

# Ispitivanje materijala metodama bez razaranja

---

**Sladonja, Robert**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*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:128:037075>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-22**



**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 REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

ROBERT SLADONJA

**ISPITIVANJE MATERIJALA METODAMA  
BEZ RAZARANJA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

ROBERT SLADONJA

**ISPITIVANJE MATERIJALA METODAMA  
BEZ RAZARANJA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Tomislav Božić, dipl.ing.stroj.

KARLOVAC, 2016.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## **VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

Stručni studij: STROJARSTVO

Usmjerenje: PROIZVODNO STROJARSTVO

Karlovac, 2016-03-11

### **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Student: Robert Sladonja

Matični broj: 0110611085

Naslov: Ispitivanje materijala metodama bez razaranja

Opis zadatka: U završnom radu opisati metode ispitivanja materijala bez razaranja:

U teoretskom dijelu rada opisati navedene metode s opisom postupaka i primjenom u praksi

- \*Ispitivanje magnetnim prahom
- \*Ispitivanje penetrantskim tekućinama
- \*Ispitivanje UZ-om

U praktičnom dijelu rada na primjeru radijalno-aksijalnog vodećeg kliznog ležaja u tehnološkoj kompoziciji opisati metode primjenjenih ispitivanja, zahtjeve za kontrolu kvalitete i prihvatljive kriterije prema važećim standardima i uvjetima za konkretan strojni dio. Međufaznim i završnom kontrolom utvrditi stanje ležaja, kao i korektivne aktivnosti za dovođenje kliznog ležaja u granice prihvatljive zadanim opsegom i kriterijima kvalitete.

Zadatak zadan:  
2016-03-11

Rok predaje rada:  
2016-04-08

Predviđeni datum obrane:  
2016-04-14

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **IZJAVA :**

Izjavljujem da sam ja, Robert Sladonja, student, OIB: 98060730615, matični broj: 0110611085, upisan kao apsolvant akademske godine 2015./2016., izradio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja i navedenom literaturom, pod vodstvom i uz stručnu pomoć mentora Tomislava Božića, dipl.ing.stroj., kojemu se ovim putem zahvaljujem. Jednako tako, zahvaljujem se Novoj Tvornici Kliznih Ležajeva d.o.o. iz Duge Rese koja mi je omogućila pisanje eksperimentalnog dijela, a posebno Nikoli Ivšiću, ing.stroj. na pruženoj pomoći.

Također, zahvaljujem se i svojoj obitelji na svojoj pruženoj moralnoj i materijalnoj pomoći tijekom studiranja.

Robert Sladonja

---

## SAŽETAK

Ispitivanje materijala bez razaranja je skupina metoda koje su već dugo vremena veoma rasprostranjene i poželjne jer se temelje na činjenici da ne ostavljaju posljedice na materijal koji se ispituje, a samim time ne stvaraju ni nepotrebne troškove pri istraživanju, izradi i ispitivanju proizvoda.

Začeci takvog ispitivanja u industriji sežu još u polovicu 19. stoljeća kad se uvidjela nužnost za ispitivanje dijelova u industriji čiji kvar predstavlja veliku opasnost za ljude i njihove živote, strojne dijelove, strojeve, te značajni financijski gubitak. Presudnim otkrićima na polju fizike tijekom 19. i prve polovice 20. stoljeća, stvorili su se uvjeti za razvoj navedenih metoda i njihovo profiliranje čime su postale nezamjenjive u svim oblicima strojarske djelatnosti, kao i u elektrotehnici, građevini, medicini, aeronautici, naftnoj industriji i prometu. Daljnjim razvojem tehnologije, automatizacije, robotizacije i u posljednjim desetljećima informatizacije, ove se metode konstantno usavršavaju do današnjih dana.

U ovom je radu naglasak stavljen na tri najrasprostranjenije metode ispitivanja materijala bez razaranja; ispitivanje magnetnim česticama, ispitivanje tekućim penetrantima i ispitivanje ultrazvukom. Opisan je način na koji se navedene metode koriste, njihovi fizikalni temelji, oprema koja se u njima koristi te primjena metoda u praksi na primjeru ispitivanja, odnosno kontrole uslijed tehnološkog procesa reparacije kliznog ležaja.

## **SUMMARY**

Non-destructive testing is a group of methods which are widespread and desirable for a very long time because they are based on a fact that they don't leave any effects or consequences on testing materials, thus don't generate unnecessary expenses in making and testing products.

Beginnings of such testing in industry date back to mid-19th century when there was a necessity to test parts in industry whose failure represents grave danger for people and their lives, for machine parts and machines, as well as significant financial loss. Crucial discoveries in physics during 19th and mid-20th century made conditions for development of mentioned methods and their profiling which have become irreplaceable in all forms of activities in mechanical engineering, as well as in electrical and civil engineering, medicine, aeronautics, petroleum engineering and transport. With further technological developments, as well as developments in automatization, robotics, and in the past few decades computerization, these methods experience constant improvement to this day.

In this paper emphasis is placed on the three most widespread non-destructive testing methods; magnetic particle testing, liquid penetrant testing and ultrasonic testing. Here is described the way in which mentioned methods are used, physical principles behind them, equipment in use with these methods and their practical application on the example of testing and quality control in the technological process of plain bearing reparation.

## SADRŽAJ

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA .....	I
IZJAVA .....	II
SAŽETAK .....	III
SUMMARY .....	IV
SADRŽAJ .....	V
1. UVOD .....	1
2. ISPITIVANJE MAGNETNIM ČESTICAMA .....	2
2.1. Osnovni principi .....	2
2.2. Razvoj metode .....	4
2.3. Magnetizam .....	4
2.4. Magnetska svojstva materijala .....	5
2.5. Magnetiziranje materijala .....	8
2.6. Struje magnetiziranja .....	11
2.6.1. Istosmjerna struja .....	11
2.6.2. Izmjenična struja .....	11
2.6.3. Ispravljajući .....	12
2.7. Demagnetizacija .....	13
2.8. Oprema za ispitivanje .....	15
2.8.1. Prenosiva oprema .....	15
2.8.2. Neprenosiva oprema .....	17
2.9. Svjetla i osvjetljenje .....	18
2.10. Mjerači magnetskog polja .....	20
2.11. Čestice .....	22
2.11.1. Suho ispitivanje .....	22
2.11.2. Mokro ispitivanje .....	23
2.11.3. Korištenje magnetne gume .....	24
2.11.4. Koncentracija i stanje čestica u suspenziji .....	24



3. ISPITIVANJE PENETRANTSKIM TEKUĆINAMA .....	26
3.1. Razvoj metode .....	26
3.2. Temelji metode .....	27
3.3. Penetrantski materijali .....	28
3.3.1. Sposobnost namakanja .....	29
3.3.2. Kapilarnost .....	30
3.3.3. Specifična gravitacija i viskoznost .....	31
3.3.4. Podjela penetranta .....	32
3.5. Koraci pri ispitivanju penetrantima .....	33
3.6. Priprema površine .....	34
3.7. Nanošenje i oprema za nanošenje penetranta .....	35
3.8. Razvijači .....	37
4. ISPITIVANJE ULTRAZVUKOM .....	39
4.1. Osnovni principi .....	39
4.2. Razvoj metode .....	41
4.3. Valovi .....	41
4.4. Fizikalna svojstva zvuka .....	43
4.4.1. Valna duljina .....	43
4.4.2. Brzina zvuka .....	44
4.4.3. Akustična impedancija .....	45
4.4.4. Omjer signala prema šumu .....	48
4.4.5. Valna interferencija .....	48
4.5. Oprema za ispitivanje .....	49
4.5.1. Piezoelektrične sonde .....	49
4.5.1.1. Tipovi sondi .....	51
4.5.1.2. Kontaktno sredstvo .....	53
4.5.2. Laser .....	54
4.5.3. Elektromagnetska akustička sonda (EMAT) .....	54
4.5.4. Ostala oprema .....	55
4.5.5. Prikaz diskontinuiteta .....	56
4.6. Otkrivanje i evaluacija diskontinuiteta .....	58
4.7. Umjeravanje .....	62

5. PRIMJENA OPISANIH METODA U TEHNOLOŠKOM PROCESU .....	64
5.1. Klizni ležajevi .....	64
5.2. Podmazivanje ležajeva .....	66
5.3. Materijali za izradu kliznih ležajeva .....	68
5.4. Reparacija oštećenog ležaja .....	73
5.4.1. Tehnološki proces reparacije ležaja <i>fi</i> 400 .....	74
5.4.2. Ispitivanje osnovnog materijala .....	78
5.4.3. Ispitivanje nalijeganja ležajne kovine na osnovni materijal .....	83
6. ZAKLJUČAK .....	96
7. LITERATURA .....	97
8. PRILOZI	
8.1. Popis oznaka	
8.2. Popis slika	
8.3. Popis tablica	

## 1. UVOD

Ispitivanje materijala bez razaranja (*eng.* Non-Destructive Testing - NDT) je široka skupina metoda tehničke analize koja se upotrebljava u industriji i znanosti za procjenjivanje svojstava materijala, komponenata ili sustava bez uzrokovanja oštećenja na ispitivanom dijelu. Upravo zbog te činjenice te su metode visoko cijenjene i mogu uštedjeti i vrijeme i novac pri evaluaciji proizvoda, otklanjanju problema i istraživanju. Metode se koriste prvenstveno u strojarstvu, elektrotehnici, građevinarstvu, aeronautici, medicini i ostalim djelatnostima.

Najčešće korištene metode ispitivanja materijala bez razaranja su sljedeće:

**Ispitivanje magnetnim česticama** - koristi jedno ili više magnetskih polja za lokaliziranje površinskih i potpovršinskih diskontinuiteta kod isključivo feromagnetičnih materijala. Diskontinuiteti, odnosno greške u materijalu, se otkrivaju i lokaliziraju zbog njihovog stvaranja polova ili narušavanja magnetskog polja induciranom u ispitivanom materijalu. Primjenjuje se kod ispitivanja odljevaka, zavora, zupčanika, cijevi,...

**Ispitivanje penetrantskim tekućinama** - provodi se nanošenjem tekućine na ispitivani materijal kako bi se vizualno otkrile greške koje su upile tekućinu (često tekućinu sa dodanim fluorescentnim bojama radi bolje vidljivosti pod ultraljubičastim svjetlom). Koristi se kod neporoznih materijala, pri ispitivanju zupčanika, cijevi, diskova, pregleda komponenti mlaznih motora,...

**Ispitivanje vrtložnim strujama** - slično kao i kod ispitivanja magnetnim česticama, vrtložne struje (električna struja) se generiraju u električno provodljivim materijalima promjenom magnetskog polja, dok diskontinuiteti u ispitivanom materijalu uzrokuju prekide u toku vrtložnih struja. Primjenjuje se na metalima i legurama, kao i za određivanje debljine premaza ili električne vodljivosti materijala, primjerice u elektranama za ispitivanje korozije u cijevima za izmjenu topline, za ispitivanje odljevaka i slično.

**Radiografsko ispitivanje** - koristi penetrirajuće gama ili rendgenske zrake pri otkrivanju grešaka i strukturnih osobina materijala. Kao izvor zračenja se koristi rendgen ili radioaktivni izotop. Koristi se za ispitivanje širokog dijapazona materijala poput metala, polimera, kompozita, radioaktivnih materijala, gume,...

**Ultrazvučno ispitivanje** - diskontinuiteti se otkrivaju i lociraju na temelju promjena odaslanih ultrazvučnih zraka koje diskontinuiteti prouzrokuju. Metoda ima primjenu pri ispitivanju odljevaka, otkivaka, zavara, cijevi i raznih drugih profila.

U ovom će radu naglasak biti stavljen na metode ispitivanja magnetnim česticama, ispitivanja penetrantskim tekućinama i ultrazvučno ispitivanje materijala i njihovu primjenu u tehnološkom procesu na primjeru reparacije radijalno-aksijalnog vodećeg kliznog ležaja.

## **2. ISPITIVANJE MAGNETNIM ČESTICAMA**

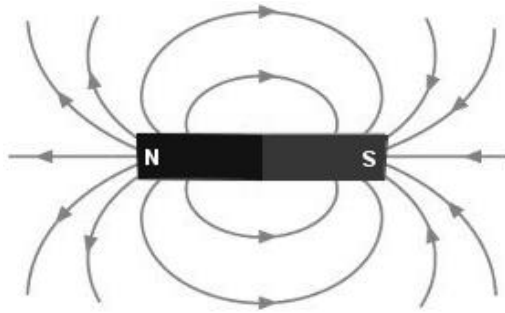
Ispitivanje magnetnim česticama je metoda ispitivanja bez razaranja koje se upotrebljava za otkrivanje grešaka. To je brza i, za upotrebu, relativno jednostavna metoda koja ne zahtijeva osobitu pripremu ispitivane površine što metodu čini jednom od najšire upotrebljivanih metoda ispitivanja bez razaranja.

Metoda koristi magnetska polja i vrlo male magnetne čestice (željezna strugotina) da otkrije greške u materijalu koji se ispituje. Jedini ključni zahtjev metode jest da ispitivani materijal mora biti feromagnetičan jer se samo takav materijal može magnetizirati tako da omogući ispitivanje.

Koristi se za ispitivanje raznih oblika poput lijevova, kovina i zavara. Upotrebljava se u automobilskoj industriji, zrakoplovnoj, petrokemijskoj, kao i za podvodna ispitivanja cjevovoda i platformi, odnosno za ispitivanje sa sigurnosnog aspekta posebno važnih dijelova [1].

### **2.1. Osnovni principi**

Magnet je svako tijelo koje u sebi i oko sebe stvara magnetsko polje kojime može djelovati privlačnim silama na feromagnetične materijale. Mjesta u kojima magnetske silnice u značajnoj mjeri poniru u ili izviru iz magneta nazivaju se polovi. Silnice uvijek izviru u sjevernom (N) i ulaze u južni pol (S) magneta.

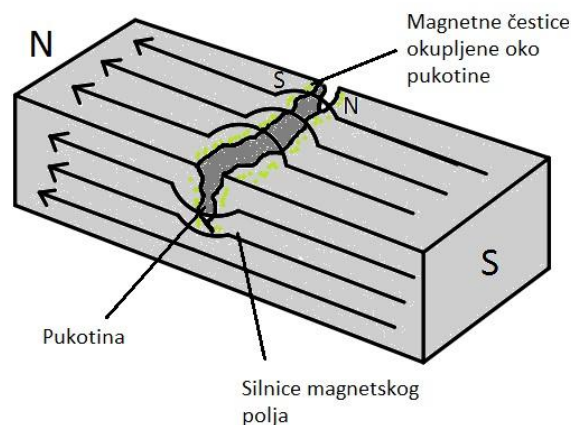


Slika 1: Magnet

Magnetske silnice imaju sljedeća važna svojstva [1]:

- traže putanju između suprotnih polova u kojoj je najmanji otpor
- nikad se ne sijeku
- sve su jednake duljine i snage
- gustoća im se smanjuje udaljavajući se od polova, kao i prelazeći iz područja veće u područje manje permeabilnosti
- u zraku teku od sjevernog prema južnom, a u materijalima obrnuto

Ako naiđu na pukotinu, magnetske silnice (magnetski tok) zaobilaze pukotinu pošto je zrak slab vodič magnetskog toka i događa se curenje magnetskog polja. Veličina, položaj i orijentacija pukotine/greške u materijalu igraju ulogu u veličini rasipanja magnetskog toka. Ukoliko se na ispitivani materijal poprskaju željezne čestice, rasute silnice magnetskog polja privlače na sebe te čestice i one se grupiraju oko pukotine. Puno je jednostavnije uočiti nakupinu tih čestica nego samu pukotinu što predstavlja osnovu magnetskog ispitivanja.



Slika 2: Nailazak silnica magnetskog polja na pukotinu

## 2.2. Razvoj metode

Najranija zabilježena upotreba magnetizma zabilježena je 1868. u ispitivanju grešaka na topovskim cijevima na način da se kroz magnetiziranu topovsku cijev spuštao kompas. Kad bi se pojavilo curenje magnetskog toka uzrokovano greškom u cijevi, igla na kompasu bi se pomakla i time bi se detektirao diskontinuitet u materijalu. Nakon sasvim slučajnog otkrivanja da se metalne čestice nastale prilikom obrade odvajanjem čestica grupiraju oko pukotina magnetiziranog materijala, za ispitivanje se počeo koristiti feromagnetični prašak. Daljnjim razvojem metoda je postala nezamjenjiva kod ispitivanja poluproizvoda kao što su limovi, otkivci, metalne šipke i grede, odljevci. Metoda se intenzivno koristi i kod preventivnog održavanja vratila, turbinskih lopatica, raznih nosača i slično [2].

## 2.3. Magnetizam

Magnetsko polje je dio elektromagnetskog polja, odnosno prostor u kojemu se opažaju naročite pojave koje nazivamo učincima magnetskog polja. Dva su osnovna učinka magnetskog polja, i to u prvom redu učinak mehaničkih sila kojima primjerice magneti djeluju jedan na drugog ili magnet na željezo, dok je druga pojava elektromagnetska indukcija [3].

**Magnet** je tijelo koje stvara magnetsko polje. To polje stvaraju gibajući električni naboji, odnosno elektroni. Dovođenjem materijala u magnetsko polje, polje utječe na elektrone u tom materijalu. Faradayev zakon indukcije opisuje taj utjecaj u obliku nastalog gibanje elektrona, odnosno elektromotorne sile:

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

Elektromotorna sila  $\varepsilon$  [V] razmjerna je promjeni magnetskog toka  $\Delta\Phi$  [Wb], a obrnuto proporcionalna vremenskom trajanju promjene  $\Delta t$  [s].

Navedeni utjecaj na materijal dovođenjem istoga u magnetsko polje ovisi o nizu faktora poput atomske i molekularne strukture materijala stoga će se različiti materijali različito ponašati budu li podvrgnuti vanjskom magnetskom polju.

## 2.4. Magnetska svojstva materijala

Magnetizam se u atomima može javiti zbog gibanja elektrona, elektronskog spina i zbog utjecaja vanjskog magnetskog polja. U većini atoma elektroni se nalaze u paru te imaju suprotne spinove što uzrokuje poništavanje magnetskog polja. Oni materijali koji imaju nesparene elektrone će se, pod utjecajem vanjskog magnetskog polja, posljedično ponašati drugačije od onih čiji su elektroni u paru. To dovodi do klasifikacije materijala ovisno o tom ponašanju na:

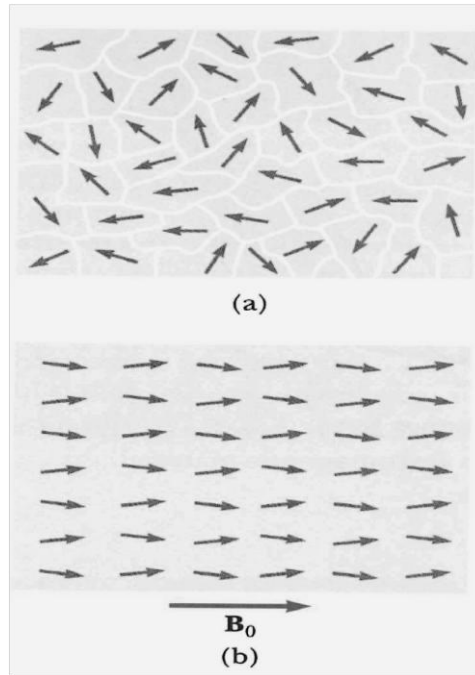
- dijamagnetične
- paramagnetične
- feromagnetične

**Dijamagnetični materijali** poput bakra, srebra i zlata imaju slabo odbojno djelovanje prema vanjskom magnetskom polju i pošto imaju sve elektrone sparene, prestankom djelovanja polja oni gube magnetska svojstva.

**Paramagnetične materijale** karakterizira slaba privlačnost prema vanjskom magnetskom polju, a iako imaju neke nesparene elektrone, također gube magnetska svojstva prestankom djelovanja vanjskog magnetskog polja na njih. Magnezij, molibden, litij i tantal spadaju u ovu skupinu materijala.

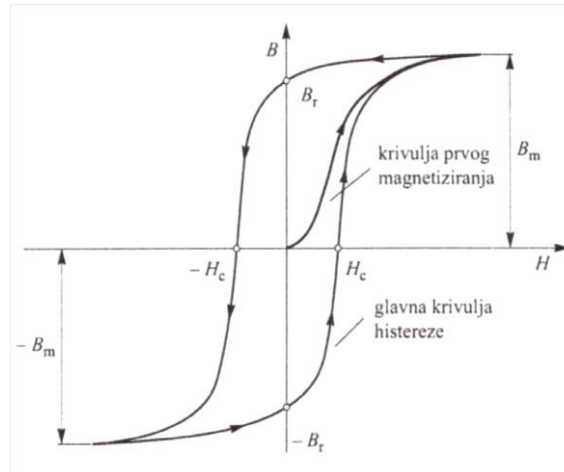
**Feromagnetični materijali** imaju veliko pozitivno, odnosno snažno privlačno djelovanje prema vanjskom magnetskom polju i prestankom djelovanja tog polja zadržavaju magnetska svojstva zbog postojanja nesparenih elektrona i zbog, inače slučajno orijentiranih, magnetskih momenata atoma (elementarnih magneta, Slika 3a) koji nakon vanjskog djelovanja magneta počinju djelovati u istom pravcu u smjeru vanjskog magnetskog polja, te se to djelovanje superponira proizvodeći snažno magnetsko polje u materijalu (Slika 3b).

Željezo, nikel i kobalt su najvažniji predstavnici ovih materijala zbog čega su upravo ovi materijali podvrgnuti ispitivanju magnetnim česticama.



Slika 3a i 3b: Magnetiziranje feromagnetičnih materijala

Magnetizaciju ovih, feromagnetičnih materijala, opisuje **krivulja histereze**:



Slika 4: Krivulja histereze

Krivulja se određuje mjerenjem magnetskog toka feromagnetičnog materijala promjenom magnetizirajuće sile. Broj silnica magnetskog polja koji prolazi kroz određenu površinu naziva se **magnetski tok**.

$$\Phi = B \cdot S \quad (2)$$

$B$  je iznos magnetskog polja [T], dok je  $S$  površina kroz koju to polje protječe [ $\text{m}^2$ ].



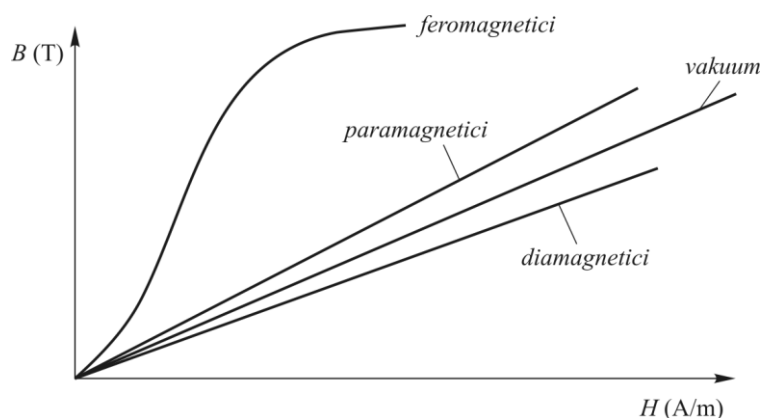
Iz ove se krivulje daje odrediti više magnetskih svojstava materijala poput zaostalog magnetizma i zaostalog toka, permeabilnosti, magnetskog otpora. Što je krivulja šira, manja će biti permeabilnost materijala, veća količina magnetskih polja, veći magnetski otpor.

Osobina materijala koja pokazuje intenzitet magnetizacije prilikom izloženosti vanjskom magnetskom polju naziva se **magnetska permeabilnost** [H/m] i izražava se slijedećim odnosom:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3)$$

Permeabilnost je izrazito važna u magnetskom ispitivanju jer utječe na zaostala magnetska polja koja mogu biti pokazatelj udjela ugljika i ostalih legiranih elemenata u materijalu. Materijal većeg sadržaja ugljika imat će manju permeabilnost i veću količinu zaostalih magnetskih polja.

Permeabilnost magnetskih materijala osim o samoj vrsti materijala, ovisi i o strukturi, stupnju magnetiziranja i temperaturi [4]. Dijamagnetični i paramagnetični materijali se u magnetskom polju ponašaju poput vakuuma, odnosno zraka, pa se takvi materijali ne koriste za magnetizaciju, već samo feromagnetični materijali.

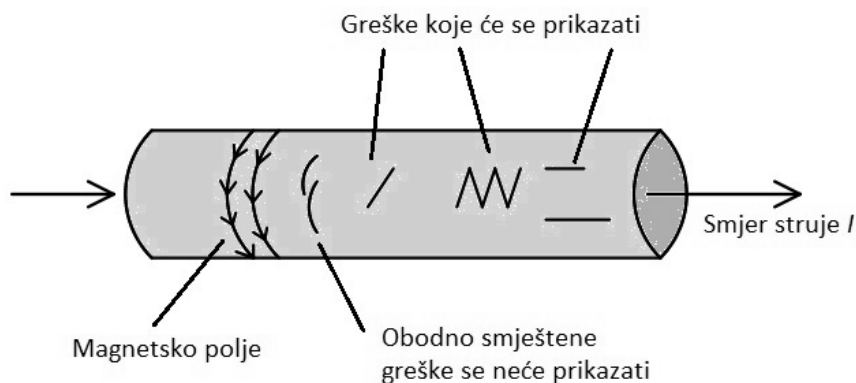


Slika 5: Permeabilnost različitih materijala

Povoljno magnetsko uređenje feromagneta može se poremetiti porastom temperature, odnosno zagrijavanjem feromagnetičnih materijala. Ta se temperatura, pri kojoj magnetska uređenost nestaje, naziva Curiejeva temperatura, a takav materijal paramagnetičnim.

## 2.5. Magnetiziranje materijala

Materijal se može magnetizirati dvjema vrstama magnetskog polja; **longitudinalnim (uzdužnim)** i **cirkularnim (kružnim)**. Diskontinuitet se ne može locirati ako je on u ispitivanom materijalu smješten uzdužno u odnosu na tok magnetskog polja, odnosno paralelno u odnosu na silnice jer tako smješten diskontinuitet vrlo malo pomiče magnetske silnice. To znači da je potrebno osigurati da magnetsko polje teče što okomitije na diskontinuitet kako bi diskontinuitet što više poremetio silnice polja. Stoga se taj problem rješava međusobno okomitim naizmjeničnim magnetiziranjem ili kružnim tokom magnetskog polja. Valja napomenuti da obodno smješteni diskontinuiteti neće biti otkriveni kružnim poljem, ali većina uzdužnih i poprečnih grešaka, kao i onih orijentiranih po 45°, hoće.



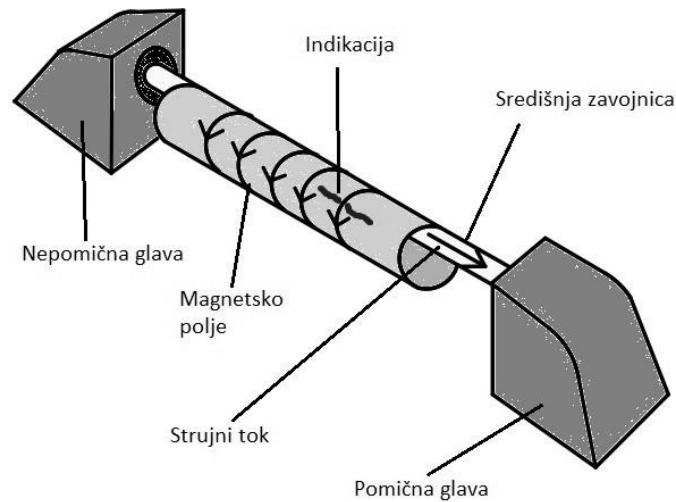
*Slika 6: Otkrivanje grešaka kružnim magnetskim poljem*

Materijale je moguće magnetizirati, odnosno stvoriti magnetsko polje u njima na primarno dva načina:

- upotrebom izravne indukcije
- upotrebom neizravne indukcije

Materijal se može magnetizirati propuštanjem električne struje kroz ispitivani materijal čime nastaje elektromagnetska indukcija. Potrebno je paziti da se ispitivani materijal nebi oštetio uslijed zagrijavanja na mjestima povećanog otpora protjecanju električne struje ili uslijed lošeg kontakta ispitne opreme i materijala koji se ispituje [5]. **Izravnu indukciju** je moguće postići umetanjem ispitivanog materijala između dva kontakta kroz koje se pusti električna struja što rezultira stvaranjem kružnog magnetskog polja sukladno pravilu desne ruke; ukoliko električna struja ima smjer

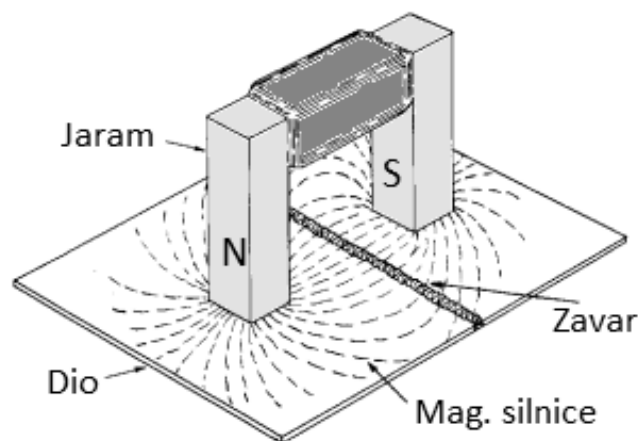
kojeg pokazuje palac, magnetsko će polje oko vodiča teći u smjeru pokazivanja prstiju desne ruke.



Slika 7: Izravna indukcija

**Neizravna indukcija** se temelji na stvaranju vanjskog magnetskog polja koji će magnetizirati ispitivani feromagnetični materijal.

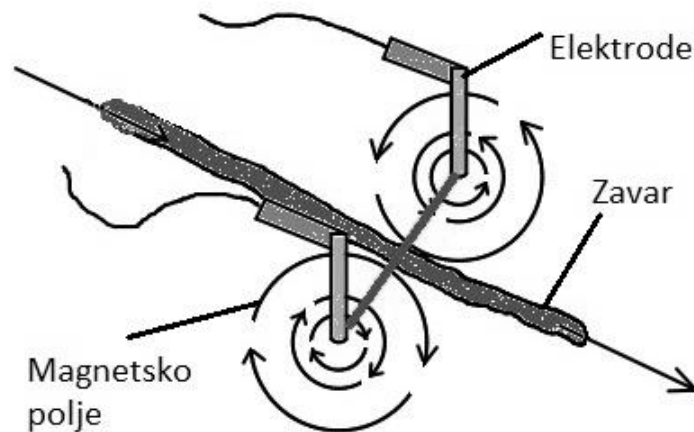
Prvi i najrasprostranjeniji način postizanja neizravne indukcije je propuštanjem električne struje kroz **jaram** čime se stvara snažno i kontrolirano magnetsko polje koje traje samo dok kroz željeznu žicu - zavojnicu omotanu oko jezgre od mekog feromagnetičkog željeza smještene unutar jarma, teče električna struja. Prislanjanjem jarma pod djelovanjem električne struje na ispitivani materijal, u njemu se stvori uzdužno magnetsko polje. Opasnosti od zagrijavanja ispitivanog dijela nema jer nema protjecanja struje kroz ispitivani dio. Jarmom se mogu magnetizirati i materijali sa nemagnetičnim slojem na površini ukoliko debljina tog sloja ne prelazi 40  $\mu\text{m}$ .



Slika 8: Magnetiziranje jarmom

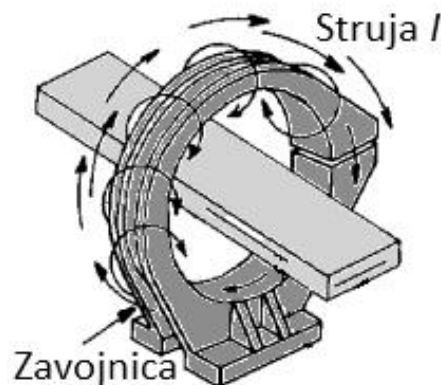
**Magnetiziranje jarmom** je vrlo popularna metoda zbog svoje prenosivosti i niske cijene. Većina jarmova može raditi i sa istosmjernom i sa izmjeničnom strujom.

