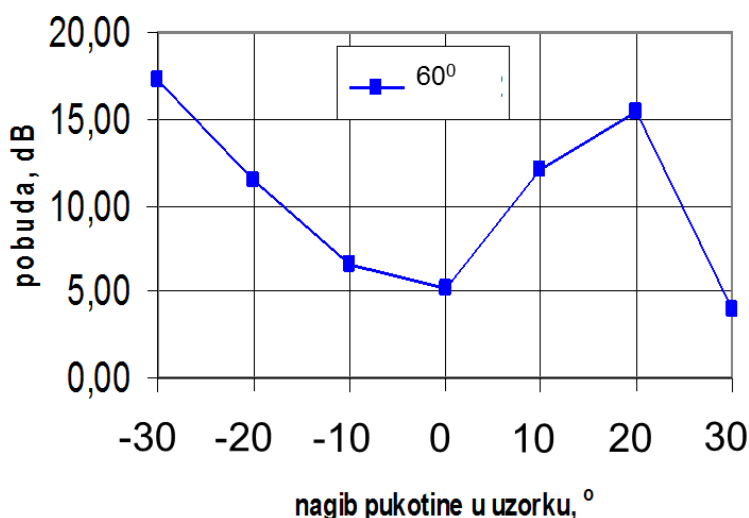
Slika 34. Kontaktni gel

5.2. Rezultati eksperimenta

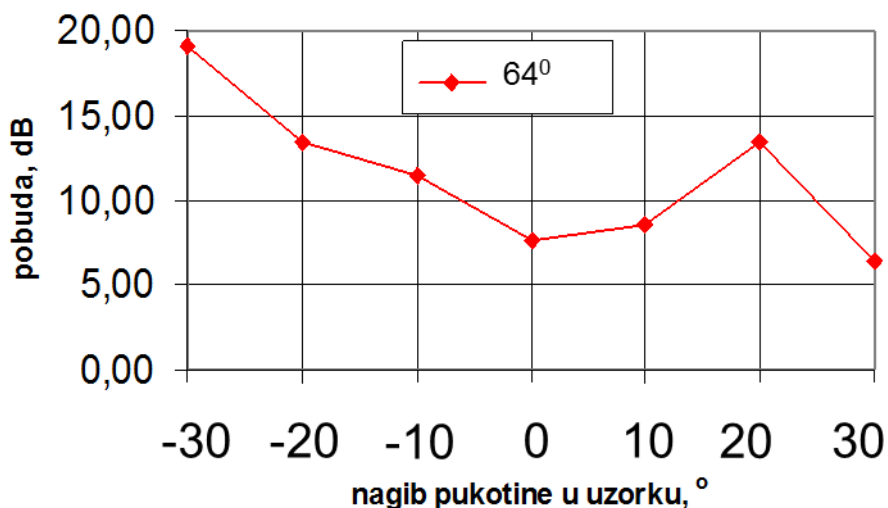
Rezultati mjerenja za kutove 60° i 64° iz Tablice 2 su također prikazani i dijagramski na slikama 35 i 36. Zbog bolje preglednosti rezultati iz Tablice 2 su zajednički prikazani na slici 37. Na vertikalnoj osi je prikazana pobuda u decibelima pri kojoj je amplituda primljenog signala iznosila 80% visine ekrana. To je amplituda signala pri kojoj se smatra da je signal pukotine jasan i nedvosmislen, tj. vrijednost pobude predstavlja pojačanje koje je bilo potrebno dodati kako bi amplituda signala reflektiranog od pukotine dosegla vrijednost 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.

