



# Mikrotalasna i termička ispitivanja



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



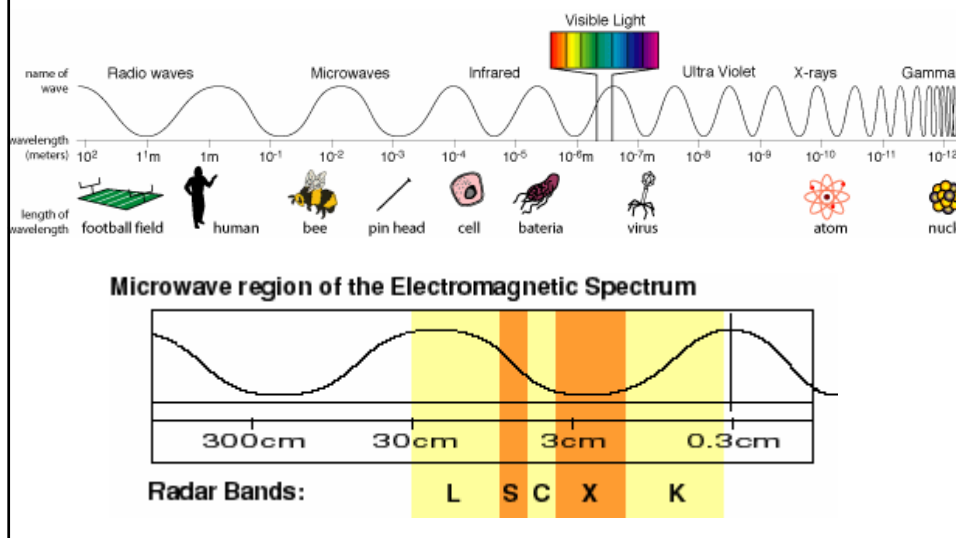
Tempus

**PoMaCoM**  
Postgraduate  
Master Course  
on Metrology

## Mikrotalasna ispitivanja

- Mikrotalasi
- Prednosti metode
- Fizički principi
- Tehnike ispitivanja
- Područja primjene

# Mikrotalasi



# Mikrotalasi

- Mikrotalasi su vrsta elektromagnetskog zračenja frekvencije od 300 MHz do 325 GHz
- To odgovara talasnim dužinama od 10 m do 1 mm
- Prva važnija upotreba mikrotalasa je radar
- Mikrotalasi se ponašaju slično svjetlu: putuju pravolinijski, odbijaju se

## Mikrotalasi

- Imaju talasne dužine 10.000 do 100.000 puta veće od svjetlosti; prodiru duboko u materijal
- Dubina prodiranja mikrotalasa zavisi od permitivnosti, permeabilnosti i provodljivosti materijala
- Mikrotalasi se odbijaju od unutrašnjih granica u materijalu

## Mikrotalasi

- Prva upotreba: ispitivanje sadržaja vlage u dielektricima: molekule vode apsorbuju mikrotalase
- Mjerenje debljine tankih metalnih obloga pomoću stojećeg talasa
- Mjerenje makroporoznosti, uključaka, grešaka u plastičnim i keramičkim materijalima, kompozitnim i laminarnim materijalima

## Prednosti metode

- Širokopolasni frekventni odziv
- Prenos signala kroz zrak bez smetnji
- Nema kontaminacije ispitivanog materijala
- Lako se dobiju informacije o fazi i amplitudi mikrotalasa
- Nije potreban fizički kontakt mjerila i materijala koji se ispituje
- Nema promjena u materijalu

## Prednosti metode

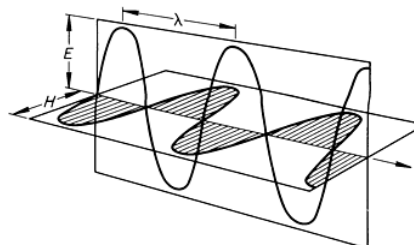
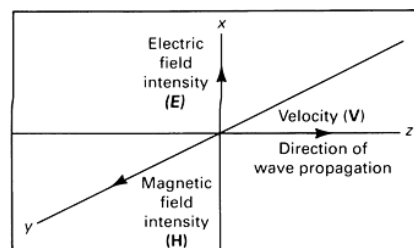
- Male dimenzije uređaja
- Mikrotalasi se mogu koristiti za otkrivanje i mjerenje pukotina:
  - Metoda je najosjetljivija kad su pukotine otvorene (površinske)
  - Ako je pukotina ispod površine, indikacija njenog položaja su visoki naponi na površini iznad pukotine
  - Više frekvencije potrebne za otkrivanje malih pukotina

