

# Ultrazvuk, vrtložne struje



v.as.mr. Samir Lemeš  
slemes@mf.unze.ba



Tempus

PoMaCoM  
Postgraduate  
Master Course  
on Metrology

## Ispitivanje ultrazvukom

- Opis metode
- Osnovna oprema
- Prednosti
- Nedostaci
- Varijable
- Metode ispitivanja
- Oprema za ispitivanje



## Ispitivanje ultrazvukom

- Metod ispitivanja bez razaranja kod kojeg se zrake zvuka visoke frekvencije emituju u materijal s ciljem otkrivanja površinskih i dubinskih grešaka
- Zvučni talasi prodiru u materijal i odbijaju se od prelaznih površina
- Stepem refleksije uglavnom zavisi od fizičkog stanja materijala na prelazu, a manje od osobina materijala

## Ispitivanje ultrazvukom

- Zvučni signali se skoro potpuno reflektuju od prelaza metal/gas
- Parcijalna refleksija se javlja na prelazima metal/tečnost ili metal/čvrsta tijela
- Ultrazvukom se otkrivaju pukotine, odvajanje laminata, lunke, pore, nemetalni uključci i druge nehomogenosti

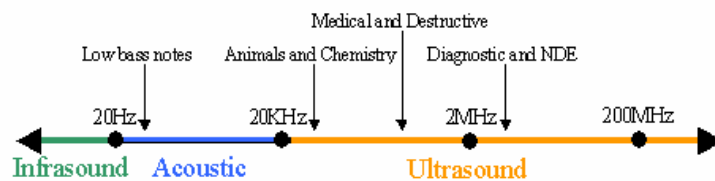


## Ispitivanje ultrazvukom

- Većina UZ uređaja otkriva greške praćenjem jedne od sljedećih veličina:
  - Refleksija zvuka od prelaznih površina ili diskontinuiteta u metalu
  - Vrijeme prolaza zvučnog talasa od ulaza do izlaza
  - Slabljenje zvučnih talasa apsorpcijom ili rasipanjem unutar ispitivanog objekta
  - Karakteristike spektralnog odziva emitovanog ili reflektovanog signala

## Ispitivanje ultrazvukom

- Većina UZ uređaja radi na frekvencijama od 0,1 do 25 MHz
- Ljudsko uho registruje zvuk od 20 Hz do 20 kHz



## Osnovna oprema

- Elektronski generator signala
- Sonda koja emituje snop UZ talasa
- Kuplant za transfer energije iz sonde
- Kuplant za transfer energije u sondu
- Sonda za prihvatanje odbijenih UZ talasa
- Pojačalo / demodulator
- Displej ili indikator
- Elektronski referentni sat

## Prednosti metode

- Jako dobra snaga prodiranja u dubinu materijala (nekoliko metara)
- Visoka osjetljivost na male greške
- Velika preciznost otkrivanja lokacije, veličine, orijentacije, oblika greške
- Dovoljno je da jedna površina bude dostupna
- Signal se lako obrađuje elektronski
- Mogućnost skeniranja po zapremini

## Prednosti metode

- Nema opasnosti po osoblje, opremu i materijale u okolini
- Portabilnost (prenosivost)
- Generiše izlaz koji se lako obrađuje računarom



## Nedostaci metode

- Manuelni način rada zahtijeva iskustvo i veliku pažnju
- Za razvoj procedura ispitivanja je potrebno veliko tehničko znanje
- Teško je ispitivati tanke dijelove, nepravilne oblike, hrapave površine
- Teško se otkrivaju defekti koji su neposredno ispod površine
- Potrebni su kuplanti i referentni standardi

## Varijable

- Osnovne varijable koje treba uzeti u obzir kod UZ ispitivanja su karakteristike UZ talasa i karakteristike dijelova koji se ispituju
- Od tih varijabli zavisi izbor opreme
- **Frekvencija** ultrazvučnih talasa: treba naći kompromis između pozitivnih i negativnih efekata izabrane frekvencije

## Varijable

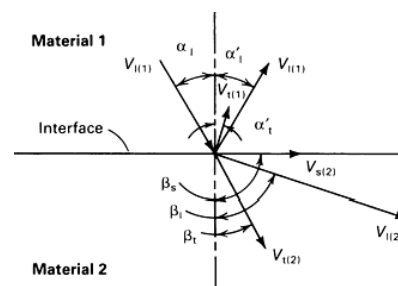
- Visoke frekvencije: veća osjetljivost, veća rezolucija, manja penetracija kod nehomogenih metala (sa većim zrnom)
- **Akustična impedanca** kombinacije dva materijala je karakteristika koja određuje stepen refleksije; ako imaju istu impedancu, nema refleksije
- Jedinica:  $\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$

## Varijable

- Čelik:  $4,66 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$
- Aluminiij:  $1,72 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$
- Bakar:  $4,18 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$
- Olovo:  $2,45 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$
- Zrak:  $0,00004 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$
- Staklo:  $1,44 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$
- Ulje:  $0,15 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$
- Voda:  $0,149 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$

## Varijable

- **Ugao nagiba**
- Kad snop UZ talasa pada okomito na grešku, ugao nagiba je  $0^\circ$  - refleksija ne mijenja pravac snopa
- Kad ugao nagiba nije  $0^\circ$ , dolazi do promjene prirode kretanja talasa i do prelamanja



## Varijable

- **Intenzitet snopa** je energija koja se emituje po poprečnom presjeku snopa, a zavisi od amplitude vibracija čestica
- Obično se koristi termin akustični pritisak (zvučni pritisak) da označi amplitudu naprezanja koja izaziva UZ talas u materijalu
- Akustični pritisak je proporcionalan kvadratu akustičnog pritiska