Magnetsko polje se unutar materijala može dobiti i **elektrodama** tako da se postave na materijal kako bi struja tekla od jedne do druge elektrode stvarajući magnetsko polje oko putanje protjecanja električne struje između elektroda.



*Slika 9: Magnetiziranje upotrebom elektroda*

Treća metoda postizanja magnetskog polja neizravnom indukcijom je **upotreba zavojnica**. Ispitivani se materijal uzdužno postavi u koncentrično magnetsko polje unutar zavojnice kojom prolazi električna struja što rezultira stvaranjem uzdužnog magnetskog polja u ispitivanom materijalu.



*Slika 10: Magnetiziranje zavojnicom*

**Uporaba permanentnih magneta** je ograničena zbog nemogućnosti kontroliranja snage magnetskog polja.

## **2.6. Struje magnetiziranja**

Struje pomoću kojih se ranije navedenim postupcima magnetizira ispitivani materijal mogu igrati važnu ulogu u ispitivanju magnetnim česticama. Te se struje mogu upotrebljavati i modificirati ovisno o zahtjevima pri ispitivanju. Osnovna je podjela struja za magnetiziranje, kao i struje općenito, na istosmjerne i izmjenične struje.

### **2.6.1. Istosmjerna struja**

Istosmjerna je ona struja kojoj se smjer električnog polja ne mijenja. Ako se, uz to, ni jakost ne mijenja, a samim time ni napon, naziva se konstantnom istosmjernom strujom. Izvori istosmjerne struje su u praktičnoj primjeni najčešće elektrokemijski izvori (ili galvanski elementi), tj. različite vrste baterija i akumulatora. Smjer istosmjerne struje jednak je smjeru električnog polja, dakle suprotan je smjeru gibanja elektrona [6]. Za ispitivanje magnetnim česticama je vrlo poželjna jer ima mogućnost stvaranja magnetskog polja koje prodire duboko u materijal.

### **2.6.2. Izmjenična struja**

Izmjenična struja je česta za ispitivanje jer je praktična i dostupna u gotovo svim prostorima gdje se ispitivanje vrši. Izmjenična struja, za razliku od istosmjerne, ima u vremenu promjenjivu jakost i smjer. Zbog promjene jakosti struje mijenjaju se u vremenu magnetski tok i gustoća silnica, ali raspored silnica u prostoru ostaje isti kao i pri konstantnoj uzbuđi istosmjerne struje [3]. Izmjeničnu struju je preporučljivo koristiti ako se očekuju samo površinske greške jer je magnetsko polje proizvedeno izmjeničnom strujom koncentrirano na uskom površinskom dijelu ispitivanog materijala zbog pojave kod izmjenične struje pod nazivom skin efekt. Skin efekt je tendencija izmjenične struje da se njezin tok koncentrira na površini vodiča. Naime, vrtložne struje, koje nastaju zbog promjenjivog magnetskog toka, stvaraju svoje magnetsko polje koje se suprotstavlja polju struje smanjujući magnetski tok ispod površine. Skin efekt raste sa porastom frekvencije izmjenične struje.

### 2.6.3. Ispravljači

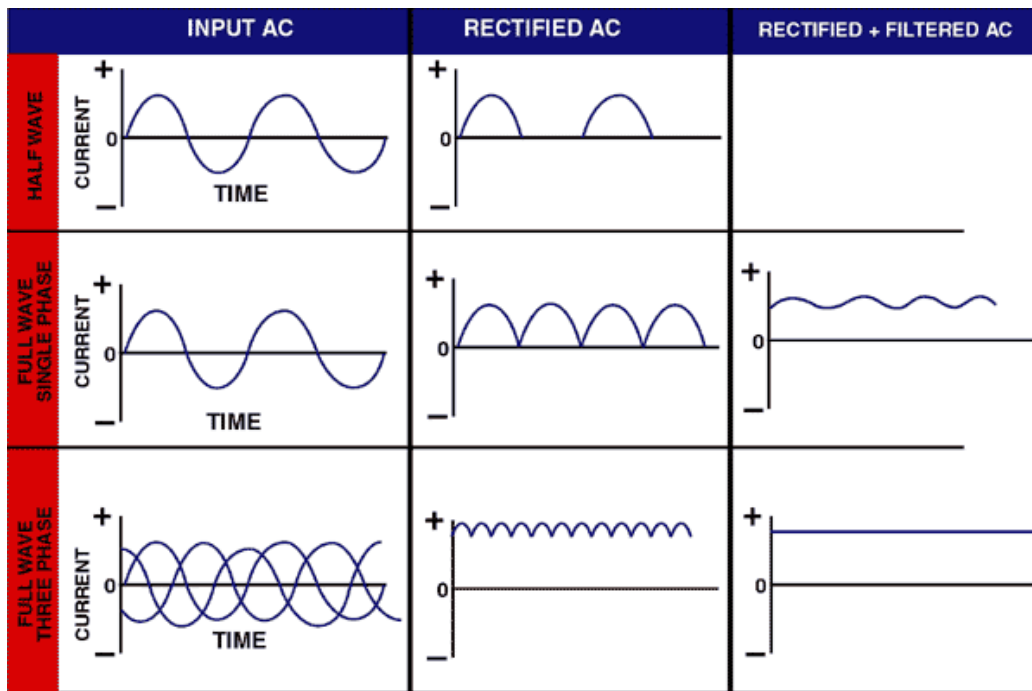
Kako bi se uklonilo djelovanje skin efekta, a samim time i rezultirajuće neželjeno svojstvo izmjenične struje pri magnetskom ispitivanju, koriste se ispravljači izmjenične struje. To su sklopovi koji pretvaraju izmjeničnu struju u pulsirajuću istosmjernu. Oni se obično sastoje od transformatora, ispravilačke diode koja daje 'jednopolarni napon', odnosno propušta struju samo u jednom smjeru, filtera koji 'zaglađuje' titranje napona i naponskog regulatora koji otklanja mrežkanje što rezultira stvaranjem gotovo čiste istosmjerne struje [7].

Ispravljači, odnosno ispravilački krugovi mogu biti jednofazni i višefazni. Jednofazni ispravljači se dijele na poluvalne i punovalne ispravilače.

**Poluvalni** je onaj čija dioda provodi izmjeničnu struju samo tijekom njenog pozitivnog poluciklusa čime se stvara pulsirajuća struja koja je korisna pri upotrebi suhih čestica za ispitivanje jer vibriranje uzrokovano pulsirajućom strujom česticama daje mobilnost i povećava sposobnost otkrivanja grešaka. Ta se struja najčešće koristi kod elektromagnetskih jarmova. Negativna strana takve struje je da daje snagu samo tijekom polovice ciklusa, te su zato izlazna snaga i napon dvostruko manji od ulaznih.

**Punovalni ispravljači** koriste dvije diode koje naizmjenično rade, svaka tijekom jednog poluciklusa što rezultira strujom dvostrukog izlaznog napona koja u oba poluciklusa teče u istom smjeru. Pošto se ciklus punovalne struje sada sastoji od dva titraja i to u jednom smjeru, izlazna će frekvencija biti dvostruka i nalikovat će istosmjernoj struji te će se moći puno lakše filtrirati. Korištenjem se ovakve struje povećava dubina ispitivanja, ali nauštrb mobilnosti čestica koju daje poluvalni ispravilač [8].

U upotrebi pri ispitivanju magnetnim česticama su još i **trofazni punovalni ispravilači** koji koriste šest dioda (dvije za svaku fazu) što višestruko povećava izlaznu frekvenciju u jednom smjeru i praktički nakon filtriranja izlazne karakteristike bit će jednake karakteristikama istosmjerne struje [9].



Slika 11: Djelovanje ispravljača na izmjeničnu električnu struju

Treba napomenuti da će prejaka struja magnetizacije kod mokrog ispitivanja uzrokovati snažno privlačenje i 'sljepljivanje' čestica na ispitivani materijal što će onemogućiti mobilnost i putovanje čestica do mjesta diskontinuiteta.

## 2.7. Demagnetizacija

Nakon ispitivanja, zaostala magnetska polja mogu [5]:

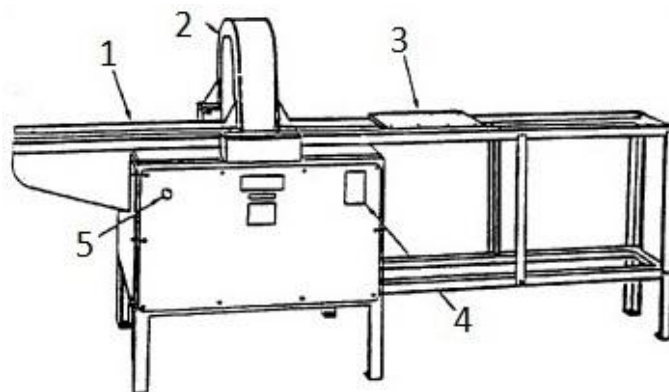
- nastaviti privlačiti abrazivne čestice pri budućoj eksploataciji ispitanog dijela
- utjecati na daljnju obradu dijela (poput privlačenja električnog luka pri zavarivanju)
- utjecati na elektroničku opremu na i oko ispitanog dijela

Demagnetizacija je nužna i ukoliko

- dio ima biti prevučen ili obojan, pošto bi čestice utjecale na prijanjanje boje ili prevlake
- se dio ima ponovno magnetizirati slabijim poljem od ispitanog

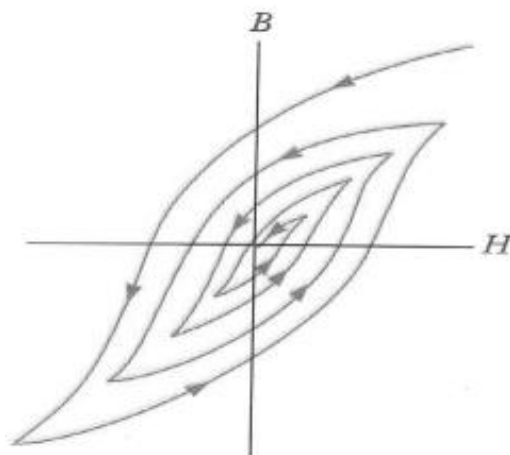
Kao što je ranije spomenuto, povoljno magnetsko uređenje feromagneta može se poremetiti porastom temperature, tj. zagrijavanjem. Često su te temperature, na

kojima materijal postaje paramagnetičan, vrlo visoke (Curiejeva temperatura iznad 700 °C) i demagnetizacija na taj način postaje neracionalna i sa energetskog aspekta i sa aspekta utjecanja na strukturu materijala. Zato se demagnetizacija ispitanog materijala vrši tako da se materijal podvrgava postupno smanjujućem promjenjivom magnetskom polju koje stvara izmjenična ili istosmjerna električna struja preko jarma ili zavojnice koja može biti zasebna prijenosna ili dijelom jedinice za demagnetizaciju, tzv. tunela za demagnetizaciju. Na Slici 12 je prikazan tunel za demagnetizaciju gdje 1 označava traku, 2 zavojnicu za demagnetizaciju, 3 pomično postolje, 4 prekidač za isključivanje i 5 svijetleći indikator.



*Slika 12: Tunel za demagnetizaciju sa zavojnicom*

U principu, demagnetizacija se provodi vođenjem materijala kroz uzastopne i postupno smanjujuće krivulje histereze [10].



*Slika 13: Demagnetiziranje materijala vođenjem kroz krivulju histereze*



Kod dijelova koji su bili magnetizirani izmjeničnom strujom, potrebno je demagnetizirati izmjeničnom strujom frekvencije 50-60 Hz ili niskofrekventnom izmjeničnom strujom. Ukoliko su dijelovi bili magnetizirani istosmjernom strujom, demagnetizacija se vrši isključivo niskofrekventnom izmjeničnom strujom.

## 2.8. Oprema za ispitivanje

Prije ispitivanja je vrlo bitno utvrditi kakve se greške na materijalu očekuju prilikom ispitivanja i na kojim dubinama jer će o tome ovisiti karakteristike magnetskog polja koje će se primijeniti te oprema koja će polje s traženim karakteristikama proizvesti. Pristupit će se odabiru kakvi će se uređaji za magnetizaciju koristiti, kakva električna struja, kakve čestice za indikaciju i kakva oprema za osvjetljavanje rezultirajućih nakupljenih čestica. Oprema za ispitivanje magnetnim česticama se prvenstveno dijeli po stupnju prenosivosti.

### 2.8.1. Prenosiva oprema

Prenosivu opremu čine magneti, elektromagneti i elektrode.

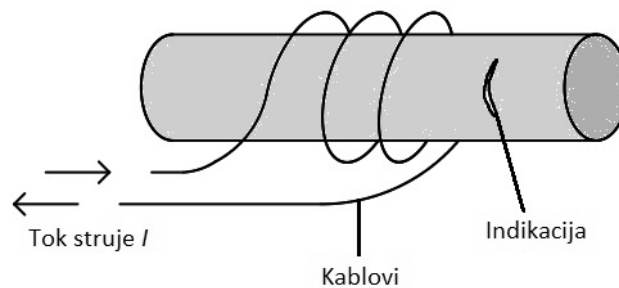
**Permanentni magneti** nisu često u upotrebi zbog nemogućnosti utjecaja i reguliranja magnetskog polja koje oni proizvode. Nepoželjni su i iz razloga što moraju biti vrlo jaki da magnetiziraju ispitivani materijal pa su potrebne velike sile i napor da bi ih se odvajalo od materijala. Ipak, postoje područja gdje su nezamjenjivi, kao što su podvodna ispitivanja i ispitivanja u eksplozivnim okruženjima gdje nije moguće koristiti uređaje za magnetiziranje pomoću električne struje.

**Elektromagneti** su najrasprostranjenije sredstvo magnetiziranja u svrhu ispitivanja zbog svoje jednostavnosti, niske cijene i prenosivosti. Oni proizvode uzdužno magnetsko polje preko zavojnice unutar elektromagneta kojom prolazi električna struja. Može ih napajati istosmjerna struja preko baterije ili izmjenična struja preko električne mreže i magnetizacija traje samo dok je elektromagnet uključen, tj. dok njime teče struja. Vrlo često imaju i mogućnost demagnetizacije.

**Elektrode** funkcioniraju na način da se prislone na površinu ispitivanog materijala i između njih teče električna struja koja stvara kružno magnetsko polje unutar

materijala. Ove su elektrode obično bakrene i protjecanje električne struje se može uključiti i isključiti po volji. Koriste se većinom za ispitivanje zavora.

Ispitivani materijal se može magnetizirati i **upotrebom prijenosnih bakrenih zavojnica** sa tri do pet namotaja koje stvaraju longitudinalno magnetsko polje u ispitivanom materijalu. Imaju nožnu sklopku kojom se upravlja protjecanje struje. Umjesto zavojnice, mogu se upotrebljavati i **vodljivi kablovi** kako bi se induciralo magnetsko polje u materijalu na istom principu kao sa zavojnicom jer kablovi u tom slučaju imaju ulogu zavojnice kad kroz njih prolazi struja. Kablovi će se namotati onoliko puta koliko iznosi veličina magnetskog polja potrebnog za ispitivanje.



*Slika 14: Magnetiziranje omatanjem strujnih kablova*

**Prijenosni izvori energije** za napajanje gore navedenih uređaja se kreću od vrlo kompaktnih prijenosnih izvora manje snage koji proizvode poluvalnu istosmjernu ili izmjeničnu električnu struju jakosti do 1400 A (Slika 15a) do onih snage 6000 A (Slika 15b), pa i više. Ovi izvori električne energije koriste finožične visokofleksibilne bakrene vodljive kablove. Isti se kablovi koriste i za induciranje magnetskog polja za ispitivanje. Prijenosni izvori, uz to što pružaju energiju za napajanje uređaja za magnetizaciju, mogu izvršiti i demagnetizaciju [11].



*Slika 15a i 15b: Prijenosni izvori električne struje*

## 2.8.2. Neprenosiva oprema

Nepokretna, odnosno stacionarna oprema za ispitivanje magnetnim česticama konstruirana je za uporabu u laboratoriju ili kod proizvodnih linija. Najčešći oblik je **horizontalna jedinica za mokro ispitivanje**. Ima glavu i pomični rep sa električnim kontaktima u koje se postavi ispitivani materijal. Pošto je rep pokretan, materijal može biti raznih duljina. Izravnom magnetizacijom se stvara u materijalu kružno magnetsko polje. Većina jedinica ima i pomičnu zavojnicu kako bi se moglo proizvesti i neizravno magnetsko polje. Suspenzija magnetnih čestica se iz posebnog spremnika pumpom i cijevi dovodi do ispitivanog materijala. Neke jedinice imaju mogućnost rada i sa istosmjernom i sa izmjeničnom strujom.



*Slika 16: Horizontalna jedinica za mokro ispitivanje*

Kod magnetiziranja kružnim poljem preko glave i repa, nakon postavljanja materijala u stezaljke, odnosno glavu i rep, kratko se prska suspenzija magnetnih čestica na materijal. Struja koja stvara magnetsko polje se pusti u trajanju 0,5 - 1,5 s nakon zaustavljanja kratkog prskanja pri čemu iscureno magnetsko polje privlači i grupira čestice iz suspenzije uz eventualnu grešku, tj. diskontinuitet.

Kod upotrebe zavojnice i induciranja longitudinalnog magnetskog polja u ispitivanom materijalu, također se prvo prska otopina u trajanju od 0,5 do 1,5 s, te nakon zaustavljanja iste se pušta struja kroz zavojnicu i čestice iz otopine se grupiraju na isti način.

Postoje i **višesmjerne jedinice za ispitivanje** koje mogu u vrlo kratkim intervalima naizmjenično stvarati i longitudinalna i kružna magnetska polja čime se otklanja potreba za više ciklusa prskanje - magnetiziranje. Takve se jedinice koriste pri vrlo čestom ispitivanju i ispitivanju velikog broja komada. Kao i kod mokrih stacionarnih jedinica, korištene struje mogu biti i istosmjerna i izmjenična. Kod ovih je jedinica posebno važno odrediti optimalnu jačinu magnetskih polja i ostvariti njihov balans jer nebalansirana polja stvaraju rezultirajuće polje koje nije u mogućnosti otkriti neke greške.

## 2.9. Svjetla i osvjetljenje

Magnetsko ispitivanje se može provesti koristeći nefluorescentne obojane čestice i one presvučene fluorescentnim slojem namijenjene upotrebi UV lampi.

Kad se za ispitivanje koriste obojene jasno vidljive čestice pod običnim osvjetljenjem nikakva posebna rasvjeta nije potrebna. Za osvjetljavanje se, osim prirodnog svjetla, koristi i umjetna rasvjeta koja bi trebala biti isključivo bijelog svjetla takvog intenziteta da je refleksija na ispitivanom materijalu minimalna. Međutim, kad se za ispitivanje koriste fluorescentne magnetne čestice, potrebne su posebne lampe kako bi ih se uočilo, a bijelo svjetlo mora biti na najnižim mogućim razinama.

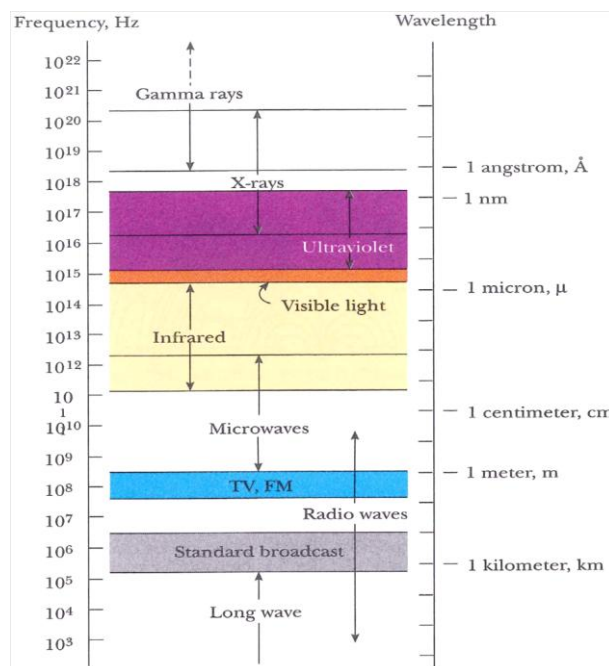
Na sobnoj temperaturi većina molekula zauzima najmanju razinu vibracije elektronskog stanja i pri apsorpciji svjetlosti ta se razina povećava kako bi se proizvelo pobuđeno stanje. Pobuda može rezultirati da molekula zauzme bilo koje vibracijsku razinu. Nakon što je molekula apsorbirala energiju i postigla jedno od viših vibracijskih stanja, ona gubi višak vibracijske energije pobuđenog stanja preko unutarnje konverzije tako da postupno pada s najniže vibracijske razine višeg pobuđenog stanja do više vibracijske razine nižeg pobuđenog stanja koje ima istu energiju. Molekula tako gubi energiju skroz dok nije postigla najnižu vibracijsku razinu prvog pobuđenog stanja. Iz te razine molekula emitira energiju u obliku **fluorescencije** [12]. Fluorescencija je vrsta luminiscencije.

**Luminiscencija** je emisija svjetlosti od strane tvari koja nije rezultat zagrijavanja, odnosno žarenja. Može biti uzrokovano kemijskim reakcijama, električnom energijom, naprezanjima kristala ili subatomske gibanjima. Fluorescencija je svojstvo tvari da

emitira svjetlosno zračenje kao rezultat izloženosti svjetlu ili drugim vrstama elektromagnetskog zračenja. Emitirana svjetlost u većini slučajeva ima veću valnu duljinu od svjetla kojem je tvar bila izložena i prestankom izloženosti, tvar prestaje fluorescentno svijetliti. Čestice koje su u upotrebi pri magnetskom ispitivanju presvučene su fluorescentnim slojem koje emitira svjetlost ukoliko su izložene ultraljubičastom svjetlu te omogućuju vidljivost pukotine u obliku nakupljenih čestica koje privuče rasuto magnetsko polje oko greške. Koriste se većinom žuto-zelene obojene čestice koje pružaju najbolji kontrast, ali u upotrebi su i čestice raznih drugih boja poput crvene, plave, žute i zelene.

**Ultraljubičasto (UV) svjetlo** je elektromagnetsko zračenje valne duljine od 400 do 10 nm. Kraće je od vidljive svjetlosti, ali veće valne duljine od rentgenskih zraka. Naziv ultraljubičasto ('izvan ljubičastog') potječe od činjenice da je ljubičasta boja najveća frekvencija vidljive svjetlosti.

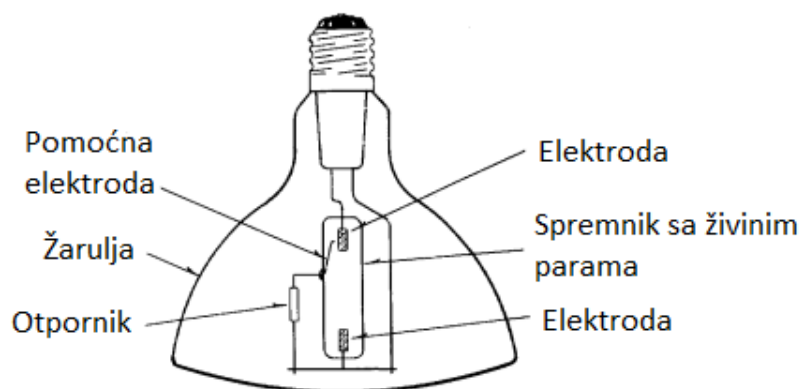
Za nerazorno ispitivanje upotrebljava se UV zračenje valne duljine između 350 do 380 nm. Ta se valna duljina koristi jer su ostale kategorije UV svjetla izrazito štetne za ljudsko zdravlje izazivajući opekline i očna oštećenja.



Slika 17: Elektromagnetski spektar

**UV lampa** se sastoji od transformatora za reguliranje struje i sklopa žarulje i filtera [5]. Filter ima zadaću da propušta svjetlo samo one valne duljine koje će omogućiti vidljivost fluorescentnim česticama. Filter se redovito mora čistiti kako ne bi prigušivao svjetlo i nikako se ne smije upotrebljavati lampa sa napuknutim filterom zbog opasnosti od očnih oštećenja.

U ispitivanjima se obično koristi **lampa sa živinim parama visokog pritiska**. Ona radi na principu zagrijavanja žive u žarulji strujom koja isparava i ionizira živu dok se ne stvori luk između glavnih elektroda čime se proizvodi svjetlost. Proces zagrijavanja i ioniziranja traje od 5 do 15 minuta od trenutka paljenja lampe.



*Slika 18: Žarulja sa živinim parama visokog pritiska*

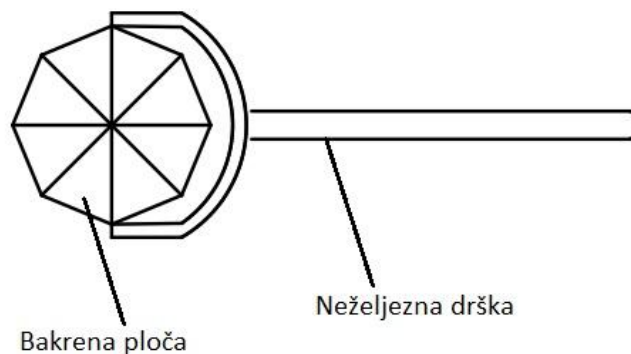
Drugi tip izvora UV svjetla su **standardne fluorescentne žarulje u obliku cijevi**. Svjetleća živina para niskog pritiska osvjetljava cijev koja je prevučena fosforom što rezultira emitiranjem uv svjetlosti od 320 do 440 nm. One su praktične za prijenosna ispitivanja i, za razliku od lučnih živinih žarulja, postignu punu snagu osvjetljavanja u nekoliko sekundi.

Postoje i **UV lampe visokog intenziteta** ( 4 puta veće snage) koje proizvode i do deset puta jače svjetlo od običnih lampi.

## 2.10. Mjerači magnetskog polja

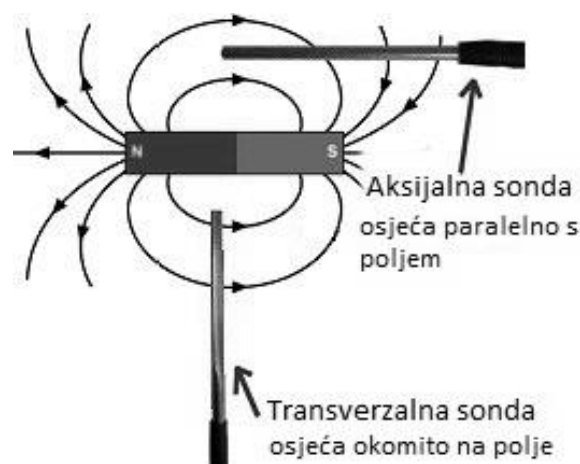
Vrlo je važno kod ispitivanja utvrditi kolike je jačine magnetsko polje potrebno, kao i njegovo usmjerenje kako bi ispitivanje bilo uspješno, odnosno kako bi magnetsko polje bilo adekvatno otkriti eventualne očekivane greške u materijalu.

Usmjerenje magnetskog polja određuje se **bertholdovim ispitnim tijelom**. Tijelo se sastoji od zaštitnog prstena u koji je postavljen željezni cilindar prekriven tankim slojem bakra. Snaga ili tok magnetskog polja su zadovoljavajući ukoliko se preko bakrene površine ispitnog tijela mogu vidjeti jasno definirane linije magnetskih čestica. Koristi se samo kod ravnih površina i suhog ispitivanja magnetskim česticama. Nakon očitavanja potrebno je izvršiti demagnetizaciju tijela.



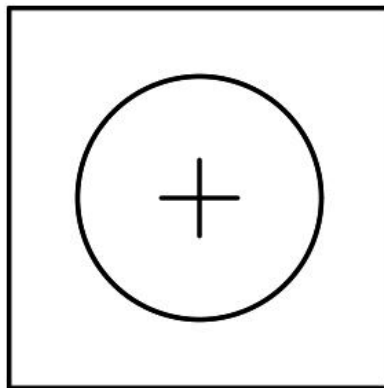
*Slika 19: Bertholdovo ispitno tijelo*

Magnetsko polje moguće je ispitati samo prekidanjem njegovih silnica [1]. Kako bi se čim neznatnije utjecalo na magnetsko polje, najbolja je metoda izbušiti malu rupu u materijalu i koristiti sonde Gauss metra za mjerenje snage polja u tom stvorenom vrlo malom zračnom rasporu, rupi. **Gauss metar** mjeri snagu polja tangencijalnog na površinu ispitivanog dijela. Sastoji se od zavojnice povezane sa galvanometrom, te mjeri promjene u magnetskom polju nastale pomicanjem ili ispitivanog materijala ili zavojnice, odnosno Gauss metra. Postoje sonde za mjerenje transverzalnih i sonde za mjerenje longitudinalnih polja. Gauss metri se mogu koristiti i za mjerenje zaostalih magnetskih polja u materijalu.



*Slika 20: Sonde Gauss metra*

Snagu i usmjerenje magnetskog polja utvrđuje se i čeličnim podmetačima, često zajedno sa gauss metrima. **Čelični podmetači** debljine nekoliko milimetara sa ugraviranim uzorcima postavljaju se i lijepe na ispitivani materijal superljepilima ili nefluorescentnim trakama otpornim na ulja tako da su uzorci okrenuti prema površini ispitivanog materijala. Nakon magnetizacije magnetskim poljem zadovoljavajuće snage i usmjerenja, čestice će oformiti željene uzorke. Ovo je jedina moguća metoda mjerenja magnetskih polja kod višesmjernih jedinica za ispitivanje i koristi se samo za mokro ispitivanje česticama. Bitno je napomenuti da je mjerenje ovom metodom relativno sporo, moguće je nepravilnim rukovanjem oštetiti ispitivani materijal i potrebno je da su površine materijala i podmetača čiste i suhe prilikom postavljanja i lijepljenja kako nebi došlo do zarobljavanja čestica ispod podmetača što bi utjecalo na rezultat mjerenja.



*Slika 21: Čelični podmetač*

## **2.11. Čestice**

Čestice koje se koriste za magnetsko ispitivanje su od feromagnetičnog željeznog materijala prevučene, odnosno obojane raznim fluorescentnim i nefluorescentnim bojama kako bi se osigurala vidljivost. Materijal od kojeg su sastavljenje mora imati svojstva da ih magnetsko polje vrlo dobro privlači, a istodobno da se one same jako ne magnetiziraju i međusobno ne prilipe.

### **2.11.1. Suho ispitivanje**

Postoji nekoliko metoda ispitivanja magnetnim česticama. Prva i najjednostavnija od njih je suho ispitivanje. Koristi se za ispitivanje zavara i vrlo plitkih



površinskih pukotina i to upotrebom poluvalne električne struje pošto nema potrebe za strujom velike mogućnosti prodiranja u materijal. Površina ispitivanog materijala smije sadržavati samo vrlo tanki sloj boje ili prevlake debljine manje od 0,1 mm. Prije ispitivanja, površina se stoga mora očistiti od svih nečistoća poput hrđe, oljuštene boje, prašine, ulja i masti koje mogu utjecati na mobilnost magnetskih čestica i miješati se s njima. Čestice za suho ispitivanje dolaze u gotovo svim bojama, dok su one za mokro ispitivanje žuto-zelene fluorescentne ili nefluorescentne čestice željeznih oksida crne, odnosno smeđe-crvene boje.



*Slika 22: Čestice za suho magnetsko ispitivanje*

Čestice za suho ispitivanje dolaze u veličinama od 50 do 150  $\mu\text{m}$  te je potrebno optimizirati izbor veličine čestica jer su finije čestice osjetljivije na magnetska polja, odnosno osjetljivije na vrlo male defekte, ali zbog svoje male veličine mogu zapeti u teksturi ispitivanog materijala, te su podložnije miješanju sa nečistoćom i prašinom i podložnije su utjecaju mikroklima u prostoru u kojem se ispitivanje odvija. Ti se utjecaji djelomično otklanjaju česticama koje se nalaze u suspenziji vode ili ulja, tj. mokrim ispitivanjem.