## Ograničenja metode

- Ne mogu prodirati duboko u metal
- Greška čija je efektivna dimenzija znatno manja od talasne dužine se ne može kompletno identifikovati
- Ne može se koristiti za greške manje od 0,1 mm
- Pukotine ispod površine se mogu otkriti mjerenjem površinskog napona, koji treba biti puno veći neposredno iznad pukotine

## Fizički principi

- U slobodnom prostoru, elektromagnetni talas je transverzalni
- Brzina kojom talas putuje duž z-ose je data relacijom:  
 $v = f \lambda$

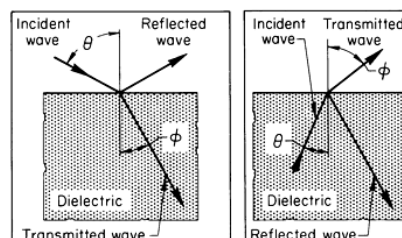


## Fizički principi

- Osobine homogenog materijala od kojih zavisi propagacija mikrotalasa su magnetna permeabilnost, dielektrični koeficijent i električna provodljivost
- Električna provodljivost može biti od  $10^{-16}$   $\Omega\text{mm}$  za dobre izolatore do oko  $10^7$   $\Omega\text{mm}$  za dobre provodnike kao što je bakar

## Fizički principi

- Refleksija i refrakcija mikrotalasa na prelazu između dva medija različitih elektromagnetskih osobina su praktično iste kao kod vidljive svjetlosti
- Važi Snellov zakon:  
$$n_2 \sin \theta = n_1 \sin \phi$$
gdje su  $n_1$  i  $n_2$  indeksi prelamanja

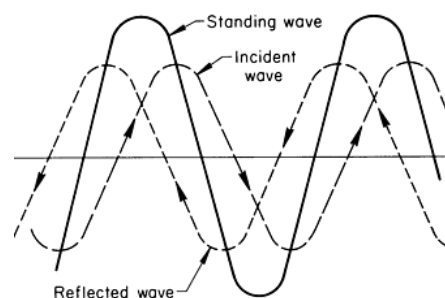


## Fizički principi

- Apsorpcija i disperzija mikrotalasa: javljaju se usljed interakcije električnog polja sa dielektričnim (molekularnim) osobinama nemetalnog materijala
- Polarizacija i provođenje (kondukcija) materijala utječu na upijanje i rasipanje energije električnog polja
- Pri tome se energija mikrotalasa pretvara u toplotnu energiju

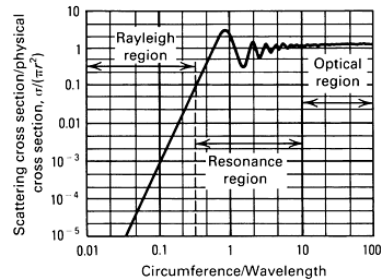
## Fizički principi

- Stojeći talasi nastaju usljed interferencije:
- Dva talasa iste frekvencije prodiru u suprotnim smjerovima
- Taj fenomen se koristi za mjerenje debljine materijala, zahvaljujući vezi između frekvencije i amplitude stojećeg talasa za dati medij



## Fizički principi

- Rasipanje (*scattering*) se javlja kad se mikrotalasi odbijaju od nehomogenih područja
- U tom slučaju odbijeni talas nije jedan talas, nego se sastoji od niza talasa različitih amplituda, faza i smjerova
- Na slici je prikazano rasipanje kod metalnih sfera različitog prečnika