## Varijable

- **Apsorpcija** ultrazvučne energije se javlja uglavnom konverzijom mehaničke energije u toplotu
- **Rasipanje** ultrazvučnog talasa se javlja zato što većina materijala nije homogena
- Rasipanje se javlja i kod anizotropnih materijala, kod kojih brzina prostiranja talasa nije ista u različitim pravcima

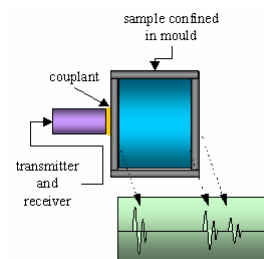
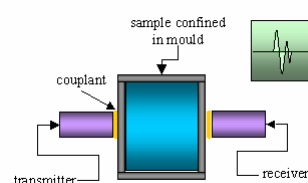


## Varijable

- **Širenje snopa** se javlja na većoj udaljenosti od sonde
- Ugao širenja zavisi od talasne dužine talasa i prečnika sonde
- **Slabljenje** ultrazvučnog snopa zavisi od početnog akustičnog pritiska, dubine dijela koji se ispituje i od koeficijenta slabljenja (dB/mm)

## Metode ispitivanja

- Dvije osnovne metode su metoda transmisije i "puls-eho" metoda
- Kod metode transmisije mjeri se samo slabljenje signala
- Kod puls-eho metode mjeri se i vrijeme prolaza i slabljenje signala



## Metode ispitivanja

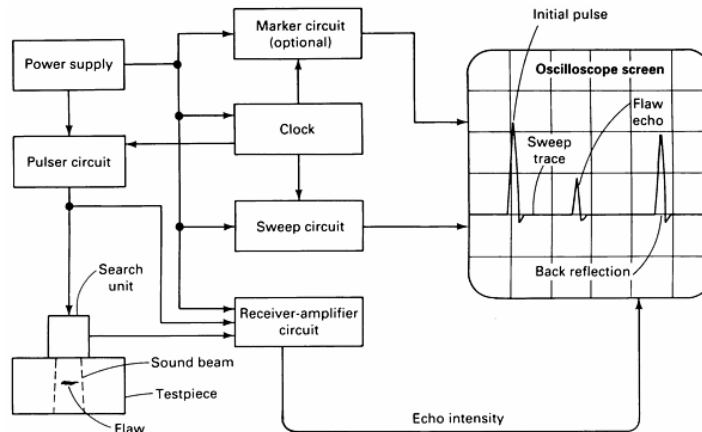
- Puls-eho metoda se koristi kod lociranja grešaka i mjerenja debljine
- Dubina greške se određuje vremenom od početnog impulsa i eha koji proizvede greška
- Veličina greške se određuje poređenjem amplitude signala reflektovanog zvuka sa referentnom amplitudom (od poznate veličine)

## Metode ispitivanja

- Rezultati puls-eho ispitivanja se mogu prikazati na razne načine:
- A-scan: kvantitativni prikaz amplituda signala i vremena putovanja signala dobijenih na jednoj tački površine
- B-scan: rezultati duž linije
- C-scan: rezultati po površini

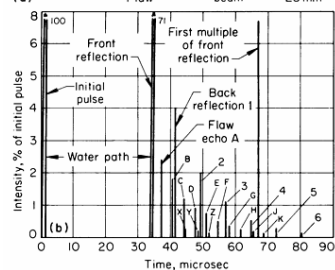
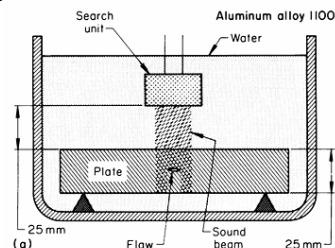
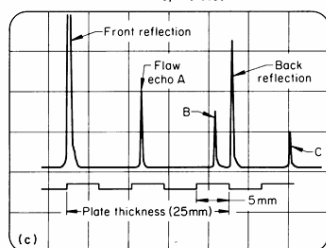
# Metode ispitivanja

