

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko

Seminar

Nedestruktivne preiskave materialov in konstrukcij

Vid Agrež
Mentor: dr. Primož Ziherl

15. 5. 2008

Povzetek

Z razvojem industrije in tehnike se je pojavila potreba po spremljanju in zagotavljanju kakovosti izdelkov, saj je okvara le teh vodila do katastrof neznanskih razsežnosti. Nedestruktivne metode so združeno področje tako fizikalnih kot inženirskih znanj. Poleg raznovrstnih načinov, kot so laserske metode, radiografija, uporaba magnetnih delcev in prodornih sredstev, je pomembna tudi obdelava podatkov. Z ustreznim kombiniranjem sredstev lahko dosežemo zadosten vpogled v material in preprečimo hujše poškodbe.

1 Uvod

Nedestruktivne preiskave materialov oziroma nedestruktivno testiranje (NDT) uporabljamo za pridobivanje informacij o konstrukcijah in materialih, ne da bi jo pri tem poškodovali. To je glavna prednost pred destruktivnimi metodami, saj je merjenec kasneje še uporaben, kar pripomore k zmanjšanju cene. Danes se metode v tem sklopu uporablja predvsem za zagotavljanje varnosti in nadzorovanje elementov v sistemih, ki so pod konstantnimi delovnimi obremenitvami in jih ni enostavno izključiti (npr. jedrski reaktorji).

V sklop NDT spada več metod in vsaka ima svoje prednosti in slabosti. Med prve spada metoda akustičnih emisij, ki so jo v primitivni različici uporabljali že lončarji v starem Egiptu, ko so poslušali pokljanje ohlajajočih se loncev in na podlagi tega presodili njihovo kakovost [1]. Prav tako spada pod nedestruktivne metode uporaba ultrazvoka, laserske svetlobe, prodornih sredstev in elektromagnetnih lastnosti snovi.

Vsaka omenjena metoda ima specifično usmeritev delovanja. Zato je za učinkovito analizo objekta potrebna njihova kombinacija. Prav tako imamo pri večini problem določanja meje, s katero bi presodili ustreznost merjenca delovnim pogojem. Tako obstajajo standardi za posamezne metode, na podlagi katerih določimo npr. obrabo konstrukcije.

2 Akustične emisije

V sklopu nedestruktivnih metod si bomo kot prvo pogledali metodo, ki sama po sebi ni destruktivna, a pri zaznavanju izkorišča deformacije materiala, ki ponavadi niso ponovljive. Metoda izkorišča dejstvo, da materiali in konstrukcije oddajajo zvok, ko so mehansko ali termalno obremenjene do plastičnih deformacij. S stalno prisotnostjo takšnega merilnega sistema (slika 1) lahko ugotovimo nastanek in lokacijo napake v konstrukciji v trenutku, ko se ta pojavi[1].

Kaiserjev pojav

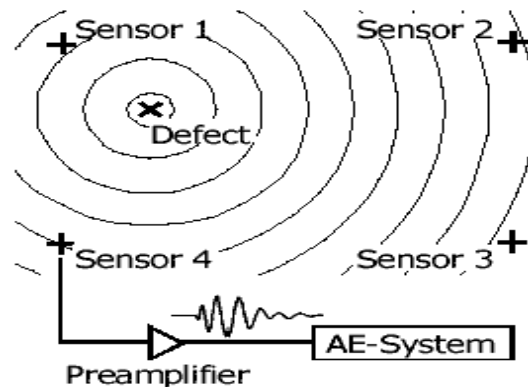
Leta 1950 je Josef Kaiser objavil doktorat, v katerem je preiskoval akustične pojave v materialih. Ugotovil je, da materiali pod obremenitvijo oddajajo majhne pulze elastične energije v frekvenčnem območju od 100 kHz do 2 MHz [2]. Naslednja ugotovitev je bila, da se zvok ne ponovi, dokler material obremenjujemo do enake meje. Šele ko je prvotna obremenitev presežena, dobimo nov signal. To imenujemo Kaiserjev pojav. Pri materialih, ki se elastično starajo, je ta signal lahko časovno odvisen.

Senzorji

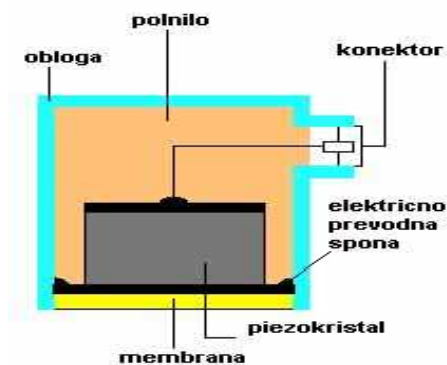
V uporabi so večinoma piezoelektrični senzorji (slika 2), ki mehanske deformacije pretvorijo v električni signal. Pri kovinskih konstrukcijah so frekvence med 100 in 300 kHz. Tako imajo za to primerni senzorji resonančno frekvenco 150 kHz. S tem tudi zmanjšamo vpliv šuma, ki ima frekvence pod 100 kHz [1]. Pri teh frekvencah signal dokaj hitro izgubi amplitudo, zato morajo biti senzorji nameščeni na manjših medsebojnih razdaljah. Tako območje zanimanja bolje pokrijemo in lažje najdemo napako.