Tablica 2. Rezultati mjerenja kod uzoraka

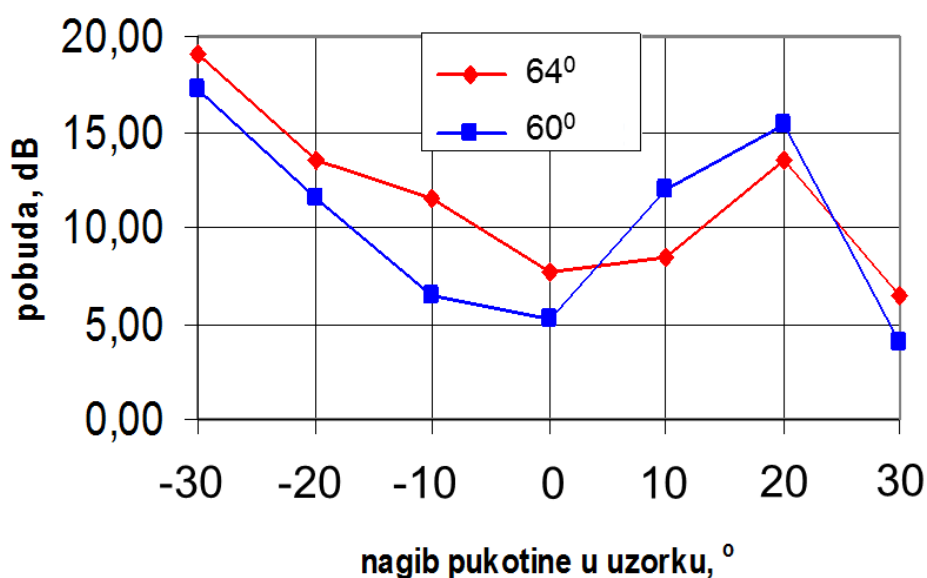
	Nagib pukotine u uzorku β						
	-30°	-20°	-10°	0°	$+10^\circ$	$+20^\circ$	$+30^\circ$
Pobuda uz kut zvučnog snopa 60° , dB	17,2	11,6	6,6	5,2	12	15,4	4
Pobuda uz kut zvučnog snopa 64° , dB	19	13,4	11,4	7,8	8,6	13,4	6,4



Slika 35. Dijagramski prikaz rezultata mjerenja za 60°



Slika 36. Dijagramski prikaz rezultata mjerenja za 64°