### **2.11.2. Mokro ispitivanje**

Magnetne čestice za mokro ispitivanje obično su željezni oksidi manje veličine, i to od 0,1 do 10  $\mu\text{m}$ , kako bi bile čim osjetljivije na magnetska polja i imale što veću mobilnost u suspenziji. Njihova vrlo mala veličina smanjuje brzinu taloženja čestica u

suspenziji. Mokro se ispitivanje se obično koristi kod stacionarnih jedinica za ispitivanje, ali se suspenzija može prskati i ručnim prskalicama što omogućava mobilnost metode. Ova je metoda ispitivanja bolja od suhe jer osigurava veću mobilnost čestica i njihovu bolju osjetljivost na magnetska polja.

Pri mokrom ispitivanju magnetnim česticama najčešće se koriste vodene suspenzije prvenstveno jer su jeftinije od uljnih, pružaju dobru sposobnost indikacija grešaka, nisu podložne zapaljenju ni isparavanjima i lakše se čiste od uljnih. Međutim, za razliku od uljnih, vodene suspenzije imaju korozivno djelovanje koje se sprječava dodavanjem aditiva, tj. korozivnih inhibitora. Ulja koja se koriste u suspenzijama su mineralna ulja na bazi nafte i bolja su sredstva za ispitivanje od vodenih suspenzija jer puno bolje vlaže ispitivani materijal i puno sporije isparavaju od vodenih.

Govoreći o česticama za ispitivanje, bitno je napomenuti i utjecaj njihovog oblika na ispitivanje. Duguljaste i vitke čestice lakše slijede magnetske silnice, ali takav njihov oblik ih čini manje pogodnim za raspršivanje, stoga se dodaju i čestice kružnog oblika koje imaju veliku mobilnost tvoreći tako optimalnu smjesu u vidu mobilnosti i osjetljivosti smjese na magnetska polja.

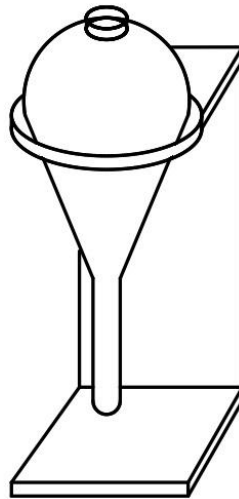
### **2.11.3. Korištenje magnetne gume**

Uz suho i mokro ispitivanje, treća metoda ispitivanja je metoda korištenjem magnetne gume, odnosno magnetnih čestica u otopini tekuće neobrađene gume. Nakon magnetizacije, otopina popuni eventualne pukotine i ostavi se da se ohladi i slegne od 10 do 30 minuta tvoreći negativ ispitivane površine u obliku gumenog sloja. Guma se za ispitivani materijal pričvršćuje glinom. Nakon ohlađivanja sloj se gume odstranjuje uz jasno vidljive pukotine na odstranjenom sloju. U ispitivanju se koriste čestice slične onima za suho ispitivanje. Ova se metoda upotrebljava za detektiranje vrlo malih pukotina zbog svoje veće osjetljivosti na posebno male pukotine od ostale dvije metode, a negativna strana joj je da zahtijeva znatno duže vrijeme ispitivanja od suhe ili mokre metode [1].

### **2.11.4. Koncentracija i stanje čestica u suspenziji**

Za ispitivanje magnetnim česticama vrlo je važno kontrolirati koliko se čestica nalazi u suspenziji kojom se ispitivani materijal prska kako bi se osiguralo da se na materijal nanese dovoljan broj čestica da bi eventualna greška postala vidljiva.

Koncentracija čestica se ispituje tako da se uzorak suspenzije čestica i tekućeg sredstva, koja se prethodno miješala bar 30 minuta kako bi se čestice ravnomjerno rasporedile u smjesi, ulije u lijevak za odvajanje kapaciteta 100 ml. Suspenzija se zatim demagnetizira kako nebi došlo do međusobnog zgrušavanja čestica i ostavi u lijevku minimalno 30 minuta ukoliko je riječ o vodenoj, a 60 ukoliko je riječ o uljnoj kako bi se na dnu lijevka deponirale čestice i očitala količina deponiranih čestica. Prihvatljiva količina, ako se radi o fluorescentnim, je 0,1 - 0,4 ml ili 1,2 - 2,4 ml ako se radi o nefluorescentnim česticama. Uz količinu, kako bi se osiguralo da čestice posjeduju dovoljnu vidljivost za ispitivanje, potrebno je UV lampom pregledati vidljivost fluorescentnih i vizualno pregledati vidljivost nefluorescentnih čestica.



*Slika 23: Lijevak za odvajanje*

Također, bitno je i pregledati eventualno prisustvo stranih čestica, odnosno nečistoća među magnetnim česticama poput prašine i otpale boje. Prisustvo stranih čestica ne smije premašiti 30 posto. Pregledati se mora i voda, odnosno ulje pod UV lampom kako bi se osiguralo da fluorescentne čestice nisu pustile svoju fluorescentnu boju pošto ispitivanje takvom smjesom ne bi polučilo zadovoljavajuće rezultate.

### **3. ISPITIVANJE PENETRANTSKIM TEKUĆINAMA**

Ispitivanje penetrantima je metoda ispitivanja bez razaranja koja se zasniva na curenju tekućine u površinske greške i pukotine svojstvom kapilarnosti i njihovom otkrivanju. Materijal se ispituje tako da se penetrantska tekućina nanese na ispitivani materijal i nakon određenog vremena ukloni, te se primjeni razvijač čime greške postaju vidljive pod bijelim svjetlom ili UV lampama zbog tekućine koja je iz greške iscurila.

Ispitivanje penetrantima je jedna od najčešće korištenih metoda ispitivanja bez razaranja zbog svoje jednostavne upotrebe i fleksibilnosti. Koristi se za ispitivanje širokog spektra materijala poput raznih metalnih materijala, stakla, keramike i polimera pod uvjetom da ispitivana površina navedenih materijala nije suviše gruba i porozna. Ispituju se razne pukotine u materijalima nastale uslijed zamora, trenja, udaraca ili preopterećenja. Također, ispituju se zavari, spojevi, kao i porozitet materijala.

Metoda je vrlo uspješna u otkrivanju vrlo malih površinskih grešaka i pukotina. Jeftino se i brzo mogu ispitati vrlo veliki strojni dijelovi raznih oblika. Ozbiljno ograničenje ove metode je to da se ispitivati mogu samo površinski diskontinuiteti na neporoznim materijalima pri čemu stanje površine u vidu završne obrade i hrapavosti mogu imati znatnog utjecaja na uspješnost ispitivanja. Uz navedeno, potrebno je da ispitivaču ispitivana površina bude izravno dostupna, čista i nakon ispitivanja očišćena od ostataka penetranta.

#### **3.1. Razvoj metode**

Prva upotreba sličnog principa ispitivanja i otkrivanja grešaka javlja se u 19. stoljeću pri ispitivanju željeznih i čeličnih dijelova u željezničkoj industriji.

Dijelovi poput raznih komponenti lokomotiva ili vagona bi se uronili u kerozinom razrijeđeno ulje. Dijelovi bi se nakon čišćenja od ulja premazali otopinom krede u alkoholu i nakon isparavanja alkohola i stvaranja tankog bijelog sloja, postale bi vidljive eventualne greške u ispitivanom dijelu tako da bi udarcima čekićem iscurilo, u pukotinama zaostalo, ulje koje bi zaprljalo kredom zabijeljenu površinu ispitivanog

dijela. U 30tim godinama 20tog stoljeća magnetsko ispitivanje je zamijenilo metodu korištenja ulja.

U 40tim godinama u upotrebu je ušla još jedna, s penetrantskim ispitivanjem, povezana metoda. Bila je to metoda ispitivanja koja se temeljila na otkrivanju površinskih defekata tako da se materijal prvo lakirao, pa udarao čekićima kako bi, udarcima potaknut, sloj laka najprije pukao na mjestu defekta čime bi površinski defekti bili otkriveni. Svega nekoliko godina kasnije, razvijena je suvremena metoda ispitivanja penetrantima.

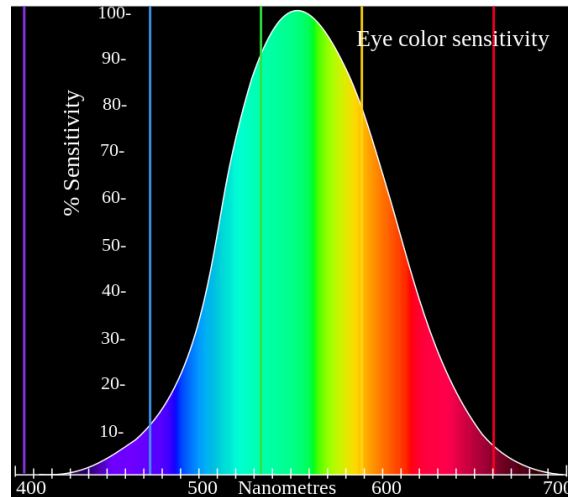
### **3.2. Temelji metode**

Oko je organ koji pretvara svjetlost u živčne impulse koje mozak onda interpretira stvarajući percepciju okoline, odnosno vid. Ljudsko oko ima ograničenu sposobnost uočavanja pukotina. Ta se ograničenost očituje u činjenici da na udaljenosti od otprilike 30 cm, koliko bi iznosila prosječna udaljenost na kojoj čovjek promatra površinu materijala, oko normalne oštine vida može raspoznavati razlike u bojama materijala, primjerice crno-sivih nijansi i linija ukoliko razmak između tih linija nije manji od 0,0088646 cm. Znači da će crno-bijele linije manjih dimenzija od navedenog oku predstavljati samo sivu masu, što dovodi do zaključka kako ljudsko oko neće moći uočiti vrlo male pukotine u materijalu [13].

Uz oštrinu vida, odnosno moć razlučivanja, vrlo je bitna sposobnost oka da uoči nijanse boja. Ljudsko oko može razlikovati oko 10 milijuna nijansi boja. Primjerice, ustanovljeno je da normalno oko može razlikovati nijansu sive samo do dva posto pune svjetlosti sive boje. Posljedično, ukoliko se nijansa boje pukotine razlikuje u manje od dva posto u odnosu na okolnu boju materijala, oko tu pukotinu neće biti u stanju uočiti.

Iako je često različiti stupanj jačine svjetlosti koje emitiraju pojedini objekti sasvim dovoljan za raspoznavanje različitih objekata u okolini, boja daje dodatnu dimenziju u razlikovanju svijeta. U očnoj jabučici ljudskog oka, uz staklasto tijelo, leću, rožnicu, zjenicu, šarenicu i bjeloočnicu, na stražnjem dijelu se nalazi i mrežnica, tj. unutarnja ovojnica oka koja sadrži vidne stanice - štapiće i čunjiće. Štapići reagiraju na prigušeno svjetlo i zaslužni su za noćni vid i razlikovanje crnog i bijelog. Sastoje se

samo od jednog fotopigmenta. Čunjići reagiraju na jako svjetlo, omogućuju visoku rezoluciju vida i viđenje boja. Postoje tri tipa čunjića ovisno o fotopigmentu koji sadrže. Svaki od tih fotopigmenata ima drugačiju osjetljivost na svjetlost različitih valnih duljina [14].



Slika 24: Osjetljivost oka na boje različitih valnih duljina

Iz dijagrama na Slici 24 je vidljivo da će pri normalnoj svjetlosti oko biti najosjetljivije na žuto-zelenu svjetlost čija valna duljina iznosi oko 500 nm. Iz tog se razloga fluorescentni penetranti prave sa fluorescencijom od 550 nm kako bi pružili optimalnu vidljivost, odnosno osjetljivost oka na njih u uvjetima ispitivanja materijala.

### 3.3. Penetrantski materijali

Kako bi ispitivanje materijala penetrantima bilo zadovoljavajuće i uspješno otkrivalo greške, penetrantski materijali moraju posjedovati nekoliko univerzalno važnih karakteristika; moraju se moći lako i ravnomjerno nanijeti po ispitivanoj površini kako bi mogli biti jednostavno i brzo uvučeni u pukotine. Za vrijeme uklanjanja materijala s površine moraju ostati u pukotinama i to u tekućem obliku kako bi pri daljnjem procesu sušenja i razvijanja izašli iz pukotine na površinu. Jednom na površini, penetrantski materijali moraju biti vidljivi pri običnom ili ultraljubičastom svjetlu i nesmiju biti škodljivi za okolinu, ispitivača ni za ispitivani materijal.

Daljnje, specifične karakteristike penetrantskih materijala se formuliraju ovisno o vrsti i stanju ispitivanog materijala (hrapavije ili glatkije površine), očekivanim greškama (veće ili manje greške) i načinu ispitivanja (obično ili UV osvjetljenje).

### 3.3.1. Sposobnost namakanja

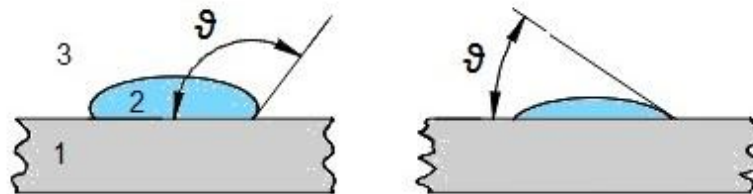
Jedno od najznačajnijih svojstava penetrantskih materijala, koje ima presudnu ulogu u osjetljivosti penetranta na otkrivanje grešaka, je **sposobnost namakanja**, odnosno **kvašenja ili močenja površine**. Da bi se ta sposobnost objasnila, potrebno je razumijeti površinske pojave, odnosno pojave koje se događaju na granicama različitih agregatnih stanja, primjerice tekućina - krutina. Naime, do površinskih pojava dolazi zbog činjenice da molekule koje se nalaze na površini tvari imaju drugačija svojstva od onih koje se nalaze u unutrašnjosti tog tijela. Te molekule na površini, u odnosu na one u unutrašnjosti, imaju suvišak energije odnosno površinsku energiju koja uzrokuje površinsku napetost tvari. Tu je napetost moguće smanjiti povišenjem temperature ili stvaranjem geometrijskih oblika najmanje površine kao što je kugla. Smanjenjem površinske napetosti može nastupiti močenje. Kako bi se namakanje dogodilo, pri kontaktu tekućine i krutine, privlačne, adhezijske, sile između ta dva različita materijala moraju nadvladati sile koje drže molekule tekućine na okupu, tj. nadvladati kohezivne sile tekućine. U suprotnom bi se molekule tekućine grupirale i zgusnule i nebi došlo do namakanja krute površine. Ukratko, ukoliko je površinska napetost tekućine manja nego napetost krute tvari, događa se namakanje.

Stavi li se kaplja neke tekućine na horizontalnu čvrstu podlogu, s kojom tekućina kemijski ne reagira, kaplja može ili poprimiti određeni oblik ili se raspršiti po čitavoj površini. Ravnotežni oblik kaplje određen je ravnotežom između gravitacijskih sila i sila napetosti površine. Jedan od ključnih značajki oblika kaplje jest da se površine kaplje i podloge sastaju pod nekim kutom. Taj se kut zove **okrajnji kut  $\vartheta$**  i za stalnu temperaturu ovisi samo o svojstvima tekućine i svojstvima površine podloge [15].

Označimo li sa  $\sigma_{13}$  površinsku napetost podloge i zraka, sa  $\sigma_{23}$  površinsku napetost između tekućine i zraka, a sa  $\sigma_{12}$  napetost između podloge i tekućine (Slika 25a), dolazimo do sljedećeg izraza za izračunavanje okrajnjeg kuta:

$$\cos\vartheta = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}} \quad (4)$$

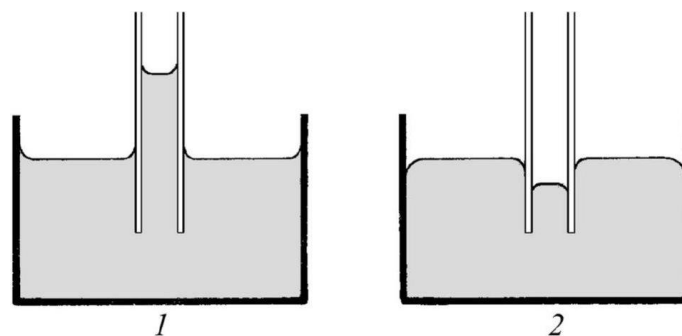
Kutevi koji zadovoljavaju datu relaciju leže u intervalu od 0 do 180°. Stoga vrijedi da tekućina idealno moči čvrstu podlogu ukoliko je okrajnji kut 0, a savršeno ne moči površinu ukoliko kut iznosi 180°. Dakle, što je kut bliže nuli, tekućina, u ovom slučaju penetrant, bolje moči podlogu ispitivanog dijela.



Slika 25a i 25b: Loše (a) i dobro močenje površine (b)

### 3.3.2. Kapilarnost

Sa moći namakanja povezana je i sposobnost ispunjavanja praznina. Za ispunjavanje praznina, odnosno pukotina, zaslužna je kapilarnost. Kapilarnost je izravna posljedica prethodno opisanih odnosa između sila adhezije i kohezije. Tekućina koja moči težit će da namoči unutarnje stijenke kapilare (uske cjevčice) čime bi nastala velika slobodna površina tekućine. Pošto površinska napetost teži tu površinu svesti na minimum, tekućina će se izdizati u vis iznad površine dokle god se sila površinske napetosti ne izjednači sa težinom stupca tekućine u kapilari (Slika 26 - 1). Ovaj proces vrijedi i u obrnutom slučaju, odnosno tekućina će se kapilarno spuštati ispod razine koju bi normalno zauzimala (Slika 26 - 2). U ovom slučaju ulogu kapilare ili cjevčice preuzima pukotina u materijalu. Penetrant će nastaviti ispunjavati pukotinu dok god suprotstavljajuća sila ne izjednači kapilarni pritisak.



Slika 26: Kapilarno uzdizanje (1) i kapilarno spuštanje (2)



Kapilarna se sila i kapilarni pritisak mogu izraziti izrazima [13]:

$$Sila = 2 \cdot pr \cdot s \cdot \cos\Phi \quad (5)$$

$$Pritisak = (2 \cdot s \cdot \cos\Phi)/r \quad (6)$$

$2pr$  označava duljinu kontakta tekućine i krutine u čemu je  $r$  radijus pukotine,  $s$  označava površinsku napetost para tekućine i plina, a  $\Phi$  kut dodira tekućine i krutine.

### 3.3.3. Specifična gravitacija i viskoznost

Viskoznost i specifična gravitacija nemaju velikog utjecaja na sposobnost penetranta za ispunjavanje pukotine, ali vrijedi ih napomenuti.

Pri kapilarnom ulaženju penetranta u pukotinu, gravitacijska sila dodatno potiskuje tekućinu u pukotinu [13]:

$$Sila = \rho r^2 h \rho g \quad (7)$$

$r$  je radijus pukotine,  $h$  visina penetranta iznad njegove slobodne površine,  $\rho$  gustoća penetranta, a  $g$  gravitacijska akceleracija.

Isto tako, gravitacija otežava izlaženje penetranta iz pukotine na površinu ispitivanog materijala:

$$Sila = hA\rho \quad (8)$$

$h$  označava visinu penetranta ispod površine,  $A$  presjek pukotine i  $\rho$  gustoću penetranta.

Iako za ispitivanje gotovo zanemariva, gravitacijska sila utječe na brzinu djelovanja penetranta.

**Viskoznost** opisuje otpor koju tekućina pruža gibanju, odnosno tečenju. Ona je također za ispitivanje zanemariva, ali utječe na brzinu ispunjavanja pukotine od strane penetranta.

### 3.3.4. Podjela penetranta

Penetrantski materijali dolaze u dva osnovna tipa:

Tip 1 - fluorescentni penetranti

Tip 2 - vidljivi penetranti

**Fluorescentni penetranti** sadrže fluorescentne boje te zahtijevaju prigušeno osvjetljenje i UV lampu kako bi bili vidljivi. Greške su uočljivije nego korištenjem vidljivih penetranta, ali oni ne zahtijevaju prigušeno osvjetljenje ni lampe i obično su crvene boje kako bi pružili što veći kontrast bijeloj boji razvijaača. Za razliku od upotrebe fluorescentnih, pri terenskim je ispitivanjima lakše koristiti **vidljive penetrante** jer ne zahtijevaju dodatno posebno osvjetljenje i opremu. Jednako tako, vidljivi penetranti pružaju bolje rezultate ispitivanja pri ispitivanju grubljih, hrapavijih površina od fluorescentnih.

Ovisno o snazi, tj. mogućnosti otkrivanja indikacija, penetrantski se materijali dijele na:

- a) Razina 0,5 - ultra niska osjetljivost
- b) Razina 1 - niska osjetljivost
- c) Razina 2 - srednja osjetljivost
- d) Razina 3 - visoka osjetljivost
- e) Razina 4 - ultra visoka osjetljivost

Ukoliko se primjerice očekuje otkrivanje grešaka samo relativno velikih dimenzija, preporučljivo je koristiti penetrante slabije osjetljivosti kako bi se smanjila vjerojatnost otkrivanja manjih, za konkretno ispitivanje, nevažnih grešaka i lažnih indikacija koje mogu biti u većem broju otkrivene upotrebom penetranta visoke osjetljivosti.

Kao što je ranije istaknuto, penetranti vidljivi pri običnom svjetlu su obično crvene boje radi što većeg kontrasta. S druge strane, fluorescentni penetranti sadrže jednu ili više boja koje pri apsorpciji elektromagnetskog zračenja određene frekvencije prime energiju. Primljena energija promijeni elektronsku konfiguraciju atoma. Ta se promjena očituje u prelasku molekule u više, nestabilno energetska stanje. Pošto molekule teže stabilnosti i što nižem energetskom stanju, višak energije pri povratku u stabilno stanje emitiraju u obliku fluorescencije.

**Temperatura** igra vrlo negativnu ulogu za fluorescentne materijale. Naime, empirijski je potvrđeno da čestice pri izloženosti intenzivnom ultraljubičastom osvjetljenju i povišenim temperaturama gube intenzitet fluorescencije. To se može objasniti sljedećim; pri prelasku atoma natrag u niže, stabilnije energetske stanje, dio se oslobođene energije oslobađa kao fluorescentna energija, a dio kao nefluorescentna. Nefluorescentni dio oslobođene energije povezan je sa molekularnim popuštanjem uslijed kolizija ili kemijskih reakcija. Porast temperature uzrokuje povećanu pokretljivost atoma što dovodi do većeg broja molekularnih kolizija. Rezultat većeg broja kolizija je povećana relaksacija molekula čime se povećava udio nefluorescentne energije koja se oslobađa umjesto fluorescentne [13]. Isto tako, visoka temperatura uzrokuje isparavanje čime se povećava neželjena viskoznost penetranta.

Pri temperaturi većim od 71 °C većina penetranta u upotrebi se počinje razgrađivati tako da nije preporučljivo premašivati navedenu temperaturu. Optimalna svojstva penetranta se mogu očekivati na temperaturama od 27 do 49 °C. Manje temperature povećavaju površinsku napetost i smanjuju kapilarne sile što negativno utječe na tok penetranta, dok povećane temperature uzrokuju prebrzo isparavanje i sušenje penetrantskih tekućina.

### **3.5. Koraci pri ispitivanju penetrantima**

Svako se ispitivanje penetrantima odvija u nekoliko temeljnih koraka:

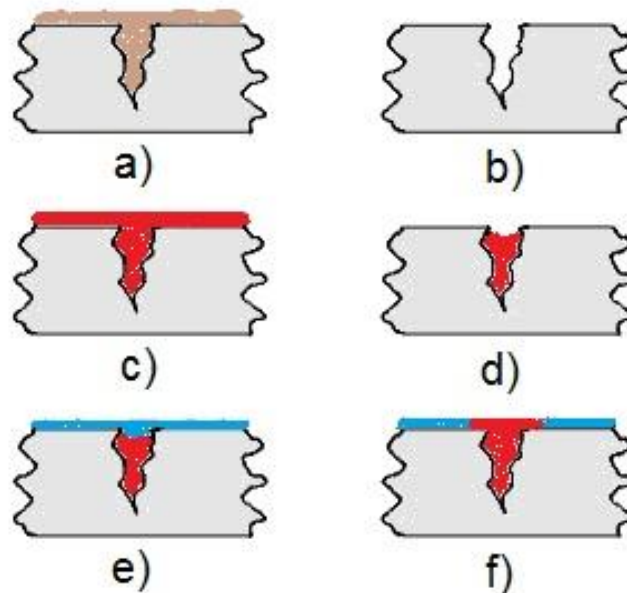
Korak 1. - Priprema površine materijala koji ima biti podvrgnut ispitivanju penetrantima, odnosno čišćenje površine od bilo kakvih naslaga stranih čestica - ilustracije a) i b)

Korak 2. - Nanošenje penetranta na očišćenu površinu kako bi se penetrant uvukao u eventualne pukotine - ilustracija c)

Korak 3. - Odstranjivanje viška penetranta sa površine ispitivanog materijala - ilustracija d)

Korak 4. - Nanošenje razvijaača na površinu ispitivanog materijala kako bi, pod djelovanjem razvijaača, u pukotinama zaostali penetrant iscurio iz pukotina - ilustracija e)

Korak 5. - Pregled ispitivane površine u cilju otkrivanja indikacija - ilustracija f)



*Slika 27: Koraci u ispitivanju penetrantima*

### 3.6. Priprema površine

Nečistoće mogu spriječiti ulazak penetranta u pukotinu. Stoga je za ispitivanje penetrantima od presudne važnosti dobra priprema, odnosno čistoća površine namijenjene ispitivanju. Prije nanošenja penetranta potrebno je osigurati da je površina ispitivanog materijala očišćena od bilo kakvih nečistoća poput prašine, oljuštene boje, ulja, masti, premaza, eventualnih ostataka ranijih ispitivanja, kao i od čestica zaostalih zbog prethodnih strojnih obrada. Prethodne strojne obrade kao što su honanje, lepanje, brušenje, pjeskarenje ili sačmarenje mogu ostaviti ozbiljne količine zaostalih finih čestica na površini materijala namijenjenog ispitivanju. Najbolja metoda uklanjanja takvih čestica je jetkanje površine prije ispitivanja, odnosno uklanjanje vrlo tankog površinskog sloja djelovanjem nagrizajućih tvari

poput raznih kiselina. Također, nakon jetkanja, a prije ispitivanja, potrebno je odstraniti sredstvo za jetkanje s površine materijala.

Potrebno je paziti da sredstvo za čišćenje poput deterdženta i sapuna ne začepi pukotine u materijalu, a posebno treba izbjegavati sredstva za čišćenje koje sadrže silikate u udjelu većem od 0,5 posto jer silikati tvore premaz koji sprječava ulazak penetranta u pukotine. Također nije preporučljivo čišćenje površine namijenjene ispitivanju visokotlačnim peraćima jer takvo čišćenje može odvojiti čestice materijala s površine koje onda začepuju pukotine.

### **3.7. Nanošenje i oprema za nanošenje penetranta**

Penetranti se mogu nanijeti na ispitivani materijal raznim metodama i to prskanjem, kistovima ili uranjanjem u kupku s penetrantom. **Vrijeme zadržavanja** penetranta na materijalu (ukupno vrijeme koje penetrant i ispitivani materijal provedu u kontaktu) je vrlo važno jer je potrebno izvjesno vrijeme da penetrant bude uvučen u sve pukotine. Na vrijeme zadržavanja utječe čitav niz faktora:

- struktura samog materijala
- površinska napetost penetranta
- kut dodira penetranta i ispitivane površine
- viskoznost
- dubina i promjer pukotine i sa tim dimenzijama povezane kapilarne sile

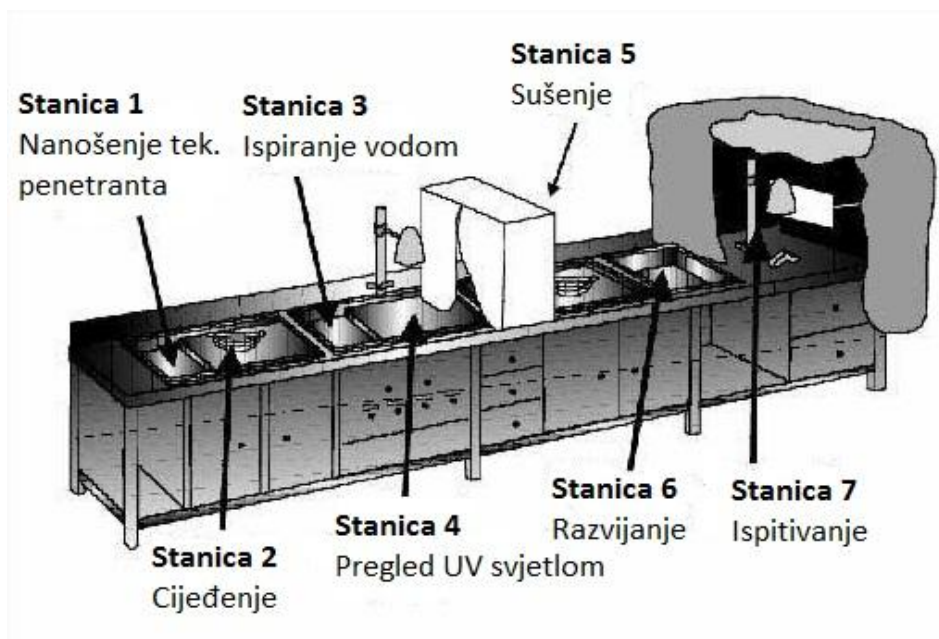
To vrijeme iznosi od 5 do 30 minuta ovisno o vrsti materijala, prijašnjoj obradi materijala i vrsti grešaka koje se očekuju i utvrđuje se eksperimentalno.

Važnu ulogu u nanošenju imaju elektrostatički raspršivači koji rade na principu stvaranja razlike potencijala između ispitivanog dijela u kontaktu sa tlom (uzemljenje) i raspršivača. Negativno nabijena elektroda na mlaznici raspršivača negativno nabija čestice tvari koja se nanosi čime uzrokuje stvaranje privlačnih sila između tvari koja se nanosi i ispitivanog materijala što znatno povećava efektivnost nanošenja. Iako je oprema skuplja nego kod korištenja sprejeva ili kupki, takvi raspršivači imaju veoma veliku brzinu nanošenja i ujednačeno pokrivaju materijal.

Penetranti imaju vijek trajanja u obliku aerosola u limenkama pod tlakom od oko dvije godine, ali je boca pod tlakom osjetljiva na temperature veće od 55 °C.

Neprenosivu opremu predstavljaju jedinice za ispitivanje u kojima glavnu ulogu imaju kupke.

U kupku sa penetrantom uranjati se može na dva načina; tako da ispitivani dio ostane uronjen za vrijeme zadržavanja penetranta, što pruža najbolje kvašenje površine, ili da se prethodno uronjeni ispitivani dio pusti da se cijedi za vrijeme zadržavanja. Pokazalo se da ukoliko se penetrant cijedi za vrijeme zadržavanja, osjetljivost na otkrivanje grešaka se povećava. Razlog tome je povećana vidljivost i obojanost grešaka zbog veće koncentracije obojanih čestica nastale uslijed isparavanja tekućine tijekom cijedenja [13].



*Slika 28: Tipična jedinica za ispitivanje fluorescentnim penetrantom srednje veličine*

Penetranti mogu biti klasificirani prema četiri metode korištene za otklanjanje suvišnog penetranta:

Metoda A - perivi vodom

Metoda B - postemulzivni, lipofilni

Metoda C - otapalom odstranjivi

Metoda D - postemulzivni, hidrofilni

**Penetranti perivi vodom (A)** su najekonomičniji za upotrebu i sadrže deterdžente kao emulzivno sredstvo koje omogućava ispiranje penetranta s ispitivane površine. Potrebno je vrlo pažljivo ispirati penetrant, pod što većim kosim kutem ( $>45^\circ$ ) kako se nebi uklonio penetrant iz pukotine.

Ukoliko je prisutna mogućnost uklanjanja penetranta iz same pukotine prilikom čišćenja ostale površine, mogu se koristiti postemulzivni penetranti kojima je potreban poseban emulgator da se penetrant može ukloniti. Takvi su **lipofilni postemulzivni penetranti (B)** koji su topivi u ulju i reagiraju s emulgatorom na bazi ulja kako bi se uklonili s ispitivane površine.