## ■ Blok šema analognog A-scan displeja:



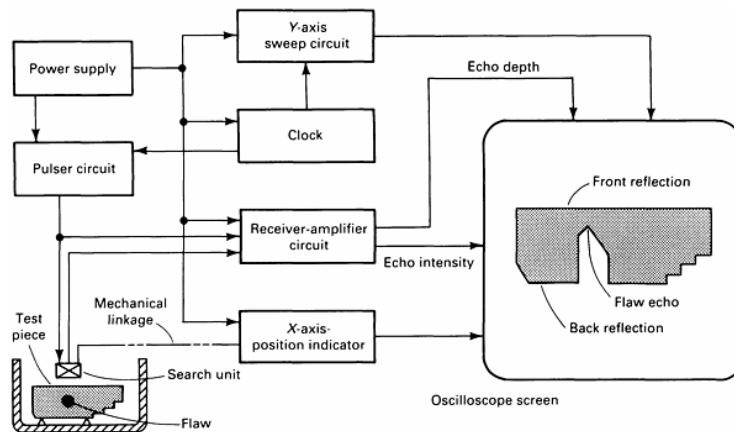
# Metode ispitivanja

## ■ Primjer očitavanja sa A-scan displeja i sa osciloskopa



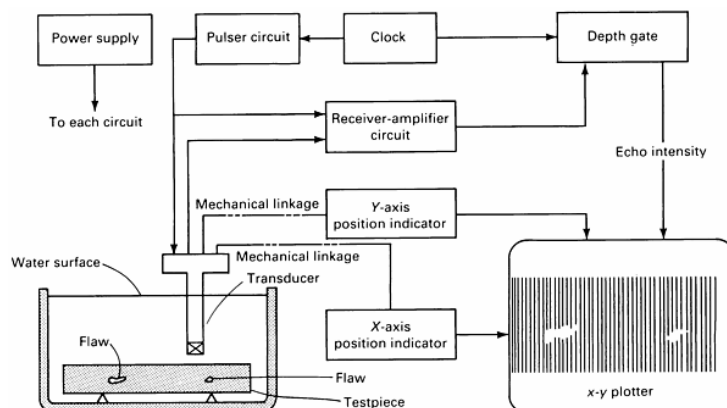
# Metode ispitivanja

## ■ Blok šema B-scan displeja:



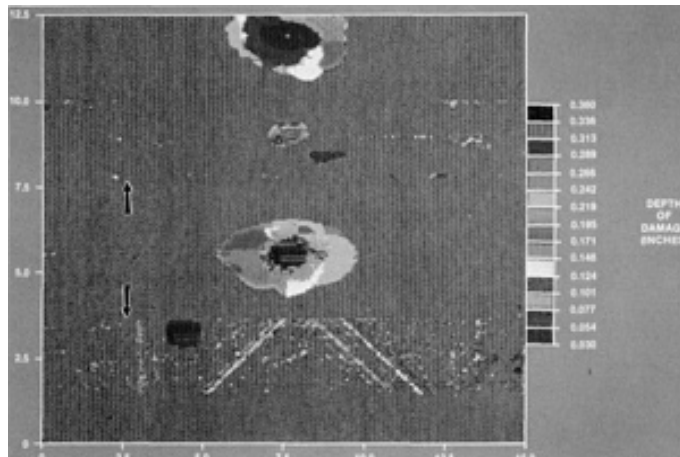
# Metode ispitivanja

## ■ Blok šema C-scan displeja:



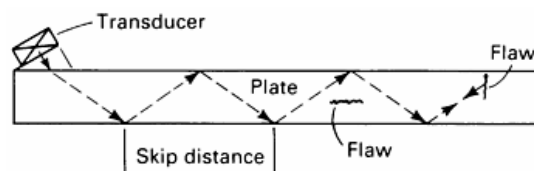
## Metode ispitivanja

- Prikaz sa C-scan displeja:



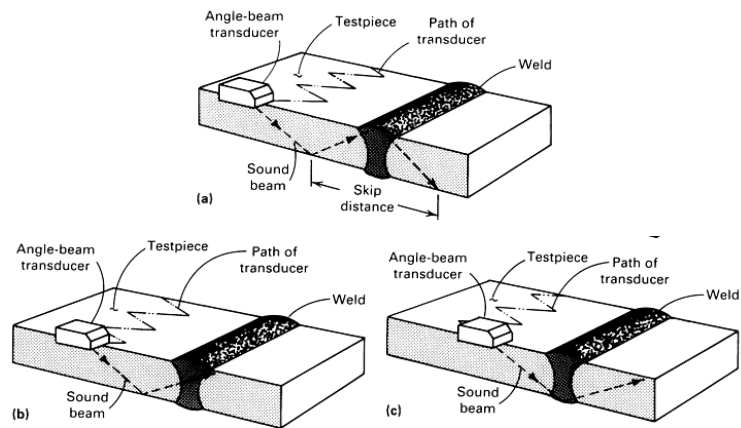
## Metode ispitivanja

- **Ispitivanje pod uglom** se koristi za ispitivanje zavarenih spojeva, cijevi, limova i pločastih materijala, te uzoraka nepravilnog oblika, gdje pravi snopovi ne mogu doći u kontakt sa svim površinama



