

Termografia infragorri aktiboa materialen azterketarako

*Estibaliz Apiñaniz**¹, *Arantza Mendioroz*², *Alberto Oleaga*²,
*Agustín Salazar*²

¹ Fisika Aplikatua I Saila, Gasteizko Ingeniaritzako U.E. (UPV/EHU)

² Fisika Aplikatua I Saila, Bilboko Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa (UPV/EHU)

* estibaliz.apinaniz@ehu.es

Jasoa: 2014-05-30

Onartua: 2014-09-08

Laburpena: Termografia infragorri aktiboaren oinarria material batean induzitzen diren uhin termikoen detekzioan datza. Uhin termiko horiek materialean zehar hedatuko dira eta materialaren propietate termikoei eta barne-egiturari buruzko informazioa garraiatuko dute; materialaren gainazalean tenperatura neurtuz lor daiteke informazio hori. Termografia infragorrian tenperatura kamara infragorri baten bitartez neurtzen da.

Azken urteetan teknika fototermikoei eta, bereziki, termografia infragorriak garapen handia izan dute, materialak karakterizatzeko teknika azkarrak direlako, laginarekin kontakturik behar ez dutelako eta entsegu ez-suntsitzaileen barnean sailka daitezkeelako.

Lan honetan, termografia infragorri aktiboaren oinarriak ikusiko ditugu eta zenbait aplikazio aztertuko ditugu hiru teknika erabiliz: termografia infragorri pultsatua, termografia infragorri modulatu eta bibrotermografia.

Hitz gakoak: bibrotermografia, termografia infragorri modulatu, termografia infragorri pultsatua

Abstract: Active Infrared Thermography techniques are based in detecting thermal waves previously induced in a material. This thermal waves will travel through the material and carry with them information of the internal structure of the material. Measuring the surface temperature allows to obtain that information. In infrared thermography the surface temperature is measured by means of an infrared camera.

During the last years these techniques have had a great development because they are very fast techniques, because no contact to the material is needed and because they can be classified as non-destructive techniques.

In this work, we will see some examples of active infrared thermography such as pulsed infrared thermography, modulated infrared thermography and vibrothermography.

Keywords: vibrothermography, modulated infrared thermography, pulsed infrared thermography.

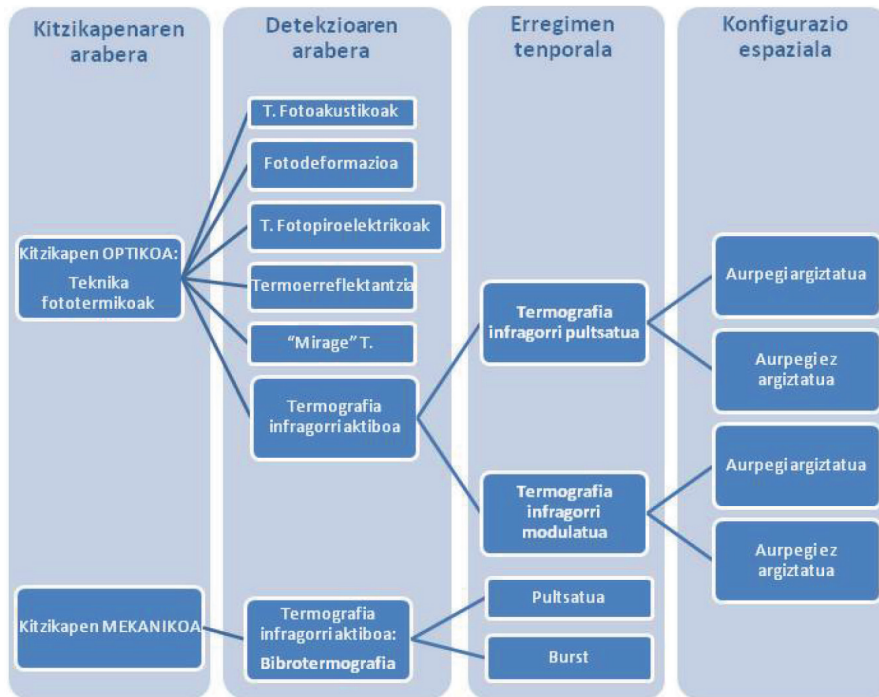
1. SARRERA

Azken urteetan teknika fototermikoeek garapen handia izan dute, propietate termikoak eta optikoak eta materialen barne-egitura aztertzeko teknika bakunak direlako. Teknika fototermikoak gainera, bereziki sentikorrek dira gainazaletik gertu dauden akats txikiak detektatzeko; ezaugarri horrek beste teknika ez-suntsitzaileetatik bereizten ditu [1-6]. Baditu beste ezaugarri batzuk, hala nola, propietate termikoetan aldaketa txikiak detektatzeko sentikortasuna eta kontakturik gabeko detekzioa. Horretaz gain, neurketak denbora errealean lortzen dira eta in-situ; azken hau, industrian oso baliagarria da fabrikazio prozesuan bertan entseguak egin ahal izateko. Teknika honek mugak ere baditu: laginaren emisibitateak altua izan behar du edo, bestela, laginaren gainazala prestatu behar da neurketak posible izan daitezen.

Teknika fototermikoen oinarria material batean sortzen diren uhin termikoen detekzioan datza. Uhin termiko horiek era desberdinetan induzi daitezke material batean: materiala argi sorta bidez argizta daiteke edo ultrasoinuen bidez kitzika daiteke (ikus 1 irudia). Sortzen diren uhin termiko horiek materialean zehar hedatuko dira eta barruko heterogeneitateek edo/eta gainazalek barreiatuko dituzte. Beraz, uhin termikoei materialaren propietate termikoei eta barne-egiturari buruzko informazioa garraiatuko dute gainazalera eta materialaren gainazalean tenperatura neurtuz lor daiteke informazio hori. Uhin termiko hauek detektatzeko eta, horrela, materialari buruzko informazio termikoa, optikoa eta egiturazkoa lortzeko hainbat detektagailu erabiltzen dira. Erabilitako detekzio-metodoaren arabera teknika desberdinak bereiz daitezke: termografia infragorria, teknika fotopiroelektrikoa, mirage efektua eta erreflektantzia fototermikoa [5-6].

