

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**KARAKTERIZACIJA INDIKACIJA
METODOM
INFRACRVENE TERMOGRAFIJE**

Petra Bagavac, mag. inž. strojarstva

Split, ožujka 2020.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. OSNOVE ZRAČENJA	6
2.1. ELEKTORMAGNETSKI SPEKTAR	6
2.2. TEORIJA TOPLINSKOG ZRAČENJA	7
2.2.1. ZRAČENJE CRNOG TIJELA.....	7
2.2.2. EMISIJA	9
2.2.3. APSORPCIJA	9
2.2.4. REFLEKSIJA.....	9
2.2.5. TRANSMISIJA	10
2.2.6. ENERGETSKA BILANCA	10
3. OPREMA.....	12
3.1. DETEKTORI.....	12
3.2. VANJSKA POBUDA.....	15
3.3. ZAPIS TERMOGRAMA	16
3.4. DEGRADACIJA SIGNALA.....	17
3.4.1. FIXED PATTERN NOISE.....	17
3.4.2. BADPIXELS	18
3.4.3. VIGNETING.....	18
3.4.4. KALIBRACIJA TEMPERATURE	19
4. OBRADA SIGNALA NAKON MJERENJA	20
4.1. TEMPERATURNI KONTRAST.....	21
4.2. DIFERENCIJALNI APSOLUTNI KONTRAST, DAC	22
4.3. MODIFICIRANI DAC	23
4.4. REKONSTRUKCIJA TERMOGRAFSKOG SIGNALA.....	25
4.5. LOCK IN TERMOGRAFIJA.....	29
4.6. TERMOGRAFIJA FAZNOG PULSA	40
4.7. DEKOMPOZICIJA VLASTITIH VRIJEDNOSTI	47
5. KARAKTERIZACIJA OŠTEĆENJA.....	53
5.1. UTJECAJ SLOŽENOSTI GEOMETRIJE UZORKA	53
5.2. UTJECAJ GEOMETRIJE OŠTEĆENJA	59
5.3. DUBINA GREŠKE	63

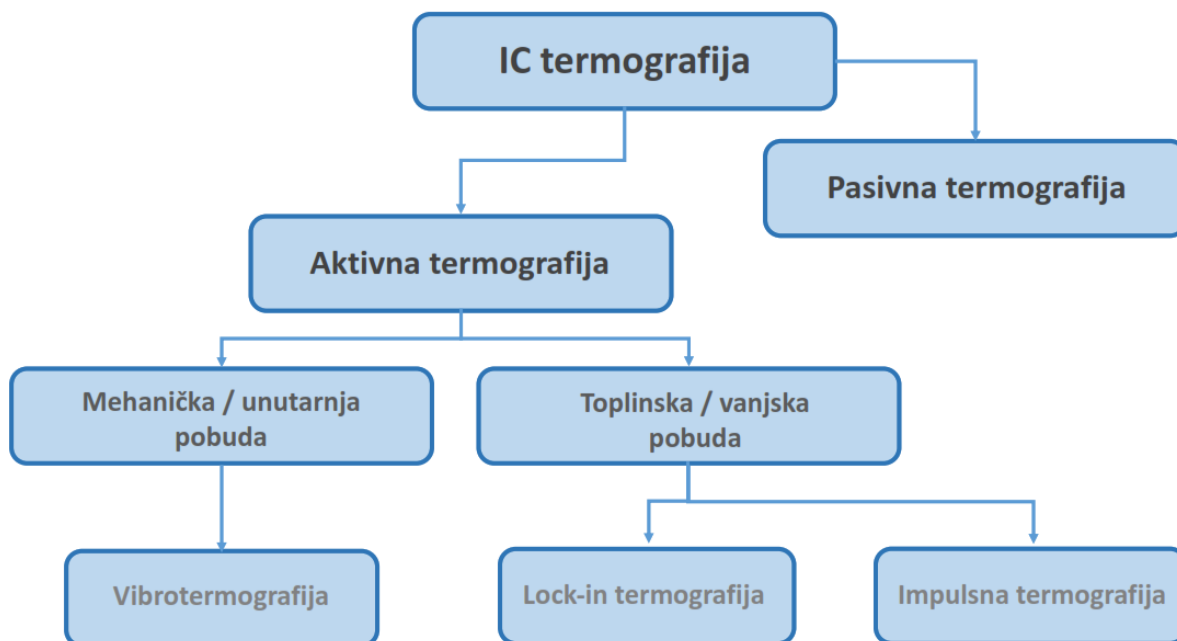
6. DINAMIČKI UDAR.....	69
7. ZAKLJUČAK.....	80
LITERATURA	82
POPIS OZNAKA I KRATICA.....	86
SAŽETAK.....	88

1. UVOD

U modernoj proizvodnji svakim danom rastu zahtjevi za kvalitetom ulaznog materijala, procesa proizvodnje, procesa montaže, ali i u procesu održavanja. Kontrola s razaranjem materijala (Destructive Testing, DT) je nesumnjivo korisna, ali skupa i spora tehnika, pa se u novije vrijeme osiguranje kvalitete sve više okreće metodama kontrole i evaluacije bez razaranja materijala (NonDestructive Testing & Evaluation techniques, NDT & E). Metode kontrole bez razaranja materijala dopuštaju ispitivanje materijala ili komponenti na način koji ne narušava buduću korisnost i pouzdanost ispitanih dijelova. NDT & E metode moraju biti pouzdane, ekonomične, osjetljive, jednostavne za upotrebu i brze. Štoviše, novi materijali i procesi se neprestano razvijaju pa i tehnike inspekcije također moraju biti adaptivne. Primjerene i priznate metode ispitivanja bez razaranja su: vizualna metoda (VT), metoda penetranta (PT), magnetska metoda (MT), ultrazvučna metoda (UT), radiografska metoda (RT), vrtložne struje (ET), akustička emisija (AE), leak test (LT), mjerenje deformacija (ST) i infracrvena termografija (IT).

Kao rezultat ispitivanja objekta metodom bez razaranja javlja se indikacija greške (oštećenje) koja može biti lažna ili prava (istinita) indikacija. Lažna indikacija je uzrokovana greškom u samom postupku ispitivanja. Prava indikacija se klasificira kao relevantna ako je uzrokovana greškom ili irelevantna ako je uzrokovana nekim poznatim svojstvom objekta. Indikacija može ili ne mora biti greška. Greška je svaka neprihvatljiva indikacija u skladu s definiranim kriterijem prihvatljivosti, a smatra se otkrivenom ako su utvrđeni svi parametri koji su propisanom metodom trebali biti utvrđeni (npr. položaj, veličina, usmjerenost, učestalost i sl.). Lažna greška je indikacija koja ukazuje na postojanje greške, a nije uzrokovana greškom. Kritična greška je najmanja greška koja mora/može biti zabilježena.

Među različitim NDT & E tehnikama koje se danas koriste, Infracrvena termografija (IT) predstavlja atraktivan alat za bez kontaktne inspekcije kad god postoji toplinski kontrast između okoline (uzorka) i objekta od interesa uslijed trošenja, oštećenja ili greške (uz pretpostavku da je varijacija emisivnosti, refleksije iz okoliša i prigušenje atmosfere zanemarivo). Takav pristup je poznat pod nazivom pasivna termografija. Ako su okolina i objekt u toplinskoj ravnoteži, vanjskim izvorom stimulacije je moguće inducirati razliku u temperaturi; to je poznato kao aktivni pristup u infracrvenoj termografiji, slika 1.



Slika 1. Podjela IC termografije

Infracrvenom termografijom kao metodom bez razaranja, moguće je ispitivati različite skupine materijala: od metalnih izotropnih materijala do kompozitnih materijala iznimno anizotropne strukture. Najčešće greške kod metalnih materijala su greške uvjetovane taljenjem (plinski uključci, nemetalni uključci, šupljine skupljanja, hladne pukotine, tople pukotine, greške nepotpunog spajanja, mramorne šare), greške uvjetovanje tehnologijom proizvodnje (udubljenja, uzvišenja, ogrebotine, žljebovi, ljuščice, površinske pukotine, uključci pijeska, dvoslojnost, preklapanja, uvaljane okuine, radijalne pukotine, uzdužne pukotine, pukotine po opsegu, unutarnje pukotine zvjezdastog oblika, pahuljaste unutarnje pukotine, pukotine, šupljine, uključci u zavaru, pogreške vezivanja, pogreške oblika zavara) i greške uvjetovanje eksploatacijom (trošenje, inicijalna pukotina). Kompozitni materijali su najčešće izloženi delaminaciji, pucanju matrice, pucanju vlakana, izvlačenju vlakana, uključcima, prazninama, oštećenjima nastalim prilikom dinamičkog udara koji se mogao dogoditi uslijed proizvodnje ili tijekom eksploatacije [1].

Greške su obično nevidljive okom, ali mogu imati kobne posljedice na sposobnost struktura da na pravilan način obavljaju svoju namjenu. Kvalitetu je važno osiguravati i kontrolirati u svakom dijelu životnog ciklusa proizvoda. Otkrivanje grešaka u njihovom samom začetku će omogućiti pravovremenu reakciju. Upravo zato, potrebno je stalno unaprjeđenje metoda za kontrolu kvalitete bez razaranja.

U ovom radu dan je pregled relevantne dostupne literature iz područja ispitivanja bez razaranja metodama infracrvene termografije. Rad je podijeljen na četiri dijela. Uvodni dio u kojem su opisane teorijske osnove zračenja i karakteristike opreme koja se tradicionalno koristi pri pregledu metodama infracrvene termografije. U središnjem dijelu rada pregledane su metode koje se koriste pri obradi termograma. Metode obrade nakon mjerenja se

primjenjuju na snimljeni termogram ili sekvencu termograma. U ove metode je obično ugrađena jednadžba širenja topline kroz materijal. Sve metode počivaju na činjenici da su toplinska svojstva materijala koji se ispituje bitno drugačija od toplinskih svojstava oštećenja koje tražimo unutar ispitivanog materijala. Treći dio rada je koncentriran na geometrijske posebnosti; razmatra se utjecaj oblika uzorka na rezultate ispitivanja, utjecaj geometrije oštećenja te procjena dubine na kojoj se nalazi oštećenje. U posebnom poglavlju je razmatran utjecaj dinamičkog udara i primjena termografije u razvoju novih materijala za avioindustriju i autoindustriju.

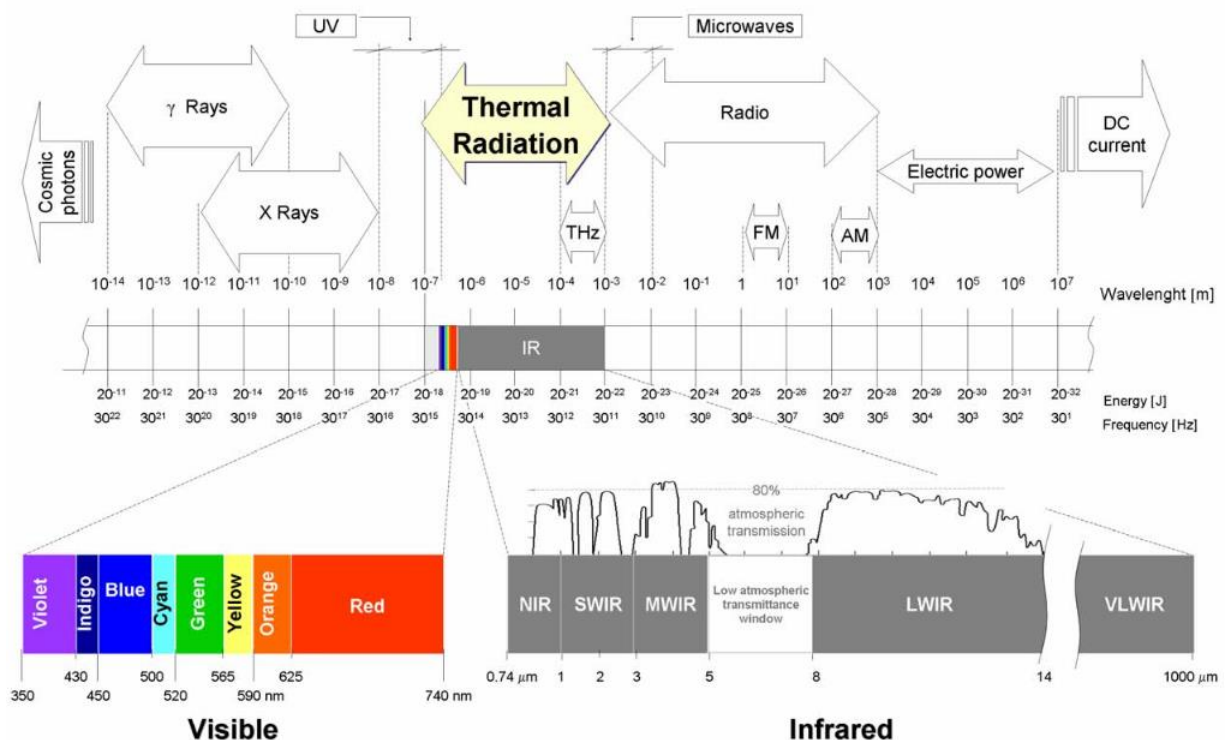
2. OSNOVE ZRAČENJA

2.1. ELEKTORMAGNETSKI SPEKTAR

Sva fizikalna tijela kontinuirano zrače elektromagnetske (EM) valove. Svako tijelo se sastoji od atoma. Tijelo na temperaturi različitoj od nule ($T \neq 0 K$), sadrži energiju zbog koje atomi titraju. Jezgre atoma nose električne naboje, pa tako pri titranju atoma dolazi zapravo do titranja električnih naboja. U točkama prostora oko električnog naboja uvijek postoji električno polje, a ako se električni naboj giba, onda postoji još i magnetsko polje. Time, električni naboj koji titra predstavlja izvor elektromagnetskog vala. Energija zračenja fotona valne duljine λ je opisana jednačbom [2]:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hf \quad (1)$$

gdje je $h = 6,6256 \times 10^{-34} Js$ Plankova konstanta, a $c = 2,9979 \times 10^8 m/s$ brzina svjetlosti. Odnos između frekvencije i valne duljine je dan jednačbom $f = \frac{c}{\lambda}$.



Slika 2. Podjela EM spektra [2].

Kad god postoji toplinska razlika (iznad 0 K) između dva objekta, zračenje će se razmjenjivati u obliku topline. Pojas toplinskog zračenja EM spektra pojavljuje se na valnim

duljinama između 0,1 i 1000 μm , slika 2. Termalni spektar može se podijeliti u tri spektralna pojasa: ultraljubičasti spektar (UV), vidljivi spektar i infracrveni spektar (IR).

Infracrveni dio spektra (0,74 - 1000 μm) može se dalje podijeliti u pet dijelova: bliže infracrveno zračenje (NIR, eng. Near Infrared) na valnim duljinama od 0,74 do 1 μm ; kratkovalno infracrveno zračenje (SWIR, eng. Short Wavelength Infrared) na valnim duljinama od 1 do 3 μm ; srednjevalno infracrveno zračenje (MWIR, eng. Medium Wavelength Infrared) na valnim duljinama od 3 do 5 μm ; dugovalno infracrveno zračenje (LWIR, eng. Long Wavelength Infrared) na valnim duljinama od 8 do 14; i vrlodugovalno infracrveno zračenje (VLWIR, eng. Very Long Wavelength Infrared) na valnim duljinama od 14 do 1000 μm . Iako je ova podjela proizvoljna i varira od jednog do drugog izvora, temelji se na 'prozorima' visoke atmosferske transmisivnosti, tj. intervala valnih duljina gdje atmosfera manje utječe na ulazno IR zračenje i na detektor spektralne osjetljivosti. Infracrveno zračenje je nevidljivo ljudskom oku, dakle energija emitirana u IR spektru se treba zabilježiti posebnom opremom (detektorima pogodnima za razmatrano IR područje) te prenijeti u vidljivi spektar, što je moguće specijaliziranom opremom [2].

2.2. TEORIJA TOPLINSKOG ZRAČENJA

2.2.1. ZRAČENJE CRNOG TIJELA

1860. Gustav Robert Kirchhoff (1824.-1887.) definirao je crno tijelo kao površinu koja niti reflektira niti transmitira upadno zračenje. Crno tijelo apsorbira ukupno zračenje neovisno o kutu upada ili valnoj duljini zračenja. Iz toga proizlazi da je crno tijelo i idealni emiter zračenja i nijedna površina ne može emitirati više zračenja od površine crnog tijela. Površina crnog tijela je ujedno i difuzni emiter, dakle emitirano zračenje je funkcija valne duljine i temperature, ali je neovisno o smjeru [3].

1900. Max Planck je jedinstvenim izrazom opisao spektralnu distribuciju intenziteta zračenja crnog tijela, danas poznatog pod nazivom Planckov zakon [4]:

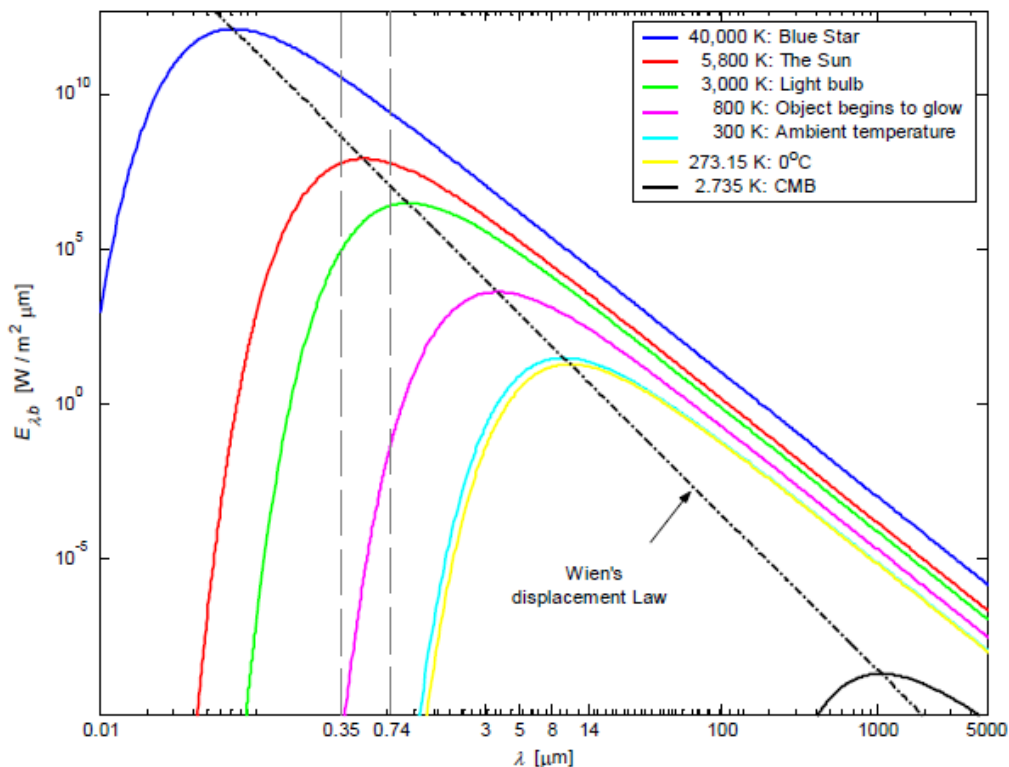
$$E_{\lambda,b} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \quad (2)$$

gdje je $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ prva radijacijska konstanta, a $C_2 = 1,4389 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m}/\text{K}$ druga radijacijska konstanta.

Na slici 3 je prikazana Planckova raspodjela zračenja za različite reprezentativne temperature: od Kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja (eng. Cosmic Microwave Background (CMB)¹) preko zračenja crnog tijela na 0 C (273,15 K), minimalne temperature pri

¹ CMB se uzima kao najbolji dokaz „Velikog praska“. CMB spektar je najpreciznije izmjereni spektar crnih tijela u prirodi, a temperatura mu iznosi oko 2.735 K, s maksimalnim intenzitetom zračenja u mikrovalnom dijelu spektra.

kojoj će objekt svijetliti i u vidljivom spektru (oko 800 K), Planckove raspodjele zračenja za temperaturu žarulje (oko 3000 K) i Sunčeve površine (oko 5800 K) do zračenja emitiranog s površine Plave zvijezde (eng. Blue Star²).



Slika 3. Planckova raspodjela zračenja za različite reprezentativne temperature [4]

1879. Josef Stefan (1835.-1893.) je eksperimentalno odredio izraz koji opisuje energiju emitiranu od površine u ovisnosti o temperaturi površine. Rezultate je teorijski 1884. potvrdio njegov učenik Ludwig Boltzmann te je taj izraz danas poznat kao Stefan-Boltzmannov zakon koji kaže da je ukupna emitirana energija integrirana po svim frekvencijama proporcionalna četvrtom kvadratu apsolutne temperature površine [3]:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

gdje je $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ Stefan-Boltzmannova konstanta. Jednadžbu (3) možemo dobiti integracijom Planckovog zakona (2) duž cijelog spektra ($0 < \lambda < \infty$).

Valna duljina na kojoj Planckova raspodjela ima maksimum (crna linija na slici 3) je dana preko Wienovog zakona. 1893. Wilhelm Wien je mjerio spektralnu raspodjelu za crna tijela pri različitim temperaturama. Wien je tada otkrio da je valna duljina na kojoj se nalazi tjeme krivulje proporcionalna temperaturi na kojoj se nalazi crno tijelo [3]:

$$\lambda_{max} T = C_3 \quad (4)$$

gdje je $C_3 = 2897.8 \text{ } \mu\text{m K}$ treća radijacijska konstanta.

² Plava zvijezda je najtoplija vrsta zvijezde, površinske temperature od oko 5 000 K.

Wienov zakon smješta radijacijsko tijelo u područje elektromagnetskog spektra, tj. Određuje mu „boju“. Valne duljine u vidljivom dijelu spektra su između 350 i 740 nm. Objekti počinju isijavati na temperaturama od oko 800 K, prvo u crvenom dijelu spektra pa zatim narančastom, žutom i tako dalje. Promjena boje označava prijelaz valnih duljina u EM spektru, odnosno promjenu temperature predmeta. Termografski instrumenti općenito mogu osjetiti zračenje tijela na temperaturi od 240 K pa na više [5, 6].

2.2.2. EMISIJA

Kirchhoff je definirao koeficijent emisije ε kao omjer toplinskog zračenja eminitranog od strane realnog tijela na danoj temperaturi u odnosu na toplinsko zračenje koje bi pri istim uvjetima zračilo crno tijelo [3]:

$$\varepsilon(\lambda, T_S) = \frac{E(\lambda, T_S)}{E_b(\lambda, T_S)} \quad (5)$$

Ova relacija predstavlja prosjek nad svim mogućim smjerovima zračenja i svim valnim duljinama zračenja. U kombinaciji s Planckovim zakonom, može se koristiti za izračun ukupne emisije površine.

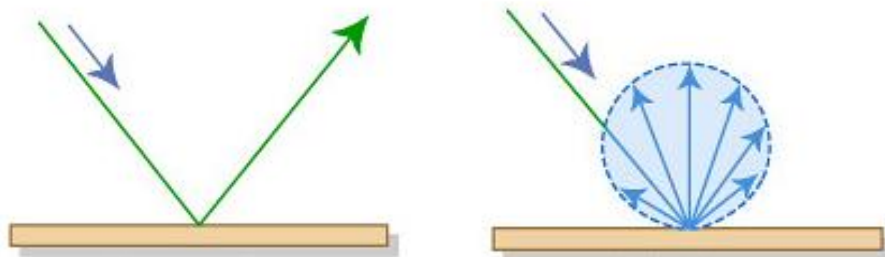
U teoriji se razlikuju četiri karakteristična tijela: crno tijelo ($\varepsilon(\lambda, T_S) = \varepsilon = 1$), sivo tijelo ($\varepsilon(\lambda, T_S) = \varepsilon < 1$), bijelo tijelo ($\varepsilon(\lambda, T_S) = \varepsilon = 0$) i realno tijelo ($\varepsilon = f(\lambda, T_S)$).

2.2.3. APSORPCIJA

Apsorpcija mjeri dio energije koji je površina upila. Dakle crno tijelo ima koeficijent apsorpcije $\alpha = 1$, a bijelo tijelo $\alpha = 0$. Za realne površine koeficijent apsorpcije je između 0 i 1. Za razliku od emisije, apsorpcija ovisi o valnoj duljini i smjeru zračenja, ali je gotovo neovisna o temperaturi površine. Prema Kirchhoffovom zakonu toplinskog zračenja emisija i apsorpcija elektromagnetskog zračenja nekog tijela jednake su na svim temperaturama, u svim uvjetima, na svim valnim duljinama, ako je tijelo u toplinskoj ravnoteži s okolinom.

2.2.4. REFLEKSIJA

Refleksija je omjer odbijenog zračenja u odnosu na ukupno upadno zračenje na površinu realnog tijela. Koeficijent refleksije ρ ovisi o smjeru upadnog zračenja, ali i o smjeru reflektiranog zračenja. U praksi se koristi prosječna veličina kako bi se olakšali izračuni. Ako je kut refleksije jednak kutu upada, kažemo da je površina odražavajuća (eng. specular). Ako površina reflektira zračenje u svim smjerovima kažemo da je difuzna (eng. diffuse), slika 4.



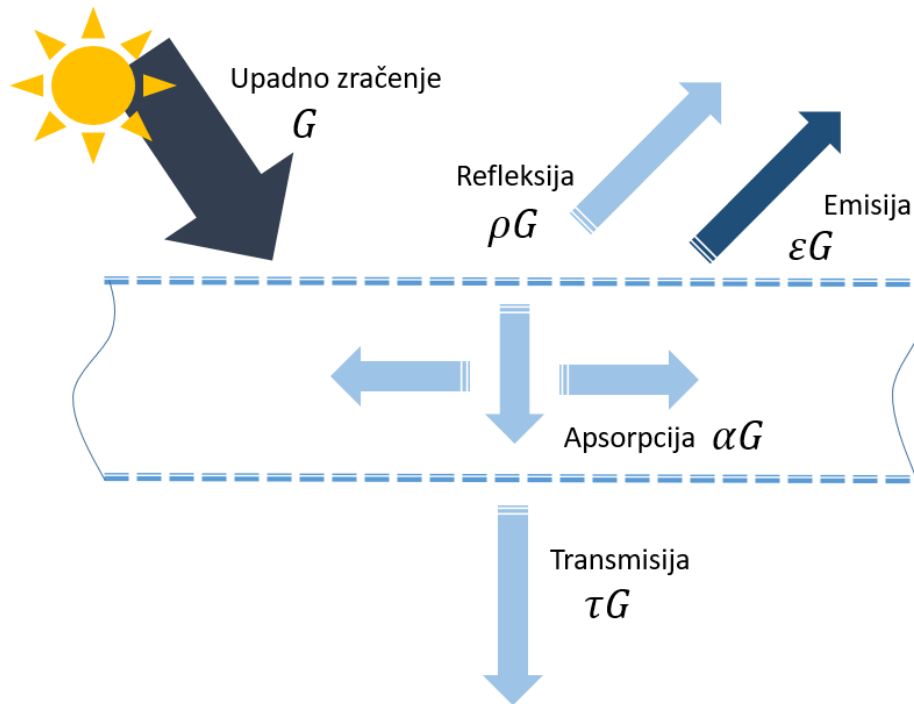
Slika 4. Refleksija o: a) odražavajuću, b) difuznu površinu

2.2.5. TRANSMISIJA

Transmisivnost τ je definirana kao omjer transmitiranog zračenja nakon prolaza kroz medij (atmosfera, magla, smog) u odnosu na količinu zračenja koje bi prošlo kroz vakuum pri istim uvjetima. Transmisivnost ima veliku ulogu kod odabira spektralnog pojasa u kojem će se izvoditi infracrvena mjerenja.

2.2.6. ENERGETSKA BILANCA

U aktivnoj termografiji, realna površina od interesa je pobuđena vanjskom pobudom te je tako površina izbačena iz ravnoteže. Dio upadnog zračenja se reflektira i taj dio zračenja je većinom uhvaćen IC kamerom, dio upadnog zračenja je apsorbiran, a dio transmitiran, slika 5. S druge strane, IC kamera snima reflektirano zračenje površine koje je posljedica vanjske pobude, ali i reflektirano zračenje koje dolazi od okolnih predmeta.



Slika 5. Energetska bilanca

Dakle, dio upadnog zračenja je apsorbiran (αG), dio reflektiran (ρG) i dio transmitiran (τG). Temeljem zakona o očuvanju energije slijedi [3]:

$$G = \alpha G + \rho G + \tau G, \quad (6)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (7)$$

Za netransparentne materijale $\tau = 0$, pa slijedi:

$$\varepsilon = (1 - \rho). \quad (8)$$

Prema Kirchhoffovom zakonu, kada je crno tijelo u ravnotežnom stanju, ukupna energija koju je tijelo apsorbiralo je jednaka energiji koju tijelo emitira:

$$\varepsilon = \alpha. \quad (9)$$

Ipak, ova relacija se može upotrijebiti i za realna tijela ako je površina difuzna. Kako bi se povećala emisivnost površine, česta praksa je bojanje površina premazima visoke emisivnosti. Ova praksa rješava problem neujednačene emisivnosti površine te smanjuje utjecaj refleksije predmeta iz okoline.

3. OPREMA

Oprema za infracrvenu termografiju je uobičajeno napravljena tako da mjeri u dva visoko transmisivna atmosferska prozora: LWIR ($8 - 14 \mu m$) i MWIR ($3 - 5 \mu m$). Iz Wienovog zakona (4) je vidljivo da objekti na visokoj temperaturi imaju maksimalnu energiju emisije na malim valnim duljinama, dok objekti na sobnoj temperaturi imaju maksimalnu energiju emisije na većim valnim duljinama. Srednjevalna IR oprema je bolji odabir za snimanje predmeta na povišenim temperaturama, dok je dugovalna IR oprema bolji izbor za snimanje predmeta na sobnoj temperaturi. Neki od važnih kriterija koje treba razmotriti prije odabira valnog spektra su: udaljenost objekta od kamere, vanjska ili unutarnja mjerenja, temperatura i emisivnost objekta od interesa i slično. Neke preporuke su da se dugovalne kamere uglavnom koriste za vanjska mjerenja jer na njihova mjerenja manje utječe sunčevo zračenje i takve kamere se najčešće koriste za industrijsku primjenu. Dugovalne kamere uobičajeno rade na sobnoj temperaturi, a kao detektori u dugovalnim kamerama se uobičajeno koriste mikrobolometri ili Merkur kadmij telurij (MCT) detektori. Srednjevalne kamere zahtijevaju hlađenje. Kriogene temperature se uobičajeno postižu Stirlingovim višestupanjskim motorom. Hlađenje na $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ pruža odličnu toplinsku razlučivost, ali ponekad je potrebno uložiti napor u održavanje vanjskih uvjeta približno konstantnima. Srednjevalne kamere imaju prednost pri laboratorijskim mjerenjima zbog veće brzine akvizicije podataka i generalno boljih svojstava [7].

3.1. DETEKTORI

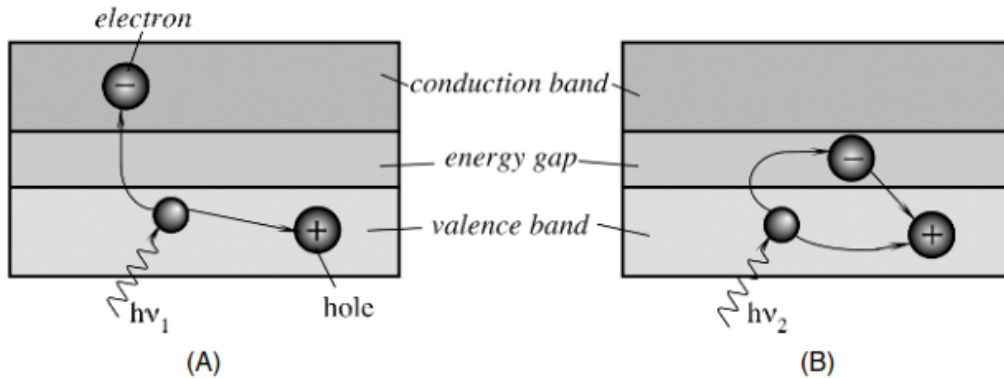
Infracrveni detektor je senzor koji pretvara upadno zračenje u neki mjerljivi oblik, uobičajeno električni napon. Detektori elektromagnetskog zračenja u spektralnom rasponu od ultraljubičastog do dalekog infracrvenog zračenja nazivaju se svjetlosni detektori. Apsorpcija fotona u osjetilniku može imati fotonski ili toplinski odgovor, i upravo su zato svi svjetlosni detektori su podijeljeni u dvije velike grupe: fotonski i toplinski detektori. Fotonski detektori rade u području od ultraljubičastog zračenja do srednje-infracrvenog zračenja, dok su toplinski detektori najkorisniji u srednje-infracrvenom i daleko-infracrvenom spektru gdje je njihova iskoristivost pri sobnoj temperaturi veća od iskoristivosti fotonskih detektora [5]. Fotonski detektori rade na principu foto efekta kojeg je otkrio A. Einstein i zbog kojeg je osvojio Nobelovu nagradu. Einstein je 1905. pretpostavio da je energija svjetlosti pohranjena u fotonima, a energija jednog fotona jednaka je [8]:

$$E = h * \nu \quad (10)$$

gdje je ν frekvencija svjetlosti, a h je Planckova konstanta i iznosi: $h = 6.626075 \times 10^{-34} \text{ J} = 4.13567 \times 10^{-15} \text{ eVs}$. Kada foton udari o površinu vodiča, može i ne mora doći do oslobađanja elektrona. Dio (φ) energije fotona E se iskoristi za odvajanje elektrona od površine, a drugi dio energije se pretvori u kinetičku energiju elektrona. Temeljem ovog se fotoelektrični efekt može zapisati kao:

$$h * \nu = \phi + K_m \quad (11)$$

gdje je ϕ radna funkcija (eng. work function) emitirajuće površine, a K_m je najveća kinetička energija kojom elektron uzbuđuje površinu. Sličan proces se odvija i kada se p-n poluvodič izloži energiji zračenja: foton prenosi svoju energiju elektronu, i ako je ta energija dovoljno velika, elektron može postati pokretljiv, a to rezultira pojavom električnog potencijala.



Slika 6. Foto efekt u poluvodiču za fotone (A) visoke energije (eng. high-energy) i (B) niske energije (eng. low-energy) [8]

Kod materijala s pravilnom kristalnom rešetkom postoje utvrđeni energijski pojasevi. Energija bilo kojeg elektrona čistog materijala mora odgovarati energiji nekog od energijskih pojaseva, koji su međusobno razmaknuti šupljinama veličine zabranjenih (nemogućih) energija. Ako svjetlo određene valne duljine (fotoni visoke energije) udari u kristal poluvodiča (slika 6), koncentracija nositelja naboja (elektroni i šupljine) u kristalu naraste, što se očituje u većoj vodljivosti kristala [8]:

$$\sigma = e(\mu_e n + \mu_h p), \quad (12)$$

pri čemu je σ vodljivost kristala, e naboj elektrona, μ_e pokretljivost elektrona, μ_h pokretljivost šupljina, a n i p su koncentracije elektrona i šupljina.