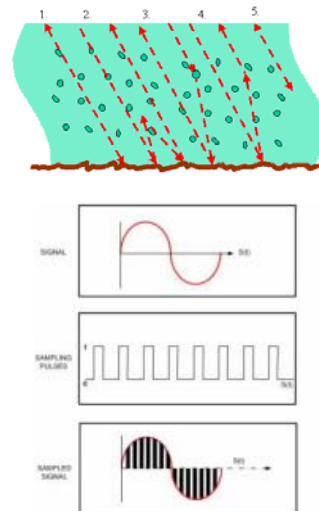
## Tehnike ispitivanja

- |  |  |
|--|--|
| ■ Transmisija kontinuiranog talasa fiksne frekvencije    | ■ Refleksija kontinuiranog talasa fiksne frekvencije |
| ■ Transmisija kontinuiranog talasa opadajuće frekvencije | ■ Refleksija kontinuiranog talasa fiksne frekvencije |
| ■ Transmisija impulsne modulacije                        | ■ Refleksija impulsne modulacije                     |



## Tehnike ispitivanja

- Stojeći talasi fiksne frekvencije
- Reflektivno rasipanje fiksne frekvencije
- Mikrotalasna holografija
- Mikrotalasna impedanca površine
- Mikrotalasna detekcija korozije nastale usljed naprezanja



## Tehnike ispitivanja

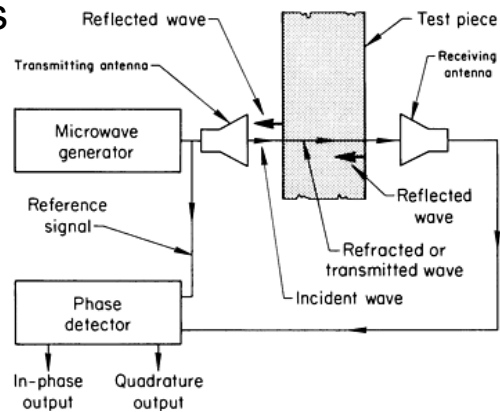
- Svaka od pomenutih tehnika koristi jedan ili više procesa kojima materijali djeluju na mikrotalase
- Na osnovu tih tehnika, instrumenti se dijele na 4 grupe:
  - Transmisija
  - Refleksija
  - Stojeći talas
  - Rasipanje

## Tehnike ispitivanja

### ■ Tehnika transmisije:

- Na površini se talas dijeli na reflektovani i na prelomljeni talas

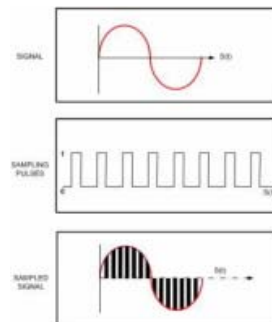
- Amplituda i faza signala kojeg primi antena se porede s referentnim signalom



## Tehnike ispitivanja

- Tehnika transmisije može imati tri varijacije:

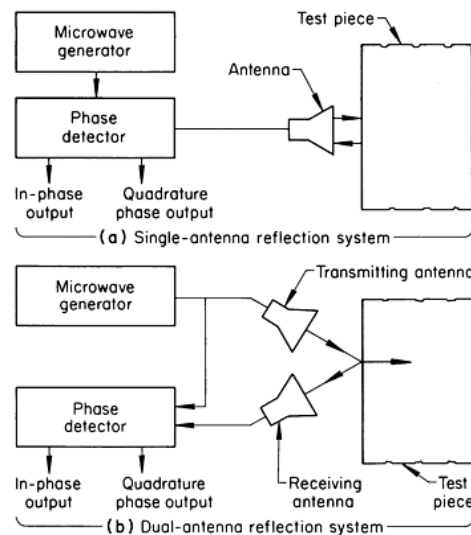
- Kontinuirani talas fiksne frekvencije
- Kontinuirani talas promjenjive frekvencije
- Impulsno modulirani talas



## Tehnike ispitivanja

- Tehnika refleksije može biti:

- sa jednom antenom
- sa dvije antene



## Tehnike ispitivanja

- I tehnika refleksije može imati tri varijacije:

- Kontinuirani talas fiksne frekvencije
- Kontinuirani talas promjenjive frekvencije
- Impulsno modulirani talas

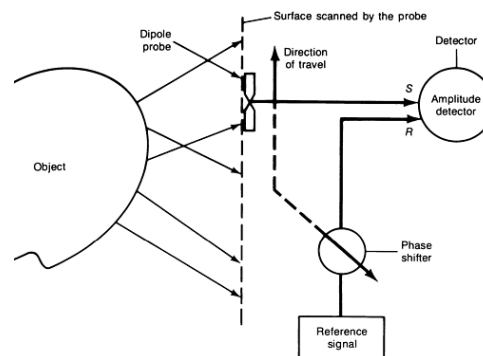
- Kako impulsi moraju biti uski kod ispitivanja plitkih defekata, koristi se i frekventna modulacija

## Tehnike ispitivanja

- Mikrotalasna holografija se zasniva na interferenciji dva talasa
- Kad su mikrotalasi u rasponu od ultraljubičastih do infracrvenih frekvencija, može se dobiti hologram na fotografskom filmu
- Hologram je slika mreže dobijene interferencijom

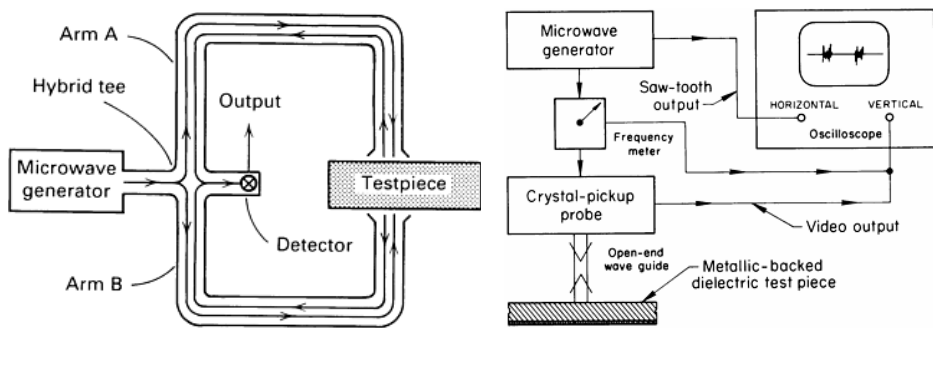
## Tehnike ispitivanja

- Ista tehnika se koristi kod mikrotalasnih frekvencija (300 MHz do 300 GHz), a umjesto filma se koristi mikrotalasni prijemnik



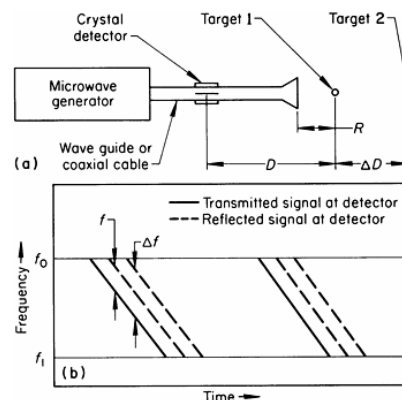
## Područja primjene

- Mjerenje debljine materijala
- Mogu se mjeriti i metalni i nemetalni materijali