Lan honetan teknika jakin bat landuko dugu: termografia infragorri aktiboa. Teknika honetan materialaren tenperatura-aldaketak termografia infragorriaren bidez detektatzen dira. Funtsezko abantaila bat du: ez da aztertu behar den laginarekin kontakturik behar, eta ondorioz, muturretako baldintzetako inguruetan dauden materialak azter daitezke, hots, presio eta tenperatura altuetan daudenak [2,4]. Termografia infragorria bi arlotan sailka daiteke: termografia pasiboa eta aktiboa [2,3,4]. Termografia pasiboan materialaren tenperatura detektatu egiten da baina materiala kitzikatu gabe; mota honetako termografia oso kualitatiboa da; materialean anomaliak dauden ala ez adierazten digu, baina ez digu anomalia horiei buruz inongo informaziorik ematen. Aktiboan, berriz, materiala iturri desberdinen bidez kitzika daiteke eta geroago ikusiko dugun bezala, laginari buruzko informazio gehiago lor daiteke.

Termografia infragorrian, adibidez, material bat homogeneoa bada eta gainazaleko tenperatura neurtzean zonalderen batean tenperatura desberdina dagoela ikusten bada bada, gainazal azpian akatsen bat dagoela pentsatu beharko dugu (delaminazioa, pitzadura, inkrustazioa). Akats horren



1. irudia. Eskema. Termografia infragorri aktiboa eta bereziki lan honetan landuko ditugun hiru teknikak: Termografia Infragorri Pulstua, Termografia Infragorri Modulatu eta Bibrotermografia. Lehenengo biak Teknika Fototermikoan barnean sailkatuta daude, hau da, optikoki kitzikatzen dira laginak eta seinalea kamara infragorriaren bidez detektatzen da; kitzikatzeko erabiltzen den denbora-erregimearen arabera termografia pulstua edo modulatu deituko dugu. Bibrotermografiak, berriz, kitzikapen mekanikoa erabiltzen du eta detekzioa, aurreko bi tekniketara bezala, kamara infragorrien bidez egiten da.

karakterizazioa (tamaina, sakontasuna, propietate termikoak...) ordea, ez da berehalakoa, uhin termikoen hedapenaren eredu teorikoak garatu eta emaitza esperimentalekin konparatu behar baitira [7]. Horretan datza, adibidez, metodo zuzena deritzona: propietate termikoak ezagututa eredu teoriko bat garatu eta emaitza esperimentalekin konparatzen da. Eraginkorragoa da ordea alderantzizko metodoa; azken honek, posible egiten du neurkera esperimentaletatik abiatuta tresna matematikoen bidez akatsa karakterizatzea. Horrela, posizio, forma eta tamaina lortuko dira. Hori, ordea, ez da beti posible, akatsek eta baita materialek ere baldintza batzuk bete behar dituztelako. Baldintza guztiak kontuan hartzeko eta teknika horien gaitasunak mugatzeko, beharrezkoa da erradiazio infragorriaren printzipio fisikoak ikastea [7].

Lan honetan termografia infragorri aktiboaren oinarriak eta aplikazioak azalduko ditugu. Horretarako, gaur egun oso erabiliak diren termografia infragorri aktiboko hiru teknika deskribatuko ditugu; teknika hauek lagina kitzikatzeko erabiltzen den metodoaren arabera sailkatzen dira (ikus 1 irudia). **Termografia pulsatua** (argi pulsu bat erabiltzen da uhin termikoak sortzeko), **termografia modulatu**a (argi modulatu erabiltzen da uhin termikoak sortzeko) eta **bibrotermografia** (ultrasoinuak erabiltzen dira uhin termikoak sortzeko). Teknika horiek materialen propietate termiko eta optikoei buruzko informazioa emateaz gain, materialen egiturari buruzko informazioa ere ematen dute eta beraz, entsegu ez-suntsiztaile oso erabilgarriak dira [2,4].

Entsegu ez-suntsiztaileak industriako osagaien kalitatea eta fidagarritasuna neurtzeko teknikak dira. Teknika hauetan oso garrantzitsua da materiala deuseztatu eta kaltetu gabe aztertzeko eskaintzen duten aukera. Entsegu mota horiek oso garrantzitsuak dira enpresa kimikoetan, ekoizpenerako enpresetan, industria aeronautikoan, automozioan eta baita medikuntzan ere. Entsegu ez-suntsiztaileen artean, aipatzekoak dira besteak beste ultrasoinuak, X-izpiak, Foucaulten korrenteak, likido sarkorrak, partikula magnetikoak, eta neutroi sortak. Lehenengo biak dira industrian ezagunenak eta erabilienak [5,6].

Azken hamarkadetan ordea, teknika fototermikoek gorakada handia jaso dute entsegu ez-suntsiztaileen esparruan. Hor, bai industriako kalitate-kontrolatan bai materialen karakterizazioan erabiltzen dira, erakusten duten sentikortasun altua eta erresoluzio-gaitasunengatik. Beste teknika edo entsegu ez-suntsiztaileekin konparatuta, kamararen bidezko termografia infragorriak abantaila nagusi bat du: neurtu nahi den gainazal osoa aldi berean neurtzen du eta erradioaktibitatea, elektromagnetismoa edo radarra bezalako beste teknika ez-suntsiztaile batzuek, laginaren gainazaleko puntu bakarra neurtzen dute.