Na slici 6 su prikazani energijski pojasevi poluvodiča gdje je E_g magnituda pojasa zabranjenih energija u elektron voltima (eV). Donji pojas se naziva valentni pojas (eng. valence band) i odgovara položaju elektrona vezanim u kristalnoj rešetki. U slučaju kada je taj poluvodič silicij ili germanij, valentni pojas je dio kovalentne veze među atomima kristala. Gornji pojas se naziva provodljivi pojas (eng. conduction band) i u njemu se nalaze slobodni elektroni (oni koji se mogu slobodno micati unutar kristala). Elektroni koji se nalaze u ovom pojasu doprinose električnoj vodljivosti materijala. Ova dva pojasa su razdvojena pojasom zabranjenih energija, a veličina tog pojasa određuje podjelu materijala na poluvodiče i izolatore. Broj elektrona u kristalu je upravo toliki da popuni sva mjesta u valentnom pojasu. Bez vanjske pobude, i poluvodiči i izolatori imaju konfiguraciju u kojoj je valentni pojas potpuno popunjen elektronima, a provodljivi pojas potpuno prazan. Pri ovakvim uvjetima, ni poluvodič ni izolator nemaju nikakvu eklektičnu vodljivost. U metalima, pojas najviše energije nije potpuno pun. Upravo se zato elektroni mogu lako pomicati kroz materijal uz malu energiju pobude. Upravo

zato metali uvijek imaju visoku električnu provodljivost. U izolatorima i vodičima materijalu se prvo treba dovesti energija koja je potrebna da elektroni prijeđu pojas nemogućih energija i dosegnu provodljivi pojas. Nemoguća energija kod izolatora je obično reda veličine 5 eV i veća, dok je kod poluvodiča širina tog pojasa nešto manja (tablica 1). Što je veća valna duljina svjetlosti (manja frekvencija fotona), potrebno je manje energije za započeti ovaj foto efekt.

Kada foton frekvencije ν_1 udari kristal, njegova energija je dovoljno velika da izbaci elektron s njegovog položaja u valentnom pojasu i gurne ga u provodljivi pojas (slika 6.a). U tom pojasu elektron postaje nositelj struje. Nedostatak elektrona u valentnom pojasu sada stvara šupljinu, koja također postaje nositelj struje. Rezultat ovog procesa je smanjenje specifičnog otpora materijala. Kada foton frekvencije ν_2 , koji nema dovoljno energije da bi elektron izbacio iz valentnog pojasa, udari kristal, dolazi do oslobađanja energije, i pri tome ne nastaju novi nositelji struje (slika 6.b). Pojas zabranjene energije služi kao granica ispod koje materijal nije osjetljiv na svjetlost [8].

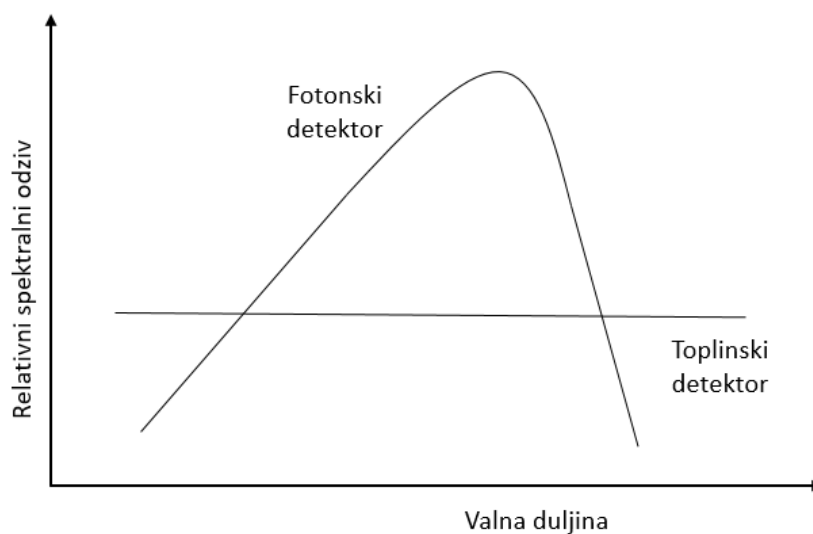
Tablica 1. Veličina pojasa nemogućih energija i najvećih valnih duljina za različite poluvodiče [8]

Material	Band Gap (eV)	Longest Wavelength (μm)
ZnS	3.6	0.345
CdS	2.41	0.52
CdSe	1.8	0.69
CdTe	1.5	0.83
Si	1.12	1.10
Ge	0.67	1.85
PbS	0.37	3.35
InAs	0.35	3.54
Te	0.33	3.75
PbTe	0.3	4.13
PbSe	0.27	4.58
InSb	0.18	6.90

Kvantni detektore pri sobnoj temperaturi se koriste za mjerenja u objektima koji emitiraju fotone energije 2 eV ili više. Međutim, ako je energija fotona manja od 2 eV (kao kod fotona svjetlosti većih valnih duljina), treba koristiti detektore čiji poluvodiči imaju užu pojas zabranjenih energija. Kod tih detektora je razina šuma u signalu pri sobnoj temperaturi čak i veća od signala koji se želi mjeriti pa je te detektore potrebno hladiti. Ovisno o potrebnoj osjetljivosti i korištenim valnim duljinama svjetlosti, uobičajeno se u detektorima koriste kristali sljedećih spojeva: olovov sulfid (PbS), indijev arsenid (InAs), indijev antimonid (InSb), germanij (G), olovov selenid (PbSe) i živa-kadmij-telurid (HgCdTe) [8]. Hlađenjem se povećava osjetljivost detektora, a radno područje se pomiče prema većim valnim duljinama. Hlađenjem se obično postižu kriogene temperature, a detektori se obično hlade tekućim dušikom, tekućim helijem, Stirlingovim hladilom ili Peltierovim efektom. U starijim uređajima je detektorski element morao skenirati malo po malo vidno polje. U novim uređajima fotonski

detektori su poredani u matricu te u istom vremenu integriraju signal duž cijelog vidnog polja. Takvi detektori se nazivaju FPA detektori (eng. Focal-plane array). Rezolucija detektora za komercijalne potrebe je uobičajeno 160x 160, 320x256, 640x512 dok u vojnoj industriji i svemirskoj tehnologiji ovakvi detektori mogu imati razlučivost i do 2048x2048 piksela.

Kod toplinskih detektora se upadno zračenje apsorbira u materijali i pri tome mijenja njegovu temperaturu što rezultira promjenom fizikalnih svojstava tog materijala, a to se koristi za generiranje izlaznog eklektičnog signala. Ovako dobiveni signal ne ovisi o fotonskoj prirodi upadnog zračenja, već samo o snazi upadnog zračenja ili brzini promjene upadnog zračenja, te su zbog toga toplinski efekti neovisni o valnoj duljini zračenja (slika 7). Tri su osnovne vrste toplinskih detektora pronašle svoju primjenu u IC termografiji, i to su bolometri, piroelektrični i termoelektrični detektori, ali oni se neće detaljno razmatrati u ovom radu [9].



Slika 7. Relativni spektralni odziv fotonskog i toplinskog detektora

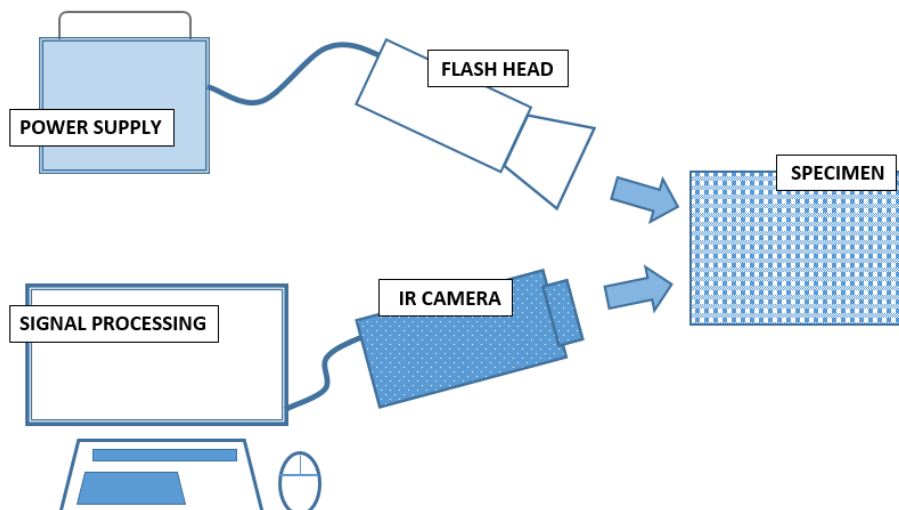
3.2. VANJSKA POBUDA

Za polubeskonačni neoštećeni uzorak, promjenu temperature na površini kao odgovor na trenutni toplinski tok možemo izračunati [10]:

$$T_{Surf}(t) - T_{Surf}(0) = \frac{Q}{\kappa \rho c \sqrt{\pi t}} \quad (13)$$

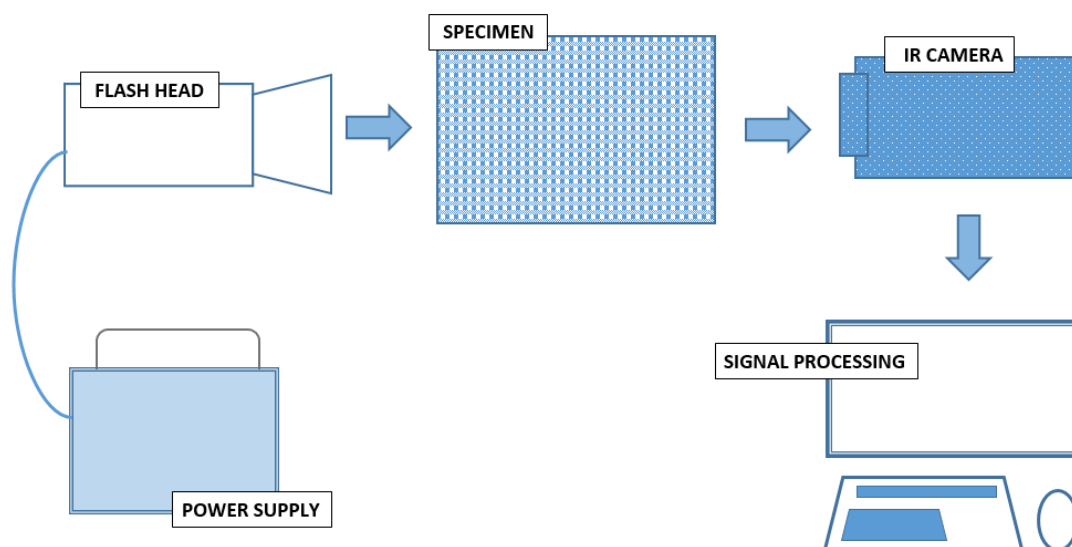
gdje je Q unesena energija po jedinici površine, κ toplinska provodljivost (engl. Thermal conductivity), ρ gustoća i c specifična toplota uzorka.

Česta je podjela termografije na refleksijsku termografiju i tranzijentnu termografiju. Kod refleksijske termografije vanjska pobuda i infracrvena kamera se nalaze s iste strane objekta, dakle kamera snima reflektirani val o površinu objekta (slika 8).



Slika 8. Eksperimentalni postav za refleksijsku termografiju

Kod tranzijentne termografije vanjska pobuda nalazi s jedne, a infracrvena kamera s druge strane objekta, dakle kamera snima tranzijentni val nakon prolaza kroz objekt (slika 9).



Slika 9. Eksperimentalni postav za tranzijentnu termografiju

3.3. ZAPIS TERMOGRAMA

Termogram se uobičajeno prezentira kao 2D mapa čiji elementi daju intenzitet mjerene veličine (npr. temperaturu, amplitudu, fazu i slično) a duž x i y osi su koordinate piksela koje odgovaraju koordinatama pojedinog detektora na FPA detektoru.

Više termograma u nizu predstavlja sekvencu termograma i prezentirani su kao 3D matrica u kojoj treća os uobičajeno predstavlja vrijeme.

Čest je i 2D zapis u kojem se uobičajeno zapisuju temperature mjerene na 1 pikselu (detektoru) u nekom vremenskom intervalu. Ovaj zapis predstavlja krivulju hlađenja promatranog piksela. Iz ovog zapisa je moguće izvući vrijedne informacije kao što je dubina greške ili debljina materijala.

3.4. DEGRADACIJA SIGNALA

Elektromagnetsko zračenje u infracrvenom spektru je po prirodi slabo, u usporedbi s X zrakama. Općenito postoje tri vrste degradacije signala: radiometrijsko izobličenje, geometrijsko izobličenje i šum. Šum se definira kao nedeterministički element koji kviri mjerni signal. Po svojoj prirodi, šum nema predvidljivo vremensko ponašanje, a definiran je statističkim parametrima poput standardne devijacije. Iako i po prirodi slab, IC signal se nalazi pod utjecajem brojnih dodatnih izvora kao što su parazitska emisija, toplinska refleksija i nasumični dolazak fotona, koji doprinose daljnjoj degradaciji signala [10, 11].

Elektronički šum koji potječe od detektora može biti iz tri izvora:

- zrnati šum (eng. shot noise) – uzrokovan slučajnom varijacijom upadnog zračenja,
- toplinski šum (eng. Johnson noise) – uzrokovan slučajnim kretanjem elektrona u vodičima i otpornicima (može se smanjiti hlađenjem detektora),
- šum treperenja (eng. flicker noise) - $1/f$ šum, šum koji ovisi o frekvenciji promatranja, njegov izvor nije u potpunosti razjašnjen, a skriva se u efektima kao što su kolebanja u broju nosioca naboja i njihovoj gibljivosti i dr. Obično se ovisnost šuma i frekvencije promatranja može napisati kao: $1/f^n$ gdje je n obično između 0,9 i 1,35.

Šum osim elektroničkog može biti:

- optički šum – nastaje iz slučajnih kolebanja upadnog zračenja,
- šum od zagrijavanja – zbog nejednolike toplinske pobude (zagrijavanja) i prividnog zagrijavanja uzrokovanog refleksijama,
- šum okoliša – elektromagnetske smetnje uzrokovane blizinom visokonaponskih vodova ili drugih izvora zračenja,
- strukturni šum – slučajne promjene toplinskih i fizikalnih svojstava materijala.

3.4.1. FIXED PATTERN NOISE

Fixed pattern noise (FPN) je posljedica nejednolikog odgovora detektora na upadno zračenje. To je čest problem kod kamera s FPA detektorima. FPN za određenu konfiguraciju

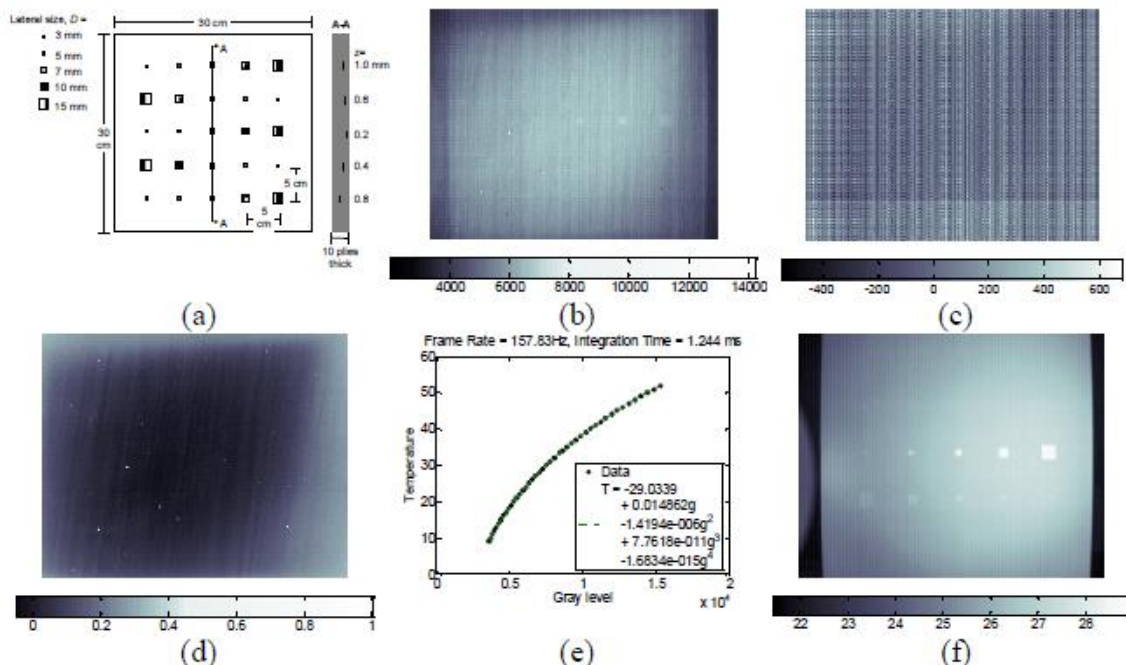
kamere se može odrediti iz termograma crnog tijela. Taj termogram se kasnije oduzme iz svih termograma snimljene sekvence (slika 10) [12].

3.4.2. BADPIXELS

Badpixel je definiran kao piksel s anomalijom u ponašanju u odnosu na preostale piksele u matrici detektora. Takav piksel je npr. mrtvi piksel (eng. dead pixel) koji na termogramu ostaje prikazan crnom bojom (hladni piksel) ili bijelom bojom (vrući piksel). Badpixel ne daju korisne informacije te pridonose degradaciji termograma. Mapa badpixela je uglavnom poznata i dana od proizvođača, međutim može se i ručno otkriti pa se intenzitet na mjestu badpixela zamjeni aritmetičkom sredinom intenziteta susjednih piksela (slika 10) [12].

3.4.3. VIGNETING

Vigneting se na termogramu može prepoznati kao zatamnjenje rubova slike u odnosu na sredinu slike, a posljedica je vremenski ograničenog izlaganja detektora upadnom zračenju. Intenzitet Vignetinga ovisi o lokaciji piksela i temperaturnoj razlici objekta od interesa i okoline (slika 10) [12].



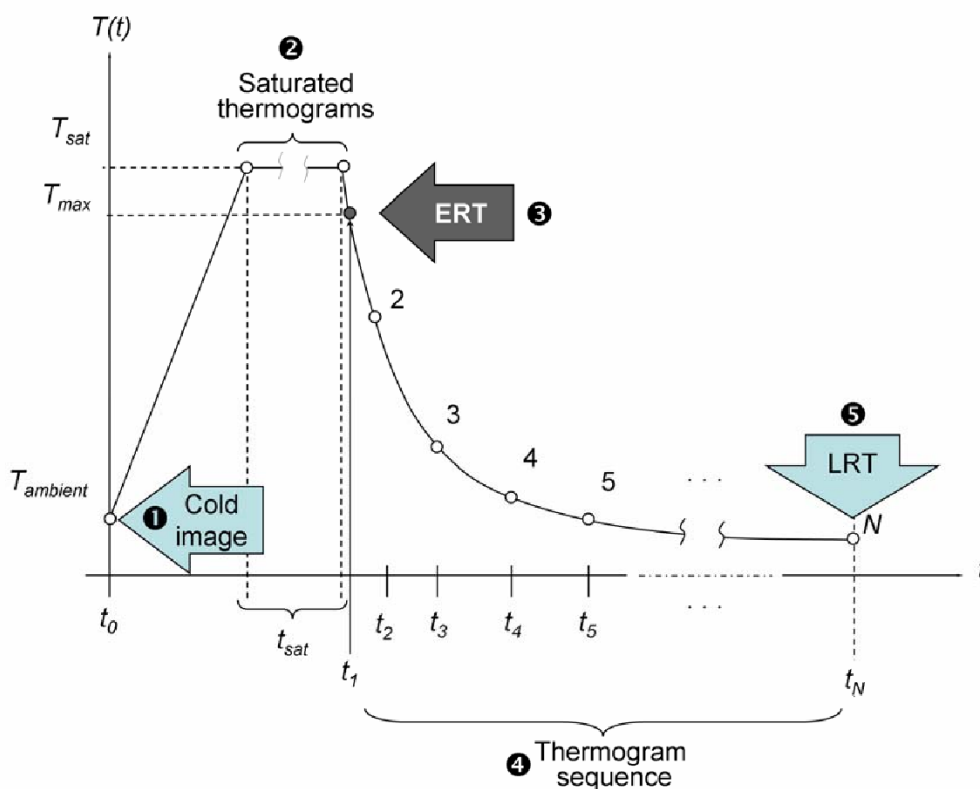
Slika 10. (a) CFRP uzorak s 25 Teflon umetaka različitih promjera na različitim dubinama; (b) termogram snimljen 209 ms nakon toplinskog impulsa; (c) FPN; (d) Termogram s badpixels i vinjetama; (e) kalibracijska krivulja temperature; (f) korigirani termogram iz (b) za FPN, badpixels, vinjete i ispravno kalibriran [14].

3.4.4. KALIBRACIJA TEMPERATURE

Kako bi se signal dobiven s detektora preračunao u odgovarajuću temperaturu potrebno je koristiti transformacijsku funkciju. Transformacijska funkcija se dobije tako da se kamera postavi pred više crnih tijela poznate temperature, a iz usrednjenih vrijednosti se polinomom opisuje kalibracijska krivulja (slika 10) [12].

4. OBRADA SIGNALA NAKON MJERENJA

Rezultat mjerenja je niz termograma. Broj termograma u nizu ovisi o vremenu akvizicije (trajanju snimanja) i učestalosti uzorkovanja (frekvenciji uzorkovanja). Kompletan slijed termograma sastoji se od 4 različita vremenska intervala, slika 11. U prvom vremenskom intervalu, prije nego što toplina dosegne površinu uzorka, snima se tzv. hladna slika (eng. cold image). Hladna slika se može koristiti za uklanjanje ili barem smanjenje utjecaja okoline. U drugom vremenskom intervalu, tijekom i nedugo nakon primjene toplinskog pulsa, termogrami su zasićeni, tj. očitavanje je izvan kalibracijske skale i nije moguće izmjeriti točnu temperaturu na površini uzorka. Broj zasićenih termograma ovisi o učestalosti uzorkovanja i toplinskim svojstvima materijala koji se pregledava: materijali niske provodljivosti ostaju zasićeniji duže od materijala s visokom vodljivošću, a više termograma, zasićenih ili ne, bilježit će se s visokim stopama uzorkovanja. Zasićeni termogrami ne daju vrijedne podatke i stoga se mogu sigurno odbaciti iz faze obrade. Treći vremenski interval počinje s rano zabilježenim termogramom (eng. early recorded thermal image; ERT) i završava kasno zabilježenim termogramom (eng. late recorded thermal image; LRT) i sadrži korisne izmjerene informacije. Posljednji zabilježeni termogram je onaj na kojem nema temperaturne razlike između neoštećene površine i površine oštećenog područja. Nakon kasno zabilježenog termograma, kasnije snimljene slike nemaju vrijedne podatke i mogu se odbaciti. Zadržani dio termografske sekvence obrađuje se različitim matematičkim transformacijama [13]. Zajednička svrha naknadne obrade je poboljšati otkrivanje oštećenja, rubova, ojačanja unutar strukture ili slično. Najčešće korištene metode su opisane u nastavku.



Slika 11. Termografska sekvenca [13]

4.1. TEMPERATURNI KONTRAST

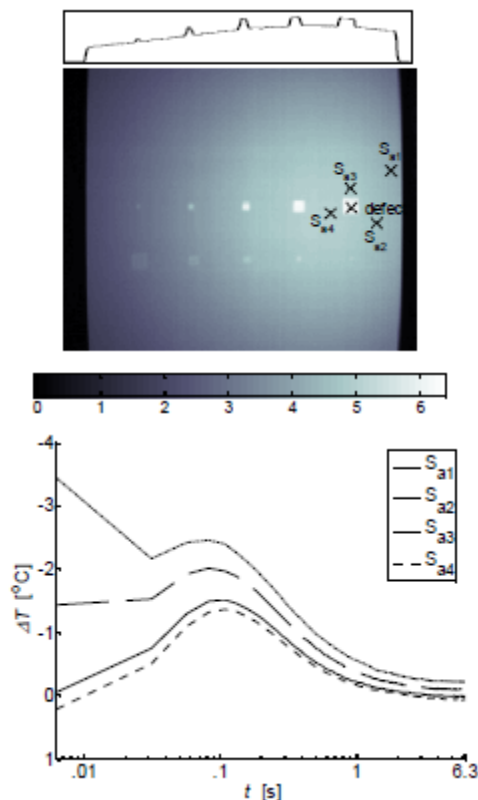
Tehnika temperaturnog kontrasta (eng. Thermal Contrast) je vrlo vjerojatno najraširenija metoda obrade termografskih podataka. Postoji nekoliko relacija koje povezuju razvoj temperature nad neoštećenim i oštećenim područjem, ali sve imaju zajedničku ograničavajuću činjenicu – potrebno je unaprijed znati gdje se nalazi neoštećeno područje. Temperaturni kontrast je definiran kao [13].

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{S_a}(t) \quad (13)$$

pri čemu je $T(t)$ temperatura u trenutku t , $T_d(t)$ je temperatura piksela d (koji može biti oštećen ili ne; temperatura može biti i usrednjena vrijednost grupe piksela), a $T_{S_a}(t)$ je temperatura neoštećenog područja u trenutku t . Ako ne postoji temperaturni kontrast, tj. $\Delta T(t) = 0$, u tom trenutku nije moguće odrediti oštećen piksel.

Amplituda temperaturnog kontrasta ovisi o dubini i debljini oštećenja, promjeru oštećenja, o toplinskim svojstvima neoštećenog materijala i oštećenja, ali i o količini energije pobude.

Glavni nedostatak metode je potreba određivanja zdravog (neoštećenog, S_a) područja. Čak kada je i neoštećeno područje dobro određeno ili unaprijed znano, promjena lokacije neoštećenog područja ima velik utjecaj na rezultate. Na slici 12 su prikazani profili temperaturnog kontrasta za 4 različito odabrana neoštećena piksela ($S_{a_1}, S_{a_2}, S_{a_3}, S_{a_4}$) koji se nalaze u okolini oštećenog piksela (*defect*). Korišteni podatci su nastali mjerenjem na polimernom uzorku ojačanom karbonskim vlaknima (eng. Carbon fiber reinforced polymer; CFRP) uzorku koji je namjerno oštećen umetcima od teflona. Umetci su različitih veličina, i umetnuti su na različite dubine unutar uzorka. Kao što se i vidi na slici, postoje značajne varijacije u temperaturnom kontrastu, ovisno o odabranom neoštećenom pikselu. Neoštećeni pikseli su relativno blizu jedan drugome i ovo je očiti znak nejednolikog zagrijavanja. Na slici 12 vidimo i toplinski profil u odabranom trenutku duž cijelog uzorka. Jasan je utjecaj nejednolikog zagrijavanja, budući da desna strana uzorka ima za oko 3 °C višu temperaturu od lijeve strane [14].



Slika 12. Utjecaj odabira zdravog područja pri računanju temperaturnog kontrasta [14]

I drugi autori su objašnjavali utjecaj odabranog ne oštećenog područja na krajnje rezultate. Čest kriterij pri odabiru boljeg izbora neoštećenog područja je bio omjer signala prema šumu [15].

Problem određivanja neoštećenog područja postaje tim veći ukoliko se želi postići automatizirana obrada signala. Taj problem je u svom istraživanju riješio M. Shepard, kao što je opisano u nastavku.

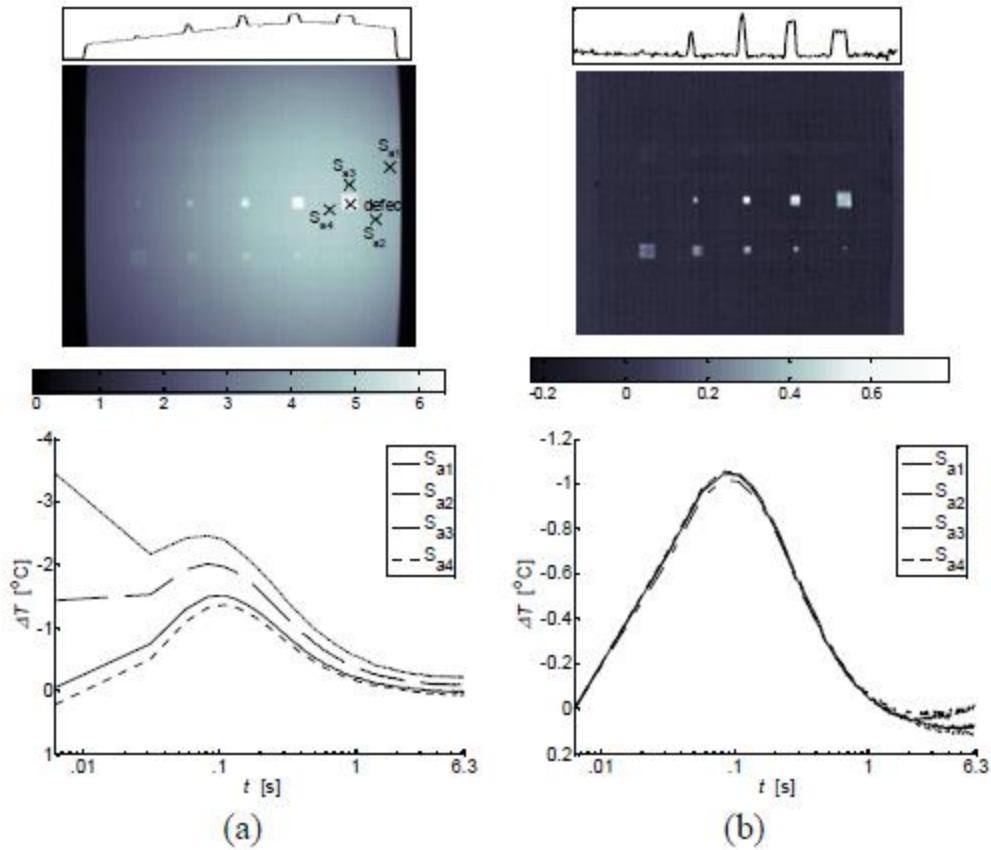
4.2. DIFERENCIJALNI APSOLUTNI KONTRAST, DAC

Problem određivanja neoštećenog područja na termalnim slikama je riješen upotrebom diferencijalnog apsolutnog kontrasta (eng. Differential Absolute Contrast; DAC). M. Shepard je predložio da se umjesto traženja neoštećenog područja svako područje smatra neoštećenim na prvih nekoliko termograma. Dakle, svaki piksel termograma se do trenutka t' ponaša kao neoštećeni piksel. Sada je potrebno za svaku sekvencu odrediti vrijeme t' koje odgovara vremenskom intervalu od trenutka kada je vanjska pobuda došla do uzorka pa sve do trenutka kada se na termogramu može primijetiti prvi oštećen piksel. Dakle, u trenutku t' se na termogramu još uvijek nema indikacije o oštećenom pikselu. Za taj vremenski interval vrijedi da je temperatura neoštećenog piksela jednaka temperaturi oštećenog piksela [16]:

$$T_{S_a}(t') = T_d(t') = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t'}}. \quad (14)$$

Ukoliko se uvrsti (14) u izraz za temperaturni kontrast (13) slijedi:

$$\Delta T_{DAC} = T_d(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t'). \quad (15)$$



Slika 13. Razvoj temperature duž termograma u trenutku $t=209$ ms i krivulje temperaturnog kontrasta: a) klasična metoda odabira neoštećenog područja, b) DAC rezultati [15].

Stvarna mjerenja u manjoj mjeri odstupanju od teorijskoj rješenja, uglavnom u kasnijim vremenima i ako je uzorak prilično tanak u usporedbi s teorijskom polubeskonačnom pločom. Ipak, DAC je iznimno koristan i često korišten budući da vrlo efikasno rješava problem nejednolikog zagrijavanja ili razlika u stanju površine uzorka [16-19].

4.3. MODIFICIRANI DAC

Originalna DAC tehnika predložena od autora M. Sheparda je imala veća odstupanja u kasnijim vremenima pa su autori C. Ibarra Castanedo et al. [19] predložili modificiranu verziju koja bi bolje opisivala temperaturni kontrast i u kasnijim vremenima. U model je uvedena

konačna debljina ploče (uzorka) za razliku od Shepadovog modela koji je vrijedio za polubeskonačnu ploču.

Modificirana verzija DACa je razvijena na teoriji kvadropola (eng. quadrupoles theory) i rješava najveći nedostatak DACa – preveliko odstupanje rezultata u kasnijim vremenima. Glavna hipoteza je da je uzorak konačne debljine, a da je vanjska pobuda u obliku delta Dirac funkcije. Derivacija rješenja je napravljena preko Laplaceove transformacije uz temperaturu definiranu kao $T(z, t)$ i toplinski tok kao $\Phi(z, t)$, a njihova Laplaceova transformacije je $\Theta(z, t)$, odnosno $\Phi(z, t)$. Rješenje problema je dano u obliku [18, 19]:

$$\begin{pmatrix} \theta_i \\ \Phi_i \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} \theta_o \\ \Phi_o \end{pmatrix}, \quad \text{gdje je } M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\text{pri čemu je } A = D = \cosh(p^*L), \quad C = kp^* \sinh(p^*L), \quad B = \sinh(p^*L) / (kp^*), \quad (17)$$

$$p^* = \sqrt{p/\alpha} \quad (18)$$

gdje je i ulazna varijabla, a o izlazna varijabla.

U slučaju da su postignuti adijabatski uvjeti i da nema razmjene topline s okolinom sa stražnje strane uzorka (ploče) vrijedi: $\Phi_i = Q$ i $\Phi_o = 0$, Laplaceova temperatura je:

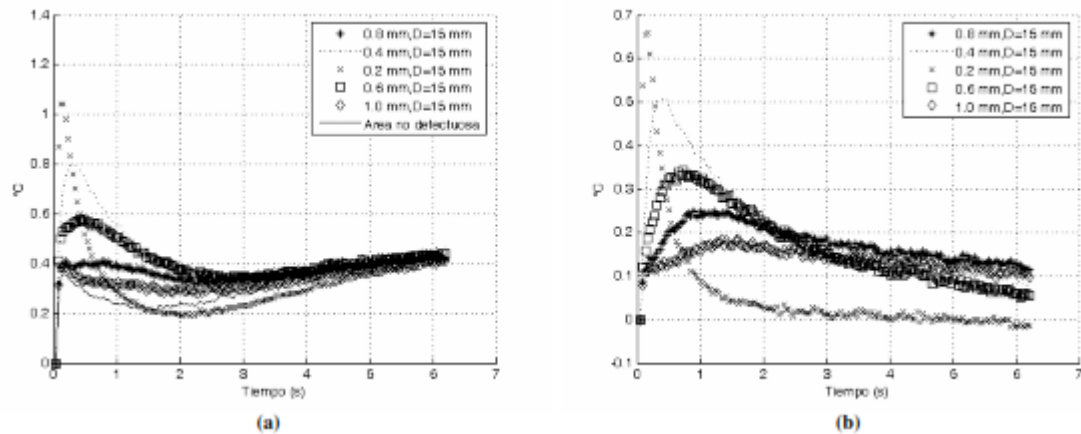
$$\theta_i = \frac{QA}{C} = \frac{Q \coth \sqrt{pL^2}}{b\sqrt{p}}. \quad (19)$$

Nakon inverzne Laplaceove transformacije, rješenje se može zapisati zapisati kao:

$$\Delta T_{DAC,mod} = T_d(t) - \frac{\mathcal{L}^{-1} \left[\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_t}{\mathcal{L}^{-1} \left[\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}} \right]_{t'}} \cdot T(t') \quad (20)$$

gdje je L debljina konačno debele ploče, a p Laplaceova varijabla.

