

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Ljubiša D. Tomić

**NEDESTRUKTIVNO ISPITIVANJE
TERMOFIZIČKIH OSOBINA
MATERIJALA IC TERMOGRAFIJOM**

doktorska disertacija

Beograd, 2012

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Ljubiša D. Tomić

**NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF
THE THERMOPHYSICS PROPERTIES
MATERIALS BY IR THERMOGRAPHY**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012

K O M I S I J A:

Dr Jovan Elazar, vanredni profesor (mentor)
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

.....

Dr Jovan Radunović, redovni profesor
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

.....

Dr Vesna Damjanović, docent
Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu

.....

Dr Slobodan Petričević, docent
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

.....

Dr Peđa Mihailović, docent
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

.....

Datum odbrane:

Eksperimentalni deo ove disertacije obavljen je sa više komercijalnih termovizijskih kamera u više naučnih ustanova u Beogradu. Kolegama iz Instituta Nikola Tesla, Laboratorije za termotehniku Instituta Vinča Elektrotehničkog fakulteta, Laboratorije za termografiju Elektrodistribucije, Vojnotehničkog instituta VS zahvaljujem se na nesebičnoj pomoći u rešavanju mnogih konkretnih problema za vreme eksperimentalnog rada.

Posebno želim da se zahvalim Prof. dr Jovanu Elazaru na velikoj pomoći i korisnim sugestijama u interpretaciji rezultata merenja.

Veliku zahvalnost dugujem doc. dr Slobodanu Petričeviću sa Elektrotehničkog fakulteta na korisnim komentarima i smernicama, tokom eksperimentalnih istraživanja.

Zahvaljujem se mj mr Bojanu Milanoviću asistentu na Vojnoj Akademiji Vojske Srbije na pomoći i korisnim sugestijama u interpretaciji numeričkih rezultata.

Svojoj porodici, kolegama Tehničkog Opitnog Centra, i prijateljima zahvaljujem se na strpljenju i podršci koja mi je bila dragocena u toku izrade ove disertacije.

Naslov Doktorske disertacije:

**NEDESTRUKTIVNO ISPITIVANJE TERMOFIZIČKIH OSOBINA
MATERIJALA IC TERMOGRAFIJOM**

Rezime:

Cilj ovog rada je poboljšanje, razvoj i primena impulsne termografije kao eksperimentalnog metoda za otkrivanje defekata u materijalu. Da bi se ostvario taj zadatak, rad je usmeren ka tri sledeća pravca:

1. Eksperimentalna istraživanja koja obuhvataju razvoj i poboljšanja uslova za merenje i akviziciju podataka.
2. Teorijska istraživanja koja obuhvataju analitičko i numeričko rešavanje sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina provođenja toplote kondukcijom uz odgovarajuće početne i granične uslove.
3. Teorijska istraživanja koja podrazumevaju primenu metode i procedure u impulsnoj infracrvenoj termografiji za date teorijske i eksperimentalne uslove.

U toku prvog dela istraživanja, izrađeni su posebni uzorci pripremljeni za eksperiment, gde su na jednoj strani ploče podjednako razmaknuti žljebovi praveći periodičnu defektnu strukturu sa određenom prostornom frekvencijom i određenom dubinom. Druga strana ploče bila je ozračena kratkim svetlosnim impulsom i temperaturna raspodela na istoj strani bila je analizirana impulsnom infracrvenom termografijom. U drugom delu testirani su različiti modeli koji opisuju dvodimenzionalnu kondukciju toplote kroz planparalelnu ploču sa defektom u obliku žljeba sa ravnim dnom sa opštim i posebnim početnim i graničnim uslovima. U trećem delu izvršeno je poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata simulacije u cilju utvrđivanja uslova i granica primenljivosti metoda za periodičnu strukturu defekata. Izvršena je teorijska analiza i eksperimentalna provera metoda u slučaju defekata u aluminijumskoj ploči.

Ključne reči:

Impulsna termografija; Impulsna videtermografija; Termovizijska kamera; Nedestruktivno testiranje; Toplotna difuzija.

Naučna oblast: Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo.

Uža naučna oblast: Fizička elektronika.

UDK broj: 621.3

Title of Ph.D. Thesis:

**NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF THE THERMOPHYSICS
PROPERTIES MATERIALS BY IR THERMOGRAPHY**

**NEDESTRUKTIVNO ISPITIVANJE TERMOFIZIČKIH OSOBINA MATERIJALA IC
TERMOGRAFIJOM**

Summary:

The aim of this paper is improving, development and application of pulsed thermography as experimental method for detection of defect in material. To accomplish this, the paper has 3 aspects:

1. Experimental research including of development and improving conditions for measuring and data acquisition.
2. Theoretical research containing of analytical and numerical solving the system of partial differential equations for heat convection by conduction, with corresponding initial and boundary conditions.
3. Theoretical research considering method and procedure application in pulsed infrared thermography for given theoretical and experimental conditions.

During the first part of research, specific samples were prepared for experiment where at one side of the plate equally spaced slots are forming the periodical structure of defects with defined spatial frequency and depth. The other side of plate was irradiated with short light pulse and temperature distribution on that side was analyzed by pulsed infrared thermography. The second part of the research, considers different models describing two-dimensional heat conduction through planparallel plate with defect in form of flat-bottom slot, with general and specific initial and boundary conditions. In the third part of research, comparison of experimental results and results of simulation was made to determine the conditions and limits of method applicability for periodically structured defects. The theoretical analysis and experimental testing of the method was done for the defects in aluminum plate.

Keywords:

Pulse thermography; Pulse Videothermography; Thermal imaging; Nondestructive Testing; Heat diffusion.

Scientific field: Electrical and Computer Engineering.

Special topic: Physical electronics.

UDK number: 621.3

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Infracrvena termografija.....	4
2.1 Termografska nedestruktivna defektoskopija.....	6
2.2 Impulsna termografija.....	6
2.3 Provođenje toplote u impulsnoj videtermografiji.....	7
2.3.1 Rešavanje jednačine provođenja toplote.....	7
2.3.2 Numerički model za impulsno zagrevanje uzorka.....	8
2.3.3 Svetlosni impuls pobudnog izvora.....	8
3. Numerička simulacija	13
3.1 Jednačina provođenja toplote u uzorku.....	13
3.1.1 Fizički model za simulaciju u impulsnoj videotermografiji.....	17
3.2 Metod konačne razlike i modelovanje u impulsnoj videotermografiji.....	17
3.2.1 FDM model i numerički rezultati.....	17
3.2.2 Izbor referentnih parametara za kvantitativnu analizu defekata.....	18
3.2.3 Metod konačnih razlika.....	19
3.3 Matematički model vremenskog oblika svetlosnog izvora.....	23
3.3.1 Vremenski oblik svetlosnog impulsa.....	23
3.3.2 Zadavanje graničnih uslova.....	26
3.3.3 Ograničenje po pitanju memorije PC.....	27
3.3.4 Testiranje numeričkog modela za različite energije svetlosnog izvora.....	27
3.3.5 Značajni zaključci analize početnih kodova simulacije.....	30

4. Eksperimentalni rezultati	32
4.1 Priprema elspérimenta i test ploče –TP.....	33
4.1.1 Postavka elspérimenta.....	39
4.1.2 Tehničke karakteristike kamere i impulsnog izvora.....	40
4.1.3 Metodologija snimanja termograma u elspérimentima PVT.....	44
4.2 Merenje temperature pomoću IC zračenja.....	45
4.2.1 Osnovne karakteristike IC termografskih kamera.....	46
4.2.2 Greška merenja temperature IC kamerom.....	46
4.3 Merna nesigurnost.....	48
4.3.1 Merna oprema i metoda merenja.....	48
4.4 Eksperimentalne procedure i rezultati.....	53
4.4.1 Metodologija prikupljanja elspérimentalnih podataka.....	53
4.4.2 Analiza podataka u impulsnoj videotermografiji.....	56
4.4.3 Elektronski sklop za sinhronizaciju dva svetlosna izvora.....	63
4.4.4 Degradacija slike.....	64
4.5 Filtriranje elspérimentalnih rezultata - termograma.....	68
4.5.1 Opis metodologije određivanja temperaturnog kontrasta.....	69
4.5.2 Fourier-ova analiza temperaturnog profila.....	70
4.5.3 Određivanje temperaturnog kontrasta usrednjavanjem IC piksela.....	72
4.5.4 Određivanje temperaturnog kontrasta filtriranjem Wiener filtrom.....	73
4.5.5 Analiza rezultata filtriranja termograma.....	76
4.6 Termogrami test uzorka.....	78
4.6.1 Termogrami dobijeni termovizijskom kamerom SC620 (120 Hz).....	79
4.6.2 Termogrami dobijeni termovizijskim kamerama SC640 i P640 (30 Hz).....	80

4.6.3	Termogram dobijen termovizijskom kamerom SC65 (50 Hz).....	81
5.	Poređenje teorijskih i eksperimentalnih rezultata.....	83
5.1	Maksimalni temperaturni kontrast.....	83
5.1.1	Poređenje eksperimentalnih rezultata pomeranjem teorijske krive.....	85
5.1.2	Promena maksimalnog temperaturnog kontrasta za periodične defekte.....	87
6.	Temperaturna modulaciona transfer funkcija.....	95
6.1	Definicija modulacione transfer funkcije	95
6.1.1	Temperaturna modulaciona transfer funkcija za periodične defekte.....	87
6.1.2	Inverzni pristup u impulsnoj videotermografiji.....	103
6.2	Analiza TMTF pomoću centralne linije termograma.....	104
6.2.1	Koncept prostorne učestanosti.....	105
6.2.2	Filtriranje sinusnom funkcijom.....	109
7.	Zaključak.....	114
8.	Literatura.....	117
 Prilozi:		
Prilog A:	Termofizičke osobine materijala.....	130
Prilog B:	Vremenska zavisnost intenziteta svetlosnog impulsa i rezultati numeričke simulacije	132
Prilog C:	Rezultati snimanja termovizijskom kamerom SC620.....	139
Prilog D:	Vremenski razvoj temperaturnog kontrastat	141
Prilog E:	Filtriranje.....	147
Prilog F:	Rezultati sekvence SEQ.0040.....	149
Prilog G:	Rezultati.....	152

Lista tabela

1.	Tabela 2.1: Ponašanje metala, kompozita i izolatora na termalni impuls	11
2.	Tabela 4.1: Geometrija testiranih uzoraka, za svaku dubinu defekta d date su dimenzije najširih i najužih karakterističnih uzoraka	38
3.	Tabela 4.2: Tehnička specifikacija termovizijske kamere FLIR SC620	41
4.	Tabela 4.3: Tabela vrednosti širine vidnog polja (H), visine vidnog polja (V) i trenutnog vidnog polja (IFOV) za različite udaljenosti objektiva termovizijske kamere	42
5.	Tabela 4.4: Tehničke specifikacije termovizijskih kamera	48
6.	Tabela 4.5: Parametri Centralne linije, njena pozicija u IC slici i karakteristične temperature	57
7.	Tabela 4.6: Parametri fita sinusnom funkcijom za centralnu liniju LI01 sa sa Slike 4.40	71
8.	Tabela 4.7: Uporedni rezultati 6 različitih načina filtriranja temperature $T(i, j)$ duž centralne linije LI01 i dobijanje filtriranih vrednosti temperaturnog kontrasta: ΔT_{SR} $\Delta T_{\omega 0}$ ΔT_{8H} plus ΔT_{8H}^* ΔT_{WFSR} i ΔT_{WF}	77
9.	Tabela 4.8: Metod određivanja temperaturni kontrast $\Delta T (^{\circ}C)$: bez filtriranja i sa filtriranjem	77
10.	Tabela 5.1: Maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} : Dubine defekta u rasponu od $d = 0.25$ mm do 1.75 mm (korak 0.25 mm). Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm	87
11.	Tabela 5.2: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} funkcijom <i>ExpAssoc</i> : Offset y_0 , pojačanja A1 i A2 i širine t_1 i t_2 . Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm	88
12.	Tabela 5.3: Maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} : Dubina defekta: $d = 0.5$ mm, 1 mm i 1.5 mm. Prostorna frekvencija defekata f_w za nekoliko vrednosti od 0.125 (lp/mm) do 1 (lp/mm)	89
13.	Tabela 5.4: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} funkcijom <i>ExpAssoc</i> : Offset y_0 , pojačanja A1 i A2 i širine t_1 i t_2 . Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm	84
14.	Tabela 5.5: Maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} : Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm Dubine defekta: $d = 0.5$ mm, 1 mm i 1.5 mm	90
15.	Tabela 5.6: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} funkcijom <i>Poly5</i> : Članovi polinoma A0, A1, A2, A3, A4 i A5. Dubina defekta: $d = 0.5$ mm; 1.0 mm i 1.5 mm	91
16.	Tabela 5.7: Parametri najboljeg fita zavisnosti vremena dostizanja maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta t_{max} za poznatu širinu $w = 4$ (mm), linearnom funkcijom: wA_0, A_1, R^2 . Dubina defekta: $d = 0.25$ mm; 0.5 mm; 0.75 mm; 1.0 mm; 1.25 mm; 1.5 mm i 1.75 mm	92
17.	Tabela 5.8: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} funkcijom <i>ExpDec1</i> : Offset y_0 , pojačanja A1 i konstanta slabljenja t_1 . Dubina defekta: $d = 0.25$ mm; 0.5 mm, 0.75 mm, 1.0 mm, 1.25 mm, 1.50 i 1.75 mm. Širina defekta $w = 4$ mm	93
18.	Tabela 6.1: Potpovršinska rezolucija parametri meta	96
19.	Tabela 6.2: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog	100

- kontrasta $TMTf_{\max}$ funkcijom *Pulse*: Offset y_0 , centar x_0 , pojačanje A , širine t_1 i t_2 . Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm i 2 mm. Parametri x_0 i y_0 su bili tokom fita stalno jednaki 0
20. **Tabela 6.3:** Parametri Promena temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(w)$ u funkciji širine defekta w , za iste vrednosti dubine defekta d od 0.5 (mm) do 1.5 (mm) 101
 21. **Tabela 6.4:** Eksperimentalni uslovi: Sekvenca NEW 0040.SEQ je snimljena 26. 08. 2008 na ETF u Beogradu, termovizijskom kamerom ThermaCAM SC640 u 14:57:57 105
 22. **Tabela 6.5:** Rezultati fitovanja sinusnom funkcijom temperaturnog profila $T_{LI01} = f(N_{\text{pix}})$ duž centralne linije LI01. Parametri $w = 19.75$ i $x_c = 10.125$ su konstantni za sve kadrove N_f 109
 23. **Tabela 6.6:** Rezultati fitovanja sinusnom funkcijom temperaturnog profila $T_{LI01} = f(N_{\text{pix}})$ duž centralne linije Li1. Parametri $w = 19.28174$ i $x_c = 15,0717$ su konstantni za sve kadrove N_f 111

Lista slika

1.	Slika 2.1: Osnovna merna oprema za IRT nadzor	4
2.	Slika 2.2: Tehnike IRT: (a) Transmisivna i (b) Refleksivna	5
3.	Slika 2.3: Termografska kontrola: (a) Transmisivna i (b) Refleksivna	5
4.	Slika 2.4: Šematski prikaz eksperimentalne postavke [4,6]	9
5.	Slika 3.1: Uzorak preseka: L debljina ploče, w širina žljeba, d dubina žljeba	14
6.	Slika 3.2: Osnovna ćelija prikazana sa mrežom za izračunavanje upotrebljena za numeričku simulaciju. Granice gde su periodični granični uslovi primenjeni označene su sa a i granice gde je nulti Neumann granični uslov je označene sa b	15
7.	Slika 3.3: Tipičan rezultat simulacije za različite ΔT_0 između temperature na različitim pozicijama u uzorku i temperaturi okoline T_0	16
8.	Slika 3.4: Dijagram toka predloženog metoda konačne razlike - FDM i eksperimentalne procedure za karakterizaciju defekata kod aluminijumske ploče sa periodičnom strukturom defekata – PST.	18
9.	Slika 3.5: Šematski dijagram za ilustraciju konstrukcije mreže za rešenje PDJ metodom konačne razlike	20
10.	Slika 3.6: Struktura mreže za dvodimenzionalnu (2D) numeričku simulaciju provođenja toplote za toplotni izvor iznad i žleb na dubini d	21
11.	Slika 3.7: Debljina gušće mreže $d1$, debljina ređe mreže d i debljina TP L : Postavljanje vrednosti termofizičkih veličina (slika levo)	22
11.	Slika 3.8: Debljina čvora gušće mreže $dx1$, debljina čvora ređe mreže $dx2$	22
12.	Slika 3.9: Širina defekta w i dy širina čvora u pravcu y ose	23
13.	Slika 3.10: Fotografski snimak tipičnog vremenskog oblika svetlosne pobude	24
14.	Slika 3.11: Vremenski oblik svetlosne pobude	25
15.	Slika 3.12: Promena koeficijenta $K_{\Delta T}$ u vremenu	28
16.	Slika 3.13: Promena koeficijenta $K_{\Delta T}$ u vremenu	28
17.	Slika 3.14: Temperatura za određeni sloj materijala paralelan površini: Sloj $x = 0$ na površini test ploče TP 13 sa $N_d = 6$. Temperatura duž centralne linije $T_{\min}(y = 0 \text{ mm} + n \cdot 8 \text{ mm}) = 0.353 \text{ K}$ i $T_{\max}(y = 4 \text{ mm} + n \cdot 8 \text{ mm}) = 0.9299 \text{ K}$, $n = 0,1,2,3,4,5$	29
18.	Slika 3.15: Temperaturni kontrast ΔT za određeni sloj materijala paralelan površini: Sloj $x = 0$ na površini test ploče TP 13 sa $N_d = 6$. Karakteristična tačka maksimalnog temperaturnog kontrasta $T_{\max} = 0.7362$ ($^{\circ}\text{C}$) za $Q1 = 0.171239\text{E}6 \text{ W/m}^2$ i crvena kriva za $Q2 = 0.1342\text{E}6 \text{ (W/m}^2)$.	29
19.	Slika 4.1: Problem radiometrijskog mernja	32
20.	Slika 4.2: Pripremni uzorci	35
21.	Slika 4.3: Šema model uzorka TP 13: (a) slika modela uzorka sa označenim presekom duž centralne linije (b) Slika poprečnog preseka žljeba, Presek A:A	36
22.	Slika 4.4: Izgled ispitne test ploče TP13: Broj defekata: 6, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm i TP14: Broj defekata: 8, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm	37
23.	Slika 4.5: Izgled ispitne test ploče TP15: Broj defekata: 9, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm i TP16: Broj defekata: 11, Dubina defekta: 0.5,	38