Funtsezko kontzeptuak

Temperatura oso aldagai garrantzitsua da edozein prozesu fisikotan, baina bere neurketak zailtasunak dauzka, ezin baita zuzenean neurtu, hots, beti berarekin zerikusia duen beste aldagai bat erabili behar da. Ezaguna da ohiko termometria (termometro arrunta) bi gorputz kontaktuan jartzean gertatzen den eroankortasunaren bidezko bero-transmisioan oinarritzen dela; behin oreka termikoa lortuta, beste aldagai fisikoa erabiltzen da neurketa egiteko. Termografia infragorriak aldiz, temperatura neurtzeko materialak igorritako erradiazioa detektatzen du eta, ondorioz, ez da beharrezkoa kontaktu fisikoa temperatura neurtzeko. Zero absolutuaren ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) gaineko tenperaturan dagoen edozein objektuk erradiazio infragorria igortzen baitu. Gainera, termografia infragorria ohiko termometria baino azkarragoa

da, ez baita oreka termikoa lortu arte itxaron behar. Azkartasunari eta kontaktu ezari ezker termografia infragorria muga-baldintzetan (presio eta temperatura altuetan) neurketak egiteko erabil daiteke.

Termografia infragorria batzuetan «thermal imaging» ere deitzen da, neurketa infragorrietatik irudi erradiometrikoa sortzeko gaitasuna duelako.

Ezinbestekoa da termografia infragorriko esperimenduetan kontuan hartu beharreko kontzeptu garrantzitsu batzuk menperatzea [7]:

- **Beroa** temperatura altuko material batetik temperatura baxuko material batera oreka termikoa lortu arte gertatzen den energia-transferentzia da. Beroaren transmisioa hiru eratan gertatzen da: eroankortasunaren, konbekzioaren eta erradiazioaren bidez. Nahiz eta termografia infragorriak detektatzen duena erradiazioa den, termografia infragorriko esperimenduetan hirurak hartu behar dira kontuan, informazio fidagarria lortu ahal izateko. Esan dugun moduan, termografia infragorria ondo ulertzeko (aplikazioak, gaitasunak eta mugak) beharrezkoa da erradiazio infragorriaren printzipioekin eta bero-transferentziari buruzko printzipioekin lotutako fisikaren legeak ezagutzea. Gainera kamara infragorriak materialak igorritako erradiazioa detektatzen du, baina kontuan hartu behar da detektatutako erradiazioak hiru osagai dituela: materialaren gainazalak irradiatutakoa, ingurunetik islatzen dena eta materialean zehar transmititu egiten dena.
- **Emisibitatea** material batek erradiazio termikoa igortzeko duen gaitasuna da eta Steffan Boltzmanen legea betetzen du [7]. Termografia infragorrian erradiazio termikoa neurtzen dugunez, ezinbestekoa da emisibitate altuko materiala izatea, eta hala ez bada, materiala beltzez margotzea gomendatzen da. Hau da teknika honek duen zailtasunetako bat, buruhauste handiak dakartzana. Geruza beltzak eragina izango du neurketen emaitzetan eta beraz, geruza ahalik eta finen jartzea gomendatzen da. Neurtu nahi den materialaren arabera geruza beltza spray baten bidez margotuz edo sputtering bidezko grafitoa jalkiz lor daiteke.
- **Difusibitate termikoa** temperaturak denboran zehar jasaten dituen aldaketen arabera bero-hedapenaren abiadura neurtzen duen propietate termikoa da. Hau da, difusibitatea beroaren hedapen-erritmoa gobernatzen duen magnitudea da, eta adierazten du zenbateko abiaduraz gertatzen den bero-difusioa materialetan. Zenbat eta difusibitate termiko handiagoa, orduan eta azkarrago hedatuko da beroa ingurunera.
- **Eroankortasun termikoa** bero-transferentziak materialaren lodiera unitate batean zehar duen abiadura da, azalera unitateko eta tenperatura-diferentziaren unitateko; eta adierazten du materialak beroa nola eroaten duen.

Definizio hauek kontuan hartuta, bero-eroapenaren ekuazioa horrela idatz daiteke:

$$\nabla^2 T(\vec{r}, t) - \frac{1}{D} \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{Q(\vec{r}, t)}{K} \quad (1).$$

Aurreko honetan, Q bolumen unitateko eta denbora unitateko laginari ematen zaion energia da, iturriaren menpeko energia alegia; D difusibitate termikoa eta K eroankortasun termikoa. Ekuazio horren emaitzak materialak gainazalean duen tenperatura emango digu. Muga-baldintzak eta beraz, ekuazioa, aldatuko dira iturriaren eta materialaren itxuraren arabera. Eta hori hartu behar da kontuan teknika bakoitzaren bidez informazioa lortu ahal izateko.

2. TERMOGRAFIA INFRAGORRI PULTSATUA

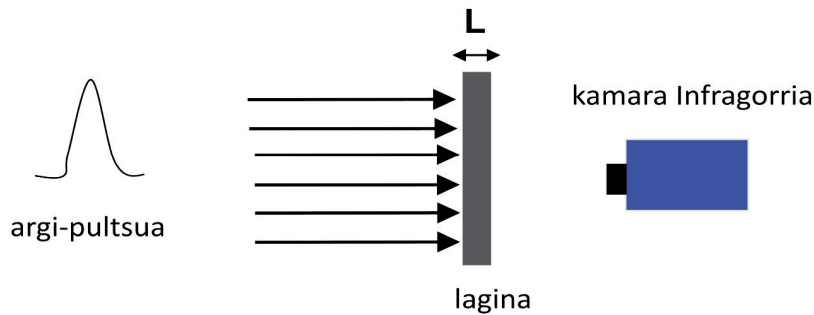
Parker et al.-ek [8] 1961. urtean proposatutako teknika hau, egun, solidoen difusibitate termikoa neurtzeko metodo estandartzat hartzen da.