Rješenje za ploču debljine L ne ovisi o unesenoj energiji u uzorak. To modificirani DAC čini točnim i u kasnijim vremenima. Na slici 14 vide se krivulje temperaturnog kontrasta za 5 različitih piksela (područja). Odabrani pikseli su upravo oni koji se nalaze nad oštećenim područjima, a međusobno se razlikuju po dubini i geometriji umetnutog oštećenja. Na slici 14.a su prikazani rezultati standardne DAC metode, a na slici 14.b su prikazani rezultati modificirane DAC metode. Na slici 14.b. se vidi korekcija temperaturnih profila u kasnijim vremenima.



Slika 14. Temperaturni kontrast za 5 različitih piksela [19]

Ova teorija je kasnije proširena i implementirana i za ploču konačne debljine u kojoj postoji tok topline sa stražnje plohe na okolinu [20].

4.4. REKONSTRUKCIJA TERMOGRAFSKOG SIGNALA

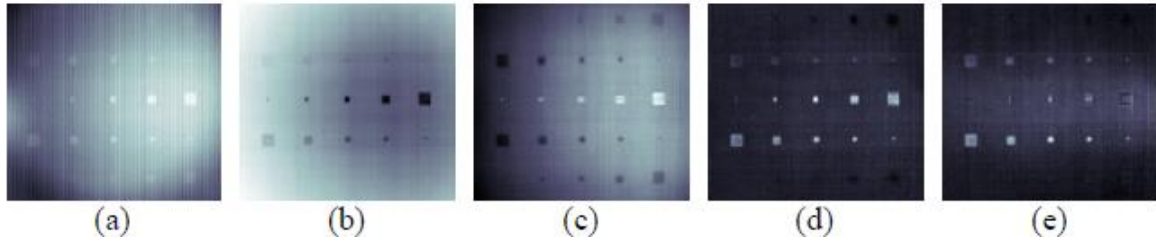
U 2001. rekonstrukcija termografskog signala (eng. Thermographic Signal Reconstruction, TSR) je preusmjerila pažnju s promatranja toplinskog kontrasta cijelog termograma na analizu ponašanja pojedinog piksela. TSR je atraktivna tehnika koja omogućava redukciju količine podataka za obradu, a temelji se na pretpostavci da će temperaturni profili (npr. krivulja hlađenja) neoštećenih piksela pratiti ponašanje 1D rješenje Fourierove jednadžbe koja može biti zapisana u ovom obliku:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t). \quad (21)$$

Jednadžba (21) je aproksimacija Fourierove jednadžbe i to treba imati na umu. M. Shepard je predložio da se zapis termografskih podataka napiše u redu koji će fitati originalne podatke m -stupanjskim polinom oblika [21]:

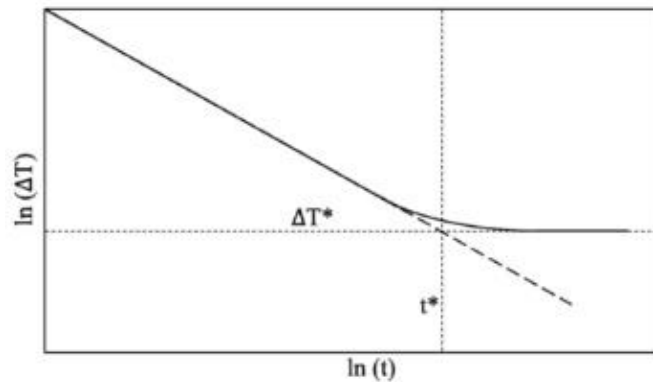
$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_m \ln^m(t). \quad (22)$$

Temperaturni profili neoštećenih piksela će uglavnom slijediti ovo rješenje, dok će pikseli nad oštećenim područjima odstupati od ponuđenog rješenja. Uobičajeno se koristi polinom m 4. ili 5. stupnja kako bi se osigurala dobra korelacija između prikupljenih podataka i teorijskog rješenja uz istovremenu redukciju šuma. Zaključno, termografska sekvenca od N termograma se ovaj način reducira na $m + 1$ sliku koeficijenata (jedna slika za svaki koeficijent) iz koje se može rekonstruirati sintetska sekvenca termograma. Na slici 15 je prikazano pet slika koeficijenata za podatke opisane polinomom 4. reda. Na ovaj način je uspješno otkriveno 23 od 25 oštećenja u uzorku.



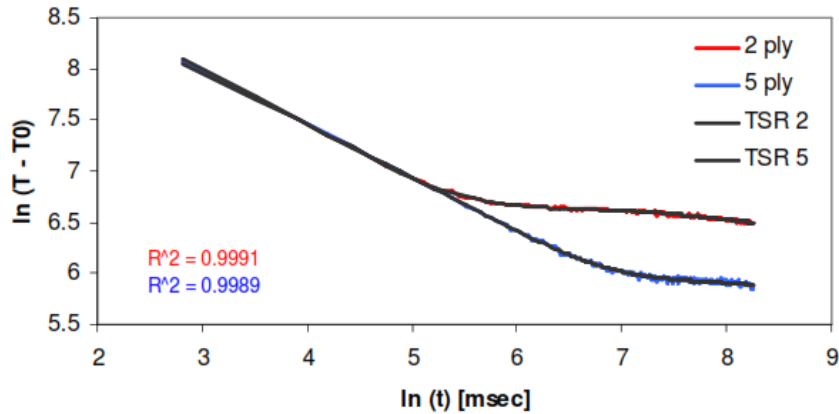
Slika 15. Slike koeficijena polinoma 4. reda TSR metode: (a) koeficijent a_0 , (b) koeficijent a_1 , (c) koeficijent a_2 , (d) koeficijent a_3 , (e) koeficijent a_4 [15]

Graf prirodnog logaritma ($\log T, \log t$) krivulje hlađenja piksela ima karakterističan oblik pravca s nagibom -0.5 , slika 16. Unesena toplina širi se kroz materijal i ukoliko u materijalu naiđe na diskontinuitet na grafovima hlađenja piksela iznad oštećenog područja se može primijetiti izraženo odstupanje krivulje hlađenja od linearnosti pravca [22]. Na ovaj način je uklonjena potreba traženja neoštećenog područja.



Slika 16. Krivulja hlađenja ($\log T, \log t$)

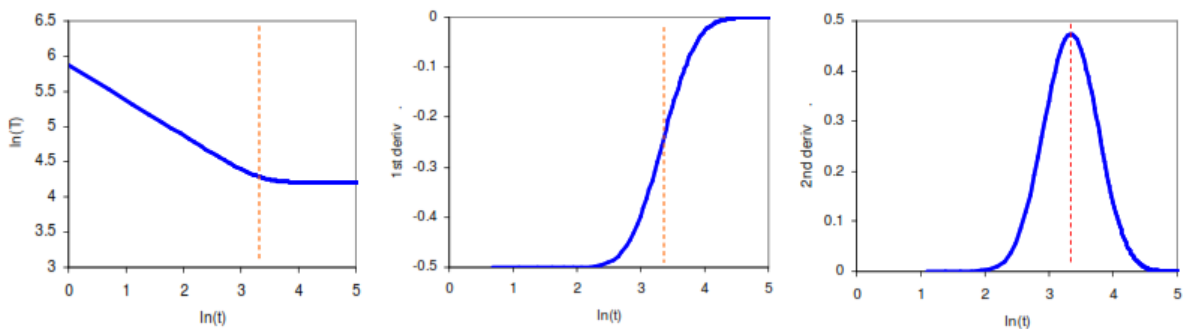
Dosad opisani temperaturni kontrast je primjenjiv u situacijama u kojima je promjer oštećenja veći od dubine na kojoj se nalazi oštećenje. Kako se ta dva parametra ujednačuju, temperaturni kontrast iščezava te dolazi na razine šuma signala. U ovakvim slučajevima TSR omogućuje značajan stupanj napretka u detekciji oštećenja. Na slici 17 su prikazani neobrađeni podaci (eng. raw data) za dva kompozitna uzorka različitih debljina te njihovi sintetski podatci nakon obrade TSRom.



Slika 17. Neobrađeni podatci za dva kompozitna uzorka te njihovi sintetski podatci nakon obrade TSROM [22]

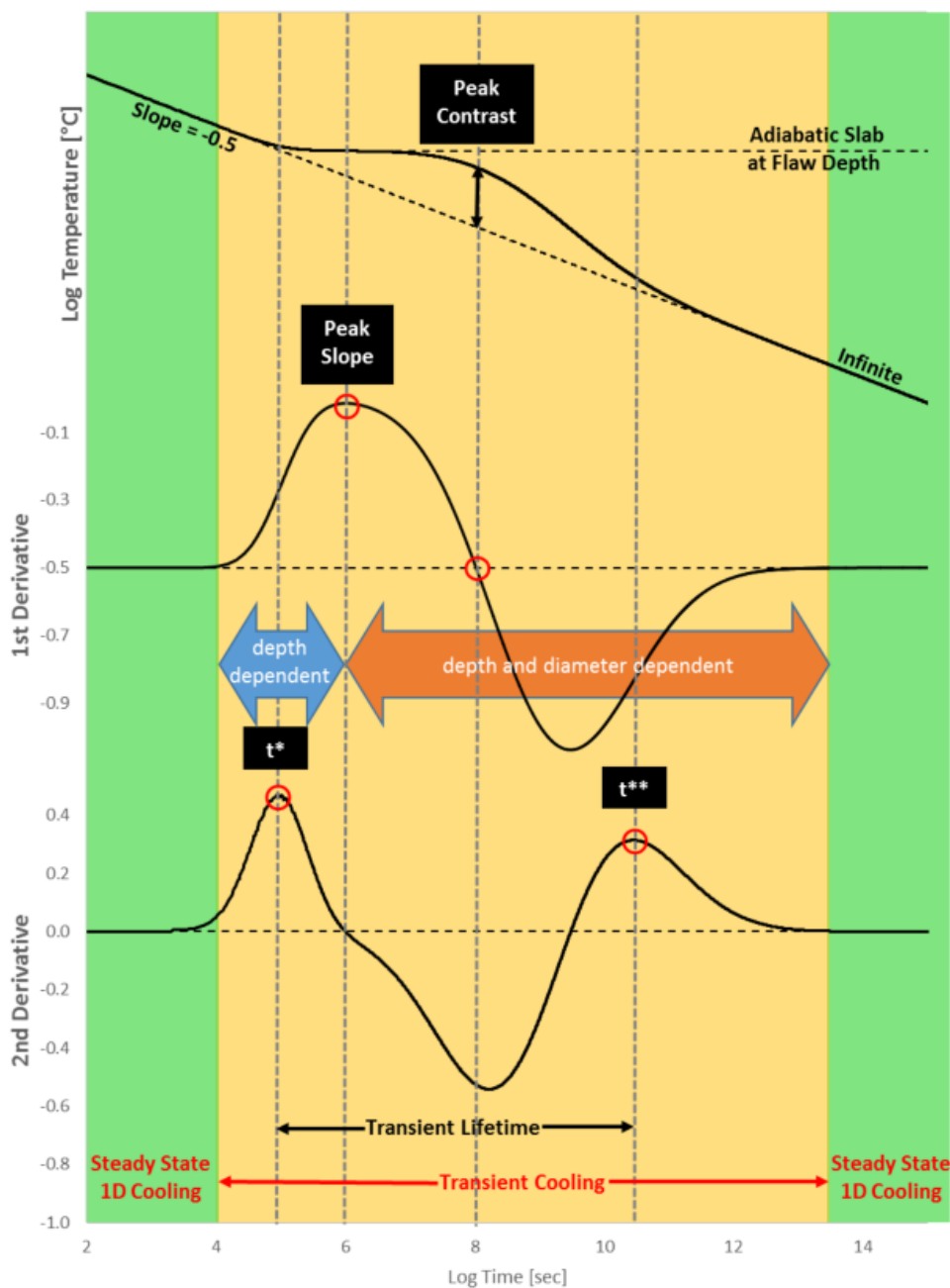
Sintetski podatci nude prednosti kao što su značajno smanjen odnos šuma i signala, mogućnost analitičkog računa, kompresiju podataka (s N na $m + 1$ sliku) te izračun prve i druge derivacije. Također, ponuđena je mogućnost analitičkog izračuna temperatura piksela i u vremenu između snimanja dva uzastopna termograma.

Prva vremenska derivacija predstavlja brzinu hlađenja piksela, a druga vremenska derivacija govori o brzini promjene brzine hlađenja. Dakle, obje derivacije su za razliku od izvornih podataka osjetljivije na temperaturne promjene. Na slici 18. dane su prikazana je prva i druga derivacija TSR podataka. Točka infleksije prve derivacije se događa u trenutku gdje druge derivacije funkcije doseže svoj maksimum. Taj trenutak odgovara trenutku u kojem se krivulja hlađenja $\log(T)$ otklanja od pravca s nagibom $-0,5$. Ako je poznata toplinska difuzivnost uzorka, moguće je iz druge derivacije odrediti debljinu uzorka ili dubinu na kojoj se nalazi oštećenje [22, 23]. Također, vrijedi i obrnuto. Ako je poznata debljina materijala, na ovaj način je moguće odrediti toplinsku difuzivnost i to s rezultatima čija se točnost i pouzdanost može usporediti sa široko korištenijom Parkerovom fleš metodom (eng. Parker flash method) [24].



Slika 18. Usporedba krivulja hlađenja (matematički model): a) hlađenje - $\log(T)$, $\log(t)$; b) 1. derivacija; c) 2. derivacija [23]

Kao primjer metode, Shepard [22] predstavlja numerički model polubeskonačne ploče s jednim provrtom ravnog dna. Rezultati su dani u logaritamskoj domeni u obliku krivulje hlađenja te njene 1. i 2. derivacije, slika 19.



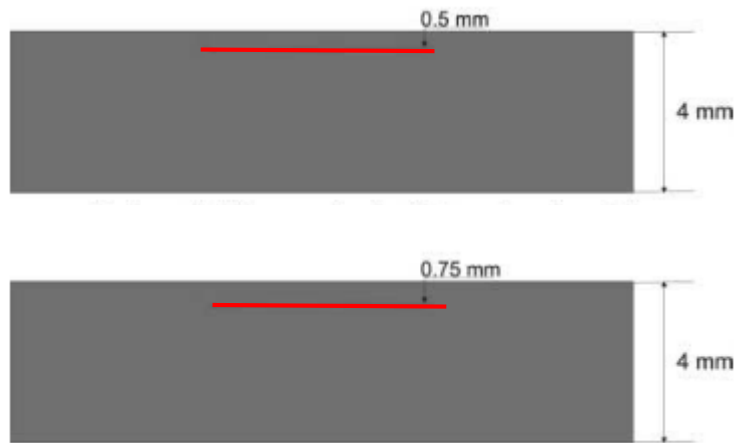
Slika 19. Usporedba krivulja hlađenja realnog uzorka: a) hlađenje - $\log(T)$, $\log(t)$; b) 1. derivacija; c) 2. derivacija [22].

Pokušane su i derivacije višeg reda, ali ne nude poboljšanje u detekciji oštećenja, a autori nisu pronašli ni fizikalno objašnjenje tih veličina.

4.5. LOCK IN TERMOGRAFIJA

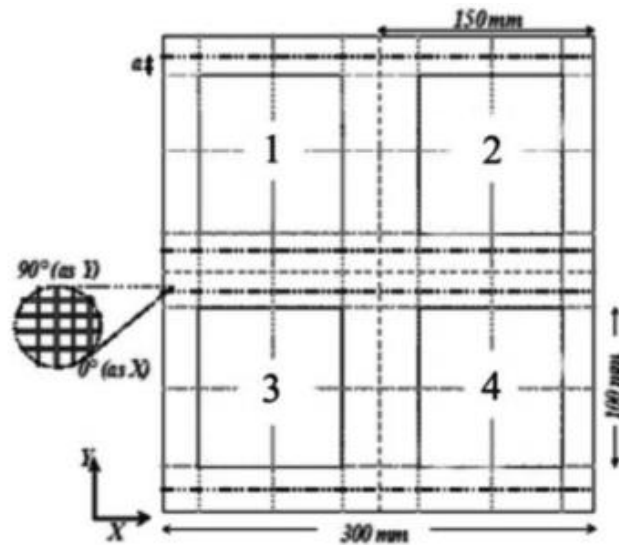
Lock in termografija je prvi put spomenuta od strane autora Carlomagno i Berardi [25], dok je prvu značajniju primjenu doživjela 90ih godina od strane autora Busse [26-28]. U ovoj metodi objekt je stimuliran moduliranim toplinskim tokom; toplinski val se širi unutar objekta po njegovoj debljini i odbija se kada naiđe na zone u kojima se mijenjaju toplinska svojstva materijala (lokalna nehomogenost ili zid). Odbijeni val se može snimiti IC kamerom kao promjena temperature na površini objekta. Tako snimljeni termogrami omogućavaju direktnu evaluaciju oblika i dubine oštećenja bez potrebe za dodatnom obradom signala [29].

Lock in termografija je primijenjena na dvije vrste CFRP uzoraka ($[45/0/90 - 45/+45/0/90]_s$ i $[0/90]_{4s}$) često korištene u avioindustriji. Delaminacija je simulirana kao umetak kapton folija debljine $25 \mu m$ različitih veličina na različitim dubinama [30]. Prvi set uzoraka se sastojao od tri uzorka. Prvi i drugi uzorak su imali umetak od kapton folije promjera $140 mm$ na dubinama $0,5$ i $0,75 mm$, slika 20. Treći uzorak nije imao nikakva oštećenja.



Slika 20. Schema prvog seta uzoraka [30]

Drugi set uzoraka se sastojao također od tri uzorka, ali s nešto složenijom geometrijom oštećenja. Svaki od uzoraka iz drugog seta je podijeljen u četiri zone. Zatim je svakoj zoni dodano neko svojstvo: neoštećena zona, oštećenje u obliku kruga određenog primjera na određenoj dubini, oštećenje u obliku elipse određenih dimenzija na određenoj dubini, slika 21.



(a) frontal view

DELAMINATION POSITION THROUGH THE THICKNESS

<p>#T1</p>	<p>#T3</p>	<p>#T5</p>
<p>#T2</p>	<p>#T4</p>	

DELAMINATION TYPES

<p>#D1</p> <p>radius 30 mm</p>	<p>#D3</p> <p>radius 15 mm</p>
<p>#D2</p> <p>x semi-axis 15 mm y semi-axis 30 mm</p>	<p>#D4</p> <p>radius 20 mm</p>

(a) details of inserts shape, dimension and position (for more details see Table 1)

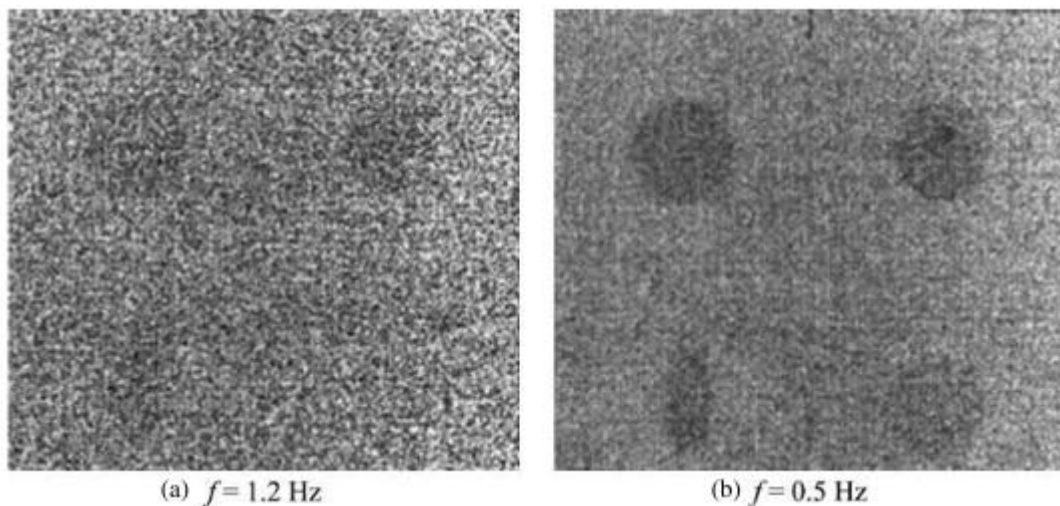
Slika 21. Schema drugog seta uzoraka [30]

Detalji o uzorcima drugog seta su dani u tablici 2:

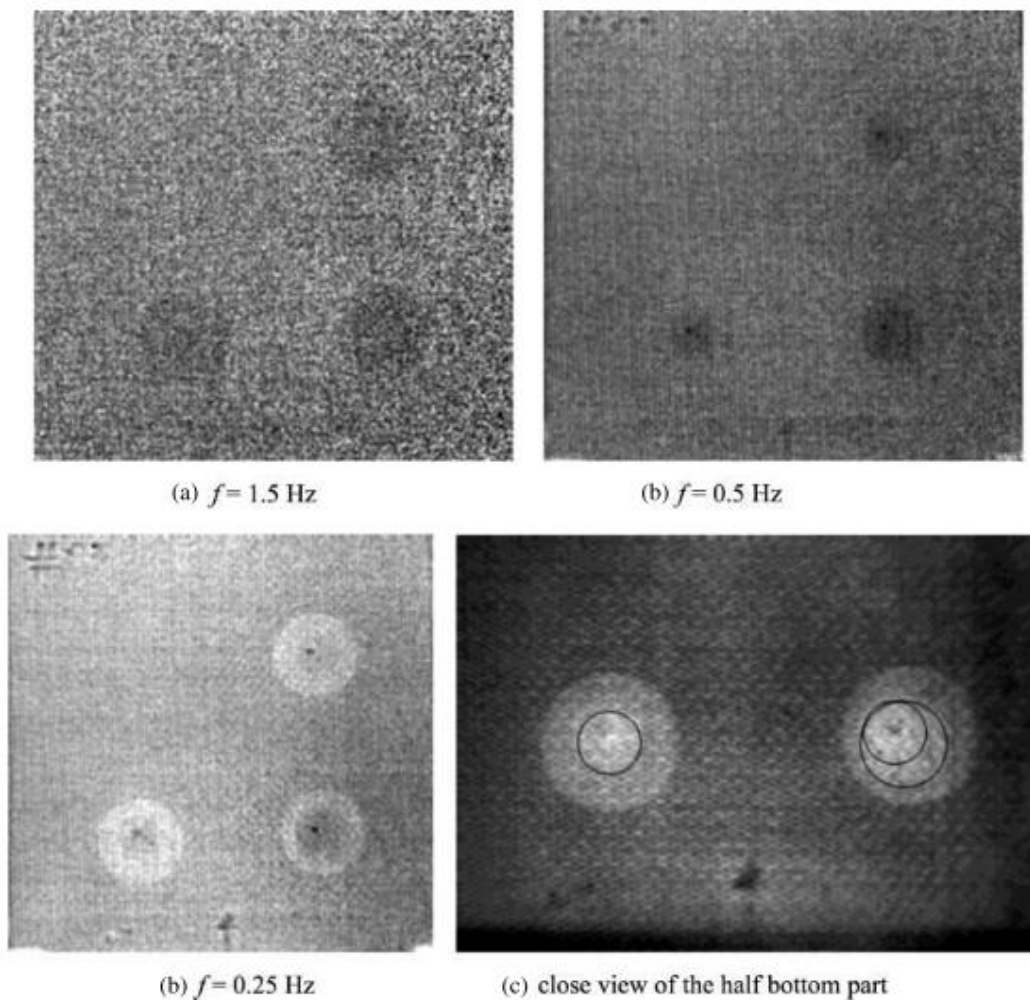
Tablica 2. Detalji o lokaciji oštećenja na uzorcima iz drugog seta (pogledati i sliku 21) [30]

	Sectors of specimen			
	1	2	3	4
Specimen II-1	D1/T1	D1/T1	D2/T1	D1/T2
II-2	D1/T2	D2/T1	D2/T2	D2/T2
II-3	Undamaged	D1/T3	D1/T3	D1/T3
		D3/T4	D3/T4	D4/T4
				D3/T5

Svi uzorci su podvrgnuti ispitivanju metodom Lock in termografije, a korištena oprema je dugovalna IC kamera Thermacam SC3000 (FLIR Systems), halogene lampe i softver IRLockIn. Modulacijska frekvencija je mijenjana u intervalu od 1,75 Hz pa do 0,05 Hz i pri pravilnom odabiru frekvencije, sva oštećenja su otkrivena. Neki rezultati su dani na slici 22 i slici 23.



Slika 22. Fazne slike za uzorak II-1 [30]



Slika 23. Fazne slike za uzorak II-3 [30]

Osim kvalitativnih rezultata, napravljena je i kvantitativna analiza. Uspoređeni su nominalni promjeri kaplan folija D_N s izmjerenim promjerima na termogramima. Na svakom termogramu je promjer mjeran u dva smjera, horizontalnom i vertikalnom, te je izračunata srednja vrijednost promjera D_M . Zavisnost ova dva parametra je dana izrazom: $D_M = 1,2D_N^{0,96}$, a izmjerene i izračunate vrijednosti su dane u tablici 3. Faktor korelacije je $R = 0,996$.

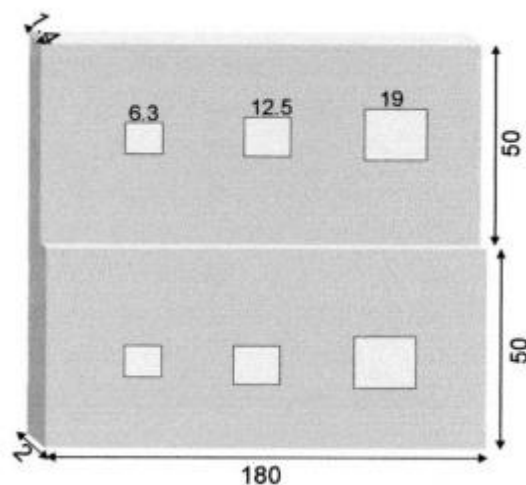
Tablica 3. Detalji o stvarnim i izmjerenim vrijednostima promjera oštećenja u uzorcima serije I.; O- izmjereni promjer duž horizontalne osi, V – izmjereni promjer duž vertikalne osi [30]

Specimen	D_N (mm)	D_{MO} (mm)	D_{MV} (mm)
I-1	140	144	144
I-2	140	141	143

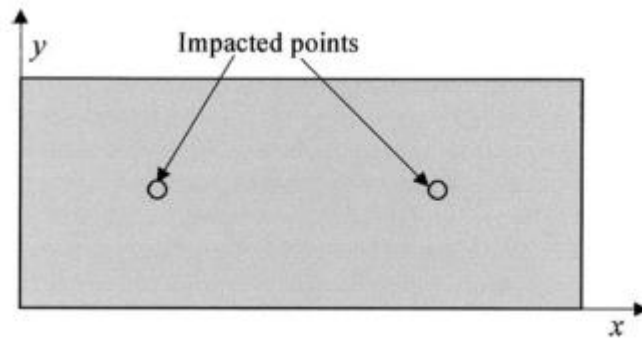
Autori su pokušali i izmjeriti dubinu oštećenja, ali rezultati previše odstupaju od stvarnih vrijednosti pa ih se neće razmatrati u ovom radu [31].

Grupa autora [32] provodi istraživanja na novim materijalima za aerotehnoške primjene pa će ovdje biti prezentirani i rezultati jednog takvog istraživanja. U radu je metodom lock in termografije ispitano pet različitih uzoraka.

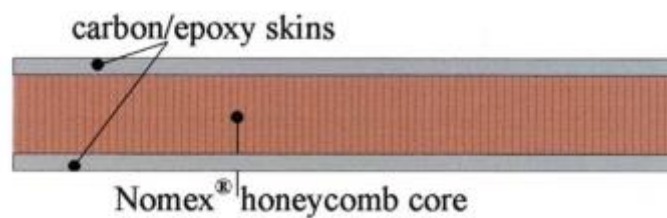
- 1) Prvi uzorak CarbStep je proizveden od preimpregiranih karbonskih vlakana $(0/90)_f$ i pečen u autoklavu. Uzorak je na jednom dijelu imao debljinu od $1,4\text{ mm}$ (gornja polovica), a na drugom dijelu 2 mm (donja polovica), kao na slici 24. Unutar svake polovice su umetnuta tri teflonska umetka na polovici debljine uzorka, tako da dubina umetaka u gornjem dijelu uzorka iznosi $0,7\text{ mm}$, a u donjem dijelu 1 mm . Ukupna dimenzija uzorka je $100 \times 180\text{ mm}^2$.
- 2) Carb-I je proizveden od preimpregiranih karbonskih vlakana $(0/90)_f$ i pečen u autoklavu. Dimenzije ovog uzorka su $140 \times 70 \times 3\text{ mm}^3$. Uzorak je oštećen udarnim opterećenjem na dva mjesta različitim energijama udara, kao na slici 25.
- 3) CFRP/Nom je napravljen od dijela avionskog krila a struktura mu je CFRP/Nomex sendvič panela. Dimenzije ovog uzorka su $200 \times 100 \times 20\text{ mm}^3$, kao na slici 26.
- 4) Nekoliko uzoraka je izrađeno u obliku laminata od Glare Fiber Reinforced Metal (FRML) materijala. Ovaj laminat sadrži slojeve Aluminijske folije tipa 7075 T-7351 među slojevima epoksi smole ojačane R staklenim vlaknima, kao na slici 27. Na ovim uzorcima su probušeni provrti promjera $d = 8\text{ mm}$ s pozicijama takvima da im je omjer promjera naspram dubini (w) iznosi $w/d = 2,5$, a udaljenost provrta (e) od ruba naspram promjeru iznosi $e/d = 1.6$.
- 5) WeldLas je ploča AISIa debljine 2 mm zavarena laserom metodom ključanice. Varirana je brzina zavarivanja u intervalu od 700 do 1200 mm/min .



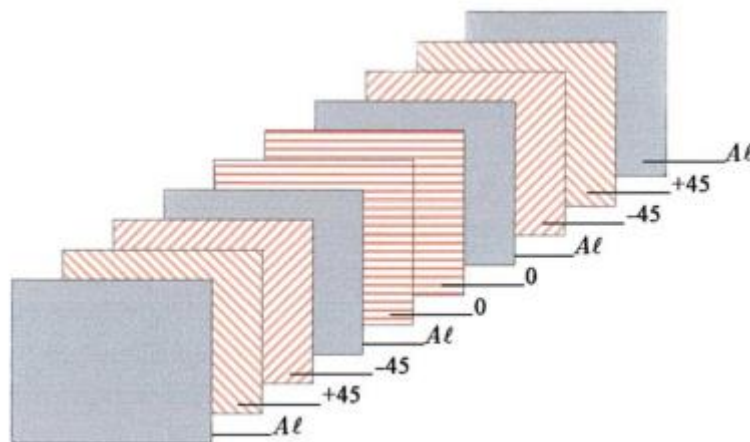
Slika 24. Uzorak CarbStep [32]



Slika 25. Pozicije oštećenja nastalih dinamičkim udarom na uzorku Carb-I [32]



Slika 26. Sandwich panel CFRP/Nom [32]

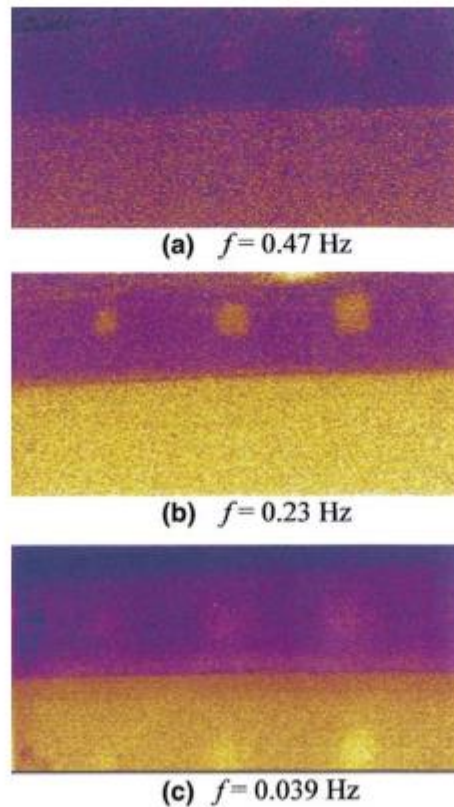


Slika 27. Shema slaganja slojeva za uzorke Glare Fiber Reinforced Metal [32]

Uzorci su pobuđeni sinusoidnim toplinskim tokom lampama snage 1 KW , frekvencija sinusoide je varirana od 3,75 Hz (257 ms) do 0,0037 Hz (273 s). Raspodjela temperatura na površini je snimana s termalnom kamerom Agema 900 Thermovision.

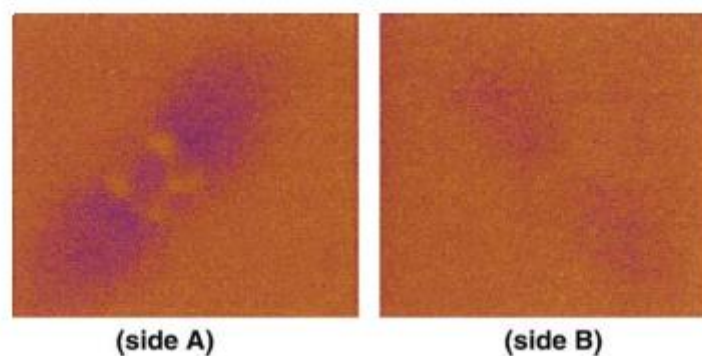
Rezultati za uzorak Stepcarb su prikazani na slici 28. Pri frekvenciji od $f = 0,47 Hz$ nadziru se oštećenja u gornjem, tanjem sloju materijala i to s vrlo slabim kontrastom. Pri nižoj frekvenciji od $f = 0,23 Hz$ oštećenja na gornjoj polovici se vide jasno i moguće je odrediti njihovu geometriju – kvadratni oblik. Pri $f = 0,039 Hz$ moguće je vidjeti i oštećenja na donjem dijelu uzorka. Autori su primijetili kako su različite debljine materijala na

termogramima obojane drukčijim bojama pa preporučuju korištenje metode i za provjeru varijacija debljine unutar neke komponente.