Slika 37. Zajednički dijagramski prikaz vrijednosti pobude za kutove zvučnog snopa 60° i 64°

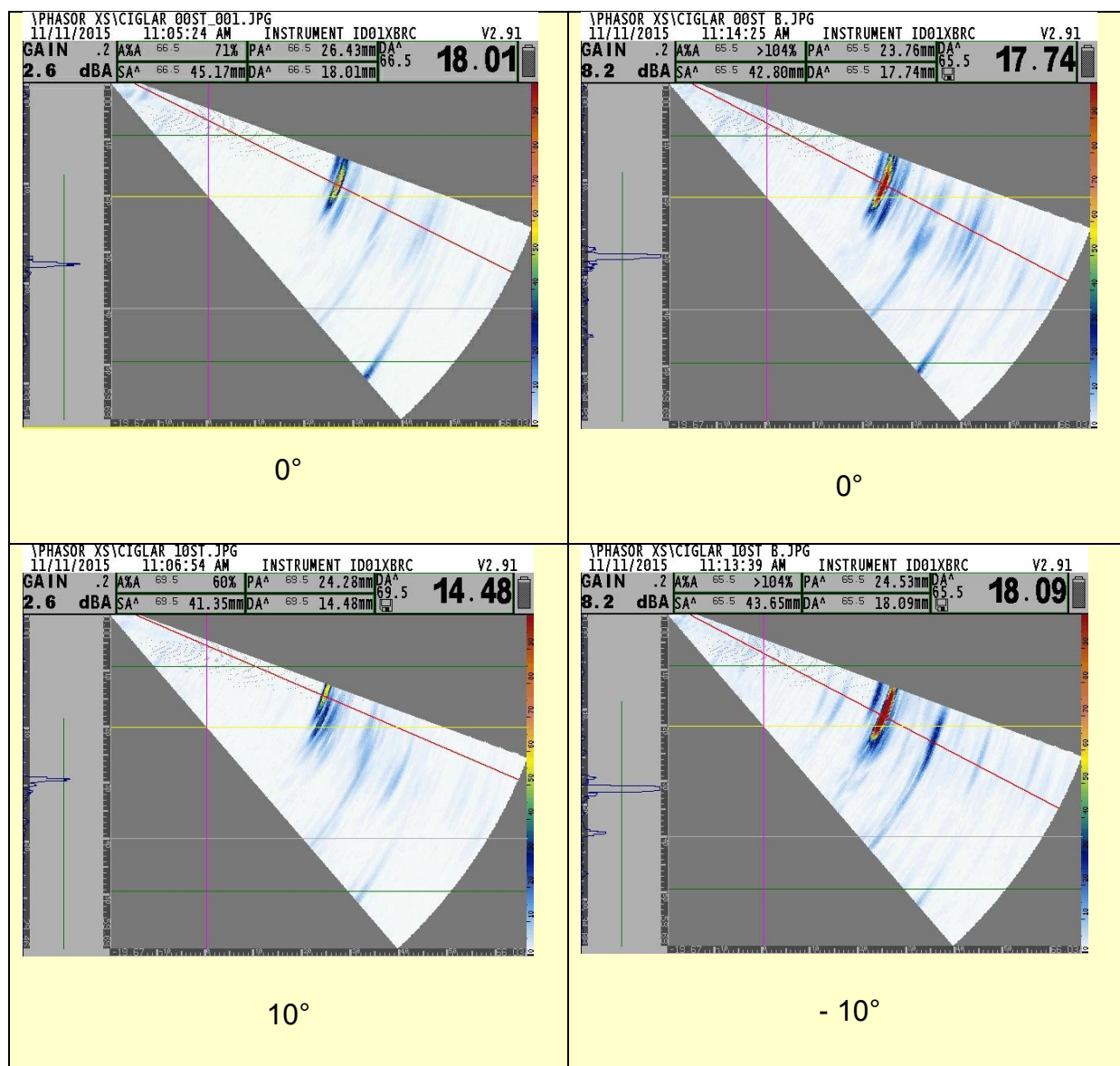
Sa slike 37 je vidljivo da prilikom ispitivanja sondom 2,25 MHz, 16 elemenata, u istom položaju, ali uz dvije različite vrijednosti kuta zvučnog snopa 60° i 64°, postoji razlika u vrijednosti pobude za različite nagibe pukotine u uzorku. Do toga dolazi uslijed refleksije ultrazvučnog snopa i puta koji emitirani ultrazvuk mora prijeći kako bi