	1.0 i 1.5 mm	
24.	Slika 4.6: Izgled ispitne test ploče TP17: Broj defekata: 15, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm i TP18: Broj defekata: 23, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm	39
25.	Slika 4.7: Eksperimentalna postavka sa dva sinhronizovana blic (test uzorak je u obliku ploče dimenzije površine 50 x 30 mm ²): a) termogram i dva blica u okolini i b) Fotografija eksperimentalne postavke sa dva blica svetlosni izvor fotografski blic YASHICA CS-250AF	39
26.	Slika 4.8: Šematski prikaz eksperimentalne postavke u refleksnom modu fotografski blic i termovizijska kamera	40
27.	Slika 4.9: Kamera Flir SC 620	40
28.	Slika 4.10: Upravljanje snimanjem preko PC računara ili LT računara	45
29.	Slika 4.11: Šematski prikaz opšte termografske merne situacije: 1) Okolina, 2) Objekat, 3) Atmosfera i 4) Kamera	47
30.	Slika 4.12: Kalibraciona kriva IC kamere i postavljanje nivoa i opsega za temperaturno izračunavanje (primer jednog 8-bitnog sistem)	47
25.	Slika 4.13: Oblasti AR01 na površini crnog tela iz koje su uzete vrednosti temperatura IC piksela za određivanje standardnog odstupanja Gausove normalne raspodele	49
26.	Slika 4.14: Histogram merenja temperature IC piksela u oblasti AR01 za klasu 64	50
27.	Slika 4.15: Procentualna zastupljenost izmerenih temperature po klasama histograma: temperaturni opseg jedne klase je 0.0156 (°C) u opsegu izmerenih temperature od 29.75 do 30.73 (°C). Histogram merenja temperature IC piksela u oblasti AR01 za klasu 64	50
28.	Slika 4.16: Oblasti na površini hladne test ploče za određivanje oblika histograma	52
29.	Slika 4.17: Statističko rasipanje rezultata	53
30.	Slika 4.18: Termogram površine test uzorka: a) Početni termogram za analizu SEQ(220) i b) Temperaturni odraz niza od 6 defekta na ozračenju površini test uzorka, termogram SEQ(233)	54
31.	Slika 4.19: Neravnomerno ozračenja površina test uzorka, termogram SEQ(230)	54
32.	Slika 4.20: Vertikalna linija IC piksela za termogram SEQ(233)	55
33.	Slika 4.21: Temperaturni profil: a) Promena temperature IC piksela duž vertikalne linije LI02 (crvena linija) i b) Promena temperature IC piksela duž LI01 normalne na defekte (crna linija)	55
34.	Slika 4.22: Oblast AR01 IC piksela za termogram SEQ(233)	55
35.	Slika 4.23: Temperaturni razvoj $T_1(t)$ i $T_2(t)$, za termograme od SEQ.847(187) do SEQ.847(207)	56
36.	Slika 4.24: Primer termogram sa višom temperaturom: Podaci se uzimaju sa centralne linije LI01 normalna na defekte i vertikalna linija paralelne na taj pravac	56
37.	Slika 4.25: Primer trećeg termograma od početka sekvence: Snimljena sekvenca NEW0040.SEQ. Podaci se uzimaju sa centralne linije Li1 normalna na defekte	57
38.	Slika 4.26: Temperaturni profil duž linije specificirane u Tabeli 2.2 trećeg termograma od početka snimljene sekvenca NEW0040.SEQ	58

39.	Slika 4.27: Prvi primer neuniformnog zagrevanja	59
40.	Slika 4.28: Temperaturni profil duž linije LI01 po sredini dve sjajne oblasti sa Slike 4.25: Na ordinati su vrednosti temperature u (°C) a na apscisi broj piksela N_{pix} od 1 do 319 piksela	59
41.	Slika 4.29: Temperaturni profil duž linije LI01 za termogram na Slici 2.10 Na ordinati su vrednosti temperature u (°C) a na apscisi broj piksela N_{pix} od 1 do 319 piksela	60
42.	Slika 4.30: Termogram snimljen posle pozicioniranja i optimizacije položaja fotografskog blica kao i eliminacije parazitnih vrućih predmeta iz okoline test uzorka	60
43.	Slika 4.31: Drugi termogram sa višom temperaturom u snimljenoj sekvenci	61
44.	Slika 4.32: Zavisnost temperature IC piksela SP01, SP02, SP03, SP04 i SP05 u vremenu (od broja frejma N_f u snimljenoj sekvenci SEQ.847	61
45.	Slika 4.33: Zavisnost temperature IC piksela SP01, SP02, SP03, SP04 i SP05 u vremenu (od broja frejma N_f u snimljenoj sekvenci SEQ.847. SP01 – Roze linija predstavlja vremensku promenu temperature IC piksela lociranog u levom donjem uglu termograma van površine pločice (X1=125, Y1=98) i SP02 – Plava linija predstavlja vremensku promenu temperature IC piksela lociranog u levom donjem uglu pločice (X2=199, Y2=100)	62
46.	Slika 4.34: Termogrami 2 sukcesivna frejma vremenski pomerena za $t_f = 33.33$ (ms)	62
47.	Slika 4.35: Eksperimentalna postavka sa dva sinhronizovana blic (test uzorak je u obliku ploče dimenzije površine $50 \times 30 \text{ mm}^2$): a) Fotografija eksperimentalne postavke sa dva blica i b) termogram i dva blica u okolini	64
48.	Slika 4.36: Profil duž centralne linije LI01 (u 38 redu odozgo), šest žlebova se jasno razlikuju	65
49.	Slika 4.37: Profil duž centralne linije (u 38 redu odozgo na Slici 4.34): Horizontalna skala je koordinata duž centralne linije normalno na žlebove y (mm) ili kordinate piksela duž reda 38 i vertikalna skala temperature piksela T_{pix}	66
50.	Slika 4.38: Profil duž centralne linije (u 38 redu odozgo na Slici 4.34): Harmonijska analiza signala u OriginPro. 8 programu od 0.125 Hz do 0.2 Hz (Hz predstavlja prostornu frekvenciju 1/mm)	67
51.	Slika 4.39: Tipična toplotna slika površine uzorka posle zagrevanja svetlosnim impulsom	68
52.	Slika 4.40: Prostorna temperaturna raspodela na površini uzorka dobijena sa termograma prikazanog na Slici 4.37 , pošto se izvrši filtriranje šuma	69
53.	Slika 4.41: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 bez filtriranja šuma: Sekvenca 847.Seq_193. frame(57)	70
54.	Slika 4.42: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 bez filtriranja šuma: Sekvenca 847.Seq_193.frame (57): Za X1 = 202 i X2 = 323 piksela za Y1=Y2=57 piksela	71
55.	Slika 4.43: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 posle izvršenog filtriranja šuma usrednjavanja duž vertikalnih linija: Sekvenca SEQ_192. frame(56)	72
56.	Slika 4.44: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 posle izvršenog filtriranja šuma usrednjavanja duž vertikalnih linija: Sekvenca SEQ_192.	72

- frame(56)
57. **Slika 4.45:** Temperatura T duž centralne linije LI01: Broj piksela od $i = 297$ do 434 , $j = 22$, za sekvencu '**Seq_0192_11.jpg**', temperaturni profil (crna linija) za original Wiener-ovim filtrom filtrirana slika (parametri WF: odnos signa-šum $n_{sr} = 0.01$ i $K = 0.00011$) 73
58. **Slika 4.46:** Rezultati simulacije filtriranja: a) Originalna IC slika izvorni termogram Al test ploče za 24,99 ms nakon zagrevanja blicem, b) Zašumljena crno-bela IC slika, c) filtrirana IC slika metodom wiener2 (3 8) i d) Crno-bela IC slika sa linijom LI01 sa koje su uzeti podsci 74
59. **Slika 4.47:** IC slike u .jpg formatu 194-og frejma snimljene sekvencu SEQ.847: a) Originalna IC slika u boji b) Konvertovana IC slika a) crno-bela (W&B format), temperatura je predstavljena u nivou sivog c) Crno-bela slika b) filtrirana Wiener filtrom i d) Crno-bela slika sa linijom duž koje su uzeti podaci 75
60. **Slika 4.48:** Temperaturni profil duž centralne linije LI01 posle izvršenog filtriranja šuma Wiener filtrom: Sekvenca SEQ_192. frame(56) i LI01 na poziciji 56-og reda odozgo 75
61. **Slika 4.49:** Temperaturni profil duž centralne linije LI01 posle izvršenog filtriranja šuma Wiener filtrom i usrednjavanja duž vertikalnih linija: Sekvenca SEQ_192. frame(56) 76
62. **Slika 4.50:** Termogrami Sekvenca 847.SEQ: IC slike od 190. frejma (pre blica) i frejmovi od 191 do 197 (posle blica). AR01 oblast i pored njega prikaz srednje temperature za dati frejm 78
63. **Slika 4.51:** Termogram iz sekvence 847.SEQ: IC slike 194 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 281 79
64. **Slika 4.52:** Termogram iz sekvence 847.SEQ: IC slike 194 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 281 79
65. **Slika 4.53:** Termogram levo TP13 za termovizijsku kameru SC640, za 3 frejm snimljene sekvence NEW0040 sa ukupno 6 frejmova. Termogram desno za termovizijsku kameru P640, za 34 frejm snimljene sekvence SEQ.005 sa ukupno 84 frejma 80
66. **Slika 4.54:** Termogram iz sekvence NEW0040: IC slike 3 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 80
67. **Slika 4.55:** Termogram iz sekvence SEQ.005: IC slike 34 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 84 81
68. **Slika 4.56:** Termogram iz sekvence SEQ_210706_001: IC slike 71 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 107 81
69. **Slika 4.57:** Termogram iz sekvence SEQ.005: IC slike 34 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 84 82
70. **Slika 5.1:** Eksperimentalni rezultati za temperaturnu razliku $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ u seriji frejmova fitovanih sa krivom dobijenom numeričkom simulacijom, za aluminijumski uzorak debljine $L = 2$ mm, sa defektima širine $w = 4$ mm i dubine $d = 0.5$ mm 83

71.	Slika 5.2: Zavisnost maksimalne temperaturne razlike ΔT_{\max} na površini uzorka od dubine defekta, za defekte širine $w = 4$ mm, u aluminijumskom uzorku	84
72.	Slika 5.3: Zavisnost maksimalne temperaturne razlike ΔT_{\max} na površini uzorka od dubine defekta, za različite širine defekta	85
73.	Slika 5.4: Eksperimentalni rezultati za temperaturnu razliku $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ u seriji frejmova $\Delta T(t_i)$ fitovanih sa krivom dobijenom numeričkom simulacijom, za aluminijumski uzorak debljine $L = 2$ mm, sa defektima širine $w = 4$ mm i dubine $d = 0.5$ mm	86
74.	Slika 5.5: Zavisnost maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta od dubine defekta $\Delta T_{\max} = f(d)$ za nekoliko vrednosti širina defekta izrađenih žljebova u Al ploči: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm	88
75.	Slika 5.6: Zavisnost temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} od prostorne frekvencije f_w (lp/mm): Dubina defekta $d = 0.5$ mm; 1 mm i 1.5 mm	90
76.	Slika 5.7: Promena temperaturnog kontrasta od širine defekta $\Delta T_{\max} = f(w)$: Dubina defekta $d = 0.5$ mm; 1 mm i 1.5 mm	91
77.	Slika 5.8: Zavisnost vremena dostizanja maksimalnog temperaturnog kontrasta od širine defekta $t_{\max} = f(w)$: Dubina defekta se kreće od $d = 0.25$ (mm) u koraku od 0.25 (mm); do $d = 1.75$ mm	92
78.	Slika 5.9: Zavisnost vremena dostizanja maksimalnog temperaturnog kontrasta od širine defekta $t_{\max} = f(w)$: Dubina defekta se kreće od $d = 0.25$ (mm) u koraku od 0.25 (mm); do $d = 1.75$ mm	93
79.	Slika 6.1: Šema periodičnih defekata u obliku žljebova u materijalu	98
80.	Slika 6.2: Zavisnost temperaturne modulacione transfer funkcije TMTF = $f(Fo)$: Na ordinati su date vrednosti TMTF u (%) prema jednačini (5.3) za test ploče širine $w = 4$ (mm), 3 (mm), 2.5 (mm) i 2 (mm) na istoj dubini od $d = 0.5$ (mm)	98
81.	Slika 6.3: Zavisnost temperaturne od Fourier - ovog broja (Fo): T_{\max} je temperatura na sredini žljeba, T_{\min} na sredini između dva žljeba i $T(y = 2$ mm) temperatura na graničnoj ivici između dva žljeba, za TP13 kad koje je širina žljeba $w = 4$ (mm) i dubina $d = 0.5$ (mm). Maksimalna vrednost temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = 1.214$ (°C)	99
82.	Slika 6.4: Zavisnost maksimalne vrednosti temperaturne modulacione transfer funkcije od Fo njegovog dostizanja: Fo_{\max} se menja od vrednosti 0.081 najužih defekata (širine 1 mm) do 0.25 najširih defekata (širine 4 mm)	100
83.	Slika 6.5: Zavisnost maksimalne vrednosti promena temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(f_w)$, za iste vrednosti dubine defekta d od 0.5 (mm), 1.0 (mm) i 1.5 (mm)	101
84.	Slika 6.6: Izgled temperaturnog profila duž linije Li i Y=120.	102
85.	Slika 6.7: Slike 2 aluminijumske pločice sa strane simuliranih defekata: a) Test ploča TP14 sa 8 defekata u obliku žljeba i b) Test ploča TP13 sa 6 defekata	104
86.	Slika 6.8: Temperaturni profil duž centralne linije normalne na žljebove na prednjoj strani aluminijumskog uzorka TP13, u prvom frejmu sa povišenom temperaturom	105
87.	Slika 6.9: Periodične strukture (prostorna učestanost): (a) Sinusna - raspodela (b) pravougaona raspodela radijanse	106
88.	Slika 6.10: Geometrijski odnosi i osnovne definicije karakteristične	107

- prostorne učestanosti
89. **Slika 6.11:** Termogram uzorka TP13 za broj frejma $N_f=3$ duž marker linije Li1 109
90. **Slika 6.12:** Temperaturni profil T_{Li01} (°C) duž centralne linije normalne na žljebove, od $N_{pix} = 1$ pix do $N_{pix} = 241$ pix na prednjoj strani aluminijskog uzorka TP13. 110
Crna linija - temperaturni profil $T_{Li1_fit} = f(N_{pix})$, rezultat fita sinusnom funkcijom eksperimentalnih rezultata za prvi kadar sa povišenom temperaturom.
Crvena linija (gornja) - za drugi kadar sa povišenom temperaturom.
Svetloplava linija - za treći kadar sa povišenom temperaturom.
Crvena linija (donja) – za četvrti kadar sa povišenom temperaturom.
Crvena linija – za kadar sa nižom temperaturom pre prvog kadra
91. **Slika 6.13:** Temperaturni profil T_{Li01} (°C) duž centralne linije Li1 normalne na žljebove, od $N_{pix} = 1$ pix do $N_{pix} = 241$ pix na prednjoj strani aluminijskog uzorka TP13, u prvom frejmu sa povišenom temperaturom 111
92. **Slika 6.14:** Temperaturni profil T_{Li01} (°C) duž centralne linije Li1 normalne na žljebove, od $N_{pix} = 1$ pix do $N_{pix} = 241$ pix na prednjoj strani aluminijske ploče TP13. 112
Crna linija - temperaturni profil $T_{Li01_fit} = f(N_{pix})$, rezultat fita sinusnom funkcijom eksperimentalnih rezultata za prvi frejm sa povišenom temperaturom.
Plava linija - za drugi kadar sa povišenom temperaturom.
Tamno zelena linija - za treći frejm sa povišenom temperaturom.
Crvena linija (gornja) – za četvrti frejm sa povišenom temperaturom.
Crvena linija (donja) – za frejm sa nižom temperaturom pre prvog frejma

1. Uvod

Termografija je jedna od tehnika koja omogućava da se vidi ono što je golim okom nevidljivo. Osim stalnog i vidnog komercijalnog napredovanja u oblasti termovizije, IC senzora, obrade i analize termograma, postoji stalna zainteresovanost za istraživanja u oblasti nedestruktivnog ispitivanja termofizičkih osobina materijala IC termografijom. Predložena tema primene IC termografije spada u grupu savremene problematike danas u svetu.

Tehnika nedestruktivnog ispitivanja materijala, nedestruktivna detekcija defekata (*non-destructive defect detection*), primenom impulsne svetlosne pobude i praćenjem vremenskog odziva temperaturnog polja na površini materijala omogućava utvrđivanje postojanja defekta unutar materijala. Ukoliko se koristi impulsni izvor svetlosti (npr. fotografski blic) za impulsno zagrevanje i termovizijska kamera za praćenje vremenskog razvoja temperature na površini tada se primenjena tehnika naziva impulsna termografija (eng. *pulsed thermography*).

Jedan od osnovnih pravaca u razvoju celokupne infracrvene tehnologije je dobijanje fotodetektorskih elemenata i nizova za funkcionisanje na sobnoj temperaturi. Takvim postupkom bi se izbegli komplikovani i skupi sklopovi za kriogeno hlađenje i detektori postali kompaktniji i pristupačniji, kompatibilni sa silicijumskom tehnologijom i izuzetno pogodni za formiranje velikih nizova i matrica, pogotovo ako se primeni postupak mikrosistemskih tehnologija. Dok na tržištu postoje termovizijske kamere potpuno automatizovane, idealne za brzu i preciznu temperaturnu analizu termofizičkih osobina materijala, detektori najnovije generacije, fokalne matrice i prijemne optike obezbeđuju digitalizovanu IC sliku CCIR formata.

Od kada je prvi put uvedena ranih šesdesetih godina kao metod za merenje termalne difuzivnosti, impulsna termografija se pojavljuje kao veoma koristan alat za nedestruktivna i bezkontaktna ispitivanja. Poboljšanjem termovizijskih kamera i njihove brzine, kratkotrajni procesi u emitovanom termalnom zračenju su korišćeni za karakterizaciju defekata. Metod se koristi za otkrivanje defekata u mnoštvu materijala i geometrija uzoraka, ali takođe i za kontrolu korozije, poroznosti i kvaliteta lepljenih struktura. Brz je i može biti primenjen i na industrijsku proizvodnju i procese održavanja. U industriji postoji stalna potreba za novim pristupima u analizi termofizičkih osobina materijala, a takođe i režima rada sistema za ispitivanje. Neblagovremeno uočavanje destruktivnih termofizičkih pojava u materijalima, kako u procesu proizvodnje tako i u eksploataciji pojedinih uređaja ili sistema, mogu dovesti do lomova ili čak i težih havarija, pa je ova problematika uvek aktuelna i značajna. Kako je jedan od ciljeva disertacije bio da se razvije metoda za masovnu primenu u industriji, oprema koja je korišćena pri istraživanju je komercijalna, ali predstavlja poslednju reč u razvoju IC tehnologije.

Interpretacija eksperimentalnih rezultata često zahteva numeričko modelovanje, kao što je urađeno u većini publikovanih radova iz ove oblasti, mada se neki radovi uglavnom odnose na teoretske aspekte metoda. Ipak, metod takođe ima neka ograničenja, kao naprimer postizanje brze, uniformne i snažne termalne pobude na velikoj površini test uzorka i pojavu prividnih ponora ili izvora usled konvektivnog ili termalnog zračenja, što utiče na pouzdanost analize termalne slike.

Radijacione i termalne karakteristike materijala mogu značajno da utiču na veličinu i dubinu defekta koje je moguće otkriti. Da bi ispitali ove odnose, izrađeni su specijalni test uzorci – paralelni žljebovi, dugi 1.5 cm, koji su urezani u aluminijumsku ploču, pri čemu je širina žljebova jednaka rastojanju između njih. Na ovaj način je dobijena periodična struktura defekta sa određenom prostornom frekvencijom i određenom dubinom. Širina

žljebova je bila nekoliko puta manja od njihove dužine, tako da struktura može da se smatra jednodimenzionalnom. Napravljeni su test uzorci sa različitim širinama i dubinama žljebova, što je omogućilo ispitivanje njihove uzajamne zavisnosti od mogućnosti otkrivanja defekata. Uzorci su nakon mašinske obrade bili crno anodizirani.

Eksperimentalni rezultati bili su dobijeni standardnom termovizijskom kamerom. Vremenska zavisnost temperature na površini posle apsorpcije kratkih svetlosnih impulsa je upotrebljena za dobijanje informacije o potpovršinskoj strukturi i termo-fizičkim osobinama materijala. Međutim standardnom termovizijskom kamerom nije najčešće moguće sinhronizovati vreme akvizicije frejma sa svetlosnim impulsom za zagrevanje, tako da je često teško odrediti ako je prvo dobijen frejm sa porastom temperature pre ili posle maksimalne vrednosti temperaturne razlike na površini uzorka. Naknadno, to nije moguće dobiti iz eksperimentalnih rezultata, osim ako je neki od frejmova tačno u trenutku dostizanja maksimalne vrednosti temperaturne razlike, koja je važna za određivanje veličine i dubine defekta. Zbog toga je bilo neophodno da se eksperimentalne tačke fituju krivom zasnovanom na teoriji, a takva kriva može biti dobijena samo pomoću numeričke simulacije.