**Hidrofilni postemulzivni penetranti (D)** su oni koji sadrže deterdžent topiv u vodi koji podiže suvišni penetrant s površine kako bi se odstranio. Hidrofilni penetranti su manje osjetljivi na vrijeme uklanjanja, dok će kod lipofilnih penetranta vrijeme od samo nekoliko desetaka sekundi imati znatan utjecaj na ispitivanje. Dakle, pri upotrebi postemulzivnih penetranta, nakon nanošenja penetranta i puštanja da se penetrant izvjesno vrijeme zadrži na materijalu, potrebno je prvo ukloniti prvi sloj penetranta, zatim u dodatnom koraku nanijeti emulgator i pustiti ga određeno vrijeme da djeluje, tek nakon čega se penetrant može ukloniti kako bi se ispitivani dio osušio, nanio razvijač i ispitao. Taj dodatan korak kojeg postemulzivni penetranti zahtijevaju, povećava vrijeme ispitivanja, a samim time i cijenu procesa ispitivanja.

**Otapalom odstranjivi penetranti (C)** se koriste većinom za ispitivanje malih površina. Pri ručnom uklanjanju otapalom odstranjivih penetranta potrebno je odstraniti penetrant i otapalo sa što manjim brojem brisanja jer se svakim dodatnim brisanjem povećava mogućnost uklanjanja penetranta i iz same pukotine.

### 3.8. Razvijači

Uloga razvijača je da izvuče, u pukotinama zaostali, penetrant na površinu ispitivanog materijala kako bi se greška mogla uočiti.

Klasificirani su u šest oblika:

1. Oblik a - suhi prašak
2. Oblik b - topiv u vodi

3. Oblik c - vodena suspenzija
4. Oblik d - nevodeni Tip 1 - fluorescentni (na bazi otapala)
5. Oblik e - nevodeni Tip 2 - vidljivi (na bazi otapala)
6. Oblik f - za specijalne namjene

**Suhi prašak**, kao prvi oblik razvijaa, je najmanje efikasni oblik razvijaa, odnosno najmanje osjetljiv na otkrivanje grešaka. Razvijaa je obično bijeli prašak koji se može nanositi na materijal prašenjem ili umakanjem cijelog ispitivanog dijela u spremnik s praškastim razvijaaem. Kao i penetranti, i razvijaa u prašak može biti nanesen elektrostatičkim raspršivačem koji statički naelektrizira ispitivani materijal kako bi elektricitet privukao čestice praška. Prašak se ne može nanijeti uniformno kao što se može tekućina, pa se razvijaa u tom obliku rijetko koristi zbog svoje niske osjetljivosti na otkrivanje grešaka. Osvjetljenje igra značajnu ulogu kod praškastog razvijaa, a indikacije otkrivene praškom imaju oštre konture zbog limitirane sposobnosti širenja praška u pukotine.

**Razvijaa topiv u vodi** je najpoželjnije na suhi ili mokri ispitivani materijal nanositi prskanjem i zatim sušiti u sušilicama sa vrućim zrakom. Ovakvim je razvijaaem vrlo lagano prekriti čitav dio namijenjen ispitivanju. Ispitivani dijelovi pravilno tretirani topivim razvijaaem imat će ujednačeni bijeli sloj po cijeloj površini. Međutim, taj će sloj biti relativno blijed i neće imati optimalni kontrast. Indikacije otkrivene korištenjem ovakvog razvijaa imat će slabe i zamagljene konture.

**Razvijaači u obliku vodene suspenzije** sadrže netopive čestice u vodi. Nanose se uranjanjem ili polijevanjem ispitivanog dijela, ali najpoželjnije je prskanjem jer penetrant nanesen prskanjem pruža veću osjetljivost na otkrivanje grešaka. Također se ovakav razvijaa mora sušiti vrućim zrakom te će razvijati svijetle i oštre indikacije.

**Nevodeni razvijaači** smatraju se najosjetljivijim na otkrivanje grešaka. Nanose se na isključivo suhu površinu materijala. Pošto dolaze u limenkama pod tlakom, vrlo su prijenosni, nanose se prskanjem i pružaju vrlo dobar kontrast i vidljivim i fluorescentnim česticama. Zbog svoje zapaljivosti, suše se prirodno, na zraku. Mana im je teškoća uklanjanja nakon ispitivanja.

U slučajevima kad je potreban trajan trag eventualnih grešaka, koriste se razvijaači u obliku polimera ili laka.



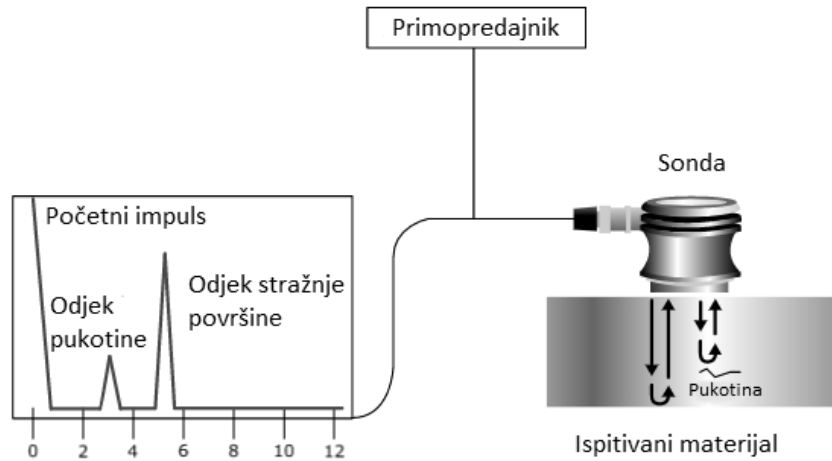
## **4. ISPITIVANJE ULTRAZVUKOM**

Ultrazvučno ispitivanje materijala temelji se na upotrebi ultrazvuka, odnosno zvuka čija je frekvencija iznad gornje granice čujnosti normalnog ljudskog uha. Metoda funkcionira na principu odbijanja ultrazvučnog vala od defekta u materijalu i prikazivanju te reflektirane energije u odnosu na vrijeme. Na temelju toga, određuje se dubina na kojoj se val reflektira, odnosno položaj defekta u materijalu. Pri ispitivanju materijala koriste se veoma kratki ultrazvučni impulsi frekvencije od 0,1 do 15 MHz (pa čak i do 50 MHz).

Zbog velike preciznosti u odnosu na ostale metode ispitivanja bez razaranja, velike moći penetracije u ispitivani materijal i mogućnosti otkrivanja vrlo dubokih defekata, zbog velike osjetljivosti na otkrivanje i najmanjih diskontinuiteta, primjenjuje se u mnogim djelatnostima poput aeronautike, automobilske industrije, željezničkom prometu,... Koristi se za ispitivanje raznih materijala počevši od čelika, raznih legura, kompozita, pa sve do drva i betona.

### **4. 1. Osnovni principi**

Tipični UZ sustav ispitivanja sastoji se od nekoliko funkcionalnih dijelova, poput primopredajnika zvučnog impulsa, sonde i uređaja za prikazivanje. Primopredajnik zvučnog impulsa je uređaj koji može proizvesti električni impuls visokog napona. Pobuđena primopredajnikom, sonda stvara zvučnu energiju visoke frekvencije. Zvučna energija se širi kroz materijal u obliku valova. Kada val naiđe na diskontinuitet (poput pukotine) u svojoj putanji, dio energije će se reflektirati natrag od površine defekta. Reflektirani signal vala je zatim transformiran od strane sonde u električni signal i prikazan je na zaslonu. Na sljedećoj ilustraciji prikazan je reflektirani signal u odnosu na vrijeme od nastajanja signala do njegovog odjeka (eho). Vrijeme putovanja signala se može izravno povezati sa udaljenosti koju je val prešao. Ponekad na temelju signala može biti dobivena i informacija o lokaciji, veličini i orijentaciji defekta (objekta od kojeg se signal reflektira) [16].



*Slika 29: Prikaz načina djelovanja ultrazvučnog ispitivanja*

Ultrazvučno ispitivanje je vrlo korisna i svestrana metoda ispitivanja bez razaranja. Neke prednosti metode uključuju [17]:

- osjetljiva je na otkrivanje površinskih i potpovršinskih grešaka
- dubina penetracije je superiorna ostalim metodama bez razaranja
- pri upotrebi impuls-odjek tehnike dovoljan je samo jednostran pristup ispitivanom dijelu
- vrlo je pouzdana i točna u otkrivanju položaja i veličine greške
- potrebna je minimalna priprema ispitivanog materijala
- elektronička oprema pruža trenutačne rezultate

Uz navedene prednosti, ultrazvučno ispitivanje ima i svojih mana kao što su:

- površina mora biti pristupačna za prenošenje ultrazvuka
- vještina i uvježbanost ispitivača su ekstenzivniji u odnosu na neke druge metode
- obično zahtijeva posredno sredstvo koje prenosi zvuk u ispitivani dio
- grubi, nepravilni, vrlo mali, izrazito tanki ili nehomogeni materijali su vrlo zahtijevni za ispitivanje
- lijevano željezo i drugi grubozrnati materijali su teški za ispitivanje zbog loše vodljivosti zvuka i visokog signala šuma
- za umjeravanje opreme i karakterizaciju indikacija potrebni su referentni uzorci i standardi

## 4.2. Razvoj metode

Primjena ultrazvuka započinje u 30tim godinama 20tog stoljeća. Vrhunac primjene ultrazvuk doživljava u Drugom svjetskom ratu gdje se primjenjuje u vojsci, mornarici, medicini, seizmici, inženjerstvu... Karakteristični uređaji koji funkcioniraju na upotrebi ultrazvuka su ultrazvučne sonde, sonari, dubinomjeri i različiti ehoskopi. Ubrzani razvoj potaknut tehnološkim dostignućima 50tih godina nastavlja se i danas. Razvoj računala u posljednjih nekoliko desetljeća omogućio je tehničarima i inženjerima veće mogućnosti uz sve manje i jednostavnije uređaje.

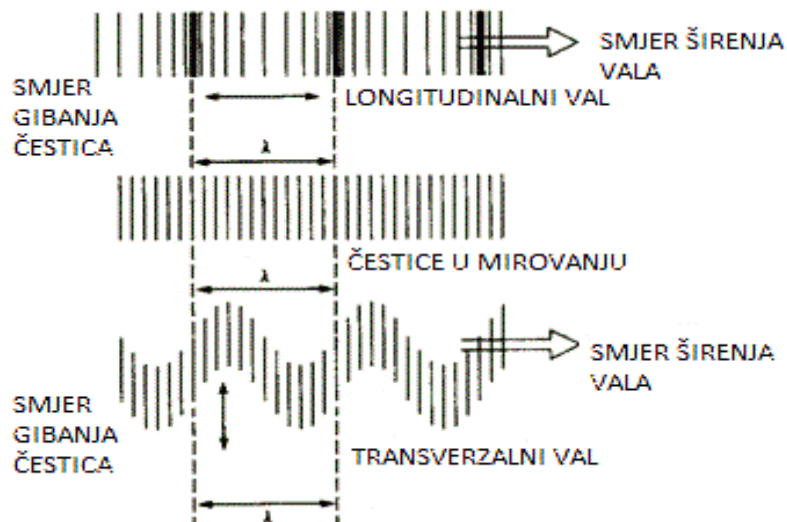
Neki uređaji imaju mogućnost prilagođavanja mjerenja u odnosu na površinsko stanje materijala. To vodi do točnijeg i ponovljivijeg mjerenja. Mnogi ultrazvučni detektori imaju trigonometrijsku funkciju koja omogućava brzo i točno određivanje lokacije greške kod primjene ispitivanja smičnim valovima. Uz kompjuterizaciju, prisutna je i automatizacija i robotizacija ultrazvučnih ispitivanja poput ispitivanja velikih dijelova složenih oblika pomoću jedne ili više sonda (primopredajnika), te računalnu evaluaciju i arhiviranje dobivenih podataka.

## 4.3. Valovi

Sve su stvari sastavljene od atoma koji mogu biti prisiljeni vibracijski se gibati. Na atomskoj razini postoje mnogi različiti uzroci vibracijskog gibanja, a jedan od uzroka može biti i zvučni val. U prirodi postoji nekoliko vrsta valova: mehanički, elektromagnetski i valovi materije. Valovi materije jesu valovi pridruženi česticama - molekulama, atomima, protonima, elektronima. Elektromagnetski valovi za svoje širenje ne zahtijevaju medij, odnosno mogu se širiti u vakuumu i to brzinom svjetlosti (radio i TV valovi, mikrovalovi, X-zrake).

Val je dakle, poremećaj sredstva u kojem putuje. **Akustika** je disciplina koja se bavi tim vremenski promjenjivim deformacijama ili vibracijama materijala. Fokusirana je na čestice koje sadrže mnogo atoma koji se unisono gibaju praveći mehanički val koji pravi elastične oscilacije u mediju. Zvuk je mehanički val čija su osnovna svojstva ponašanje prema Newtonovim zakonima i mogu postojati, tj. širiti se isključivo u mediju (voda, zrak, razni kruti materijali). Uz zvučne valove, mehanički valovi su još i primjerice seizmički te vodeni valovi. U krutim tvarima zvučni se valovi mogu širiti na

temelju četiri temeljna principa koji su bazirani na načinu kako čestice osciliraju. Zvuk se može širiti longitudinalnim (uzdužnim) valovima, transverzalnim (smičnim) valovima, površinskim valovima i u tankim materijalima tanjurastim valovima. Longitudinalni i transverzalni valovi su dvije metode širenja najviše u upotrebi kod ultrazvučnog ispitivanja.



Slika 30: Širenje longitudinalnih i transverzalnih valova

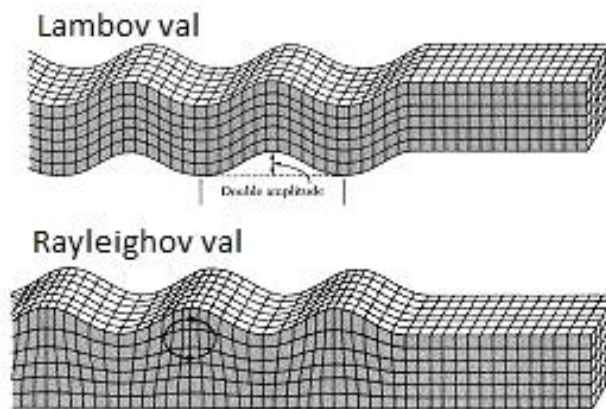
**Longitudinalni valovi** mogu nastati u tekućinama, kao i u krutim materijalima jer energija putuje atomskom strukturom serijama kompresijskih i ekspanzijskih pokreta.

**Transverzalni valovi** osciliraju pod pravim kutem (transverzalnim) na smjer širenja. Trebaju kruti materijal za efektivno širenje, stoga tekućine i stakla ne provode dobro transverzalne valove. Ovi su valovi relativno slabi u odnosu na longitudinalne.

U zraku, zvuk putuje pomoću kompresije i ekspanzije molekula zraka u smjeru širenja. U krutinama, međutim, molekule mogu podržavati vibracije i u drugim smjerovima. Zato se mogu, uz longitudinalne i transverzalne, javiti i druge vrste valova. Neki od njih, poput **Rayleighovih** i **Lambovih valova** su također korisni za ultrazvučno ispitivanje.

Površinske Rayleighove valove karakterizira kombinacija longitudinalnih i transverzalnih gibanja koja stvara eliptično simetrično gibanje - titranje čestica, pri čemu je glavna os okomita na površinu krutine. Ti su valovi korisni jer su vrlo osjetljivi na površinske defekte i ostale značajke površina. Lambovi valovi su kompleksni vibracijski valovi koji se šire paralelno na površinu krutine kroz čitavu debljinu

materijala. Pošto ovi valovi putuju i nekoliko metara kroz čelik, korisni su za ispitivanje žica i cijevi.



Slika 31: Lambovi i Rayleighovi valovi

#### 4.4. Fizikalna svojstva zvuka

Zvučni val je određen amplitudom i frekvencijom, valnom duljinom, intenzitetom, brzinom zvuka, smjerom, od kojih su najvažnije a) amplituda i b) frekvencija.

a) **Amplituda zvučnog vala** (tiraja) odnosi se na amplitudu zračnog pritiska u valu, tj. označava udaljenost najviše i najniže razine zvuka. U prijevodu, amplituda označava glasnoću zvuka te se povećanjem amplitude povećava jakost zvuka.

b) **Frekvencija** jest broj titraja u jednoj sekundi. Ona označava visinu zvuka. Čujno područje ljudskog uha je između 20 Hz i 20 000 Hz (20 kHz). Područje zvuka ispod 20 Hz naziva se infrazvuk, a područje iznad ljudskog čujnog područja, dakle iznad 20 kHz naziva se ultrazvuk. Povećanjem frekvencije, valu se smanjuje dužina.

##### 4.4.1. Valna duljina

Vrlo važna karakteristika je valna duljina  $\lambda$  [m] koja se izračunava dijeljenjem brzine rasprostiranja vala u sredstvu  $v$  [m/s] i njegove frekvencije  $f$  [Hz]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (9)$$

U UZ ispitivanju kraće valne duljine rezultirane povećanjem frekvencije će obično omogućiti detekciju manjih diskontinuiteta. Uzevši to u obzir, glavno pravilo pri ispitivanju je da diskontinuitet mora biti veći od jedne polovine valne duljine kako bi bio detektiran.

**Osjetljivost** i **rezolucija** su dva pojma često upotrebljavana u UZ ispitivanju kako bi se opisala mogućnost metode da otkrije i locira defekt. Osjetljivost je sposobnost lociranja malih diskontinuiteta te ona generalno raste s povećanjem frekvencije (smanjivanjem valne duljine). Rezolucija je sposobnost lociranja defekata blizu jedan drugom unutar materijala ili uz samu površinu. Rezolucija se također generalno povećava s porastom frekvencije.

**Valna frekvencija**, međutim, može imati i suprotne, tj. neželjene efekte stoga je za optimalnu kvalitetu ispitivanja nužan balans između željenih i neželjenih posljedica izbora frekvencije. Prije odabira frekvencije ispitivanja nužno je uzeti u obzir debljinu i strukturu zrna ispitivanog materijala, kao i tip, veličinu i vjerojatnu lokaciju defekta. Povećanjem frekvencije, zvuk se odbija od grubozrnate strukture i malih nesavršenosti u materijalu. Lijevani materijali, primjerice, često imaju grubozrnatu strukturu stoga je za njihovo ispitivanje potrebna niža frekvencija, dok je za kovane materijale koji kovanjem dobivaju finiju i usmjereniju strukturu zrna potrebna viša frekvencija [18].

Frekvencija također utječe na moć prodiranja zvučnog vala koja opada s porastom frekvencije.

#### 4.4.2. Brzina zvuka

Brzina širenja vala (**fazna brzina**) ovisi o elastičnosti i tromosti sredine u kojoj se val širi. Izraženo formulom [19]:

$$v = \sqrt{\frac{\text{elastična svojstva sredine}}{\text{tromost sredine}}} \quad (10)$$

Zvuk se širi zbog elastične veze među molekulama medija, koncentrično od izvora i to na dva načina; u zraku, ostalim plinovima i vodi šire se isključivo longitudinalni valovi (pa tako i zvuk) jer ga prenose čestice sredstva titrajući u smjeru širenja vala. U krutim tijelima širiti se mogu i longitudinalni i transverzalni valovi.

Brzina zvuka u tekućinama iznosi:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (11)$$

pri čemu je  $B \left[ \frac{N}{m^2} \right]$  je volumni modul elastičnosti tekućine, a  $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  gustoća materijala.

- u plinovima:

$$v = \sqrt{\frac{kp}{\rho}} \quad (12)$$

gdje je  $kp$  volumni modul elastičnosti plina, odnosno umnožak adijabatske konstante  $k$  i tlaka plina  $p$ .

- u krutim tvarima:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (13)$$

gdje je  $E \left[ \frac{N}{m^2} \right]$  Youngov modul elastičnosti koji se javlja u Hookovom zakonu:

$$\frac{\Delta F}{\Delta S} = E \frac{\Delta l}{l} \quad (14)$$

To znači da zvuk putuje različitom brzinom u različitim materijalima.

#### 4.4.3. Akustična impedancija

Kad se govori o zvuku (ultrazvuku) i njegovu rasprostiranju, bitna je akustična impedancija. Akustična impedancija  $Z$  omjer je zvučnog tlaka  $p$  i brzine čestica  $v$  u mediju u kojem se rasprostire zvučni val. Ovisno o tome razlikujemo karakterističnu akustičnu impedanciju medija  $Z_0$  od impedancije akustičnog elementa u kojem se taj medij nalazi. Karakteristična impedancija se određuje za medij u uvjetima slobodnog raspostiranja vala, tj. kada nema reflektiranih valova. Ovisna je o materijalu i definirana je kao umnožak njegove gustoće  $\rho$  i brzine zvuka  $c$ , tj. brzine kojom se zvučni val u tom materijalu rasprostire:

$$Z_0 = \rho \cdot c \quad (15)$$

Tablica 1: Akustična svojstva nekih metala u krutom stanju

Metal	Longitudinalna brzina [cm/μs]	Transverzalna brzina [cm/μs]	Površinska brzina [cm/μs]	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	Akustična impedancija [g/cm <sup>2</sup> -sec x 10 <sup>5</sup> ]
Aluminij	0,632	0,313	-	2,70	17,10
Mjed	0,428	0,230	-	8,56	36,70
Bronca	0,353	0,223	0,201	8,86	31,28
Bakar	0,466	0,233	0,193	8,93	41,61
Zlato	0,324	0,120	-	19,32	62,6
Željezo	0,590	0,323	0,279	7,70	45,43
Lijevano željezo	0,480	0,240	-	7,80	37,44
Olovo	0,216	0,070	0,0630	11,4	24,62
Magnezij	0,631	-	-	1,74	10,98
Mangan	0,466	0,235	-	7,39	34,44
Metal	Longitudinalna brzina [cm/μs]	Transverzalna brzina [cm/μs]	Površinska brzina [cm/μs]	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	Akustična impedancija [g/cm <sup>2</sup> -sec x 10 <sup>5</sup> ]
Molibden	0,629	0,335	0,311	10,2	64,16
Nikal	0,563	0,296	0,264	8,88	49,99
Platina	0,396	0,167	-	21,4	84,74
Srebro	0,360	0,159	-	10,5	37,8
Titan	0,607	0,331	-	4,5	27,32
Volfram	0,518	0,287	0,265	19,25	99,72
Cink	0,417	0,241	-	7,10	29,61
Cirkonij	0,465	0,222	-	6,48	30,1

Impedancija je važna za određivanje transmisije valova i refleksije na granici dva materijala različitih impedancija. Važna je i za izradu ultrazvučnih sondi, kao i za procjenu apsorpcije zvuka u mediju.

Na granici dvaju sredstava (medija) koja imaju različitu akustičnu impedanciju zvuk će se djelomično odbijati (reflektirati) i prelamati (refraktirati) što predstavlja osnovu ultrazvučnog ispitivanja materijala.

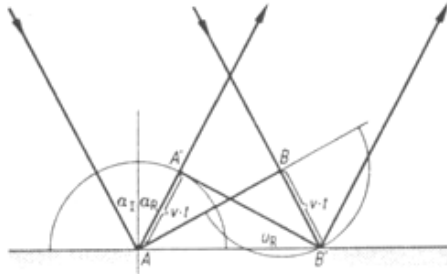
$$I_r = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right|^2 \cdot I_i \quad (16)$$

$I_r$  - intenzitet reflektiranog vala      $I_i$  - intenzitet upadnog vala



Zakon refleksije:

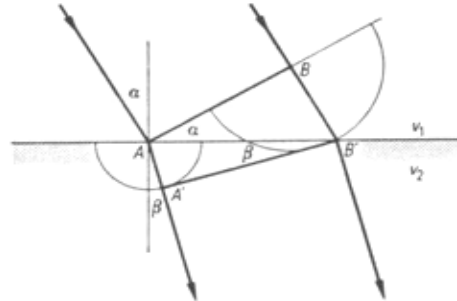
$$r = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (17)$$



Slika 32: Refleksija vala

Zakon refrakcije:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (18)$$



Slika 33: Refrakcija vala

Naime, potrebno je razlikovati slučajeve kada ultrazvučni valovi u ispitivani materijal dolaze okomito ili kad dolaze pod određenim kutom.

Pri okomitom ulasku UZ snopa u ispitivani materijal, na mjestu greške u materijalu (koja je ustvari drugi medij) snop se odbija od te greške. U slučaju da su te greške u materijalu manje, dio ultrazvučnog vala će proći, a dio će se odbiti natrag.

Kada UZ snop ulazi u ispitivani materijal pod određenim kutem na granici dvaju medija (greške), dolazi do transformacije vala te nastaje transverzalni i longitudinalni val međusobno neovisnog širenja. Oni se mogu: a) oba odbiti b) jedan odbiti, a drugi prelomiti ili c) oba prelomiti. Kako će se odbiti, ovisi o upadnom kutu snopa i o svojstvima medija na granici gdje se spajaju. Mijenjanjem ulaznog kuta snopa moguće je eliminirati stvaranje pojedinih valova. To je iskorišteno kako bi se razvio kutni ultrazvučni vibrator. Između ultrazvučnog vibratora i ispitivanog materijala postavlja se klin od elastičnog materijala pod određenim kutom. Tako se longitudinalni val odbija natrag u vibrator, a transverzalni val prodire u materijal pod određenim kutom.

Zvučni valovi se, dakle, refraktiraju prolazeći između materijala različitih akustičnih brzina. Što je veća razlika brzina, veća je i refrakcija. Bitno je napomenuti da, pošto putuje manjim brzinama, transverzalni val refraktira bitno manje od longitudinalnog te se i reflektira pod manjim kutem od longitudinalnog.

#### 4.4.4. Omjer signala prema šumu

Detekcija defekata uključuje mnoge dodatne faktore uz prije spomenute valnu duljinu i akustičnu impendanciju. Jedna od njih, i vrlo dobar pokazatelj mogućnosti detekcije defekta, je odnos signala i šuma koji se javlja zbog međusobno različitih konkurirajućih refleksija (primjerice pukotina će imati veću refleksiju od uključine zbog veće razlike u impedanciji zraka u odnosu na materijal uključine). Odnos signala i šuma ( $S/N$  omjer) je mjera kakav je signal defekta u odnosu na ostale pozadinske refleksije (šum). Na taj odnos utječu [16]:

- veličina i fokalna svojstva sonde
- frekvencija i efikasnost sonde
- zakrivljenost i hrapavost površine
- lokacija defekta u odnosu na zraku ultrazvuka
- šumovitost mikrostrukture materijala
- reflektivnost defekta koja ovisi o akustičnoj impedanciji, veličini, obliku i orijentaciji defekta

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{16}{\rho v_{metal} w_x w_y \Delta t}} \cdot \frac{A_{greške}(f)}{FOM(f)} \quad (19)$$

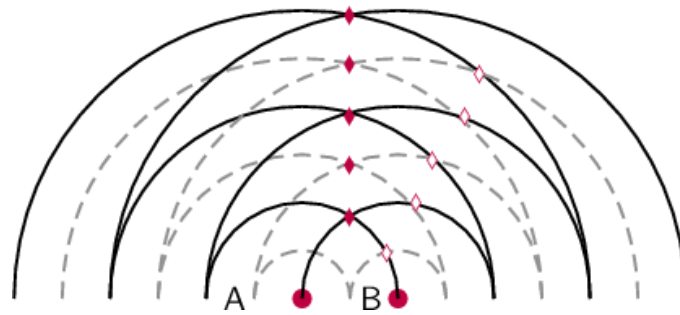
$w$  predstavlja širinu zrake u mjestu greške,  $\Delta t$  trajanje impulsa, a  $FOM$  šum.

Ovaj omjer raste s povećanjem veličine defekta i sa zrakom većeg fokusa.

Što je kraći zvučni impuls (veća frekvencija), bolja je detekcija defekta - omjer raste s povećanjem frekvencije. Minimalni omjer potreban za ispitivanje iznosi 3:1.

#### 4.4.5. Valna interferencija

Zvučni valovi koje stvara UZ sonda ne izviru iz jedne točke, već izviru iz više točaka uzduž površine piezoelektričkog elementa sonde, te dolazi do međusobne interakcije i interferencije valova. Blizu površine izvora stvaraju se ekstenzivne fluktuacije (neujednačenosti) valova koje se smanjuju udaljavanjem valova od površine. Na tu neujednačenost zvučnog polja utječu zakrivljenost površine, frekvencija i brzina zvuka u materijalu.



Slika 34: Interferencija vala A i vala B

## 4.5. Oprema za ispitivanje

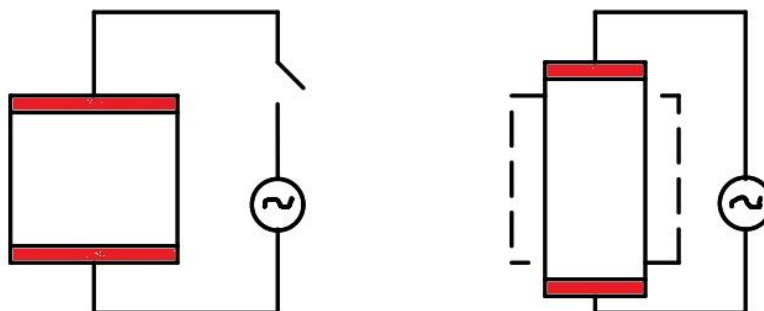
Oprema za ultrazvučno ispitivanje materijala sastoji se od sonde, uređaja za prikazivanje rezultata ispitivanja, medija za prenošenje ultrazvučnog impulsa i kablova.

Sonda je vrlo važan dio ultrazvučnog ispitivanja. Mnogi su faktori, od kojih su materijali od koje je izrađena, njena mehanička i električna konstrukcija, kao i vanjski uvjeti, vrlo bitni za ponašanje sonde u ispitivanju. Mehanička konstrukcija uključuje parametre poput područja izlaganja površine, mehaničko prigušenje, kućište, tip priključka.

Najčešće mogu biti piezoelektrične, laserske i EMAT.

### 4.5.1. Piezoelektrične sonde

Pretvaranje električnih impulsa u mehaničke vibracije i konverzija dolaznih mehaničkih vibracija natrag u električnu energiju je polazna točka ultrazvučnog ispitivanja. Aktivni element je najbitniji dio sonde jer on vrši pretvaranje. Taj je aktivni element ustvari komad polariziranog materijala koji radi na principu piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični efekt je pojava kada piezoelektrični materijal prilikom djelovanja sile na nj u vidu stiskanja ili širenja generira električni napon na svojoj površini [20]. Isto tako, kada je taj materijal podvrgnut električnom naponu, deformira se. Djelovanje električnog napona/impulsa na piezoelektrični materijal prikazan je sljedećom slikom:

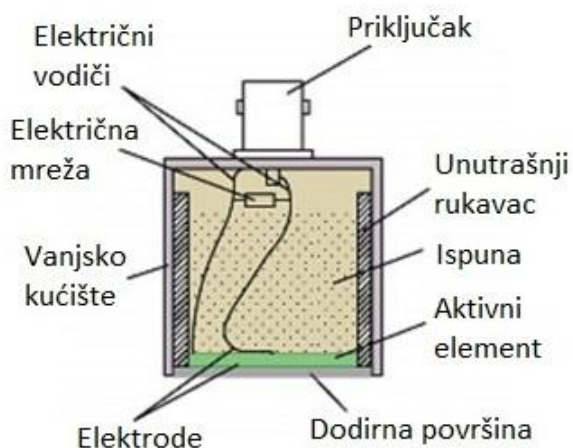


Slika 35: Piezoelektrični efekt

Najčešći **piezoelektrični materijali** u upotrebi su:

- kvarcni kristali - visoko anizotropni, smjer vibracije ovisi o smjeru rezanja
- piezoelektrična keramika - od čega su najvažniji barij-titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) i olovni-titan-cirkonat ( $\text{PbZrTiO}_3$ ). Sastav, oblik i dimenzije piezoelektrične keramike se mogu precizno odabrati prema specifičnim potrebama
- piezoelektrični polimeri (film Poliviniliden-fluorida PVDF) i piezoelektrični kompoziti izrađeni kao kombinacija keramike i polimera kako bi imali najbolja svojstva nedostižna samim polimerima i samoj keramici.