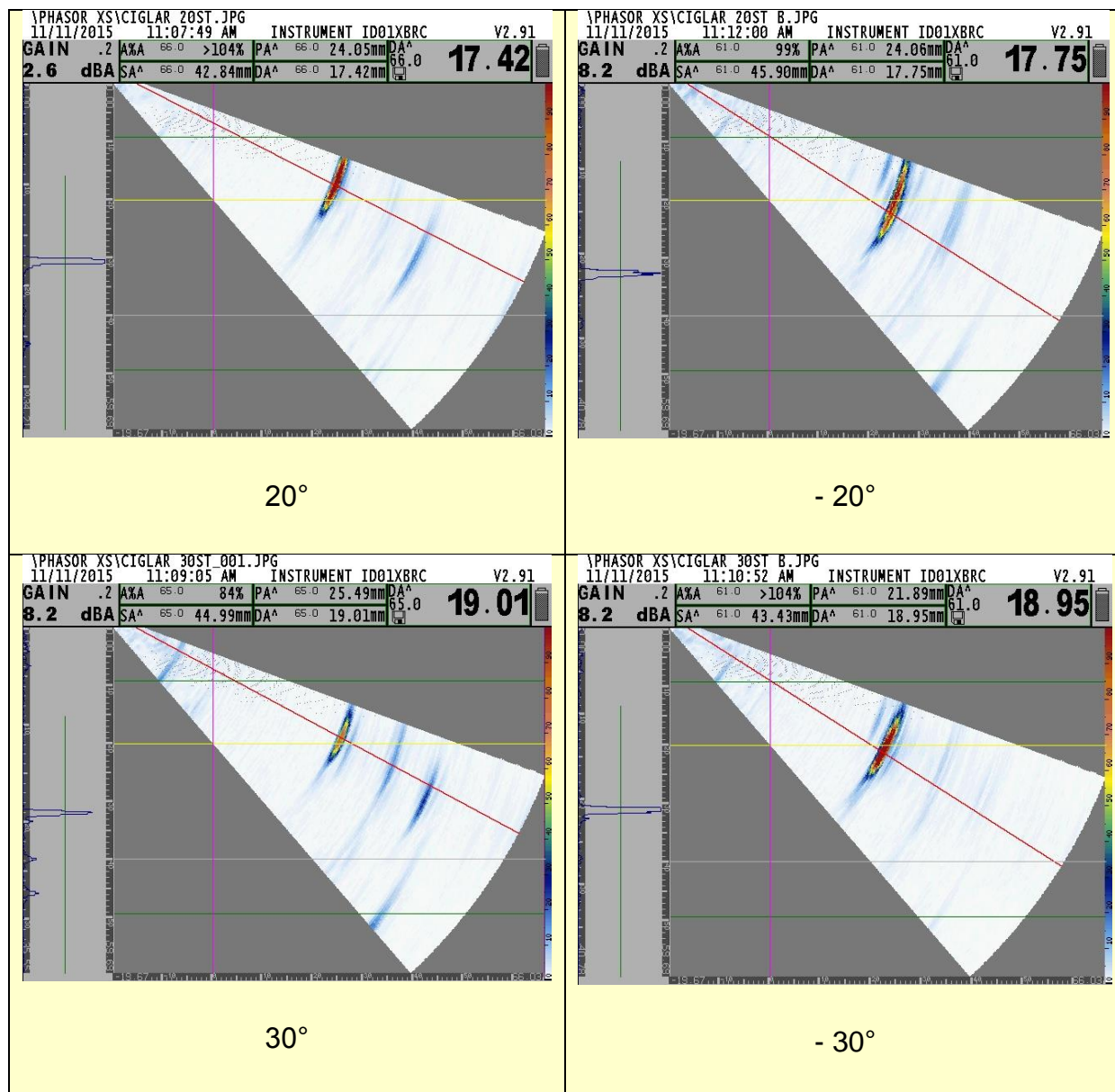
se reflektirani signal vratio i bio zabilježen u sondi.