Slika 28. Fazne slike za uzorak CarbStep: (a) $f=0,47$ Hz; (b) $f=0,23$ Hz; (c) $f=0,039$ Hz [32]

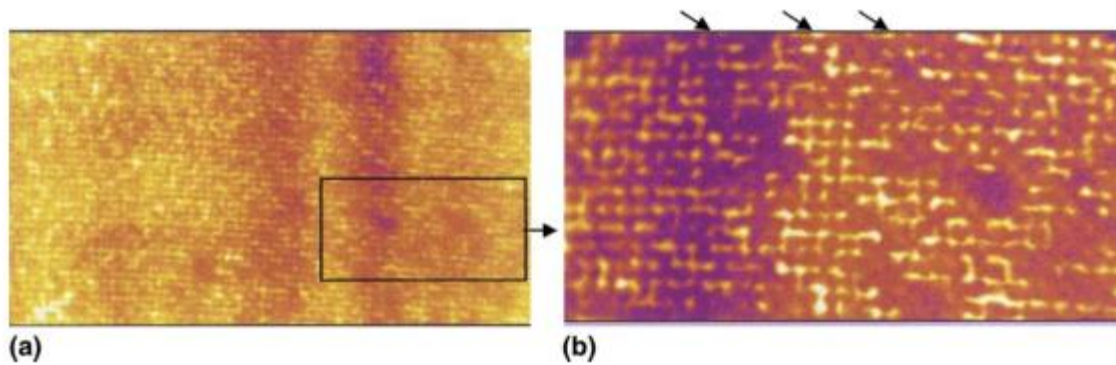
Na uzorku Carb-I pri $f = 0,12$ Hz moguće je primjetiti lom vlakana nakon udarnog opterećenja. Oštećenje je bolje vidljivo na strani udara (strana A), dok se na suprotnoj strani (strana B) posljedice udara gotovo i ne primjećuju, slika 29.



Slika 29. Fazna slika za uzorak Carb-I: a) strana udara; b) suprotna strana [32]

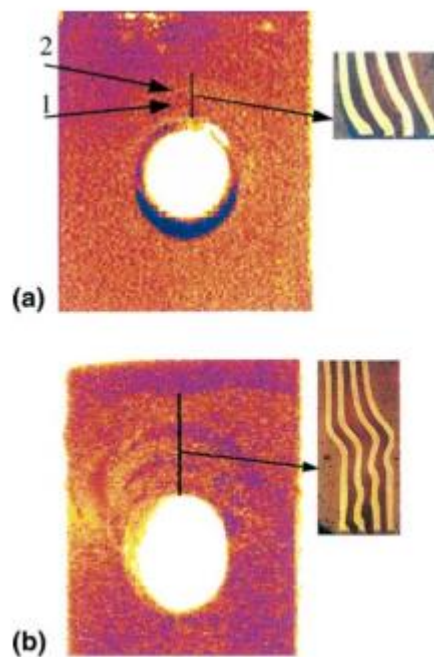
Na uzorku CFRP/Nom pri $f = 0,029$ Hz je moguće primjetiti dvije toplije vertikalne zone. Kako bi bolje promotrili moguće oštećenje, autori su ponovili snimanje samo s krupnijim

kadrom. Zaključili su da je na tom području prisutna greška u proizvodnji, stavljeno je previše ljepila i to je ljepilo djelomično ispunilo saće unutar sendvič materijala, slika 30.



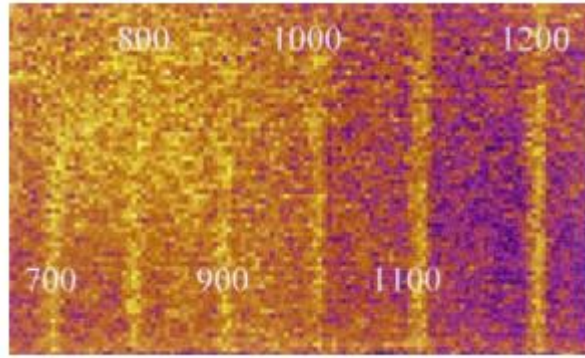
Slika 30. Uzorak Carb/Nom: a) fazna slika; b) pogled izbliza [32]

Glare uzorci su ispitani pri frekvenciji od $f = 0,039 \text{ Hz}$ te je slika pukotine nakon bušenja snimljena i mikroskopom, slika 31.



Slika 31. Fazne slike za uzorak Glare s pripadajućim mikroskopskim snimkama površine nakon bušenja [32]

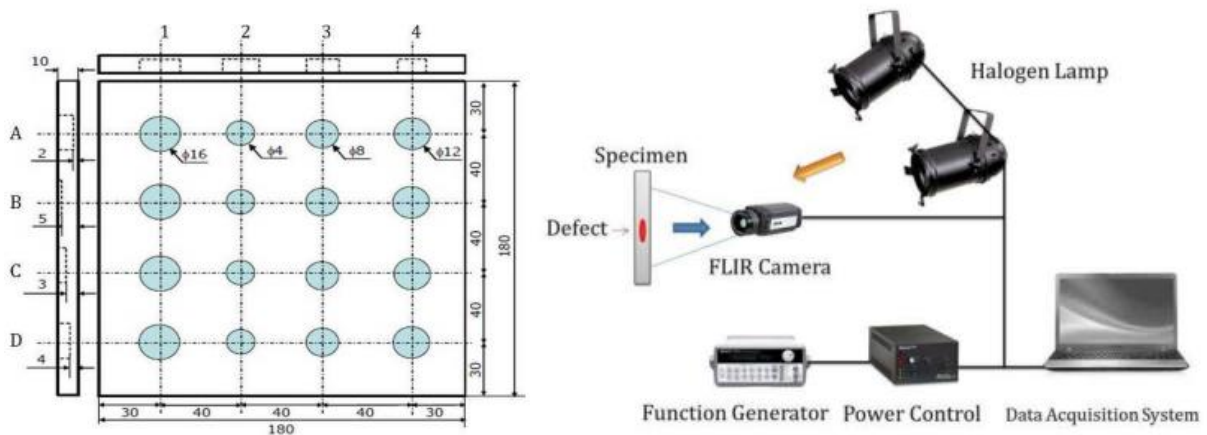
Zavari na uzorku WeldLas su ispitani s modulacijskom frekvencijom $f = 0,47 \text{ Hz}$. Na slici 32. se vidi svih 6 linijskih zavara, po jedna za svaku brzinu zavarivanja.



Slika 32. Uzorak WeldLas na kojem je vidljivo 6 prolaza laserskim zavarivanjem pri različitim brzinama zavarivanja [32]

Autori su zaključili kako metodom lock in termografije mogu doći do vrijednih informacija o veličini, poziciji i prirodi oštećenja u različitim materijalima.

Autori [33] prezentiraju rezultate lock in termografije na uzorku nehrđajućeg čelika, slika 33.



Slika 33. a) Uzorak STS 304; b) schema provedenog mjerenja [33]

U prethodno pregledanoj literaturi, fazni pomak sinusoide bi se uvijek računao iz četverokoračnog računanja. U ovom radu autori analiziraju metodu tako što rezultate obrađuju dvokoračnim, trokoračnim, četverokoračnim i peterokoračnim računanjem faznog pomaka za svaki piksel termografske sekvence, prema slijedećim jednadžbama:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad (23)$$

gdje su I_1 i I_2 termografske vrijednosti s termografa pomaknutih za 90° ;

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\sqrt{3}\left(\frac{I_3 - I_2}{2I_1 - I_2 - I_3}\right)\right), \quad (24)$$

gdje su I_1, I_2 i I_3 termografske vrijednosti s termografa pomaknutih za 120° s odabranim vrijednostima perioda $0, 2\pi/3$ i $4\pi/3$;

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}\right), \quad (25)$$

gdje su I_1, I_2, I_3 i I_4 termografske vrijednosti s termografa pomaknutih za 90° s odabranim vrijednostima perioda $0, \pi/2$ i $3\pi/2$;

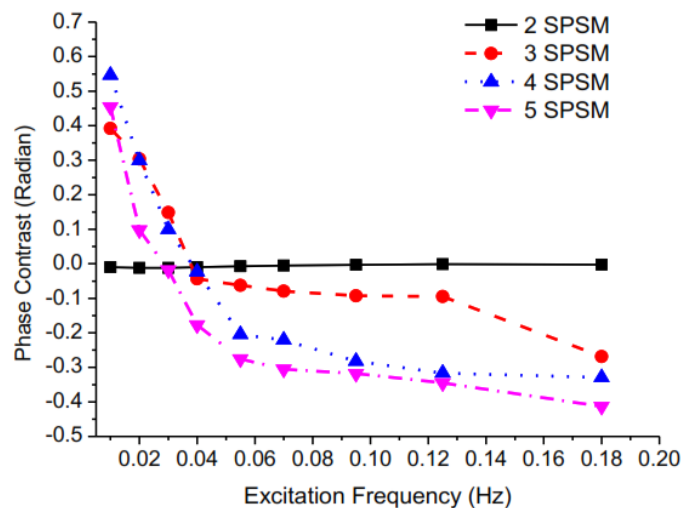
$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1}\right), \quad (26)$$

gdje su I_1, I_2, I_3, I_4 i I_5 termografske vrijednosti s termografa pomaknutih za 90° s odabranim vrijednostima perioda $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ i 2π .

Odnos kontrasta naspram šuma (eng. Contrast to noise ratio, CNR) se koristi kako bi se definirala dva područja interesa: zdravo područje i oštećeno područje. Kontrast je definiran kao apsolutna razlika između srednje izmjerene vrijednosti između oštećenog (eng. Defected region of interest, DROI) i zdravog područja (eng. Sound region of interest), a šum je standardno odstupanje izmjerenih vrijednosti unutar zdravog područja (σ):

$$CNR = 20 \log_{10}\left(\frac{|DROI_{mean} - SROI_{mean}|}{\sigma}\right). \quad (27)$$

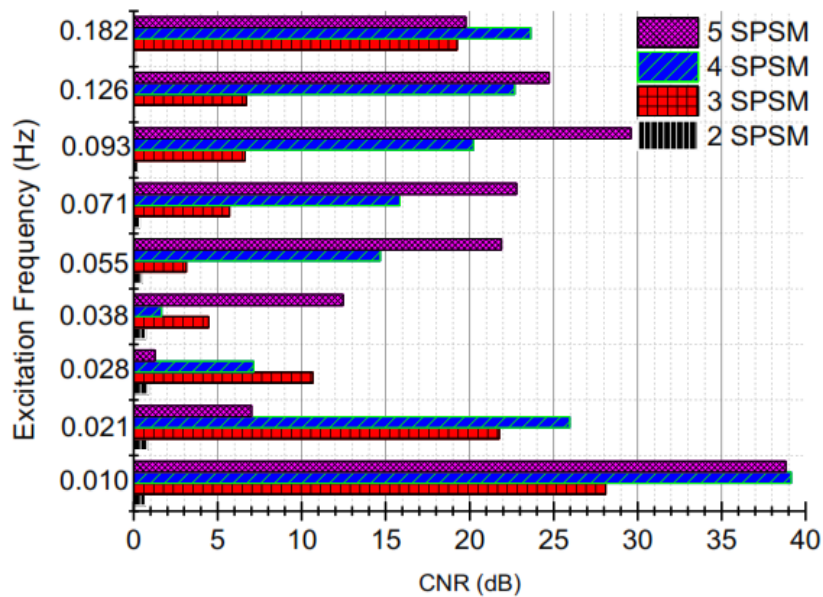
Frekvencija uzbude je odabrana prema duljini difuzije materijala, a varirana je od $0,182 \text{ Hz}$ do $0,01 \text{ Hz}$. Kako bi se usporedile mogućnost detekcije svake od tehnika izračuna faznog kontrasta, odabrano je jedno oštećenje (u ovom slučaju oštećenje A1 sa slike 34) i za to oštećenje je izračunat fazni kontrast svakom od predloženih tehnika pri svim odrađenim frekvencijama uzbude, slika 35. Fazni kontrast je izračunat tako da je od vrijednosti faze piksela lociranog centralno nad oštećenim područjem oduzeta faza izmjerena u neposrednoj blizini, ali nad neoštećenim područjem.



Slika 34. Fazni kontrasti za piksel nad oštećenim područjem A1: dvokoračno, trokoračno, četverokoračno i peterokoračno računanje faznog pomaka [33]

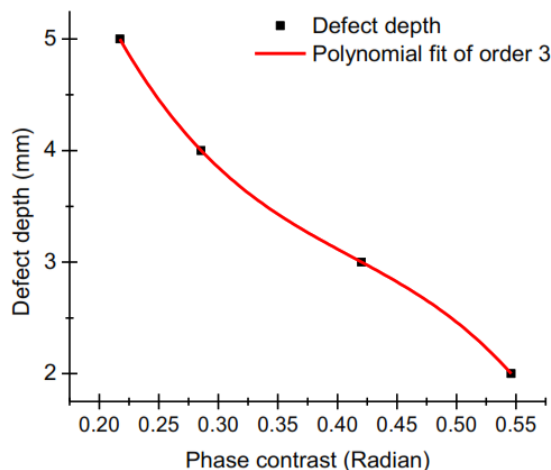
Iz rezultata se može zaključiti da dvostepeni izračun pomaka faze nije primjerena metoda za određivanje oštećenog i zdravog područja unutar materijala jer nije moguće iz dvije točke sinusoide rekonstruirati sinusoidu, kao što se vidi na dijagramu sa slike 34.

CNR analiza je zatim primijenjena na svaku od metoda izračuna faznog pomaka u odnosu na frekvenciju uzbude. Na slici 35 je prikazan CNR vrijednost za odabrano oštećenje i vidljivo je da su četverokoračni i peterokoračni izračun faznog kontrasta u prednosti u odnosu na ostale tehnike.



Slika 35. Odnos frekvencije uzbude i CNR vrijednosti za odabrano oštećenje: vidljivo je da su četverokoračni i peterokoračni izračun faznog kontrasta u prednosti u odnosu na ostale tehnike [33]

Utjecaj dubine greške na fazni kontrast je promatran na oštećenjima A1, C1, D1 i B1 koji se nalaze na dubinama 2, 3, 4 i 5 mm, a sva navedena oštećenja imaju promjer 16 mm. Na slici 36, je prikazan izmjereni fazni kontrast nad spomenutim oštećenjima pri frekvenciji uzbude od 0,01 Hz. Vidljivo je da se fazni kontrast smanjuje s povećanjem dubine oštećenja, što je i očekivano. Rezultati su opisani polinomom trećeg reda: $13,34 - 63,59\phi + 140,63\phi^2 - 113,97\phi^3$.



Slika 36. Ovisnost faznog kontrasta o dubini oštećenja [33]

Autori su proveli i druga slična istraživanja o ovoj temi, više u literaturi [34, 35].

U literaturi je dostupna i usporedba eksperimentalnih rezultata Lock-in termografije s rezultatima metode konačnih elemenata [36].

4.6. TERMOGRAFIJA FAZNOG PULSA

Termografija faznog pulsa (eng. Pulse Phase Thermography, PPT) podatke iz vremenske domene seli u frekvencijsku domenu koristeći diskretnu Fourierovu transformaciju (DFT) [37-39]:

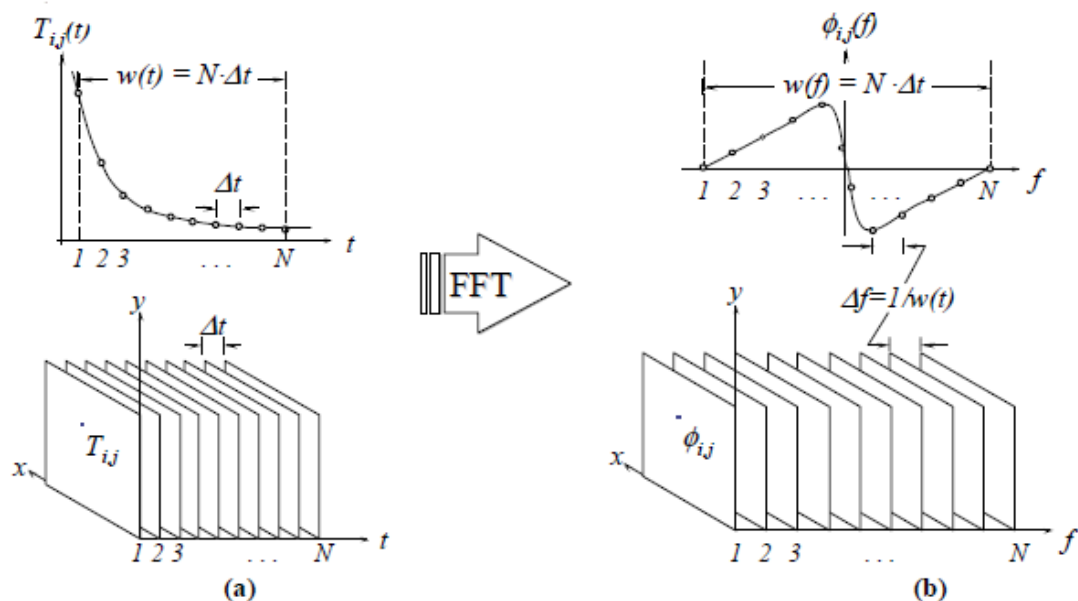
$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N}\right) = Re_n + Im_n \quad (28)$$

gdje je j imaginarna jedinica ($j^2 = -1$), n označava porast frekvencije ($n = 0, 1, \dots, N$), Δt je interval uzorkovanja termograma, a Re i Im su realni i imaginarni dio transformacije iz kojih se može izračunati amplituda A i faza signala ϕ [C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague. *Pulsed Phase Thermography Reviewed*. QIRT J., 1(1): p. 47-70, 2004]:

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} \quad \text{and} \quad \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right). \quad (29)$$

PPT razvrstava dostupne informacije koherentno, prema rastućim frekvencijama. Metoda omogućava otkrivanje nekih novih karakteristika za razliku od prije spomenutih metoda (npr. temperaturni kontrast).

Na slici 37 prikazan je prijelaz iz vremenske domene signala u frekvencijsku domenu signala upotrebom FFT transformacij [40, 41].



Slika 37. Prijelaz iz vremenske domene u frekvencijsku domenu FFT algoritmom [41]

Nakon obrade snimljenje sekvence FFT algoritmom, svaki piksel u frekvencijskoj domeni ima svoj fazni profil. Ovisno o duljini snimanja i intervalu uzorkovanja, fazni profili u sekvenci imaju određenu frekvencijsku razlučivost, Δf [41]:

$$w(f) = N \cdot \Delta t, \quad (30)$$

$$\Delta f = \frac{1}{w(f)}, \quad (31)$$

gdje je $w(f)$ ukupna duljina snimanja, N je broj ukupno snimljenih termograma, a Δt vremenski interval uzorkovanja.

DFT može biti upotrebljena nad bilo kojim oblikom vala vanjske pobude, dakle osim za PPT može se koristiti i za lock-in termografiju (LT) i za vibrotermografiju (VT). Faza signala je naročito zanimljiva u termografiji jer je manje osjetljiva od originalnih podataka na vanjske utjecaje kao što su varijacije u emisivnosti, nejednoliko zagrijavanje uzorka, refleksije iz okoline te stanje površine od interesa. Na slici 38 su prikazani fazegrami za različite frekvencije. Može se primijetiti kao su oštećenja u plićim dubinama materijala bolje vidljiva na višim frekvencijama, dok su dublja oštećenja bolje vidljiva na nižim frekvencijama i 'nestaju' na višim frekvencijama.

Dubine do kojih je moguće ispitati materijal ovom metodom su između $1,8 \mu$ pa čak i do više od 2μ , gdje je μ dubina toplinske difuzije, a dana je jednadžbom [42]: $\mu = (\alpha/\pi f)^{1/2}$.

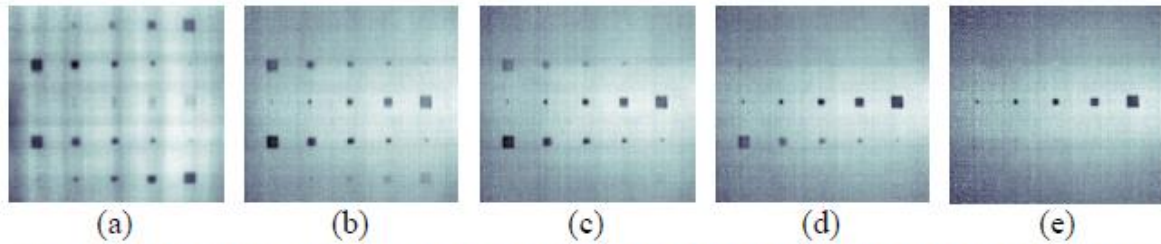
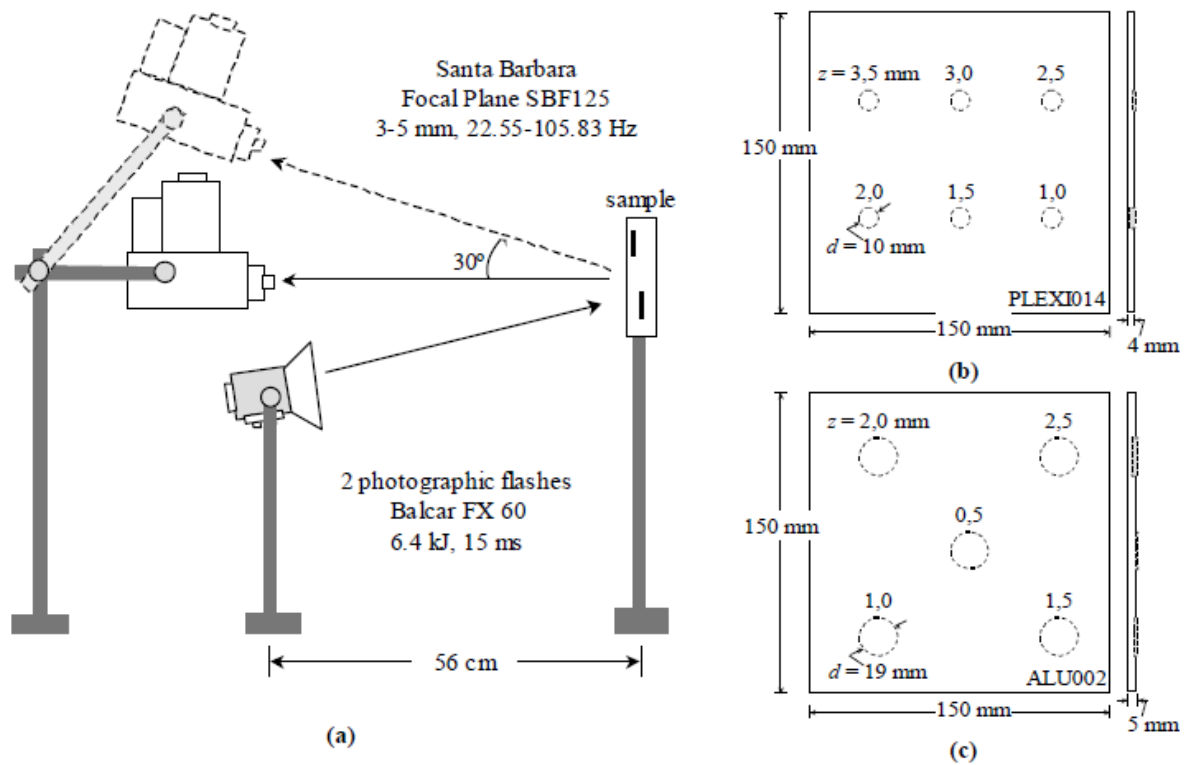


Fig. 6. PPT results: phasegrams at $f=$ (a) 0.15; (b) 0.47; (c) 0.63; (d) 1.10; and (e) 2.21 Hz.

Slika 38. Fazne slike pri različitim frekvencijama: a) $f=0,15$ Hz, b) $f=0,47$ Hz, c) $f=0,63$ Hz, d) $f=1,10$ Hz, e) $f=2,21$ Hz - može se primijetiti kao su oštećenja u plićim dubinama materijala bolje vidljiva na višim frekvencijama, dok su dublja oštećenja bolje vidljiva na nižim frekvencijama i 'nestaju' na višim frekvencijama [41]

Nedostatak PPT je što povećava razinu šuma, posebno na višim frekvencijama. Na dovoljno visokim frekvencijama razina šuma je veća od samog signala i dovodi do nemogućnosti očitavanja. Autor [41] preporučuje da se FFT uvijek koristi nakon TSRa kako bi se šum smanjio.

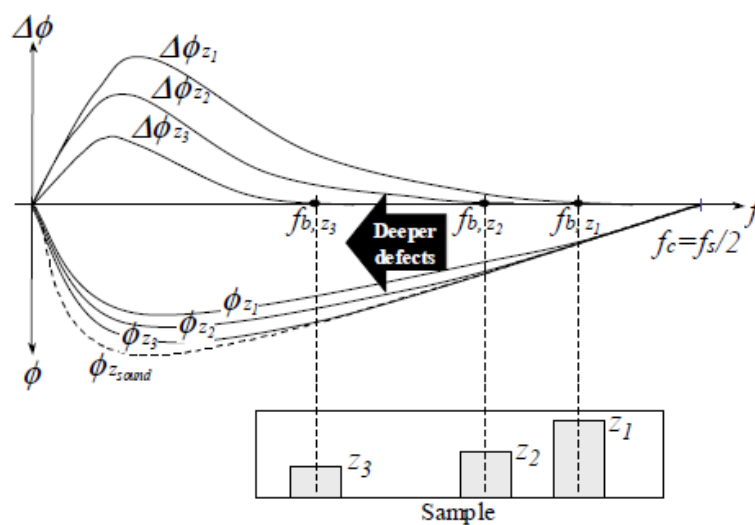
U nastavku su dani rezultati primjene PPT metode na uzorak od pleksiglasa i aluminijski. Od opreme je korištena FPA infracrvena kamera (Santa Barbara Focalplane SBF125, srednji val od 3 do 5 μm , s razlučivosti 320x256 piksela), dvije fotografske bljeskalice (Balcar FX 60, otpuštaju 6,4 kJ energije u 15 ms) i računalo (Pentium 4, 2 GB RAM). Podatci su obrađeni u MatLabu. Dimenzije i opis uzoraka su prikazani na slici 39 [41]. Uzorak od pleksiglasa debljine 4 mm ima šest oštećenja simuliranih kao provrti ravnog dna (eng. Flat bottom hole; FBH) promjera 10 mm, smještenih na dubinama od 3,5, 3, 2,5, 2, 1,5 i 1 mm dubine. Aluminijski uzorak debljine 5 mm ima pet umjetno dodanih oštećenja (FBH) promjera 19 mm, smještenih na dubinama od 2,5, 2, 1,5, 1 i 0,5 mm dubine. Napravljena su dva seta mjerenja, u jednom je kamera bila okomita na uzorke, a u drugom setu je kamera bila postavljena pod kutom od 30°, kao na slici 39. Ovdje će se dati uzorci samo za slučaj mjerenja na uzorku od pleksiglasa gdje je kamera postavljena okomito na površinu uzorka.



Slika 39. a) Eksperimentalni postav; b) pleksiglas uzorak (PLEXI014); c) aluminijski uzorak (ALU001) [41]

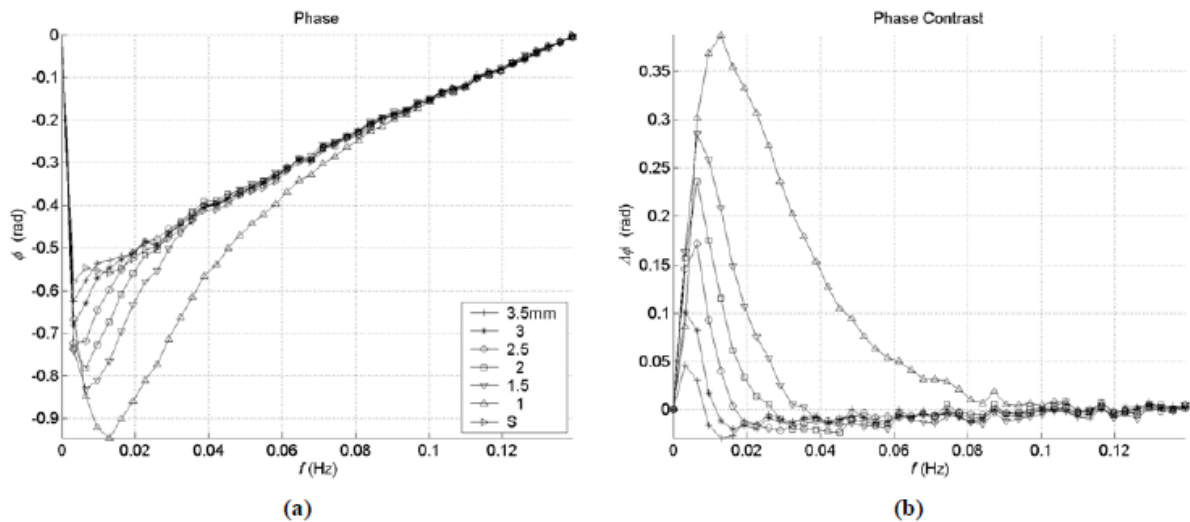
Frekvencija na kojoj se sijeku fazni profil neoštećenog materijala i fazni profil oštećenja je poznata pod nazivom slijepa frekvencija (eng. blind frequency), slika 40 [41]. Dubina greške (z) se mijenja obrnuto proporcionalno s kvadratnim korijenom slijepa frekvencije:

$$z \propto f_b^{-1/2}. \quad (32)$$



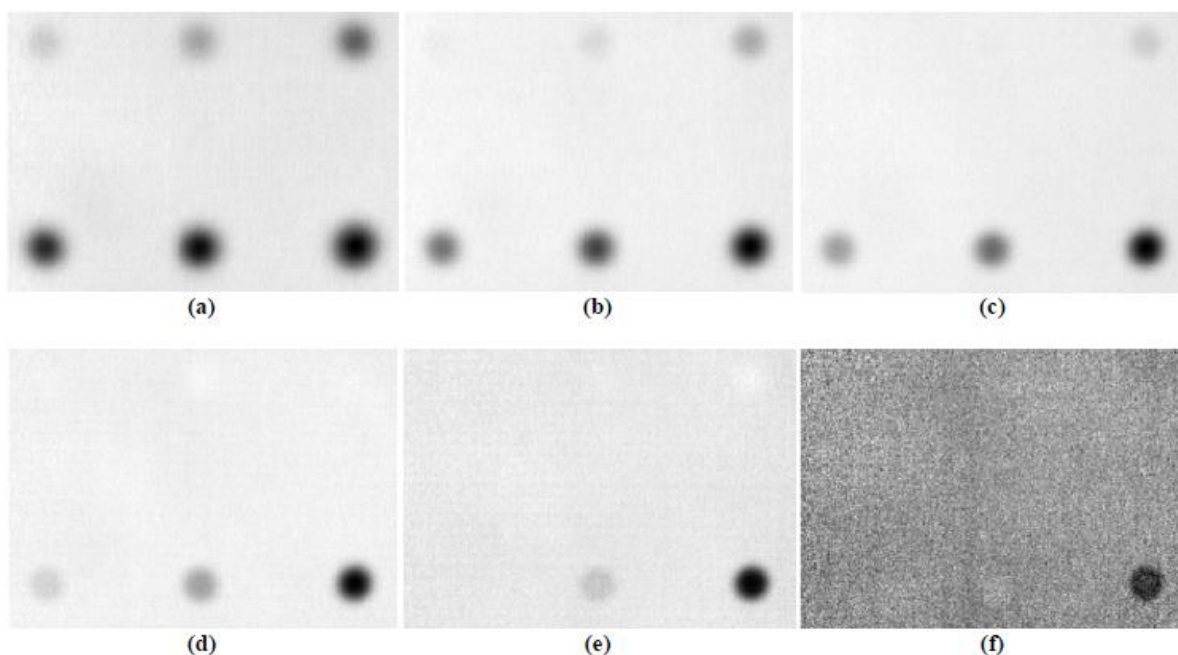
Slika 40. Poveznica slijepa frekvencije s dubinom na kojoj se nalazi oštećenje [41]

U ovom radu [41] dana je kvalitativna usporedba slijepe frekvencije za svako od oštećenja. Na slici 41 su prikazane vrijednosti faze za neoštećeno područje i svako od oštećenja i fazni kontrasti svakog oštećenja u odnosu na neoštećeno područje. Podatci pokazuju snažnu vezu između slijepe frekvencije i dubine na kojoj se nalazi oštećenje.



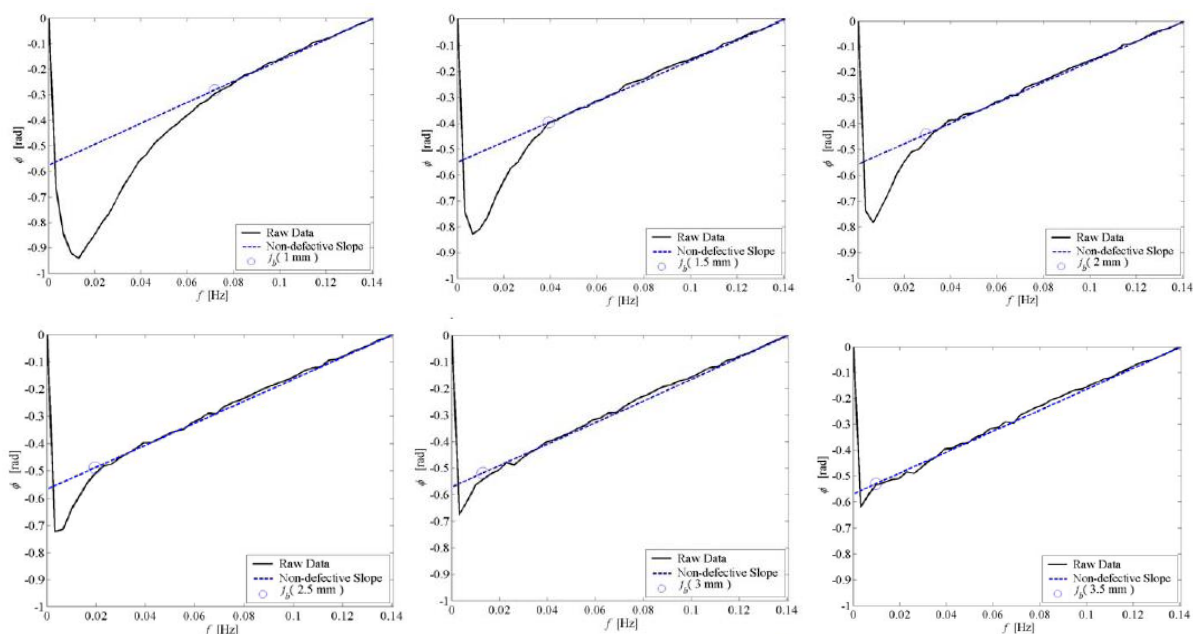
Slika 41. PLEXI0014, $f=0,28$ Hz: a) faza, b) fazni kontrast [41]

Na slici 42 je prikazan raspon frekvencija tako da svaki od 6 prikazanih fazograma odgovara slijepoj frekvenciji jednog od oštećenja. Baš zato, kako se povećava slijepa frekvencija s fazegrama iščezava jedno po jedno oštećenje, od najdubljeg ($z = 3,5$ mm) do najplićeg ($z = 1$ mm) oštećenja.