Sastavni dijelovi sonde prikazani su Slikom 36:



Slika 36: Prikaz sastavnih dijelova sonde

Piezoelektrični element je rezan na  $1/2$  željene valne duljine. Kako bi se dobila maksimalna moguća energija iz primopredajnika, postoji odgovarajući sloj između aktivnog elementa i lica sonde. Optimalna impedancija tog sloja je postignuta dimenzioniranjem na debljinu od  $1/4$  valne duljine. Ispuna koja podupire kristal ima veliki utjecaj na prigušenje sonde. Najbolje prigušenje postiže se ispunom impedancije slične aktivnom elementu.

Sonda koja u jednoj primjeni ima vrlo dobru moć ispitivanja, u drugim se primjenama može vrlo loše ponašati. Primjerice, osjetljivost na male defekte je proporcionalna produktu efikasnosti sonde. Rezolucija, sposobnost detektiranja defekata na površini zahtijeva sondu velikog prigušenja. Iz tog je razloga vrlo bitno razumijeti koncept propusnosti i veličine frekvencije sonde. Naime, frekvencija primarno ovisi o materijalu ispune. Sonde manjeg prigušenja imat će uži opseg frekvencija i manju moć razlučivanja, ali veću penetraciju. Dakle, niže frekvencije (0,5-2,25 MHz) imat će veću energiju i moć prodiranja, a kristali visoke frekvencije (15-25MHz) bit će osjetljiviji na male diskontinuitete iako će imati malu sposobnost prodiranja u materijal.

#### 4.5.1.1. Tipovi sondi

Ultrazvučne sonde se prave za vrlo široki spektar primjena i zato treba izabrati onu koja ima odgovarajuću frekvenciju, propusnost i fokus zrake kako bi se došlo do željenih rezultata ispitivanja.

Osnovna podjela sondi je sljedeća:

**Kontaktne sonde** - koriste se za direktna kontaktna ispitivanja i obično ručno koriste. Proizvode energiju okomito na ispitivani komad. Koriste se za pronalaženje praznina, pora, pukotina, kao i za mjerenje debljine. Aktivni je element zaštićen u robustnom kućištu kako bi izdržao kontakt sa mnogim ispitnim materijalima. Često imaju zamjenjive kontaktne ploče kako bi se produžio njihov vijek trajanja.

**Uranjajuće sonde** - karakterizira ih činjenica da nemaju kontakta sa ispitivanim materijalom, te su izrađene kako bi djelovale u obično vodenom okruženju, tj. spremniku s vodom u kojem su uronjene i sonda i ispitivani materijal gdje voda ima ulogu kontaktnog sredstva - medija za prenošenje ultrazvuka. Obično imaju slojeve jednakih impedancija kako bi se što više zvučne energije prenosilo vodom do

ispitivanog materijala. Mogu imati kružno ili sferno fokusirajuću leću. Koriste se kod automatiziranog skeniranja i u situacijama gdje je potrebna oštro fokusirana zraka u cilju poboljšanja rezolucije valnog toka.

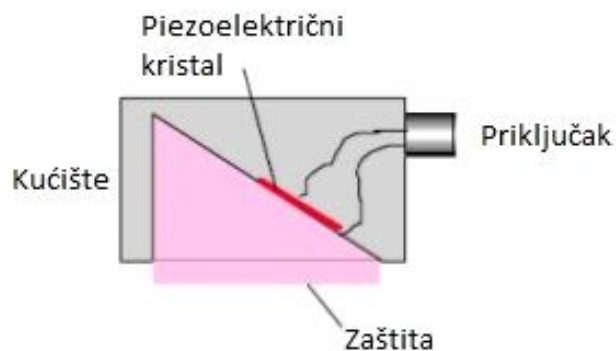
Kontaktne sonde mogu biti ravne, kutne i sonde s dvostrukim aktivnim elementom.

**Ravne se sonde** (Slika 38a) upotrebljavaju na relativno ravnim površinama i gdje nije potrebna osjetljivost na otkrivanje grešaka blizu površine.

**Kutne sonde** se upotrebljavaju zajedno sa polimernim ili epoksidnim klinovima kako bi stvarale longitudinalne ili prvenstveno refraktirane transverzalne valove pod određenim kutem u odnosu na površinu ispitivanog materijala. Ispitivanjima je utvrđeno da:

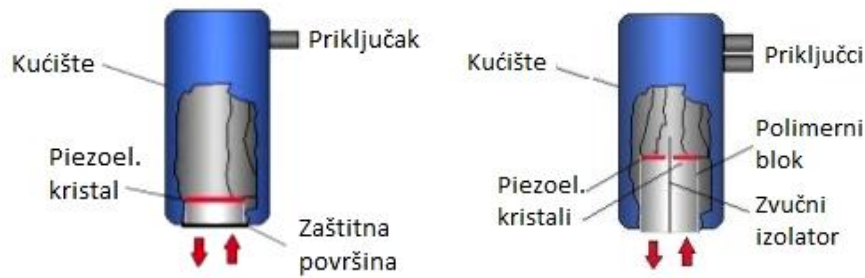
- od  $45^\circ$  do  $80^\circ$  nastaju transverzalni valovi;
- od  $0^\circ$  do  $35^\circ$  nastaju longitudinalni valovi;
- od  $35^\circ$  do  $45^\circ$  nastaju i longitudinalni i transverzalni valovi.

Prvenstveno se kutnim sondama ispituju zavari.



Slika 37: Kutna sonda

**Sonde s dvostrukim aktivnim elementom** koriste jedan element koji prenosi UZ val, a drugi prima. Moguće je zato optimizirati kvalitetu odaslanog i primljenog signala koristeći zasebne aktivne elemente koji pružaju najbolje karakteristike za svoju namjenu. Vrlo su korisne za otkrivanje grešaka vrlo blizu površine. Često se koriste za grube površine, krupnije materijale, detekciju pitinga i poroziteta i pružaju visoku otpornost na temperature, čak do  $550^\circ\text{C}$ .



Slika 38a i 38b: Ravna sonda i sonda s dvostrukim aktivnim elementom

#### 4.5.1.2. Kontaktno sredstvo

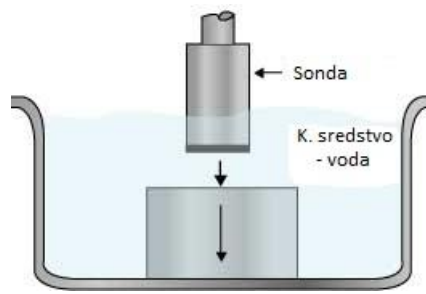
Kontaktno sredstvo je materijal (obično tekućina) koja olakšava prijenos ultrazvučne energije sa odašiljača u ispitani uzorak. Kontaktno sredstvo je obično neophodno zbog velike razlike u akustičnoj impedanciji zraka i krutina (ispitivanog materijala). Stoga, gotovo se sva energija reflektira i vrlo malo prenosi u ispitivani materijal. Kontaktno sredstvo istiskuje zrak i omogućuje odašiljanje više UZ energije u ispitni uzorak kako bi se ta energija mogla iskoristiti za ispitivanje.

U kontaktnom ispitivanju (kontaktna sonda) kao kontaktno sredstvo između sonde i uzorka obično se upotrebljava tanak sloj ulja, glicerina ili vode.



Slika 39: Kontaktno sredstvo kod ispitivanja kontaktnim sondama

Kod, primjerice, preciznih mjerenja često se koristi ispitivanje uranjajućim sondama. U takvom ispitivanju i sonda i ispitivani uzorak su uronjeni u kontaktno sredstvo, što je prvenstveno voda. Ovakva metoda olakšava održavanje konzistentnosti sredstva prilikom micanja i manipuliranja sonde i/ili ispitivanog materijala.

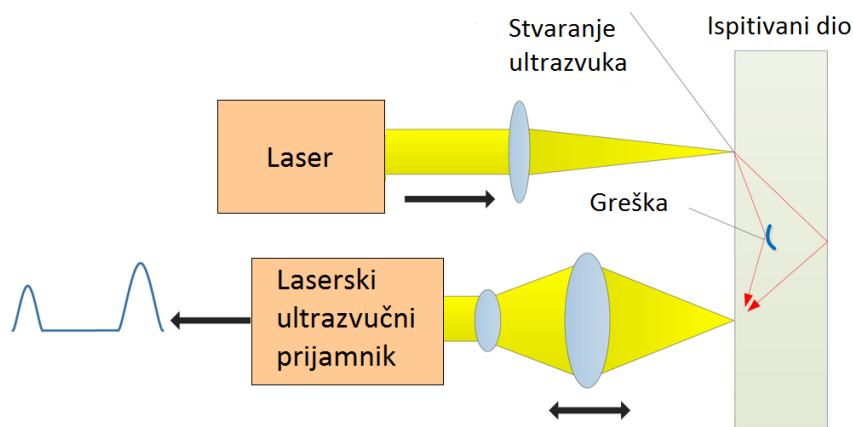


Slika 40: Kontaktno sredstvo kod ispitivanja uranjajućim sondama

#### 4.5.2. Laser

Ultrazvuk se može stvarati i laserom pri čemu je bitno napomenuti dva područja:

Područje termičke elastičnosti gdje je ultrazvuk generiran brzom ekspanzijom materijala i ablativno područje u kojem je ultrazvuk generiran od strane plazme stvorene vaporizacijom površine.



Slika 41: Ultrazvučno ispitivanje laserom

#### 4.5.3. Elektromagnetska akustička sonda (EMAT)

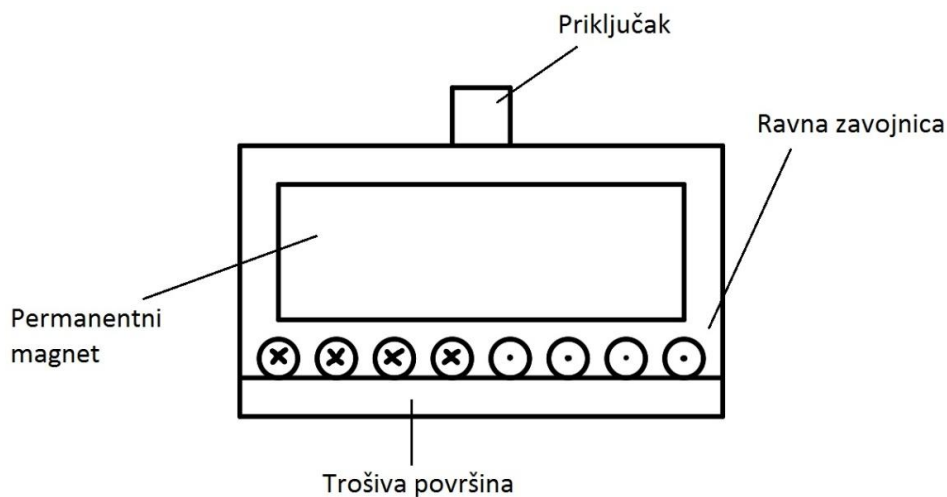
Takve sonde funkcioniraju na potpuno drugačijem principu od kontaktnih i uranjajućih sondi i ne trebaju kontaktno sredstvo. Žica (zavojnica), smještena blizu površine ispitivanog materijala kojom prolazi električna struja odgovarajuće frekvencije, stvara vrtložne struje koje se ponašaju prema Lorentzovom principu [16]:

$$F = J \cdot B \quad (20)$$



Sila  $F$  je umnožak gustoće inducirane struje  $J$  [ $A/m^2$ ] i induciranog magnetskog polja  $B$ . Te vrtložne struje, ovisno o polarizaciji ispitnog uređaja, mogu pobuditi željene oblike zvučnih valova koji se zatim šire ispitivanim materijalom.

EMAT nudi mnoge prednosti poput mogućnosti ispitivanja u zabačenim okruženjima pri povišenim temperaturama i brzinama gdje nije lako pobuđivati valove piezoelektricima. Utjecaj stanja površine ispitivanog materijala je manji i ne zahtijeva kontaktno sredstvo. Međutim, EMAT zahtijeva jaka magnetska polja (koja se dobivaju korištenjem skupih rijetkih materijala poput samarij-kobalta i neodimij-željezo-borona) i vrlo jake struje da bi pobudio valove koji budu slabiji od valova stvorenih piezoelektricima tako da im je efikasnost niska. Koristi se za ispitivanje debljine materijala, za ispitivanja zavara na cijevima i šipkama, u željezničkoj i automobilskoj industriji...



Slika 42: EMAT

#### 4.5.4. Ostala oprema

Ostala oprema uključuje:

##### Ultrazvučne pulsator-prijamnike

- pulsator stvara kratke usmjerene električne impulse velike amplitude koji se u primopredajniku pretvaraju u UZ valove. Pulsatorom je moguće kontrolirati duljinu ili prigušenje impulsa (vrijeme podvrgnutosti sonde impulsu), te energiju impulsa (napon kojem je sonda podvrgnuta, obično se kreće od 100 do 800 V)

- prijamnik pojačava dolazni ultrazvučni impuls (pomoću povećanja frekvencije). Prijamnikom je moguće kontrolirati oblik i pojačanje dolaznog vala.

### **Generatore tonskog izboja**

Pojačavaju niskonaponske signale u signale velike energije, odnosno odašilju izboje akustične energije u ispitivani materijal, primaju ih, te pomoću računala interpretiraju i analiziraju primljene signale. Koriste se u ultrazvučnim ispitivanjima velike snage, primjerice kod EMAT-a.

### **Generatore proizvoljnih funkcija**

Pomoću računala omogućuju, gdje je to potrebno, stvaranje bilo kojeg oblika vala uz standardne valove koji se koriste pri ispitivanju.

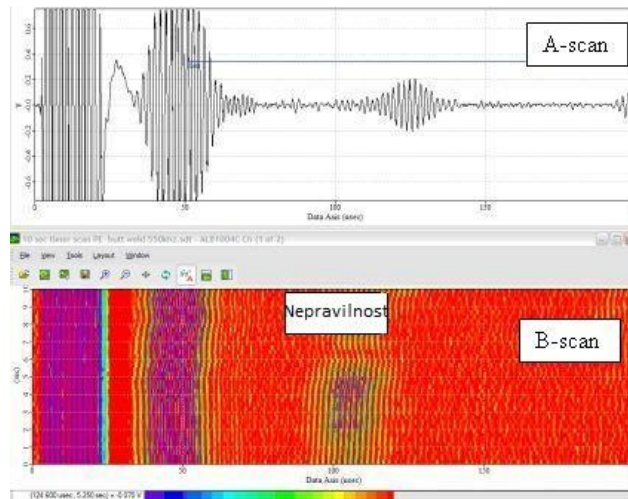
#### **4.5.5. Prikaz diskontinuiteta**

Vrijeme se počinje mjeriti u trenutku slanja početnog zvučnog impulsa. Nakon što se impuls odbije od diskontinuiteta ili stražnje stijenke ispitivanog materijala, vrijeme se zaustavlja pretvaranjem zvučnog signala u električni impuls. Iz tih se podataka može vrlo trenutačno odrediti udaljenost stijenke ili diskontinuiteta sljedećom relacijom [21]:

$$s = \frac{c \cdot t}{2} \quad (21)$$

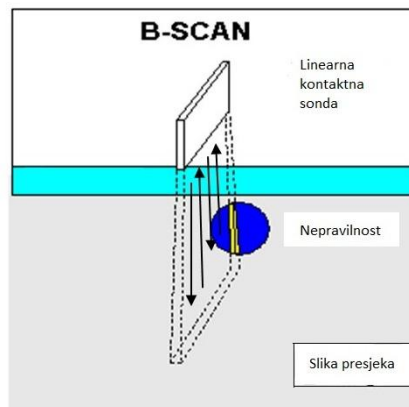
U navedenom izrazu  $s$  predstavlja putanju zvuka, odnosno udaljenost [mm],  $c$  brzinu zvuka [km/s] i  $t$  vrijeme [ms]. Ti se podaci dobiveni ultrazvučnim ispitivanjem mogu predočiti i prikazati u nekoliko oblika:

- **A - scan** prikazuje količinu primljene ultrazvučne energije kao funkciju vremena. Amplituda primljenog impulsa je predstavljena kao pomak duž jedne osi (obično  $y$ -osi), a vrijeme putovanja ultrazvučnog impulsa prikazano je kao pomak duž druge osi. U sustavu linearne amplifikacije vertikalni je pomak proporcionalan amplitudi signala. Sa uporabom logaritamskih amplifikatora  $y$ -os predstavlja logaritamsku skalu.



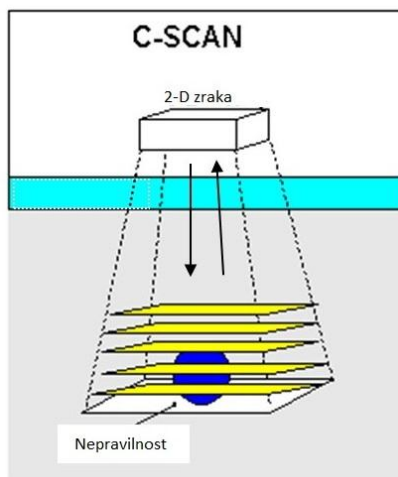
Slika 43: A-scan nepravilnosti sa pripadajućim B-scanom pri ispitivanju zavara

- **B - scan** prikazuje presjek ispitivanog uzorka. To je dvodimenzionalna grafička prezentacija gdje je vrijeme putovanja ultrazvučnog impulsa predstavljeno kao pomak duž jedne osi. U prikazu, odbijeni impuls je prikazan kao događaj.

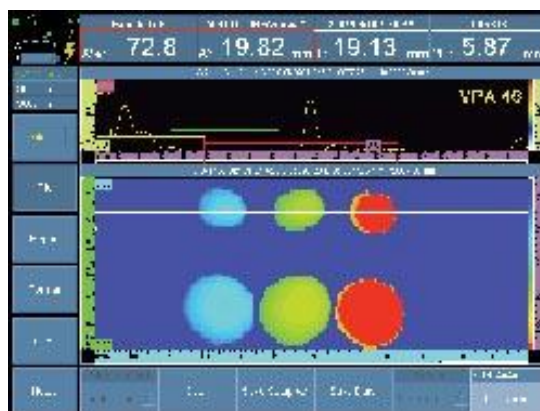


Slika 44: Shematski prikaz B-scana nepravilnosti

- **C - scan** daje planski prikaz uzorka sa njegovim diskontinuitetima. To je dvodimenzionalni grafički prikaz u kojem su odjeci diskontinuiteta prikazani u gornjem pogledu ispitivane površine.



Slika 45: Shematski prikaz C-scana nepravilnosti



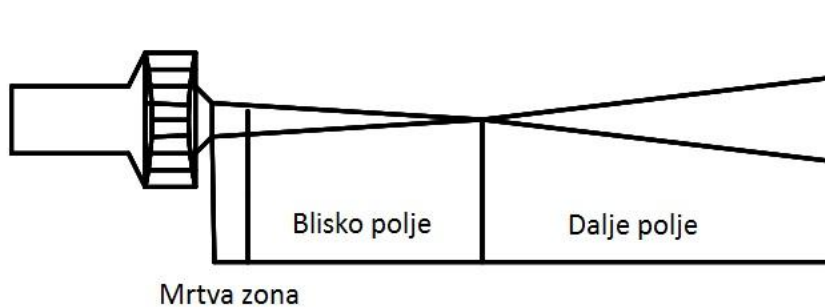
Slika 46: C-scan korozije

- **hibridni/šavni prikaz** daje planski prikaz C-scana sa A ili B-scanovim pogledima koji su spojeni u ovom hibridnom prikazu kako bi se dobila čišća i cjelovitija slika oštećenog dijela uzorka. Ovaj se prikaz koristi za ispitivanje većih uzoraka ili površina.

#### 4.6. Otkrivanje i evaluacija diskontinuiteta

Ultrazvučni valovi pokrivaju samo određeni dio ispitivanog dijela. To područje se zove zvučna zraka. Zvučna zraka je ovisna o vrsti sonde koju se upotrebljava i o materijalu koji se ispituje. Zvučna se zraka može podijeliti na područje bliskog polja u kojem se zraka sužava i područje daljeg polja u kojem se zraka širi. Duljine i širine tih polja ovise o promjeru elementa, frekvenciji i brzini zvuka u ispitivanom materijalu. Postoji i 'mrtva zona', tj. područje u kojem nije moguće otkriti diskontinuitet jer početni

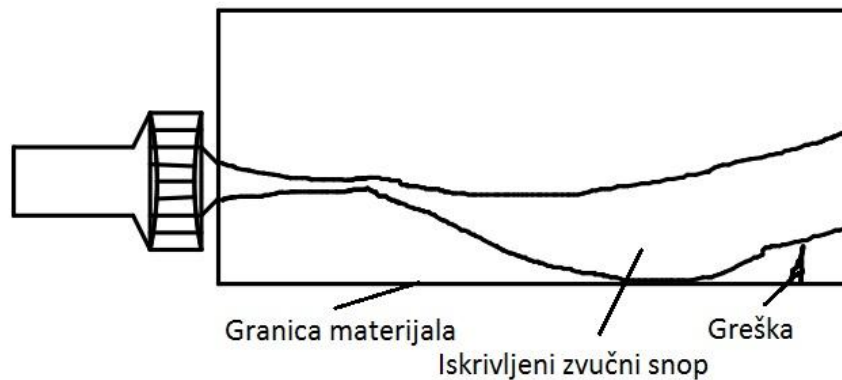
odjek onemogućava detektiranje [21]. Zone u zvučnom valu prikazuje slika koja slijedi:



Slika 47: Područja zvučnog vala

Važno je naglasiti da će u području bliskog polja postojati veća fluktuacija valova i međusobna interferencija stoga može biti vrlo teško točno određivati i procjenjivati defekte unutar tog područja.

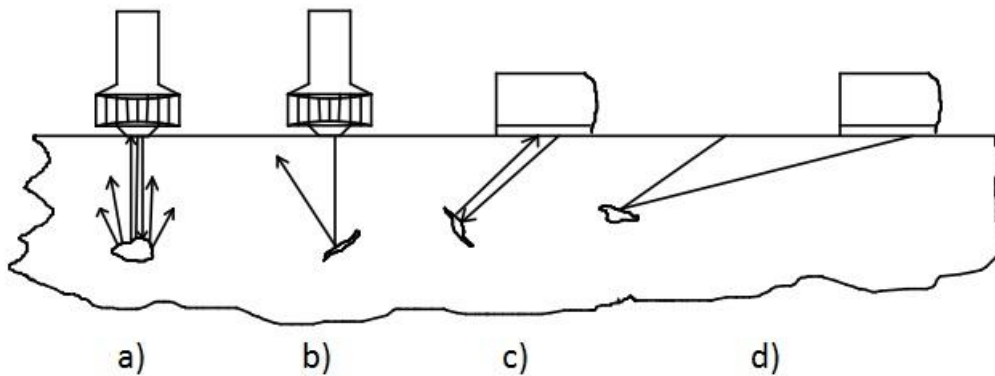
Kod ispitivanja blizu granica ispitivanog materijala potrebno je vrlo pažljivo ispitivati jer će zvučna zraka nailaskom na granicu skrenuti i moguće propustiti otkriti diskontinuitet, tj. nepravilnost.



Slika 48: Ispitivanje blizu granice materijala

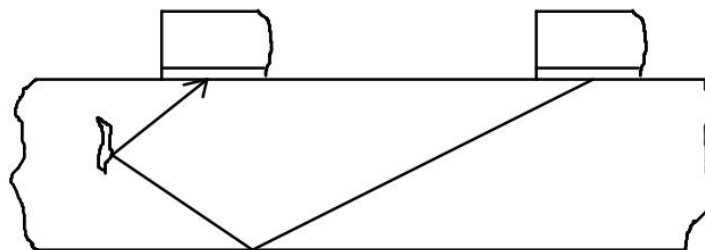
Kut pod kojim je diskontinuitet smješten je ključan. Prostorni diskontinuiteti reflektiraju zvučne valove u velikom broju smjerova što ih čini lakšim za otkrivanje. S druge strane, dvodimenzionalni diskontinuiteti odbijaju zvučne valove pod određenim kutem i ukoliko se koristi neodgovarajući tip sonde ili neodgovarajući kut, zraka se neće odbiti natrag u sondu i diskontinuitet se neće otkriti. Također, promjer najmanjeg diskontinuiteta koji može biti otkriven iznosi  $\geq 1/2$  valne duljine UZ vala. Povećanjem frekvencije, kraća je valna duljina UZ vala i manje je diskontinuitete moguće otkriti.

Primjerice, otkivci zahtijevaju frekvencije 2 - 6 MHz, a materijali grublje strukture poput odljevaka, 0,5 - 2 Mhz. Stoga je vrlo bitno odabrati pravilni tip, veličinu i frekvenciju sonde kojom se ispitivanje vrši i ispitivati pod povoljnim kutovima ovisno o eventualnim greškama koje se očekuju.



*Slika 49: Pravilno (a i c) i nepravilno ispitivanje (b i d)*

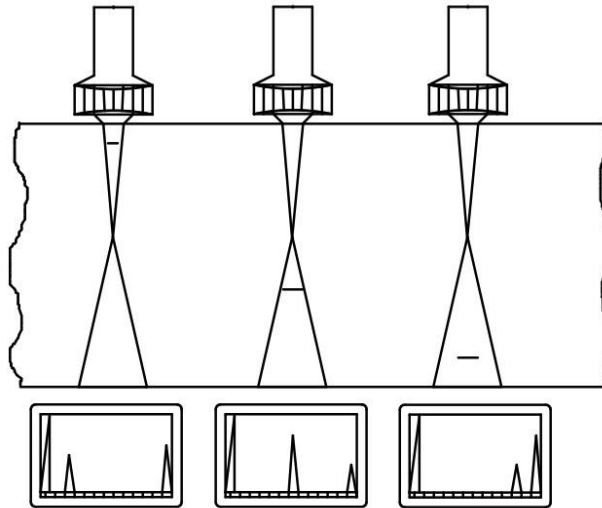
Često kod ispitivanja debelih dijelova u kojima postoje vertikalni diskontinuiteti nije moguće obaviti ispitivanje tako da sonda dođe u povoljan položaj da otkrije diskontinuitet. Iz tog se razloga mogu upotrijebiti dvije sonde gdje jedna odašilje, a druga prima zvučni impuls. Ta se tehnika naziva tandem tehnika i prikazana je sljedećom slikom.



*Slika 50: Tandem tehnika ispitivanja*

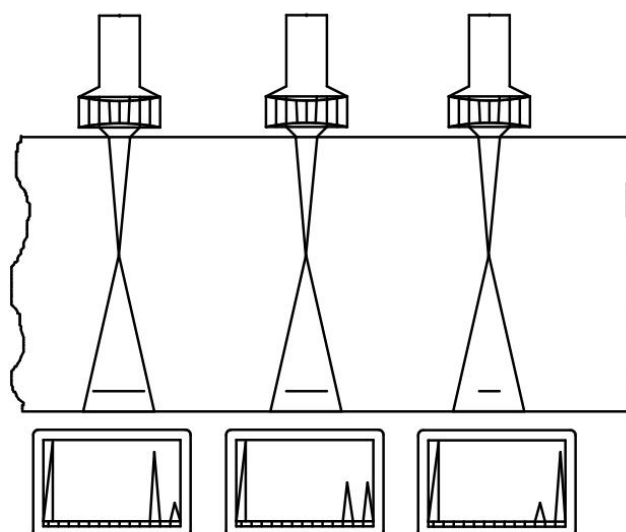
Mali diskontinuiteti su oni koji potpuno potpadaju unutar zvučne zrake. Na temelju odjeka se utvrđuje dubina i veličina diskontinuiteta. Veličina sonde utječe na širinu snopa, a time se izravno utječe i na veličinu diskontinuiteta kojeg snop može obuhvatiti i u potpunosti izmjeriti. Slika 49a prikazuje diskontinuitet kojeg će sonda s lakoćom otkriti, ali zbog njegove veličine neće mu moći odrediti točne dimenzije.

Što je diskontinuitet bliže izvoru zvuka, manje vremena je potrebno da zraka stigne do diskontinuiteta i odbije se natrag u izvor. Pri tome vrijedi pravilo da se visina odjeka smanjuje kvadratom udaljenosti tog odjeka od izvora. To znači da će se na zaslonu odbijena zraka prikazati što bliže početnom impulsu što je greška bliža izvoru, odnosno sondi (Slika 51).



*Slika 51: Rezultirajući odjek u zavisnosti o udaljenosti*

Također, veličina greške se procjenjuje na sličan način pošto vrijedi pravilo da je visina odjeka proporcionalna njegovoj površini, odnosno kvadratu promjera odjeka. Naravno, zbroj energije vala odbijenog od greške i onog odbijenog od pozadine jest ukupna energija odaslanog vala, odnosno energija početnog impulsa.



*Slika 52: Rezultirajući odjek u zavisnosti o veličini*

#### 4.7. Umjeravanje

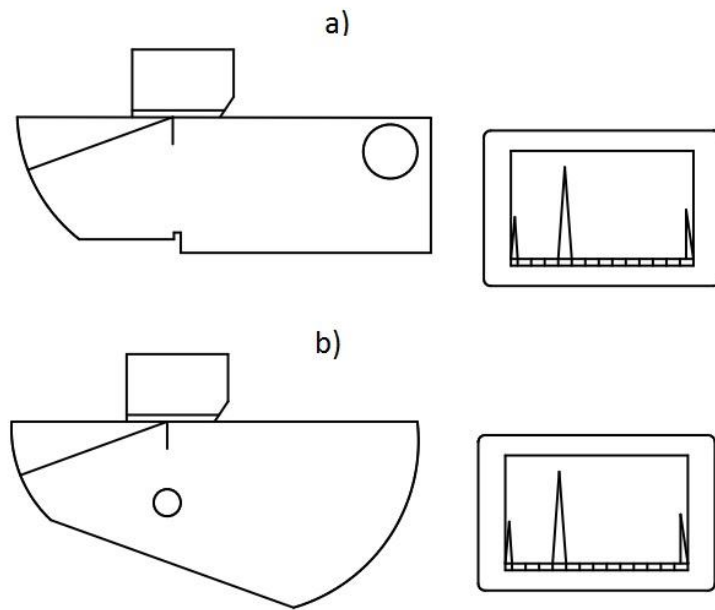
Za učinkovito ispitivanje ultrazvukom potrebno je kalibrirati i mjeriti razne parametre kao što su [22]:

- Linearnost vremenske baze ili horizontalnu linearnost
- Linearnost pojačanja opreme ili vertikalnu linearnost
- Omjer Osjetljivost i signal - šum
- Snaga penetriranja
- Radna frekvencija
- Karakteristike odašiljača impulsa
- Raspon širine i kašnjenja izlaza (Gate-a)
- Varijacije napajanja

Ukoliko uređaji nisu pravilno umjereni, rezultati ispitivanja ne mogu i neće biti zadovoljavajući. Stoga je umjeravanje ispitnih instrumenata jako bitan korak prije ispitivanja. Umjeravanje se zasniva na ranije opisanoj relaciji  $s = \frac{c \cdot t}{2}$  (vidi Poglavlje 4.5.5.).

Princip je jednostavan; potrebno je umjeriti uređaj na materijalu poznatih dimenzija (mjernom etalonu) pri čemu etalon mora biti od približnog istog materijala kao i materijal kojeg će se nakon umjeravanja ispitivati. Primjerice, za ravnu sondu, umjeravanje će se vršiti preko mjerenja debljine etalona. Etalon namijenjen umjeravanju sonde izrađen od niskolegiranog sitnozrnatog čelika je debljine točno 25 mm i naziva se V1 etalon. Upotrebljava se za određivanje točke emisije posmičnog vala i kuta loma. Također, koristi se za mjerenje osjetljivosti i rezolucije. V1 etalomom umjeravati se mogu i kutne sonde. S druge strane, postoji i V2 etalon namijenjen umjeravanju samo kutnih sonde.