5.3. S – prikazi mjerenja i analiza

U Tablici 3 su napravljeni S – prikazi mjerenja pukotina sondom 2,25 MHz, 16 elemenata za 60°. Za vrijednosti kutova +10°, +20° i +30°, -30°, -20°, -10° i 0°. 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.

Tablica 3. S – prikazi mjerenja



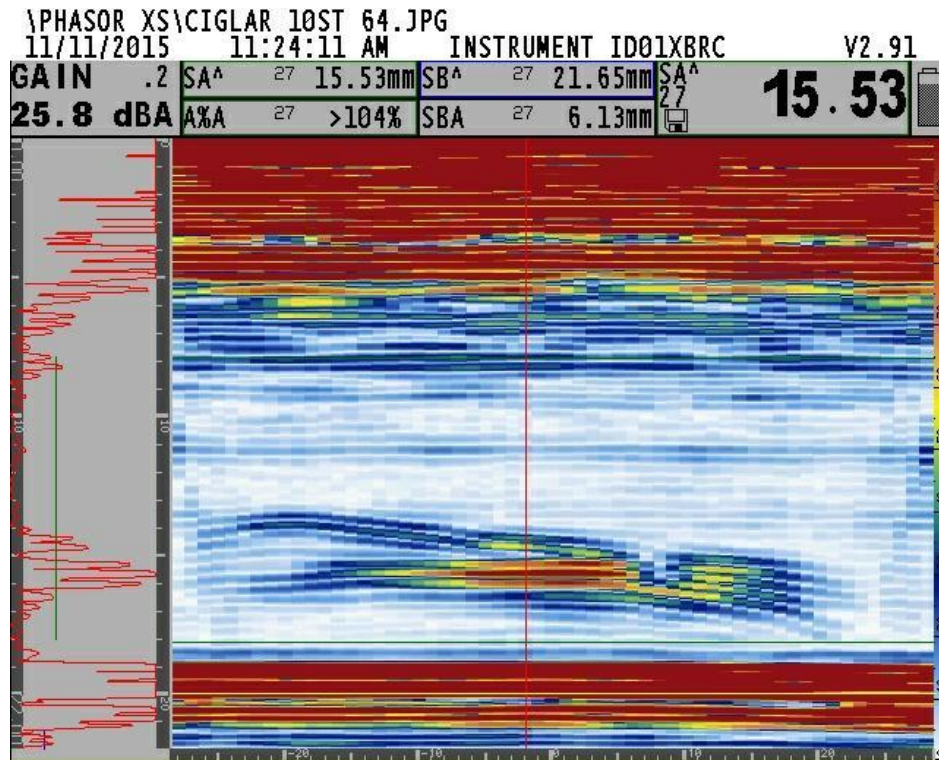


Napravljena su i kontrolna ispitivanja uzoraka sa ravnom sondom. Korištena je koherentna sonda 5 MHz, 64 elementa. Iz prikaza je moguće primijetiti kako nisu svi utori idealnog oblika, kako je već i pretpostavljeno iz rezultata ispitivanja sa sondom 2,25 MHz, 16 elemenata.

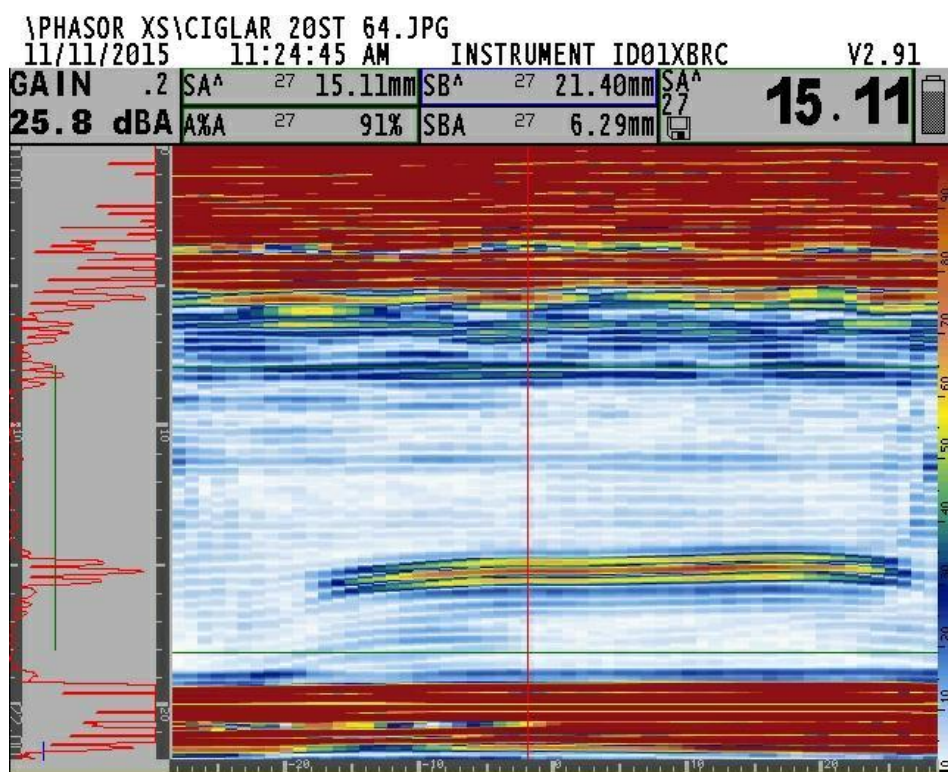
Kod uzorka sa indikacijom od 10° nepravilnosti u izradi su izražene. Odziv od indikacije bi u ovom pogledu trebao biti jednoličan po cijeloj dužini indikacije, međutim, očito je kako ovdje to nije slučaj (slika 38).

Na prikazu uzorka sa indikacijom pod kutom od 20° je moguće očitati konstantni odziv cijelom dužinom indikacije. Grupiranje rezultata ispitivanja na pozicijama kuta indikacije od 20° na dijagramu to i potvrđuje (slika 39).