S piezoelektriki lahko dosežemo občutljivosti do $1000 \text{ V}/\mu\text{m}$, kar pomeni, da premik 0.1 pm povzroči signal z amplitudo $100 \mu\text{V}$. Pri tem amplituda električnega

šuma 10 krat manjša. Maksimalno frekvenčno območje za takšne senzorje je od 20 kHz do 1.5 MHz, pri čemer je najvišja delovna temperatura okoli 550 °C [1].



Slika 1: Shema postavitve senzorjev za učinkovito lociranje napake. Te postavimo na gosto (1 m), tako da lažje določimo napako. Posamezne signale preko ojačevalnika vodimo na računalnik, kjer preračunamo nastanek defekta [1].



Slika 2: Enostavni prerez akustičnega senzorja, katerega glavni sestavni del je piezoelektrični kristal. Ta je preko membrane pritisnjen na merjenec. Mehanske vibracije v njem povzročijo spreminjajočo se napetost, ki jo analiziramo s pomočjo sistema priklopljenega na konektor. [3]

Uporaba

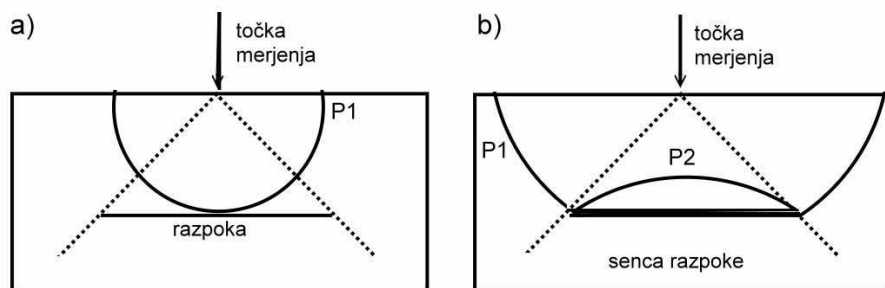
Metoda je uporabna v sistemih, kjer je potrebno testiranje opreme med delovanjem. Mednje spadajo rafinerije, cevovodi, jedrske elektrarne, konstrukcije letal, gradbeni objekti pod velikimi obremenitvami, itd. Tako lahko z računalniško podporo nadzorujemo sistem v realnem času, pri čemer samo poseganje v sistem ni potrebno. To so glavne prednosti pred drugimi NDT metodami [1].

Omejitev metode je predvsem, da je nezmožna zaznavati napake na materialu, ki niso posledica njegove deformacije (npr. korozija). Prav tako se spreminja merilo za napake od sistema do sistema. Tako presoja temelji na merilcu. Sama metoda je občutljiva na okoliški šum. Ko ta preseže določen prag, postane neuporabna.

2.1 Metoda odmeva

Metoda se uporablja pri preiskavah betonskih ali zidanih objektov. Sprejemnik je enak kot pri akustični emisiji, le da ne zaznava zvoka, ki ga povzročajo deformacije v materialu. Na mestu merjenja v površino ustrelimo kroglico premera 4 do 15 mm s hitrostjo od 2 do 10 m/s [1]. Tako povzročimo valovno fronto, ki se širi znotraj materiala. Kot ta zadane na razpoko, se od nje odbije, kar zaznamo na merilniku. S tako metodo lahko preiskujemo betonske objekte, široke do 1.5 m.

Pri udarcu se sprostijo globinski longitudinalni (primarni P) in transvezalni (sekundarni S) valovi, ki se širijo v sferičnih valovnih frontah, ter površinski Raleigh-ovi R valovi, ki se širijo radialno navzven po površini. Naša metoda izkorišča P valove (slika 3), katerih hitrost širjenja je reda km/s. Za beton ta znaša med 3000 do 5500 m/s.



Slika 3: Skici prikazujeta a) širjenje motnje v obliki P vala (P1) proti razpoki in b) njen odboj (P2). Prikazana je tudi pomakljivost te metode, saj imamo za razpoko geometrijsko senco. Ta nam prepreči zaznavanje napak za prvo oviro. S puščico je označena točka merjenja, kot tudi mesto udarca. Prilagojeno iz [1].

3 Ultrazvok

Začetki ultrazvočnega testiranja (UT) so v petdesetih letih 20. stoletja. Uporabljamo ga lahko za detekcijo napak, merjenje velikosti objekta in določitve materiala. UT izkorišča visoko frekvenčno valovanje v MHz območju, ki je običajno med 0.1 in 15 MHz. Valovna dolžina je tako reda milimetrov, kar zadostuje za zadostno ločljivost pri preiskavi materialov. Valovanje je lahko polarizirano longitudinalno ali transverzalno. Hitrosti longitudinalnega c_l in transverzalnega c_t valovanja v rasežnem sredstvu sta:

$$c_l^2 = \frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - \mu)} \quad (1)$$

in

$$c_t^2 = \frac{G}{\rho} = \frac{E}{2\rho(1 + \mu)}, \quad (2)$$

kjer so E elastični modul, ρ gostota snovi, μ Poissonovo število in G strižni modul. S temi zvezami lahko določimo tudi posamezne elastične konstante snovi.

Obstaja več načinov, kako preiskati material. Prva delitev je na pulzno-odmevni in na presevni način. Druga je glede na vpadni kot valovanja. Prav tako ločimo, ali se sonda dotika preiskovanca preko gela, ali pa je v vodni kopeli skupaj z merjencem. To je potrebno zato, da zmanjšamo odboje na prehodu sonda-merjenec. Različni koti med sondo in površino merjenca so potrebni, če želimo povečati odbojnost napake v materialu v primeru, kot ta leži pod nekim kotom glede na površino. V pošte

pride tudi, ko je na površini prisotna ovira. To lahko predstavlja močnejši var ali pa vpetje merjenca.