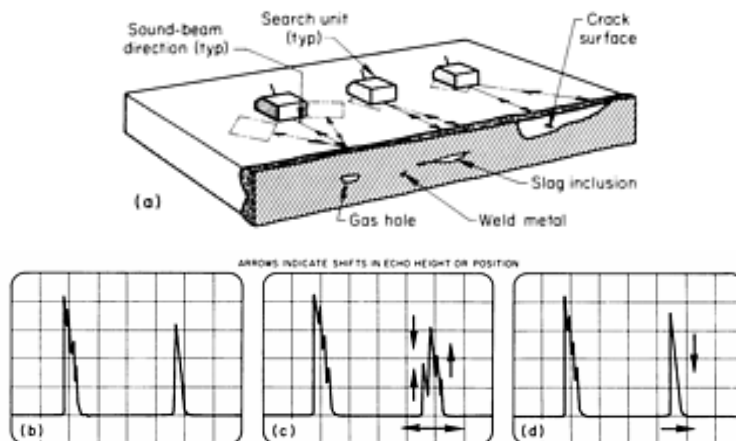
# Metode ispitivanja

## ■ Ispitivanje zavarenih spojeva



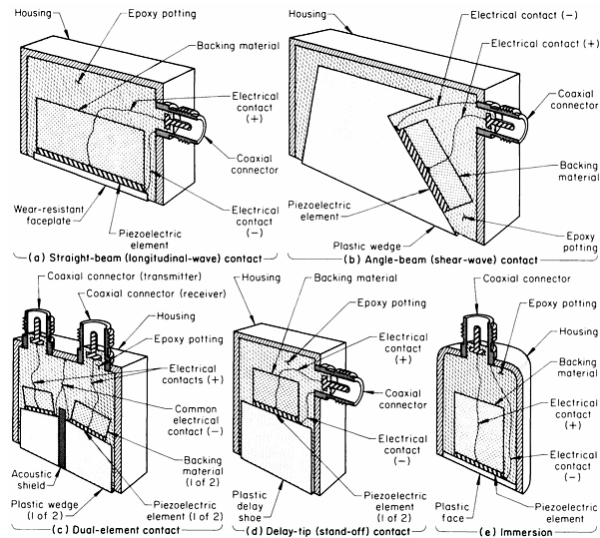
# Metode ispitivanja

## ■ Ispitivanje zavarenih spojeva

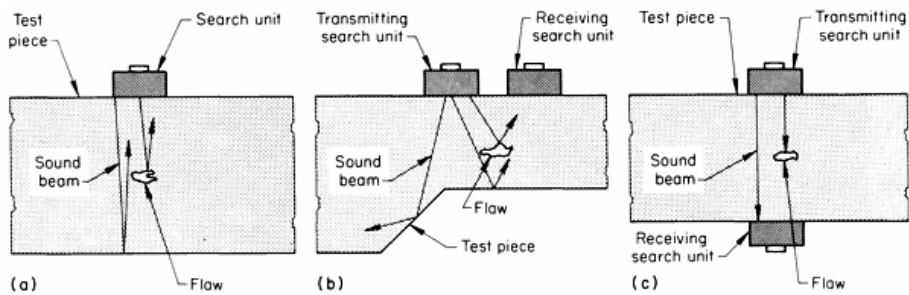


# Oprema za ispitivanje

- Poprečni presjeci piezo-električnih UZ sondi

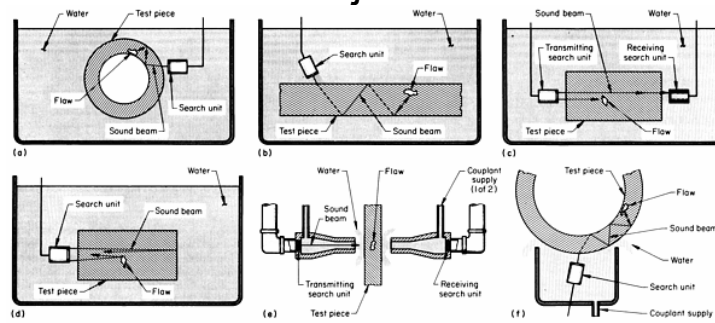


# Oprema za ispitivanje



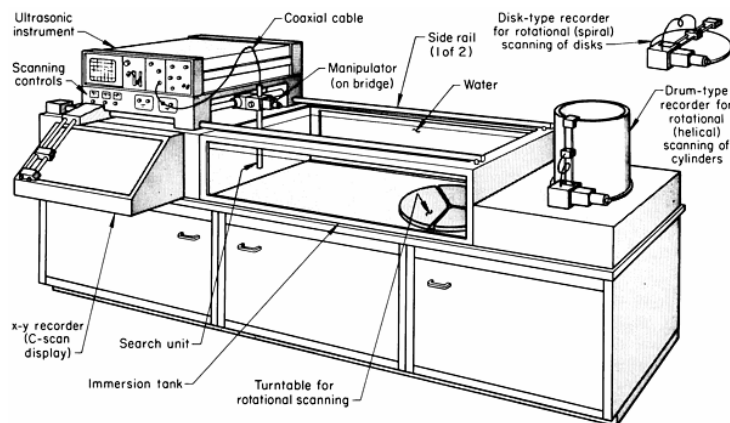
## Oprema za ispitivanje

- Sonde za ispitivanje pod vodom
- Prednost ovog ispitivanja je veća brzina, mogućnost kontrole smjera snopa i mogućnost automatizacije



## Oprema za ispitivanje

- Sistem za ispitivanje pod vodom



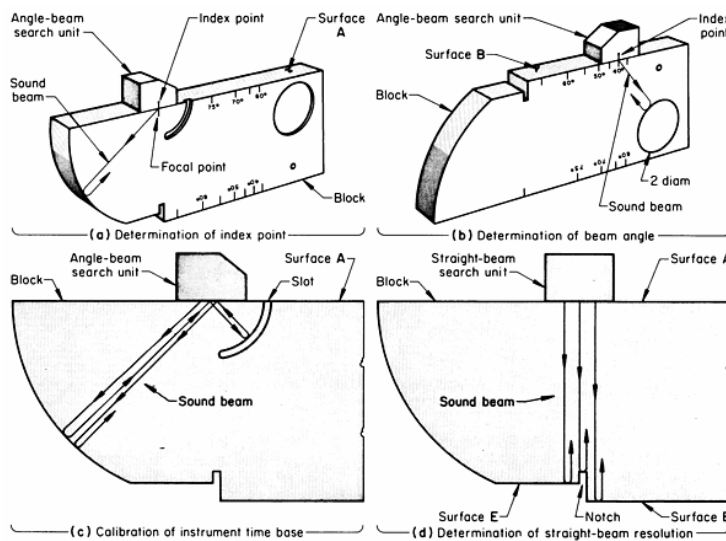


# Oprema za ispitivanje

## Uređaji za mjerenje debljine



# Kalibracija



## Proizvođači opreme

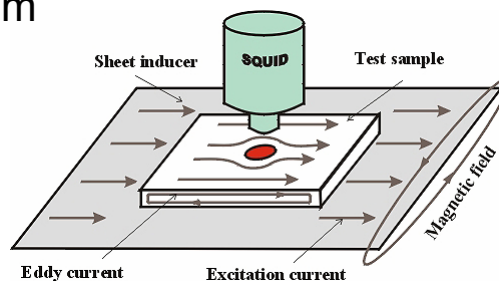
- General Electric Inspection Technologies  
Krautkramer / Agfa / Hocking  
([www.geinspectionstechnologies.com](http://www.geinspectionstechnologies.com))
- Olympus ([www.olympusndt.com](http://www.olympusndt.com))
- NDT Systems ([www.ndt-systems.com](http://www.ndt-systems.com))
- Newco ([www.newcoinc.com](http://www.newcoinc.com))
- UE Systems ([www.uesystems.com](http://www.uesystems.com))

## Ispitivanje vrtložnim strujama

- Područje upotrebe
- Razvoj metode
- Princip rada
- Radne varijable
- Instrumenti
- Senzori
- Očitavanje rezultata mjerenja
- Referentni standardi

## Područje upotrebe

- Zasniva se na principu elektromagnetske indukcije
- Koristi se za identifikaciju niza fizičkih, strukturnih i metalurških stanja u elektroprovodljivim metalnim proizvodima