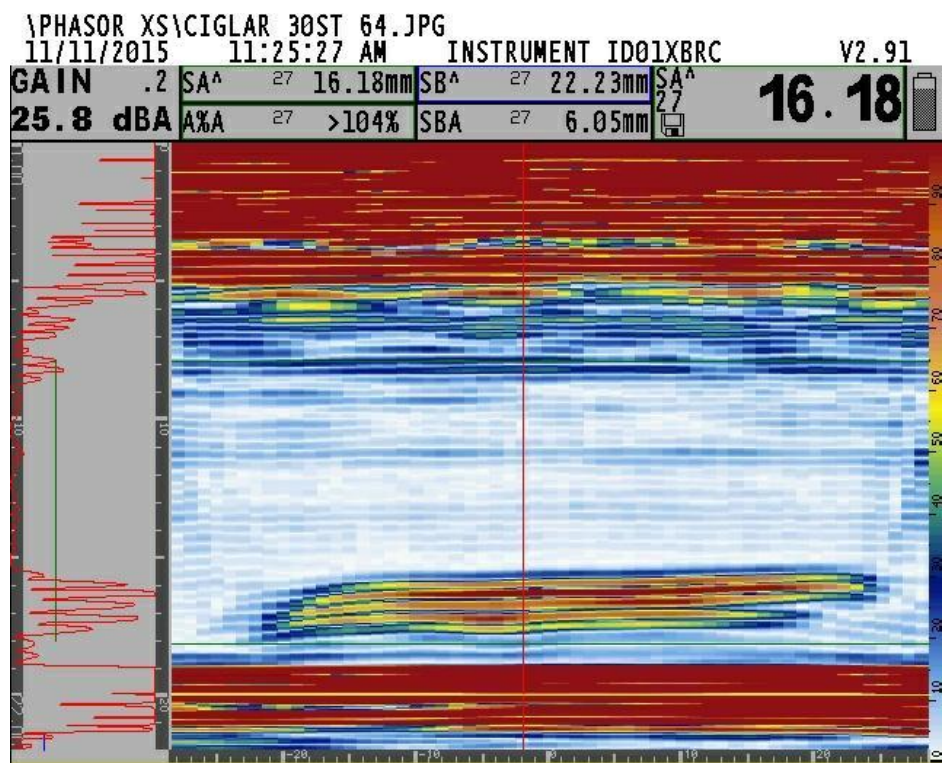
Odziv od indikacije koja je pod kutom od 30° je većinom konstantan, moguće je primijetiti nepravilnost kod ruba (slika 40).



Slika 38. Nepravilnost uzorka s indikacijom od 10°



Slika 39. Nepravilnost uzorka s indikacijom od 20°



Slika 40. Nepravilnost uzorka s indikacijom od 30°

6. ZAKLJUČAK

Iz S-prikaza je vrlo jasno vidljivo postojanje indikacije, no moguće je da se sa konvencionalnom sondom za ispitivanje ultrazvukom, iz tog položaja ne bi mogla uspješno detektirati, što je dobar pokazatelj prednosti uređaja za ispitivanje koherentnim ultrazvučnim poljem. Uređaj pruža veliku slobodu i mogućnosti prikaza i obrade podataka kakva nije moguća uz konvencionalne metode ispitivanja ultrazvukom, a glavne su prednosti veća brzina provođenja ispitivanja, veća pouzdanost te jednostavnije arhiviranje i kasnija obrada rezultata ispitivanja.

Na temelju ispitivanja četiri uzorka na kojima su namjerno napravljene pukotine različitih orijentacija, uspjelo se ustanoviti da se orijentacija pukotine na uzorcima odražava na rezultate mjerenja. Korištena je koherentna sonda koja ne zahtijeva pomicanje duž uzorka, što smanjuje mogućnost utjecaja na mjerenje. Ispitivanje i pozicioniranje sonde se vršilo ručno, ali su rezultati pokazali da već i minimalni pomak ili zakret sonde prilikom mjerenja može imati znatan utjecaj na rezultat mjerenja. S obzirom da je ispitivanje rađeno s frekvencijom 2,25 MHz, u daljnjem radu bi se moglo ispitati ponašanje odziva od pukotine pri višim i nižim frekvencijama. Također bi bilo zanimljivo ponoviti ispitivanje u istim uvjetima, ali sa konvencionalnim ultrazvučnim ispitivanjima i usporediti dobivene podatke.