Pulzno-odmevni način

V tem načinu sonda pošlje v snov pulz in “poslušá”, kdaj dobi odmeve. Te dobimo v snovi zaradi defektov, kot so razpoke in od nasprotne površine merjenca. Tako dobimo na merilniku prikazane izmerjene amplitude sunkov v odvisnosti od časa (slika 4), od koder lahko določimo velikost defekta in njegovo globino.

Presevni način

Tu uporabimo dva piezoelektrična kristala. S prvim generiramo pulze, ki jih zaznavamo z drugim. Ta je nameščen na nasprotni strani merjenca. Tak merilni sistem zazna defekt preko zmanjšanja amplitude prejetega sunka, saj nam razpoka odbije del valovanja. Način merjenja se uporablja tam, kjer je ultrazvočni signal šibek. Vzrok so napake v materialu, ki slabo odbijajo valovanje tako, da ima pulzno-odmevna metoda slabo razmerje med signalom in šumom. Pomanjkljivost načina je, da nam ne poda informacije o globini defekta.



Slika 4: Slika prikazuje izseke testiranja lopatic letalskega motorja, ki so prikazane na podsliki 1. Poslika 2 prikazuje signal brez napake in podslika 3 z napako. Preurejeno iz [2] geslo Ultrasonic testing.

Razmerje signal/šum

Defekti v materialu imajo različne odbojnosti glede na razliko zvočne impedance. Tako ima razpoka večjo odbojnost kot kovinski tujek.

V neidealnem materialu dobimo tudi dodatne odboje, kot so kovinski drobcí mikroskopskih velikosti, ki jih najdemo v konstrukcijah. To nam povzročá motnje na detektorju oziroma šum. Kako dobro lahko v takem merjencu zaznamo napake, nam opiše razmerje signal/šum (S/N). To naj ne bi bilo manjše od 1 [4]. Opišemo ga z zvezo:

$$\frac{S}{N} \propto \frac{\gamma(\nu_0)}{\sqrt{A\Delta t}} \quad (3)$$

kjer je $\gamma(\nu_0)$ razmerje med amplitudo odbitega valovanja od defekta in povprečne amplitude šuma pri dani frekvenci. Parameter A pa predstavlja efektivno površino defekta in Δt je širina pulza.

Prednosti in slabosti

Ultrazvočna metoda je občutljiva tako na površinske kot globinske efekte, ki jih lahko zazna globlje kot ostale metode. Ima dobro ločljivost pri določanju oddaljenosti in velikosti napake. Kljub temu pa potrebuje dostop do očiščene površine in vmesni medij, da preprečimo dodatne odboje na površini. Linearne razpoke, ki potekajo vzporedno z ultrazvočnim valovanjem, je težje zaznati.

4 Elektromagnetno testiranje

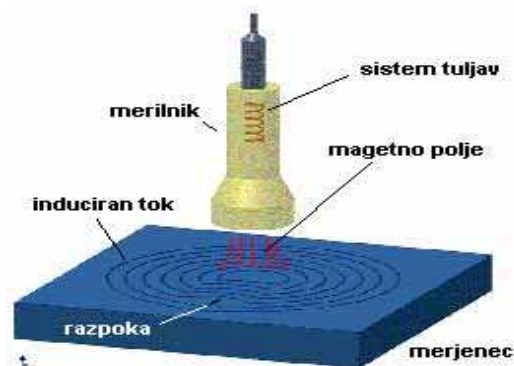
V to poglavje uvrščamo metode, ki pri določanju stanja konstrukcije izkoriščajo njene elektromagnetne lastnosti. Sem spada obnašanje induciranih tokov in otekanje magnetnega toka.

4.1 Izkoriščanje indukcije

Za preiskovanje razpok v materialu, ki je električno prevoden, lahko izkoristimo indukcijo. Objektu približamo tuljavo, ki oddaja izmenično magnetno polje in v njem inducira tok. Ker se ta pojavi v zaključenih tokovnih zankah, vzpostavi sekundarno magnetno polje, ki posledično oslabi primarno polje. To lahko izmerimo kot spremembo impedance oddajne tuljave. Vpliv razpoke v materialu vpliva na inducirane tokovne zanke, tako da ga te zaobidejo. S tem pa se poveča impedanca tuljave. Prav na njeno spremembo vplivajo dejavniki, kot sta prevodnost merjenca in oddaljenost tuljave. Poleg omenjenega načina, kjer je os tuljave pravokotno glede na ploskev (slika 5), ki jo slikamo, jih lahko namestimo tudi vzdolžno. Tako tuljava zaobjame merjenec. Kako globoko v merjenec h_m lahko doseže polje, je odvisno od permabilnosti μ in prevodnosti σ materiala ter frekvence polja ν [1]:

$$h_m = \frac{1}{\sqrt{\pi\nu\sigma\mu}}. \quad (4)$$

Kot smo že omenili, metodo uporabljamo na prevodnih konstrukcijah, kjer lahko zaznamo površinske in podpovršinske napake (do 5 mm). Čeprav ne potrebuje stika s površino, mora biti v njeni bližini. Slabost metode je, da se lahko pojavijo lažne indikacije napak. Takšen primer je nekonstantna oddaljenost površine od merilne tuljave, kar ponovno povzroči spremembe v impedanci.