U cilju provere osnovne hipoteze formulisan je odgovarajući matematičko-fizički model koji je iskorišćen za analizu efekata koji su svojstveni prisustvu defekata u materijalu ispod površine na izmenu temperaturnog polja na površini materijala koji se ispituje u sceni, menjajući IC signaturu i izgled termovizijske slike. Rezultati teorijskih istraživanja uticaja periodičnih defekata u aluminijumskoj ploči različitih širina i dubina nisu do sada bili publikovani.

Pored teorijskih istraživanja izvršene su eksperimentalne provere osnovne hipoteze. Numerički kod napisan u programskom paketu MATLAB i omogućava analizu uticaja dubine i širine defekta ispod površine, to postoji mogućnost programirane primene za različite materijale. Kao rezultat istraživanja izvršeno je poređenje teorijske krive i eksperimentalnih rezultata.

Okosnica ovog rada je teorijska i eksperimentalna provera polazne hipoteze kao i praktičnih posledica mogućeg uticaja periodičnih defekata različitih širina i dubine na izmenu IC signature. Ovom zadatku je prilagođena i struktura ovog rada:

U **Uvodu** je istaknut veliki potencijal koji IC termografija, prevashodno impulsna videotermografija, ima u procesima proizvodnje, kontrole kvaliteta i praćenja eksploatacije različitih proizvoda i uređaja, i to kao jedna od metoda nedestruktivne defektoskopije. Posebno je naglašen značaj tehnološkog napretka u proizvodnji infra-crvenih senzora za razvoj IC termografije. Polazeći od izuzetne aktuelnosti i perspektivnosti impulsne termografije sagledani su njeni trenutni dometi, kao i prepreke na putu daljeg napretka. Takođe su dati ciljevi disertacije, metodologija kojom će se navedeni ciljevi ostvariti i očekivani rezultati disertacije.

Drugo poglavlje se bavi problemom IC termografije kao metode nedestruktivnog ispitivanja materijala. U njemu su sistematski prikazane različite varijante IC termografije i pogodnosti njihove primene sa posebnim osvrtom na impulsnu termografiju. Dati su fizički osnovi na kojima je metoda zasnovana i osnovne jednačine koje regulišu apsorpciju i transport toplote.

Treće poglavlje posvećeno je numeričkom modelovanju procesa provođenja toplote u uzorku sa simuliranim defektima. Kako be se olakšala analiza eksperimentalnih rezultata, kojima su verifikovani validnost predloženog fizičkog modela i numerička simulacija, pretpostavljeni su defekti sa periodičnom strukturom. Periodična struktura defekata je, pored toga, omogućila uvođenje temperaturne prenosne funkcije u predikciju veličine i dubine defekata koji se mogu detektovati IC termografijom. U poglavlju je detaljno opisan

numerički kod razvijen u MATLAB-u korišćenjem metode konačnih razlika, granični i početni uslovi, matematički model svetlosnog impulsa i njegova apsorpcija, kao i testiranje samoga koda. Takođe su prikazani rezultati simulacije za različite karakteristike defekata, i to u vidu temperaturnog polja u uzorku, a za različite eksperimentalne uslove.

U **poglavlju 4** opisan je eksperiment i prikazani eksperimentalni rezultati. Detaljno su opisani priprema eksperimentalnih uzoraka, postavka eksperimata i karakteristike korišćene opreme. Posebna pažnja je posvećena određivanju merne nesigurnosti i metodologiji snimanja termograma i prikupljanja mernih rezultata. Na kraju su dati eksperimentalni rezultati u sirovom stanju i nakon obrade i izvršena je njihova analiza.

Opisane su specifičnosti primene termovizijskih uređaja u impulsnoj termografiji kao jednoj od metoda nekontaktne defektoskopije. Osnovni cilj je definisanje ukupne širine i značaja primene termovizijskih kamera za otkrivanje periodične strukture defekata različitih širina i dubina.

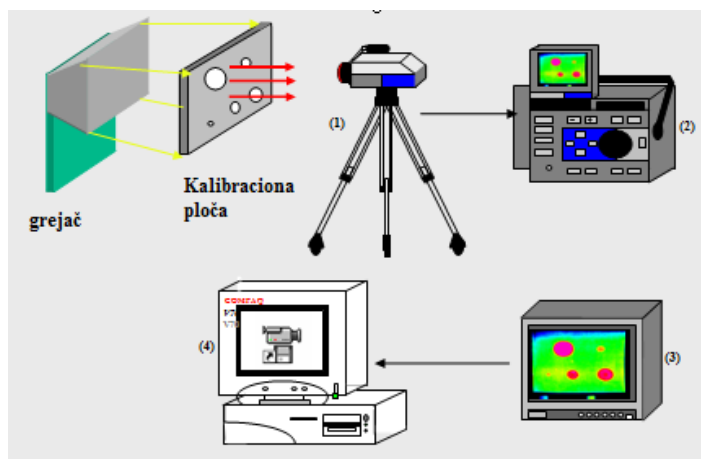
U **poglavlju 5** izvršena je detaljno poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Kao parametar po kome je vršeno poređenje odabrana je maksimalna temperaturna razlika na površini uzorka. Fitovanjem eksperimentalnih rezultata krivom dobijenom u numeričkoj simulaciji otklonjen je problem koji u obradi rezultata nastaje zbog nemogućnosti kontinualne akvizicije podataka termovizijskom kamerom. Ova nemogućnost je izazvana karakteristikama kamere, koja radi samo u frejm modu, pa su podaci o temperaturnom polju na površini uzorka u trenucima između frejmova nedostupni za analizu. Konstatovano je izvanredno slaganje između eksperimentalnih i numeričkih rezultata, čime je potvrđena validnost fizičkog modela i numeričkog koda. Nakon toga je izvršena numerička predikcija maksimalne temperaturne razlike na površini uzorka za različite dubine i širine defekata.

U **šestom** poglavlju definisana je temperaturna modulaciona transfer funkcija za periodične defekte, sa osvrtom na inverzni pristup u impulsnoj termografiji. Izvršena je analiza temperaturne transfer funkcije pomoću centralne linije termograma, a na osnovu koncepta prostorne učestanosti.

U **zaključku**, koji predstavlja sedmo poglavlje, dat je pregled najvažnijih rezultata doktorske disertacije i istaknuti su njeni glavni doprinosi. Na kraju disertacije, pored priloga i liste referenci, dati su opšti zaključci izvedeni iz celine rada, kao i perspektive daljih istraživanja u oblasti impulsne termografije za termofizičku karakterizaciju materijal.

2. Infracrvena termografija

IC termografija (eng. *Infrared Thermography* - IRT) [1] je savremena tehnika nedestruktivnog testiranja – NDT materijala i ima značajnu primenu za kontrolu aviona. Osnovna merna oprema za IRT nadzor prikazana je na [Slici 2.1](#) i u mernom nizu sadrži: (1) IC kameru, (2) kontrolna tabla kamere, (3) direktni pregled na monitoru i (4) procesiranje signala i akvizicija podataka.



Slika 2.1: Osnovna merna oprema za IRT nadzor

Stručnjak za nedestruktivno testiranje – NDT materijala pri krajnjoj kontroli pre izlaza proizvoda. Pri izboru merne opreme za upotrebu u IRT, ključno mesto zauzima izbor termovizijske kamere (IC kamera).

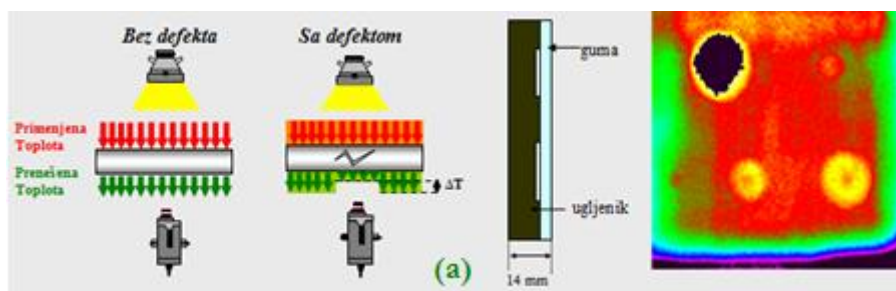
- Višestruka upotreba IC detektora obuhvata: IC noćno osmatranje scene, termalnu kontrolu aktivnih izvora, za vojnu primenu,
- Termalna osetljivost: (0.1°C do 0.01°C).
- Frekvencija akvizicije-prikupljanja podataka: (25 slika/s do 300 slika/s).
- Način linijske akvizicije ili fokalna matrica-FPA.

Izbor grejača:

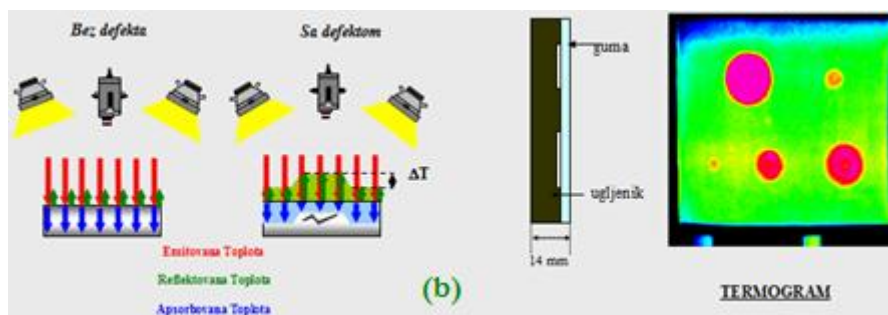
- Različite tehnike: ventilator sistema za grejanje – kompresor vrućeg vazduha, lampe, fleš lampe- bljeskalice, vruća voda, impulsno zagrevanje, laser, sunčevi zraci sa blendom za otvor iznad ispitivanog materijala, vrući prekrivači – navlake.
- Površinsko zagrevanje ili linijski grejači.
- Homogenost, ponovljivost, kalibracione karakteristike podešavanja parametara.

IC termografija pokazuje dobre rezultate kod kontrole npr. kompozitnih materijala što je poznato u velikom broju referenci na temu primene na tim materijalima. Primenjuju se dve ravnopravne tehnike transmisivna i reflektivna, prikazane na [Slici 2.2](#) pod (a) i pod (b) respektivno.

- Transmisivna tehnika:

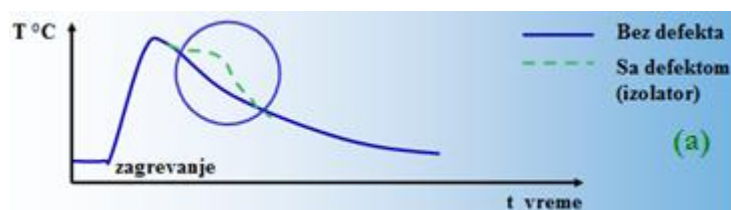


- Refleksivna tehnika:



Slika 2.2: Tehnike IRT: (a) Transmisivna i (b) Refleksiivna:

Temperaturne promene u tački iznad defekta i tački van defekta su prikazane na Slici 2.3.



Slika 2.3: Termografska kontrola: (a) Transmisivna i (b) Refleksiivna.

Prednosti metode:

- Ukupno ispitivanje celog materijala.
- Za pregled se zahteva pristup samo JEDNOJ STRANI.
- Ispitivanje se vrši u realnom vremenu.
- Primena za sve kompozitne strukture i materijale ravnomerne poroznosti.
- Nije osetljiva za male površine, već je naročito pogodna za velike površine materijala.

Nedostaci metode:

- Osetljiva na primenjeni način zagrevanja (tip izvora, trajanje impulsa i poziciju izvora).
- Mora se analizirati vreme odziva.

- Tačno se moraju poznavati termofizičke karakteristike upotrebljenog komada materijala ili njegova debljina.
- Manje je objašnjena nego ultrazvučna defektoskopija i radiografija.
- Nehomogeno zagrevanje na složenim delovima materijala koji se ispituje.

Pojavljivanje defekta:

- Nedostatak prijanjanja i kohezije na lepljenim površinama, vazdušni mehurovi.
- Raslojavanje.
- Defekti na površinama prevlaka.
- Uključuje strane materijale.
- Ulaz tečnosti.

2.1 Termografska nedestruktivna defektoskopija

Termografija nedestruktivna defektoskopija je jedna od tehnika koja omogućava da se vidi nevidljivo. Metodologija termografskog nedestruktivnog testiranja TNDT se zasniva na tri osnovna koncepta:

- Aktivni ili pasivni metod,
- Procesiranje slika i
- Kvantitativne karakterizacije.

Šematski prikaz eksperimentalne postavke IC termografije za nedestruktivno ispitivanje (TNDT), prikazana je na [Slici 2.2](#).

Mnoge istraživačke grupe rade na rešavanju inverznog problema pomoću podataka dobijenih termografskim merenjima površinske temperature impulsnom videotermografijom, tj. da se iz eksperimentalnog skupa TNDT podataka, izdvajaju kvantitativne veličine za defekte ispod površine kao što su dubina i veličina. Ovo je važno pitanje da bi se kvalitativno procenila ozbiljnost defektne oblasti. Na ovu temu su objavljeni mnogi radovi do sada [1-14, 40-52].

Da bi proučavali ovaj problem odlučili smo se, da odaberemo pored nekoliko poznatih pristupa, praktičan numerički pristup koji je kombinovan sa tehnikama procesiranja slike.

2.2 Impulsna termografija

Osnove impulsne metode za merenje toplotne difuzivnosti prvi put je postavio Parker sa saradnicima još ranih 1960-ih [1-5, 126-130]. Kod ove metode impuls zračenja iz pogodnog izvora se apsorbuje na prednjem površinskom sloju takog cilindričnog, homogenog uzorka. Iz vremena porasta temperature njegove zadnje strane do polovine svoje maksimalne vrednosti određuje se toplotna difuzivnost. Impulsna termografija (eng. *pulse thermography* – PT), se pojavljuje kao veoma koristan alat za nedestruktivno (eng. *nondestructive testing* - NDT), i nekontaktno testiranje [6-13]. Sa poboljšanjem termovizijskih kamera i povećanjem njihove brzine generisanja termovizijskih slika, kratkotrajni procesi u emitovanom termalnom zračenju su upotrebljene za karakterizaciju defekta [14-17, 131-134]. Uvođenjem uređaja za obrazovanje termalne slike metoda se sada uobičajeno zove impulsna videotermografija (eng. *pulse video thermography* - PVT) [18-21, 135-139].

Metoda se koristi za detekciju defekata u različitim materijalima [22-31, 140-157] i geometrijske uzorke [28-29, 158,159], ali i za inspekciju korozije, lemljenih veza, poroznosti

i kvaliteta lepljenih delova strukture materijala [30-33, 160-163]. To je brz metod i može biti primenjen na oba industrijsku proizvodnju i održavanje procesa. Interpretacija eksperimentalnih rezultata često zahteva neko numeričko modelovanje, kako je navedeno u većini radova koji se bave impulsnom termografijom ali neki radovi se odnose uglavnom na teorijske aspekte metode [34-37, 164-169].

Međutim, metoda ima takođe neka ograničenja, kao što je postizanje brzog, uniformnog i energetski termalnu pobudu preko velike površine cilja ili pojave sporednih konvektivno ili radijaciono termalnih ponora ili izvora, koji utiču na pouzdanost analize termalne slike - termograma površine cilja.

Radijacione i termalne karakteristike materijala mogu u velikoj meri da utiču na veličinu i dubinu mogućnosti detekcije defekata.

2.3 Provođenje toplote u impulsnoj videtermografiji

Vremenska zavisnost temperature na površini posle apsorpcije kratkih svetlosnih impulsa je upotrebljen za dobijanje informacije o potpovršinskoj strukturi i termofizičkim osobinama materijala. Razlika temperatura T_2 i T_1 se prati. Odgovarajuća jednačina prenošenja toplote u pravouglim koordinatama, ukoliko nema izvora i ponora toplote osim apsorbovane energije iz svetlosnog snopa, je oblika:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(x, y, z, t) \quad (2.1)$$

gde je $Q(x, y, z, t)$ funkcija izvora toplote unutar uzorka dok je T temperatura, k toplotna provodnost, $c \cdot \rho$ zapreminski temperaturni kapacitet i t vreme.

Za potrebe metode impulsne videotermografije, može se pokazati [21,37,38,41,42] da se rešenje sistema jednačina provođenja toplote (3.1) za materijale sa periodičnom strukturom defekata može rešiti samo pomoću numeričke simulacije i dobiti teorijska kriva razlike temperatura T_2 i T_1 .

Kriva temperaturne razlike bazirana na teoriji fizičkog modela bilo je moguće razvijenim modelom vraćajući se na osobine uzorka. Na slici 3.2 prikazan je dijagram toka za predloženi MKR/eksperimentalne procedure za karakterizaciju defekata u aluminijumskoj ploči sa periodičnom strukturom defekata.

2.3.1 Rešavanje jednačine provođenja toplote

Neka se energija svetlosnog impulsa po jedinici površine Q i trajanja kraćeg od trajanja jednog frejma termovizijske kamere, apsorbuje u trenutku $t_0 = 0$ unutar zapremine uzorka specifične toplote c i gustine ρ tako da početna raspodela toplote bude određena bezdimenzionom funkcijom $Q(x)$. Rešavanje jednačine za dati model planparalelne pločice sa periodičnom strukturom defekata u obliku žljeba moguće je izvršiti samo numeričkim putem. U Prilogu 1 dat je jedan numerički postupak za izračunavanje temperaturnog kontrasta ΔT kao razlike temperatura T_2 i T_1 , kojeg je autor ove disertacije koristio u praksi. Uzmimo u obzir površinu $x = 0$ homogenog čvrstog materijala, koji je ozračen u x pravcu uniformnim fluksom radijacije $I(t) = Q_0 \cdot Q(t)$, gde je Q_0 energija apsorbovana u materijalu po jedinici površine, a $Q(t)$ je vremenski oblik svetlosnog impulsa, funkcija

eksponencijalnog impulsa. Rezultantna (krajnja) gustina energije $Q(x)$ unutar materijala u trenutku $t = 0$ je:

$$Q(x) = Q_0 \cdot \mu \cdot \exp(-\alpha x) \quad (x \geq 0)$$

$$Q(x) = 0 \quad (x < 0)$$

gde je μ koeficijent apsorpcije za pobudu, a T razlika temperatura (t.j. $T(t < 0) = 0$, $T(x, t = 0)$).

Početna inicijalna raspodela temperature unutar uzorka odmah nakon pobude, zanemarujući nelinearne efekte kao što su prelazne (kratkotrajne) faze, je:

$$T(x) = T_0 \exp(-\mu x)$$

gde je $T_0 = Q_0 \mu / c \rho$ početni porast temperature na površini, ρ je gustina i c je specifična toplota po jedinici mase materijala.

2.3.2 Numerički model za impulsno zagrevanje uzorka

Kompjuterski program za simulaciju baziran na modelu bio je napisan u MATLAB-u i 2D temperaturno polje na površini uzorka posle izlaganja zagrevanju svetlosnim impulsom dobijenim za različite vrednosti koeficijenta apsorpcije i različite dubine i širine defekta.

Kod metode impulsne videotermografije jedna od pretpostavki je da se energija svetlosnog snopa apsorbuje u vrlo tankom površinskom sloju uzorka debljine mnogo manje od debljine samog uzorka. Raspodela apsorbovane energije po dubini uzorka se može dobiti korišćenjem jednostavne relacije.