## Područje upotrebe

- Mjerenje električne provodnosti, magnetske permeabilnosti, veličine zrna, stanja termičke obrade, tvrdoće i fizičkih dimenzija
- Otkrivanje pukotina i uključaka
- Otkrivanje razlike u sastavu, mikrostrukturi i drugim osobinama metala
- Mjerenje debljine magnetski neprovodne obloge na metalu

## Područje upotrebe

- Ne zahtijeva se direktan električni kontakt sa objektom ispitivanja
- Pogodno za ispitivanja velikom brzinom – moguće ispitivati 100% proizvodnje
- Indirektna metoda: potrebna posebna pažnja prilikom obrade rezultata mjerenja



## Razvoj metode

- Elektromagnetska indukcija
- Teorija i primjena indukcionih kalema
- Rješenje rubnih problema koji opisuju dinamiku EM polja u blizini indukcionih kalema
- Teoretsko predviđanje promjene impedance usljed malih tokova
- Napredak u elektronici instrumenata (displeji, registracija, mikroprocesori)

## Razvoj metode

- Faraday je 1831. otkrio EM indukciju: promjenom struje u kalemu žice se indukuje struja u susjednom kalemu
- Maxwell je 1864. dao dinamičku teoriju EM polja (set jednačina)
- Hughes je 1879. koristio metodu za otkrivanje promjena osobina metala
- Kranz je 1925. razvio instrument za mjerenje debljine stjenke

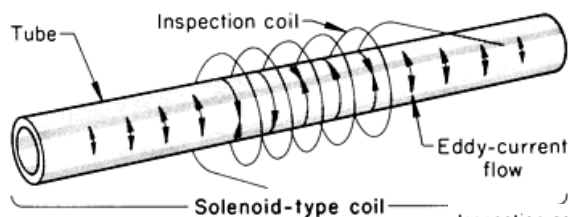
## Princip rada

- Sličan indukcionom zagrijavanju, ali koristi izvor struje znatno manje snage
- Promjene električne struje koje se javljaju kad se EM polje instrumenta nalazi u blizini greške u materijalu se detektuju osjetljivim elektronskim sklopovima
- Struja pobude je naizmjenična struja

## Princip rada

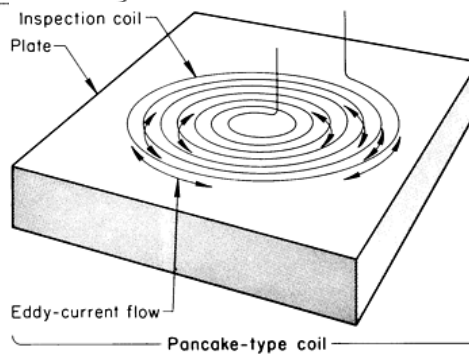
- Struja koja se indukuje unutar objekta koji se ispituje teče u zatvorenim kolima
- Amplituda i faza tih kola zavise od:
  - Primarnog polja pobudnih struja
  - Električnih osobina objekta koji se ispituje
  - EM polja koje generišu struje koje teku kroz objekat
  - Prisustva diskontinuiteta u objektu

## Princip rada



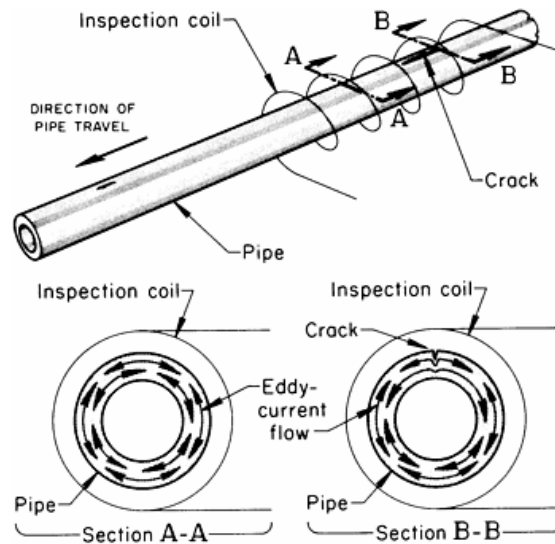
- Za cilindrične dijelove i cijevi koristi se solenoid-kalem

- Za ravne objekte koristi se ravni kalem

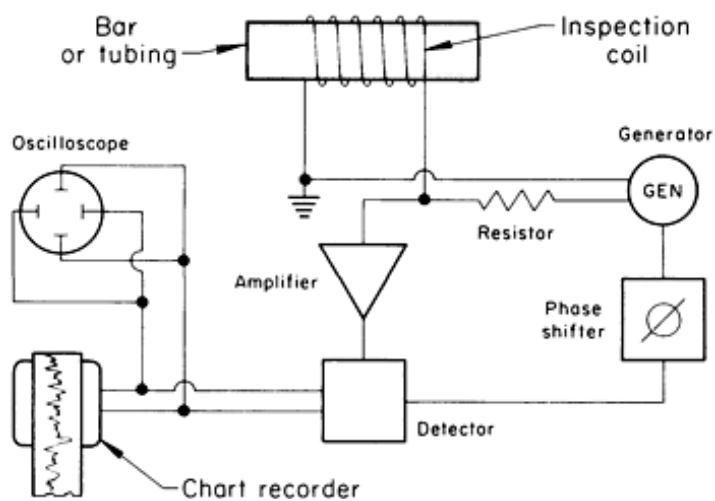


## Princip rada

- Presjek A-A ne sadrži grešku
- U presjeku B-B usljed greške mijenja se smjer toka indukovane struje