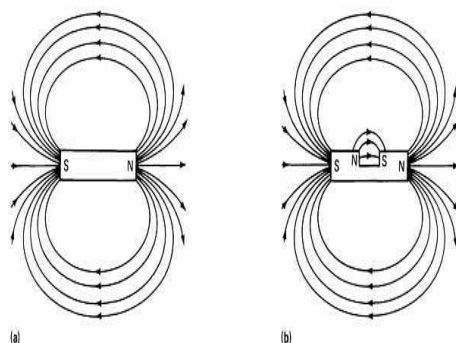


Slika 5: Shema načina iskanja napak s pomočjo indukcije, kjer je detekcijska tuljava postavljena pravokotno na površino.

<http://www.bam.de/en/kompetenzen/fachabteilungen>, (25. 4. 2008)

4.2 Uporaba magnetnega polja

Metode, ki uporabljajo magnetno polje, so predvsem namenjene zaznavanju napak, kot so razpoke, praznine ali nečistoče v magnetnih materialih. Pri tem se zanašamo na "puščanje" magnetnega toka iz takšnega materiala v zunanjem magnetnem polju. S tem imenujemo vzpostavitev magnetnega polja v nezveznostih na površini enakomerno namagnetnega merjenca (slika 6). To lahko zaznamo na več načinov. V prvem primeru nam senzor predstavlja majhna tuljavica, ki jo moramo premikati ob merjencu s konstantno hitrostjo. Ko pridemo do razpoke, se v tuljavi spremeni magnetni pretok. Drugi temelji na Hallovem pojavu. Polprevodniški senzor meri direktno magnetni tok in ni odvisen od spremembe hitrosti merilnika.



Slika 6: Magnetni material v magnetnem polju a) brez in b) z razpoko. Vzeto iz [5].

Bolj enostavna metoda uporablja drobno mlete magnetne delce (železni prah). Ti se ponavadi na merjenec dodajajo v suspenziji. Delcem je primešano fluorescentno barvilo, s katerim ob ustrezni osvetlitvi ugotovimo, kje so se nabrali delci (slika 7). To je enostaven in hiter način odkrivanja razpok na materialu.



Slika 7: Slika prikazuje avtomobilski del pod UV svetlobo. Svetlo zelena črta je posledica fluorescentnih magnetnih delcev, ki so se nabrali na razpoki.

<http://www.cgm-cigiemme.it/Pictures>, 24. 4. 2008

5 Prodorna sredstva

Je zelo enostavna metoda za iskanje razpok in mikroskopskih poškodb površine. Na očiščeno površino nanese prodorno sredstvo, ki mora imeti to lastnost, da pride tudi v najmanjše pore. Nato ostanek sredstva odstranimo. Postopki se sedaj razlikujejo glede na to, kakšne snovi poleg barvil so bile primešane prodornemu sredstvu. Lahko so dobro vidna v UV spektru tako, da potrebujemo za zaznavanje UV luč. Drugače pa uporabimo razvijalec. Ko tako kemično snov nanese na konstrukcijo, ta potegne poprej absorbirano sredstvo na površino in tako vidimo, kje so poškodbe.

Metodo uporabljamo tudi skupaj z radiografijo, s katero težko zaznamo površinske defekte. V tem primeru uporabimo prodorna sredstva, kot so srebrov nitrat, cinkov jodid in kloroform [5]. S tem povečamo kontrast v merjencu.

Materiali, ki so primerni za takšen postopek preiskave, ne smejo biti porozni. Metoda je poceni in jo lahko uporabimo za hitro lokalno preiskavo na cevovodih, varih, turbinskih lopaticah, kolesjih, itd [5].

Njena omejitev je predvsem to, da mora biti napaka na dostopni površini. Če so napake preplitve, jih ne zaznamo. Prav tako ne pridobimo informacije o njeni globini. Zaradi prisotnosti močnih kemikalij način preiskave ni primeren v biološko občutljivih okoljih.

6 Laserske metode

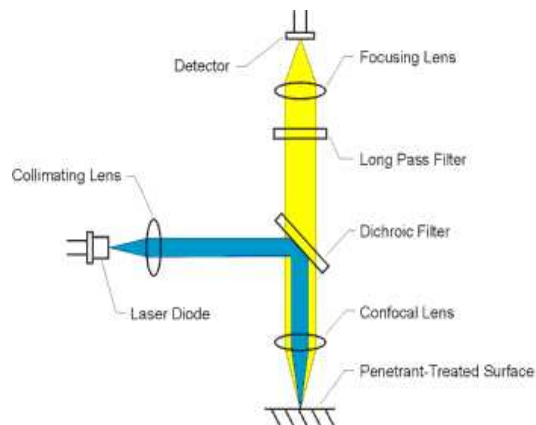
Med najhitreje razvijajoče se nedestruktivne optične metode spada uporaba laserja. Uporabljamo ga lahko na mikroskopskih in makroskopskih skalah. Možni tipi uporabe so lasersko slikanje oziroma ugotavljanje profila merjenca, laserska vibrometrija in laserska metoda prodornih sredstev [6]. Med prednosti laserske tehnike spada dejstvo, da z njo lahko preslikamo površine, ki niso niso gladke ali čiste. Prav tako ni potreben neposreden stik z merjencem. Zajemanje podatkov v realnem času, si omogočimo z uporabo CCD kamer.