Termografia mota honetan materiala laburki argizatzen da eta kamara infragorri baten bidez neurtu egiten da gainazaleko tenperatura denboran zehar nola aldatzen den. Grabaketa-denbora materialaren arabera asko alda daiteke: milisegundo gutxi batzuk (metalen kasuan adibidez) edo segundo batzuk (epoxy edo plastikoen kasuan). Laginean denboran zehar gertatzen den tenperatura-aldaketak propietate termikoak neurtzea ahalbideratzen du. Termografia pulsatua da ezagunena entsegu ez-suntsizaile bezala erabiltzen diren metodoen artean [4].

Temperaturaren neurketak bi eratakoak izan daitezke: alde batetik, «islapena» deritzogun neurketan bero-iturria eta kamara alde berean kokatzen dira, hau da aurpegi argizatuan neurtzen da temperaturaren garapena. Bestetik, «transmisioa» deritzogun neurketan materiala alde batetik berotu eta kontrako aldeko (argiztatu gabeko aurpegia) gainazaleko tenperatura neurtzen da; azken teknika honi Flash metodoa ere deitzen zaio (ikus 1 irudia).

Termografia pulsatuak dituen aplikazioen artean badaude materialen difusibitatearen neurketa [9, 10], akatsen detekzioa, propietate optiko eta termikoen aldibereko neurketak [11], gogortasun profilaren neurketa eta lagin anitzetako materialetan eroankortasun termikoen, difusibitate termikoen eta erresistentzia termikoen neurketak.

Teknika honek azkartasuna du abantaila nagusia. Eta gainera, kontakturik gabekoa, horrela produkzio kateetan produkzioa gelditu gabe aplikatu daitekeen teknika da.



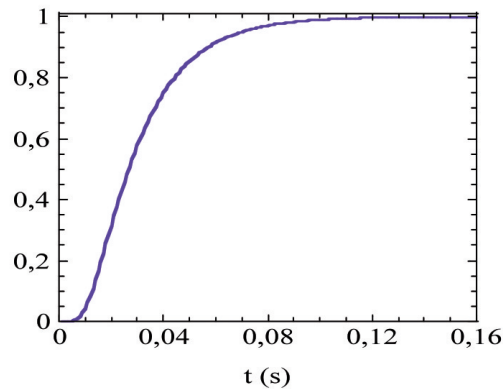
2. irudia. Termografia modulatuaren esperimentuaren eskema (Flash konfigurazioa). Flash lanpararen edo laserraren bidez lagina argizatzen da, laginaren zurgapena eta emisibitatea hobetzeko grafitozko geruza batez estaltzen da eta, azkenik, kamara infragorriak aurpegi ez-argizatutuan gertatzen den tenperatura-aldaketa neurtzen du.

Esana dugu metodo hau materialen difusibitatea neurtzeko metodo estandartzat erabili dela, batez ere laginak lauak direnean; gainera, azken lanetan metodo hau, hots, Flash metodoa geometria kurboko kasu desberdinetara zabaldu da [6]. Gainontzeko propietate termiko eta optikoak neurtzeko beroaren difusio-ekuazioa sakonago aztertu behar da eta termografian oso erabiliak diren alderantzizko metodoak garatu behar dira, beroak denborarekin duen garapenaren kurba zehatz-mehatz doitzeko. Alderantzizko metodo hauek esperimentalki lortutako kurba datu teorikoekin doitzea dute helburu. Behin doiketa zuzena lortuta, laginaren propietate termiko eta optikoak lortuko dira.

Termografia infragorri pultsatuaren adibidea da difusibitate termikoaren neurketa azkarra. Baldintza idealetan (lagina termikoki isolatua badago, bero-galerak kontuan hartzekoak ez direnean, argi-pultsua gainazalitik uniformeki banatuta badago eta argi-pultsua bat-batekoa bada) difusibitate termikoa erraz lor daiteke: argi-pultsua jaurtikitzen denetik gainazaleko tenperatura maximoaren balioaren erdia lortu arteko denbora tarteak neurtzen da ($t_{1/2}$) (ikus 3 irudia) eta hurrengo ekuazioaren bidez lortzen da difusibitatea:

$$t_{1/2} = 0,1388 \frac{L^2}{D} \quad (2),$$

non D difusibitate termikoa eta L laginaren lodiera diren.



3. irudia. Flash konfigurazioaren bidez lortutako temperatura-kurba, hau da, aurpegi argizatugabearen denboran zehar gertatzen den temperatura-aldaketa. Temperatura maximoaren balioaren erdia lortzeko behar den denbora neurtuz ($t_{1/2}$) materialaren difusibitatea lortzen da, (2) ekuazioa jarraituz.

3. TERMOGRAFIA INFRAGORRI MODULATUA

Termografia modulatuan materialaren gainazala argiztaten duen argi-iturria modulatu da. Kitzikapen horren ondorioz uhin termiko bat sortzen da, materialaren barnerantz hedatu eta gainazalaren azpian dauden akatsetan sakabanatu egiten dena. Azkenik, uhin termikoa gainazalera heltzen da eta kamara infragorri baten bidez gainazaleko erradiazioa neurtzen da.

Esan dugun moduan kitzikapena modulatu da eta lortuko dugun erantzuna ere modulatu izango da, hots, kamerak temperatura modulatu neurtuko du. Lock-in moduluak [12] kamerak jasotako temperaturaren modulua eta kitzikapen-seinalearekiko desfasea lortzen du eta datu horiek dira teknika honek materialak aztertzeke erabiliko dituenak; horregatik, teknika honi Lock-in termografia ere deitzen zaio.