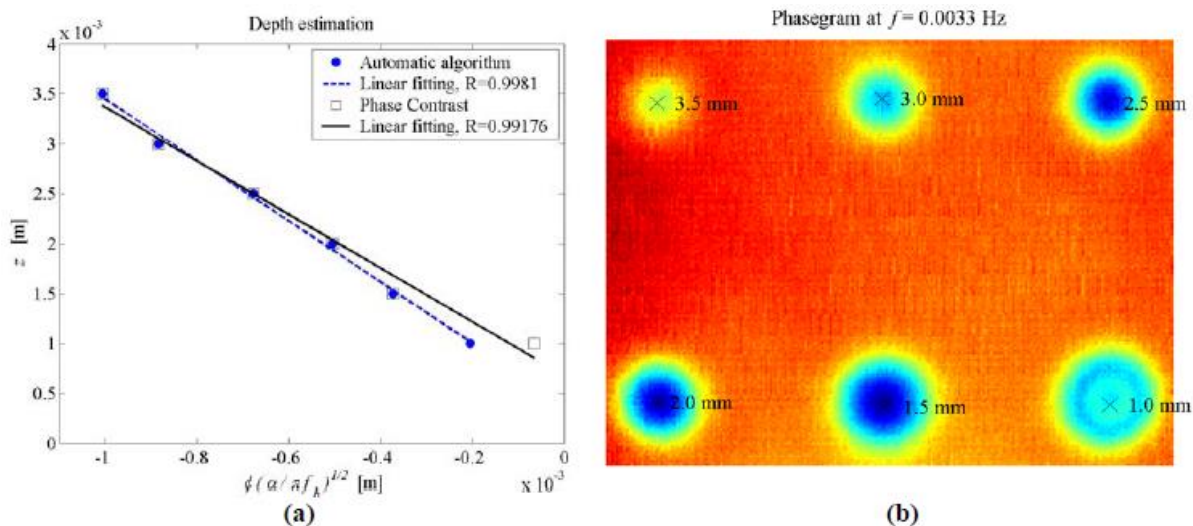
Slika 42. plexi014, $F=0,28$ Hz, fazne slike koje odgovaraju slijepoj frekvenciji za različite dubine na kojima se nalaze oštećenja: a) $f_b(3,5\text{mm})=0,0065$ Hz, b) $f_b(3\text{mm})=0,0097$ Hz, c) $f_b(2,5\text{mm})=0,0162$ Hz, d) $f_b(2\text{mm})=0,0259$ Hz, e) $f_b(1,5\text{mm})=0,0356$ Hz, f) $f_b(1\text{mm})=0,1067$ Hz [41]

Autor [41] je primijetio kako odabir neoštećenog područja ima velik utjecaj na krajnji rezultat. Također u realnim situacijama neoštećeno područje je teško, ako ne i nemoguće odrediti. Rješenje tog problema je ponuđeno u literaturi [43]. Ideja je pronaći točku infleksije na faznom profilu piksela, koja bi približno odgovarala slijepoj frekvenciji za taj piksel. Fazni profili oštećenih piksela pri višim frekvencijama su linearni te na taj način slijede ponašanje neoštećenog piksela. Pri nižim frekvencijama, a ovisno o dubini oštećenja, fazni profili oštećenih piksela odstupaju od linearnog ponašanja. Na temelju ovog, predložen je automatski algoritam koji bi očitavao frekvenciju na kojoj počinje odstupanje od linearnog ponašanja. Ta frekvencija odgovara slijepoj frekvenciji. Algoritam procjenjuje nagib pravca temeljen na metodi najmanjih kvadrata, a analiza počinje od najviše razlučive frekvencije te se kreće prema nižim frekvencijama. Ovakav pristup ne zahtijeva izračun faznog kontrasta niti poznavanje neoštećenog područja. Metoda je isprobana na uzorku od pleksiglasa (slika 39.b), a rezultati su dani na slici 43.



Slika 43. Fazni profili za 6 oštećenja na uzorku PLEXI014, uspoređeni s faznim profilom zdravog područja [43]

Rezultati dobiveni i izračunom faznog kontrasta i rezultati dobiveni automatskim traženjem slijepe frekvencije, prikazani su na slici 44.a. Na slici 44.b su prikazane lokacije piksela korištenih za izračun slijepe frekvencije na faznoj slici $f = 0,0033 \text{ Hz}$.



Slika 44. a) Korelacijski rezultati između dubine oštećenja i slijepe frekvencije dobivene izračunom (plava krivulja) i automatskim traženjem (crna krivulja); b) fazna slika s lokacijama oštećenih piksela [43]

Za pet od šest oštećenja na uzorku, procijenjene vrijednosti slijepe frekvencije su jednake za obje metode, slika 44. Odstupanje postoji samo u procjeni slijepe frekvencije najbližeg oštećenja.

Metoda je uspješno primjenjena i na drugim materijalima, poput akrilnog stakla [44-47].

4.7. DEKOMPOZICIJA VLASTITIH VRIJEDNOSTI

Fourierova transformacija je vrijedan alat koji prebaciva signal iz vremenske domene u frekvencijsku, međutim prilikom transformacije kao bazna funkcija se koriste sinusoide što i nije najprikladniji izbor za termografske podatke budući da su oni, po svojoj naravi, tranzijentni signali. Dekompozicija vlastitih vrijednosti (eng. singular value decomposition, SVD) je alternativni alat u kojim se izvače prostorni i vremenski podatci iz matrice signala u kompaktniji i jednostavniji zapis. SVD se ne oslanja na bazne funkcije već se temelji na transformaciji svojstvenog vektora koji formira ortonormalni prostor. SVD je jako sličan analizi glavnih komponenti (eng. principal component analysis, PCA) s razlikom što SVD istovremeno provodi PCA i u redovima i u stupcima matrice.

SVD matrice $M \times N$ ($M > N$) može biti izračunat [48]:

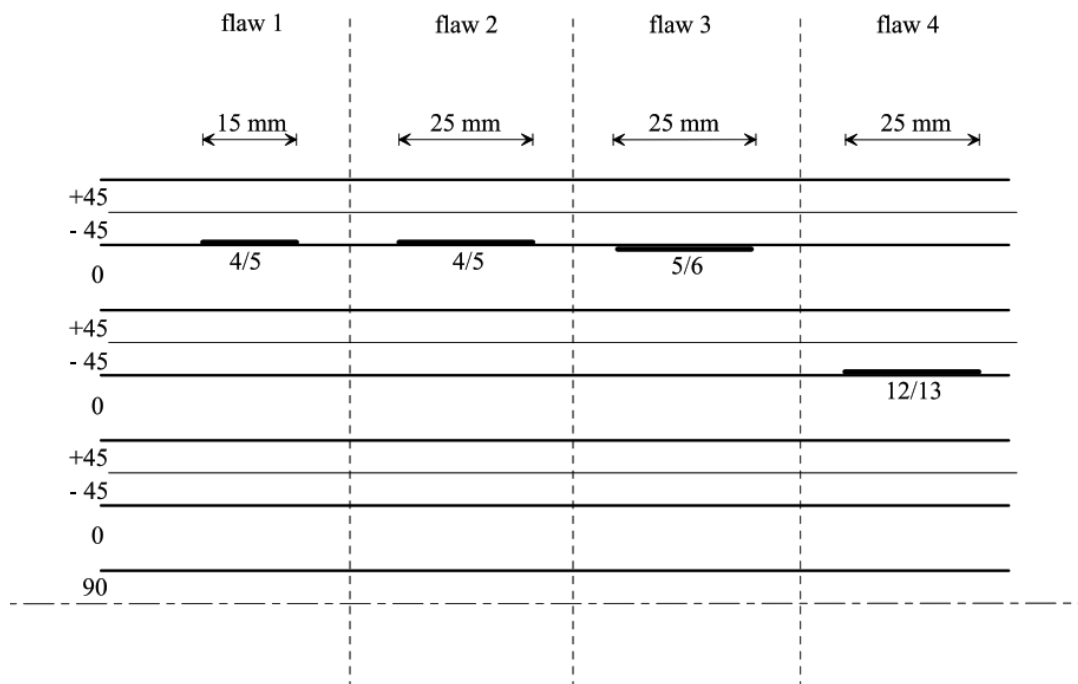
$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{R}\mathbf{V}^T \quad (33)$$

gdje je \mathbf{U} ortogonalna matrica $M \times N$, \mathbf{R} je dijagonalna matrica $N \times N$ (gdje su singularne vrijednosti matrice \mathbf{A} u dijagonali), a \mathbf{V}^T je transponirana matrica $N \times N$.

Dakle, kako bi se SVD primijenio na termografsku sekvencu potrebno je preorganizirati podatke kao 2D $M \times N$ matricu \mathbf{A} . Uobičajeno se preorganiziraju termogrami tako da je svaki stupac matrice vremenska promjena temperature za svaki piksel. Na taj način su redci matrice \mathbf{A} organizirani kao prostorna varijacija. Na ovaj način stupci \mathbf{U} predstavljaju set ortogonalnih statističkih MODova poznatijih pod nazivom empiričke ortogonalne funkcije (EOF) koje opisuju prostornu varijaciju podataka.

Glavne komponente (PCs), koje predstavljaju vremensku varijaciju, poredane su u redcima matrice \mathbf{V}^T . Prvi EOF predstavlja najkarakterističniju varijabilnost podataka; drugi EOF će prikazivati drugu najkarakterističniju varijabilnost i tako dalje. Obično originalni podatci mogu biti reprezentativno prikazani tek s nekoliko prvih EOFa. Tipično, sekvenca od tisuću termograma se može dovoljno dobro opisati s deset ili manje EOFa.

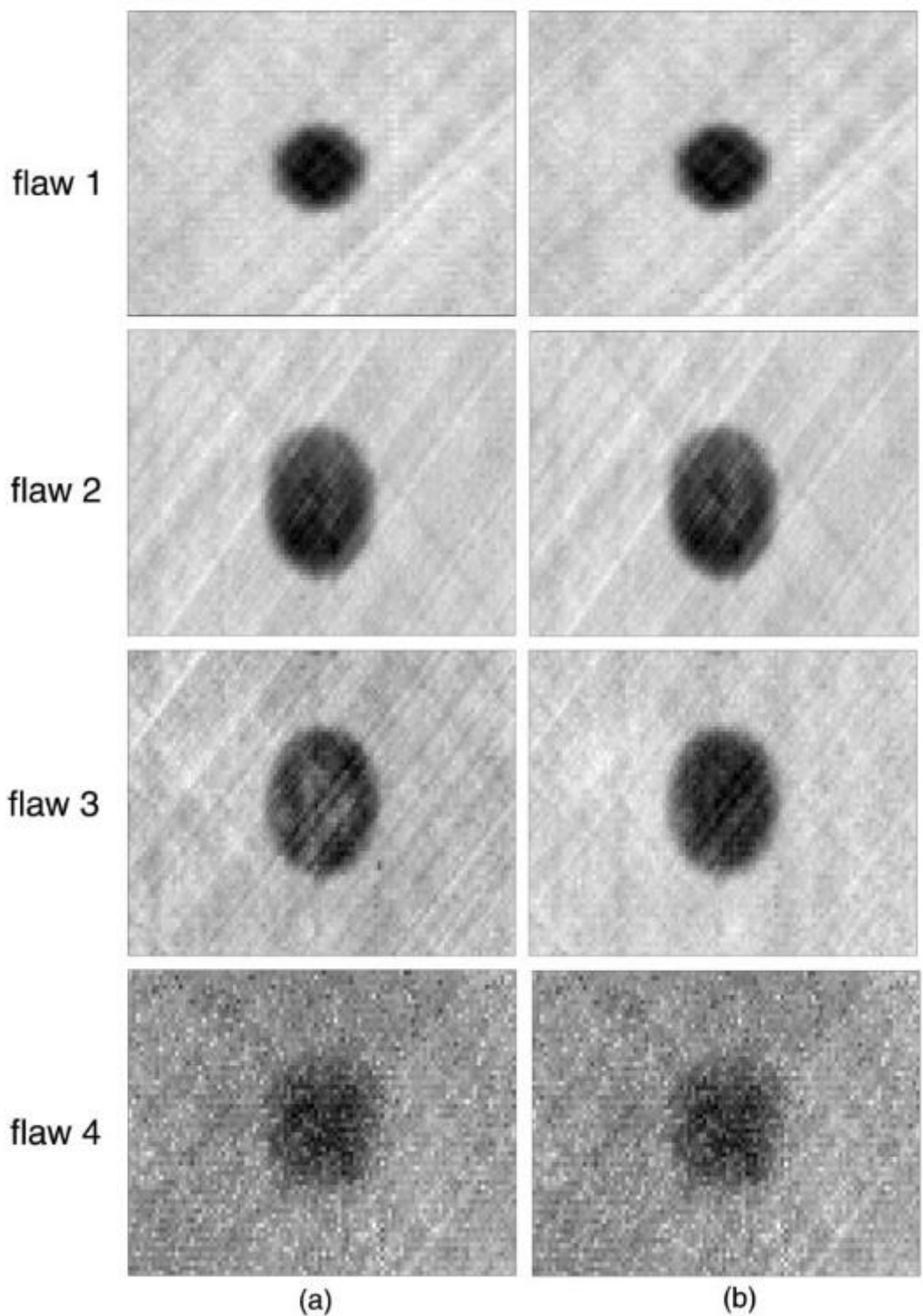
Eksperimentalni rezultati su dobiveni na uzorku kompozitnog materijala: 50 slojeva AS4/3501 unutar kojih su umetnuti kružni teflonski umetci na različitim dubinama, kao na slici 45. To su redom greška 1: krug promjera 15 mm na dubini između četvrtog i petog sloja, greška 2: krug promjera 24 mm na dubini između četvrtog i petog sloja, greška 3: krug promjera 25 mm na dubini između petog i šestog sloja i greška 4: krug promjera 35 mm na dubini između dvanaestog i trinaestog sloja.



Slika 45. Pedesetoslojni kompozitni uzorak s kružnim teflonskim umetcima - plan laminiranja [48]

Uzorak je ispitan koristeći konvencionalnu pulsnu termografiju s pobudom ksenonske bljeskalice pogonjene s jedinicom koja je sposobna emitirati 6 kJ energije. Fotonskim infracrvenim detektorima je sniman odgovor uzorka na pobudu. Frekvencija uzorkovanja za prve 3 opisane greške je 200 Hz , a snimljeno je 300 termograma za svaku grešku. Ukupno vrijeme snimanja je 1.5 s po uzorku. Za grešku 4, zbog znatno veće dubine na kojoj se greška nalazi, ukupno vrijeme snimanja je povećano na 10 s , pa je frekvencija snimanja smanjena na tek 30 Hz , ukupno ponovo rezultirajući s 300 termograma po sekvenci.

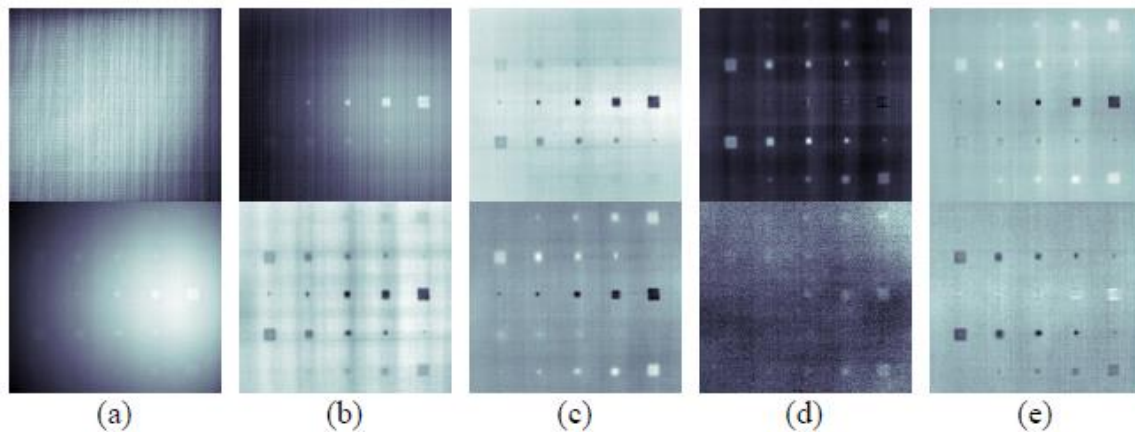
Na slici 46. Uspoređeni su rezultati dobiveni usporednim korištenjem metode PPT i PCA. Razlike u rezultatima dobivenim PPT i PCA metodom su vrlo male i gotovo neprimjetne, ali autor navodi kako rezultati dobiveni PCA metodom daju čišći izgled termograma te zaključuje kako je tu razina šuma nešto niža nego na termogramima dobivenima PPT metodom.



Slika 46. Obradene slike: a) PCA, b) PPT [48]

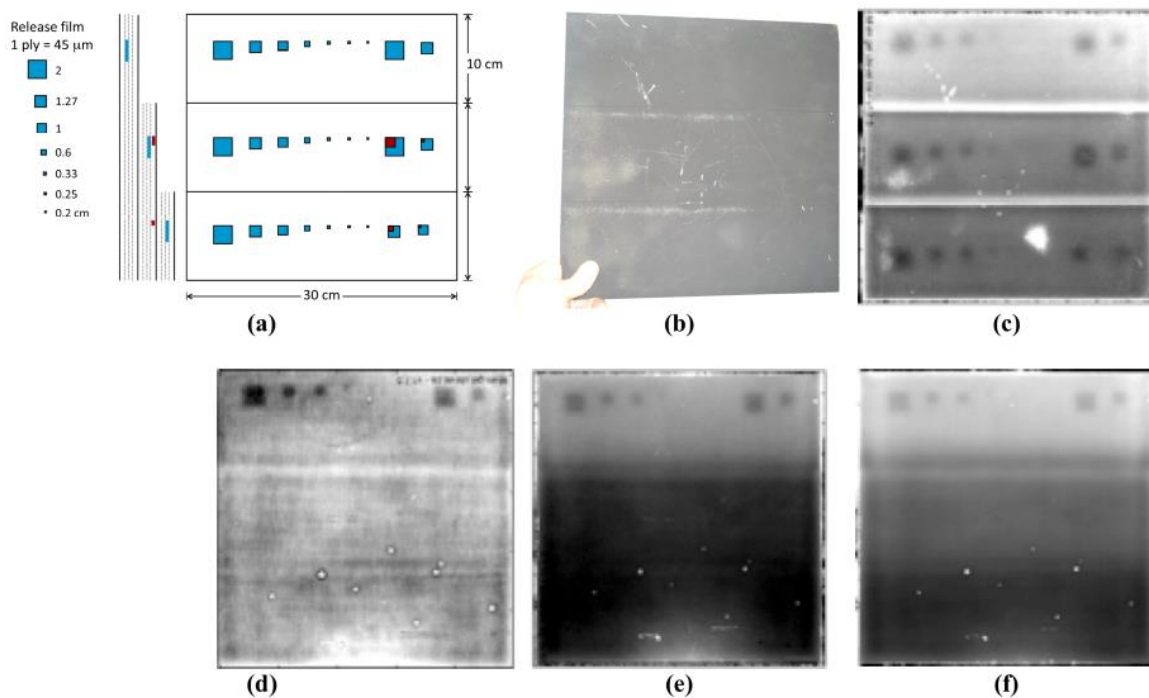
Autori [41] pokazuju EOFe u rastućem nizu. U prvom retku prva slika (EOF_1) prikazuje utjecaj vigneting i fixed pattern noisea. FPN je prisutan i na drugoj slici (EOF_2) uz utjecaj nejednolikog zagrijavanja. Zanimljivo, na idućim slikama nema utjecaja degradacije signala već se vide isključivo oštećenja i smjer vlakana u matrici kompozitnog materijala. Iz posljednje tri slike moguće je detektirati 22 od 25 prisutnih grešaka. U drugom retku, kada je SVD

primijenjen na obrađene podatke, detektabilnost grešaka je povećana te je moguće prepoznati 24 od 25 prisutnih grešaka, slika 47. [41].



Slika 47. PCT rezultati s oduzimanjem hladne slike: a) EOF₁, b) EOF₂, c) EOF₂, d) EOF₄ i e) EOF₅ [41]

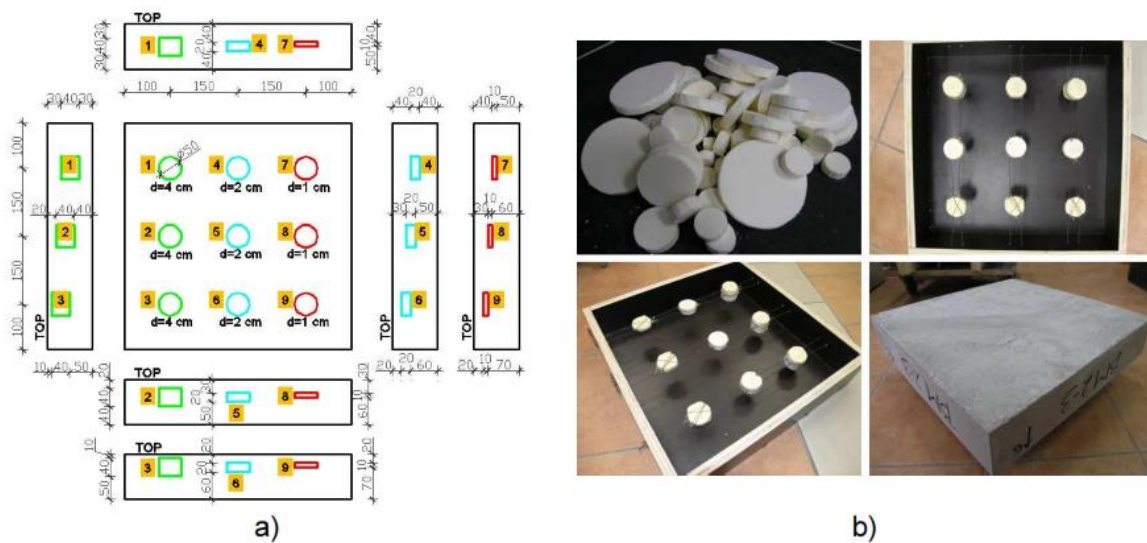
Autori [49] uspoređuju PPT i PCA metodu. Uzorak na kojem se radi usporedba je kompozitni materijal GLARE (eng. Glass reinforced aluminum) koji ima najširu primjenu u zrakoplovstvu. Na slici 48 je prikazan shematski prikaz uzorka s planom laminacije, fotografija uzorka te rezultati.



Slika 48. Glare uzorak: a) shema s prikazom površine oštećenja te lokacijom oštećenja unutar kompozitne ploče; b) fotografija uzorka; c) PPT fazna slika za $f=0,52$ Hz; d) EOF₅; e) PPT fazna slika za $f=0,44$ Hz; f) slika asimetrije [49]

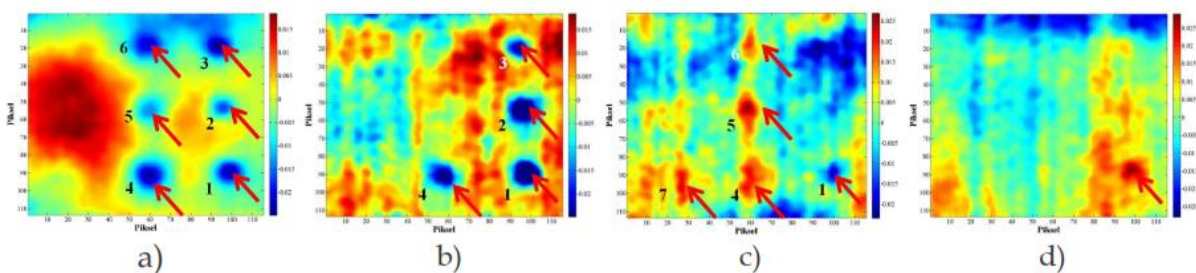
Na slici 48.c je prikazan fazegram ($f = 0,52 \text{ Hz}$) koji je dobiven pregledom uzorka PT sa stražnje strane (desna strana na slici 48.a), a zatim su dobiveni podatci obrađeni FFT. Na slici možemo vidjeti 15 (od 31) najvećih oštećenja. Uzorak je ispitan i PT s prednje strane (lijeva strana na slici 48.a) te naknadno obrađen s PCA. Detektirano je tek šest najvećih oštećenja (slika 48.d i 48.e), i to onih koji se nalaze u najtanjem dijelu materijala, debelom tek kao jedan sloj staklenih vlakana i jedan sloj aluminijski.

Autori [50] su primijenili PCA metodu na termografski slijed podataka te to nazvali Principal Component Termography (PCT). Materijal je bio beton, a oštećenja su simulirana umetcima od polistirena različitih promjera i debljina koje su autori postavili na različite dubine unutar betonskog bloka, kao na slici 49:



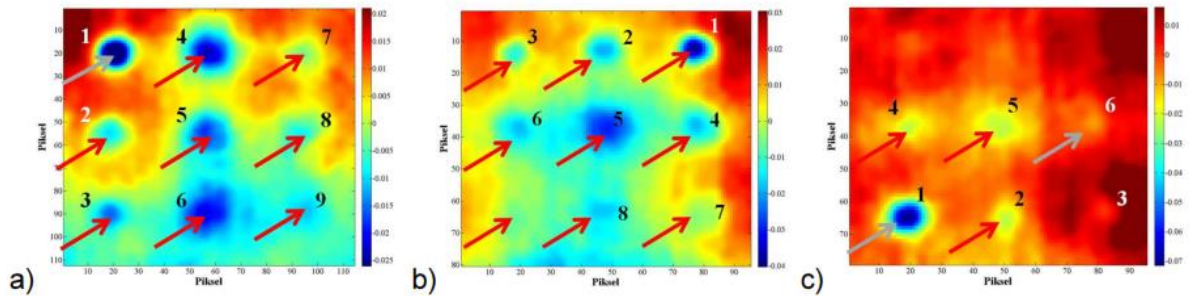
Slika 49. a) Schematski prikaz uzorka; b) fotografije uzorka i polistirenskih umetaka [50]

Na slici 50 je prikazan 2., 3., 4., i 6. EOF. Autori zaključuju da se oštećenja najbolje vide na EOF₂, jer je tu vidljivo 6 od 9 oštećenja. Ukupno je uspješno detektirano 7 od 9 oštećenja.



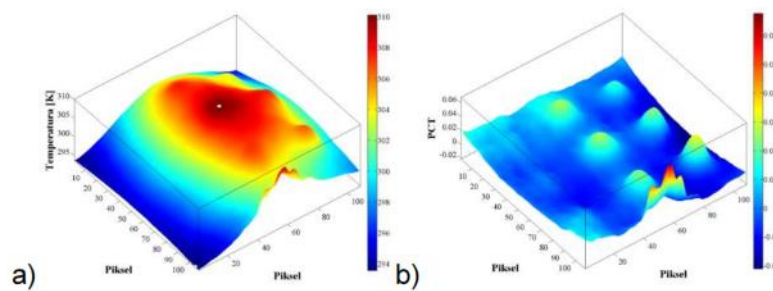
Slika 50. Slike nakon obrade PCT metodom: a) EOF₂, b) EOF₃, c) EOF₄ i d) EOF₆ [50]

Varirana je udaljenost kamere i halogene lampe od površine uzorka. Na slici 51 su prikazani rezultati za udaljenosti: 1,5 m, 2 m i 3 m.



Slika 51. Nakon obrabe PCT metodom: a) EOF₂ na udaljenosti 1.5m; b) EOF₂ na udaljenosti 2m; c) EOF₂ na udaljenosti 3m [50]

Na slici 52 su prikazani 3D termogram i PCT (EOF₂). Na termogramu je vidljiv jak utjecaj nejednolikog zagrijavanja, koje je u termografiji snažan uzrok nesigurnosti u pregledu stanja uzorka. Na obrađenim rezultatima se ne vidi utjecaj nejednolikog zagrijavanja, čime je problem riješen.



Slika 52. Nakon obrade PCA metodom, udaljenost 2m: a) najbolji termogram; b) PCT (EOF₂) [50]

Ova metoda je uspješno primijenjena i kod drugih autora [51, 52].

5. KARAKTERIZACIJA OŠTEĆENJA

Oštećenje je u potpunosti definirano ako je poznat položaj, oblik, debljina i dubina na kojoj se to oštećenje nalazi. U ovom poglavlju je pregledana literatura koja se koncentrira na primjenu dosad spomenutih metoda obrade signala nakon mjerenja na stvarne uzorke u kojima su oštećenja simulirana najčešće ili tankim umetcima teflona različite geometrije na različitim dubinama ili provrtima ravnog dna različitih promjera na različitim dubinama. Autori se bave problemima utjecaja složenosti same geometrije izratka na mogućnost detekcije oštećenja, utjecajem geometrijskih karakteristika simuliranih oštećenja na mogućnost detekcije oštećenja te pronalaženjem korelacije referentnog parametra svake metode (temperaturni kontrast u ovisnosti o vremenu, fazni kontrast u ovisnosti o frekvenciji i slično) i dubine na kojoj se promatrano oštećenje nalazi. U nastavku je dan pregled najuspješnijih istraživanja u pogledu karakterizacije oštećenja.

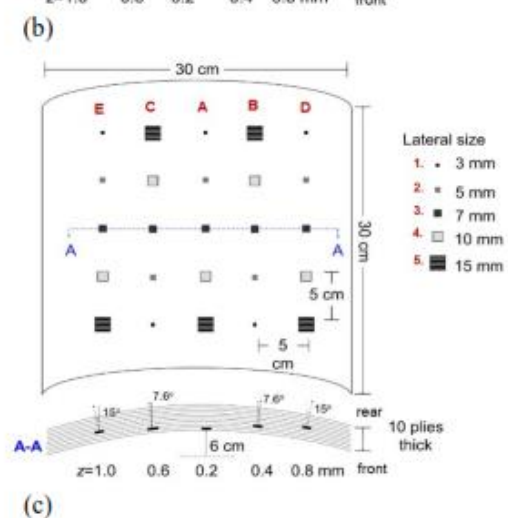
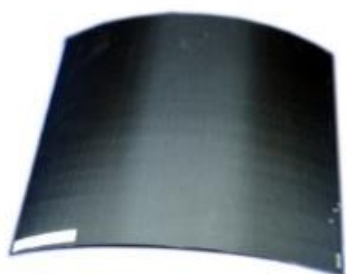
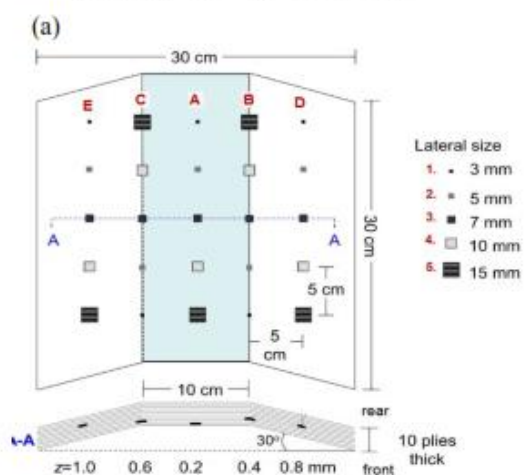
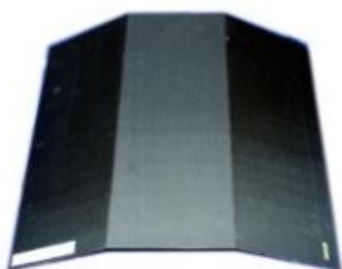
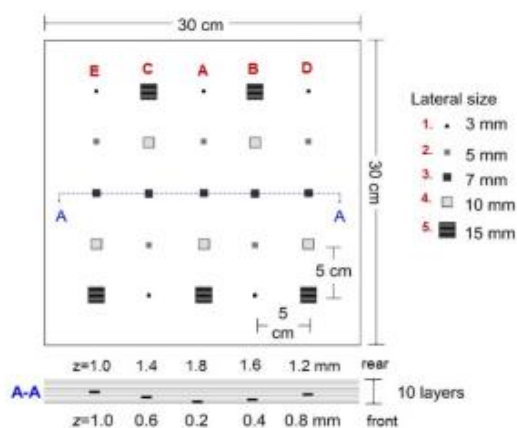
5.1. UTJECAJ SLOŽENOSTI GEOMETRIJE UZORKA

U prijašnjim radovima, ispitivanja su rađena na ravnim (planarnim) uzorcima. Takav slučaj je vrlo malo moguć u realnim okolnostima. Autori [53] su razmatrali utjecaj oblika uzorka na rezultate mjerenja. U svrhu ispitivanja izrađena su tri CFRP uzorka: SP1 – planarni uzorak, SP2 – trapezoidni uzorak i SP3 – cilindrični uzorak. Svi uzorci su bili izrađeni na jednak način od jednakih materijala i jednakih su debljina. Svi uzorci imaju 25 teflonskih umetaka koje simuliraju delaminaciju unutar kompozitnog materijala. Umetci su različitih promjera i smješteni su na različitim dubinama, slika 53.

Korištena oprema i parametri snimanja za svaki od uzoraka su prikazani u tablici 4.

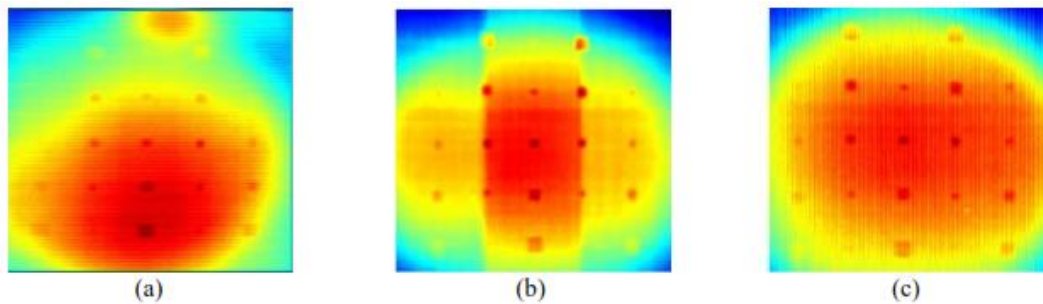
Tablica 4. Korištena oprema i parametri snimanja [53]

Experimental Equipment		Acquisition Parameters		
Thermal stimulation:				
➤ Photographic Flashes: Balcar FX 60		Sampling rate, f_s	SP1 157 Hz	SP2 157 Hz
➤ pulse duration: 5ms thermal pulse,		Acquisition duration, t_{acq}	6.37 s	6.7 s
➤ deposited energy: 3.2 KJ/ flash (total energy deposited 6.4 KJ).		Time interval, $\Delta t = 1/f_s$	6.3 ms	6.3 ms
Thermographic monitoring:		Total number of frames	1000	1052
Santa Barbara infrared camera, Focal Plane Array, nitrogen cooled, InSb, 320x256 pixels				1076



Slika 53. Uzorci različite geometrije s planom teflonskih umetaka: a) planarni, b) trapezni, c) cilindrični [53]

Neobrađeni termogrami su prikazani na slici 54. Vidljiv je utjecaj nejednolikog zagrijavanja, koji se najviše očituje na planarnom uzorku SP1.