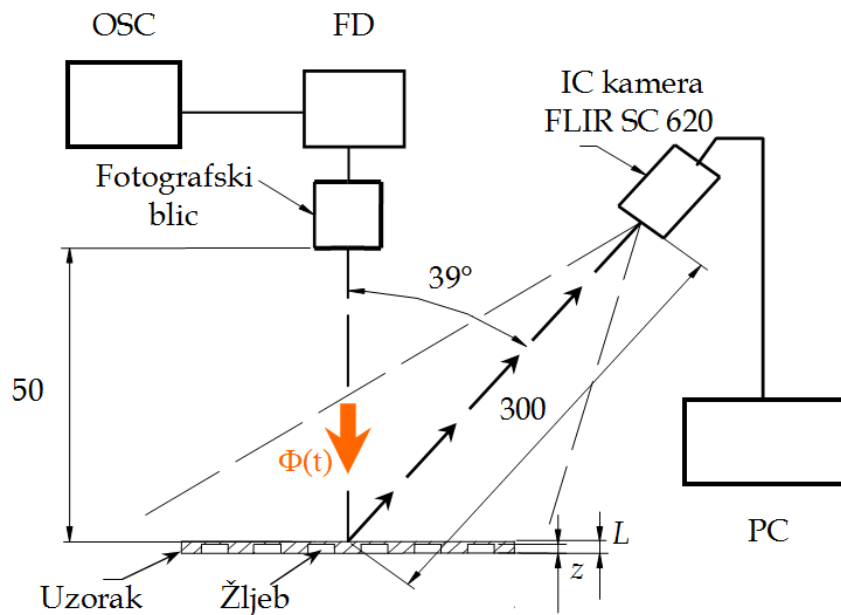
$$Q(x) = Q_0 \cdot e^{-\mu x}$$

gde je Q_0 energija svetlosnog snopa na površini uzorka ($x = 0$), a μ apsorpcioni koeficijent materijala uzorka. Kod čvrstih neprozračnih materijala, koeficijent μ je takav da se energija impulsnog izvora svetlosti apsorbuje praktično na samoj površini uzorka.

2.3.3 Svetlosni impuls pobudnog izvora

Teorijski vremenski oblik svetlosnog impulsa fotografskog blica $Q(t)$, snimljeno osciloskopom, pokazuje da se u osnovnoj postavci metode nemože poći od pretpostavke da je trajanje svetlosnog impulsa beskonačno kratko ili barem mnogo kraće od vremena porasta temperature zadnje strane zdravog materijala $x = L$, a pogotovo gornje ivice defekta $x = d$. Međutim, u praksi je čest slučaj da se impulsno grejanje prednje strane uzorka vrši u zavisnosti od karakteristika svetlosnog izvora u nekom konačnom trajanju t_p koje je poredivo sa vremenom porasata temperature. Izraz za promenu temperature uzorka se tada može naći primenom principa superpozicije. Pretpostavljamo da imamo seriju Dirakovih impulsa koji sukcesivno deluju na prednju površinu uzorka od trenutka $t = 0$ do $t = t_p$, kada amplituda svetlosnog impulsa opadne približno na nulu.

Fototermalni efekat je konverzija apsorbovane elektromagnetne energije, u toplotnu energiju u materijalu koji se ispituje [15, 16]. Fototermalni efekat može biti detektovan primenom metode fototermalne radiometrije – FTR, koja je zasnovana na detekciji promena IC zračenja emitovanog od uzorka koji je pobuđen elektromagnetskim zračenjem (laserom, ksenonskom bljeskalicom, fotografskim blicem, ...). Uopštena struktura sistema za analizu primenom tehnike impulsne video-termografije prikazana je na [Slici 2.4](#).



Slika 2.4: Šematski prikaz eksperimentalne postavke [4,6].

Vremenski oblik krive temperature na površini uzorka [8,9], zavisi od:

- Prodiranja pobudnog zračenja u materijal,
- Termalne difuzivnosti materijala,
- Transmisije materijala za emitovano IC zračenje

Vremenska zavisnost temperature na površini je izvor informacije o defektu u materijalu. Oblik toplotnog impulsa koji je generisan apsorpcijom zračenja ksenonske bljeskalice je:

$$\Phi_{\mu}(t) = \left(\frac{\Phi_0}{t_p} \right) \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_p} \right), \quad t > 0 \quad (2.2)$$

gde je $\Phi_{\mu}(t)$ vremenska promena absorbovanog fluksa na jedinici površine uzorka, Φ_0 je ukupna absorbovana energija po jedinici površine prednje strane, t_p je vreme za koje amplituda toplotnog impulsa dostiže maksimum. Određuje se posmatranjem impulsa izlaznog signala detektora fotodiode. Efekat ograničenog trajanja impulsa nastaje kada je ono uporedivo sa vremenom propagacije toplotnog talasa u uzorak.

Fluks radijacione energije svih talasnih dužina optičkog izvora na prednjoj strani uzorka $\Phi_{\mu}(t)$ se integriše po vremenu trajanja impulsa da se dobije absorbovana energija po jedinici površine uzorka Q_0 .

$$\mu \cdot \int_0^{\infty} \Phi_{\mu}(t) dt = \rho \cdot c \cdot T_0 \quad (2.3)$$

U izrazu (2), μ je koeficijent apsorpcije a T_0 je adijabatski porast temperature na površini prednje strane osvetljenog materijala. Amplituda toplotnog impulsa je Φ_0 (J/cm^2). Upadno zračenje se apsorbuje u vrlo tankom sloju pri površini uzorka. Prostorna raspodela absorbovane upadne energije se ne uzima u obzir. Radi se o ravnom uniformnom izvoru.

Tada je $\mu L \gg 1$, pa se forma toplotnog impulsa najčešće može aproksimirati Dirack-ovom delta funkcijom $\delta(x,t)=T-T_0$. Očekivana prostorna raspodela generisanog toplotnog impulsa je u pravcu dejstva pobude $E(x) = E_0\delta(x)$.

Distribucija toplote u čvrstom telu je opisana jednačinom:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{C_p \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

gde je T temperatura, k je toplotna provodnost, $C_p \cdot \rho$ zapreminski toplni kapacitet i t je vreme. Uzmimo u obzir površinu $x = 0$ polubeskonačnog homogenog materijala, koji je ozračen u x pravcu uniformnim fluksom radijacije $Q(t) = Q_0 V(t)$, gde je Q_0 energija apsorbovana u materijalu po jedinici površine, a $V(t)$ je vremenska promena funkcije svetlosnog impulsa. Rezultantna (krajnja) gustina energije $Q(x)$ unutar materijala u trenutku $t = 0$ je:

$$Q(x) = Q_0 \cdot \mu \cdot \exp(-\mu x) \quad (x \geq 0)$$

$$Q(x) = 0 \quad (x < 0)$$

gde je μ koeficijent apsorpcije za pobudu, a T_0 razlika temperatura (tj. $T(t < 0) = 0$, $T(x, t = 0)$). Početna distribucija temperature odmah nakon pobude, zanemarujući nelinearne efekte kao što su prelazne (kratkotrajne) faze, je:

$$T(x) = T_0 \exp(-\mu x)$$

gde je $T_0 = Q_0 \mu / C_p \rho$ početni porast temperature na površini, ρ je gustina i C_p je specifična toplota po jedinici mase materijala.

Predpostavka da je toplotni tok u y i z pravcu zanemarljiv (u praksi bi ovo značilo da dimenzije osvetljene površine moraju biti velike u odnosu na dubinu prodora obuhvaćenih radijacija), da su dimenzije defekata velike kao i rastojanja između njih i da su doprinosi toplotnom toku od strane termalne radijacije i kontakta u $x = 0$ sa vazduhom ili drugim materijalima zanemarljivi, omogućava korišćenje jednačine za 1D provođenja toplote.

Matematički model za raspodelu temperatura, koji odgovara konfiguraciji prikazanoj na Slici 2.4 se može uprostiti: (1) Zdravi ispravni delovi testiranog materijala imaju debljinu dovoljno veću od dubine d na kojoj se nalazi defekt, da se može smatrati beskonačnim ($0 < x < \infty$), (2) Defekt ima beskonačnu toplotnu otpornost. Drugim rečima, defektno područje ima dubinu ograničenu na rastojanju d od posmatrane površine materijala.

Termalni proces je: Površinska temperatura uzorka je ostvarena Dirakovim impulsom u trenutku $t = 0$, i posle čega se hladi (unutrašnja difuzija). Rasporedi porasta temperature nakon Dirakovog impulsa na površini su [1]:

$$T_1 = \frac{Q}{\rho C \sqrt{\pi a t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \quad (2.5)$$

$$T_2 = \frac{Q}{\rho C x_1} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 a t}{x_1^2}\right) \cos\left(\frac{n \pi x}{x_1}\right) \right] \quad (2.6)$$

gde je ρ gustina (kg/m^3), C_p je specifična toplota ($\text{J} \cdot \text{C}^{-1} \text{kg}^{-1}$), $a = k / \rho C_p$ je termalna difuzivnost (m^2/s), k je termalna provodljivost ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$), i Q_0 je apsorbovana energija po jedinici površine (J/m^2). Količnik $Q_0 / \rho C_p d$ je jednak ravnotežnoj temperaturi iznad defekta

Za potrebe ovog rada jednačina može biti rešena uz dva uslova:

(a) za fazu zagrevanja gde treba uzeti u obzir samo stranu koja se greje i tada se

primenjuje polubeskonačni model,

(b) u fazi hlađenja se posmatra razlika temperatura u funkciji vremena.

U proračunima, dve veličine su od interesa: količina toplote koju treba predati jedinici površine radi dobijanja traženog nivoa kontrasta, i potrebno vremena da se taj kontrast razvije na posmatranoj površini uzorka.

U **Tabeli 2.1** su date tipične vrednosti [8] za vreme $t_{1/2}$, potrebno da se podigne temperatura naspramne površine do polovine maksimuma, za list debljine L , računato prema:

$$t_{1/2} = \frac{1.38 \cdot L^2}{\pi^2 \cdot a}$$

Pošto bljeskalice predaju energiju u veoma kratkom vremenu mogu se generisati na površini uzorka visoke početne energije.

Da bi izračunali maksimalnu temperaturu prednje strane (T_f) potrebno je proceniti početnu temperaturu za impulse različitog oblika. Za trougaoni impuls dobije se [8]:

$$T_f = \frac{8 \cdot Q_0}{3\beta \cdot C_p \rho \cdot (2\pi a y)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.7)$$

gde je Q energija predata po jedinici površine, y efektivno vreme bljeska, i β je parametar profila impulsa. Izračunate vrednosti su date u **Tabeli 2.1**.

Obzirom da je trajanje bljeska kratko, samo plitak površinski sloj će biti izložen visokim temperaturama. Približno se efektivna dubina uniformnog zagrevanja materijala na T_f izračunava [4]:

$$d_{eff} = \frac{1}{\mu} = \frac{Q_0}{T_f \cdot C_p \rho} \quad (2.8)$$

Izračunate vrednosti date su u **Tabeli 2.1**. Više energije od 1 J/cm^2 apsorbovane u nekoliko milisekundi mogu proizvesti fizičko i hemijsko oštećenje u nekim materijalima.

Tabela 2.1: Ponašanje metala, kompozita i izolatora na termalni impuls.

Materijal	$t_{1/2}$ (s)	T_f (°C)	d_{eff} (mm)
Bakar	0,13	3,4	0,87
Aluminijum	0,15	5,2	0,80
Nikl	0,61	6,5	0,39
Meko gvožđe	1,1	9,6	0,30
Cirkaloj 2	2,3	20,4	0,27
Titanijum	1,8	21,0	0,23
Nerđajući čelik	2,0	13,0	0,22
CFRP(\perp na f.)	33	98,7	0,05
CFRP(\parallel na f.)	3,8	33,3	0,16
GRP(\perp na f.)	107	146	0,03
GRP(\parallel na f.)	82	128	0,03
Kalaj	160	184	0,02
Porcelan	32	74	0,05
Pleksiglas	128	212	0,027

Staklo	34	112	0,05
Beton	26	88	0,06

Napomena: Uslovi za proračun parametara u tabeli su: Debljina materijala 1 (cm), Maksimalna površinska temperatura T_f (°C) za trajanje fleš impulsa 6 (ms), 1 (J/cm²) i Debljine d_{eff} (mm) materijala zagrejanih na T_f (°C).

U površinskoj oblasti do neke dubine u materijalu d_{eff} dolazi do apsorpcije svetlosti i njene konverzije u toplotu. Apsorbovani fluks zračenja, $\Phi_{\mu}(x) = \Phi_0 \cdot \exp(-\mu x)$ na dubini x u materijalu i uvek je manji od upadnog fluksa zračenja Φ_0 . Energija koja je apsorbovana u tankom sloju uzorka, može se izraziti $E_{\text{abs}} = E_0(1 - e^{-\mu x})$ za $\mu x = \mu d_{\text{eff}}$ fluks opadne za $1/e$. To znači ako samo ta oblast bude perturbovana sa temperaturnim rasom $\Delta T = E_0 \cdot \mu / c \cdot \rho$, a ostali deo uzorka je na temperaturi okoline do $\{i\}$ i $\{e\}$ do difuzije toplote u ostalom delu materijala (toplotni fluks). Ovde smo pretpostavili da je neradijativna relaksaciona apsorpcija predominantna u materijalu pa je termalna energija $E_{\text{th}} = E_{\text{abs}} = c \cdot \rho \cdot V \Delta T$, gde je $V = A d_{\text{eff}}$ zapremina ispod površine A grejanja. Temperatura na površini uzorka $\Delta T(x=0)$ je funkcija vremena $\Delta T_0(t)$ i ona nas zanima jer ćemo je detektovati IC detektorom. Termovizijska slika defekta na površini ispitivanog uzorka se formira iz razlike radijansi defektne i bezdefektne (pozadina) oblasti $\Delta T = T_d - T_b$.

Dejstvom svetlosnog impulsa na površinu ispitivanog materijala u tankom potpovršinskom sloju će se generisati toplotni impuls koji difuzijom ka drugoj strani uzorka prouzrokuje poremećaj prvobitnog temperaturnog polja

Prenos toplote između površine koja je zagrejana i okolne sredine procesom difuzije. U okolnoj sredini se nalaze periodično urađeni defekti u obliku žljebova, koji izazivaju poremećaj prostiranja toplote na suprotnu stranu.

U aproksimaciji rešavanja provođenja toplote procesom difuzije, predpostavljeni su adijabatski uslovi izolovanog sistema u odnosu na okolinu.

Predpostavka da je toplotni tok u y i z pravcu zanemarljiv (u praksi bi ovo značilo da dimenzije osvetljene površine moraju biti velike u odnosu na dubinu prodora obuhvaćenih radijacija) i da su doprinosi toplotnom toku od strane termalne radijacije i kontakta u $x=0$ sa vazduhom ili drugim materijalima zanemarljivi, omogućava korišćenje jednačine za jednodimenzionalno provođenja toplote.

Svetlosni impuls fotografskog blica indukuje toplotni impuls čija energija izaziva poremećaj u homogenoj temperaturi posmatrane površine uzorka, zbog prisustva potpovršinskih defekata. Pobuda se vrši promenljivim svetlosnim fluksom u vremenu koji izaziva nestacionarni toplotni efekat po debljini uzorka. Vremenski oblik svetlosnog impulsa je snimljen i njegov oblik je dat na Slici 2.2. Eksponencijalnim impulsom se najčešće karakteriše promena intenziteta fleš lampe. Njen matematički izraz se može napisati kao funkcija vremena maksimalnog intenziteta τ_m [Slika 2.2](#), odnosno kao (1) Kako trajanje impulsa ne figurira u jednačini (1), potrebno je u jednačinama staviti da $\tau \rightarrow \infty$, budući da je trajanje ovog tipa impulsa beskonačno. Jednačine temperature predstavljaju temperaturni odziv kao posledicu trenutnog grejanja svetlosnim impulsom.

3. Numerička simulacija

Pošto imamo test ploču od aluminijum (Al) sa simuliranim defektima u obliku prostoperiodične strukture, i pošto je relativno jednostavnog geometrijskog oblika opravdano je razvijati uprošćen matematički model na jednoj ćeliji u programskom paketu MATLAB® R2008a. Geometrija i uslovi eksperimenta omogućavaju dvodimenzionalno (2D) modelovanje. Osnova za razvoj modela su literaturni podaci o termofizičkim karakteristikama aluminijuma. Na osnovu tih podataka i pomoću standardnih metoda 2D projektovanja razvijen je model periodične ćelije aluminijuma i prostiranje toplote koji je izveden u program za proračun metodom konačnih razlika *ImpulsnaVideoTermografija.m*.

U okviru programa *ImpulsnaVideoTermografija.m* moguć je proračun temperatura i temperaturne razlike koje se javljaju na površini test uzorka između ćelija i njihovo poređenje sa eksperimentalno izmerenim temperaturnim razlikama između tačaka na sredini oblasti između defekta i tačaka na sredini oblasti između defekta. Temperaturne razlike su merene u metodi impulsne videtermografije termovizijskom kamerom u realnom vremenu.

Svrha našeg istraživanja je određivanje maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} i u kom trenutku t_{\max} nastaje, za različite periodične strukture potpovršinskih defekata u materijalu visoke termičke provodnosti kao što je metal aluminijum, što može omogućiti određivanje trenutka dejstva svetlosnog impulsa.

Pošto je analitičko rešenje problema prostiranja toplotog impulsa nastalog fototermalnim efektom u periodičnim strukturama potpovršinskih defekata u materijalu teško naći pribeglo se razvijanjem simulacionog numeričkog modela rešavanja parcijalne diferencijalne jednačine prostiranja toplote.

U radu je izložen matematički model akogi opisuje interakciju pobudnog optičkog snopa sa ispitivanim nehomogenim materijalom, proces fototermalnog efekta kojima se deo apsorbirane energije svetlosnog impulsa pretvara u toplotu, kao i transport termodinamičkog poremećaja koji generisani toplotni impuls proizvodi u nehomogenom uzorku. Diskutovana je primenljivost razvijenih modela u određivanju granice primenljivosti impulsne termografije za detekciju podpovršinskih defekata u obliku periodične strukture. Rezultati eksperimentalnih istraživanja su upoređeni razvijenim numeričkim modelom.

3.1 Jednačina provođenja toplote u uzorku

Provođenje toplote u uzorku je regulisano, takozvanom jednačinom provođenja toplote:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t), \quad (3.1)$$

gde je c_p , ρ i k su specifična toplota na konstantnom pritisku, gustina i toplotni provodnost respektivno. Maksimalni porast temperature na ploči je manja od 5 (°C), pa se tokom prelaznog stanja smatra da su termofizičke veličine nezavisne od temperature. Izraz $Q(x, y, z, t)$ predstavlja energiju predatu uzorku od zagrevanja svetlosnim impulsom. Pošto se periodična struktura defekta sastoji od žljebova čija je dužina mnogo veća od njihove

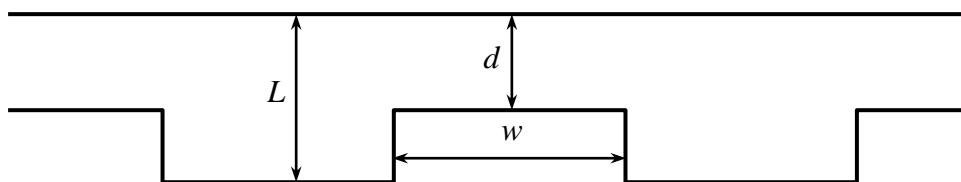
širine, temperaturna raspodela u pravcu žljeba (ξ – osa u modelu) može se smatrati konstantnom, tako da izraz koji sadrži je $\partial T / \partial \xi$ je jednak nuli.