Slika 53a i 53b: Umjeravanje kutne sonde pomoću V1 etalona (a) i V2 etalona (b)

## 5. PRIMJENA OPISANIH METODA U TEHNOLOŠKOM PROCESU

Korištenje ranije opisanih metoda bit će pobliže objašnjeno i razrađeno na primjeru ispitivanja u procesu reparacije radijalno-aksijalnog vodećeg kliznog ležaja prema Zadatku. Prije pristupanja razradi metoda u navedenom postupku, potrebno je pobliže objasniti funkciju ležaja općenito, te princip rada i način izrade kliznih ležajeva i sa njima povezanih strojnih dijelova.

### 5.1. Klizni ležajevi

Osovine na sebi nose mirujuće ili rotirajuće strojne dijelove kao što su remenice, zupčanci, rotor i sl. One mogu mirovati, tako da se na njima smješteni strojni dijelovi okreću, ili da rotiraju zajedno sa strojnim dijelovima pričvršćenim na njima. Osovine su opterećene samo na savijanje i ne prenose okretni moment. Vratila, s druge strane, također nose na sebi strojne dijelove kao i osovine, ali se one stalno okreću te uvijek prenose i okretni moment. Vratila su osim na savijanje, opterećena i na uvijanje [23].

Vrlo velika i često promjenjiva opterećenja uslijed djelovanja momenata i sila na vratilo ili osovinu pri radu, moguće je minimizirati pravilnim dimenzioniranjem, te vođenjem i uležištenjem vratila i osovina. Strojni dijelovi namijenjeni navedenom su ležajevi. Oni su prvenstveno pod opterećenjem uslijed djelovanja trenja između njih i gibajućih strojnih dijelova (osovine ili vratila).

**Trenje** je otpor koji dva tijela u kontaktu pružaju njihovom međusobnom gibanju. Ovisi o kemijskom sastavu i hrapavosti površina u kontaktu. Postoji nekoliko vrsta trenja, i to:

- trenje mirovanja - statičko, koje pruža otpor početku gibanja
- trenje gibanja - kinematičko, u koje spadaju trenje klizanja, valjanja, kotrljanja i viskoznost tekućina.

Pošto za ležaje značenje ima samo trenje gibanja, oni se primarno dijele na:

- klizne ležajeve koji djeluju na principu klizanja
- valjne ležajeve koji djeluju na principu valjanja preko valjnih tijela unutar ležaja

Trenje klizanja pretvara kinetičku energiju u toplinu i iznosa je proporcionalnog sili kojom se tijela međusobno stišću u točkama kontakta. Na principu trenja klizanja funkcionira **klizni ležaj** čija je zadaća vođenje osovine ili vratila i prijenos opterećenja s rukavca osovine ili vratila na blazinicu ležaja. Rukavci su oni dijelovi osovina i vratila kojima se oni oslanjaju na ležaje, odnosno na glatku i uljem ili mastima podmazanu cilindričnu plohu smještenu u kućištu - blazinicu ležaja.

Neke prednosti kliznih ležajeva u odnosu na valjne su [24]:

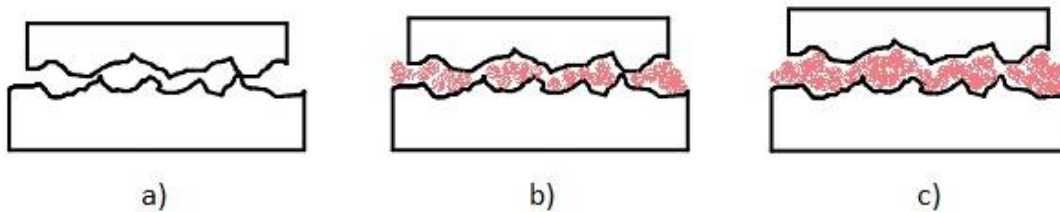
- jednostavnije su konstrukcije, a time i jeftiniji
- zauzimaju manje prostora u radijalnom smjeru
- mogu biti podijeljene izvedbe (gornji i donji dio ležaja)
- prigušuju udarce, vibracije i šumove, tj. vrlo tihog su rada
- dozvoljavaju veće brzine vrtnje

Ipak, imaju i svojih nedostataka kao što su:

- veliko trenje kod malih brzina, a time i najveće trenje prilikom pokretanja i zaustavljanja
- osjetljiviji su na nedostatno podmazivanje, stoga i zahtjevniji za održavanje u tom pogledu

Kako bi se smanjilo trošenje i čim više smanjilo trenje između osovine ili vratila i ležaja, najbitnije je podmazivanje ležaja. Postoji nekoliko vrsta trenja [25]:

1. suho trenje - javlja se pri nedostatku maziva ili oksidacijskog sloja i najvećeg je iznosa, stoga je i najopasnije za materijal.
2. granično trenje - ovdje između kontaktnih površina postoji vrlo mali sloj čestica ili maziva. Teoretski je to sloj debljine jedne molekule (monomolekularni sloj).
3. mješovito trenje nastaje ukoliko postoji djelomično djelovanje i čvrstih površina tijela u kontaktu i maziva između njih. Događa se pri nedovoljnoj količini maziva ili pri isuviše sporom gibanju.
4. tekuće trenje, odnosno hidrodinamsko (ili hidrostatsko ukoliko je postignuto pumpama) postoji ako čestice čvrstih tijela nisu u kontaktu ni u jednom trenutku jer između njih uvijek postoji sloj maziva, pa se javlja samo unutarnje trenje maziva. Vrijednost faktora trenja je minimalna.



Slika 54: Vrste trenja: a) suho b) mješovito c) hidrodinamsko

## 5.2. Podmazivanje ležajeva

Radi olakšavanja trenja, odnosno smanjivanja faktora trenja i smanjivanja trošenja materijala, koriste se maziva. Mazivo mora zadovoljiti neke osnovne uvjete, primjerice da se mora stvarati brzo, tj. mazivo mora imati veliku kemijsku aktivnost. Mazivo mora biti žilavo, odnosno otporno na raskidanje sloja, mora imati antikorozivna svojstva, veliku sposobnost razmazivanja, mora imati sposobnost odvođenja topline, veliku adheziju prema metalu kako bi se sloj maziva održao i za vrijeme velikih specifičnih pritisaka te mora imati ujednačenost svojstava podmazivanja.

Kao maziva za ležajeve upotrebljavaju se prvenstveno tekuća maziva, odnosno ulja. **Ulja** najbolje ispunjavaju spomenute zahtjeve i njime se postiže hidrodinamsko trenje. Prednost pri korištenju imaju jeftina mineralna (derivati nafte) u odnosu na sintetska. Pošto sva tekuća maziva porastom temperature postaju rjeđa, njihova se viskoznost (otpor tečenju) smanjuje, ali se porastom tlaka viskoznost nešto povećava. Iz tog se razloga mineralna ulja ne primjenjuju pri visokim temperaturama. Sintetskim, s druge strane, viskoznost nije toliko osjetljiva na temperature, pa se primjenjuju pri vrlo velikom dijapazonu temperatura, od -70 sve do +250 °C. Upotrebljavaju se za podmazivanje viskoopterećenih brzohodnih ležajeva.

**Mazive masti** su mineralna ulja zgusnuta pomoću metalnih sapuna, odnosno mineralnih soli (kalcijevi, natrijevi ili litijevi hidroksidi). Pjenasta struktura tih tvari obavija kapljice ulja te ih samo u najmanjim količinama oslobađa za podmazivanje tako da se pri gibanju kapljice istisnu iz pora. Ovisno o vrsti, upotrebljive su u širokom intervalu temperatura, od -30 do 160 °C. Koriste se za niska opterećenja i sporedne ležajeve.

Najznačajnije **krute tvari za podmazivanje** dolaze u obliku grafita i molibdensulfita ( $\text{MoS}_2$ ). Rabe se pri malim brzinama klizanja. Grafit je vrlo jeftino mazivo. Dolazi u obliku listića i posjeduje svojstvo kalavosti tako da se pri velikim pritiscima listići grafita sve više kalaju i sprječavaju direktni kontakt. Molibdensulfid ima važno svojstvo u zavisnosti od djelujućeg pritiska i što je tanji, svojstva podmazivanja su mu veća. Vrlo je kvalitetno mazivo i može se upotrebljavati do čak  $650\text{ }^\circ\text{C}$ . Puno je skuplji od grafita pa se zato ne upotrebljava u velikoj mjeri.

U kliznim ležajima mazivo je smješteno u prostoru između blazinice i rukavca. Pokretanjem i povećanjem brzine vrtnje, trenje od suhog, preko mješovitog, prelazi u hidrodinamsko pri čemu se ekscentricitet smanjuje. Debljina mazivog sloja (mjesto najmanjeg sloja) ovisi o opterećenju ležaja i smanjuje se s porastom sila.



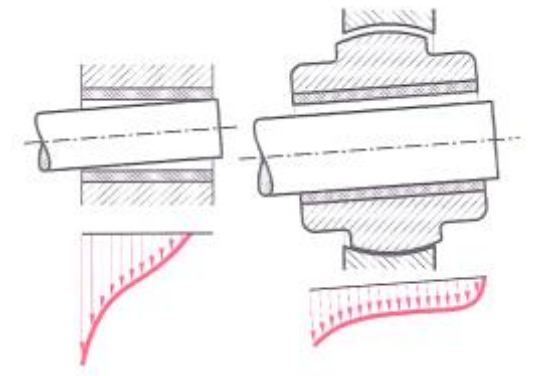
*Slika 55: Razdioba površinskog tlaka na blazinicu*

Ulje za podmazivanje se dovodi kroz provrte u kućištu ležaja do utora ili do komora za podmazivanje čime se ulje raspodjeljuje na cijelu površinu u kontaktu. Mast se također dovodi do ležajnih mjesta, ali tlačenjem. Podmazivati se može i konstrukcijom maznog prstena na rukavcu. Prsten koji se rotira s rukavcem, na sebi transportira ulje iz komore i podmazuje ležaj.

U sklopovima gdje se zahtijevaju velike brzine vrtnje, izrađuju se ležajevi s više točaka. Ti ležajevi odstupaju od kružnog oblika osiguravajući na taj način postojanje više uljnih klinova u isto vrijeme čime se pospješuje podmazivanje, odnosno smanjuje trenje.

Sile koje djeluju na vratilo savijaju vratilo i rukavac stvarajući velike rubne tlakove. Pritisci pri naginjaju rukavca dovode do velikog trošenja i zagrijavanja, stoga se ti

tlakovi smanjuju upotrebom blazinice uložene u kuglasti zglob što prikazuje sljedeća slika:



*Slika 56: Nagib rukavca*

*a) rubni pritisak kod nepokretne (krute) blazinice;*

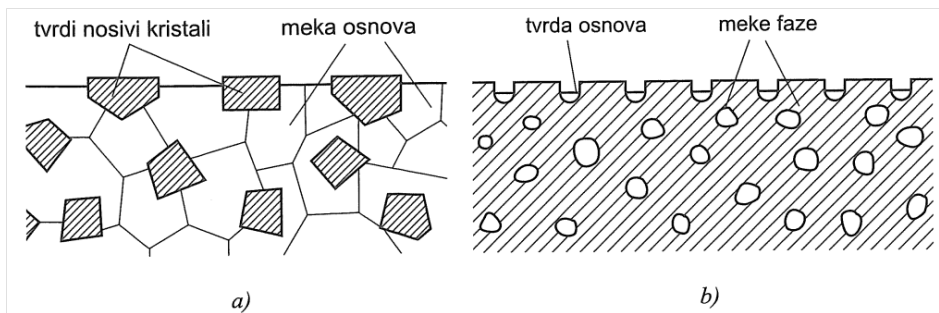
*b) sprječavanje stvaranja rubnog pritiska uporabom blazinice uložene u kuglasti zglob*

### **5.3. Materijali za izradu kliznih ležajeva**

Vrlo je teško ostvariti da se duga osovina ili vratilo dovoljno točno okreće u nizu ležaja. Iz tog razloga **materijal za izradu ležajeva** mora biti dovoljno mekan i pri opterećenju prilagodljiv rukavcu, odnosno osovini ili vratilu. Uz navedeno, ležaj mora biti i dovoljno čvrst i tvrd, ali sa malim faktorom trenja i površinom otpornom na trošenje i udarna opterećenja [26]. Također, materijal ležaja mora biti:

- dovoljno žilav
- dobre toplinske vodljivosti
- male toplinske rastezljivosti
- dobrih antikorozivnih svojstava
- mora imati sposobnost dobrog prijanjanja maziva i sposobnost klizanja pri nedovoljnom podmazivanju

Takva se tražena svojstva prvenstveno mogu zadovoljiti materijalima dvofazne mikrostrukture, odnosno materijala sastavljenih od tvrdih i mekih faza poput sivog lijeva, bijele kovine, bronce. Meka faza ima ulogu prilagođavanja rukavcu, a tvrda faza na sebe preuzima opterećenja.



Slika 57: Nosive strukture ležajnih materijala:

a) tvrdi nosivi kristali u mekoj osnovi; b) meke faze u tvrđoj osnovi

Pošto je puno jednostavnije i lakše zamijeniti blazinicu nego rukavac, teži se da većinu trošenja podnese blazinica. Stoga je obično materijal rukavca tri do pet puta tvrdi od materijala blazinice ležaja. Pošto su rukavci obično i dijelovi osovina ili vratila, izrađuju se od istog materijala i to gotovo isključivo od konstrukcijskih čelika, čelika za cementiranje i kaljenje ili od poboljšanih čelika. Čelici za cementiranje i kaljenje su bolji jer se njima postiže veća tvrdoća i glatkoća površine.

Prema obilježjima sastavnih dijelova mikrostrukture, materijali za izradu kliznih ležajeva se mogu podijeliti na:

1. tradicionalne dvofazne legure (bijeke kovine, bronce)
2. dvofazne legure s mogućnošću podmazivanja (olovna bronca i legure aluminija s kositrom)
3. monofazni materijali (polimeri)
4. porozni samopodmazujući sinterirani materijali
5. keramika

Od **tradicionalnih dvofaznih legura** rabe se:

1. Cu-Sn i Cu-Sn-P legure (kositrena i fosforova bronca)
2. Cu-Sn-Zn-Pb (crveni lijev)
3. Cu-Al legure (aluminijeva bronca)
4. Sn-Pb-Sb-Cu legure (bijeke kovine)
5. sivi i nodularni lijev

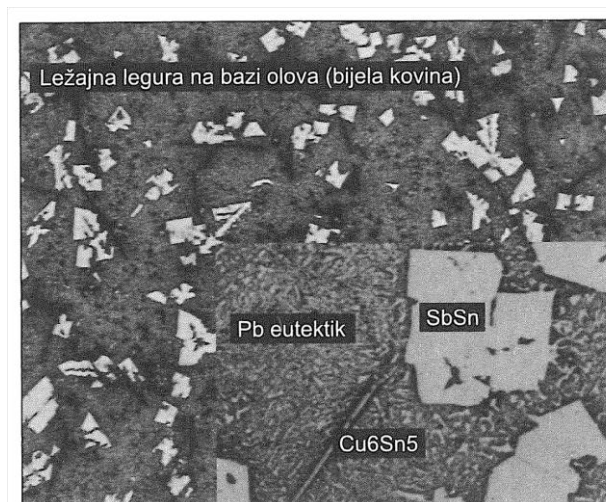
Tipične bronce su legure bakra s kositrom. Imaju vrlo dobru toplinsku vodljivost, a time i sposobnost hlađenja ležaja. **Lijevene kositrene bronce** vrlo dobro

ispunjavaju zahtjeve za klizne ležajeve jer imaju tvrdi  $\delta$ -fazu otpornu na trošenje uloženu u matricu od  $\alpha$ -faze otpornu na udarce. Dodavanjem fosfora povećava im se antifrikciona sposobnost.

**Crveni lijev** sve više zamjenjuje lijevanu broncu. U njemu je skupi kositar djelomično zamijenjen jeftinijim cinkom koji ima jednako djelovanje.

**Aluminijeva bronca** ima sposobnost zadržavanja čvrstoće pri povišenim temperaturama, dobru sposobnost ohlađivanja, dobru otpornost na koroziju i trošenje, kao i veliku otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama.

**Bijele kovine** su legure na bazi kositra (kositrena bijela kovina) ili olova (olovna bijela kovina). Ležajevima od bijele kovine dodaju se antimon i bakar jer moraju sadržavati u ravnomjernoj mekoj osnovi (Pb eutektik) tvrde dijelove ( $\beta$ -faza SbSn i  $\gamma$ -faza  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ), što se vidi iz mikrostrukture olovne bijele kovine na Slici 58.



*Slika 58: Mikrostruktura olovne bijele kovine s dodacima antimona i bakra*

Toplinsko stezanje kovine je malo, pa dobro prijanja na podlogu, a dobra je i toplinska vodljivost. Nedostatak je slaba dinamička izdržljivost, ispucavanje površine i slaba otpornost na umor pa se legura mora često ponovno nanositi [26]. Olovne bijele kovine se u odnosu na kositrene lakše deformiraju, što povećava zračnost u ležaju. Olovo se dodaje radi pojeftinjenja legure, ali legure s olovom podnose manja opterećenja i manje su otporne na koroziju. Dodavanjem kadmija povećava se olovnim bijelim kovinama čvrstoća i tvrdoća, niklom žilavost i antikorozivnost, dok arsen usitnjuje mikrostrukturu čime se poboljšavaju mehanička svojstva legure.



Bijele kovine pri nepovoljnom podmazivanju pokazuju dobre osobine klizanja, ali pošto se tale na 300 °C, pogodne su za rad do 110 °C. Crveni lijev i aluminjeve bronce odvođe toplinu bolje od bijele bronce, stoga su one pogodnije za ležajeve gdje pritisci premašuju mogućnosti bijele kovine te se one upotrebljavaju pri temperaturama do 200 °C.

Upotreba **sivog lijeva** predviđena je za visoka opterećenja jer ima veliku dinamičku izdržljivost, a grafit u lijevu omogućuje dobra svojstva podmazivanja, osim pri nepovoljnom podmazivanju kad sivi lijev jedva ima sposobnost klizanja. Također, sivi je lijev slabo otporan na trošenje i koroziju, a i antifrikciona su mu svojstva slabija od crvenog lijeva. Koristi se samo kod malih brzina klizanja.

Kod izrade blazinica manjih ležaja za manja opterećenja i male brzine vrtnje, upotrebljava se **sinteriranje bakra i kositra** sa dodatkom grafita ili molibden-sulfida, odnosno prešanje praha tih materijala pod velikim pritiscima. Takve sinterirane smjese su zbog svoje poluporoznosti samopodmazive nakon impregnacije uljem (kapilarno curenje ulja iz pora). Pri mirovanju ulje ponovno otječe u pore.

**Dvofazne legure s mogućnošću podmazivanja** karakterizira činjenica da jedna faza može u ekstremnim uvjetima služiti kao mazivo. To su prvenstveno:

1. Cu-Pb (olovna bronca)
2. Cu-Pb-Sn (olovno-kositrena bronca)
3. Al-Sn legure (aluminij-kositar)

**Olovne se bronce** koriste za manje zahtjevne ležajeve i kod manjih brzina klizanja. Vrlo su mekane, a time i neosjetljive na geometrijska odstupanja. Zbog mekoće, slabe su otpornosti na trošenje i na koroziju. Otpornost na koroziju se povećava višeslojnom izradom blazinica, nanošenjem vrlo tankog dodatnog sloja olova i kositra ili indija (0,025 mm). Nositelji tvrdoće u olovnoj bronci, kristaliti bakra, legiranjem s kositrom, postaju još tvrdi čime nastaju **olovno-kositrene bronce**. Pri radu i povišenju temperatura se naročito mekana olovna faza sve više razmazuje čime vrši stanovito podmazivanje. Te legure, zbog naročito mekane olovne faze, imaju dvostruko veću dinamičku izdržljivost od bijele kovine, a zbog kositrom ojačane tvrde faze, i veliku otpornost na trošenje. Na istom principu samopodmazivanja kojeg ima olovno-kositrena bronca, se temelje i Al-Sn legure.

Ovdje aluminij čini tvrđu fazu, a samopodmazivanje pri porastu temperature vrši kositar iz meke faze (eutektik kositra i aluminija).

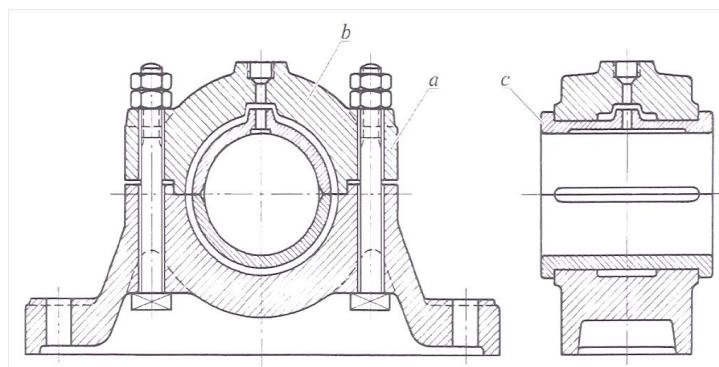
**Monofazni ležajni materijali** poput polimera (termoplasti i duroplasti) se primjenjuju samo u određenim slučajevima. To su prvenstveno **poliamid PA** (najlon) i **poli(tetrafluoretilen) PTFE**. Rabe se prvenstveno u uvjetima agresivnih korozijskih djelovanja, gdje je otežano korištenje maziva ili gdje to korištenje nije prihvatljivo (prehrambena industrija, tekstilna) zbog svojih izvrsnih antifrikcionih svojstava i dobrog prigušenja vibracija. Međutim, zbog vrlo loših mehaničkih svojstava koje podrazumijevaju sklonost puzanju pod opterećenjem i vrlo velika toplinska rastezljivost, očvršćuju se dodavanjem grafita, olova, ugljika ili primjerice bronce, čime nastaje kompozitni materijal.

U radnim uvjetima vrlo velikih temperaturnih ekstrema (vrlo visoke ili vrlo niske temperature) ili uvjetima vrlo agresivnih korozijskih djelovanja primjenjuje se **keramika** ( $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $SiN_4$ ) za izradu ležaja.

Ovisno o smjeru prenošenja opterećenja, ležajevi mogu biti:

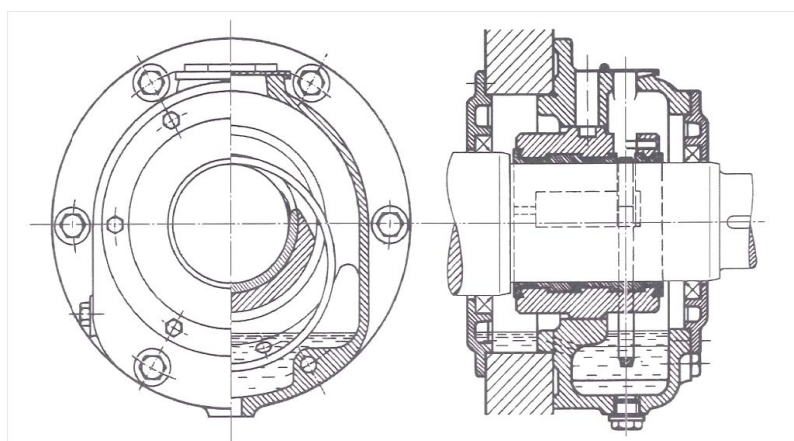
- radijalni - opterećenje djeluje okomito na os ležaja
- aksijalni - opterećenje djeluje uzduž osi ležaja
- radijalno-aksijalni - kombinirani

Radijalni (uzdužni) se ležajevi izrađuju kao jednodijelni i kao dijeljeni. **Jednodjelnom** se **ležaju** tuljac uprešava s čeone strane, a ukoliko to nije moguće, ležajevi se izrađuju od donjeg i gornjeg dijela (poklopca) gdje svaki posjeduje polovicu blazinice i fiksiraju se, poželjno, elastičnim vijcima pomoću površina za centriranje na mjestima koja su najmanje izložena pritiscima u radu.



*Slika 59: Stojeći dvodijelni ležaj s poklopcem*

Ukoliko je kontaktna površina ležaja s vratilom od istog materijala kao i kućište ležaja, radi se o **ležaju od jednoslojnog materijala**. Blazinica može biti prelivena i kovinom kako bi kovina na sebe preuzela ulogu žilavog materijala, a blazinica ulogu čvrstog i tvrdog materijala. Takvi su **ležajevi od dvoslojnog materijala**. Ležajne se kovine mogu ulijevati centrifugalno, brizganjem, nanositi u vrlo tankim slojevima od 0,5 do 0,8 mm platiranjem ili elektrolitički nanositi. Također, u upotrebi su još i ležajevi s troslojnim materijalom kod kojih se na kliznom sloju od ležajne kovine nalazi još jedan sigurnosni sloj od primjerice olovne bronce [23].



*Slika 60: Ležaj iz dvoslojnog materijala s prstenom za podmazivanje*

#### **5.4. Reparacija oštećenog ležaja**

Ukoliko postoji relativno gibanje između bilo koja dva elementa, neminovno dolazi do trošenja. Pri radu, ležajevi su podvrgnuti velikim opterećenjima koja uzrokuju pojavu čitavog niza mehanizama trošenja poput adhezijskog i abrazijskog, te zamora materijala. Na slikama 61a i 61b je vidljivo znatno oštećenje vodećeg radijalno-aksijalnog kliznog generatorskog ležaja jedne austrijske hidroelektrane nastalo uslijed trošenja ležaja, odnosno zamora pri radu. Zamor materijala je puknuće ili postupno odvajanje malih čestica materijala uslijed normalne eksploatacije strojnog dijela. Zamor materijala je progresivan i jednom započet, uslijed daljnjeg će se rada postupno povećavati.



*Slika 61a i 61b: Stanje ležaja prije reparacije*

Ležaj s tolikim oštećenjem više nije pogodan za rad, stoga ga je nužno obnoviti, odnosno reparirati.

Na primjeru istog ležaja opisat će se, prema Zadatku, proces reparacije i, s njime povezane, primjene u ovom radu opisanih metoda ispitivanja bez razaranja.

#### **5.4.1. Tehnološki proces reparacije ležaja *fi* 400**

Spomenuti ležaj promjera *fi* 400 mm, tj. **generatorski dvodijelni radijalno-aksijalni vodeći klizni ležaj od dvoslojnog materijala** podvrgnut je reparaciji, odnosno ispravljanju svih oštećenja i zamjeni sloja stare kovine novim.

Tehnološki proces je točno određeni postupak, redoslijed po kojem se izrađuje pod određenim uvjetima dio (sklop, proizvod) iz osnovnog materijala (dijelova, sklopova) sa određenim alatima, napravama na određenim strojevima (radnim mjestima) u određenom vremenu. Iz zakona tehnologije slijedi da će se promjenom tehnološkog

postupka doći do promjene konačnog rezultata, pa je zato nužno da se u proizvodnji striktno pridržava propisan tehnološki proces [27]. Jedan od ciljeva tehnološkog procesa je postići što jednostavniji i što kraći tok materijala. Taj je tok materijala kroz tehnološki proces definiran redoslijedom operacija, pošto je operacija osnovna jedinica tehnološkog procesa. Redoslijed operacija reparacije ležaja o kojemu će biti riječ dat je sljedećim popisom:

**Operacija 10 - RUČNA OBRADA**

Očistiti ležaj. Rastaviti u polutke. Očistiti, ponovno spojiti za dimenzionalnu kontrolu.

**Operacija 20 - DIMENZIONALNA KONTROLA**

Napraviti dimenzionalnu kontrolu kugle, provrta i odriava. Slikati ležaj.

**Operacija 30 - DEFEKTAŽA**

Snimiti ležaj i napraviti nacрте za stranku.

**Operacija 40 - RUČNA OBRADA**

Rastaviti ležaj. Spremiti vijke i zatike.

**Operacija 50 - AUTOGENO ZAVARIVANJE**

Navariti kuglu po postojećoj površini cca. 3-5 mm stranično.

**Operacija 60 - BORVERK**

Poravnati višak vara na dosjedima na čisto.

**Operacija 70 - RUČNA OBRADA**

Spojiti ležaj vijcima za tokarenje.

**Operacija 80 - TOKARENJE - KARUSEL**

Centrirati ležaj. Istokariti staru kovinu iz ležaja na čisto. Očistiti osnovni materijal na čisto. Tokariti (šropati) kuglu izvana fi 765+0,20 mm. Po potrebi počistiti izvana upuste za ploče.

**Operacija 90 - RUČNA OBRADA**

Rastaviti u polutke. Skositi bridove na dosjedima.

**Operacija 100 - BORKVERK**

Po potrebi počistiti poprečne kanale u provrtu.

**Operacija 110 - ŽARENJE**

Žariti na temp. 580 °C / 6 sati. Dati dijagram žarenja.

**Operacija 120 - SAČMARENJE**

Sačmariti provrt i čela za odrive prema TU-01.

**Operacija 130 - MAGNETSKA KONTROLA**

Ispitati osnovni materijal magnetom.

**Operacija 140 - KOSITRENJE**

Pripremiti za kositrenje i kositrili površinu za kovinu prema TU-04.

**Operacija 150 - RUČNA OBRADA LJEVAONICA**

Pripremiti ležaj za centrifugalno lijevanje. Zadelati kanale i otvore. Po potrebi dati ploče na doradu tokarenjem.

**Operacija 160 - TOKARENJE - KARUSEL**

Po potrebi tokariti ploče prema uputama iz lijevaone.

**Operacija 170 - CENTRIFUGALNO LIJEVANJE**

Pripremiti i centrifugalno odliti Kovinu Tego V738 na fi 385 mm.

**Operacija 180 - RUČNA OBRADA LJEVAONICA**

Rastaviti ležaj u polutke. Dobro očistiti ležaj od nečistoće nastale lijevanjem.

**Operacija 190 - BORVERK**

Poravnati višak kovine sa dosjeda. Minimalno počistiti dosjede finom obradom

**Operacija 200 - RUČNA OBRADA**

Očistiti ležaj. Spojiti za tokarenje.

**Operacija 210 - TOKARENJE - KARUSEL**

Tokariti kovinu na fi 396 mm. Upuste sa čela fi 570 x 32 x R10. Skošnja 15/45° mm. Rastaviti, skinuti donju polutku i u gornjoj tokariti kanal R 222 x 150 u simetrali. Počistiti kanale bočno, širine 42 mm.

**Operacija 220 - RUČNA OBRADA**

Po potrebi na poziv karuseliste u op. 150 izvaditi vijke iz ležaja. Skinuti donju polutku.

**Operacija 230 - ULTRAZVUČNA KONTROLA**

Ispitati kovinu ultrazvukom prema ISO-4386-1, klasa B1. Dati atest.

**Operacija 240 - KONTROLA PENETRANTIMA**

Ispitati kvalitetu kovine penetrantom prema ISO-4386-3, klasa B.

**Operacija 250 - RUČNA OBRADA**

Detaljno očistiti ležaj. Pročistiti sve rupe i navoje.

**Operacija 260 - BORVERK**

Pročistiti kanale na gornjoj polutki širine 42 mm. Očistiti skošenje na kanalu širine 150 mm.

**Operacija 270 - RUČNA OBRADA**

Spojiti ležaj na tokarenje.

**Operacija 280 - BORVERK**

Proširiti postojeće rupe fi 25 na fi 26H7 za zatike. Staviti zatike, osigurati od ispadanja u donjoj polutki. Očistiti izvana kanal i upuste na kugli.

**Operacija 290 - TOKARENJE - KARUSEL**

Tokariti kuglu fi 762 mm (nadmjera). Provrt fi 398 mm (podmjera), te odrive na širinu ..... mm. Skošnje 15/45°.

**Operacija 300 - KONTROLA PENETRANTIMA**

Ispitati kvalitetu kovine penetrantom prema ISO-4386 -3, klasa B.

U pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji, u što spada i navedeno repariranje ležaja, tehnološki proces obuhvaća operacije i tehničku kontrolu. **Tehnička kontrola**, kao sastavni dio tehnološkog procesa sastoji se od ulazne, međufazne i završne kontrole. U ovom slučaju, razradit će se, prema slijedu operacija u tehnološkoj dokumentaciji, kontrole magnetnim česticama, ultrazvukom i penetrantskim tekućinama.

#### 5.4.2. Ispitivanje osnovnog materijala

Nakon što su na ležaju primljenom na reparaciju obavljena sva potrebna početna mjerenja dimenzija i snimanje stanja primljenog ležaja sa svim defektima, izvršeno je navarivanje kugle i zatim uklanjanje stare kovine tokarenjem.