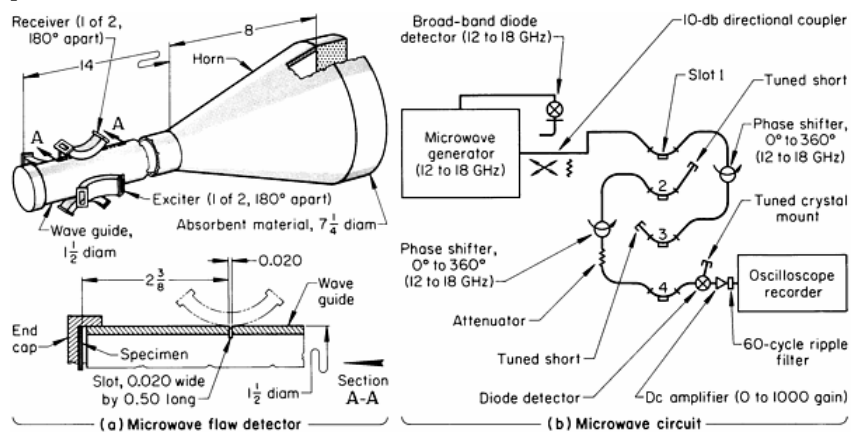
## Područja primjene

- Otkrivanje diskontinuiteta
- Za razliku od poroznosti i odstupanja od nominalnog hemijskog sastava, diskontinuiteti kao što su uključci, greške, pukotine, dovode do refleksije, prelamanja ili rasipanja elektromagnetnih talasa



## Područja primjene

### ■ Mikrotalasno otkrivanje površinskih pukotina u metalima



## Područja primjene

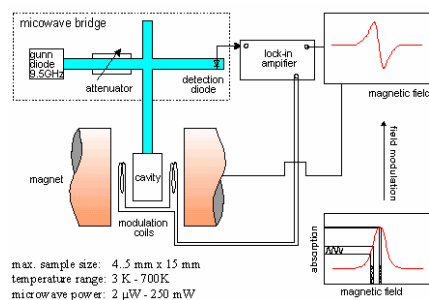
- Hemijski sastav dielektričnih materijala
- Promjene hemijskog sastava utječu na brzinu prostiranja mikrotalasa
- Promjene brzine mijenjaju količinu i ugao reflektovane i emitovane energije
- Mogu se mjeriti: polimerizacija, oksidacija, esterifikacija, vulkanizacija

## Područja primjene

- **Mjerenje vlažnosti**
- Molekule vode snažno upijaju i rasipaju mikrotalase
- Ova tehnika se koristi i u kontinuiranom (procesnom) mjerenju i u laboratorijskim uslovima, posebno za plastične i keramičke materijale
- Ne može se koristiti kod gasova
- Jak je utjecaj temperature

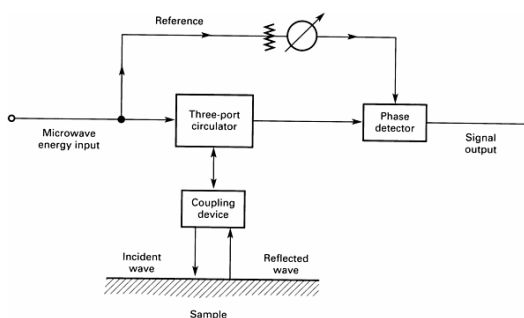
## Područja primjene

- **Mjerenje anizotropije**
- Osobine materijala koje zavise od smjera mogu se mjeriti pomoću linearno polariziranih mikrotalasa
- Mjerenje se zasniva na rotiranju glave senzora u odnosu na materijal i praćenjem ugla rotacije



## Područja primjene

- Mjerenje korozije uzrokovane naprezanjem
- Aluminij, magnezij i titan su skloni pojavi korozije ako su izloženi naprezanju
- Mjeri se impedanca površine, koja zavisi od korozije



## Termička ispitivanja

- Opis metode
- Princip rada
- Oprema za ispitivanje
- Metode ispitivanja
- Primjena





## Termička ispitivanja

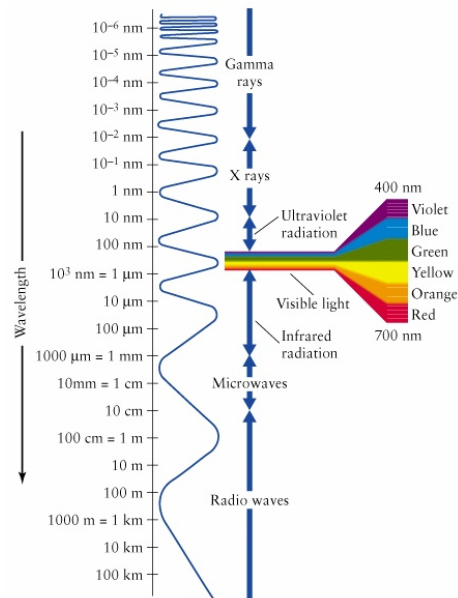
- Ove metode obuhvataju sve metode kod kojih se uređaji koji su osjetljivi na promjenu temperature koriste da registruju promjene temperature komponenti, struktura, sistema ili fizičkih procesa
- Koriste se za otkrivanje grešaka (neposredno) ispod površine, kod složenih objekata i sklopova