Predpostavlja se da je uzorak termički izolovan od okoline, sve razmene toplote zračenjem ili konvekcijom između uzorka i okoline su zanemarene. Prema ovom, adijabatskom stanju, nulti Neumann granični uslov je primenjen na gornje i donje granice uzorka [34,40-43].

3.1.1 Fizički model za simulaciju u impulsnoj videotermografiji

Međutim, metoda ima takođe neka ograničenja, kao što je postizanje brzog, uniformnog i energetski termalnu pobudu preko velike površine cilja ili pojave sporednih konvektivno ili radijaciono termalnih ponora ili izvora, koji utiču na pouzdanost analize termalne slike - termograma površine cilja.

Radijacione i termalne karakteristike materijala mogu u velikoj meri da utiču na veličinu i dubinu mogućnosti detekcije defekata. U cilju ispitivanja ovih odnosa, izrađeni su specijalni uzorci ciljeva – paralelni žljebovi, dužine 1.5 cm, gde su urezani u aluminijsku ploču, sa širinom žljebova jednakoj razmaku između njih. Na ovaj način dobijena je periodična struktura defekata, kao što je prikazano na Slici 2.4.



Slika 3.1: Uzorak presek: L debljina ploče, w širina žljeba, d dubina žljeba.

Širina žljebova je bila nekoliko puta manja od njegove dužine, tako da struktura može biti razmatrana jednodimenziono. Ciljevi sa različitim širinama i dubinama žljebova proizvedeni su omogućavajući ispitivanje njihove međusobne zavisnosti na mogućnost detekcije defekta. Uzorci su bili crno anodizovani posle obrade.

Fizički model upotrebljen za numeričku analizu simuliraog 2D modela provođenja toplote pod uslovima u homogenoj aluminijskoj ploči. Geometrija ploče modela definisana je tako da odgovara specifikaciji ploče. Mreža je pažljivo prilagođena u odnosu na oba uslova geometrijskom i eksperimentalnim da bi dopustio adekvatno modelovanje visokog gradijenta blizu površine.

Početni uslov temperature uzorka bila temperatura koja je merena pre eksperimenta i bila je jednaka temperaturu okoline $T_0 = 300$ [K]. Dobijena vrednost bila je 26.84 [°C] i u slučaju aluminijum-vazduh. Površinska emisivnost ploče bila je procenjena iz eksperimentalnih podataka i određena vrednost bila je 0.95 . Emisivnost je određena primenom dve poznate metode koje se primenjuju u termografiji. U jednom slučaju koristi se crna selotejp traka poznate emisivnosti od 0.95 , a u drugom meri se temperatura u nekoj tački na površini ploče (preciznim termoparom). Potom se menja vrednost emisivnosti (parametra na termovizijskoj kameri), dok se temperature koju pokazuje kamera i onu koju pokazuje termopar ne izjednače. Tako je određena vrednost emisivnosti eksperimentalno. Pomoću selotejp trake upoređuje se temperatura spota SP01 na selotejp traci i temperatura spota na ploči SP02. Kada se te dve temperature izjednače dobija se emisivnost. Sve ploče su imale istu emisivnost u granicama 0.95 ± 0.02 .

Imajući u vidu specifičnosti koje se javljaju kod primene metode, PVT u čvrstom telu za nedestruktivnu defektoskopiju kada se provođenje toplote ne može rešiti analitički

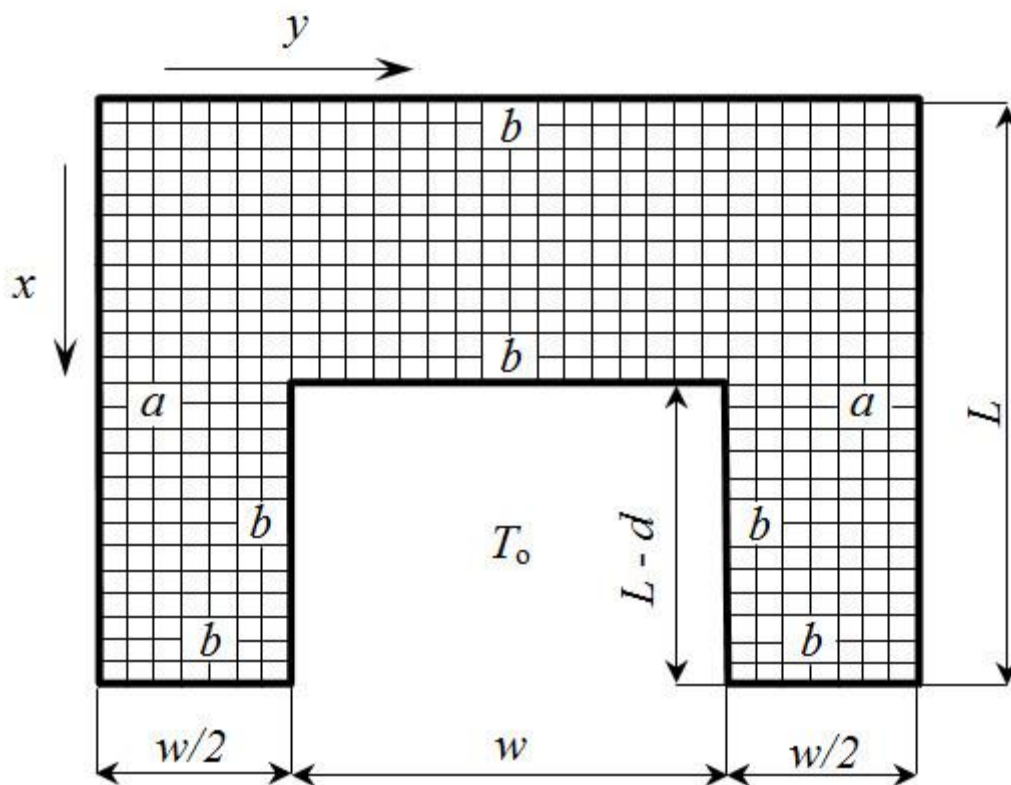
odlučeno je da se razvije numerički model rešavanja problema. Da bi proučavali ovaj problem odlučili smo se, da odaberemo pored nekoliko poznatih pristupa, praktičan numerički pristup koji je kombinovan sa tehnikama procesiranja slike.

Model prenosa toplote je rešen za 2D slučaj aluminijumske ploče sa defektima u obliku žljebova pravougaonog oblika visine 4 i više puta veće od njihove širine. Prisetimo se da je ovaj model sa defektom ispod površine, za umetnutu geometriju (defekt tipa termičke otpornosti) u pravouglim koordinatama je na Slici 3.1. Defekt ispod površine se simulira različitim širinama i dubinama.

Primenjena impulsno stimulirana termografija se bavi termalno otpornim defektima kao što su (NDT procena keramičko kompozitnih materijala, metalizacija i korozija npr.). Metod sadrži zagrevanje i posmatranje promene temperature na jednoj od strane prednjoj ili zadnjoj strani uzorka. Dva osnovna koncepta su poznata reflektivni (pobuda i termovizijska kamera na istoj strani testiranog predmeta) i transmisivna gde je kamera sa suprotne strane.

Pošto je struktura defekta periodična, to je dovoljno razmotriti samo osnovnu ćeliju dvodimenzionalnog modela (2D), sa odgovarajućim periodičnim graničnim uslovima. Osnovna ćelija je prikazana na Slici 3.2.

Na Slikama 3.1 i 3.2 prikazane su geometrija i mreža upotrebljene u modelu sa vazдушnim defektima u obliku periodične strukture. Model će imati vazdušne defekte različite po dubini i širini. Dimenzije defekata su različitih širina i dubina. Od širine defekata zavisi i broj žljebova kanala na jednoj ploči.



Slika 3.2: Osnovna ćelija prikazana sa mrežom za izračunavanje upotrebljena za numeričku simulaciju. Granice gde su periodični granični uslovi primenjeni označene su sa a i granice gde je nulti Neumann granični uslov je označene sa b .

Vremenski oblik svetlosnog impulsa za zagrevanje je snimljen na osciloskopu, a za potrebe numeričke simulacije, aproksimirano pomoću niza energija $Q(t)$. Energija predata pomoću svetlosnog impulsa je apsorbovana je u gornje slojeve uzorka u dubinu materijala pomoću koeficijenta apsorpcije μ . Pod pretpostavkom da je uzorak ravnomerno osvetljen, zavisnost predate energije od koordinata y i z nestaje i $Q(x, y, z, t)$ tada ima oblik:

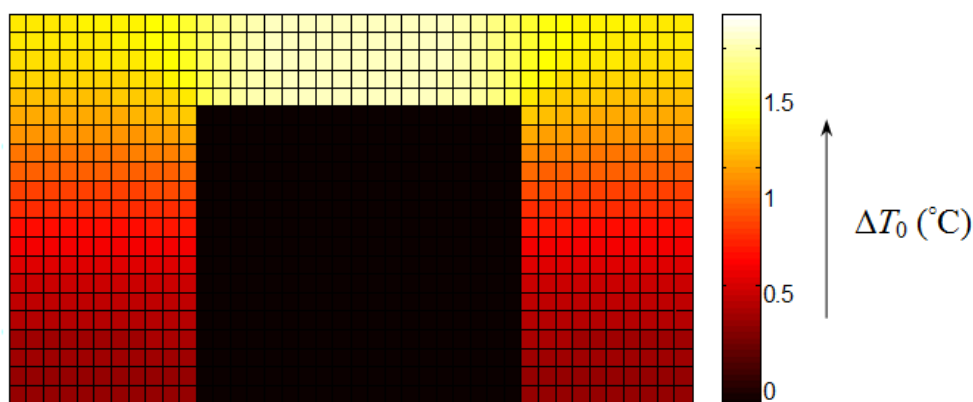
$$Q(x, t) = Q_0 \cdot Q(t) \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (3.2)$$

Numerička jednačina je rešena u MATLABU pomoću metoda konačnih razlika (eng. *Finite Difference Method* - FDM) [44]. Nakon prostorne i vremenske diskretizacije, jednačina (3.1) se transformiše u jednačinu koju treba rešavati, sa n i m predstavljaju čvorne tačke duž x i y osa, respektivno, i p broj vremenskog koraka:

$$\frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta y)^2} + Q_{m,n}^p = \frac{\rho \cdot C_p}{k} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Tipičan rezultat simulacije za porast temperature ΔT_0 iznad sredine pod uticajem toplotnog impulsa, za Al ($\mu = 125000 \text{ m}^{-1}$, $\rho = 2655.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $c_p = 880 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, $k = 189.3 \text{ W} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), je pokazan na Slici 3.3. Početna temperatura uzorka bila je postavljena da bude jednaka temperaturi ambijenta $T_0 = 300 \text{ (K)}$.

Dvodimenzioni (2D) numerički model se temelji na metodi konačnih razlika. Mreža čvorova je postavljena tako da je gušća bliže površini uzorka koja je ozračena svetlosnim izvorom u područjima u kojima se očekuje veća vrednost temperaturnih gradijenata (dimenzije zapremine čvorova su manje (u pravcu x ose ima se snažniji gradijent na površini tako da je u pravcu x ose izabrana mreža čvorova sa dve gustine, prvi sloj sa gušćom mrežom pri vrhu (sloju materijala $d1$ sa gušćom mrežom čija je dimenzija čvora u pravcu x ose $dx1$ dok je za drugi sloj ispod prvog sloja test ploče gde se očekuje slabiji temperaturni gradijent debljine iznad defekta $d - d1$ i debljina ostalog dela ploče gde nema defekta $L - d1$ sa dimenzijom čvora $dx2$) da bi se greška diskretizacije čvora svela na minimum. Broj čvorova za debljinu zida debljine $d1$ i $L - d1$ odnosno $d - d1$, kreće se od 21 za gušću mrežu do 5 za oblast $d - d1$ i 20 za oblast $L - d1$.



Slika 3.3: Tipičan rezultat simulacije za različite ΔT_0 između temperature na različitim pozicijama u uzorku i temperaturi okoline T_0 .

Numerička simulacija provođenja toplote zasniva se dakle na diferencijalnoj jednačini dvodimenzionalnog nestacionarnog prenosa toplote u pravouglim koordinatama. Na Slici 3.2 prikazan je uobičajen rezultat simulacije.

3.2 Metod konačne razlike i modelovanje impulsne video termografije

Danas su na raspolaganju i lako pristupačni komercijalni softverski alati kao npr. ANSYS, COMSOL, FEMLAB i MATLAB. Jednačina provođenja toplote dobijen iznad je parcijalna diferencijalna jednačina (eng. *Partial differential equation* – PDE). U osnovi, ima dva puta njenog rešavanja: analitički i numerički. Kasnije, će se dati analitička rešenja dobijena za neka pojedinačne slučajeve. U praksi, se češće upotrebljavaju numerička rešenja kao numerički metodi koji nemaju ograničenja kao što su oblik ili veličina i dozvoljavaju uključene neke granične uslove u stacionarnom kao i u prelaznom stanju. Ima tri numerika metoda primenjena za rešavanje PDE:

- Metod konačne razlike (eng. *Finite Difference Method* - FDM)
- Metod konačnih elemenata (eng. *Finite Element Method* - FEM)
- Metod graničnih elemenata (eng. *Boundary Element Method* - BEM)

Metodi se mogu videti kao opšta verzija generalnog prilaza metod težinskih ostataka (eng. *method of weighted residuals* – WRM). Metod konačne razlike je primenjen za rešavanje problema provođenja toplote u aluminijumskoj modelskoj ploči sa defektom u obliku žljeba, promenljive širine i dubine dat je u ovom radu. Za bolju ilustraciju, metod je pokazan za 2D slučaj. Više detalja je opisano i dato u [22, 23, 170-173]. Upotrebljeni metod numeričkog rešavanja PDJ provođenja toplote u modelskoj ploči Al -FDM u programskom paketu MATLAB.

3.2.1 Matematički model

Numeričko modelovanje podrazumeva da sistem PDJ bude rešen, istovremeno sa graničnim kao i početnim uslovima u slučaju vremenski zavisnih problema. Razmatrana test ploča aluminijuma u eksperimentu impulsne termografije – PT, reguliše definiciju PDJ ovog problema je generalno slučaj 2D kratkotrajne toplotne provodnosti data jednačinom [69], gde je T temperature, k termalna provodnost, c_p je specifična toplota na konstantnom pritisku ρ je gustina materijala, Q_i je unutrašnji toplotni izvor, t je vreme i x , y i z su prostorne koordinate u *cartesian* koordinatni sistem. Izraz Q_i ne bi trebalo da bude shvaćen pogrešno Q_0 je termin koji se koristi da se opiše toplotni fluks koja je naneta na površini ploče tokom perioda pobude. Ustvari tokim PT eksperimenta gde je izvor pobude spoljni. Nije generisana toplota unutar ploče, $Q_i = 0$ u ovom konkretnom slučaju.

Matematički, metoda konačne razlike je numerička metoda za rešavanje PDJ koja opisuje fizičku pojavu provođenja toplote ako su poznati granični uslovi. Fizički model ima poznatu geometriju i granične uslove. Provođenje toplote u uzorku je regulisano pomoću takozvane jednačine provođenja toplote (jednačina 3.1).

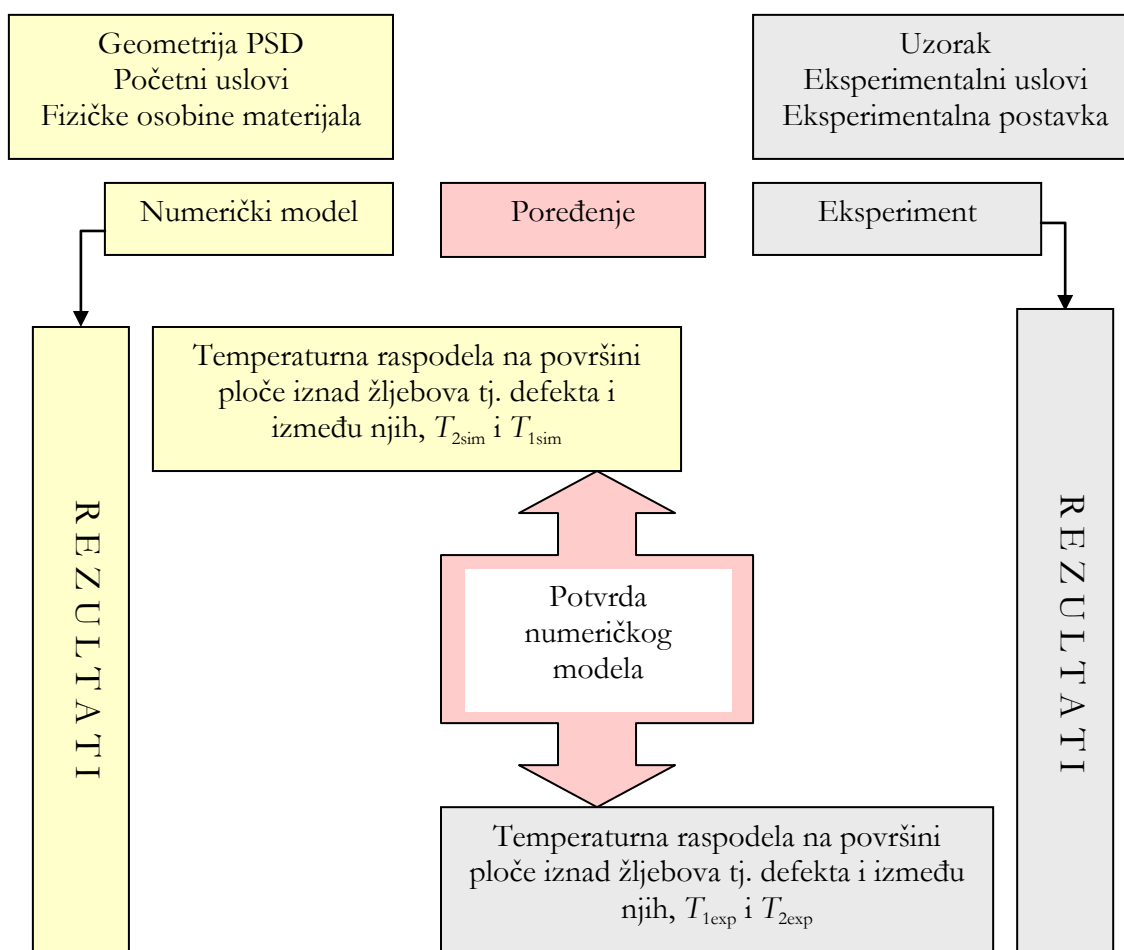
$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t), \quad (3.1)$$

gde su c_p , ρ i k specifična toplota na konstantnom pritisku, gustina i toplotna provodnost, respektivno. Izraz $Q(x,y,z,t)$ predstavlja energiju predatu uzorku pomoću zagrevanja svetlosnim impulsom. Kako periodična struktura defekata sadrži žljebove čija je dužina mnogo veća od njihove širine, temperaturna raspodela u pravcu žljeba (z - osa u modelu), smatra se konstantna, tako da izraz $\partial T/\partial z$ koji sadrži jednačina (3.1) jednak nuli.

Pretpostavlja se da je uzorak termalno izolovan. Pošto su defekti u aluminijumskoj ploči periodične strukture, to je dovoljno razmatrati samo osnovnu ćeliju dvodimenzionalnog modela, sa prikladnim periodičnim graničnim uslovima. Osnovna ćelija je prikazana na Slici 3.1.

3.2.2 FDM model i numerički rezultati

Predložen je metod minimalne vrednosti kvadrata razlike MVKR koji je bio upotrebljen za ispitivanje kvaliteta parametra procene koji je bio odvojeno primenjen za sve modele širine i dubine defekata odgovarajuće test ploče. Ustvari ideja je da se definiše korektan model kvantitativne analize detekcije defekata u PVT eksperimentima.