Od stare kovine djelomično očišćeni, čelični odljevak se žario u peći na temperaturi 580 °C u vremenu od 6 sati kako bi se otopila preostala stara kovina. Nakon vrlo sporog ohlađivanja, pristupilo se sačmarenju komada kako bi se pripremila površina osnovnog materijala na koju će se naliti ležajna kovina i ispitalo je prije lijevanja.



*Slika 62: Čelični odljevak nakon žarenja*

Treba napomenuti da se u ovoj fazi vrši ispitivanje **magnetnim česticama** pošto je ležaj star i očekuju se prvenstveno površinske greške i pukotine u materijalu do 1 mm, a penetrant nema dovoljnu osjetljivost otkrivanju takvih grešaka.

**Pri ispitivanju** prvenstveno treba odlučiti je li indikacija relevantna ili nije, odnosno je li lažna. Indikacije su obično karakterizirane kao linearne ili kružne. Linearne su one sa duljinama većim od trostruke širine, a kružne one kojima duljina ne prelazi trostruku širinu. Pri velikom opterećenju čak i mikrodiskontinuitet predstavlja veliku opasnost. Veličinu indikacije koja će se uzeti u obzir pri ispitivanju propisuje norma.

Površinski su diskontinuiteti opasniji, ali i vidljiviji od potpovršinskih. Također, potrebno je procijeniti mjesto gdje se indikacija nalazi jer indikacije jednakih dimenzija u dijelovima materijala manje izloženim naprezanju neće biti jednako opasne kao one smještene u dijelovima izloženijim naprezanju.

U ispitivanju magnetnim česticama diskontinuiteti će imati sljedeće karakteristike:



- površinski diskontinuiteti će imati oštre, a potpovršinski zamagljene indikacije.
- pukotine uslijed toplinske obrade imat će kratke, dobro definirane i oštre indikacije često grupirane u nagnute nakupine
- uključine pri zavarivanju mogu biti raznih oblika, a praznina je znak poroziteta
- zamorne pukotine pokazuju se kao oštri jednoliki uzorci neprekinute duljine

U skladu sa redoslijedom operacija, izvršena je kontrola osnovnog materijala. Točan materijal, odnosno kemijski sastav osnovnog materijala nije poznat.

Ispitivanje je vršeno prema normi **CCH 70-3, MT 70-3, klasi** točnosti ispitivanja **3**. Normom CCH 70-3 propisane su specifikacije za ispitivanje čeličnih odljevaka. Klase prema navedenoj normi dane su u Tablici 2.

Tablica 2: Klase točnosti ispitivanja prema CCH 70-3

Tabelle 2

Art der Fehler	Qualitätsklassen	Höchstdimension der Anzeige oder Nr des Referenzstandards nach ASTM E 125				
		1 (1)	2	3	4	5
Kleinste zu berücksichtigende Anzeige (in mm)		0,5	1	1,5	2	3
<b>Lineare Diskontinuitäten</b>	unzulässig					
- maximale Länge der Anzeigen	(2)		3 mm	5 mm	10 mm	15 mm
- Höchstsumme der Längen der Anzeigen in $\Sigma$ (3)	-		18 mm	30 mm	60 mm	90 mm
- Mindestdistanz zwischen den Grenzen von zwei ausgerichteten Anzeigen (4)	-		10 L	8 L	5 L	4 L
<b>Porositäten</b>	unzulässig					
- Höchstdimension der Anzeige / $\Sigma$	-		3 mm	5 mm	5 mm	5 mm
- Verhältnis: Summe der Oberflächen der Anzeigen/ $\Sigma$	-		2 ‰	5 ‰	10 ‰	20 ‰
- Mindestdistanz zwischen den Rändern der zwei benachbarten Anzeigen	-		9 mm	15 mm	15 mm	15 mm
<b>Oberflächenlunker (5)</b>	unzulässig		n° II-1	n° II-2	n° II-3	n° II-4
<b>Einschlüsse (5)</b>	unzulässig		n° III-1	n° III-2	n° III-2	n° III-3

Prema Klasi 3, najmanje indikacije uzete u obzir imaju duljinu od 1,5 mm i smiju posjedovati sljedeće karakteristike;

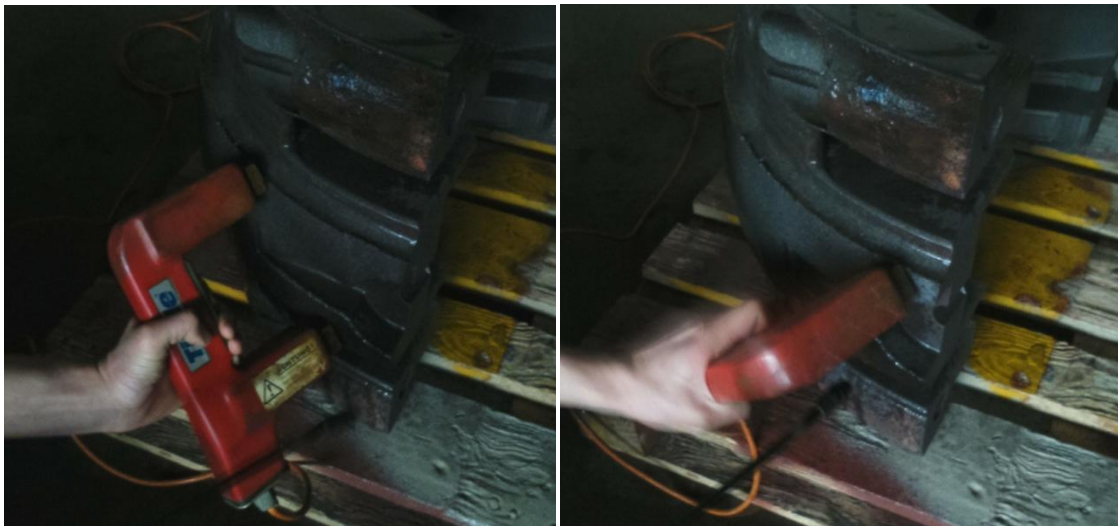
Ukoliko se radi o **linearnim diskontinuitetima**:

- Maksimalna duljina indikacija: 5 mm
- Najveća ukupna duljina indikacija (u  $\Sigma$ ): 30 mm
- Minimalna udaljenost između granica dvaju poravnatih indikacija: 8 L

Ukoliko se radi o **porozitetu**, indikacije smiju posjedovati ove karakteristike:

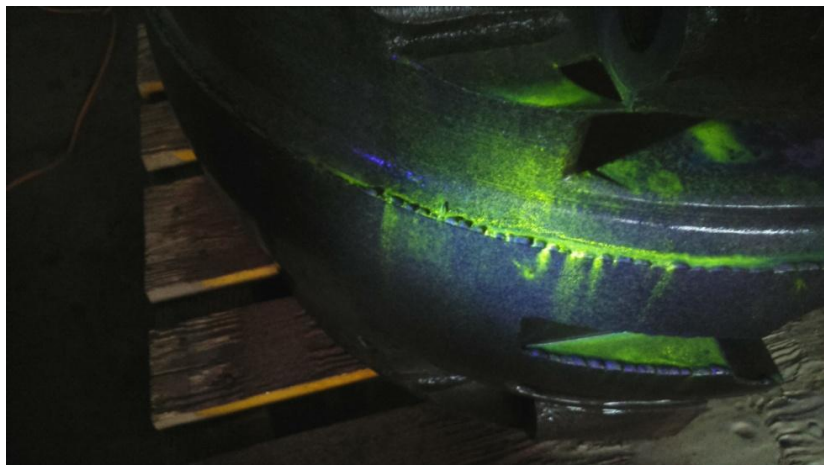
- Maksimalna dimenzija indikacije (u  $\Sigma$ ): 5 mm
- Odnos: suma površina indikacija (u  $\Sigma$ ): 5 ‰
- Minimalna udaljenost između rubova dviju susjednih indikacija: 15 mm

Magnetiziranje je rađeno jarmom, izmjeničnom strujom i to naizmjenično, odnosno u dva međusobno okomita položaja kako bi se ravnomjerno magnetizirao materijal. Svako magnetiziranje je, prema Normi, izvršeno u trajanju 3-5 s, uz prskanje vodene suspenzije fluorescentnih čestica. Ispitivanje je obavljeno lampom sa ultraljubičastim svjetlom pri prigušenom ambijentalnom osvjetljenju, također prema Normi.



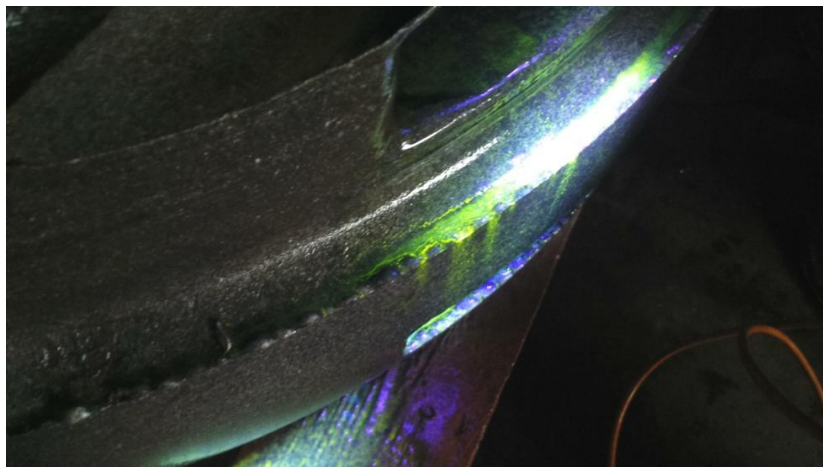
*Slika 63a i 63b: Naizmjenično, međusobno okomito magnetiziranje*

Kod ovakvih se ležajeva pukotina obično očekuje u radijusu, te je potrebno na tim dijelovima obratiti posebnu pozornost (Slika 64).



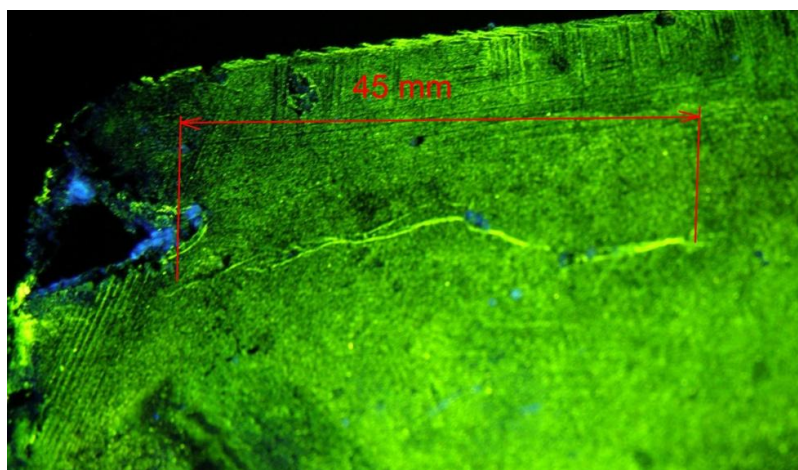
*Slika 64: Magnetne čestice u zoni radijusa pod UV osvjetljenjem*

Također, potrebno je pri ispitivanju paziti da se lažna indikacija ne zamijeni pravom. Jedna je takva uočena lažna indikacija prikazana na Slici 65.



*Slika 65: Lažna indikacija*


Ukoliko se otkriju, greške se moraju brušenjem i/ili zavarivanjem ukloniti nakon što se izmjere, dokumentiraju i pošalju Kupcu na uvid pošto saniranje eventualnih grešaka predstavlja dodatan posao, a time i trošak. Primjer dokumentirane greške prikazan je Slikom 66.



*Slika 66: Dokumentirana greška*

Ispitivanjem **nisu nađene indikacije**, te je moguće nastaviti izvođenje tehnološkog procesa reparacije prema redosljedu operacija.

Nakon ispitivanja, potrebno je izraditi **Mjerni protokol ispitivanja (atest)** kojim se iznose rezultati ispitivanja i potvrđuje da je ispitivanje izvršeno sukladno traženim uvjetima i standardima. Mjerni protokol prethodno obavljenog ispitivanja ležaja *fi 400* prikazan je na sljedećoj stranici.

		<b>MJERNI PROTOKOL / TEST CERTIFICATE</b>		Arhiv br. / Arch. No <b>KBR.MT.</b> _____	
		Opis mjerenja / Description of Measurement <b>MAGNETSKO ISPITIVANJE</b> <b>MAGNETIC EXAMINATION</b>		Listova: <b>1</b>	List: <b>1</b>
<b>PREDMET MJERENJA:</b> Object of measurement		<b>LAGERSCHALE Ø400</b>		<b>OBJEKT:</b> Plant	
<b>BROJ NACRTA:</b> Drawing No.		-		<b>RADNI NALOG:</b> Work order	
<b>BROJ KOMADA:</b> Quantity		-		<b>NARUDŽBA:</b> Order	
<input type="checkbox"/> ULAZNA KONTROLA / Incoming insp.		<input type="checkbox"/> ZAVRŠNA KONTROLA / Final insp.		<input type="checkbox"/> NAKON POPRAVKA / After repair	
<input checked="" type="checkbox"/> KONTROLA U PROIZVODNJI / Interim. insp.		<input type="checkbox"/> KONTROLA U REMONTU / In service			
<input type="checkbox"/> OTKIVAK / Forging		<input type="checkbox"/> ZAVAR / Weld		<input type="checkbox"/> LOPATICA / Blade	
<input checked="" type="checkbox"/> ODLJEVAK / Casting		<input type="checkbox"/> NAVAR / Overlay		<input type="checkbox"/> LEŽAJ / Bearing	
<input type="checkbox"/> ŠIPKA / Bolt-material		<input checked="" type="checkbox"/> PRIPREMA ZAVARA		<input checked="" type="checkbox"/> OSNOVNI MAT. / Basic material	
<b>MATERIJAL / Material</b> Postojeći		<b>TOPL. OBRADA</b> Heat treated		<input checked="" type="checkbox"/> DA / Yes <input type="checkbox"/> NE / No	
				<b>STANJE POVRŠINE</b> Surface cond.	
				<input checked="" type="checkbox"/> PRIHVATLJIVO / Acceptable	
<b>OPSEG ISPITIVANJA</b> Extent of testing		<input type="checkbox"/> VIDI UPUTSTVO/NACRT/ See instructions/Drawing/ <input type="checkbox"/> PLAN KONTROLE / I & T plan		<input checked="" type="checkbox"/> 100 % PRISTUPAČNE POVRŠINE 100 % of the accessible surface	
				<b>DEMAGNETIZACIJA</b> Demagnetization <input type="checkbox"/> DA/Yes <input checked="" type="checkbox"/> NE/No	
<b>INSTRUKCIJE</b> Instructions		<input type="checkbox"/> 101.D5.NDM.0001.94 <input type="checkbox"/> HZLM 21014 <input type="checkbox"/> HZLM 21007 <input checked="" type="checkbox"/> CCH 70-3, MT 70-3, kl. 3		<input type="checkbox"/> HZLM 603504-3 Q3 <input type="checkbox"/> HZLM 603106-2 <input type="checkbox"/> HRLM 603107 <input type="checkbox"/> HRN EN 1369, kl. 3	
				<input type="checkbox"/> DIN 17 245 <input type="checkbox"/> DIN 1691 : MS2 <input type="checkbox"/> ASME Sect V. Art.7 <input type="checkbox"/> ONORM 10228-1-Qc4	
<b>APARAT</b> Instrument	<b>TIP</b> Type	<b>TVM 220</b>		<b>TVORNIČKI BROJ</b> No. of instrument	<input checked="" type="checkbox"/> TIEDE
				<input type="checkbox"/> ZAVOJNICA/Coil	
<b>MAGNETSKE ČESTICE</b> Magnetic particles		<input checked="" type="checkbox"/> FLUORESC. 633.10 Fluoresc.		<input type="checkbox"/> CRNE / Black	
				<input type="checkbox"/> CRVENE / Red	
				<b>BR.ŠARŽE/Batch Number:</b> 1401035	
<b>NOSIVO SREDSTVO</b> Carrier fluid		<input checked="" type="checkbox"/> VODA / Water		<input type="checkbox"/> ULJE / Oil	
				<input type="checkbox"/> PETROLEJ/Petroleum	
<b>ZA MAG.KORIŠTENOM/</b> Mag. With:		<input checked="" type="checkbox"/> JARAM / Yoke		<input type="checkbox"/> CENTRALNI VODIČ Central conductor	
				<input type="checkbox"/> ZAVOJNICA Coil	
				<input type="checkbox"/> PROTOK STRUJE Flow of current	
				<input type="checkbox"/> INDUKCIJA Inducted current	
<b>VRSTA STRUJE</b> Magnetizing current		<input checked="" type="checkbox"/> IZMJENIČNA / AC <input type="checkbox"/> ISTOSMJERNA/DC		<input type="checkbox"/> IZMJENIČNA / AC <input type="checkbox"/> ISTOSMJERNA / DC	
				<input type="checkbox"/> IZMJEN. / AC <input type="checkbox"/> ISTOSMJ./DC	
				<input type="checkbox"/> IZMJEN. / AC <input type="checkbox"/> ISTOSMJ./ DC	
				<input type="checkbox"/> IZMJEN. / AC	
<b>RAZM. POL./ ELEKTR.</b> Pole / prod distance		<b>120 mm</b>			
<b>JAKOST STRUJE</b> Amperage				CENTRALNI VODIČ Central cond. kA	
				kA	
				kA	
<b>AMPER - ZAVOJI</b> Ampere - turns				NAMATANJEM VODIČA Cabl wrappings kA	
				kAZ	
				kAZ	
<b>JAKOST MAGN. POLJA</b> Field strenght		<b>20 ≥ A / cm</b>		A / cm	
				A / cm	
				≥ A/cm	
<b>IZMJERENO</b> Measured		<b>20 &gt; A / cm</b>		A / cm	
				A / cm	
				> A/cm	
				A / cm	
<b>REZULTATI ISPITIVANJA</b> <b>RESULTS OF EXAMINATIONS</b>					
<input checked="" type="checkbox"/> BEZ INDIKACIJA No indications		<input type="checkbox"/> DOZ. INDIKACIJE Admissible indicat.		<input type="checkbox"/> NEDOZ. INDIKACIJE In admissible indications	
				<input type="checkbox"/> UPOTREBLJI. PG. br. Applicable NCR No.	
				<input type="checkbox"/> NAKON POPRAVKA / After repair DOBRI /Right ŠKART/Reject	
<b>Primjedbe / Remarks:</b>					
<b>Protokol u skladu sa:</b> EN 10204 3.1 Certification according to:			<b>DET NORSEKE VERITAS QUALITY SYSTEM CERTIFICATE</b> Certificate No. <b>CERT-139811-2013-AQ-HRV-HAA</b>		
		<b>Ispitao / Tested by</b>		<b>Odobrio / Approved by</b>	
<b>Potpis / Signature</b>					
<b>Datum / Date</b>					

Kao što je i iz atesta vidljivo, ispitala se cjelokupna površina ispitivanog odljevka (100% pristupačne površine) fluorescentnim česticama, a jakost magnetskog polja korištenog pri ispitivanju iznosila je oko 20 A/cm.

Čestice korištene pri ispitivanju također moraju imati svoj certifikat (atest), kao i sva oprema kojom se ispitivanje izvodi kako bi se osigurala sljedivost tehnološkog procesa.

U tehnici, **standard** predstavlja obveznu **tehničku normu** kojom se definiraju dimenzije, materijali i kvaliteta raznih proizvoda ili postupci ispitivanja, proračunavanja ili ispitivanja kvalitete, odnosno svojstava robe [28].

Poštivanjem standarda osigurava se da će djelatnosti i proizvodnja rezultirati proizvodima sa značajkama koje zadovoljavaju potrebe i očekivanja kupca. Te su potrebe i očekivanja izraženi u specifikacijama proizvoda, a skupno se nazivaju zahtjevi kupaca. Jer kupac je taj koji konačno određuje prihvatljivost proizvoda [29].

Ugovorom kupac može utvrditi koji će se standardi primjenjivati u proizvodnji, odnosno određenoj djelatnosti ili standarde prepustiti na određivanje organizaciji koje te djelatnosti, odnosno proizvodnju provodi.

#### **5.4.3. Ispitivanje nalijevanja ležajne kovine na osnovni materijal**

Daljnijim procesom reparacije, čelični se odljevak podvrgnuo elektrolitskom nanošenju kositra u kupki za kositrenje čime se pripremio komad za optimalno nalijevanje bijele kovine. Nakon provedene pripreme, provelo se centrifugalno lijevanje kovine Tego V738.

U tablicama koje slijede na Slici 67 dane su karakteristike bijelih kovina, uključivši i, za ovaj ležaj korištenu, Tego V738.

Kao što je vidljivo iz tablica na Slici 67, korištena kovina ima najveću tvrdoću kod povišenih temperatura, najveću otpornost na naprezanje, kao i veliku veznu čvrstoću.

	LM THERMIT	SnSb12 Cu6Pb (WM 80)	TEGO V738	TEGOTENAX V840	TEGOTENAX S V841	ECKA Tegostar
Sn	6	80	81	89	88	81,13
Pb	75,8	2	max 0,06	max 0,06	max 0,06	
Sb	15	12	12	7,5	7,5	12
Cu	1,2	6	5	3,5	3,5	6
Ni	0,5		0,3		0,2	
As	0,5		0,5		max 0,1	
Cd	1		1,2		0,8	
Zn						0,6
Ag						0,1

		LM THERMIT	SnSb 12 Cu6Pb (WM 80)	TEGO V738	TEGOTENAX (V840)	TEGOTENAX S (V841)	TEGOSTAR 738						
Tvrdoća kod povišenih temeperatura HB 10/250/80	20°C	26	27	35	23	28	24						
	50°C	21	23	28	17	23	20						
	100°C	14	13	17	10	16	12						
	150°C	8	7	10	8	9	10						
NAPREZANJE NA VLAK													
0,2% gran.rastez	$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	28	62	84	46	66	76						
Vlačna čvrstoća	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	57	89	102	77	100	78						
Istezanje	A <sub>5</sub> %	1.2	3.0	1.5	11.2	8.4	1.0						
Modul elastičnosti	$R_{p0,01}$ N/mm <sup>2</sup>	29900	55700	52500	56500	49500	57000						
NAPREZANJE NA TLAK													
0,2% gran. tečenja	$\sigma_{d0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	20°C	100°C	20°C	100°C	20°C	100°C	20°C	100°C	20°C	100°C		
		46	27	62	37	80	48	47	27	63	30	90	50
2% gran. tečenja	$\sigma_{d2}$ N/mm <sup>2</sup>	85	59	87	69	122	80	76	45	103	60	107	54
Tlačna čvrstoća	$\sigma_{dB}$ N/mm <sup>2</sup>	134	83	189	121	195	126	157	100	235	136	190	91
Skraćenje pri sabijanju	$\epsilon_{dB}$ %	34	37	46	53	34	34	47	50	39	44	50	50
VEZNA ČVRSTOĆA (Čelik C10; debljina metala ležaja > 6 mm) (DIN ISO 4386) RHC													
	$R_{ch}$ N/mm <sup>2</sup>	57	39	98	75	86	62						
DINAMIČKO NAPREZANJE													
Izmj. Savojna čvrstoća	$\sigma_{bW}$ N/mm <sup>2</sup>	±28	±28	±39	±29	±33	±35						
TRAJNA UDARNA SAVOJNA ČVRSTOĆA													
Srednji br. Uudara do kidanja		285	490	910	3741	2689	2856						
Srednji rad udara do kidanja	J	77	134	250	1028	739	785						

Slika 67: Vrste i karakteristike bijele kovine

Nakon lijevanja bijele kovine, međufaznom je kontrolom potrebno ispitati nalijeganje ležajne kovine na osnovni materijal, u ovom slučaju na čelični odljevak.

**Prvo se ispitalo ležaj ultrazvukom.** Ispitivanje se provelo prema **ISO 4386-1** normi namijenjenoj ispitivanju višeslojnih kliznih ležajeva s debljinom ležajnog sloja  $\geq 0,5$  mm, **klasi pogrešaka B1** (Tablica 3).

Tablica 3: Grupe pogrešaka

Grupa pogrešaka	Zona spoja dvaju materijala		Rubna zona	
	Pojedinačna greška [mm <sup>2</sup> ] max.	Ukupno grešaka [%] max.	Greška vezana za jedan rub zone nesmiije prelaziti [%] max.	[mm] max.
A	0	0	0	0

B1	0,75b	1	1	5
B2	2b	1	1	5
C	2b	2	2	10
D	4b	4	4	20

pri čemu je:  $b$  čitava funkcionalna duljina radijalnog ležaja i širinu segmenta ili prstena kod aksijalnog ležaja;  $a$  rubna zona vidljivi prijelaz između osnovnog i ležajnog materijala.

Grupa pogrešaka A je primjenjiva na novoizrađenim ležajevima debljine stijenki osnovnog materijala do 70 mm, bez praznina i rupa i bez prekida na kliznoj površini. Varijacije debljine stijenke nesmiye prelaziti 25%.

**Grupa B1 i B2** je primjenjiva na novoizrađenim i repariranim ležajevima debljine stijenki osnovnog materijala do 100 mm, bez praznina i rupa i bez prekida na kliznoj površini. Varijacija debljine stijenke nesmiye prelaziti 50%.

Grupa pogrešaka C je primjenjiva na novoizrađenim i repariranim ležajevima debljine stijenki osnovnog materijala do 100 mm (ako je nužno, sa prazninama i rupama i prekidima na kliznoj površini). Varijacija debljine stijenke nesmiye prelaziti 50%.

Grupa pogrešaka D se primjenjuje na novoizrađenim i repariranim ležajevima koji se ne mogu smjestiti u prije navedene kategorije.

Korištena je ravna  $\Phi$  10 sonda s jednostrukim aktivnim elementom, frekvencije 4 MHz, prema uputama Norme (Tablica 4). Kao kontaktno sredstvo korišteno je, na prethodno očišćenu površinu, ručno nanoseno lako strojno ulje. Alternativno, ležaj se može i uroniti u ulje.

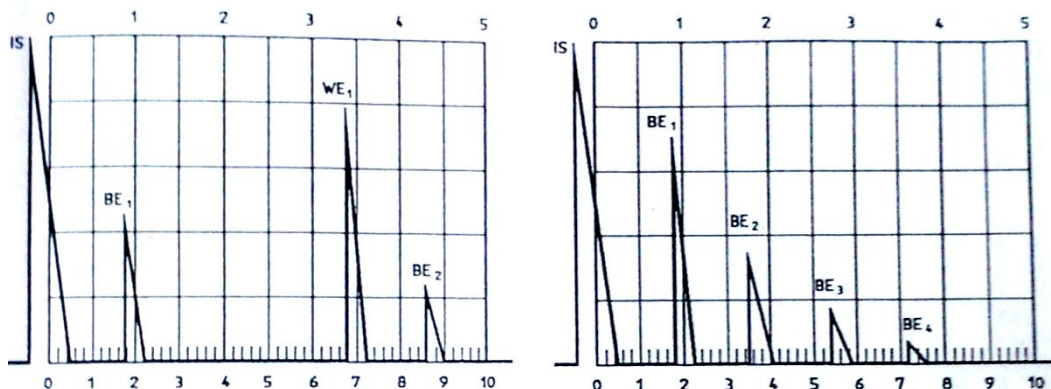
Tablica 4: Izbor sonde

Debljina sloja ležajnog metala [mm]	Debljina sloja osnovnog metala (čelik) <sup>1</sup>	Promjer sonde [mm]	Frekvencija sonde [mm]	Tip sonde
>2	20 do 250	10 do 30	2 do 5	Jedan kristal
1 do 3	5 do 50	10 do 15	4 do 6	Dva kristala
0,5 do 3	1 do 25	6	10	Dva kristala
1 - Za lijevane čelike, maksimum je umanjnjen za faktor 0,5; za broncu 0,3 do 0,2				

Norma propisuje mogućnost ispitivanja prijanjanja dvjema metodama, sa i bez odjeka pozadine. Trebalo bi se prvenstveno koristiti **ispitivanje sa odjekom pozadine** gdje god geometrija dijela to dopušta.

Naime, **na osnovu visine, tj. intenziteta odjeka spoja i odjeka pozadine**, moguće je procijeniti je li prijanjanje zadovoljavajuće. Da bi prijanjanje bilo zadovoljavajuće, odjek spoja mora biti manji ili jednak odjeku pozadine (Slika 68a). Ako je odjek spoja veći od odjeka pozadine, prijanjanje nije zadovoljavajuće. Ukoliko uopće nema odjeka pozadine, ili se odjek spoja ponavlja bar tri puta, spoj niti nije ostvaren, odnosno prisutan (Slika 68b). Oba se navedena slučaja tretiraju kao nezadovoljavajuće prijanjanje. Ako su odjeci spoja i pozadine prigušeni, znak je to poroziteta u ležajnom materijalu i također će se zaključiti nezadovoljavajuće prijanjanje.

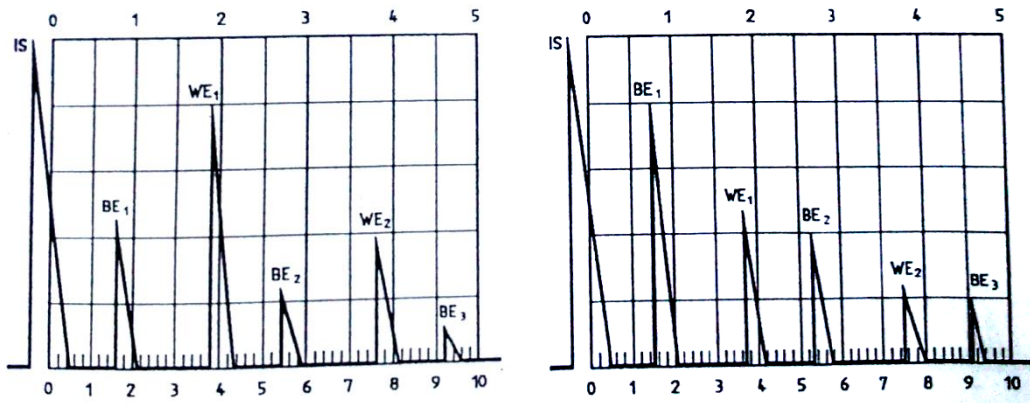
Kod ležajeva veoma velike debljine i malog promjera, ili pri upotrebi sonde s dvostrukim aktivnim elementom, odjek pozadine može biti manji od odjeka spoja iako je prijanjanje dobro. Uzrok tome je skretanje zvučne zrake ili slabljenje zrake. U tom se slučaju pomoću višeslojnog etalona određuje omjer razine signala jednog dobrog i jednog lošeg spoja, tj. prijanjanja.



Slika 68a i 68b: Dobro (a) i loše (b) prijanjanje

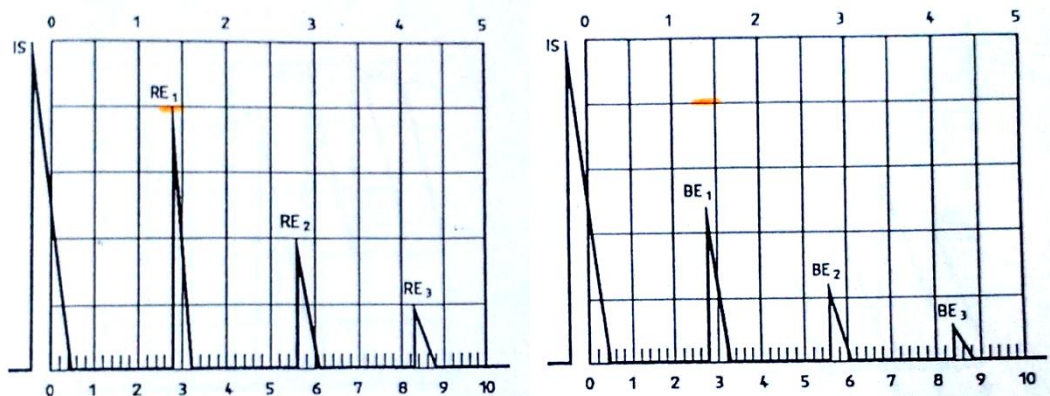
Isto tako, moguće je procijeniti prijanjanje i **na temelju smanjenja visine odjeka pozadine**. To je ostvarivo umjeravanjem etalonima koji zadovoljavaju ISO 2400 ili ISO 7963 tako da se prikažu bar dva odjeka pozadine, te namještanjem amplitude da prvi odjek pozadine dostigne 80 % visine ekrana. Nakon označavanja te visine, moguće je procjenjivati prijanjanje ili otkrivati greške pomoću visina odjeka prije prvog pozadinskog. Ukoliko je visina odjeka 50 % visine ekrana ili manja, zanačajna je greška prisutna.