Uporaba prodornih sredstev in laserja

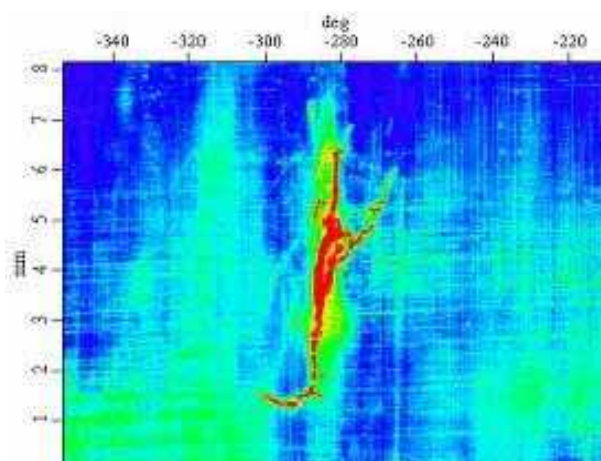
Kot smo že spoznali pri prodornih sredstvih, ta lahko vsebujejo fluorescentno barvilo, ki se ga vidi pod UV svetilko. V tem primeru se za detekcijo uporablja računalniško voden laserski sistem, ki vsebuje UV laser (slika 8). Z njim vzbudimo fluorescentne delce, katerih izsevano svetlobo zaznamo z detektorjem, ki zazna samo intenziteto. Takšen sistem je zelo natančen in lahko pokaže napake na materialu velikosti 0.02 mm (slika 9). Ločljivost je odvisna od velikosti laserske pike, hitrosti vzorčenja in senzorja.

Laserska vibrometrija

Laserska vibrometrija je metoda, s katero lahko natančno merimo hitrosti in odmike nihajoče površine. Deluje na principu zaznavanja Dopplerjevega premika koherentne laserske svetlobe. Površina merjenca siplje oziroma odbije lasersko svetlobo. Iz Dopplerjevega premika frekvence lahko določimo komponento hitrosti v smeri žarka. Pri tem se uporablja optični interferometer in referenčni laserski snop. Fotodetektor nato meri intenziteto interferenčne slike, kjer je frekvenca ponavljanja



Slika 8: Shema laserskega sistema za detekcijo razpok skupaj s prodornimi sredstvi. Laserski žarek sfokusiramo in ga usmerimo na površino merjenca [6].



Slika 9: Slika polovice plašča cevi dobljena s sistemom na sliki 8. Na osi x so kotne stopinje in na y višina v milimetrih. Tople brave na sliki so posledica fluorescentnega prodornega sredstva in označujejo razpoko [6].

vrhov ravno enaka Dopplerjevemu premiku. Tak sistem nam predstavlja Michelsonov interferometer, kjer lahko intenziteto interferenčne slike zapišemo takole [7]:

$$I(t) = I_r I_m R + 2\sqrt{I_r I_m R} \cos(2\pi\nu_d t + \Phi). \quad (5)$$

Tu sta I_r in I_m intenziteti referenčnega in merilnega žarka in R odbojnost površine. Faza Φ se z odmikom površine (x_p) spreminja kot

$$\Phi = \pi\lambda/x_p, \quad (6)$$

kjer je λ valovna dolžina laserja. Fazna zakasnitev v maksimumu je $\Phi = 2\pi$. Tako je $x_p = \lambda/2$. Da je izpolnjen pogoj za maksimum interferenčne slike, mora veljati:

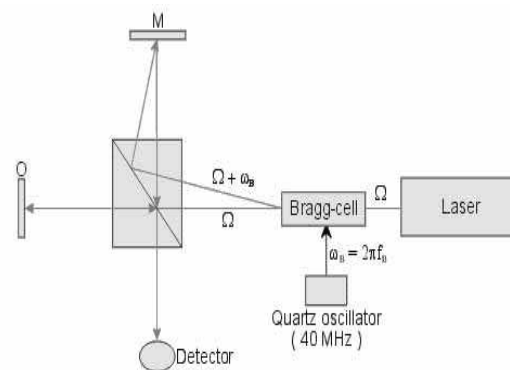
$$\nu_d = \frac{1}{t} = \frac{v}{x_p} \Rightarrow \nu_d = 2\frac{v}{\lambda}, \quad (7)$$

kjer je v hitrost nihajoče površine.

Pri takem načinu nimamo informacije, ali se površina detektorju približuje ali se od njega oddaljuje. To lahko popravimo tako, da v en krak interferometra dodamo žarek s konstantno premaknjeno frekvenco (slika 10). To dosežemo z akustooptičnim modulatorjem, ki ga prestavlja Braggova celica. To je primeren kristal preko katerega moduliramo laserski žarek z akustičnimi valovi s frekvenco (f_b) okoli 40 MHz [7]. Iz nje dobimo naš osnovni žarek in takšnega z naloženo vzbujajočo frekvenco. Intenziteta interferenčne slike je sedaj

$$I(t) = I_r I_m R + 2\sqrt{I_r I_m R} \cos(2\pi(\nu_b - \nu_d) \cdot t + \Phi) \quad (8)$$

S takšnim laserskim sistemom lahko dokaj hitro in natančno ugotovimo naravo nihanja površine, ki jo opazujemo. Točaksni merilnik lahko s sistemom zrcal prilagodimo tako, da je maksimalna hitrost snemanja površine 10 m/s. Natančnost nastavitve kota zrcal je do 0,002 °.