Teknika honen aplikazioetariko bat da gainazal azpiko akatsak detektatzeko gaitasuna eta gaitasun horrek zuzeneko harremana dauka **difusibitate termikoaren luzerarekin**:

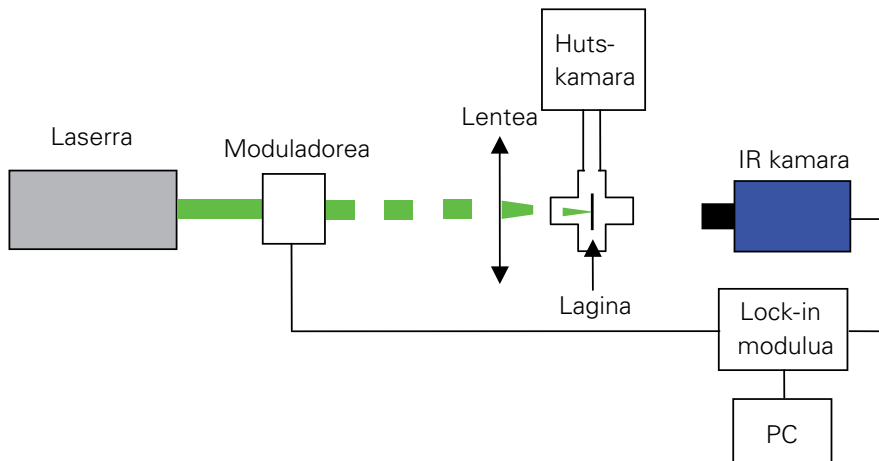
$$\mu = \sqrt{\frac{D}{\pi f}} \quad (3),$$

non D difusibitate termikoa, eta f argi iturri modulaturen maiztasuna den. Beraz, esana dugu teknika hauek gainazaletik oso gertu dauden akatsak bakarrik detektatzeko gai direla, baina hori material bakoitzaren arabera gertatuko da, eta difusibitate altuagoko materialetan (metaletan, adibi-

dez) barruagoko akatsak detektatu ahal izango ditu. Gainera, (3) formulan ikus daiteke argizatze-maiztasunak ere ondo aukeratu behar direla; maiztasun txikiak maiztasun handiak baino sarkorragoak izango dira, baina zehaztasun gutxiago eskainiko dute. Adibidez 0,1 Hz-ko maiztasunerako aluminioaren difusibitate termikoaren luzera $\mu_{Al} = 6$ mm eta bakelitarena, aldiz, $\mu_{Bakelitra} = 0.1$ mm-koak dira.

Termografia infragorri pulsatuan bezala, termografia infragorri modulatuan konfigurazio ezberdinak daude: erradiazio infragorria argiztatutako aurpegian edo ez argiztatuan detekta daiteke. Bestetik, argiztapen laua edo argiztapen puntuala erabil-daitezke. Termografia infragorri modulatuaren bidez, fasea eta anplitudea (bi aldagai) lortzen dugu eta beraz, aurreko teknikak baino zehaztasun handiagoa emango digu; hala ere, neurketa-denbora luzatu egingo da.

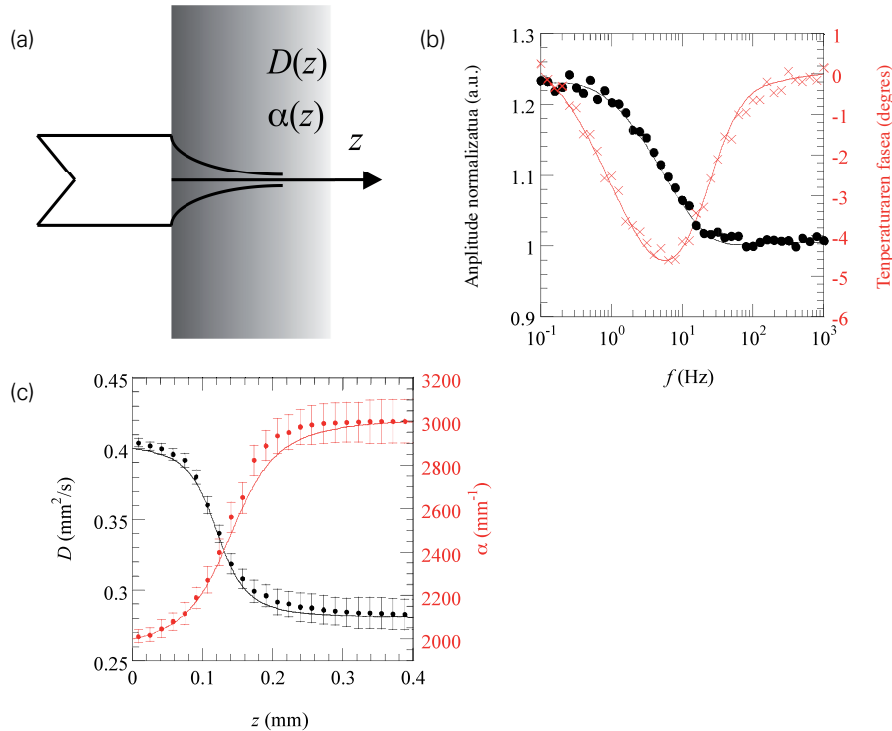
Teknika honen bidez, adibidez, eroankortasun-profilak neur daitezke [13] (ikus 4 irudia). Eroankortasun-profilak materialaren sakontasunean zehar gertatzen den eroankortasunaren aldaketa ematen digu, eta suberaturako materialak karakterizatzeko oso erabilgarria izan daiteke, eroankortasun profila eta suberaketak emandako gogortasun profila estuki erlazionatuta baitaude [13]. Bestetik, difusibitatea erraz lor daiteke; akatsak eta pitzadurak detekta daitezke, eta propietate optiko eta termikoen aldibereko neurketak egin daitezke [14]. Aurreko teknikak bezala teknika hau ere abantailatsua da, ez baita teknika suntsitzailea, eta gainera, neurketak egiteko ez da laginarekin kontakturik behar.