## Princip rada

- Osnovni princip se zasniva na mjerenju temperature površine kad toplota teče na ili sa objekta koji se ispituje
- Razlike temperature se koriste za otkrivanje grešaka ili za određivanje karakteristika prenosa toplote
- Što je veća greška i što je bliža površini, to će veća biti razlika temperature

## Princip rada

- Vidljivi spektar: svjetlost talasne dužine 400 do 700 nm
- S promjenom temperature, mijenja se talasna dužina zračenja



## Princip rada

- Mehanizmi prenosa toplote (konvekcija, kondukcija i radijacija) zavise od karakteristika materijala
- Termičko ispitivanje zavisi od lokalnih varijacija tih karakteristika
  - Specifična toplota – količina toplote koju će materijal apsorbovati za vremenski interval
  - Gustoća – masa po jedinici zapremine
  - Temperatura – mjera toplotne energije

## Princip rada

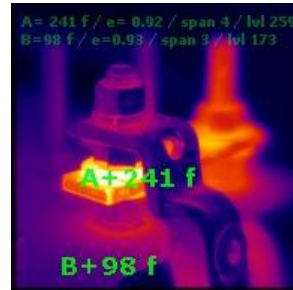
- Termička provodljivost – količina toplote koja teče u datom pravcu kad postoji temperaturna razlika u tom pravcu
- Termička difuzija – brzina kojom toplota izlazi iz područja s većom temperaturom u okolinu
- Koeficijent prenosa toplote – mjera efikasnosti razmjene toplote između površine i gasa ili tečnosti koji preko nje teku

## Oprema za ispitivanje

- Temperaturni senzori koji se koriste kod termičkog ispitivanja se dijele na dvije kategorije: kontakti i beskontaktni senzori
- Pored senzora, koriste se instrumenti za snimanje i uređaji za kalibraciju
- Beskontaktni senzori zavise od zračenja, koje je u infracrvenom području, u slučaju kad se ispitivanje vrši na sobnoj temperaturi

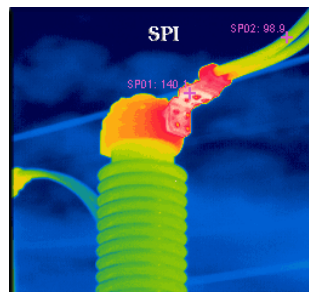
## Oprema za ispitivanje

- **Infracrvena oprema** je osjetljiva na dio spektra u blizini infracrvenog područja (1  $\mu\text{m}$  – 1 mm)
- Senzori su obično silikonski ( $t > 425^\circ\text{C}$ ) ili od olovnog sulfida ( $t > 200^\circ\text{C}$ )



## Oprema za ispitivanje

- **Ručni skeneri** mogu registrovati spektar talasnih dužina od 8 do 12  $\mu\text{m}$ .
- Imaju loše karakteristike i ne mogu se koristiti za precizna mjerenja lokalnih temperaturnih razlika
- Koriste se za otkrivanje vrućih tačaka (pregrijane komponente, nevidljivi plamen i sl.)

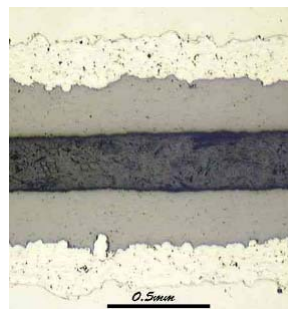


## Oprema za ispitivanje

- **Infracrveni sistemi visoke rezolucije** koriste piroelektrične *vidicon* kamere sa kolima za obradu slike ili mehaničke skenere sa kriogenskim hlađenjem
- Rezolucija: 150 piksela po liniji
- Temperaturna osjetljivost: do 0,1°C
- Vrijeme odziva: <0,1 s
- Siva ili kolor temperaturna skala