Slika 3.4: Dijagram toka predloženog metoda konačne razlike - FDM i eksperimentalne procedure za karakterizaciju defekata kod aluminijumske ploče sa periodičnom strukturom defekata – PST.

Ovde će biti prezentovani rezultati primene matematičkog koda *RazlikaKvadrata.m* napisanog u softverskom programu MATLAB® R2008a, u cilju dobijanja optimalne vrednosti pojačanja A_{opt} i optimalne vrednosti pomeraja t_{opt} [ms].

Naglasimo i to, da je na [Slici 3.4](#) prikazan dijagram toka predložene numeričke simulacije metoda konačne razlike - FDM i eksperimentalne procedure za karakterizaciju defekata kod aluminijumske ploče sa periodičnom strukturom defekata – PST koja je jorišćena u tezi.

Proračun prenosa toplote u modelu se obavlja u kodu *ImpusnaVideoTermografija.m* izrađenom u softveru MATLAB. Razloži za primenu paketa MATLAB su višestruki. Prvo, ovaj paket nudi izvanredne matematičke mogućnosti, drugo, ima relativno dobru grafičku vizuelizaciju rezultata, treće, lako se programira (kreiranje .m fajlova) i četvrto, instalacija je podržana na računarima različitih konfiguracija i operativnog sistema.

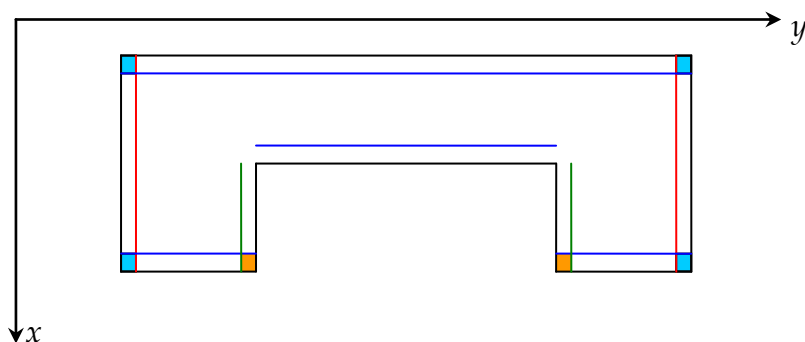
Za slučaj numeričke simulacije proračuna prenosa toplote u test pločama vršena kodom *ImpusnaVideoTermografija.m* napisanim u programskom paketu MATLAB® (verziji R2008a) na notebook računaru TOSHIBA (procesor: Genuine Intel(R) T2130 1.86 GHz, RAM:1014 MB) sa operativnim sistemom Windows Vista™. U ovom programskom paketu razvijeni su kod za poređenje eksperimentalnih rezultata sa teorijskom krivom iz numeričke simulacije *RazlikaKvadrata.m* i kod za Wiener-ovo filtriranje: *Filter.m*.

3.2.3 Metod konačnih razlika

Metoda konačnih razlika (MKR) jedna je od savremenih numeričkih metoda koja nalazi sve veću primenu u proračunima provođenja toplote kod složenih fizičkih modela materijala sa unutrašnjim defektima pravougaonog oblika uz primenu računara. Upotrebljavan je metod konačne razlike u vremenskom domenu (eng. Finite Difference Time Domain - FDTD), metod numeričke simulacije za proračun dinamike svetlosnog impulsa [11]. U radu je primenjen metod konačnih razlika (tzv. metod sa jednim korakom). Za zadat početni uslov $T_0 = T(t = t_0) = 0$, diferencijalna jednačina se rešava za vreme t u intervalu $[a, b]$. Definiše se korak $\Delta x = (b - a)/N_x$, deljenjem intervala $[a, b]$ na N_x podintervala. Ako se funkcija „dobro“ ponaša u području traženja rešenja $[a, b]$, može se koristiti konstantan korak Δx , u suprotnom je potreban promenljiv korak. (Za Δy se definiše korak $(c - a)/N_y$ deljenjem intervala $[c, b]$ na N_y podintervala). Nova vrednost rešenja T određena je pomoću vrednosti u prethodnom koraku i promene zbog pomaka za iznos koraka. $T_{i+1} = T(t_i) + \Delta x f(t_i, T_i) + O(\Delta x)^2$, Euler-ova metoda.

U numeričkom modelu provođenja toplote granice su tretirane u skladu sa Slikom 3.5., [7 – 9, 174-176]. Pokazano je kako treba tretirati ćelije koje su na površini u x i y pravcu.

- Ćelije između plave linije i površine $x = 0$ su tretirane kao ćelije na površini samo u x pravcu.
- Ćelije između zelene linije i površine su tretirane kao ćelije na površini samo u y pravcu.
- Ćelije između crvene linije i površine su tretirane kao ćelije na adijabatskoj površini samo u y pravcu, što je urađeno uvođenjem periodičnih graničnih uslova.
- Plave ćelije su tretirane kao ćelije na površini u x pravcu a kao ćelije na adijabatskoj granici u y pravcu.
- Oker ćelije su tretirane kao ćelije na površini i u x i u y pravcu.



Slika 3.5: Šematski dijagram za ilustraciju konstrukcije mreže za rešenje PDJ metodom konačne razlike.

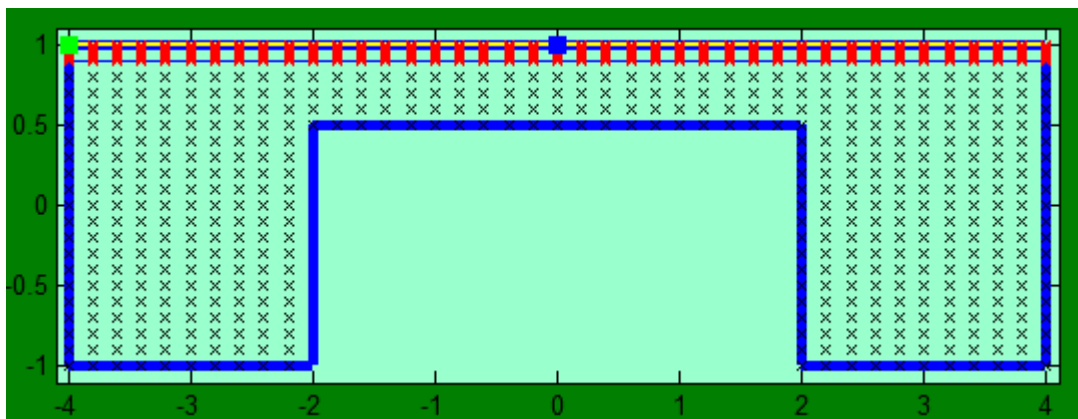
Merenje temperaturne raspodele na metalnoj površini je način da se metodom nedestruktivne detekcije otkriju defekati u objektu. U proračunima, toplotni fluks je postavljen na $Q_o = 0.3338787 \times 10^6 \text{ W/m}^3$, i temperatura na donjoj strani ploče je održavana na $26.84 \text{ }^\circ\text{C}$ (300 K). Pretpostavljeno je da sve granice budu adijabatske, osim gornje površine koja se greje i leva i desna ivica ćelije gde važe granični periodični uslovi u skadu sa [Slikom 3.5](#). Pošto je toplota provođenja kroz aluminijum je mnogo brža nego odvođenje toplote konvekcijom vazduha sa njegovih površina, opravdano je koristiti adijabatski uslov.

Za 2D numeričko rešenje jednačine (3.1), struktura mreže je načinjena kako je prikazano na [Slici 3.2](#). Pošto se očekuje visok gradijent temperature blizu toplotnog izvora i žljeba, relativno veliki broj čvorova (približno 11261 čvor), za $dx = 0.005 \text{ mm}$ i $dy = 0.2 \text{ mm}$. Formiranjem mreže sa dva segmenta, ukupan broj čvorova iznosi 1381 čvor. Segment blizu gornje površine uzorka koji se greje i gde se očekuje visok gradijent temperature debljine $d1 = 0.1 \text{ mm}$ ($dx1 = 0.005 \text{ mm}$), a drugi segment ispod debljine $d - d1 = 0.4 \text{ mm}$ ređe mreže ($dx2 = 0.1 \text{ mm}$).

Za početni kod simulacije gustina mreže je bila ujednačena i tada bi umesto 1381 čvor mreža sadržavala 11261 čvor odnosno više od 10 puta. Ujedno ukupan broj iteracija $N_{it} = 2083332$ za vremenski korak od $dt = 0.12 \text{ } \mu\text{s}$. Mreža je takođe konstruisana duž pravca X - ose i Y ose. Ispod grejača mreža ima 861 čvor, a mreža ispod nje ima 205 čvorova ($N_d = 5$, $N_y = 41$ za $dx = 0.1 \text{ mm}$; $dy = 0.2 \text{ mm}$) iznad žljebova. U tezi nije korišćen nijedan od poznatih komercijalnih softvera (npr. CFX - ANSYS Inc., U.S.A., Ver. 11.0), veće je razvijen kod simulacije u MATLAB-u koji je jednostavan i odgovara periodičnoj strukturi defekata generisanih u planparalelnu ploču aluminijuma i što se može videti u odličnom slaganju sa eksperimentalnim rezultatima.

Upotrebljavajući 2D mrežu jednačina konačne razlike bila je izvedena iz jednačine (3.1). prostiranje toplote u pravcu z- ose se zanemaruje pošto je dužina kanala 4 puta veća od njegove širine, nema gradijenta., 2D mreža bila je prilagođena za numerički proračun.

Opis koda simulacije u programskom paketu MATLAB[®] pod nazivom *ImpulsnaVideoTermografija.m*, za ćeliju dobijenu iz fizičkog modela ako se uzme poprečni presek pošto posmatramo dvodimenzioni (2D) slučaj provođenja toplote u pravcu x, y ose. Polazimo od rešavanje parcijalne diferencijalne jednačine (PDJ) koja za 2D slučaj glasi $dT/dt = a*d^2T/dx^2 + a*d^2T/dy^2 + 1/(Ro*Cp)*Q(x,y,t)$



Slika 3.6: Struktura mreže za dvodimenzionalnu (2D) numeričku simulaciju provođenja toplote za toplotni izvor iznad i žleb na dubini d .

Struktura mreže za dvodimenzionalnu (2D) numeričku simulaciju oko toplotnog izvora i žljebova prikazan je na Slici 3.6, nakon urađenog poboljšanja mreže u smislu smanjenja broja čvorova.

Kod *ImpulsnaVideoTermografija.m* ima mogućnost postavljanja boje okvira grafičkog interfejsa koji omogućava laku komunikaciju sa programom numeričke simulacije. Oblast grafičkog interfejsa je izdvojena i prikazana na Slici 3.4 da se prikaže osnovna ćelija u kodu numeričke simulacije test pločica u preseku. Veličina defekta u simulaciji je definisana širinom $4w$. Pošto nas interesuje temperatura T2 plava tačka na sredini defektne oblasti, na slici je sredina označena sa 0 a širina se menja po $2w$ desno i levo od centra.

Promenom veličine w menjamo širina defekta za model koji želimo da simuliramo, a debljina defekta d se takođe može menjati od 0 do maksimalne debljine zdrave pločice L . Debljina defektne oblasti d u pravcu x ose može da se menja od sredine koja je na $L/2$ debljine pločice do $x = 0$ odnosno oznaka 1 na slici. Za podpovršinske defekte bliže površini test pločice, dubina defekta d se može menjati 0 do $L/2$ ili kako je označeno na slici 2 od 1 do 0 ili za dublje defekte d se može menjati od $L/2$ do L odnosno 0 do -1.

Model ćelije defekta širine $4w$ ima međudefektne oblasti iste širine $4w$ zbog simetrije problema provođenja toplote u periodičnoj strukturi defekata uzeli smo levo i desno od defekta širinu pola međudefektne oblasti $2w$ a zbog simetrije problema susednim defektima levo i desno pripada oblast širine $2w$.

Razvijen je fizički model koji odražava karakteristike uzorka. Kompjuterski program za simulaciju zasnovan na tom modelu je napisan u MATLAB® R2008a i dobijeno je dvodimenzionalno polje na površini uzorka izloženog toplotnom svetlosnom impulsu, za različite vrednosti koeficijenta apsorpcije i različite veličine i dubine defekata.

Za slučaj materijala sa velikim koeficijentom apsorpcije μ elektromagnetsko zračenje koje materijal apsorbuje ima malu dubinu prodiranja od nekoliko μm . Pod pretpostavkom da su ostvareni uslovi homogenog zagrevanja TP na površini intenzitet svetlosnog talasa se menja samo duž x ose koja je usmerena od površine ka unutrašnjosti materijala. Svetlost koja je apsorbovana konvertuje se u toplotu i izaziva ogroman gradijent temperature zbog tačnijih rezultata simulacije smanjuje se dimenzija čvora dx do reda $1 \mu\text{m}$. To zahteva i vremenski interval dt sve manji i manji a to povećava računarsko vreme zbog velikog broja iteracija a javlja se i problem radne memorije komercijalnih računara za izvršenje numeričke simulacije provođenja toplote u materijalu sa simuliranim defektima u obliku periodične strukture, npr. reda manje od 1 ($dt = 0.12 \mu\text{s}$). Za vreme simulacije od $T_s = 250 \text{ ms}$, broj iteracija $N_{it} = 2063750$.

Problem je rešen sa različitom gustinom mreže u pravcu x ose. Mreža je podeljena na dva dela, debljina prvog gušćeg dela mreže ispod površine TP je $d1$ i kreće se do 0.1 mm i , a jedan čvor ima debljinu $dx1$ koji se zadaje po želji. Ukupan broj ćelija u ovom delu mreže je $Nd1 = (d1/dx1)+1$. Kako broj ćelija mora biti "integer" dimenzije će biti povećane ili smanjene u skladu sa relacijom $d1 = (Nd1-1)*dx1$. Na slici 3 prikazan je deo grafičkog interfejsa pomoću koga se postavljaju vrednosti po dubini materijala test pločice $d1$, d i L .

$d1 =$	0.1	[mm]	$\mu =$	1250	E+02
$d1 =$	0.1	[mm]	$T_o =$	0	[K]
$d =$	0.5	[mm]	$Rho =$	2655.41	
$ d =$	0.5	[mm]	$C_p =$	880	
$L =$	2	[mm]	$K_x =$	189.3	
$ L =$	2	[mm]	$K_y =$	189.3	
			$Q_o =$	0.16194E6	

Slika 3.7: Debljina gušće mreže $d1$, debljina ređe mreže d i debljina TP L : Postavljanje vrednosti termofizičkih veličina (slika levo).

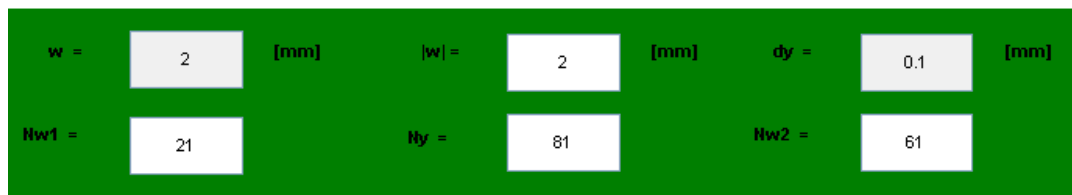
Drugi deo mreže sastoji se iz dve pod oblasti $d - d1$ i pod oblasti $L - d$ imaju istu gustinu $dx2$. Postavljanjem vrednosti d za dubinu defekta i širinu ćelije $dx2$ u drugom delu mreže dobija se broj ćelija Nd . $Nd = ((d-d1)/dx2)+1$ je broj ćelija a dubina defekta se dobija iz $d = (Nd-1)*dx2+d1$, kako broj ćelija mora biti "integer" dimenzije će biti povećane ili smanjene.

Postavljanjem vrednosti za debljinu TP L postavlja se i broj ćelija NL . $L - d$ debljina pločice; $NL -$ broj ćelija; $NL = ((L-d1)/dx2)+1$ je broj ćelija; $L = (NL-1)*dx2+d1$; kako broj ćelija mora biti "integer" dimenzije će biti povećane ili smanjene. Postavljanje uslova stabilnosti koji mora da zadovolji uslov $= (Rho*Cp)/2 * (Kx/dx^2+Ky/dy^2)^{-1}$; Uslov stabilnosti zavisi od dy , Rho , Cp , Kx , Ky i $dx = \min(dx1,dx2)$;

$dx1 =$	0.005	[mm]	$dx2 =$	0.1	[mm]
$Nd1 =$	21		$Nd =$	5	
			$NL =$	20	

Slika 3.8: Debljina čvora gušće mreže $dx1$, debljina čvora ređe mreže $dx2$.

Na Slici 3.8 prikazan je deo grafičkog interfejsa pomoću koga se postavljaju vrednosti debljine čvora gušće mreže $dx1$ i debljina čvora ređe mreže iznad defekta $dx2$.



Slika 3.9: Širina defekta w i dy širina čvora u pravcu y ose.

Na [Slici 3.9](#) prikazan je deo grafičkog interfejsa pomoću koga se postavljaju vrednosti po širine materijala test pločice w , širinu mreže numeričke simulacije dy .

Termofizičke karakteristike materijala su: μ , ρ , C_p , K_x i K_y . Svetlosni impuls se modeluje impulsom fotografskog blica koji ima vremensku zavisnost prikazanu na slici snimljen na osciloskopu fototranzistorom (vidi Sl. 1) Q_0 (W/m^2) i uslovi okoline se postavljaju na $T_0 = 0$ °C. Na [Slici 3.7 \(slika levo\)](#) prikazan je deo grafičkog interfejsa pomoću koga se postavljaju vrednosti termofizičkih karakteristika materijala μ – koeficijenta apsorpcije, ρ – gustina, C_p – specifična toplota, K_x i K_y – koeficijent provođenja toplote u x i y pravcu za simulaciju anizotropnih materijala i Q_0 (W/m^2) – svetlosni fluks po jedinici površine test pločice ili iradijansa. Širina materijala test pločice w , širinu mreže numeričke simulacije dy . Vremenske karakteristike simulacije, i uslov stabilnosti rešavanja Fourier-ove PDJ provpđenja toplote. Postavljanje T_{fr} , N_{fr} , T_s , N_{it} . dt je poznato T_{fr} može da se menja najčešće 50 ili 200 μs . Vreme simulacije se zadaje T_s od 250 ms do oko 400 ms npr za Al. $N_{u_fr} = (T_{fr}/dt)+1$; je broj iteracija u okviru jednog frejma, a vreme $T_{fr_round} = (N_{u_fr}-1)*dt$.

3.3 Matematički model vremenskog oblika svetlosnog izvora

Osvetljavanje površine materijala svetlosnim impulsom samo sa posmatrane strane je osnova metode impulsne videotermografije. U modelu zagrevanja svetlosnim impulsom uvedena je pretpostavka da se energija svetlosnog snopa apsorbuje u vrlo tankom površinskom sloju uzorka debljine mnogo manje od debljine samog uzorka. Raspodela apsorbovane energije po dubini uzorka se može dobiti korišćenjem jednostavne relacije.

$$Q(x) = Q_0 \cdot \exp[-\mu \cdot x], \quad (3.2)$$

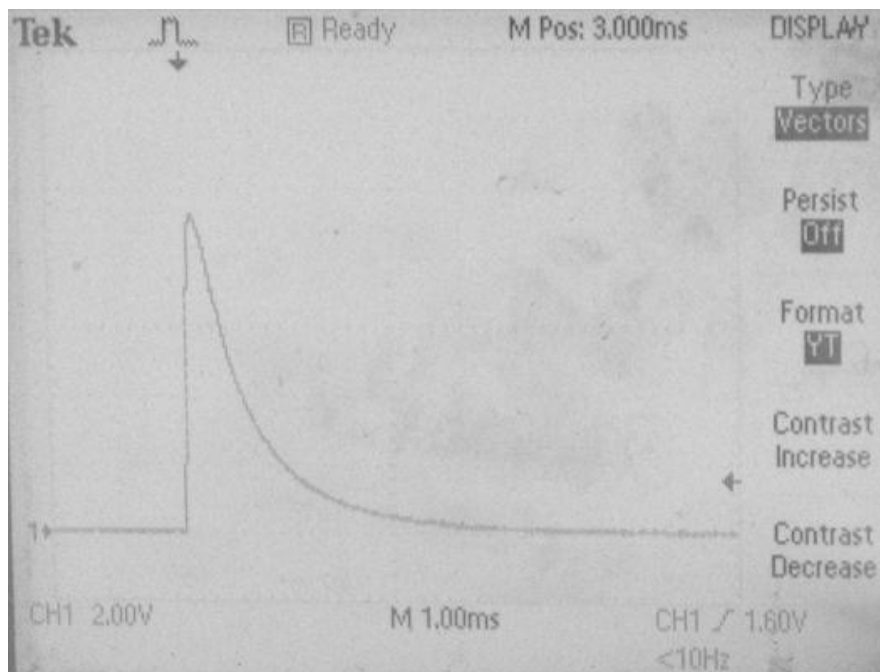
gde je Q_0 energija svetlosnog snopa na površini uzorka ($x = 0$), a μ apsorbcioni koeficijent materijala uzorka. Kod čvrstih neprozračnih materijala, koeficijent μ je takav da se energija imulsnog izvora svetlosti apsorbuje praktično na samoj površini uzorka.