Slika 10: Shema vibrometra, ki temelji na Michelsonovem interferometru. V sistem je dodana še Braggova celica, ki skrbi za referenčno frekvenco. [7]

Lasersko slikanje

Lasersko slikanje poteka z monokromatskim virom svetlobe, sistemom optičnih leč in fotodetektorjem [6]. Prva postavitev leč služi fokusiranju laserskega snopa in zagotavljanju njegovega konstantnega premera čez celotno merilno območje, to je od maksimalne do minimalne oddaljenosti površine od laserskega izvora. Druga postavitev pa nam odbiti žarek projicira na fotodetektor. Iz tega, kateri del detektorja je osvetljen, se določi globina osvetljene točke na predmetu. Tako z dvodimenzionalnim slikanjem površine dobimo njeno tridimenzionalno sliko.

Za zaznavanje se lahko uporablja enoelementni merilec pozicije (ang. single-element position-sensing device PSD) ali pa CCD. Z detektorjem, sestavljenim iz slednjih, bi lahko poleg pozicije zaznali tudi obliko in razporejenost intenzitete odbitega žarka, pri čemer PSD zazna samo lokacijo in celotno intenziteto. Običajno se uporablja PSD, saj je miniaturne CCD sisteme težko narediti. Prav tako pa so njihovi odzivni časi počasnejši. Enostavni PSD prikazuje slika 11.



Slika 11:
PSD

Na nasprotnih koncih fotodiode dobimo na anodah tokova I_1 in I_2 , iz katerih pridobimo normaliziran signal, ki je sorazmeren odmikom na površini [6]:

$$I_n = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}. \quad (9)$$

Tako se znebimo vpliva nihanja izhodne moči laserja in spremembe v odbojnosti površine.

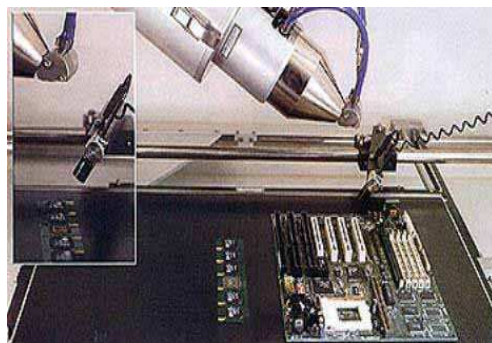
Takšen sistem lahko uporabljamo za natančna slikanja na različnih področjih, kot je npr. arheologija. Prav tako je uporabna za odkrivanje napak na materialih. Pri slikanju oboda cevi je obosna hitrost naprave nekaž 10 mm/s, pri čemer se vrtili okoli cevi s približno 3 Hz. Ločljivost take naprave je od 0.025 do 0.05 mm.

7 Radiografija

Metoda temelji na različnih absorpcijskih koeficientih materiala, ki ga pregledujemo z elektromagnetnim sevanjem zelo majhnih valovnih dolžin oziroma γ žarkov (slika 14). Razlike v absorpciji so posledica spreminjanja gostote, sestave in debeline merjenca. Te zabeležimo tako, da za merjenec postavimo detektor, s katerim dobimo informacijo, koliko vpadnega sevanja se je na določenih mestih absorbiralo. Najstarejšo izvedbo detektorja je predstavljala kar fotografska plošča. Novejše različice prepuščeno sevanje pretvorijo direktno v elektronski signal, ki ga lahko gledamo sproti na zaslonu. Alternativna metoda je računalniška tomografija (CT). V tem primeru sta detektor in sevalec pravokotna na ravnino slike, ki jo dobimo iz več enodimenzionalnih intenzitetnih slik. V tem postopku potrebujemo računalniško obdelavo.

Kot smo že ugotovili, lahko z radiografijo zaznamo značilnosti merjenca, če se te zadosti razlikujejo od okolja, to pomeni najmanj 1% razlike absorpcijskih koeficientov. V praksi zaznamo napake, ki so zadosti debele v smeri vpada žarkov. To pomeni, da je za uspešno slikanje potrebna pravilna orientacija vzorca.

Poleg ultrazvoka je to metoda, s katero lahko zadovoljivo zaznamo napake, ki se pojavijo relativno globoko pod površino merjenca. Razlika je v tem, da je radiografija bolj učinkovita pri neplanarnih napakah, ultrazvok pa pri planarnih. Uporabna stran je tudi, da lahko določimo razlike v sestavi merjenca.



Slika 12: Slika miniaturnega sistema za radiografijo, s katerim preiskujejo napake na računalniškem vezju (matični plošči)

<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1437>, (25. 4. 2008)

8 Toplotno testiranje – termografija

Termografija je nedestruktivna metoda, ki izkorišča motnje toplotnega toka, katerega izvor je lahko zunanji ali notranji. Motnje so lahko posledica razlik v sestavi merjenca in napak, ki se pojavijo v njem [8]. Prisotnost napake se pozna preko spremembe temperaturnega profila na površini, kar lahko zaznamo z infrardečo kamero in nato analiziramo (slika 13). Metoda spada med mlajše nedestruktivne metode in je po letu 1999 začela v letalski industriji nadomeščati ultrazvok in radiografijo.

Pred metodami, ki so uporabljale infrardečo kamero, so bili uveljavljeni postopki s toplotno občutljivimi snovmi. Te so se pri različnih temperaturah obarvale z določenim odtenkom. Nanosi lahko spremenijo barvo pri točno določeni temperaturi. Obstajajo pa tudi takšni, ki imajo območje med 104-1270 °C, na katerem zvezno spreminjajo barvo. Danes so v uporabi kot indikatorji temperature, ki je še sprejemljiva za delo gasilcev.