## Oprema za ispitivanje

- **Interferometrijski sistemi** kombinuju moduliranu lasersku pobudu sa brzom detekcijom faze i amplitude
- Primjer: ispitivanje obloga nanešenih plazmom
- Mjeri se interakcija termičkih talasa lasera i varijacija debljine obloge



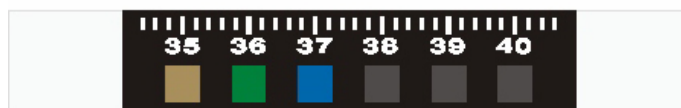
## Oprema za ispitivanje

- **Radiometri i pirometri** mjere temperature zračenja, tačke ili linije
- Radiometri imaju spor odziv, tako da se koriste za praćenje temperatura koje se sporo mijenjaju
- Pirometri su beskontaktni termometri za temperature od 0 do 3000°C
- Koriste se u industrijskom okruženju



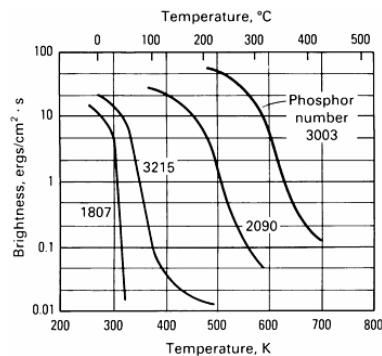
## Oprema za ispitivanje

- **Tečni kristali** se nanose na objekte koji se ispituju
- Tečni kristali reaguju na temperature od -20 do 250°C
- Vrijeme odziva je 30 do 100 ms
- Rezolucija može biti do 0,02 mm



## Oprema za ispitivanje

- **Termički kaljeni fosfor** je organski materijal koji emituje vidljivu svjetlost kad se osvijetli ultraljubičastom lampom
- Objekat koji se ispituje se premazuje fosforom do debljine 0,12 mm



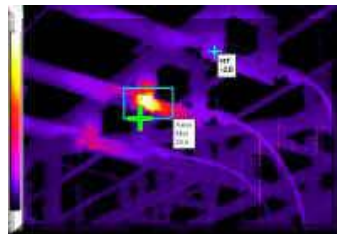
## Oprema za ispitivanje

- Koriste se i druge vrste premaza osjetljivih na temperaturu
- Koriste se i drugi uređaji za mjerenje temperature: termistori, termoelementi, termoparovi



## Metode ispitivanja

- Statičke metode se koriste kad su temperaturne promjene tokom vremena male
- Primjer: parovod se može ispitivati na defekte traženjem vrućih tačaka
- Takvi defekti su obično visoke temperature



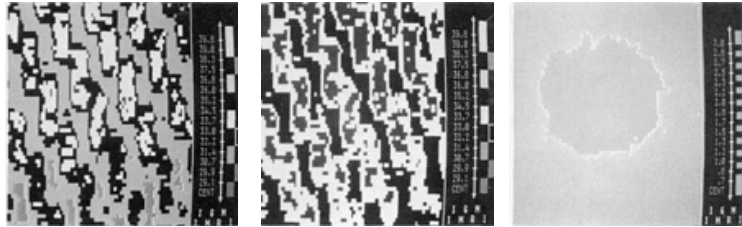
## Metode ispitivanja

- Dinamičke metode se koriste za otkrivanje anomalija kod kojih se temperatura mijenja tokom mjerenja
- Promjene se mogu javljati zbog aktivnih ili zbog pasivnih uzroka
- Primjer: Područje koje sadrži hladnu vodu će se hladiti sporije i formiraće privremenu vruću tačku, dok će na mjestu stanjenja stjenke ili na mjestu korozije hlađenje biti brže