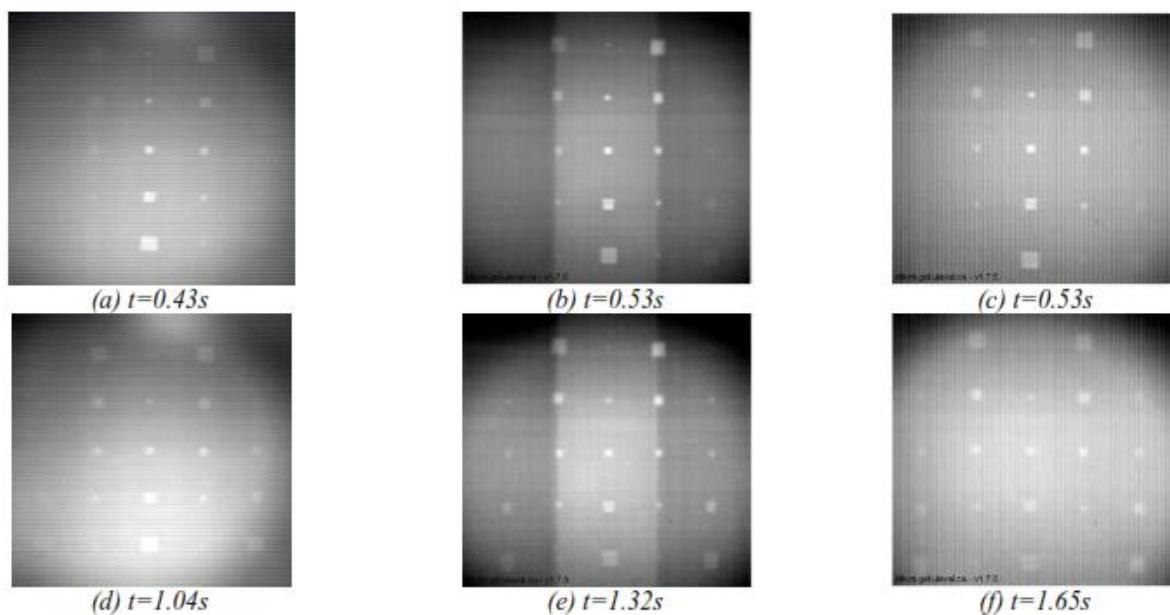
Slika 54. Neobrađeni termogrami snimljeni $t=1,15s$ nakon vanjske uzbude: a) planarni uzorak, b) trapezni uzorak, c) cilindrični uzorak [53]

Snimljene sekvence termograma su obrađene TSR, PPT i PCT metodama, a rezultati i utjecaj geometrije uzorka na detektabilnost oštećenja bit će diskutirani u nastavku.

1) Neobrađeni termogrami

Na slici 55 prikazani su termogrami u različitim vremenskim intervalima. U prvom stupcu su prikazani termogrami planarnog uzorka (SP1), u drugom stupcu trapezoidnog uzorka (SP2) a u trećem stupcu cilindričnog uzorka (SP3). Ono što je vidljivo bez obzira na oblik uzorka je da su plića oštećenja vidljiva u ranijim vremenskim intervalima, dok je dubljim oštećenjima trebao duži vremenski interval kako bi se razvio dovoljan temperaturni kontrast potreban za detekciju oštećenog područja. Na slici 55 je vidljivo da su u ranijim vremenima tri serije plićih oštećenja (A, B i C) vidljive. Kako vrijeme odmiče, na nekim termogramima se vide i dvije dublje serije oštećenja (D i E). Suprotno tomu, u kasnijim vremenima dolazi do gubljenja temperaturnog kontrasta na seriji s plićim oštećenjima te one postaju slabo vidljive. Zaključno, manja oštećenja na većim dubinama uglavnom daju slabiji temperaturni kontrast i time im je smanjena mogućnost detekcije.

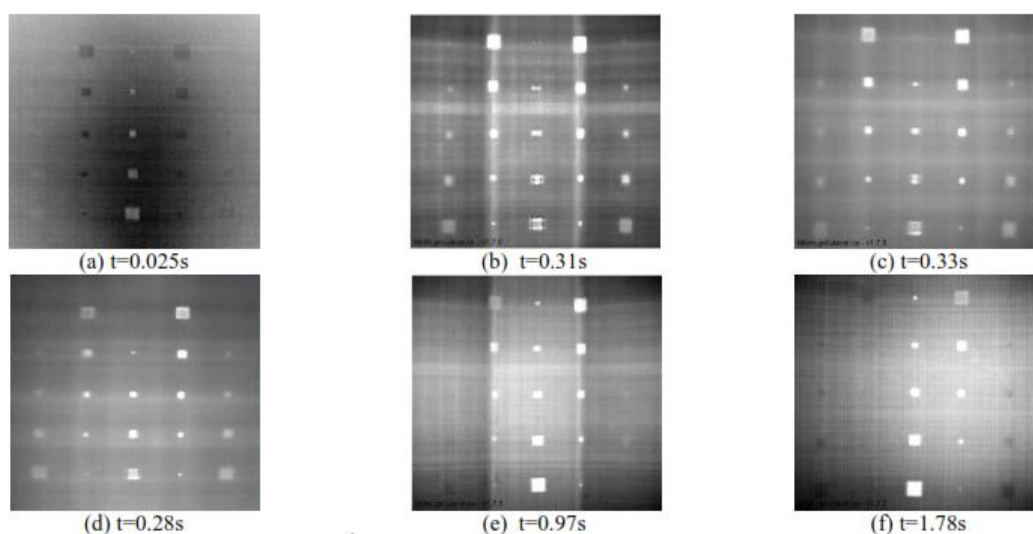
S gledišta utjecaja geometrije uzorka na rezultate može se primijetiti kako je trapezoidnom i cilindričnom uzorku postignut bolji temperaturni kontrast. Autori se slažu da je to moguća posljedica uniformnijeg zagrijavanja tih površina. Na planarnom uzorku SP1 vidljive su 3 serije najplićih oštećenja, dok na trapezoidnom uzorku nisu detektirana samo najmanja oštećenja na najvećim dubinama: oštećenje od 3 mm na dubinama od 0,8 mm i 1 mm. Na cilindričnom uzorku također nisu detektirana samo najmanja oštećenja na najvećim dubinama: oštećenje od 3 mm na dubinama od 0,8 mm i 1 mm te oštećenje od 5 mm na dubini od 1 mm. Ovo je posljedica toga što su krajevi trapezoidnog i cilindričnog uzorka bliže bljeskalici pa su tijekom izlaganja vanjskoj toplinskoj pobudi imali priliku apsorbirati više topline nego ista područja na planarnom uzorku.



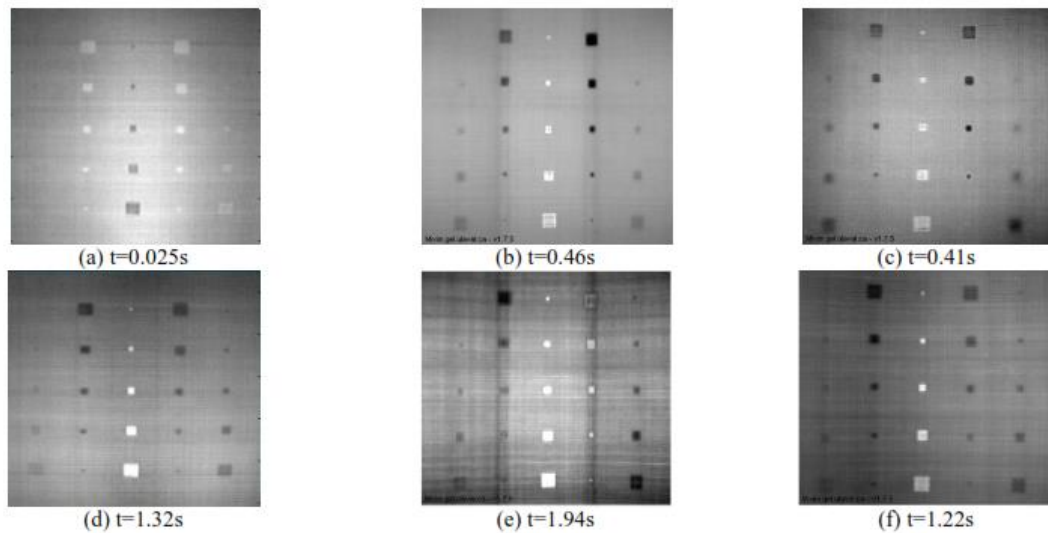
Slika 55. Termogrami za SP1 (lijevi stupac), SP2 (srednji stupac) i SP3 (desni stupac) snimljeni u različitim vremenima: gornji redak – ranije vrijeme; donji redak: kasnije vrijeme [53]

2) Rekonstrukcija termografskog signala

Sekvenca termograma je rekonstruirana sintetskim podacima preko TSR metode. Napravljena je prva i druga derivacija krivulje hlađenja, a rezultati su na slici 56 i 57. U usporedbi s neobrađenim podacima, obrađeni podaci osiguravaju bolju detektabilnost. Na sintetskim podacima dobar temperaturni kontrast je ostvaren u ranijim vremenskim intervalima, što je jasan pokazatelj veće osjetljivosti sintetskih podataka. Na obrađenim podacima u slučaju trapezoidnog uzorka moguće je detektirati svih 25 simuliranih oštećenja, na cilindričnom uzorku 24 oštećenja, a na planarnom uzorku 23 oštećenja (slika 56). Također, na trapezoidnom uzorku je vidljiva i orijentacija karbonskih vlakana.



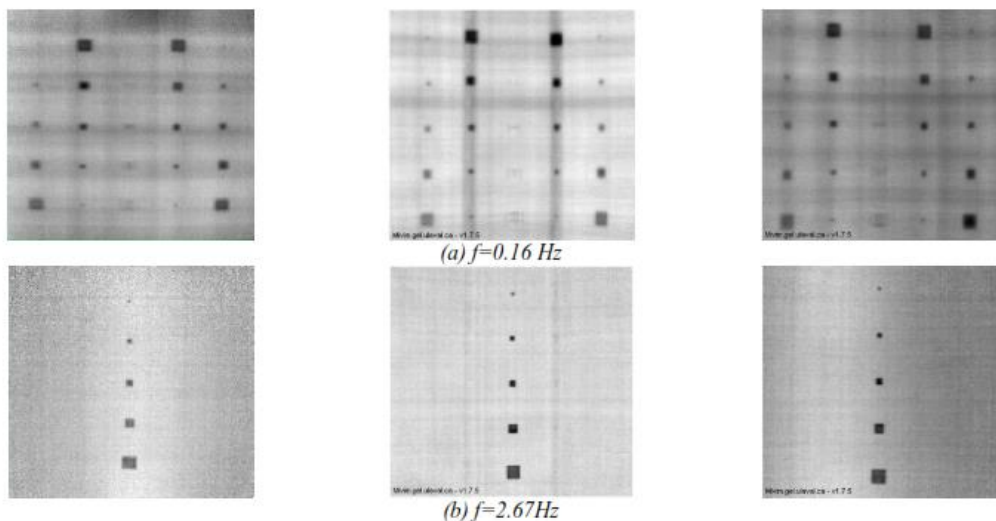
Slika 56. Prva vremenska derivacija krivulje hlađenja opisana polinomom 4. reda [53]



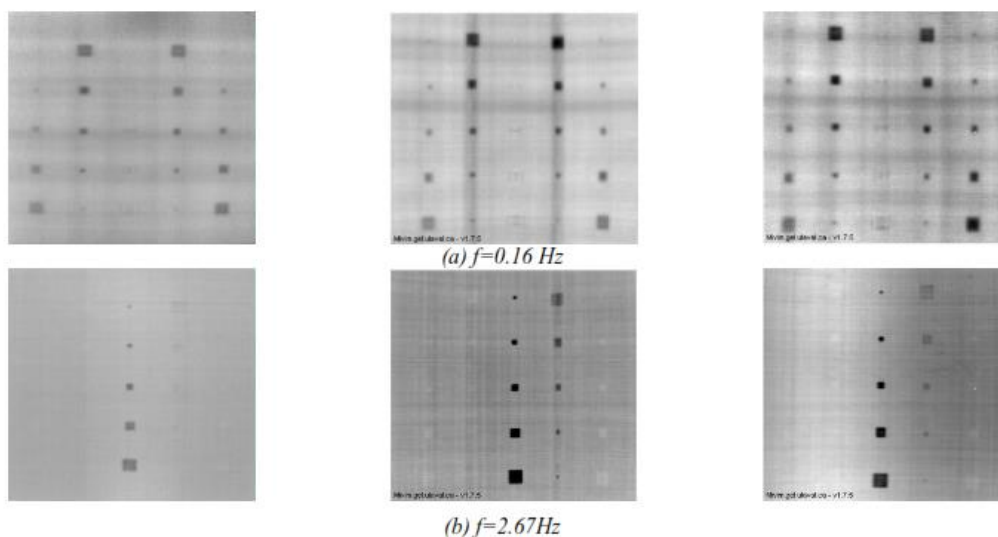
Slika 57. Druga vremenska derivacija krivulje hlađenja opisana polinomom 4. reda [53]

3) Pulsno fazna termografija

FFT algoritam je primijenjen na dva seta podataka, neobrađeni podaci (slika 58) i TSR data (slika 59). Na nižim frekvencijama se u pravilu bolje vide dublja oštećenja, dok su na višim frekvencijama vidljiva samo najplića oštećenja. Također je primjetno da su rezultati za neobrađene podatke i TSR data na nižim frekvencijama gotovo isti, međutim na višim frekvencijama je vidljivo da su neobrađeni podatci više onečišćeni šumom pa je samim time i smanjena mogućnost detekcije oštećenja. Na trapezoidnom uzorku je detektirano svih 25 oštećenja.



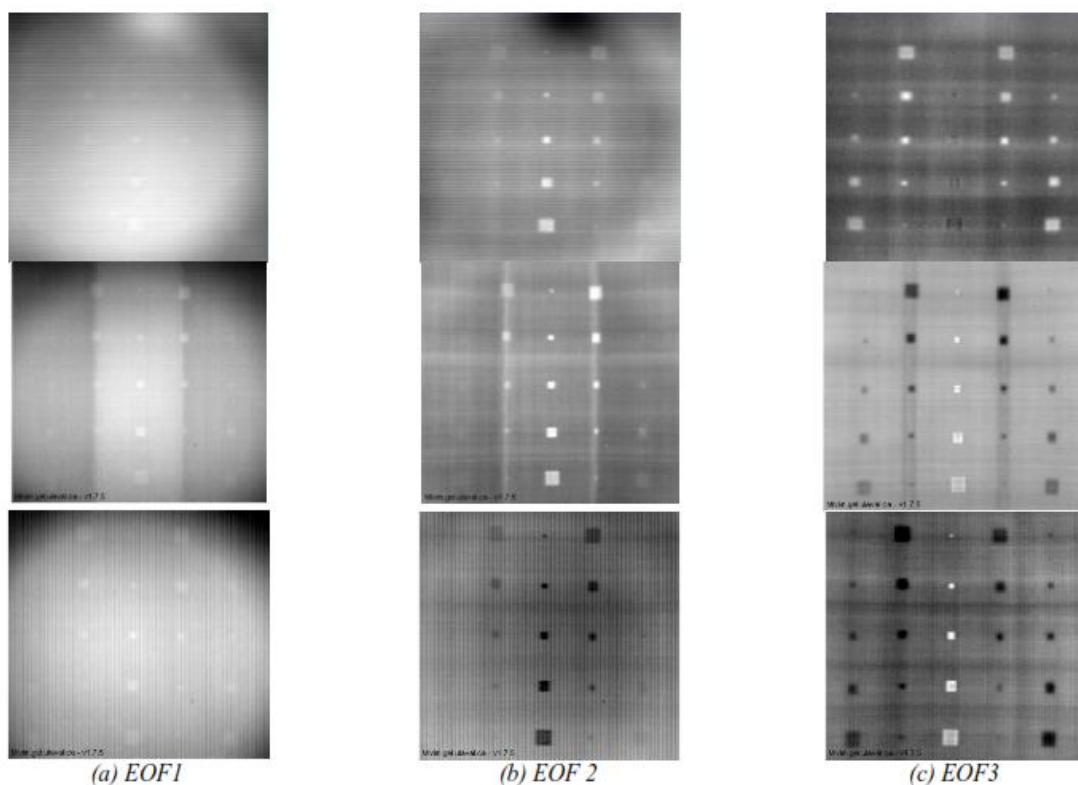
Slika 58. FFT metoda primjenjena na raw set podataka: a) $f=0.16$ Hz; b) $f=2.67$ Hz [53]



Slika 59. FFT metoda primjenjena na TSR set podataka: a) $f=0.16$ Hz; b) $f=2.67$ Hz [53]

4) Analiza glavnih komponenti

Slični rezultati su dobiveni i nakon PCA analize: poboljšana je mogućnost detekcije oštećenja. Kao što se vidi na slici 60, EOF_1 na svim uzorcima prikazuje utjecaj nejednolikog zagrijavanja na površinu uzorka, EOF_2 na svim uzorcima otkriva plitka oštećenja na dubinama od $0,2$ mm, $0,4$ mm i $0,6$ mm, dok EOF_3 na svim uzorcima otkriva dublja oštećenja koja se nalaze na dubini $0,8$ mm i 1 mm.



Slika 60. a) EOF₁; b) EOF₂; c) EOF₃. U gornjem redku je prikazan uzorak SP1, u srednjem redku uzorak SP2, a u donjem redku uzorak SP3 [53]

U tablici 5. je dan kratki pregled mogućnost prikazanih metoda ovisno o složenosti geometrije uzorka.

Tablica 5. Kratki pregled rezultata korištenih metoda [53]

Data Processing	Planar (SP1)		Trapezoid (SP2)		Curved (SP3)	
	Insertions detected	Detection rate	Insertions detected	Detection rate	Insertions detected	Detection rate
Raw temperature	20	80%	23	92 %	22	88%
1st time derivative	23	92%	25	100%	24	94%
2nd time derivative	23	92%	24	94%	24	94%
Raw PPT	24	94%	25	100%	24	94%
Synthetic PPT	24	94%	25	100%	24	94%
PCT	24	94%	25	100%	25	100%

5.2. UTJECAJ GEOMETRIJE OŠTEĆENJA

Kao što je i primijećeno, vrijednost faze nakon obrade sekvence termograma FFTom ovisi o veličini oštećenog područja kao i o debljini oštećenja. Zamisli li se da su oštećenja u CFRP uzorku simulirana na dva načina: provrtom ravnog dna i umetkom tankog filma teflona;

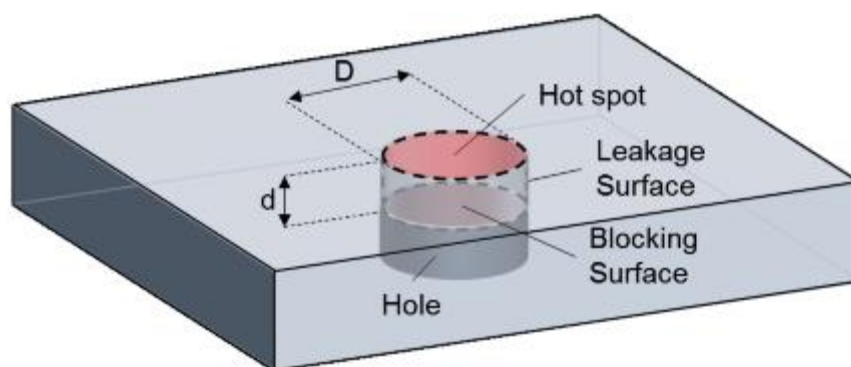
oboje jednakih promjera oštećenja. Da li bi oba oštećenja jednako utjecala na toplinsku sliku uzorka?

Drugi problem je geometrija oštećenja koja u idealnom slučaju je krug, međutim u praksi može biti bilo koja nepravilna površina. Kako zaključke izvedene iz laboratorijskih ispitivanja na pripremljenim uzorcima prenijeti na stvarne konstrukcije?

Ovaj problem je naveo autore [54] da uvedu pojam normaliziranog promjera oštećenja.

U najjednostavnijem obliku, aktivna termografija je vizualna identifikacija oštećenja temeljena na toplinskom kontrastu između oštećenog područja i neoštećenog područja uzorka snimanog IC kamerom čija je površina bila izložena tranzijentnom toplinskom toku. Odlučujući faktori o tome hoće li doći do detekcije oštećenja unutar zdravog materijala ili ne su vezani za vrstu greške, veličinu greške i njen položaj u materijalu. Idealno oštećenje (eng. „best-case“ scenario) bi bila šupljina unutar krutog materijala, kojoj je promjer značajno veći od dubine jer bi u tom slučaju ravno dno predstavljalo adijabatsku prepreku toplinskom toku (eng. Blocking surface), dok bi se zarobljena toplina odvodila kroz bočne strane materijala (eng. Leakage surface). Upravo ovo odvođenje topline ometa 1D toplinsku sliku (čini je 3D problemom) te zadaje probleme pri detekciji oštećenja malenih promjera na većim dubinama slika 61.

U istraživanju se oštećenja unutar materijala uobičajeno simuliraju provrtima ravnog dna, a mogućnosti termografije kao NDT metode se opisuju kao vjerojatnost da će se prepoznati tako simulirano oštećenje. U slučaju kada je promjer oštećenja veći od dubine oštećenja, na termogramima će se oštećeno područje prikazati kao vruća točka (eng. hot spot). U ranim vremenima bočna površina oštećenja je adijabatska površina koja blokira prolaz toplinskog vala i prolaz topline se može modelirati kao 1D problem. U kasnijim vremenima toplina se odvodi kroz bočne površine oštećenja i pri tome 3D priroda odvođenja topline dominira toplinskom slikom. Kod oštećenja u kojima je promjer oštećenja malen u usporedbi s dubinom oštećenja, 3D efekt postaje dominantan značajno ranije i time ometa detekciju oštećenja, ali i određivanje točne dubine na kojoj se oštećenje nalazi.



Slika 61. Toplina zarobljena površinama FBH unutar objekta od interesa [54]

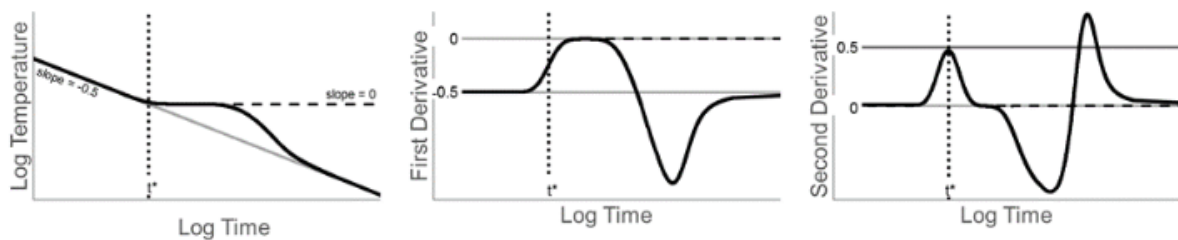
Detektabilnost je povezana s omjerom blokirajuće (eng. Blocking surface) i cureće površine (eng. Leakage surface), a za cilindrični provrt dubine d , i promjera $D = 2r$ se može zapisati kao [54]:

$$\text{Contrast} \propto \frac{\text{Blocking surface}}{\text{Leakage surface}} = \frac{\pi r^2}{2\pi r d} = \frac{D}{4d}. \quad (34)$$

Iz ovog modela moguće je napraviti i kvalitativnu analizu prema kojoj se dubina oštećenja d može izračunati prema izrazu:

$$d = \sqrt{\pi \alpha t^*}, \quad (35)$$

gdje je α toplinska difuzivnost materijala, a t^* vrijeme u kojem se u logaritamskoj domeni krivulja hlađenja nad oštećenim područjem siječe s pravcem krivulje hlađenja neoštećenog područja (pravac s nagibom $-0,5$), slika 62; detaljnije u poglavlju 4.4.



Slika 62. Bezdimenzionalna ovisnost temperature o vremenu hlađenja (lijevo), prva derivacija (sredina), druga derivacija (desno) u polubeskonačnoj ploči s adijabatskim zidom FBHa i omjeru promjera naspram dubine 15 [54]

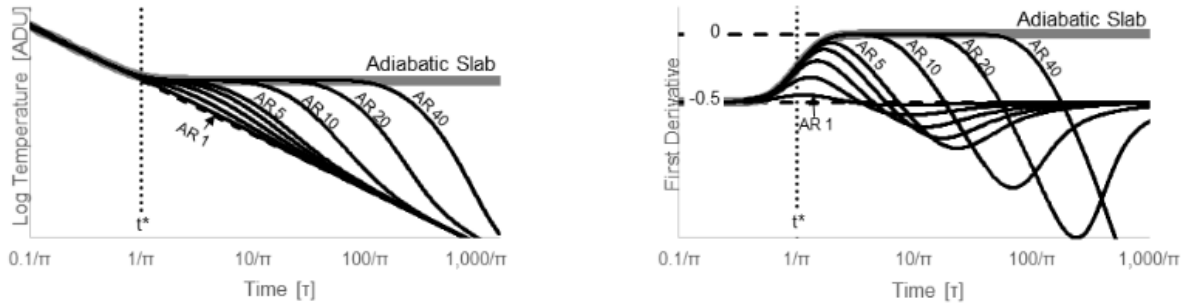
U praksi se takvo oštećenje najčešće simulira provrtom ravnog dna. U pravilu, što je oštećenje veće (odnosno što je omjer promjera greške i dubine na kojoj se nalazi povoljniji) lakše ga je detektirati i to je ponekad moguće i na neobrađenim termogramima. Manja oštećenja zahtijevaju dodatnu obradu signala, a često i veću energiju pobude.

U numeričkom modelu modelirana je ploča s jednim provrtom ravnog dna. Promjer provrta je $2,54 \text{ cm}$, a dubina provrta je varirana od $0,064 \text{ cm}$ do $10,16 \text{ cm}$, kako bi se postigli različiti omjeri promjera naspram dubine provrta (eng. aspect ratio), tablica 6. Vanjska pobuda je modelirana kao toplinski impuls od $100\,000 \text{ W/m}^2$ duljine $2,4 \text{ s}$.

Tablica 6. Omjer promjera naspram dubine FBH korištenih pri numeričkom modeliranju [54]

Aspect Ratio	0.25	0.5	0.75	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40
Diameter[cm]	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54
Depth [cm]	10.16	5.08	3.387	2.54	1.27	0.847	0.635	0.508	0.423	0.363	0.318	0.282	0.254	0.169	0.127	0.102	0.085	0.064

U rezultatima je vidljivo da vrijeme u kojem provrt ravnog dna divergira od temperature pri kojoj se u logaritamskoj domeni krivulja hlađenja nad oštećenim područjem siječe s pravcem krivulje hlađenja neoštećenog područja (pravac s nagibom $-0,5$) raste s porastom omjera promjera naspram dubine provrta, slika 63.

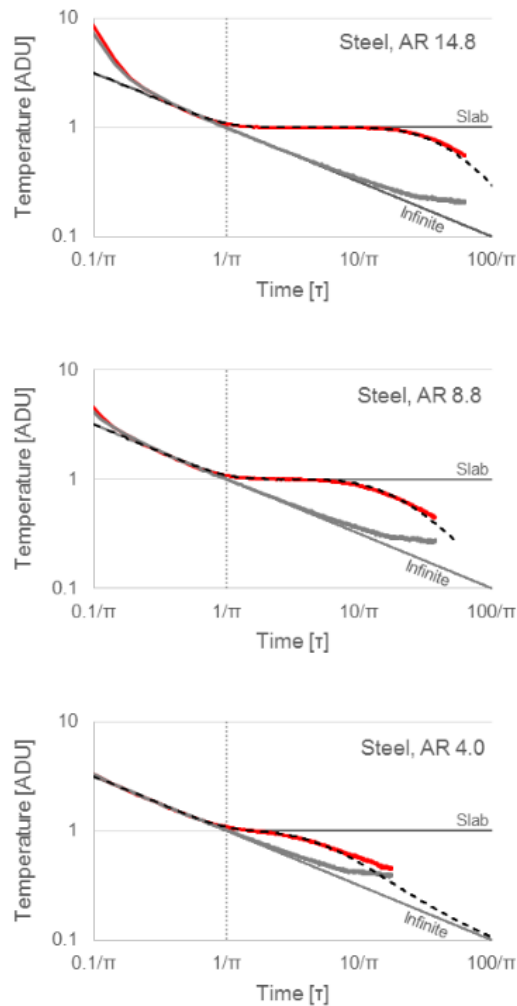


Slika 63. Rezultati dobiveni numeričkim modelom: a) bezdimenzionalna ovisnost temperature o vremenu; b) 1. derivacija [54]

Kako bi se potvrdili rezultati modela, napravljen je i eksperiment. Na čeličnoj ploči debljine 1,27 cm je izglodano deset provrta ravnog dna, prema tablici 7, a rezultati su dani na slici 64.

Tablica 7. FBH u 1.27mm debeloj čeličnoj ploči [54]

Diameter [cm]	5.100	3.820	2.553	2.560	1.608	1.963	1.943	1.288	1.275	0.953
Depth [cm]	0.147	0.170	0.173	0.246	0.239	0.226	0.356	0.325	0.533	0.439
Aspect Ratio	34.6	22.4	14.8	10.4	6.7	8.7	5.5	4.0	2.4	2.2



Slika 64. Usporedba rezultata dobivenih eksperimentom ili numeričkim modelom za različite omjere promjera provrta ravnog dna naspram dubini [54]

U usporedbi modela s eksperimentom vidljivo je da u eksperimentu nije ostvareno adijabatsko stanje za manje omjere promjer provrta naspram dubine provrta. Autor zaključuje da se za takve slučajeve ne može koristiti 1D rješenje prema predloženom teorijskom modelu [55]:

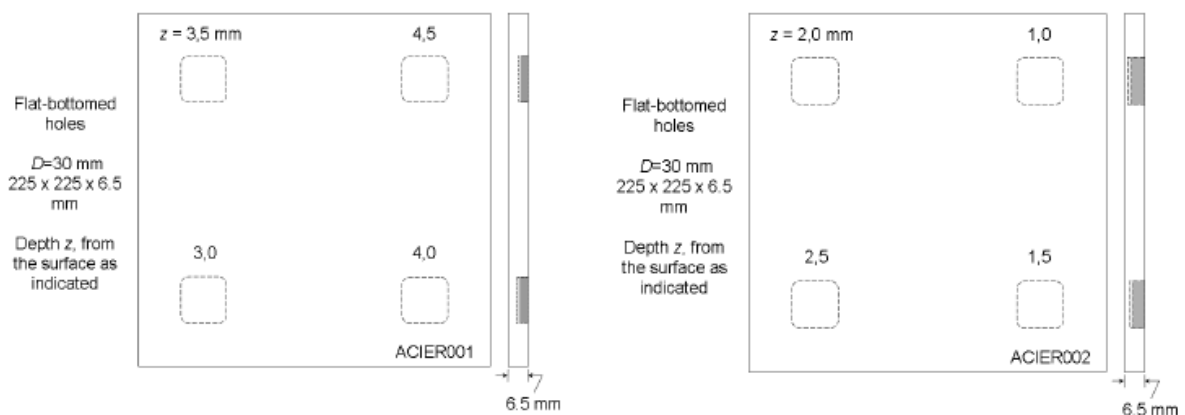
5.3. DUBINA GREŠKE

Ako su poznate toplinske karakteristike materijala, nakon obrade sekvence termograma metodom faznog pulsa (PPT) moguće je odrediti slijepu frekvenciju koja je u izravnoj vezi s dubinom na kojoj se nalazi oštećenje [40]:

$$z_d = C_1 \Phi_d \sqrt{\frac{\alpha_d}{\pi f_b}} + C_2 = C_1(\Phi_d \mu_d) + C_2 \quad (36)$$

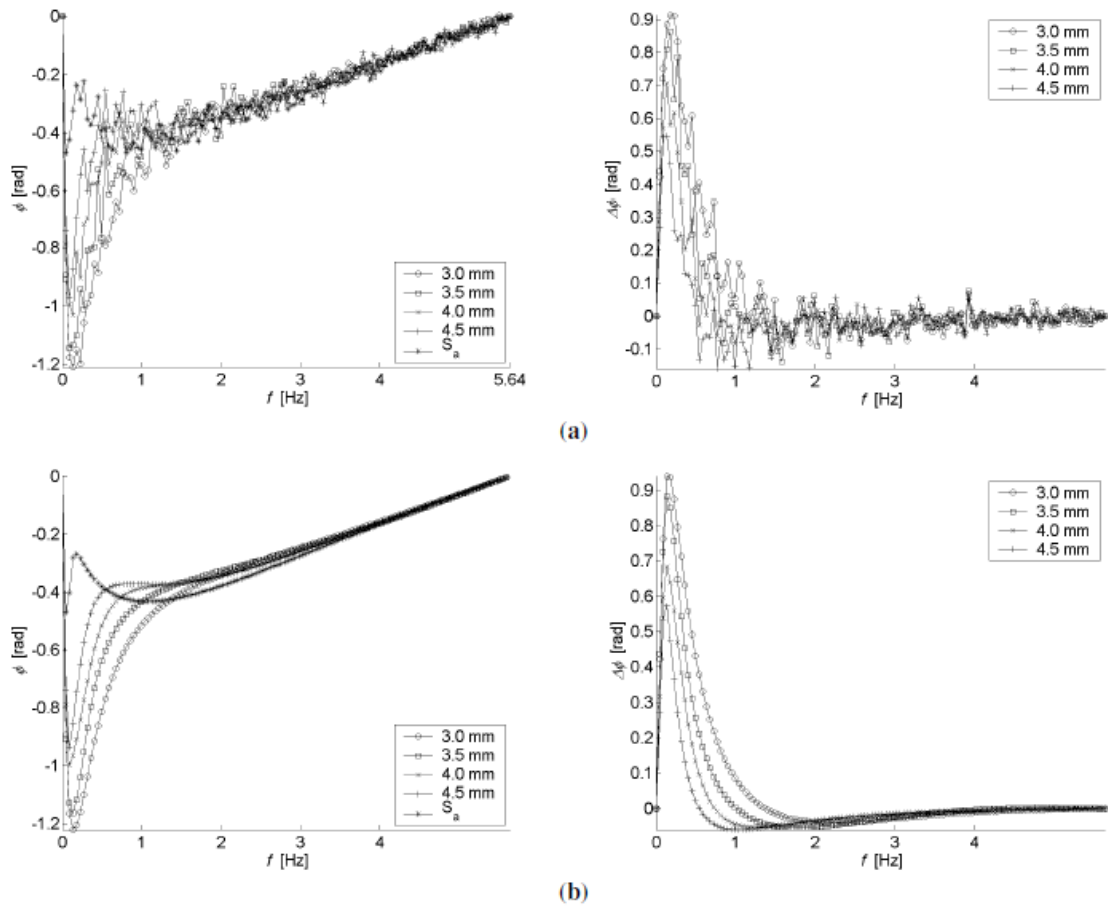
gdje je konstanta C_1 posljedica toplinskih karakteristika materijala, a konstanta C_2 opisuje grešku tijekom fitanja podataka; Φ_d je faza na frekvenciji f_b , a $\mu_d = \sqrt{\frac{\alpha_d}{\pi f_b}}$ je dubina toplinske difuzije, pri čemu je α_d toplinska difuzivnost materijala oštećenja, budući da je pri f_b vidljivo oštećenje.

Rezultati kvantitativne analize su prikazani na dva aluminijska uzorka veličine $225 \times 225 \times 6,5 \text{ mm}$ na kojima su oštećenja simulirana kao 5 provrta ravnog dna dimenzija $30 \times 30 \text{ mm}$ smještenih na različitim dubinama, kao na slici 65.