4. irudia. Termografia modulatuaren muntaketa esperimental. Lagina laser baten bidez kitzikatzen da, izpi sorta modulatu egiten da eta laginean fokatzen da (argiztapen puntuala). Lagina kitzikatu ostean, uhin termikoa materialean zehar hedatzen da eta kamara infragorri baten bidez laginak igortzen duen erradiazioa jasotzen da; hortik, tenperaturaren anplitudea eta fasea lortzen dira.

4. irudian irudikatua dago muntaketa esperimentalak, lagina laser baten bidez kitzikatzen da, izpi sorta modulatu egiten da eta laginean fokalizatzen da (argizatzen puntuala). Lagina grafitoz estaltzen da (grafitozko geruza ahalik eta finen izan behar du neurketen emaitzetan ahalik eta eragin txikiena izan dezan); gainera, lagina huts-kamara batean koka daiteke eroan bidezko bero-galerak ekiditeko (hau beharrezkoa izaten da lagin oso finetan edo eroale txarrak direnean). 4 irudian ikusten den bezala, lagina kitzikatu ostean uhin termikoa materialean zehar hedatzen da eta laginak igortzen duen erradiazioa kamara infragorri baten bidez jasotzen da; hortik, tenperaturaren anplitudea eta fasea lortzen dira. Datu horiek aztertuz, materialaren egiturari eta propietateei buruzko informazioa lortzen da.

Teknika honekin, adibidez, materialaren eroankortasun eta difusibitate profilak berreraiki daitezke; propietate hauek material bat suberatu ostean



5. irudia. Termografia modulatuaren bidez, materialaren eroankortasun eta difusibitate profilak berreraiki daitezke. a) Lagina argi modulatuaz argizatzen da, uhin materiala zeharkatzen dute eta gainazalean erradiazio infragorria neurtzen da. b) Tenperaturaren anplitudea eta fasea maiztasunaren menpe. Puntuak eta gurutzak datu esperimentalak dira; lerro jarraituak teoria kontuan izanda egindako doikuntzak dira. c) Lortutako difusibitate termiko eta eroankortasun termikoen profilak.

daukan gogortasun profilarekin zuzenki erlazionatuta daude, eta beraz, materialaren barne egiturari buruzko informazio baliagarria ematen dute.

Adibidez, 5b irudian ikus daitezke esperimentalki lortutako tenperaturaren anplitudea eta fasea (puntuak eta gurutzeak). Lerro jarraituen bidez lortutako doikuntzak irudikatu ditugu (horretarako beroaren difusioaren ekuazioa erabili dugu); doikuntzetatik difusibitate termikoaren eta eroan-kortasun termikoaren profilak lortu ditugu (ikus 5c irudia).

4. BIBROTERMOGRAFIA

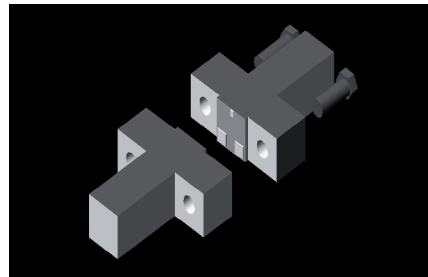
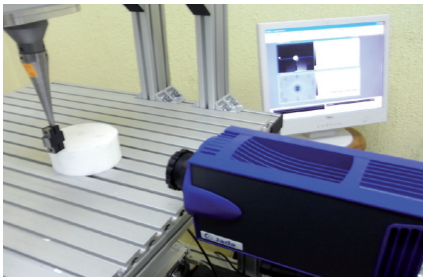
Bibrotermografia edo «Thermosonics» teknika 70. hamarkadaren bukaeran erabiltzen hasi zen termografiako teknika da [14, 15]. Pitzadurak, delaminazioak eta akatsak detektatzeko teknika ez-suntsitzaile bezala sortu zen. Anplitude handiko soinu edo ultrasoinu-bibrazioek berokuntza funtzionala sortzen dute pitzadurretan edo bestelako akatsetan, eta berokuntza hori materialaren gainazalean detekta daiteke kamera infragorriaren bidez. Adibidez, pitzaduraren kasuan aurpegiaren arteko marruskaduraren bidez sortzen da beroa, eta beraz, kanpoko kitzikadura mekanikoa barneko bero iturri moduan aritzen da (akatsetan kokatutakoa) eta sortutako beroa materialean barruan hedatzen da gainazalera heldu arte. Azkenik, kamara infragorriaren bidez gainazaleko erradiazio infragorria neurtuko dugu eta horrek emango digu beroa sortu duen akatsari buruzko informazioa.

Teknika honek abantaila nagusi bat du aurreko tekniken aldean: aurreko bi tekniken bidez gainazalerekiko perpendikularrak diren pitzadurak eta korrosioa detektatzea ia ezinezkoa da eta bibrotermografia aldiz, pitzadura mota hauek detektatzeko oso teknika boteretsua da metaletan, polimeroetan, zein konpositetan [2, 3]. Bestetik, aurrean ikusi ditugun kitzikadura optikoko bi teknikek ez bezala, teknika honek aukera ematen du gainazaletik urrunago dauden akatsak detektatzeko; kitzikadura optikoan uhina gainazalean sortzen da, akatseraino joaten da eta han sakabanatu egiten da, gero berriro gainazalera joan behar duelarik. Bibrotermografian, berriz, uhina akatsean bertan sortzen da eta gainazaleraingoko bidea baizik ez du egin behar.