Polazimo od diferencijalne jednačine koju želimo da rešimo numerički.

3.3.1 Vremenski oblik primenjenog svetlosnog impulsa

Matematički model promene intenziteta svetlosnog impulsa u vremenu, dobijen je snimanjem bljeska fotografskog blica digitalnim osciloskopom postavljenim iza aluminijumske ploče. Za tu svrhu korišćena je brza fotodioda, a merenjem amplitude snimljenog signala dobijena je promena varijacije osvetljaja površine uzorka. Deo vremenski promenljivog intenziteta svetlosnog impulsa se apsorbuje u materijal po dubini uzorka, u zavisnosti od koeficijenta optičke apsorpcije.

Svetlosni impuls fotografskog blica indukuje toplotni impuls čiji vremenski oblik zavisi od promene svetlosnog impulsa. Promenljivim svetlosnim fluksom se vrši pobuda površine uzorka ploče koji izaziva nestacionarni toplotni efekat po dubini materijala. Vremenski oblik svetlosnog impulsa je snimljen i njegov oblik je dat na [Slici 3.10](#).



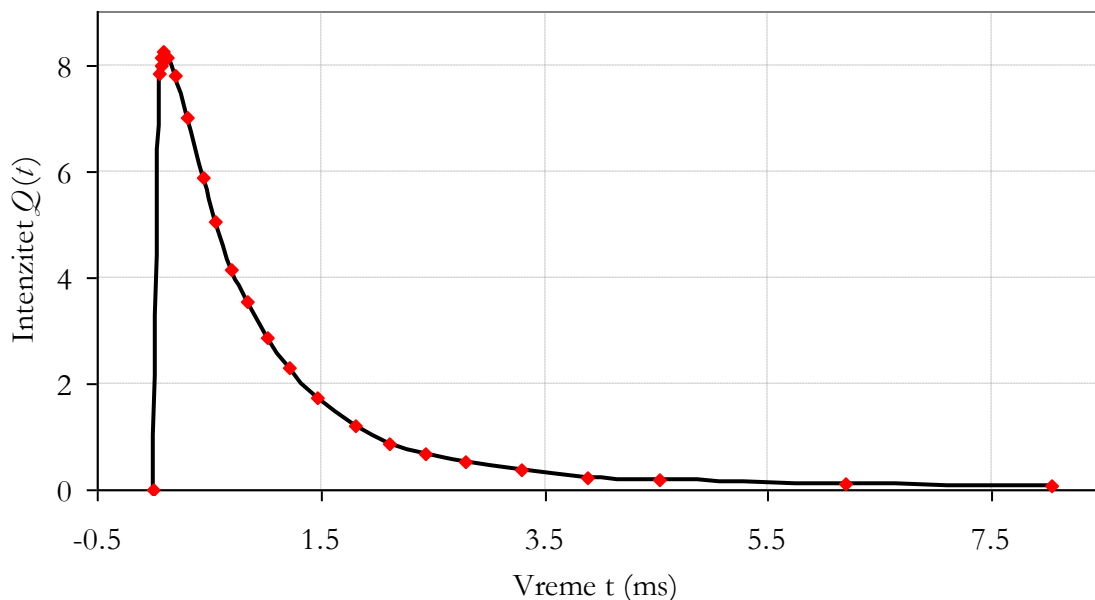
Slika 3.10: Fotografski snimak tipičnog vremenskog oblika svetlosne pobude.

Prostorni profil absorpcionog fluksa pobudnog elektromagnetnog zračenja, prostire se u pravcu x – ose i obeležava se sa $Q(x)$. Fotothermalnim efektom u pravcu x ose generiše se toplotni impuls prostornog oblika kao i oblik absorbovanog svetlosnog fluksa. On opada eksponencijalno u skladu sa jednačinom 3.2. Pošto se stvara ogroman gradijent na površini uzorka, početni kod koji je bio napisan u MALAB-u morao se korigovati u pravcu formiranja mreže sa dve različite gustine. Dakle u pravcu x – ose, formirana bliže površini mreža sa korakom dx_1 a ispod nje mreža sa korakom dx_2 . Unutrašnji prostorni izvor toplote $Q(x)$ i vremenska funkcija $Q(t)$ su sačinjavali unutrašnji izvor toplote kao početna osnova modelovanja funkcije izvora. Na osnovu izvršene analize razvijena su dva pristupa numeričke simulacije - modelovanja vremenske funkcije $Q(t)$: Prvi pristup zasnovan na fitovanju eksperimentalnih vrednosti u programskom paketu Origin Pro 8. i drugi pristup sa 6 funkcija zasnovan na fitovanju u programskom paketu MATLAB.

Eksponencijalnim impulsom se najčešće karakteriše promena intenziteta fleš lampe fotografskog blica. Njen matematički izraz se može napisati kao funkcija vremena maksimalnog intenziteta τ_m kao što je prikazano na [Slici 3.10](#), odnosno kao:

$$Q(t, \tau_m) = \frac{t}{\tau_m} \cdot \exp\left[1 - \frac{t}{\tau_m}\right], \quad (3.3)$$

Kako trajanje impulsa ne figurira u jednačini 3.3, potrebno je u jednačinama staviti da $\tau \rightarrow \infty$, budući da je trajanje ovog tipa impulsa beskonačno. Vrednost intenziteta svetlosnog impulsa $Q(t)$, su prikazane grafički na [Slici 3.11](#) i



Slika 3.11: Vremenski oblik svetlosne pobude.

Vrednosti intenziteta svetlosnog impulsa $Q(t)$, su prikazane grafički na [Slici 3.11](#) i izvršeno je fitovanje eksperimentalnih vrednosti u programskom paketu Origin Pro 8. Rezultati fita impulsnom funkcijom su parametri y_0 , x_0 , A , t_1 , P i t_2 .

$$y = y_0 + A \cdot \left(1 - \exp \left[-\frac{x - x_0}{t_1} \right] \right)^P \cdot \exp \left[-\frac{x - x_0}{t_2} \right], \quad (3.4)$$

$$y = 0,14 + 10 \cdot \left(1 - \exp \left[-\frac{x - 1,95 \cdot 10^{-9}}{0,07} \right] \right)^{0,32} \cdot \exp \left[-\frac{x - 1,95 \cdot 10^{-9}}{0,79} \right], \quad (3.5)$$

Izraz (3.2) predstavlja formule pomoću kojih se simuliraju segmenti svetlosnog impulsa vrednost funkcije $Q(t)$ data je u funkciji t tabelarno (Dodatak D, Tabela 3.1).

Fotografija impulsa je prikazana na [Slici 3.10](#) (prikazana u negativnom formatu). Na [Slici 3.11](#) može se videti da impuls ima vremensko kašnjenje, posle koga funkcija ima eksponencijalni tok. Sa osciloskopa su dobijene 25 vrednosti da bi procenili oblik funkcije svetlosnog impulsa. Iz vrednosti dobijene sa [Slike 3.11](#), intenzitet svetlosnog fluksa je modelovan sa 6 funkcija. Vremensko kašnjenje nije uzeto. Najbolji fit eksperimentalnih rezultata za različite delove eksperimentalne krive bio je fit različitim analitičkim izrazima u Origin Pro 8. Jednačina 3.3 pokazuje model intenziteta vremenske zavisnosti, dok je prostorna zavisnost bila uključena sa eksponencijalnim faktorom. Ceo model intenziteta impulsa bio je upotrebljen kao:

$$Q(x, t) = Q_0 \cdot Q(t) \cdot \exp[-\mu \cdot x], \quad (3.6)$$

gde je μ koeficijent apsorpcije.

Primena razvijenog modela u programu MATLAB sa 6 funkcija daje izgled funkcije intenziteta pobudnog svetlosnog impulsa promenljivog u vremenu pi rikazanog na [Slici 3.1](#).

$$Q(t) = \begin{cases} 141.350238t & \text{za } 0\text{ms} < t < 5.55339 \cdot 10^{-2}\text{ms} \\ -388.65t^2 + 69.1t + 5.2171 & \text{za } 5.55339 \cdot 10^{-2}\text{ms} < t < 9.45464 \cdot 10^{-2}\text{ms} \\ -12.362t^2 - 1.0231t + 8.4854 & \text{za } 9.45464 \cdot 10^{-2}\text{ms} < t < 3.06974 \cdot 10^{-1}\text{ms} \\ -0.456t^5 + 1.596t^4 - 4.06t^3 + 9.401t^2 - 14.099t + 10.552 & \text{za } 3.06974 \cdot 10^{-1}\text{ms} < t < 1.20908\text{ms} \\ 1.4694t^2 - 6.2778t + 7.7472 & \text{za } 1.20908\text{ms} < t < 1.81661\text{ms} \\ 9.344e^{-1.319t} + 0.5417e^{-0.2568t} & \text{za } 1.81661\text{ms} < t \end{cases} \quad (3.7)$$

Dijagram vremenske funkcije $Q(t)$ za vremenski period od 0 do 8.23928 ms koji obuhvata 25 izmerenih tačaka intenziteta svetlosnog fluksa prikazan je u dodatku D.4. Maksimalna vrednost svetlosnog impulsa izmerena je u $t(5) = 0.094546$ (ms) i iznosila je $Q(t) = 8.23928$ (V).

3.3.2 Zadavanje graničnih uslova

Prema teoriji [22], individualnost rešenja parcijalne diferencijalne jednačine –PDJ, zavisi od graničnih uslova za koje se rešenje traži. Stoga je veoma bitno zadavati granične uslove istim redom tačnosti, kojim se aproksimira diferencijalna jednačina.

Drugi izvod jednačine je aproksimiran sa tačnošću reda $(\Delta x)^2$ pa bi i granični uslov trebao biti aproksimiran centralnim izvodom:

$$dT/dx = (T(x+\Delta x) - T(x-\Delta x))/2\Delta x \quad \text{red veličine greške je } (\Delta x)^2, \quad (3.5)$$

a ne levim odnosno desnim izvodom:

$$dT/dx = (T(x) - T(x-\Delta x))/\Delta x \quad \text{red veličine greške je } (\Delta x), \quad (3.6)$$

Aproksimacija drugog izvoda formulom:

$$d^2T/dx^2 = (T(x+\Delta x) - 2T(x) + T(x-\Delta x))/(\Delta x)^2$$

prema nekim autorima daje grešku reda veličine $(\Delta x)^2$.

(3.7)

Te je granični uslov koji je u obliku:

$$dT/dx = 0 \quad (3.8)$$

formulisan prema izrazu (3.5)

$$T(x+\Delta x) = T(x-\Delta x) \quad (3.9)$$

odakle je:

$$d^2T/dx^2 = (2T(x+\Delta x) - 2T(x))/(\Delta x)^2 \quad (3.10)$$

U svim problemima elektromagnetike koji su rešeni ovom metodom korišćen je izraz (3.5). Prema logici koju ste pomenuli, da ne bi dolazilo do difuzije prema spoljašnjoj sredini, treba postaviti da je temperatura spoljašnje sredine jednaka temperaturi na ivici uzorka.

$$T(x-\Delta x) = T(x)$$

(3.11)

Ukoliko se izraz (3.11) zameni u izraz (3.7) dobija se:

$$d^2T/dx^2 = (T(x+\Delta x)-T(x))/(\Delta x)^2$$

(3.12)

U primeru koji je tretiran u [22], korišćena je aproksimacija izvoda na polovini ξ ćelije, tako da se u izrazu 2.8 na 24. strani, ispred izvoda po ξ koordinati javlja 2, kao i u jednačinama koje su napisane u kodu.

Što se korekcije koda tiče, neophodno je ukloniti 2 u jednačinama iza kojih u komentaru piše Nojmanov granični uslov.

3.3.3 Ograničenja po pitanju memorije PC

Što se tiče problema memorije, MATLAB ima ograničenje po pitanju dužine niza na 1120Mb podataka (na računaru na kome je najčešće vršena numerička simulacija). Kako je kod napisan da pamti celu matricu temperature T , moguće je, da sa povećanjem gustine mreže, matrica temperature nadmašila tu vrednost i realizacija numeričkog koda nije moguća.

Problemi koji su se javljali u vezi memorije mogli su da budu rešeni na dva načina, kako bi se prevazišao taj problem:

1. Prvi način je bio da se doradi deo koda koji bi omogućio neuniformnu gustinu mreže, odnosno da se gustina mreže definiše različito za dva ili više segmenata;
2. Ili na drugi način da se kod koriguje tako da ne pamti čitavu matricu temperature T , već samo vrednosti temperature u vremenskim koracima frejmovi simulacije T_{fr} koji bi se unapred definisali. Na taj način bi se drastično smanjio broj elemenata matrice i tada ne bi imali problema sa memorijom računara.

Odlučeno je da se obe varijante primene u kombinaciji, tako da se gustina mreže sastoji iz dva segmenta u pravcu x – ose nejednake debljine materijala dx_1 i dx_2 dok će se podaci pamtit i za unapred zadati vremenski korak T_{fr} na svakih (npr. 50 μ s).

3.3.4 Testiranje numeričkog modela za različite energije svetlosnog izvora

Odnos temperaturnog kontrasta $\Delta T_1(t)$ (promenljiv u vremenu dobijen za vrednost apsorbiranog svetlosnog fluksa Q_1) i $\Delta T_1'(t)$ za vrednost Q_2 koji je označen sa $K_{\Delta T}$ predstavlja trenutni odnos.

Za Q Iz $\Delta T_1(t)$ se uzimaju diskretne vrednosti u vremenu $\rightarrow \Delta T_1, \Delta T_2, \dots$

Za Q' Iz $\Delta T_1'(t)$ se uzimaju diskretne vrednosti u vremenu $\rightarrow \Delta T_1', \Delta T_2', \dots$

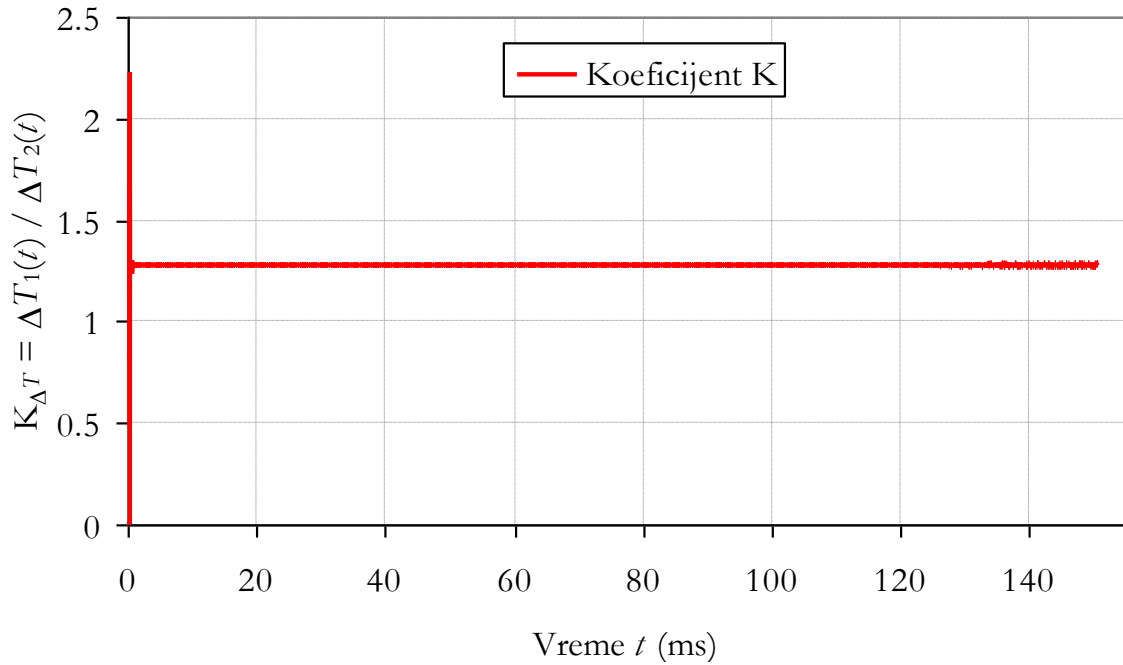
Za $Q = 0.1342E6$ W/m² i $Q' = 0.171239E6$ W/m² dobija se odnos K_Q .

$$K_Q = \frac{Q}{Q'} = \frac{0,1342E6}{0,171239E6} = 0.78369, \text{ dok za } K_{\Delta T} \text{ dobija se u svakom trenutku odnos}$$

$$K_{\Delta T} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_1'} = \frac{0,5769}{0,7362} = 0.78361.$$

$K_Q \cong K_{\Delta T} = 0.7836$, razlikuje se na 5-toj decimali. Grafik je prikazan na [Slici 3.12](#).

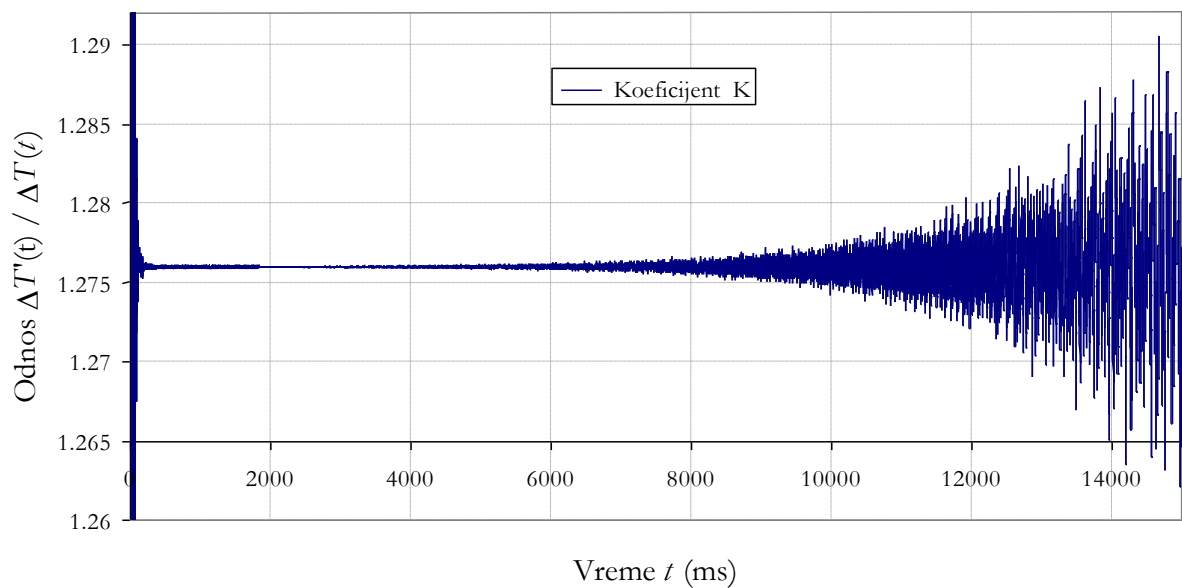
Odnos temperaturskog kontrasta za dve različite energije Q_1 i Q_2



[Slika 3.12](#): Promena koeficijenta $K_{\Delta T}$ u vremenu.