## Princip rada



## Radne varijable

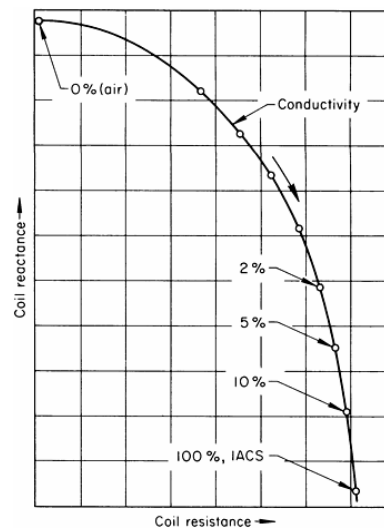
- Impedanca kalema
- Električna provodnost
- Magnetna permeabilnost
- Lift-off faktor
- Fill faktor
- Rubni efekat
- Skin efekat



## Impedanca kalema

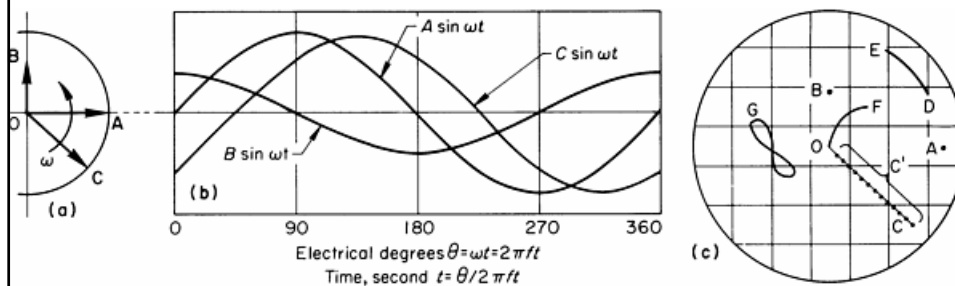
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

- Z: impedanca
- R: omski otpor
- $X_L$ : induktivni otpor  
 $X_L = 2\pi fL_0$
- International Annealed Copper Standard (IACS)



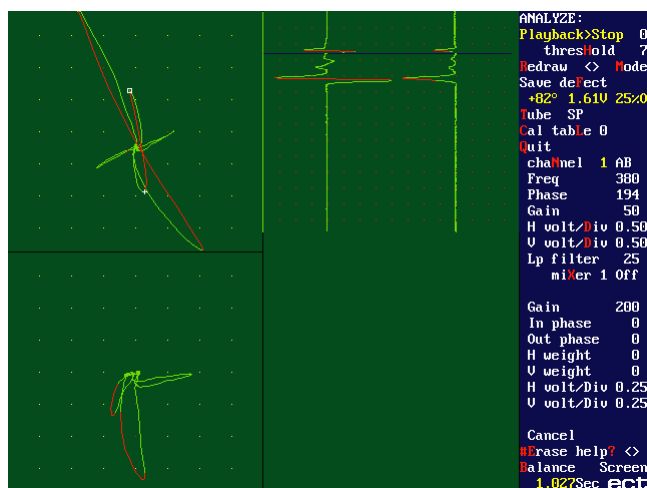


## Impedanca kalema



- Često se rezultujuće sinusoide prikazuju u fazor (phasor) dijagramu
- Time se olakšava uočavanje razlika u fazama između indukovanih struja

## Impedanca kalema



## Električna provodnost

- Svi materijali imaju karakterističan otpor toku električne struje
- Najveći otpor imaju izolatori, srednji poluprovodnici a najniži - provodnici
- Kod ovog ispitivanja se koristi mjerenje na osnovu IACS (International Annealed Copper Standard)
- Žareni čisti bakar: 100% IACS

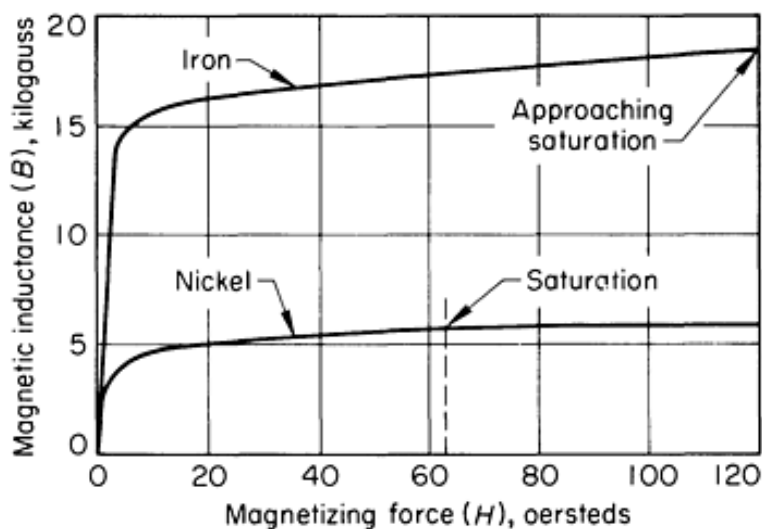
## Električna provodnost

Metal	Otpor $\mu\Omega\text{mm}$	Provodnost %IACS
Bakar	17,2	100
Aluminij	28,2	61
Magnezij	46	37
Nerđajući čelik	700	2,5
Titanijum	548	3,1

## Magnetna permeabilnost

- Neki materijali (željezo, nikel, kobalt,...) koncentrišu fluks magnetnog polja – imaju visoku i promjenljivu permeabilnost
- MP nije konstanta za materijal nego zavisi od jačine magnetnog polja
- Kriva koja pokazuje vezu između intenziteta magnetnog polja i magnetnog fluksa se zove kriva magnetizacije

## Magnetna permeabilnost



## Magnetna permeabilnost

- MP jako utječe na indukovanu struju
- Radi toga se metode ispitivanja za magnetične i nemagnetične materijale razlikuju
- Isti faktori koji utječu na električnu provodnost (sastav, tvrdoća, zaostali naponi, greške) utječu i na MP
- Za kompenzaciju utjecaja MP koristi se dodatni kalem sa istosmjernom strujom – da se postigne saturacija