Teknika honen aplikazioak Fluorescent Penetrant Inspection teknika-
ren (FPI) [5,6] alternatibak dira, hau da, bibrotermografiaren bidez mantentze inspektzioak eta turbinen xafilen eta diskoen manufaktura-kalitatearen kontrolak egin daitezke. Izan ere, bibrotermografia automobilen motoreen hainbat parte ikuskatzeko erabili da. Dena den, orain arte egindako ikasketak gehienak pitzadura eta akatsen azterketa kualitatiboak izan dira. Pitzaduraren forma eta tamainaren kalkulu zehatzagoak beroaren difusioaren ekuazioaren ikasketak sakonagoa eskatzen du; horrela, aukera izango dugu alderantzizko metodo aurreratuen bidez [16, 17], akatsak eta pitzadurak kuantitatiboki eta era fidagarrian karakterizatzeko.

Bibrotermografian batez ere bi teknika erabiltzen dira, kitzikaduraren arabera sailkatuta. Lock-in teknika eta Burst teknika; Lock-in konfigurazioan maiztasun altuko oszilazioetako anplitudea modulatzeko da maiztasun txikia erabiliz, gero, detektatutako seinalea sarrerako seinalearekin sinkronizatuz gainazaleko tenperaturaren anplitudea eta fasea lortzen dira (ikus 6 irudia). Burst teknikan, berriz, ultrasoinuak denbora labur batez aplikatzen dira eta ultrasoinuak aplikatu aurretiko eta aplikatu ondorengo gainazaleko tenperatura neurtzen da, bi tenperaturen neurketen konparaketak materialaren buruzko informazioa emango digu [15].

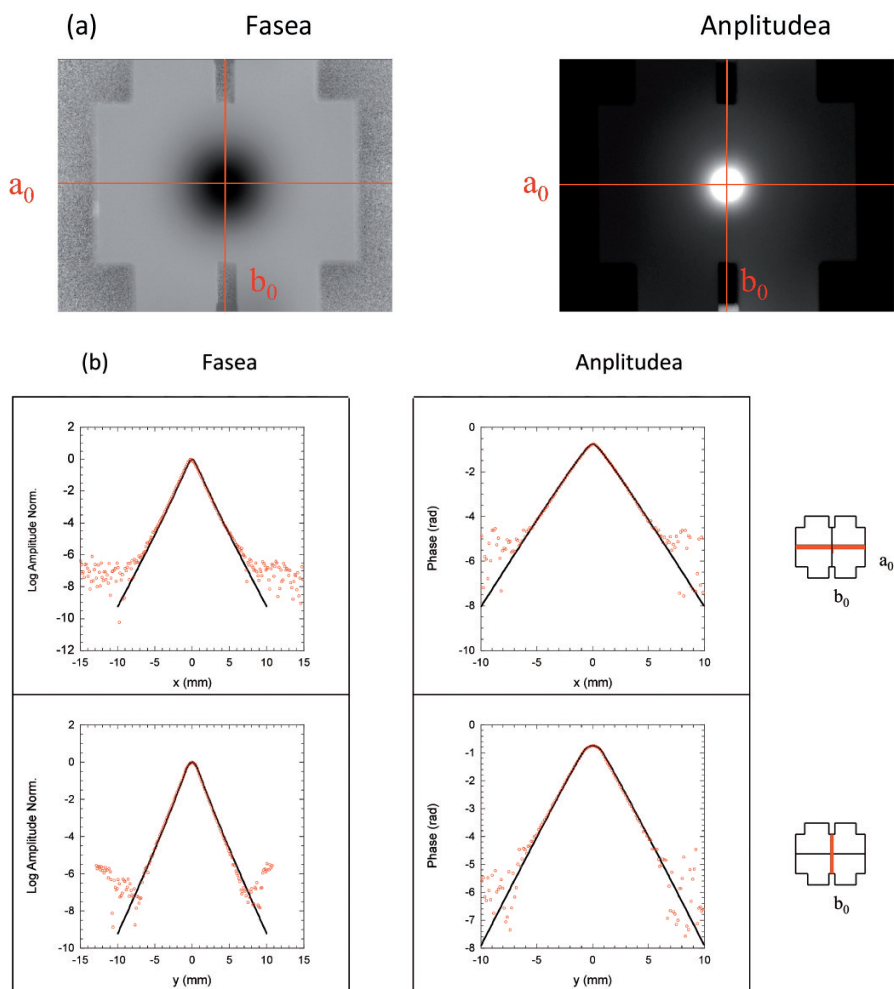
Bibrotermografia erabiltzen duten laborategi gehienek soldatzaile ultrasoinikoa erabiltzen dute bibrazio-iturri moduan. Soldatzaile horiek 1-3 kW-eko potentzia sortzen dute, eta potentzia hori laginari transmititzen diote punta txiki baten bidez (ikus 6 irudia). Gainera, kontuan hartu behar da energia-fluxu handiek lagina kaltetu dezaketela, punta ere apur daitezkeela eta neurketak eralda daitezkeela. Hori ekiditeko, akoplamendu materiala erabiltzen da (gehienetan tefloia).



6. irudia. Ezkerrean, bibrotermografiaren bidezko neurketa baten muntaketa esperimentalak. Eskuinean, akats perpendikular baten simulazioa egiteko lagin kalibratua.

Teknika hau fidagarriagoa eta kalitate-kontrolerako egokiagoa bihurtu nahi dute azken urteetan egindako ikerkuntzek [16, 17, 18]. Horretarako, bero-sorkuntzaren eta garraioaren fenomenoak sakonki aztertzen jarraitu beharko dute, neurketetatik akatsen inguruko datu kuantitatiboak lortu ahal izateko.

6 irudian, ezkerrean, bibrotermografiaren bidezko neurketa baten muntaketa esperimentalaren argazkia dugu eta, eskuinean, akats perpendikular baten simulazioa egiteko lagin kalibratua. 7 irudian irudikatu ditugu lagin horren fasearen eta anplitudearen termogramak eta haietatik lortutako datuak bere doikuntzekin batera. Lagin kalibratuak erabiliz, bibrotermografiak pitzadura perpendikularrak detektatzeko eta karakterizatzeke daukan gaitasuna neur daiteke.