Slika 69a i 69b: Bez greške (a) i greška (b) u prijanjanju

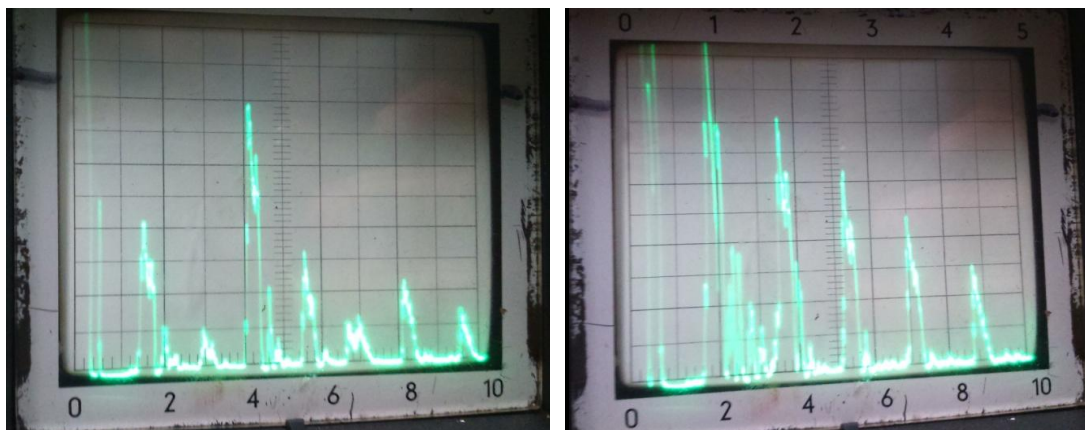
**Ispitivanje bez odjeka pozadine** se provodi tako da se prvo pomoću etalona namjesti referentni odjek na 80 % visine ekrana (Slika 70a). Prianjanje je zadovoljavajuće ukoliko je odjek spoja manji od referentnog (Slika 70b). Ako je odjek jednak ili veći od referentnog, prisutna je greška u spoju. Nepravilan ili raspršen signal ukazuje na poroznost ležajnog materijala.



Slika 70a i 70b: Referentni odjek i zadovoljavajuće prijanjanje

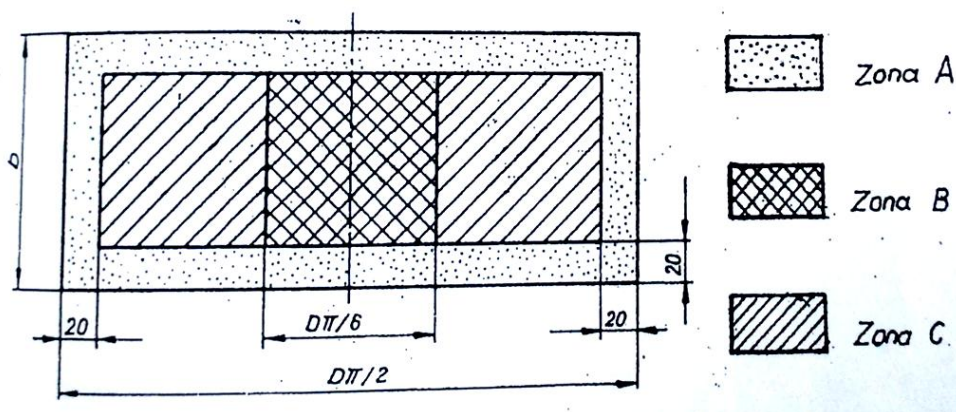
Pri ispitivanju prianjanja korištena je metoda gdje se kvaliteta prianjanja procjenjuje na temelju smanjenja visine odjeka pozadine. Naravno, u prvom je koraku izvršeno **umjeravanje**.

Ispitni se sustav umjerio pomoću stepenastog etalona istog sastava i debljine kao i ispitivani dio. Etalon ima sloj materijala koji ispravno naliježe na osnovni materijal (Slika 71a) i sloj koji ne naliježe ispravno na osnovni materijal (Slika 71b). Vremenska baza bi trebala biti tako podešena da se na etalonu dobiju barem dva odjeka i da prvi odjek pozadine bude na 80 % visine ekrana (Slika 71a). Zbog veće debljine sloja (mjerno područje 100 mm), potrebno je bilo pojačanje (amplituda) iznosa 60 dB.



Slika 71a i 71b: Umjeravanje ispitnog sustava

U eksploataciji su određeni dijelovi ležajnih površina bitno različito opterećeni. Te su zone prikazane Slikom 72 i potrebno je na njih obratiti posebnu pozornost pri ispitivanju, pogotovo na Zonu A.



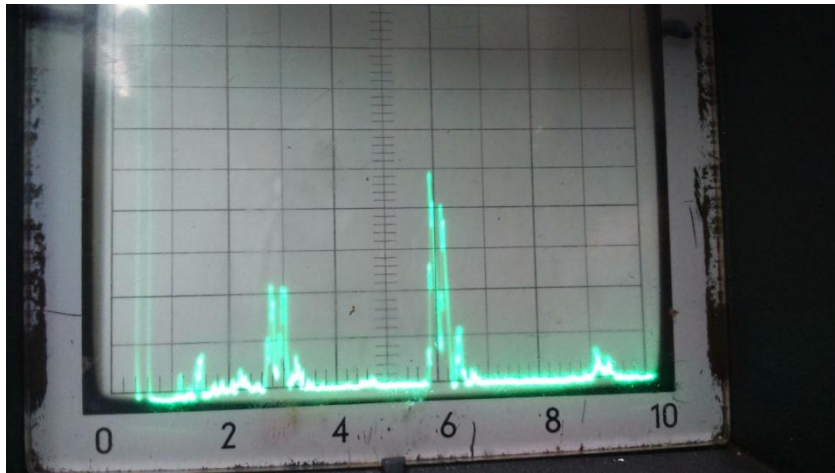
Slika 72: Prikaz pojedinih zona ležaja

Zona A - rubna zona ležajne površine, obuhvaća područje uz rub ležajne površine te uz otvore i kanale za podmazivanje. Sa aspekta opasnosti odvajanja bijele kovine je izrazito opasna zona.

Zona B - nosiva zona ležajne površine.

Zona C - zona ležajne površine, obuhvaća i dio bijele kovine koji na ležaju služi kao uljna brtva. Od sekundarnog je značaja.

Slike 73a i 73b prikazuju dobar spoj, odnosno dobro prijanjanje ležajne kovine na osnovni materijal. Prvi odjek na ekranu korištenog ultrazvučnog uređaja Krautkramer USL 32 je odjek spoja ležajne kovine i osnovnog materijala, a drugi odjek je odjek stražnje stijenke ležaja (pozadinski odjek).



*Slike 73a i 73b: Ispitivanje prianjanja ležajne kovine*



*Slika 74: UZ ispitivanje donje polovice ležaja*

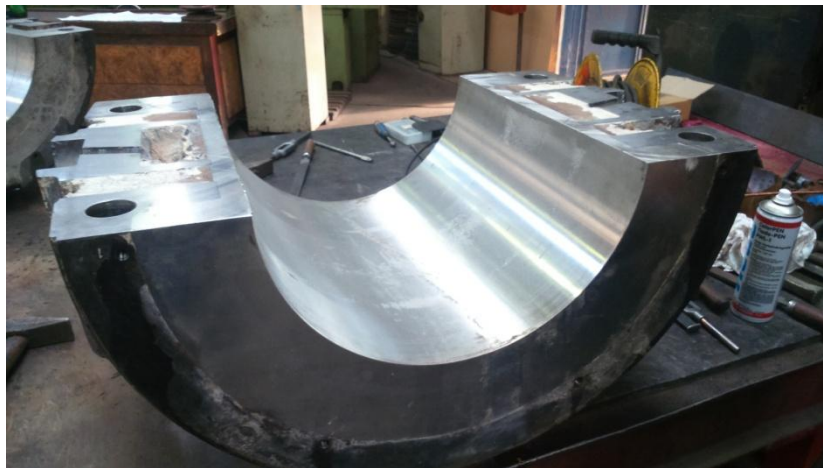
Potrebno je napomenuti da se ispitivalo vučenjem sonde maksimalnom brzinom od 150 mm/s kako i propisuje korištena Norma.

UZ ispitivanjem **nisu nađene greške** u nalijeganju kovine na osnovni materijal.

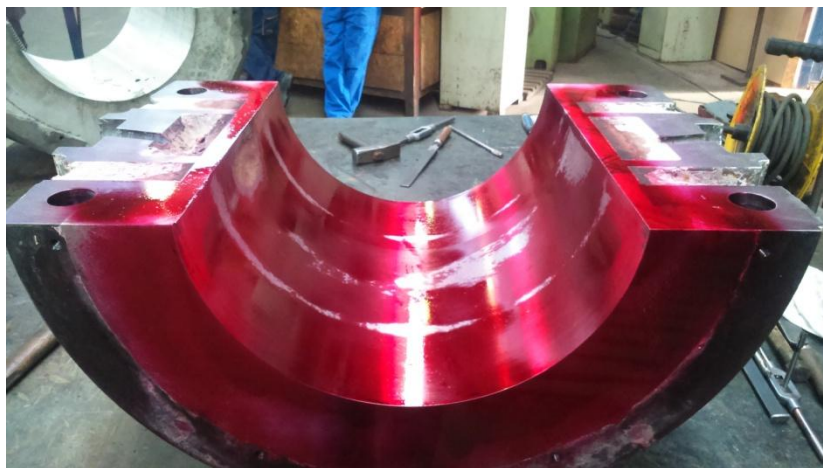
Nakon ultrazvučnog, pristupilo se daljnjem ispitivanju nalijeganja ležajne kovine i otkrivanju diskontinuiteta na kliznoj površini ležaja, i to **penetrantskim tekućinama**.

Ispitivanje je provedeno prema **ISO 4386-3** normi, **Klasi B** prihvatljivih grešaka.

Na, prethodno od svih nečistoća očišćenu, ispitnu površinu hrapavosti  $Ra \leq 5 \mu m$  (Slika 75) nanesen je **vodom perivi penetrant (Metoda A)** crvene boje u spreju sa udaljenosti od 20 do 30 cm. Vrijeme zadržavanja penetranta iznosilo je 15 min (Norma propisuje 10 - 60 min).



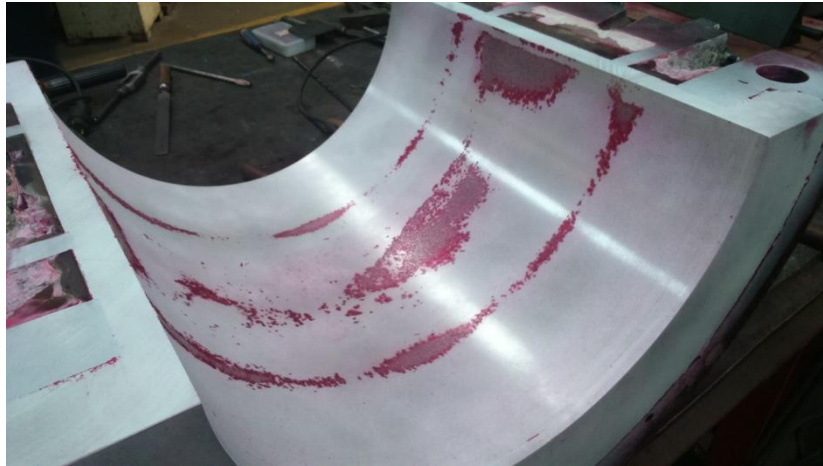
*Slika 75: Očišćena gornja polovica ležaja prije nanošenja penetranta*



*Slika 76: Gornja polovica ležaja poprskana penetrantom*

Nakon vremena zadržavanja, višak penetranta je odstranjen vodom, čija temperatura ne smije prijeći  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nakon uklanjanja viška penetranta, na potpuno suhi se ispitni materijal nanio **nevodeni razvijач na bazi otapala (Oblik e - nevodeni Tip 2 - vidljivi)** bijele boje u sloju manjem od  $25 \mu m$ . Vrijeme razvijanja iznosilo je 15 min, te se zatim izvršilo obilježavanje indikacija.

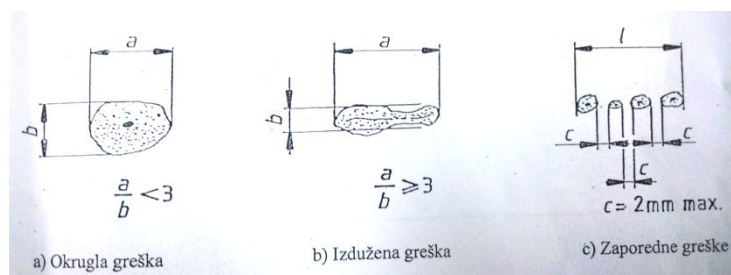
Površinski se diskontinuiteti poput tragova alata ili velike pukotine neće prikazati razvijanjem. Takve površine treba sanirati i nakon izvršene sanacije ponovno ispitati. Izolirane greške manje od 1,5 mm se zanemaruju.



Slika 77a i 77b: Gornja i donja polovica ležaja nakon razvijanja

Vrlo je važno napomenuti da se poroznost središnjeg dijela koji se vidi na Slici 77a može zanemariti jer će se taj sloj materijala ukloniti tokarenjem pri kasnijoj obradi.

Naime, ispitivana površina mora biti uspoređena sa slikama klasa indikacija, ovisno koja se klasa pri ispitivanju traži.

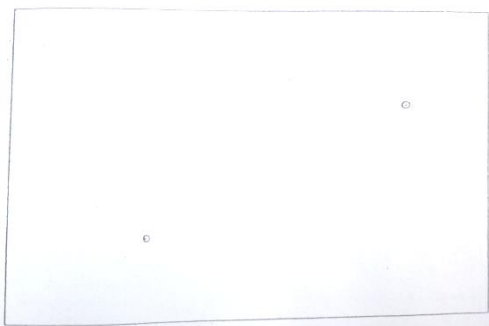


Slika 78: Tipovi grešaka

Slika 78 prikazuje tipove grešaka na temelju kojih će se prepoznavati indikacije i svrstavati po sljedećim klasama, gdje svaka ilustracija predstavlja površinu od 1 dm<sup>2</sup>:

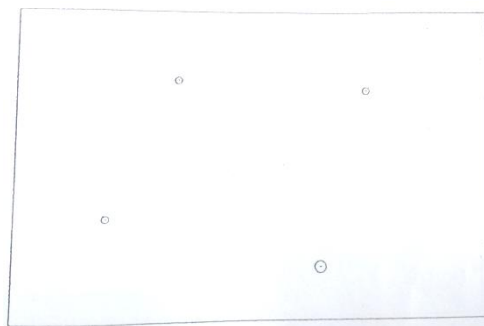
#### Klasa A

- a) Nema okruglih grešaka čiji je  $a > 3$  mm
- b) Nema izduženih grešaka
- c) Nema grešaka u nizu
- d) Nema više od dvije greške ukupne površine do 6,3 mm<sup>2</sup>
- e) Ukupna površina grešaka ne prelazi 10 mm<sup>2</sup>/dm<sup>2</sup>



#### Klasa B

- a) Nema okruglih grešaka čiji je  $a > 4$  mm
- b) Nema izduženih grešaka
- c) Nema grešaka u nizu
- d) Nema više od četiri greške ukupne površine do 16 mm<sup>2</sup>
- e) Ukupna površina grešaka ne prelazi 20 mm<sup>2</sup>/dm<sup>2</sup>

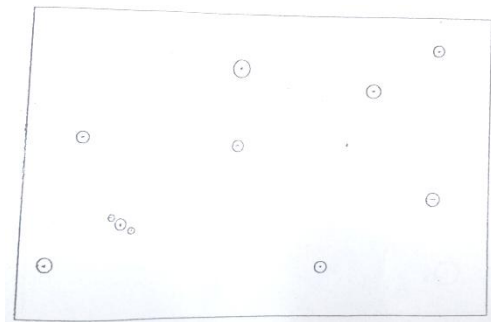
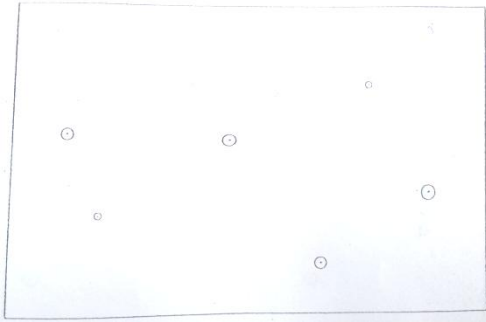


#### Klasa C

- a) Nema okruglih grešaka čiji je  $a > 5$  mm
- b) Nema izduženih grešaka
- c) Nema grešaka u nizu
- d) Nema više od šest grešaka ukupne površine do 40 mm<sup>2</sup>
- e) Ukupna površina grešaka ne prelazi 50 mm<sup>2</sup>/dm<sup>2</sup>

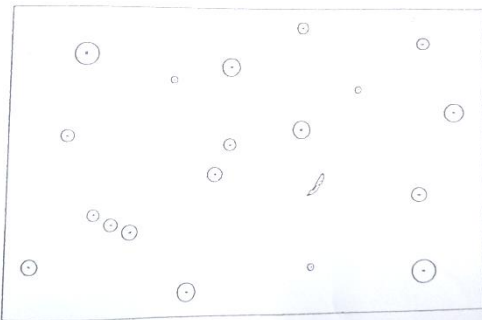
#### Klasa D

- a) Nema okruglih grešaka čiji je  $a > 6$  mm
- b) Nema izduženih grešaka
- c) Nema grešaka u nizu ukupne duljine  $l > 10$  mm
- d) Nema više od jedanaest grešaka ukupne površine do 100 mm<sup>2</sup>
- e) Ukupna površina grešaka ne prelazi 125 mm<sup>2</sup>/dm<sup>2</sup>



### Klasa E

- a) Nema okruglih grešaka čiji je  $a > 8$  mm
- b) Nema izduženih grešaka
- c) Nema grešaka u nizu ukupne duljine  $l > 16$  mm
- d) Nema više od dvadeset grešaka ukupne površine do  $250 \text{ mm}^2$
- e) Ukupna površina grešaka ne prelazi  $250 \text{ mm}^2/\text{dm}^2$



Sam lijev je dobar, nije porozan, što se vidi iz sljedeće slike:



*Slika 79: Dobar lijev kovine na donjoj polovici*





Nakon ispitivanja potrebno je sastaviti izvješće o ispitivanju koje treba sadržavati:

- a) pozivanje na Normu
- b) dimenzije i materijale kliznog ležaja
- c) oznaku upotrijebljenog penetranta, ime proizvođača, tip penetranta i broj šarže penetranta
- d) rezultate ispitivanja prijanjanja na spoju između ležajnog i osnovnog materijala, te utvrđenu i dopuštenu grupu grešaka
- e) rezultate ispitivanja na kliznoj površini ležaja, te utvrđenu i dopuštenu klasu grešaka
- f) mjesto i datum provođenja ispitivanja, uz ime kontrolora koji je ispitivanje proveo

## 6. ZAKLJUČAK

Zbog izvjesnog produljenja roka završetka reparacije ležaja, za vrijeme pisanja ovog rada nije bilo moguće provesti, a time ni obraditi ostatak tehnološkog procesa, odnosno za ovaj rad bitnu, završnu kontrolu u potpunosti repariranog ležaja.

Ipak, na temelju dosadašnje primjene, u ovom radu opisanih, metoda u tehnološkom procesu reparacije kliznog ležaja, može se zaključiti da su metode ispitivanja materijala bez razaranja:

- vrlo efikasne i brze u otkrivanju grešaka, sa pouzdanim rezultatima
- relativno jednostavne, sigurne i jeftine za primjenu
- esencijalne za osiguranje kvalitete i dobro odvijanje tehnološkog procesa, kao i
- ključne kako bi rezultat, odnosno proizvod tehnološkog procesa bio izrađen prema svim zahtjevima kupca, u prihvatljivoj kvaliteti i unutar dozvoljenih tolerancija, udovoljavao sigurnosne aspekte, te bio kvalitetan i pouzdan za eksploataciju.

## LITERATURA

- [1] [https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/cc\\_mpi\\_index.htm](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/cc_mpi_index.htm)
- [2] <http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/RO/VI%20semestar/Tehnicka%20dijagnostika/Predavanja/13.TehDi.pdf>
- [3] Pinter V.: Osnove elektrotehnike - Knjiga prva, Tehnička knjiga D.D., Zagreb, (1994.)
- [4] Materijali za elektrotehničke proizvode, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, (2010.) [http://www.ieee.hr/\\_download/repository/TE\\_8\\_novi.pdf](http://www.ieee.hr/_download/repository/TE_8_novi.pdf)
- [5] Liquid Penetrant and Magnetic Particle Testing at Level 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2000.)  
<http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-11.pdf>
- [6] Essert M., Grilec J.: Elektricitet i magnetizam - fizikalne osnove, Digitalni udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, (2009.)  
[https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1348657703-0-eim\\_2009.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1348657703-0-eim_2009.pdf)
- [7] Whites K.: Lecture 7: Diode Rectifier Circuits, (2009.)  
<http://whites.sdsmt.edu/classes/ee320/notes/320Lecture7.pdf>
- [8] ELEC 435, Electronics 1, Rectifier Circuits  
<http://web.alfredstate.edu/albaf/r/Fall07/ELEC354/LEC%5CDiodes-part2.pdf>
- [9] Dixon J.: Three-phase Controlled Rectifiers, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile <http://web.ing.puc.cl~power/paperspdf/dixon/21.pdf>
- [10] Serway R., Beichner R.: Physics for Scientists and Engineers, Saunders College Publishing, (2000.)
- [11] <http://www.ideal.hr/ndt-magnetna-metoda>

- [12] An Introduction to Fluorescence Spectroscopy, PerkinElmer Inc., (2000.)  
<http://www.chem.uci.edu/~dmitryf/manuals/Fundamentals/Fluorescence%20Spectroscopy.pdf>
- [13] [https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/cc\\_pt\\_index.htm](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/cc_pt_index.htm)
- [14] Cones and Color Vision - Neuroscience, Sinauer Associates Inc., (2001.)  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11059/>
- [15] Paić M.: Gibanja, sile, valovi, Školska knjiga, Zagreb, (1997.)
- [16] [https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc\\_ut\\_index.htm](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm)
- [17] <http://www.mistrasgroup.com/services/traditionalndt/ut.aspx>
- [18] Ultrasonic Testing of Materials at Level 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1988.)
- [19] Sorić I.: Valovi, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split,  
[http://marjan.fesb.hr/~suri/ktf/predavanja/predavanje\\_11\\_Valovi.pdf](http://marjan.fesb.hr/~suri/ktf/predavanja/predavanje_11_Valovi.pdf)
- [20] <http://www.slideshare.net/crisevelise/fundamentals-of-ultrasound/>
- [21] Berke M.: Nondestructive Material Testing with Ultrasonics - Introduction to the Basic Principles, (2000.)  
<http://www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke1.htm#0>
- [22] Yudhister K., Ashtok K., Reeta G.: On the Calibration of Ultrasonic Flaw Detector, National Physical Laboratory, New Delhi  
<http://www.qnetworld.de/nde2002/papers/028P.pdf>
- [23] Decker K.: Elementi strojeva, Golden Marketing, Tehnička knjiga, Zagreb, (2016.)
- [24] Jelaska D.: Elementi strojeva, Skripta, Fakultet strojarstva, elektrotehnike i brodogradnje, Split, (2005.)  
<http://marjan.fesb.hr/~djelaska/documents/ES-skripta-760.pdf>

[25] Math M.: Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, (2010.)

[26] Filetin T., Kovačićek F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, (2011.)

[27] Gačnik V., Vodenik F.: Projektiranje tehnoloških procesa, Tehnička knjiga, Zagreb, (1990.)

[28] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Standard>

[29] Sustavi upravljanja kvalitetom - Temeljna načela i rječnik (ISO 9000:2000)

## POPIS OZNAKA

Simbol	Jedinica	Značenje
$\varepsilon$	V	elektromotorna sila
$\Phi$	Wb	magnetski tok
$t$	s	vrijeme
$B$	T	magnetsko polje
$S$	m <sup>2</sup>	površina
$T$	°C	temperatura
$\mu$	H/m	permeabilnost
$f$	Hz	frekvencija
$I$	A	jakost struje
$\vartheta$	°	okrajnji kut
$F$	N	sila
$p$	Pa	pritisak
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\lambda$	m	valna duljina
$v$	m/s	brzina
$B$	N/m <sup>2</sup>	volumni modul elastičnosti tekućine
$l$	m	duljina
$E$	N/m <sup>2</sup>	Youngov modul elastičnosti
$z$	Pas/m	akustična impedancija
$c$	m/s	brzina zvuka
$I_r$		intenzitet odbijenog vala
$I_i$		intenzitet upadnog vala
$S/N$		omjer signala prema šumu
$J$	A/m <sup>2</sup>	gustoća struje

## POPIS SLIKA

<i>Slika 1</i>	Magnet	3
<i>Slika 2</i>	Nailazak silnica magnetskog polja na pukotinu	3
<i>Slika 3</i>	Magnetiziranje feromagnetičnih materijala	6
<i>Slika 4</i>	Krivulja histereze	6
<i>Slika 5</i>	Permeabilnost različitih materijala	7
<i>Slika 6</i>	Otkrivanje grešaka kružnim magnetskim poljem	8
<i>Slika 7</i>	Izravna indukcija	9
<i>Slika 8</i>	Magnetiziranje jarmom	9
<i>Slika 9</i>	Magnetiziranje upotrebom elektroda	10
<i>Slika 10</i>	Magnetiziranje zavojnicom	10
<i>Slika 11</i>	Djelovanje ispravljača na izmjeničnu električnu struju	13
<i>Slika 12</i>	Tunel za demagnetizaciju sa zavojnicom	14
<i>Slika 13</i>	Demagnetizacija materijala vođenjem kroz krivulju histereze	14
<i>Slika 14</i>	Magnetiziranje omatanjem strujnih kablova	16
<i>Slika 15</i>	Prijenosni izvori električne struje	16
<i>Slika 16</i>	Horizontalna jedinica za mokro ispitivanje	17
<i>Slika 17</i>	Elektromagnetski spektar	19
<i>Slika 18</i>	Žarulja sa živinim parama visokog pritiska	20
<i>Slika 19</i>	Bertholdovo ispitno tijelo	21
<i>Slika 20</i>	Sonde Gauss metra	21
<i>Slika 21</i>	Čelični podmetač	22
<i>Slika 22</i>	Čestice za suho magnetsko ispitivanje	23
<i>Slika 23</i>	Lijevak za odvajanje	25
<i>Slika 24</i>	Osjetljivost oka na boje različitih valnih duljina	28
<i>Slika 25</i>	Loše i dobro močenje površine	30
<i>Slika 26</i>	Kapilarno uzdizanje i kapilarno spuštanje	30
<i>Slika 27</i>	Koraci u ispitivanju penetrantima	34
<i>Slika 28</i>	Tipična jedinica za ispitivanje fluorescentnim penetrantom srednje veličine	36

<i>Slika 29</i>	Prikaz načina djelovanja ultrazvučnog ispitivanja	40
<i>Slika 30</i>	Širenje longitudinalnih i transverzalnih valova	42
<i>Slika 31</i>	Lambovi i Rayleighovi valovi	43
<i>Slika 32</i>	Refleksija vala	47
<i>Slika 33</i>	Refrakcija vala	47
<i>Slika 34</i>	Interferencija vala A i vala B	49
<i>Slika 35</i>	Piezoelektrični efekt	50
<i>Slika 36</i>	Prikaz sastavnih dijelova sonde	50
<i>Slika 37</i>	Kutna sonda	52
<i>Slika 38</i>	Ravna sonda i sonda s dvostrukim aktivnim elementom	53
<i>Slika 39</i>	Kontaktno sredstvo kod ispitivanja kontaktnim sondama	53
<i>Slika 40</i>	Kontaktno sredstvo kod ispitivanja uranjajućim sondama	54
<i>Slika 41</i>	Ultrazvučno ispitivanje laserom	54
<i>Slika 42</i>	EMAT	55
<i>Slika 43</i>	A-scan nepravilnosti sa pripadajućim B-scanom pri ispitivanju zavara	57
<i>Slika 44</i>	Shematski prikaz B-scana nepravilnosti	57
<i>Slika 45</i>	Shematski prikaz C-scana nepravilnosti	58
<i>Slika 46</i>	C-scan korozije	58
<i>Slika 47</i>	Područja zvučnog vala	59
<i>Slika 48</i>	Ispitivanje blizu granice materijala	59
<i>Slika 49</i>	Pravilno i nepravilno ispitivanje	60
<i>Slika 50</i>	Tandem tehnika ispitivanja	60
<i>Slika 51</i>	Rezultirajući odjek u zavisnosti o udaljenosti	61
<i>Slika 52</i>	Rezultirajući odjek u zavisnosti o veličini	61
<i>Slika 53</i>	Umjeravanje kutne sonde pomoću V1 i V2 etalona	63
<i>Slika 54</i>	Vrste trenja: suho, mještovito, hidrodinamsko	66
<i>Slika 55</i>	Razdioba površinskog tlaka na blazinicu	67
<i>Slika 56</i>	Nagib rukavca	68
<i>Slika 57</i>	Nosive strukture ležajnih materijala	69
<i>Slika 58</i>	Mikrostruktura olovne bijele kovine s dodacima antimona i bakra	70



<i>Slika 59</i>	Stojeći dvodijelni ležaj s poklopcem	72
<i>Slika 60</i>	Ležaj iz dvoslojnog materijala s prstenom za podmazivanje	73
<i>Slika 61</i>	Stanje ležaja prije reparacije	74
<i>Slika 62</i>	Čelični odljevak nakon žarenja	78
<i>Slika 63</i>	Naizmjenično, međusobno okomito magnetiziranje	80
<i>Slika 64</i>	Magnetne čestice u zoni radijusa pod UV osvjetljenjem	80
<i>Slika 65</i>	Lažna indikacija	81
<i>Slika 66</i>	Dokumentirana greška	81
<i>Slika 67</i>	Vrste i karakteristike bijele kovine	84
<i>Slika 68</i>	Dobro i loše prijanjanje	86
<i>Slika 69</i>	Bez greške i greška u prijanjanju	87
<i>Slika 70</i>	Referentni odjek i zadovoljavajuće prijanjanje	87
<i>Slika 71</i>	Umjeravanje ispitnog sustava	88
<i>Slika 72</i>	Prikaz pojedinih zona ležaja	88
<i>Slika 73</i>	Ispitivanje prijanjanja ležajne kovine	89
<i>Slika 74</i>	UZ ispitivanje donje polovice ležaja	89
<i>Slika 75</i>	Očišćena gornja polovica ležaja prije nanošenja penetranta	90
<i>Slika 76</i>	Gornja polovica ležaja poprskana penetrantom	90
<i>Slika 77</i>	Gornja i donja polovica ležaja nakon razvijanja	91
<i>Slika 78</i>	Tipovi grešaka	91
<i>Slika 79</i>	Dobar lijev kovine na donjoj polovici	93
<i>Slika 80</i>	Neprihvatljive greške na gornjoj i donjoj polovici	94
<i>Slika 81</i>	Površina bez indikacija	94

## POPIS TABLICA

<i>Tablica 1</i>	Akustična svojstva nekih metala u krutom stanju	46
<i>Tablica 2</i>	Klase točnosti ispitivanja prema CCH 70-3	79
<i>Tablica 3</i>	Grupe pogrešaka	84
<i>Tablica 4</i>	Izbor sonde	85