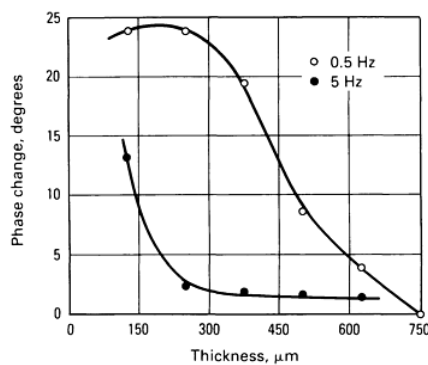
## Metode ispitivanja

- Primjer dinamičke obrade slike:
- Slika defekta 3 s nakon zagrijavanja
- Slika defekta 5 s nakon zagrijavanja
- Razlika te dvije slike otkriva defekat



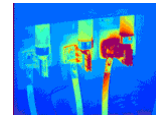
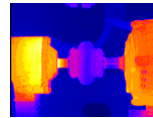
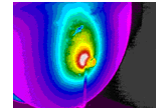
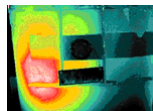
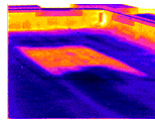
## Metode ispitivanja

- Kvantitativne metode se baziraju na referentnim standardima
- Primjer: varijacije u fazi promjene temperature u zavisnosti od debljine obloge i modulacije termičke pobude (0,5 i 5 Hz)



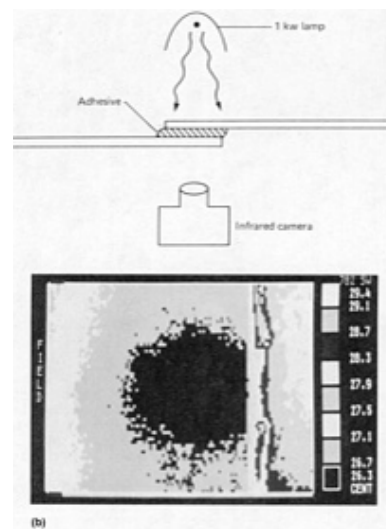
## Primjena

- Vruća i hladna oprema
- Kontrola procesa
- Prodiranje tečnosti
- Greške
- Elektronski uređaji
- Istraživanje



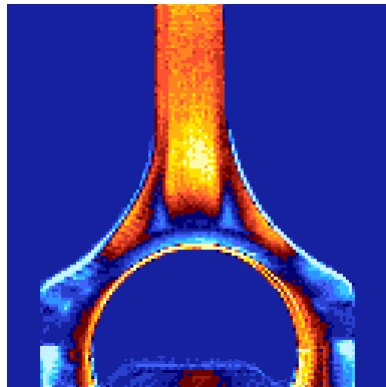
## Primjeri primjene

- Termalno ispitivanje spoja aluminijskih limova



## Primjeri primjene

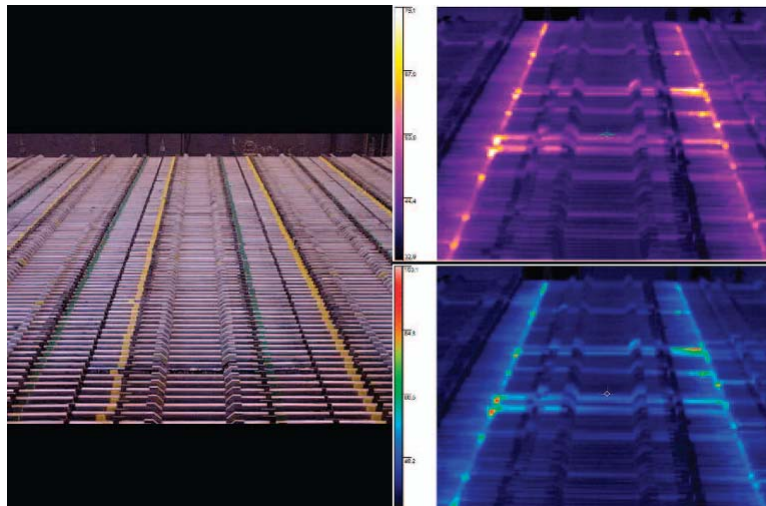
- Termalno ispitivanje napreznja



## Primjeri primjene



## Primjeri primjene



## Primjeri primjene