Bolj enostavna metoda za preučevanje velikih površin je snemanje v infrardečem območju. V obeh primerih segrejemo površino in gledamo njen odziv. V drugem primeru je pomembno odtekanje toplote s površine v obliki toplotnega toka:

$$P = -\frac{\lambda \cdot S}{l}(T_p - T_o) \quad (10)$$

kjer je P toplotni tok, S presek, l dolžina, λ toplotna prevodnost vzorca in $T_p - T_o$ razlika med temperaturo površine T_p in ozadja T_o za idealen homogen primer. Niso pa vsi materiali primerni za takšno preučevanje.

Prvi kriterij je glede na **difuzijo toplote**, ki nam jo predstavlja razmerje med toplotno prevodnostjo in toplotno kapaciteto. Materiali, kot sta baker in aluminij, z velikim difuzijskim koeficientom so težko obvladljivi, saj se toplotni profil zelo hitro spreminja. Nasprotno predstavljata guma in steklo, kjer bi postopek trajal predolgo, da bi videli kakršenkoli učinek.

Drugi kriterij je glede na to, kako dobro površina predmeta seva v okolico. Slabe sevalce, kot so barvne kovine, se običajno v postopku prekrije s pralno črno barvo, medtem ko večina polimerov ne potrebuje predhodne obdelave. Prav tako naletimo na materiale, ki so nevidni v infrardečem spektru.

Segrevanje vzorca

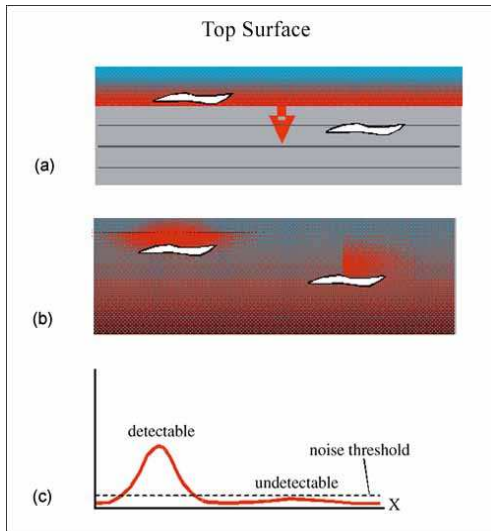
Za segrevanje vzorca obstaja velik nabor tehnik (slika 14). Večina predaja energijo prek sevanja v obliki svetlobe, mikrovalov in elektromagnetne indukcije. Sledi vzbujanje s pomočjo ultrazvoka in direkten stik z vročim objektom.

Optično vzbujanje se uporablja v industriji, kjer so potrebne preiskave velike površine, saj tako izotropno gretje enostavnejše. Običajno se uporablja ksenonske bliskavke ali halogenske luči. Površino vzbudimo s pomočjo pulza, daljše osvetlitve ali pa s periodičnim osvetljevanjem. Kljub različnim tehnikam pa je sam fizikalni proces enak, razlika je le v obdelavi podatkov.

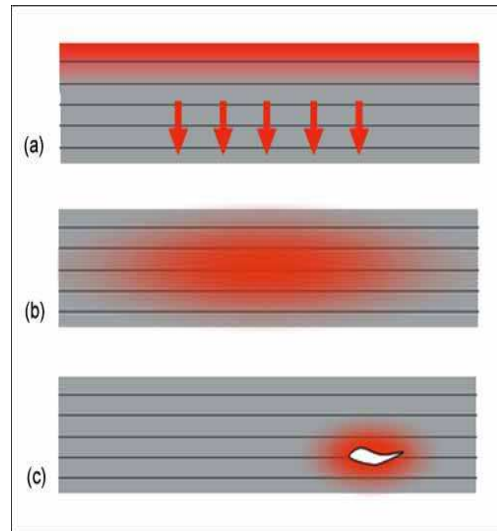
Zvočno vzbujanje povzroča mehanska nihanja. Pri idealnem vzorcu je temperaturni učinek zanemarljiv in ga na infrardeči kameri ne vidimo. Toplotni odziv dobimo, če vzorec vsebuje napake oziroma razpoke. Predstavljamo si lahko, da na teh mestih pride do lokalnih trenj in do gretja. Ultrazvok, s katerim vzbujamo vzorec

je med 15 do 30kHz in ima moč 1 do 2 kW [8].

Elektromagnetno gretje z mikrovalovi je primerno za materiale, ki vsebujejo zadosti kovinskih delcev. Primer je poliester ojačan s kovinsko mrežo. Razlika takega gretja odgretja s svetlobo je, da lahko grejemo element v jedru in ne samo po površini [8].



Slika 13: Zaporedje podslik prikazuje a) segrevanje površine merjenca, ki vsebuje praznine (bele lise), b) transport toplote in c) odziv, ki ga vidimo [8].



Slika 14: Prikaz različnih načinov gretja. a) primer površinskega gretja s svetlobnim tokom, b) globinsko gretje s pomočjo elektromagnetnega polja in c) Izkoriščanje razpok pri ultrasoničnem gretju [8].