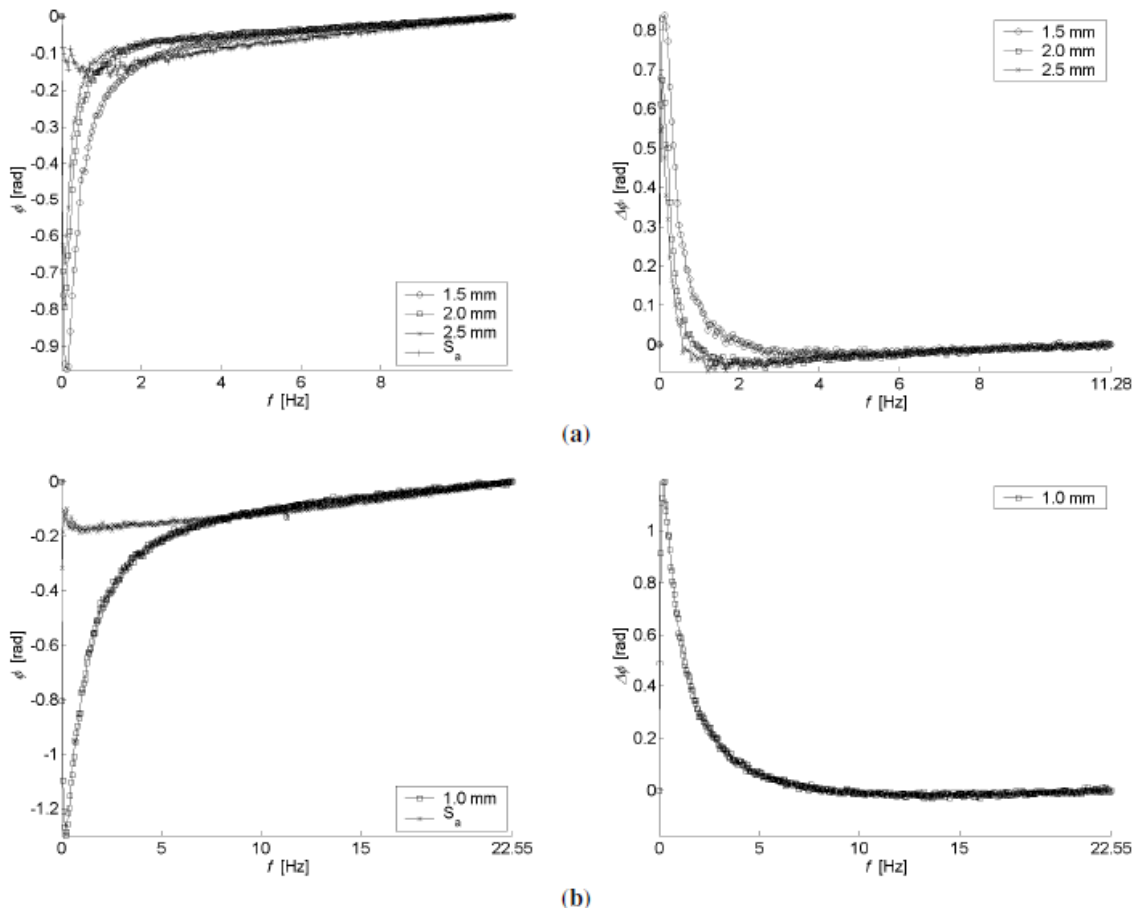


Slika 65. Schema uzoraka: a) ACIER001 i b) ACIER002 s lokacijom i geometrijom provrta. [40]

Na slici 66 i 67 prikazani su fazni profili za oštećena i neoštećeno područje uzorka 1 i 2.

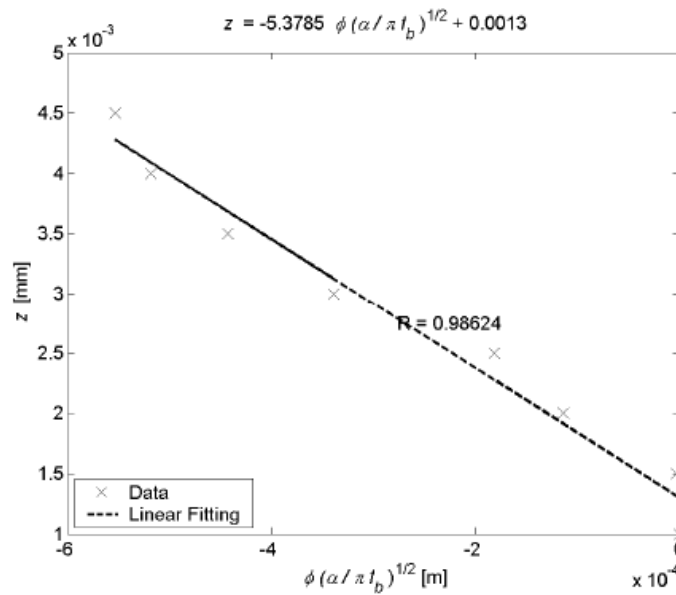


Slika 66. Faza i fazni kontrast za uzorak ACIER001. FFT primjenjen na a) raw podatke; b) TSR podatke [40]



Slika 67. Faza i fazni kontrast za uzorak ACIER002. FFT primjenjen na a) raw podatke; b) TSR podatke [40]

Fazni profili prikazani na slici 66 i 67 su iskorišteni kako bi se pronašla slijepa frekvencija svakog od oštećenja. Regresijski rezultati nakon opisa dubine oštećenja preko parametra $\mu_d = \sqrt{\frac{\alpha_d}{\pi f_b}}$ metodom najmanjih kvadrata su prikazani na slici 68.



Slika 68. Linearni korelacijski koeficijenti: ovisnost dubine oštećenja z u odnosu na slijepu frekvenciju. Podatci s oba uzorka su uključeni u analizu [40]

U radu [40] je postignuto dobro poklapanje rezultata te su autori zaključili da postoji snažna korelacija između dubine greške i slijepe frekvencije. Predlažu ispitivanje metode na realnim uzorcima kako bi se otkrili potencijalni problemi i nedostaci metode.

Apsolutni kontrast faze $\Delta\phi$ je definiran na sličan način kao i apsolutni temperaturni kontrast:

$$\Delta\phi = \phi_d - \phi_s \quad (37)$$

gdje je ϕ_d faza oštećenog piksela, a ϕ_s je aritmetička vrijednost faze piksela nad odabranim neoštećenim područjem. Fazni kontrast ovisi o toplinskim karakteristikama materijala, o podpovršinskoj strukturi objekta od interesa te o koeficijentu toplinskog prolaza ispitivanog materijala.

Kao što je već rečeno u poglavlju 4.6, oštećenja na većim dubinama se mogu detektirati na nižim frekvencijama, dok će na višim frekvencijama biti vidljiva samo oštećenja na malim dubinama. Dakle, oštećenje će biti vidljivo na frekvencijama od najmanje raspoložive (razlučive) frekvencije pa sve do specifične frekvencije na kojoj fazni kontrast $\Delta\phi$ nije dovoljno velik da bi omogućio detekciju greške (slika 69). Na slici 69 fazni profili piksela su prikazani na donjem dijelu y -osi. Krivulje faznog kontrasta su prikazane na gornjem dijelu y -osi, a izračunati su koristeći jednadžbu 37 i fazu neoštećenog područja koja je na slici 69 prikazana isprekidanom linijom. Prednosti PPT metode su što u jednoj snimljenoj sekvenci termograma na raspolaganju imamo više frekvencija koje omogućuju pregled šireg intervala dubina.

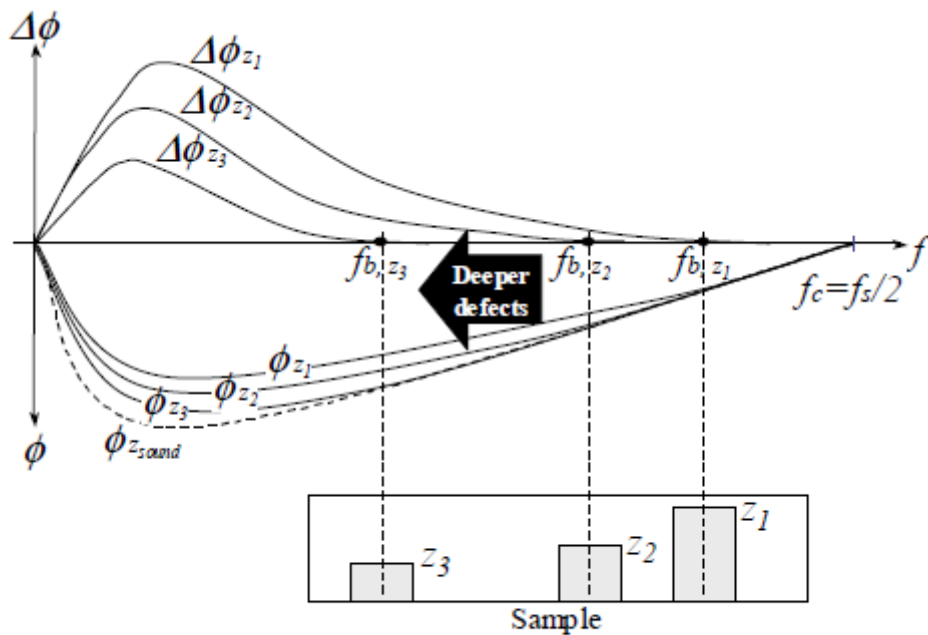


Figure 2. Blind frequency relationship with defect depth.

Slika 69. Određivanje slijepe frekvencije iz krivulja faznog kontrasta [41]

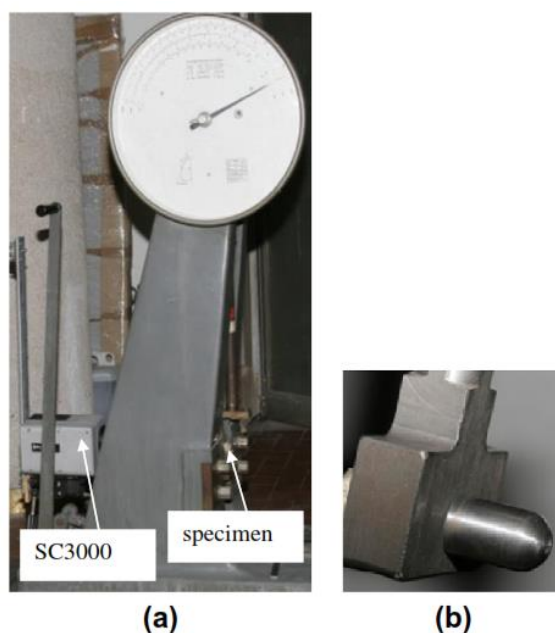
Teoretski nedovoljan fazni kontrast je $\Delta\phi = 0$, ali u praksi su podatci onečišćeni šumom pa je potrebno odabrati prag vrijednosti. U literaturi [56] ima primjera da je vrijednost praga od $\Delta\phi < 5^\circ \approx 0,87 \text{ rad}$ dovoljna kako bi se detektiralo oštećenje u obliku provrta ravnog dna (eng. flat bottom hole) na dubini od $1,4 \text{ mm}$ na uzorku od CFRP debljine 11 mm . Dakako, metoda nije ograničena isključivo na provrte ravnog dna.

6. DINAMIČKI UDAR

Posebno popularno je ispitivanje utjecaja udara na kompozitne materijale. Kompozitni materijali nude brojne prednosti pred uobičajeno korištenim metalnim materijalima: visoka specifična čvrstoća, toplinska i električna izolacija (osim karbona), zvučna izolacija, otpornost na koroziju... Međutim njihova karakteristična fizička svojstva je teško opisati uglavnom zbog njihove izotropnosti, ali i zbog velikih varijacija materijala u upotrebi. S druge strane, u takvim materijalima dolazi do širokog raspona grešaka i tijekom samog proizvodnog procesa i tijekom upotrebe: delaminacija, pucanje matrice, pucanje vlakana, izvlačenje vlakana, nedovoljna količina smole ...; što dodatno otežava njihovu kontrolu bez razaranja.

Grupa autora [57] je provela istraživanje utjecaja oblika vrha bata na dinamički udar tako što je mijenjana geometrija bata čime je direktno i promijenjena površina dodira bata i uzorka. U drugom dijelu istraživanja varirana je energija udara tako što je mijenjan kut odnosno visina pada bata. Ovo istraživanje je provedeno na uzorcima iz stakloplastike (GFRP) napravljenim od E staklenih vlakana unutar epoksidne matrice. Dimenzije svakog uzorka su $100 \times 130 \times 2,9 \text{ mm}$.

Ekspirimenti su napravljeni paralelno u dva laboratorija. U prvom laboratoriju (TSI) korištena je IC kamera ThermaCam SC3000 (s brzinom akvizicije $f = 300 \text{ Hz}$ i $f = 600 \text{ Hz}$) i Charpyev bat s polusfernim vrhom promjera 18 mm (slika 70).



Slika 70. TSI: a) Eksperimentalni postav; b) vrh Charpyevog bata [57]

U drugom laboratoriju (TSII) korištene su dvije IC kamere: ThermaCam SC3000 ($f = 900 \text{ Hz}$) i Jade III ($f = 680 \text{ Hz}$) te Charpyev bat s polusfernim vrhom promjera 24 mm (slika 71).



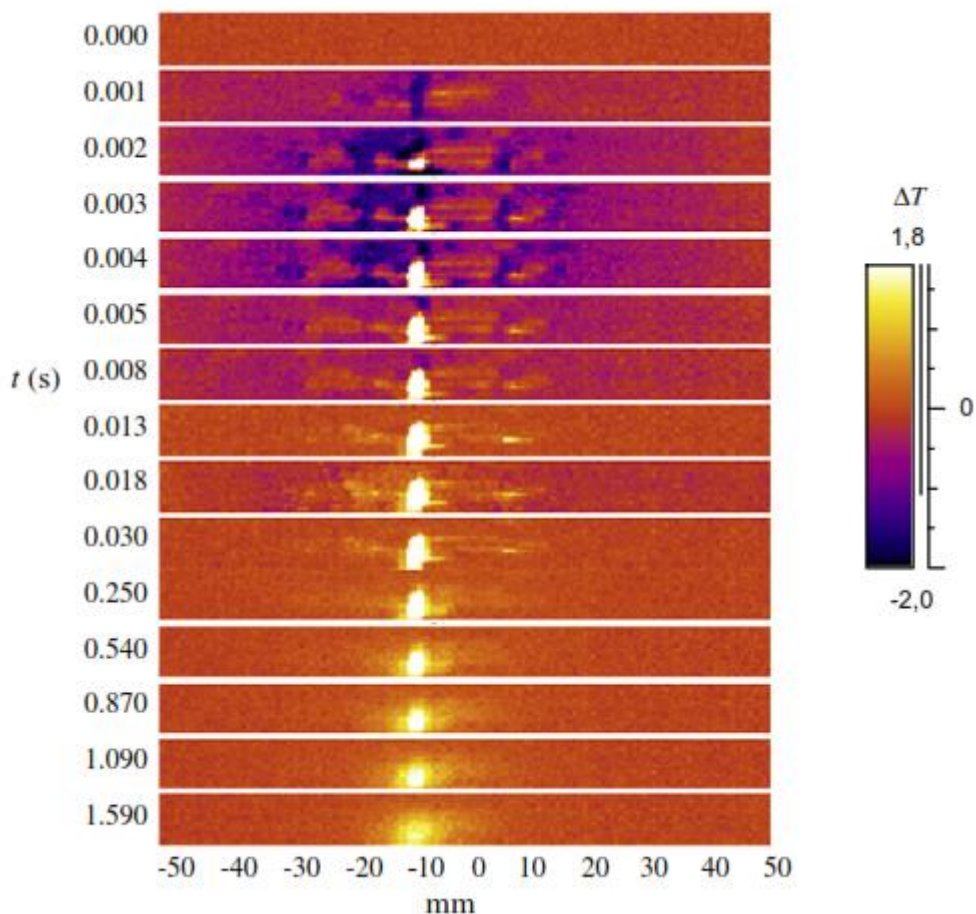
Slika 71. TSII: a) Eksperimentalni postav; b) vrh Charpyevog bata [57]

Kako bi se bolje uočio toplinski fenomen od svih termograma u sekvenci oduzeta je hladna slika (raspodjela temperatura na površini uzorka prije udara) te je dobivena sekvenca termograma s temperaturnim kontrastom ΔT :

$$\Delta T = T(i, j, t) - T(i, j, 0) \quad (38)$$

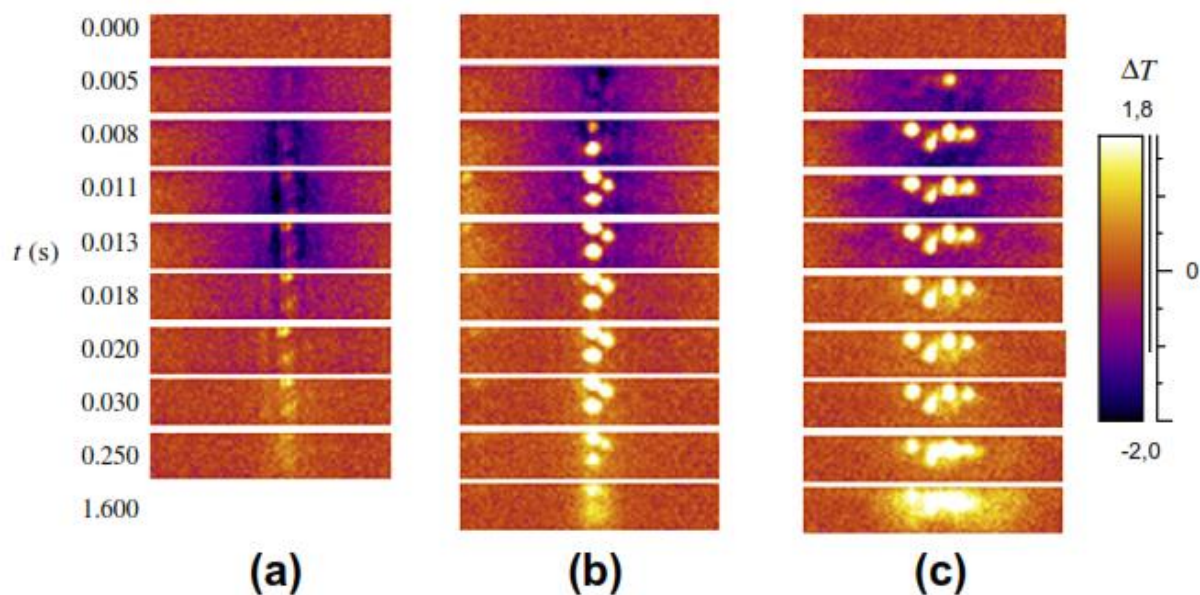
gdje su i , odnosno j , redovi i stupci termograma.

Prvi uzorak je udaren s energijom od $12,3 J$ pri postavi TSI, a na slici 72. je prikazano nekoliko karakterističnih vremena. Prva slika je raspodjela temperaturnog kontrasta na površini neposredno prije udara; $\Delta T \sim 0$. Na termogramima snimljenim neposredno nakon udara primjetne su hladne zone (tamna područja na termogramima) koje karakteriziraju elastičnu vlačnu deformaciju na strani suprotnoj od strane udara (strana na kojoj je postavljena IC kamera). U kasnijim vremenima se na termogramima pojavljuje vruća točka koja se s vremenom širi. Zagrijavanje materijala je karakteristično za plastičnu deformaciju.

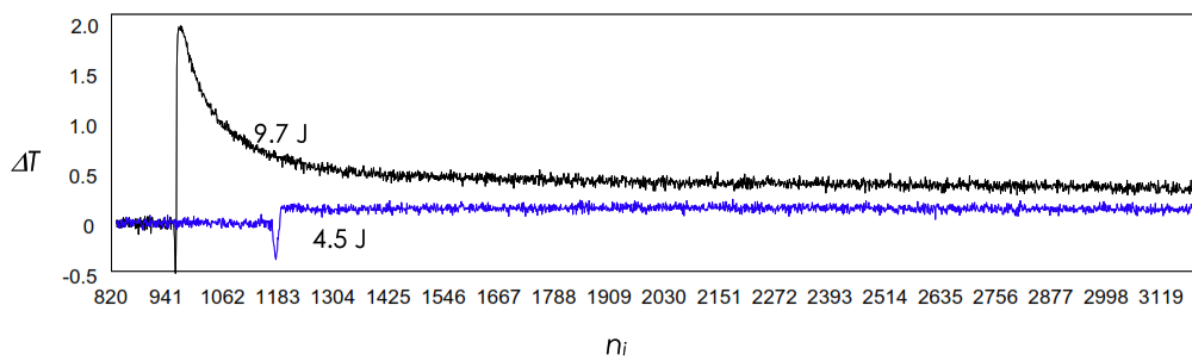


Slika 72. Promjena temperature prilikom dinamičkog udara; $E=12J$ (TSI) [57]

Na slici 73 su prikazani rezultati snimljeni na uzorcima ispitanima u laboratoriju TSII. Tu je varirana energija udara: za prvi uzorak (slika 73.a) iznosi $E = 4,5 J$, za drugi uzorak (slika 73.b) iznosi $E = 9,7 J$ i za treći uzorak (slika 73.c) iznosi $E = 15,9 J$. Prilikom udara s najmanjom energijom udara ($E = 4,5 J$) nema karakteristične vruće točke budući da ta energija udara nije bila dovoljna za plastičnu deformaciju uzorka. Na slici 74 je prikazan razvoj temperature za karakteristične piksele: plavom bojom za uzorak oštećen energijom udara ($E = 4,5 J$), a crnom za uzorak oštećen energijom udara ($E = 9,7 J$).

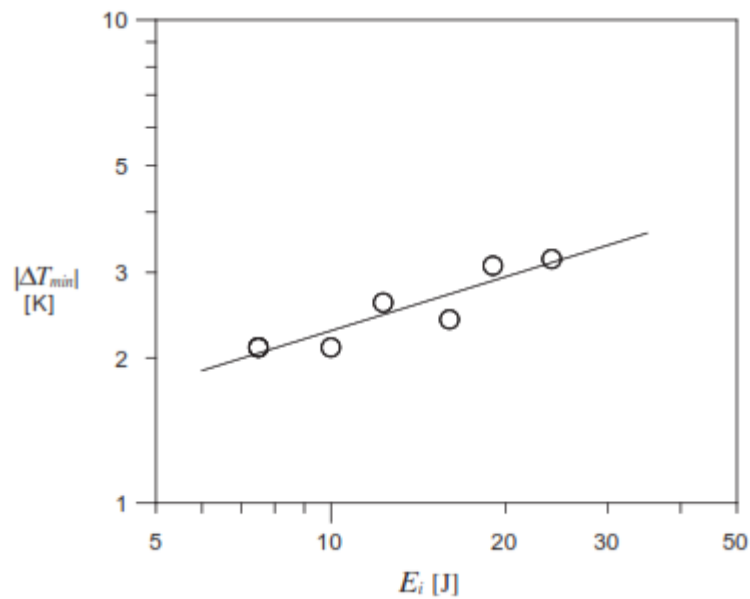


Slika 73. Promjena temperature prilikom dinamičkog udara: a) $E=4,5\text{J}$, b) $E=9,7\text{J}$, c) $E=15,9\text{J}$ (TSII) [57]

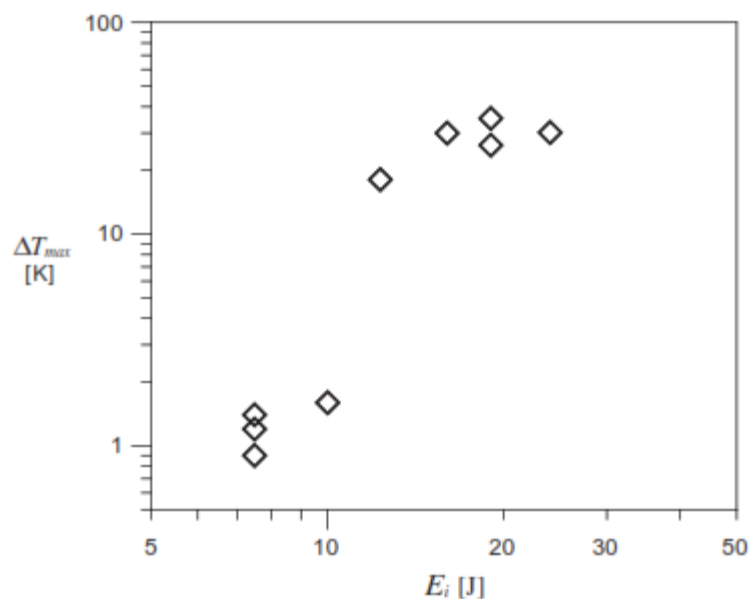


Slika 74. Razvoj temperature nakon udara različitim energijama: a) $E=4,5\text{ J}$, b) $E=9,7\text{ J}$ [57]

Na slici 75 i 76 su prikazani dijagrami ovisnosti promjene temperature ovisno o energiji udara i to na slici 75 je maksimalno odstupanje temperature hladne točke termograma, a na slici 76 maksimalno odstupanje temperature vruće točke termograma.

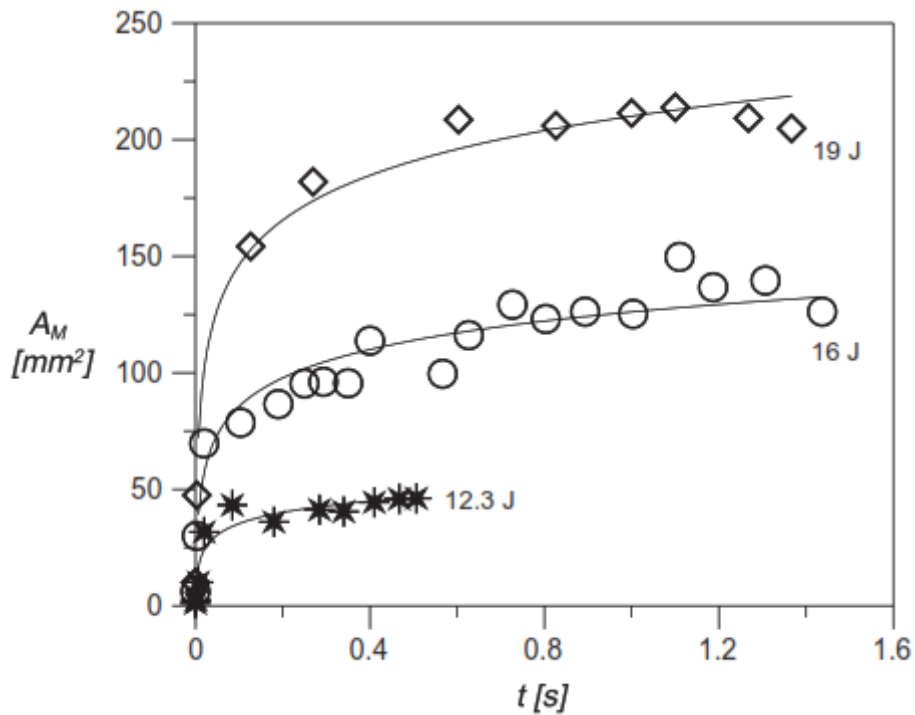


Slika 75. Promjena temperature ovisno o energiji udara: maksimalno odstupanje temperature od hladne točke termograma [57]



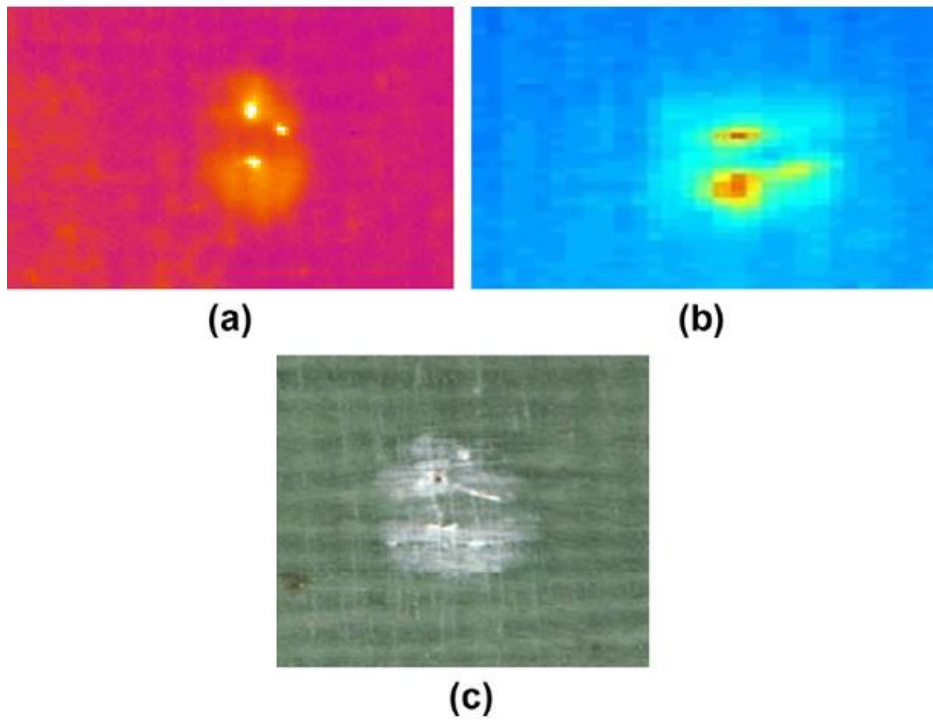
Slika 76. Promjena temperature ovisno o energiji udara: maksimalno odstupanje temperature od vruće točke termograma [57]

Posebna pozornost je pridana procjeni veličine greške. Na slici 77 Prikazana je propagacija pukotine u vremenu. Veličina greške je ovdje očitana kao površina vrućeg područja na termogramu (A_M), a razmatrano je širenje pukotine nakon pokusa s udarnom energijom od 12,3 J, 16 J i 19 J. S dijagrama se može zaključiti da je najveće oštećeno područje ono nastalo nakon udara od 19 J, a ujedno je u tom pokusu bila i najbrža energija propagacije. Najbrže širenje pukotine se odvija u prve 0,3 s nakon udara.

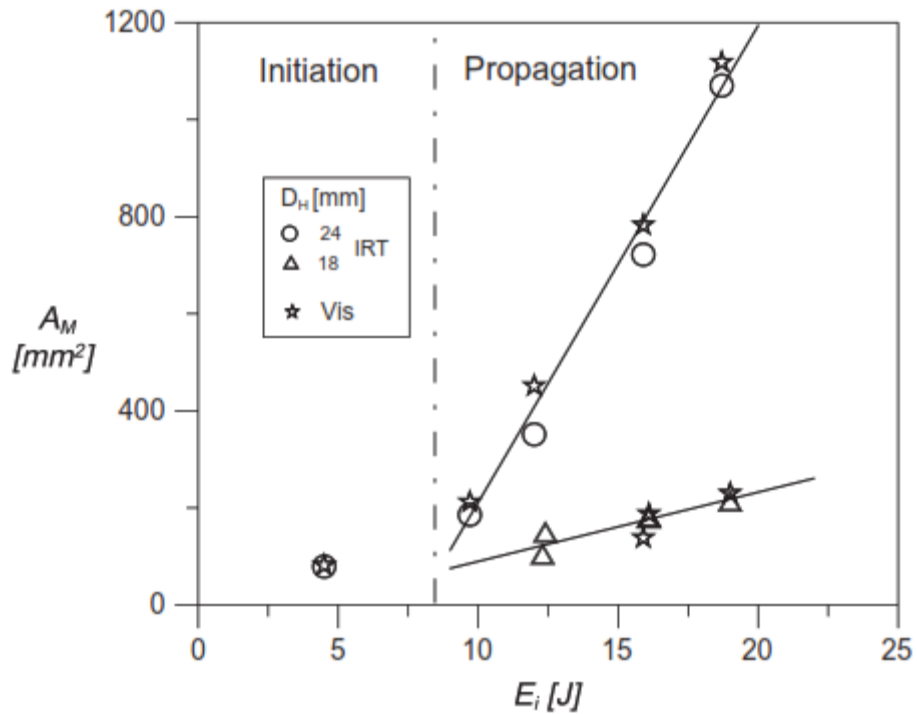


Slika 77. Propagacija pukotine u vremenu ovisno o energiji udara [57]

Na slici 78 je prikazan utjecaj oblika bata na veličinu pukotine. U dijagramu je prikazana ovisnost krajnje veličine pukotine s obzirom na oblik bata. Autori su primijetili snažan utjecaj oblika bata na veličinu oštećenja, što je i očekivano jer je dodirna površina između bata i uzorka promijenjena. Veličina svakog oštećenja je očitana s termograma, ali i izmjerena vizualnom kontrolom (što je bilo moguće budući da su uzorci od stakloplastike transparentni). Iz priloženog grafa se vidi dobra podudarnost rezultata IRT s vizualnom kontrolom, slika 79.

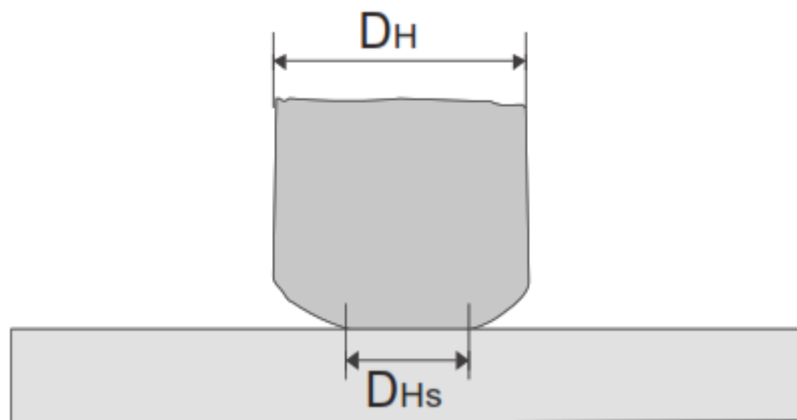


Slika 78. Utjecaj oblika bata na veličinu pukotine; $E=9,7$ J: a) fazna slika $f=0,14$ Hz, b) termogram, c) fotografija [57]



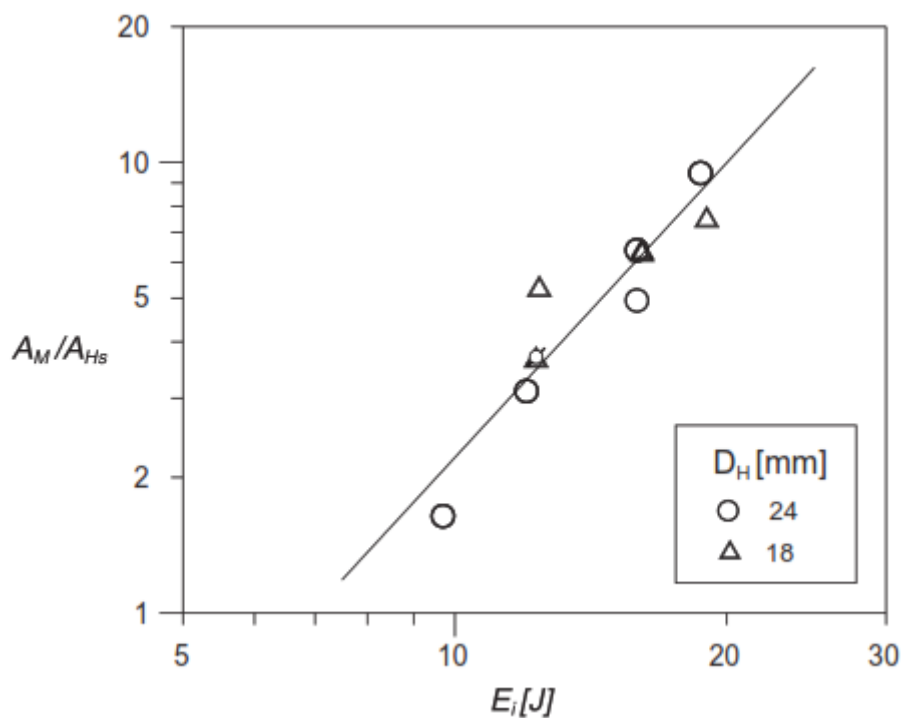
Slika 79. Usporedba veličine oštećenja nakon snimka s IR termografijom i nakon vizualne kontrole [57]

Dalje je analiziran utjecaj geometrije bata, ali tako da je u obzir uzeta stvarna dodirna površina bata. Naime, u kontakt s uzorkom dolazi samo vrh bata, a ne cjelokupni promjer bata kao što je ranije razmatrano (vidi sliku 80).