7. irudia. a) Aurreko irudiko laginaren termograma. b) Termogramaren azterketa materialaren gainazaleko bi norabideetan. Puntuak datu esperimentalak adierazten dituzte eta marra beltz jarraituek teoria kontuan hartuz lortutako doikuntzak (alde-rantzizko metodoa). Doikuntzek pitzaduraren tamainari eta kokapenari (sakone-rari) buruzko informazioa ematen dute.

5. LABURPENA

Lan honetan termografia infragorri aktiboaren oinarriak eta aplikazioak ikusi ahal izan ditugu. Horretarako hiru teknika deskribatu ditugu: termografia pulsatua, termografia modulatu eta bicrotermografia. Termografia

pulstua propietate termikoak neurtzeko teknika ez-suntsizaile azkarra da, eta termografia modulatuak ostera zehaztasun handia ematen digu.

Bi teknika hauek, propietate termikoen neurketa ahalbideratzeaz gain, posible egiten dute akatsak, pitzadurak, korrosioa eta eroankortasun termikoen profilak neurtzea. Termografia pulstuan eta modulatuan tenperatura eremuan sortzen den perturbazioa neurtzen da. Bibrotermografian, aldiz, neurketak garbiagoak dira, eta «hondo hotza» agertzen da, hau da, ez dugu materiala berotzen eta horrek sortzen duen eragina aztertzen: akatsa bera da bero iturria eta, beraz, neurketak askoz garbiagoak dira. Teknika honek, beraz, detekta ditzake aurreko bi teknikek ezin detekta ditzaketen akatsak, pitzadurak edo korrosioa, gainazaletik urrunago daudenak eta gainazalarekiko perpendikularrak direnak. Bibrotermografia akatsak detektatzeko oso teknika boteretsua da, baina egun akats horiek kuantitatiboki era zehatz batean karakterizatzeko bide luzea dago oraindik.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] E. G. HENNEKE II, K. L. REIFSNIDER, and W. W. STINCHCOMB. 1979. «Thermography. An NDI Method for Damage Detection». *J. Metals*, **31(9)**, 11-15.
- [2] X. P. V. MALDAGUE, *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Springer-Verlag, 1993
- [3] D. P. ALMOND eta P. M. PATEL, *Photothermal Science and Techniques*, Chapman and Hall, 1996
- [4] X. P. V. MALDAGUE, *Theory and Practice of Infrared Technology for non destructive testing*, Wiley, 2001
- [5] CHARLES J. HELLER, *Handbook of Non destructive Evaluation*, McGraw-Hill Professional; 2 edition, 2012
- [6] PAUL E. MIX, *Introduction to Nondestructive Testing: A training guide*, Second Edition, Wiley-Interscience, 2 edition, 2005
- [5] Y. A. CENGEL, *Heat transfer: A practical Approach*, Mc Graw Hill 2003.
- [7] W. J. PARKER, R. J. JENKINS, C.P. BUTLER, G.L. ABBOTT. 1961. «Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity». *J. Appl. Phys.*, **32**, 1679
- [8] A. SALAZAR, A. MENDIOROZ, E. APIÑANIZ, C. PRADERE, F. NOËL eta J.C. BATSALE. 2014. «Extending the flash method to measure the thermal diffusivity of semitransparent solids». *Meas. Sci. Technol.*, **25**, 035604-035611.
- [9] E. APIÑANIZ, A. MENDIOROZ, N. MADARIAGA, A. OLEAGA, R. CELORRIO eta A. SALAZAR. 2008. «Thermal characterization of rods, tubes and spheres using pulsed infrared thermography». *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 015403.

- [10] A. SALAZAR, A. MENDIOROZ, E. APIÑANIZ, C. PRADERE, F. NOËL eta J.C. BATSALE. 2014. «Extending the flash method to measure the thermal diffusivity of semitransparent solids». *Meas. Sci. Technol.*, **25**, 035604-035611.
- [11] O. BREITENSTEIN eta M. LANGENKAMP. 2003. *Lock-in Thermography*. Springer, 2nd edition, 2010.
- [12] R. CELORRIO, E. APIÑANIZ, A. MENDIOROZ, A. SALAZAR eta A. MANDELIS. 2010. «Accurate reconstruction of the thermal conductivity depth profile in case hardened steel». *J. of App. Phys.*, **107**, 083519
- [13] R. FUENTE, A. MENDIOROZ, E. APIÑANIZ eta A. SALAZAR. 2012. «Simultaneous Measurement of Thermal Diffusivity and Optical Absorption Coefficient of Solids Using PTR and PPE: A Comparison». *Int. J. Thermophys.* **33**, 1876.
- [14] E. G. HENNEKE II, K. L. REIFSNIDER, AND W. W. STINCHCOMB. 1979. «Thermography – An NDI Method for Damage Detection». *J. Metals*, **31(9)**, 11-15.
- [15] L. D. FAVRO, X. HAN, Z. OUYANG, G. SUN, H. SUI, AND R. L. THOMAS. 2000. «Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse». *Rev. of Sci. Inst.*, **71(6)**, 2418-2421.
- [16] A. MENDIOROZ, E. APIÑANIZ, A. SALAZAR, P. VENEGAS eta I. SÁEZ-OCÁRIZ. 2009. «Quantitative study of buried heat sources by lock-in vibrothermography: an approach to crack characterization». *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42(5)**, 055502
- [17] A. MENDIOROZ, A. CASTELO, R. CELORRIO eta A. SALAZAR. 2013. «Characterization of vertical buried defects using lock-in vibrothermography: I. Direct problem». *Meas. Sci. Technol.*, **24**, 065601.
- [18] R. CELORRIO, A. MENDIOROZ eta A. SALAZAR 2013. «Characterization of vertical buried defects using lock-in vibrothermography: II. Inverse problem». *Meas. Sci. Technol.*, **24**, 065602.