LITERATURA

- [1] www.conrad.hr, pristupila 13.11.2015
- [2] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Boroskop#/media/File:BorescopeApplication.png>, pristupila 13.11.2015.
- [3] https://hr.wikipedia.org/wiki/Kontrola_bez_razaranja, pristupila 13.11.2015.
- [4] Ciglar, D., "Doprinos istraživanju graničnih uvjeta brušenja", doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1999.
- [5] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/kbr_met.html, pristupila 13.11.2015.
- [6] https://hr.wikipedia.org/wiki/Kontrola_bez_razaranja, pristupila 13.11.2015.
- [7] ANDERS ROSELL, Finite Element Modelling of Eddy Current Non- Destructive Evaluation in Probability of Detection Studies, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2012
- [8] <https://www.yumpu.com/en/document/view/36461999/phasec-2200/3>, pristupila 13.11.2015.
- [9] https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska_kontrola, pristupila 13.11.2015.
- [10] http://glossary.periodni.com/preuzimanje_slike.php?name=rendgenska_cijev.png&source=rendgenska+cijev, pristupila 13.11.2015.
- [11] https://hr.wikipedia.org/wiki/Rendgenska_cijev#/media/File:Cosser_Crookes_xray_tube.jpg, pristupila 13.11.2015.
- [12] https://www.google.hr/search?q=elektromagnetski+spektar&espv=2&biw=1920&bih=947&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjYnLR7LPJAhVDiSwKHeL5DXMQ_AUIBigB#imgdii=JSZOKgslcL8RIM%3A%3BJSZOKgslcL8RIM%3A%3BQiwK8BDqy8-S-M%3A&imgrc=JSZOKgslcL8RIM%3A, pristupila 13.11.2015.
- [13] https://www.google.hr/search?q=termografski+ure%C4%91aj&espv=2&biw=1920&bih=947&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjnta2h7rPJAhWFFywKHRFACrPJ_AUIBigB#imgrc=qmcwwRn-xtpEgM%3A, pristupila 13.11.2015.
- [14] https://www.google.hr/search?q=termogram+parnog+postrojenja&biw=1920&bih=947&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiAk8rP7LXJAhVBjSwKHfZWB_8Q_AUIBigB#tbm=isch&q=termogram+zgrade&imgrc=CxLkCIWSI5qYEM%3A, pristupila 13.11.2015.
- [15] <https://www.google.hr/search?q=termogram+parnog+postrojenja&biw=1920&>

bih=947&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiAk8rP7LXJAhVBJSwKHfZW
B_8Q_AUIBigB#tbm=isch&q=termogram+lokomotive&imgsrc=GNAifPy1Se2O9M%3A
, pristupila 13.11.2015.

[16] Vjera Krstelj, Ultrazvučna kontrola odabrana poglavlja, ZAGREB, 2003.

[17] http://marjan.fesb.hr/kk/lab_hr.html, pristupila 13.11.2015.

[18] HRN EN ISO 9000:2008 Sustavi upravljanja kvalitetom - Temeljna načela i terminološki rječnik

[19] dr.sc. D. Markučić, Metode nerazornih ispitivanja: podloge za predavanja; FSB, 2003.

[20] Kontrola kvalitete nakon zavarivanja" Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, ftp://161.53.116.242/Predavanja_vjezbe_programi_rokovi/Zavarivanje, 2012. radiografija

[21] INFRACRVENA TERMOGRAFIJA STUDIJ: DODIPLOMSKI STUDIJ KOLEGIJ: Laboratorijski rad USTANOVA: FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE SVEUČILIŠTA U ZAGREBU Pripremili: Prof.dr.sc. Srećko Švaić, dipl.ing. Doc.dr.sc. Ivanka Boras, dipl.ing. Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu

[22] Udiljak, T., Ciglar, D. & Mihoci, K., Bone Drilling Temperature, 3rd International Conference, Business Systems Management - UPS - 2004, Mostar, BiH, september 23-24, 2004. ISBN 3-901509-24-0, pp.259-262

[23] Vjera Krstelj, Ana Lypolt, Penetrantska kontrola, ZAGREB, 2005.