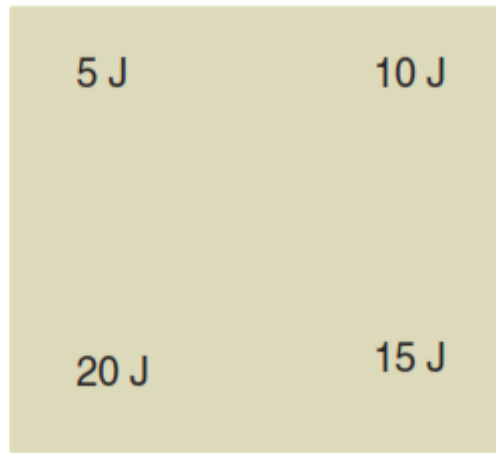
Slika 80. Schema dodirne površine bata i uzorka prilikom udara [57]

Autori su sada u omjer postavili površinu oštećenja (A_M) i stvarnu kontaktnu površinu između bata i uzorka (A_{Hs}). Na dijagramu (slika 81) je prikazana ovisnost omjera tih površina naspram energiji udara i primjetno je da sada podatci leže na jednom pravcu. Ovakvi rezultati su i očekivani.



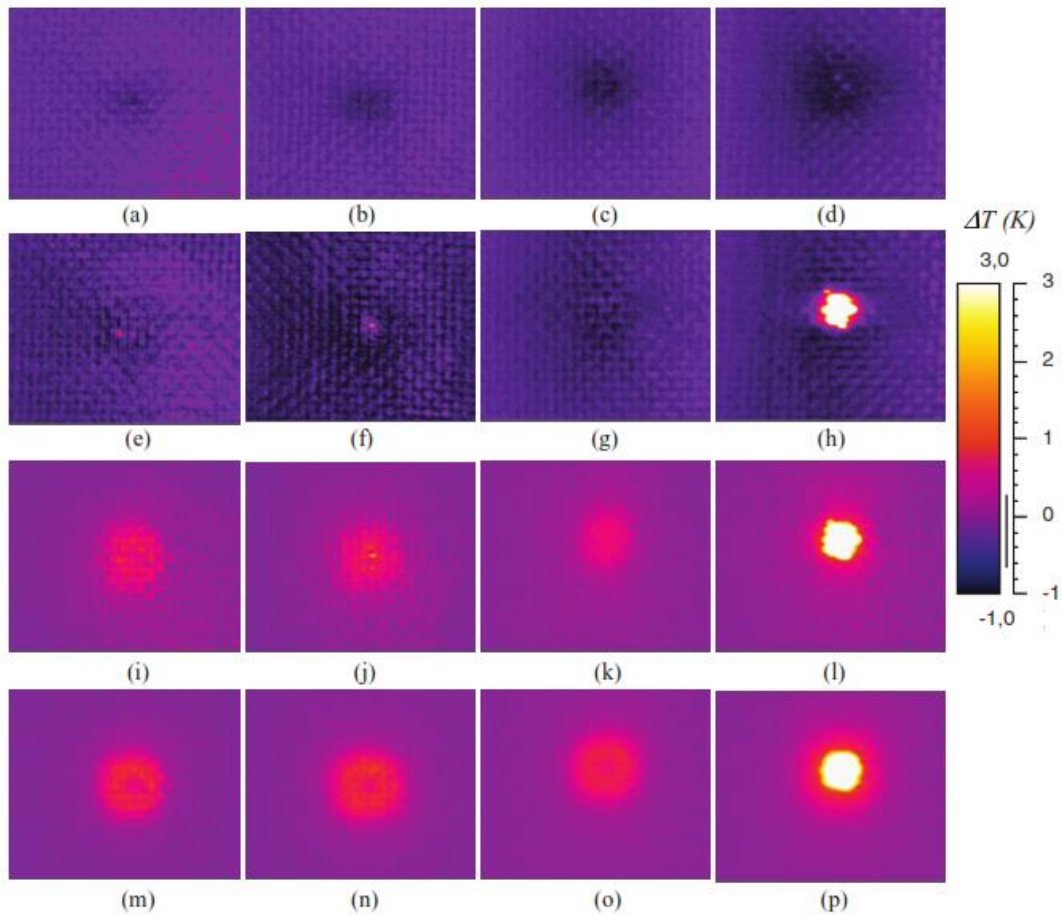
Slika 81. Ovisnost omjera površine naspram energiji udara [57]

Grupa autora [58] je provela istraživanje utjecaja udarnog opterećenja na GFRP materijale s ciljem pronalaska granične energije udara pri kojoj bi materijal bio trajno plastično deformiran. Pripremljen je GFRP uzorak debljine dvadeset slojeva $[0/90]_{10S}$ dim. 240x240 mm. Uzorak je opterećen udarnim opterećenjem koje je nanoseno Charpyevim batom, kao na slici 82. Uzorak je pretrpio četiri udarca različitih energija, po jedan unutar četiri zone. [58]



Slika 82. Plan dinamičkog opterećenja uzorka [58]

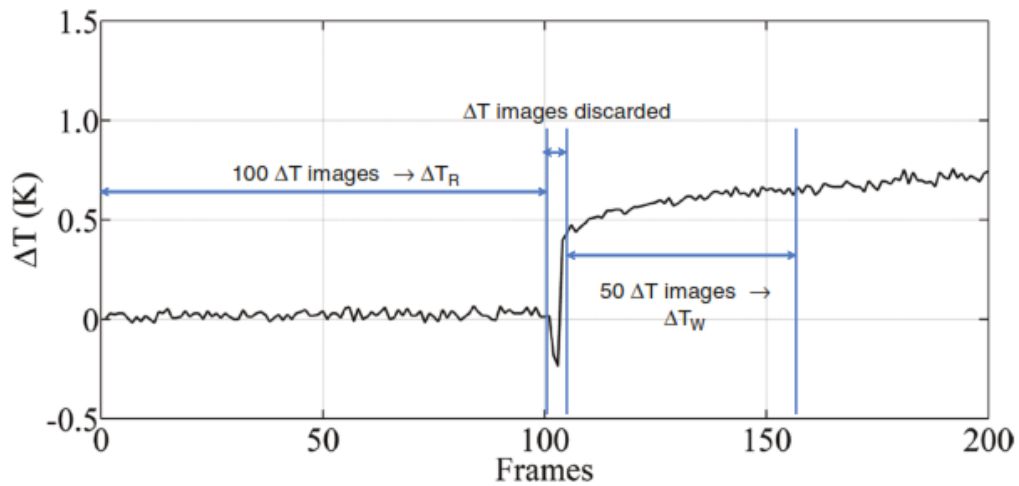
Temogrami snimljeni u različitim vremenima tokom i nakon udarca su prikazani na slici 83. Kako bi bili lako usporedivi, na svim termogramima je zadržana ista temperaturna skala. Početak deformacije uzorka se nalazi u području elastične deformacije. Kako se kamera prilikom snimanja nalazi na suprotnoj strani od bata, kamera snima površinu koja je u ovom slučaju opterećena vlačnom silom. Dolazi do rastezanja materijala što se vidi kao hladnije područje na snimljenim termogramima. Nakon početne elastične deformacije, snimani uzorak ulazi u područje trajne plastične deformacije te je ono na termogramima vidljivo kao topla zona na uzorku. Vrijeme prelaska iz područja elastične deformacije u plastičnu ovisi o energiji udara, a s termograma je vidljivo da opada s porastom energije udara.



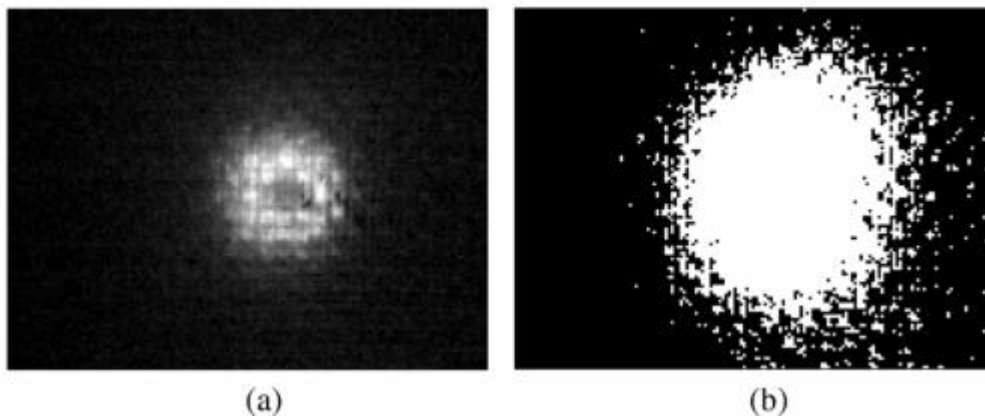
Slika 83. Promjena temperature nakon dinamičkog udara: a) $E=5J$, $t=0,01s$; b) $E=10J$, $t=0,01s$; c) $E=15J$, $t=0,01s$; d) $E=20J$, $t=0,01s$; e) $E=5J$, $t=0,02s$; f) $E=10J$, $t=0,02s$; g) $E=15J$, $t=0,02s$; h) $E=20J$, $t=0,02s$; i) $E=5J$, $t=0,03s$; j) $E=10J$, $t=0,03s$; k) $E=15J$, $t=0,03s$; l) $E=20J$, $t=0,03s$; m) $E=5J$, $t=0,04s$; n) $E=10J$, $t=0,04s$; o) $E=15J$, $t=0,04s$; p) $E=20J$, $t=0,04s$ [58]

Na slici 84 je prikazan razvoj temperature prilikom udara za proizvoljan piksel. Na grafu su izolirana dva područja, jedno prije udara, tzv. referentno područje (T_R) i drugo nakon udara bata, ali dok još postoji porast temperature, tzv. toplo područje (T_W). U ta dva područja je usrednjena temperatura piksela te je slika zamijenjena binarnom slikom (Slika 85), tako da je za svaki piksel termograma ispitano dali pripada toplom ili hladnom području prema:

$$\begin{cases} \Delta T_W(i,j) > T_R(i,j) + 3\sigma(i,j) & pixel = 1 \\ \Delta T_W(i,j) \leq T_R(i,j) + 3\sigma(i,j) & pixel = 0 \end{cases} \quad (39)$$



Slika 84. Razvoj temperature prilikom udara za proizvoljan piksel [58]



Slika 85. Binarna slika; $E=5J$ [58]

Iz prethodnih razmatranja, autori zaključuju da je kritična energija udara između 10 i 15 J te pretpostavljaju da pri toj energiji dolazi do loma unutar matrice i/ili vlakana kompozitnog materijala. Slična razmatranja autori predstavljaju i u drugoj literaturi [60-64].

7. ZAKLJUČAK

Pregledom literature utvrđeno je da je infracrvena termografija odličan i obećavajući alat koji se može koristiti za kontrolu bez razaranja i kompozitnih i metalnih materijala. Rad i istraživanje najutjecajnijih autora se koncentrira na obradu mjernog signala nakon samog procesa mjerenja. Najčešće korištene metode koje su ujedno pružile i najučinkovitiju detekciju oštećenih područja unutar materijala su: Temperaturni kontrast (TC), Diferencijalni apsolutni kontrast (DAC), Modificirani diferencijalni apsolutni kontrast (mDAC), Rekonstrukcija termografskog signala (TSR), Lock in termografija (LT), Termografija faznog pulsa (PPT) i Dekompozicija vlastitih vrijednosti (PCT). Svaka od metoda ima prednosti i nedostatke koji su istaknuti u četvrtom poglavlju, a sumirani u tablici 8. U budućem istraživanju bi bilo dobro pokušati otkloniti navedene nedostatke metoda kombiniranjem poznatih ili nekih novih metoda. Potrebno je pronaći zajednički parametar izvrsnosti koji bi se koristio za ocjenu pogodnosti metode, a vrijedio bi za sve metode. Takav parametar izvrsnosti bi omogućio stvarnu usporedbu metoda i olakšao izbor najprikladnije metode.

Nakon što su na izratku detektirani mogući položaji oštećenja materijala, oštećenje je potrebno dalje opisati. Oštećenje je opisano ako je poznat položaj, oblik, debljina i dubina na kojoj se to oštećenje nalazi. U pregledanoj literaturi autori su primijenili poznate metode obrade signala nakon mjerenja na stvarne uzorke u kojima su oštećenja simulirana najčešće ili tankim umetcima teflona različite geometrije na različitim dubinama ili provrtima ravnog dna različitih promjera na različitim dubinama. Autori se bave problemima utjecaja složenosti same geometrije izratka na mogućnost detekcije oštećenja, utjecajem geometrijskih karakteristika simuliranih oštećenja na mogućnost detekcije oštećenja te pronalaženjem korelacije referentnog parametra svake metode (temperaturni kontrast u ovisnosti o vremenu, fazni kontrast u ovisnosti o frekvenciji i slično) i dubine na kojoj se promatrano oštećenje nalazi. U ovom području je moguće ostvariti veliki iskorak u istraživanju budući da su rezultati svake metode uvijek eksperimentalno povezani sa stvarnim fizikalnim veličinama. Ponuđeni rezultati i dana matematička rješenja uglavnom vrijede za posebne uvjete ispitivanja u kojem su neki početni parametri već unaprijed poznati (na primjer debljina materijala odnosno stijenke, vrsta materijala ili materijal oštećenja, stvarna izmjera referentnog oštećenja ili slično).

U petom poglavlju dan je pregled relevantne literature u kojoj se autori bave ispitivanjem utjecaja udara na kompozitne materijale. Kompozitni materijali nude brojne prednosti pred uobičajeno korištenim metalnim materijalima. Istovremeno, njihova karakteristična fizička svojstva je teško opisati uglavnom zbog njihove izotropnosti, ali i zbog velikih varijacija materijala u upotrebi. Infracrvena termografija se najčešće koristi kao pomoć pri opisu utjecaja dinamičkog udara, nastanka inicijalne pukotine te daljnjeg širenja pukotine kroz zdrav materijal budući da nastala plastična deformacija unutar materijala uzrokuje zagrijavanje materijala i ostavlja primjetan toplinski trag. Ovakva istraživanja se uglavnom koriste u razvoju novih materijala za avioindustriju i autoindustriju.

Tablica 8. Prednosti i nedostaci najčešće korištenih metoda za naknadnu obradu signala

METODA	PREDNOSTI	NEDOSTACI
TC	<ul style="list-style-type: none"> najraširenija i najjednostavnija metoda obrade moгуće primijeniti i na mjerenjima snimljenima s primitivnim IC kamerama 	<ul style="list-style-type: none"> promatra se samo jedan vremenski trenutak iz intervala hlađenja potrebno je unaprijed znati neoštećeno područje – rezultati uvelike ovise o odabranom neoštećenom području
DAC	<ul style="list-style-type: none"> nije potrebno unaprijed znati neoštećeno područje efikasno rješen problem nejednolikog zagrijavanja i razlike u emisivnosti na površini uzorka 	<ul style="list-style-type: none"> zbog pretpostavke da je uzorak polubeskonačna ploča stvarna mjerenja odstupaju od teorijskog rješenja potrebno je ručno odrediti vrijeme u kojem se krivulje hlađenja oštećenog i neoštećenog piksela odvajaju
mDAC	<ul style="list-style-type: none"> originalni DAC je nadograđen - matematički model opisuje hlađenje ploče konačne debljine 	<ul style="list-style-type: none"> komplikiran matematički model nije primijenjen na eksperimentalnim mjerenjima
TSR	<ul style="list-style-type: none"> uklanja šum iz mjernih podataka – krivulja hlađenja je glatka derivabilna krivulja višestruko komprimira podatke 	<ul style="list-style-type: none"> podatci su opisani polinomom višeg stupnja – neminovno se gubi dio važnih mjernih podataka
LT	<ul style="list-style-type: none"> poznata je korelacija modulirane frekvencije pobude pri kojoj vidimo oštećenje i dubine oštećenja manje unošenje topline umaterijal – možemo koristiti na osjetljivim materijalima; primjena u restauraciji umjetnina jednostavna implementacija metode 	<ul style="list-style-type: none"> vremenski zahtjevan proces mjerenja – potrebno je napraviti više mjerenja, ovisno o rasponu dubina na kojem se očekuju oštećena područja potrebno je imati vođeni modulirani izvor topline koji može gotovo kontinuirano mjenjati frekvenciju pobude
PPT	<ul style="list-style-type: none"> koristi sve raspoložive podatke – promatra se cijeli vremenski interval hlađenja djelomično uklanja šum poznata je korelacija frekvencije pri kojoj prvi put vidimo oštećenje i dubine oštećenja 	<ul style="list-style-type: none"> računalno zahtjevna metoda gubi se fizikalni značaj pri prelasku iz vremenske domene u frekvencijsku potrebna je hi-tech oprema za provođenje snimanja – obavezne IC kamere s velikim brzinama akvizicije podataka
PCT	<ul style="list-style-type: none"> pogodna za tranzijentne signale višestruko komprimira podatke 	<ul style="list-style-type: none"> nije moguće provesti karakterizaciju oštećenja

LITERATURA

- [1] American Society for Non Destructive Testing – ASTN. Infrared and Thermal Testing. Nondestructive Handbook on Infrared Technology, Volume 3, ASNT Handbook Series, X. Maladague technical ed., P. O. Moore ed., 3rd edition, Columbus, Ohio, ASNT Press, 718 p., 2001
- [2] T. Elliott, N. T. Gordon. Handbook on Semiconductors - Infrared Detectors. Journal of Electronic Materials, Vol. 35, pp. 841–936), Amsterdam: Elsevier, 1993
- [3] M. Andrassy, I. Boras, S. Švaić. Osnove termografije s primjenom. p. 172, Zagreb: Kigen, 2008
- [4] P. Ncropera, D. P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3rd edition, John Wiley & Sons, USA, 1990
- [5] A. Galović. Termodinamika II. p. 322, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2003
- [6] A. Galović. Odabrana poglavlja iz kondukcije. p. 119, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2003
- [7] W. Minikina, S. Dudzik. Infrared Thermography: Errors and Uncertainties. John Wiley & Sons, 222 p, 2009
- [8] J. Fraden. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications. 3rd edition, Advanced Monitors Corporation, Springer – Verlag, 589 p, San Diego, California, 2004
- [9] Rogalski. Infrared Detectors. Second edi., CRC Press, 900 p, 2011
- [10] W. Minikina, S. Dudzik. Infrared Thermography: Errors and Uncertainties. John Wiley & Sons, 222 p, 2009
- [11] M. Vollmer, K. P. Moellmann. Infrared thermal imaging: fundamental, research and applications. Wiley – VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany, 611 p, 2010
- [12] S. Marinetti, X. Maldague, M. Prystay. Calibration Procedure for Focal Plane Array Cameras and Noise Equivalent Material Loss for Quantitative Thermographic NDT. Materials Evaluation, Vol. 55, no. 3, pp. 407–412, 1997
- [13] X. P. V. Maldague. Theory and Practice of Infrared Technology for NonDestructive Testing. John Wiley – Interscience. 684 p., 2001
- [14] Ibarra-Castanedo, H. Benitez, X. Maldague, A. Bendada. Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography. <https://www.researchgate.net/publication/228417761>. 2007
- [15] V. Vavilov, G. Xingwang, S. Wei and L. Yingtao. Peculiarities of detecting Teflon defect surrogates in CFRP by transient IR thermography. DOI: 10.21611/qirt.2004.019
- [16] R. E. Martin, A. L. Gyekenyesi, S. M. Shepard. Interpreting the Results of Pulsed Thermography Data. Materials Evaluation, Vol. 61, no. 5, pp. 611-616, 2003
- [17] S. M. Shepard. Advances in Pulsed Thermography. Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering, Thermosense XXVIII, Orlando, FL, 2001, Eds. A. E. Rozlosnik and R. B. Dinwiddie, 4360:511-515, 2001
- [18] H. D. Benítez, C. Ibarra-Castanedo, A. Bendada, X. P. Maldague, H. Loaiza and E. Caicedo. Definition Of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography. Infrared Physics And Technology, 2008
- [19] Ibarra-Castanedo, A. Bendada, X. Maldague. Thermographic Image Processing for NDT. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007

- [20] M. Klein, A. Bendada, M. Pilla, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague. Enhancing Infrared Images Contrast for Pulsed Thermography. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. July 2-5, 2008, Krakow – Poland
- [21] M. Shepard. (2013). United States Patent No. US 8449176B2
- [22] M. Shepard. Flash Thermography of Aerospace Composites. IV Conferencia Panamericana se END Buenos Aires – Octubre 2007
- [23] M. Shepard. Characterization of Full-Range Time Evolution in Active Thermography. 2014. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2014.178>
- [24] ASTM E 1461-01. (2001). Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. West Conshohocken, PA: ASTM International
- [25] G. M. Carlomagno, P. G. Berardi. Unsteady Thermography in Non-Destructive Testing. Proceedings of the 3rd Biannual Information Exchange, pp. 33–40, St. Louis/USA, 1976
- [26] G. Busse. Nondestructive evaluation of polymer materials. NDT&E International, 27(5), p. 253–262, 1994
- [27] G. Busse, D. Wu, W. Karpen. Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography. Journal of Applied Physics, 71(8), p. 3962–3965, 1994
- [28] D. Wu, G. Busse. Lock-in Thermography for NonDestructive Evaluation of Materials. Revue Générale de Thermique, 37, p. 693–703, 1998
- [29] Meola, G. M. Carlomagno, L. Giorleo. Geometrical Limitations to Detection of Defects in Composites by Means of Infrared Thermography. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 23, No. 4, 2004. DOI: 10.1007/s10921-004-0819-z
- [30] Meola, G. M. Carlomagno, D. Annicchiarico, M. Giordano, M. Zarrelli. Detection of delamination in carbon-fibrereinforced polymers with lock-in thermography. Article in International Journal of Aerospace Engineering, November 2010 DOI: 10.1243/09544100JAERO743
- [31] Meola, V. Grasso, C. Toscano, G. M. Carlomagno. Nondestructive evaluation of fiber reinforced polymers with lockin thermography. In book: Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Chapter: Nondestructive evaluation of fiber reinforced polymers with lockin thermography Publisher: Springer International Publishing; Editors: Kelvin Chang et al. Retrieved from: https://www.researchgate.net/profile/Giovanni_Carlomagno/publication/271440715
- [32] Meola, A. Squillace, G. M. Carlomagno, A. Vitiello. Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography. Engineering Failure Analysis 13, p. 380–388, 2006, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2005.02.007
- [33] Kim, R. Shrestha, M. Choi. Defect detection with thermal imaging and phase shifting methods in lock-in thermography. Materials Science, 2016, DOI: 10.21611/qirt.2016.057
- [34] Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace, U. Prisco, R. E. Morace. Analysis od Composites with Infrared Thermography. Macromol Symp. 228, p. 273-280., 2005, DOI: 10.1002/masy.200551025
- [35] Meola, C. Toscano. NonDestructive evaluation of Carbon Fiber Reinforced Polymers with Ultrasonic and Infrared Thermography: An Overview on Historical Steps and Patents. Recent Patzents on Materials Science, vol 5, Issue 1, 2012. DOI: 10.2174/1874464811205010048
- [36] S. Ranjit, K. Kang, W. Kim. Investigation of Lock-in Thermography for Evaluation of Subsurface Defect Size and Depth. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 16, No. 11, p. 2255-2264, 2015, DOI: 10.1007/s12541-015-0290-z
- [37] J. Fourier. Theorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides–Partie. Memoires de l’Academie des Sciences 4, p. 185–555, 1824

- [38] Mateljan. ARTA Program for Impulse Response Measurement and Real Time Analysis of Spectrum Frequency Response. User Manual, Version 1.0.0, Faculty of Electrical Engineering, University of Split, Electroacoustic Laboratory, Split 2004.
- [39] W. K. Pratt. Digital Image Processing. New York: Wiley, 698 p., 1991
- [40] Ibarra-Castanedo, X. Maldague. Pulsed Phase Thermography Reviewed. QIRT J., 1(1): p. 47-70, 2004
- [41] Ibarra-Castanedo, X. Maldague. Defect depth retrieval from pulsed phase thermographic data on Plexiglas and aluminum samples. Article in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, April 2004, DOI: 10.1117/12.540855
- [42] X. P. MALDAGUE. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley & Sons, N.Y., 2001.
- [43] Ibarra-Castanedo, D. González, X. Maldague. Automatic Algorithm for Quantitative Pulsed Phase Thermography Calculations. 2004. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/241889059>
- [44] V Vavilov, T Ahmed, J Jin, R.L. Thomas et L.D. Favro. Experimental thermal tomography of solids by using the flash one-side heating. Sov. J. NDT, 12, 1990.
- [45] C. Ibarra-Castanedo, M. Genest, J. M. Piau, S. Guibert, A. Bendada, X. P. V. Maldague. Active Infrared Thermography Techniques for the Nondestructive Testing of Materials. Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization, p. 325–348, World Scientific Publishing, 2007
- [46] C. Ibarra-Castanedo, M. Genest, P. Servais, X. P. V. Maldague, A. Bendada. Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography. Nondestructive Testing and Evaluation, 22(2-3), p. 199–215, 2007, DOI:10.1080/10589750701448548
- [47] Lj. Tomić, V. Damnjanović, G. Dikić, B. Milovanović. Reconstruction of Simulated Cylindrical Defects in Acrylic Plate Using Pulsed Phase Thermography. Applied Science, vol 9. 1854, 2019, DOI:10.3390/app9091854
- [48] N. Rajic. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. Composite Structures 58 p. 521–528, 2002
- [49] C. Ibarra-Castanedo, N. P. Avdelidis, M. Grenier, X. Maldague and A. Bendada. Active thermography signal processing techniques for defect detection and characterization on composite materials. Proc. of SPIE Vol. 7661, Termosense XXXII, 2010. Retrieved from: <https://doi.org/10.1117/12.850733>
- [50] B. Milovanović, I. Banjad Pečur. Principle component thermography for defect detection in reinforced concrete structures. Conference: Advances in Cement and Concrete Technology in Africa, 2016
- [51] M. A. Omar, R. Parvataneni, Y. Zhou. A combined approach of self-referencing and Principle Component Thermography for transient, steady, and selective heating scenarios. Infrared Physics & Technology, 53(5), p. 358–362, 2010. DOI: 10.1016/j.infrared.2010.06.004
- [52] B. Yousefi, S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, X. P. V. Maldague. Comparative analysis on Thermal Non-Destructive Testing Imagery applying Candid Covariance-Free Incremental Principal Component Thermography (CCIPCT). Infrared Physics & Technology, 2007, DOI: 10.1016/j.infrared.2017.06.008
- [53] P. Theodorakeas, N.P. Avdelidis, C. Ibarra-Castanedo, M. Kouj, X. Maldague. Pulsed thermographic inspection of CFRP structures: experimental results and image analysis tools. Article in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2014
- [54] M. Shepard. Aspect Ratio Considerations for Flat Bottom Hole Defects in Active Thermography. Conference: 2016 Quantitative InfraRed Thermography, 2016. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/305634902>

- [55] C. Ibarra-Castaneda, X. Maldague. Pulsed Phase Thermography Inversion Procedure using Normalized Parameters to Account for Defect Size Variations. Article in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005
- [56] BAI W. and WONG B. S. Evaluation of Defects in Composite Plates under Convective Environments using Lock-In Thermography. *Meas.Sci. Technol.*, 12: 142-150, 2001.
- [57] C. Meola, G. M. Carlomagno. Impact damage in GFRP: New insights with infrared thermography. *Composites: Part A* 41 p. 1839–1847, 2010, DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.09.002
- [58] S. Boccardi, G. M. Carlomagno, G. Simeoli, P. Russo, C. Meola. Evaluation of impact-affected areas of glass fibre thermoplastic composites from thermographic images. *Meas. Sci. Technol.* 27, 2016, DOI: 10.1088/0957-0233/27/7/075602
- [59] C. Meola, S. Boccardi, G.M. Carlomagno, N.D. Boffa, F. Ricci, G. Simeoli, P. Russo. Impact damaging of composites through online monitoring and non-destructive evaluation with infrared thermography. *NDT&E International* 85, p. 34–42, 2017, DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.10.004
- [60] Simone Boccardi, Natalino D. Boffa, Fabrizio Ricci, Giovanni M. Carlomagno, Carosena Meola, Pietro Russo, Giorgio Simeoli. Infrared thermography to impact damaging of composite materials. Conference: SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 2017, DOI: 10.1117/12.2261077
- [61] C. Meola, G. M. Carlomagno. Infrared Thermography in Health Monitoring of CFRP for Aeronautical Applications. *Journal of Aerospace Science, Technologies & Systems*, Vol 89, No. 4, 2010
- [62] L. Krstulovic-Opara, B. Klarin, P. Neves, Ž. Domazet. Thermal imaging and Thermoelastic Stress Analysis of impact damage of composite materials. *Engineering Failure Analysis*, 18, p. 713–719, 2011
- [63] C. Meola, G. M. Carlomagno, V. Lopresto, F. Ricci, G. Caprino. Investigation of Impact Damage in Composites with Infrared Thermography. *Aerotecnica The Journal of Aerospace Science Technology and Systems*, 2010
- [64] C. Meola, G. M. Carlomagno. Infrared thermography of impact-driven thermal effects. *Appl Phys A* 96: p. 759–762, 2009, DOI: 10.1007/s00339-009-5267-2

POPIS OZNAKA I KRATICA

1D	jednodimenzionalno
2D	dvodimenzionalno
3D	trodimenzionalno
AE	metoda akustične emisije (eng. acoustic emission)
CFRP	polimer ojačan karbonskim vlaknima (eng. carbon fiber reinforced polymer)
CNR	omjer kontrasta naspram šuma (eng. contrast to noise ratio)
DAC	diferencijalni apsolutni kontrast (eng. differential absolute contrast)
DFT	diskretna Fourierova transformacija (eng. discrete Fourier transformation)
DT	ispitivanje s razaranjem materijala (eng. destructive testing)
DROI	oštećeno područje od interesa (eng. defected region of interest)
EM	elektromagnet
EOF	empirička ortogonalna funkcija (eng. empiric orthogonal function)
ERT	rano zabilježeni termogram (eng. early recorded thermal image; ERT)
ET	metoda vrtložnih struja (eng. Eddy testing)
FBH	provrt ravnog dna (eng. flat bottom hole)
FFT	brza Fourierova transformacija (eng. fast Fourier transformation)
FPA	(eng. focal-plane array)
FPN	(eng. fixed pattern noise)
GFRP	polimer ojačan staklenim vlaknima (eng. glass fiber reinforced polymer)
IC	infracrveno
IT	infracrvena termografija (eng. infrared thermography)
LT	lock-in termografija (eng. lock-in thermography)
LT	leak test (eng. leak test)
LRT	kasno zabilježeni termogram (eng. late recorded thermal image; LRT)
LWIR	dugovalno infracrveno zračenje (eng. long wavelength infrared)
MWIR	srednjevalno infracrveno zračenje (eng. medium wavelength infrared)
MT	magnetska kontrola (eng. magnet testing)
NDT&E	ispitivanje i evaluacija bez razaranja materijala (eng. nondestructive testing)

NIR	bliže infracrveno zračenje (eng. near Infrared)
PCA	analiza glavnih komponenti (eng. principal component analysis)
PCT	termografija glavnih komponenti (eng. principal component thermography)
PPT	termografija faznog pulsa (eng. pulse phase thermography)
PT	metoda penetranta (eng. penetrant testing)
RT	radiografska metoda (eng. radiographic testing)
SROI	zdravo područje od interesa (eng. sound region of interest)
ST	mjerenje deformacija (eng. strain testing)
SVD	dekompozicija vlastitih vrijednosti (eng. singular value decomposition)
SWIR	kratkovalno infracrveno zračenje (eng. short wavelength infrared)
TSR	rekonstrukcija termografskog signala (eng. thermographic signal reconstruction)
UT	ultrazvučno testiranje (eng. ultrasound testing)
VLWIR	vrlo dugovalno infracrveno zračenje (eng. very long wavelength infrared)

SAŽETAK

Infracrvenom termografijom kao metodom bez razaranja, moguće je ispitivati različite skupine materijala: od metalnih izotropnih materijala do kompozitnih materijala iznimno anizotropne strukture. Greške su obično nevidljive okom, ali mogu imati kobne posljedice na sposobnost struktura da na pravilan način obavljaju svoju namjenu. Otkrivanje grešaka u njihovom samom začetku će omogućiti pravovremenu reakciju. Upravo zato, potrebno je stalno unaprjeđenje metoda za kontrolu kvalitete bez razaranja.

U ovom radu dan je pregled relevantne dostupne literature iz područja ispitivanja bez razaranja metodama infracrvene termografije. Rad je podijeljen na četiri dijela. Uvodni dio u kojem su opisane teorijske osnove zračenja i karakteristike opreme koja se tradicionalno koristi pri pregledu metodama infracrvene termografije. U središnjem dijelu rada pregledane su metode koje se koriste pri obradi termograma. Metode obrade nakon mjerenja se primjenjuju na snimljeni termogram ili sekvencu termograma. U ove metode je obično ugrađena jednadžba širenja topline kroz materijal. Sve metode počivaju na činjenici da su toplinska svojstva materijala koji se ispituje bitno drugačija od toplinskih svojstava oštećenja koje tražimo unutar ispitivanog materijala. Najčešće korištene metode koje su ujedno pružile i najučinkovitiju detekciju oštećenih područja unutar materijala su: Temperaturni kontrast (TC), Diferencijalni apsolutni kontrast (DAC), Modificirani diferencijalni apsolutni kontrast (mDAC), Rekonstrukcija termografskog signala (TSR), Lock in termografija (LT), Termografija faznog pulsa (PPT) i Dekompozicija vlastitih vrijednosti (PCT). Treći dio rada je koncentriran na geometrijske posebnosti; razmatra se utjecaj oblika uzorka na rezultate ispitivanja, utjecaj geometrije oštećenja te procjena dubine na kojoj se nalazi oštećenje. U posebnom poglavlju je razmatran utjecaj dinamičkog udara i primjena termografije u razvoju novih materijala za avioindustriju i autoindustriju.

U zaključku su istaknute prednosti i nedostaci svih obrađenih metoda. Opisani su najčešći problemi s kojima se autori susreću. Naveden je mogući prostor daljnja istraživanja.