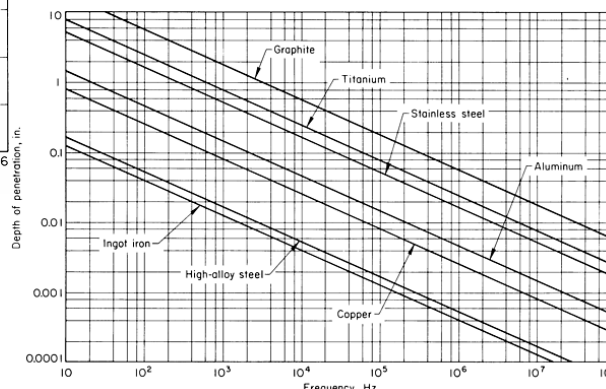
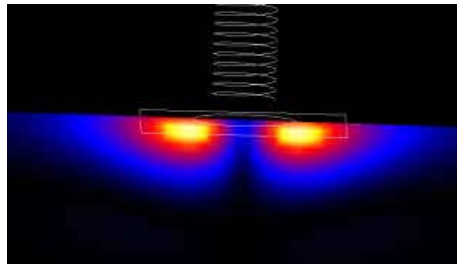
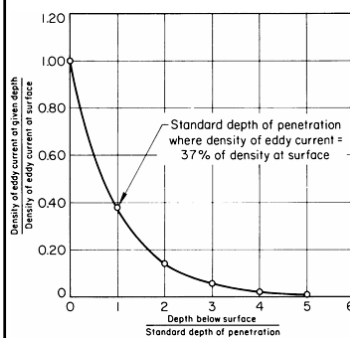
## Lift-off faktor

- Kad se instrument za ispitivanje izloži naponu u zraku, dat će neki otklon čak i kad nema provodljivog materijala u blizini
- Kako se kalem približava materijalu, otklon se povećava
- Te promjene otklona pri promjeni rastojanja između kalema i provodnika se nazivaju "lift-off"
- Posebno važno kod složenih oblika

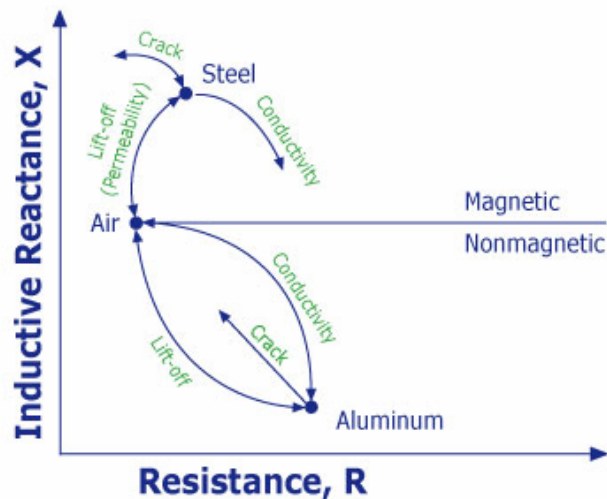
## Fill faktor / Edge / Skin

- Fill faktor je ekvivalent "Lift-off" faktora, ali kod cilindričnih objekata
- Edge efekat (rubni efekat) se javlja kad se kalem približi rubu objekta koji se ispituje, jer dolazi do izobličenja toka magnetnog polja
- Indukovano polje je gušće blizu površine, a progresivno opada po dubini; ta pojava se naziva "Skin" efekat

## Skin efekat

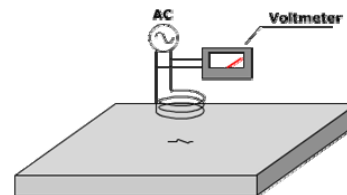


## Ponašanje materijala



## Instrumenti

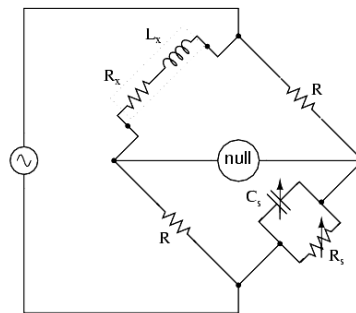
- Analogni i digitalni
- Klasifikacija na osnovu displeja za prikaz rezultata
- Najosnovniji instrument se sastoji od izvora izmjenične struje, kalema žice spojenog na taj izvor, i od voltmetra za registrovanje promjene napona



## Instrumenti

- Pored osnovnih dijelova, koristi se niz dodatnih kola i uređaja:

- Rezonantna kola (za promjenu frekvencije pobudne struje)
- Maxwell-Wien most (za mjerenje induktivnosti iz poznatog omskog otpora i kapaciteta)

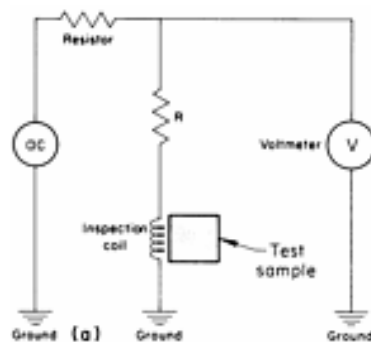


## Instrumenti

- Instrumenti za vrtložne struje se mogu podijeliti u sljedeće kategorije:
  - a) Sistem otpornik-kalem  
*Resistor and single-coil system*
  - b) Sistem debalansa mosta  
*Bridge unbalance system*
  - c) Sistem indukcijskog mosta  
*Induction bridge system*
  - d) Transmisijski sistem  
*Through transmission system*