9 Vibracijske metode

Vibracijska metoda se uporablja pri kontroli elementov, ki vsebujejo več sestavnih delov. Kot primer navedimo črpalne naprave, motorje, turbine in ventilatorje [1]. Prav tako lahko analiziramo tudi odzive na vibracije, s katerimi vzbujaamo konstrukcije, kot so vozila in mostovi, ki so bili izpostavljeni velikim obremenitvam ali pa koroziji. Večinoma se metodo uporablja na koncu proizvodnje, kjer preizkusimo, kako bi se končni izdelek obašal pod pogoji uporabe, za katere je namenjen. Oprema za take poskuse vključuje klimatsko nadzorovano sobo in naprave za vzbujaanje vibracij oziroma sunkov. Na kratko samo preizkušanje opišemo s tresenjem merjenca, pri čemer merimo amplitudo in frekvenco vibracij, ki jih vzbudimo v njem. Vibracijske naprave lahko poganjamo mehansko, hidravlično ali z elektromagneti v frekvenčnih območjih od 10 do 55 Hz, od 0 do 500 Hz oziroma od 5 do 2 kHz [1]. Mehanske vibracijske naprave so finančno najugodnejše. Njihova slaba lastnost je, da težko proizvajajo naključno tresenje. V osnovi napake najlažje ugotovimo z zajemanja zvoka, ki ga pri testu oddaja merjenec, in z njegovo frekvenčno analizo. Pri tem upoštevamo lastne frekvence posameznih sestavnih delov, da lahko izločimo nezaželene vibracije.

Merilniki

Poleg prej opisane analize zvoka se pri vibracijski metodi uporabljajo merilniki pospeška, hitrosti, raztezka materiala in premikov.

Raztezek materiala merimo s pomočjo žice, pritrjene ob merjenec, katere mere se spreminjajo ob elastičnem raztezk. Naprava meri upornost take žičke, pri čemer mora upoštevati lastne toplotne raztezke. Merilnik se umeri glede na faktor F [1], ki je za posamezno žičko dolžine L in upornosti R definiran z

$$F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} . \quad (11)$$

Pospešek merimo s pomočjo piezoelektričnega kristala, ki nam mehanske sunke pretovri v električne. Te lahko preko Fourierove transformacije prikažemo v frekvenčnem prostoru in s tem dobimo zastopane frekvence. Tak merilnik pospeška ima notranje dušenje tako, da je njegov odziv na pospešek linearen. Njegova pomanjkljivost je slaba odzivnost pri nizkih frekvencah.

Hitrost merimo preko elektrodinamičnih merilnikov, katerih odziv je linearno odvisen od hitrosti pri tresenju. Sestavlja ga komplet tuljav in permanentni magnet. Tuljave so nameščene na vzmeteh okoli magneta tako, da se pri tresenju v njih spreminja magnetni pretok. Naprava lahko meri hitrosti pri frekvencah tresenja od 1 do 2000 Hz. Slaba stran takšnih merilnikov je občutljivost na zunanje magnetno polje.

Premike vpetij oziroma gredi merimo s pomočjo merilnikov, ki delujejo na podlagi induciranih tokov v gredi. Kot smo že ugotovili pri elektromagnetnih metodah, se impedanca merilne tuljave spreminja z oddaljenostjo od merjenca. Če imamo takšne merilnike nameščene okoli gredi, lahko določimo relativne vibracije vrteče se osi, raztezanje gredi zaradi segrevanja, ali obrabo ležajev.

10 Zaključek

Sklop nedestruktivnih metod za preiskave materialov je zelo široko področje. Poleg poprej opisanih metod obstaja se cel sklop postopkov, kako pregledati konstrukcije vizualno, torej takšnih ali drugačnih oblik kamer, ogledal, itd. Prav tako smo izpustili metode, ki razpoke v sistemih za transport tekočih sredstev uporabljajo obarvane pline in velike tlake. Metode, kot je jedrska magnetna resonanca in funkcijska magnetna resonanca, so veliko bolj pomembne v medicini kot pri preiskavah materialov. Nedestruktivne metode so postale nepogrešljiv del sodobne industrije in vzdrževalnih del. Kot smo že ugotovili, ima vsaka svoj prednosti in slabosti, tako da skupaj uporabimo take, ki pokrijejo slabosti drugih. Seveda je v realnosti velik pogoj predstavlja finančni vidik testiranja. To je tudi razlog, da se v avtomobilski proizvodnji uporablja test z magnetnimi delci in prodornimi sredstvi namesto laserskega slikanja. Slednje je pomembno na področju letalske in vesoljske tehnike, kjer je potrebno tudi vizualno pregledati posamezne dele, kot so potisne šobe na vesoljskem raketoplanu.

Literatura

- [1] P. E. Mix, *Introduction to Nondestructive Testing* (John Wiley & Sons, New Jersey, 2005).
- [2] <http://en.wikipedia.org>, 24. 4. 2008
- [3] <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>, 25. 4. 2008
- [4] J. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials* (Springer-Verlag, New York, 1977).
- [5] D. A. Aldrich, C. E. Anderson, *Nondestructive Evaluation and Quality control* (ASM International, New York, 1997).
- [6] <http://www.laser-ndt.com/>, 25. 4. 2008
- [7] <http://www.polytec.com/int/>, 25. 4. 2008
- [8] <http://www.asnt.org/publications/materialseval/basicsarchive.htm>, 25. 4. 2008
- [9] R. K. Miller, *Nondestructive testing handbook. Vol. 6, Acoustic emission testing* (ASNT, Columbus, 2005)
- [10] B. Birnbaum, *Eddy-Current Characterization of Materials and Structures* (ASNT, Philadelphia, 1981)