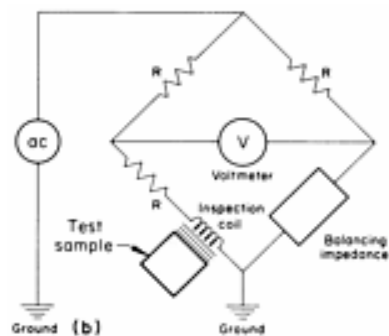
## Sistem otpornik-kalem

- Jednostavan instrument, kod kojeg se prati napon u kalemu senzora
- Pogodan za mjerenje velikih lift-off varijacija ako nije bitna velika preciznost



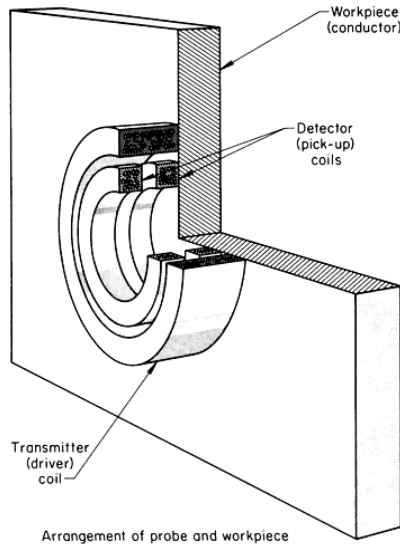
## Sistem debalansa mosta

- Instrument veće preciznosti
- Mjeri se razlika napona između impedance kalema senzora i referentne impedance
- Problem koji se javlja usljed promjene temperature

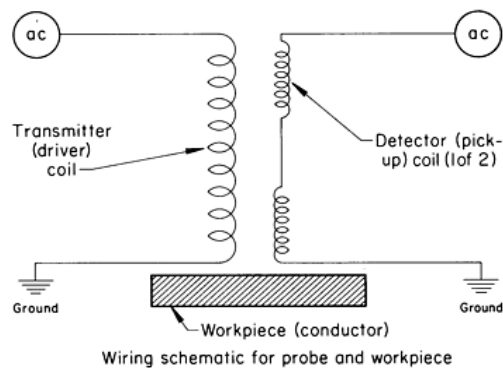




## Sistem indukcijskog mosta



- Referentni kalem i kalem senzora su spojeni u transformator

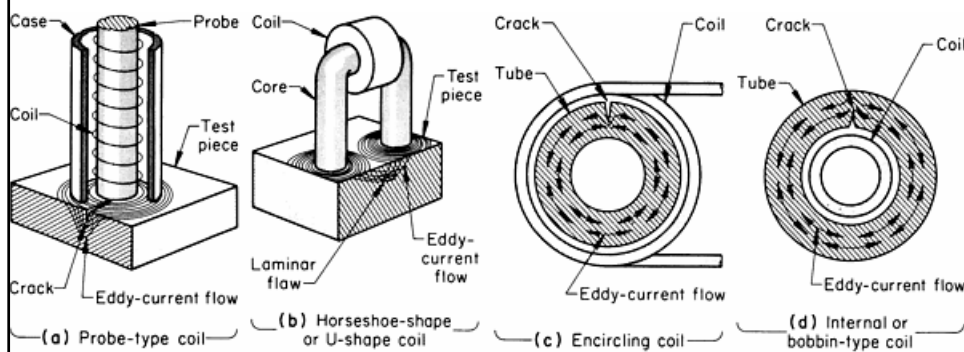


## Transmisijski sistem

- Signal se prenosi iz kalema kroz metal, a detektuje se na suprotnoj strani metala
- Ako je udaljenost dva kalema fiksna i kola imaju visoku impedancu, signal ne zavisi od položaja metala
- Ovo potpuno eliminiše lift-off, ali zahtijeva postavljanje dva kalema



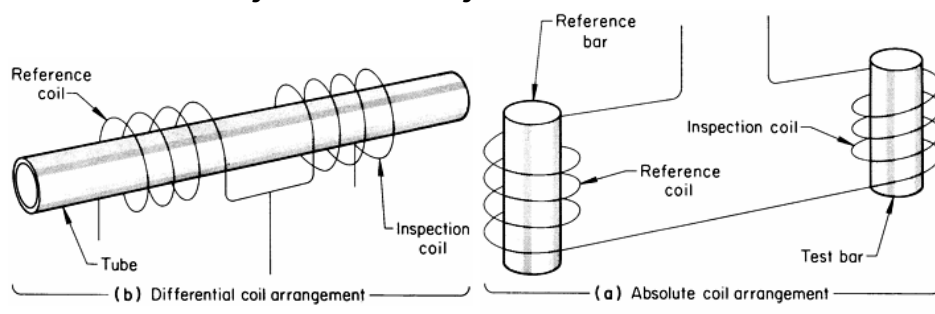
## Senzori



- Izbor senzora s kalemom zavisi od geometrije površine objekta koji se ispituje: štap, potkovica, prsten

## Senzori

- Često se koriste parovi senzora, u apsolutnom ili diferencijalnom spoju
- Apsolutni: kod sortiranja
- Diferencijalni: kod cijevi



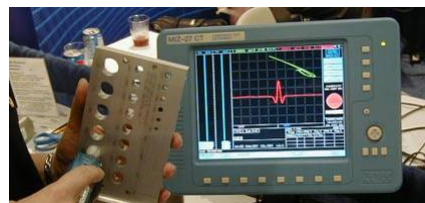
## Senzori

- Senzori mogu biti različitih oblika i veličina
- Izbor senzora zavisi od vrste diskontinuiteta koji se ispituje
- Za ispitivanje cijevi na kratke greške, koriste se prstenasti kratki senzori



## Očitanje rezultata mjerenja

- Svjetlosni alarm
- Zvučni alarm
- Relejni prekidači
- Analogni pokazivači s kazaljkom
- Digitalni pokazivači (displeji)
- XY ploteri za crtanje grafika impedance
- XY osciloskopi
- "Strip-chart" rekorderi
- Rekorderi s magnetnom trakom
- Računari



# Referentni standardi