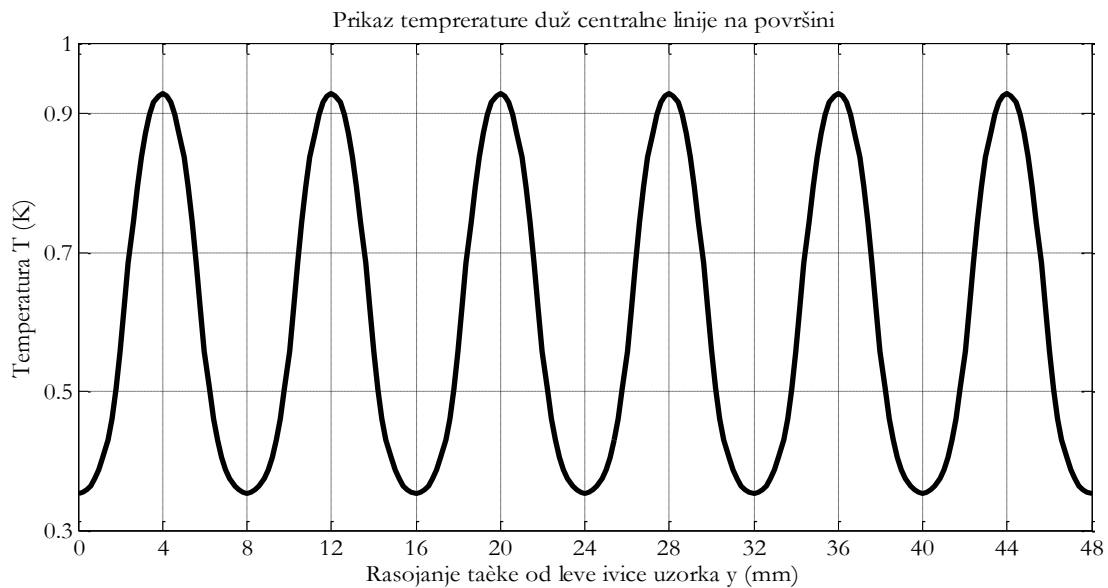
Posmatranjem dijagrama na [Slici 3.12](#) se može zaključiti da je koeficijent $K_{\Delta T}$ slabo promenljiv za vreme trajanja procesa difuzije toplote u aluminijumskoj ploči.

Odnos temperaturskog kontrasta za energije Q_1 i Q_2

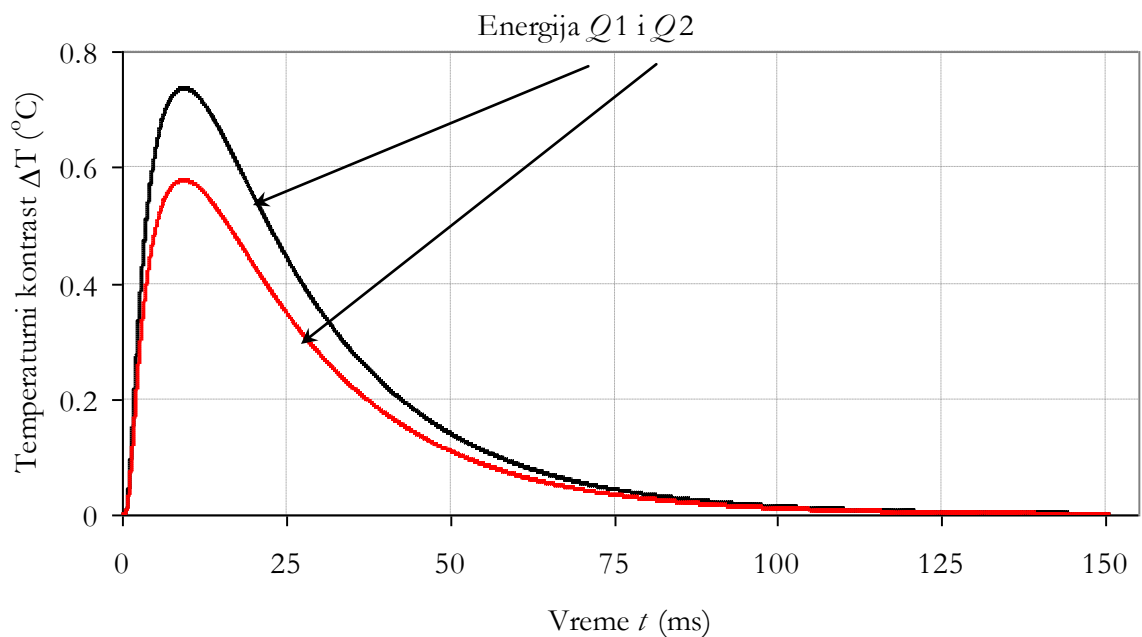


[Slika 3.13](#): Promena koeficijenta $K_{\Delta T}$ u vremenu.

Na Slici 3.13 prikazan je odnos temperaturnih kontrasta za u vremenu do 14 (s), koeficijent $K_{\Delta T}$ je skoro ne promenljiv za vreme trajanja procesa difuzije toplote u aluminijumskoj ploč do 6 (s).



Slika 3.14: Temperatura za određeni sloj materijala paralelan površini: Sloj $x = 0$ na površini test ploče TP 13 sa $N_d = 6$. Temperatura duž centralne linije $T_{\min}(y = 0 \text{ mm} + n \cdot 8 \text{ mm}) = 0.353 \text{ K}$ i $T_{\max}(y = 4 \text{ mm} + n \cdot 8 \text{ mm}) = 0.9299 \text{ K}$, $n = 0,1,2,3,4,5$.



Slika 3.15: Temperaturni kontrast ΔT za određeni sloj materijala paralelan površini: Sloj $x = 0$ na površini test ploče TP 13 sa $N_d = 6$. Karakteristična tačka maksimalnog temperaturnog kontrasta $T_{\max} = 0.7362$ ($^{\circ}\text{C}$) za $Q_1 = 0.171239\text{E}6 \text{ W/m}^2$ i crvena kriva za $Q_2 = 0.1342\text{E}6 \text{ (W/m}^2)$.

Na **Slici 3.15**, vrednost maksimalnog temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} se dostiže u trenutku $t_{\max} = 9.362$ ms od početka pobude. U istom trenutku svoj maksimum ima i kriva temperaturnog kontrasta za svetlosnu snagu Q_2 koja je manji od ΔT_{\max} za Q_1 , srazmerno snazi. Rezultati numeričke simulacije za Q_1 i Q_2 kriva temperaturnog kontrasta se dobijaju kao razlika T_1 (zelena tačkana slici mreže ćelije), na sredini međudefektne oblasti i T_2 (plava tačka na slici mreže simulacije), na sredini defekta. Ravnotežna temperatura na kraju procesa.

3.3.5 Značajni zaključci analize početnih kodova simulacije

Testiranje numeričkog koda je započeto variranjem koeficijenta apsorpcije μ [1/cm] od 10, 100, 1000, 10000 i 100000. Analiza rezultata dobijenih za različite vrednosti koeficijenta apsorpcije od manjih vrednosti do većih vrednosti. Praktično se apsorpcija svetlosnog zračenja vrši u tankom površinskom sloju materijala koji za vrednosti koeficijenta apsorpcije μ od 10 do 100000 [1/cm] daje sledeće vrednosti debljine sloja materijala u koji se sva apsorbovana svetlosna energija konvertuje u toplotu od 1000 [μm], 100 [μm], 10 [μm], 1 [μm] i 0.1 [μm].

Iz literature je poznato da se energija apsorbovanog zračenja pretvara u toplotu u tankom površinskom sloju debljine 10^{-4} [cm] do 10^{-5} [cm], ako je $d_{\text{eff}} = 1/\mu$ tada se koeficijent apsorpcije kreće od 10000 [1/cm] do 100000 [1/cm] za neprovidne materijale. Apсорpcija ima karakter površinskog efekta. Za čist Al koeficijent refleksije je $R \sim 0.9$.

Povećanjem dimenzije ćelije u pravcu y ose sa $dy = 0.02$ mm na $dy = 0.2$ mm (povećanje 10 puta), pri čemu je dimenzija ćelije u x pravcu po dubini pločice imala stalnu vrednost $dx = 0.002$ mm, Vrednost temperaturnog kontrasta se smanjuje sa $\Delta T = 0.01856$ °C na $\Delta T = 0.01856$ °C (smanjenje je 1.58 %).

Cilj dobijanje izjednačene temperature $T_1(t)$ i $T_2(t)$ čija trajna vrednost je 0.5 °C, za slučaj $dx =$ koeficijenta apsorpcije za μ sa 10000 1/cm na 14705.882 1/cm, uz pretpostavku da smo tačno izmerili svetlosni fluks $Q_0 = 1,27388$ W/cm² na površini fibera.

Za materijale koji su sporiji sa aspekta provođenja toplote difuzijom uticaj konvekcije toplote u okolni prostor i gubitka zračenjem dolaze do izražaja. Sa aspekta fotografskog blica izrađen je efekat tople bljeskalice u sceni i zasićenja scene ogrom energijom u kratkom vremenu (zasićeni pikseli). Za izbegavanje ovih uticaja eksperimentalni rezultati jednog – dva frejma neposredno posle zagrevanja nisu uzimani u procesu fitovanja eksperimentalnih rezultata krivom numeričke simulacije. Modelovanje gubitaka usled zračenja i konvekcije je zanemareno u jednostavnijem 2D modelu, kao i da je aluminijum dobar toplotni provodnik (difuzijom toplote). Vreme nastanka termalnog kontrasta i njegovo isšeznuće je ispod 300 μs , posmatra se adijabatski izolovan slučaj od okoline. Podaci vezani za koeficijent termalne difuzije izmeren na istom uzorku aluminijuma od koga su napravljeni i test uzorci ($a = 81$ cm²/s, $c_p = 880$ J/kg°C specifične toplote kao i $k = 189.4$ W/m°C toplotne provodnosti), proverene su eksperimentalno metodom impulsne laserske metode u institutu Vinča u laboratoriji za termotehniku. Gustina aluminijuma je određena merenjem mase i izračunate zapremine iz poznatih dimenzija ploče i dimenzija defekta širine i dubine žljeba $\rho = 2655.4$ kg/m³. Tako dobijene stvarne vrednosti termofizičkih osobina su unete u simulacijama u programu *ImpulsnaVideoTermografija.m* [5], tako da se dobije poklapanje proračuna sa rezultatima eksperimenta

Procenjene vrednosti termofizičkih parametara uključeni su u osnovni model aluminijumske ploče sa defektom. Pretpostavljeno je da je koeficijent apsorpcije $\mu = 1250$

$1/\text{cm}^2$ i $Q_0 = 0.16194 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ svetlosni fluks na površini materijala. Pretpostavlja se da je test uzorak načinjen od homogenog materijala aluminijuma. Na Slici 2.2 prikazani su rezultati simulacije.

Međutim, ovi rezultati se ne poklapaju sa rezultatima merenja temperature aluminijumske ploče na kraju procesa impulsnog zagrevanja T_∞ koja zavisi od svetlosne snage fotografskog blica. Temperatura T_∞ zagrevanja ploče u eksperimentalnim rezultatima pokazuju više vrednosti. Vrednost izmerenu na kraju sekvence u eksperimentu iznose $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tabela 2 u dodatku teze), i ona se može postići povećavanjem vrednosti svetlosnog fluksa sa vpočetne vrednosti iz simulacije $Q_0 = 0.16194 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ koja je dala vrednost $T_\infty = 0.4933 \text{ }^\circ\text{C}$ na $Q_0 = 0.26262 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$. Tražeći uzorke, ustanovili smo da su oni posledica različite snage svetlosnog impulsa fotografskog blica što zavisi od promenljivog napona usled trošenja izvora za napajnje (komercijalne baterijski izvori od 1.5 V).

U programu, apsorpcija svetlosti se modeluje menjanjem koeficijenta apsorpcije μ i širine čvora simulacije $dx1$ u gornjem sloju mreže sa Slike 2.1. Ustanovljena je zavisnost koeficijenta apsorpcije i širine čvora $dx1$. Menjali smo vrednost apsorpcionog koeficijenta i probanjem smo ustanovili da se najbolje slaganje sa eksperimentom dobija ako se usvoji da je koeficijent apsorpcije $\mu = 1250 \text{ 1/cm}^2$. Krajnji model aluminijumske ploče sa defektom u obliku žljeba periodične strukture dobijen je preciznijim modelovanjem mreže sa dva sloja različite gustine.

Karakterističan rezultat simulacije $\Delta T_{\text{max_sim}} = 0.7353 \text{ }^\circ\text{C}$ i $t_{\text{max_sim}} = 10.91 \text{ ms}$ uz zadate početne uslove Q_0 – apsorbovana energija po metru kvadratnom i termofizičke karakteristike upotrebljene ploče aluminijuma (k – toplotnu provodnost, ρ - gustinu i c_p - specifičnu toplotu), za širinu defekta $w = 4 \text{ mm}$ na dubini $d = 0.5 \text{ mm}$ (debljina aluminijumske ploče je $L = 2 \text{ mm}$). Temperatura na kraju procesa difuzije kada se temperatura na površini izjednači između defektne i bezdefektne oblasti. (oko 300 do 400 ms) iznosi $T_1 = T_2 = T_\infty = 0.4933 \text{ }^\circ\text{C}$.

Osnovni simulacioni model aluminijumske ploče sa periodičnom strukturom više paralelnih žljebova – defekat čiji broj zavisi od njihove širine (ploče su istih dimenzija), zbog periodične strukture sastoji se od jednog žljeba i polovine međudefektne prostora levo i desno od defekta. (Slika 3.6).

U okolini materijala ispod površine koja se zagreva svetlosnim impulsom (mehanizmom apsorpcije i fototermalne konverzije u toplotni impuls), površina i materijal ispod trpi uticaj velikog gradijenta. Apsorpcioni koeficijent μ za netransparentan materijal u čvrstom stanju je velik i omogućava prodor samo $1 - 2 \text{ }\mu\text{m}$ svetlosti u materijal i znatno utiče na strukturu temperaturnog polja u njemu. Gustina mreže mora biti dvoslojna sa gornjim gušćim slojem i donjim ređim.

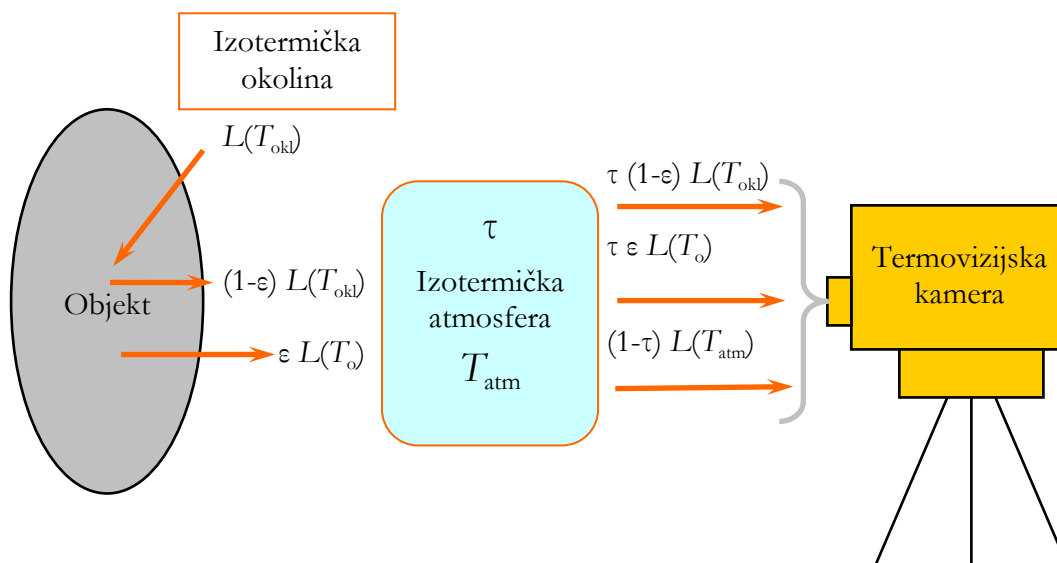
4. Eksperimentalni rezultati

Ova glava prikazuje rezultate eksperimentalnih istraživanja i to korišćenjem eksperimentalne tehnike koja je na osnovu razmatranja u drugoj glavi teze usvojena. Izvršena su snimanja na različitim, posebno odabranim uzorcima sa simuliranim defektima u obliku periodične strukture, a zatim su dobijeni eksperimentalni podaci analizirani i obrađivani softverom za analizu snimljenih termograma. Razvijena je metodologija na osnovu razlike kvadrata poznatih i tehnika upoređivanja teorijskih rezultata numeričke simulacije i eksperimentalnih podataka programom napisanim u MATLAB[®]-u *RazlikaKvadrata.m*.

U posebnom delu ove glave data je analiza eksperimentalnih rezultata. Eksperimentalni rezultati su snimljeni u vidu sekvenci u specijalnom softverskom paketu za generisanje i post analizu sekvenci (niz termograma ekvidistantno pomerenih u vremenu u zavisnosti of frekvencije slika date za termovizijsku kameru). Iz snimljenih sekvenci eksperimentalnih rezultata, dat je prikaz selektovanih frejmova.

Data je sistematizacija izrađenih slika odabranih frejmova po širinama i dubinama defekata koji su korišćeni u eksperimentima. Defekti su sistematizovani po širini i dubini, što je ilustrovano karakterističnim IC slikama (termogramima).

Napravljeni su modeli ploče od aluminijuma sa ciljem da se ispita osetljivost tehnike impulsne videotermografije. Test uzorci su konstruisani bušenjem glodalicom simuliranih defekata u ploče od aluminijuma.



Slika 4.1: Problem radiometrijskog mernja.

Toplotni impuls generisan u materijalu, na površini TP izaziva promene u temperaturnoj raspodeli koja se posmatra termovizijskom kamerom. Temperatura na TP, se prati na površini sa iste strane koja se pobuđuje svetlosnim impulsom.

Želi se dakle izvršiti kvalitativna analiza uticaja defekta na prostiranje toplotnog impulsa, nakon apsorpcije svetlosnog impulsa. Na površini TP generiše se temperaturni impuls, a hlađenje zagrejane površine se dalje odvija procesom unutrašnje difuzije toplote prema hladnijim delovima u ploči. Defekti koji su generisani u TP utiču na brzinu toplotne difuzije. U ambijentu u kome se posmatra raspodela IC zračenje površine test ploče, pored

sopstvenog zračenja TP imamo i zračenje drugih objekata, koji ulaze u vidno polje kamere u okolini posmatranog objekta, kao i reflektovano zračenje drugih jakih izvora koji ne ulaze u vidno polje kamere. (Vidi [Sliku 4.1](#)) Od fizičkih karakteristika TP koju posmatramo, interesuje nas informacija o raspodeli: njene emisivnosti ϵ i temperaturne razlike ΔT , na površini koju posmatramo

Signal koji ulazu u vidno polje optičkog sistema kamere na svom putu (posmatramo objekte koji su udaljeni $R = 40$ cm) do kamere biva neznatno oslabljen pošto se za transmisiju atmosfere usvaja opravdano $\tau = 1$. Za slučaj da su uslovi u atmosferi takvi da je $\tau < 1$, signal bi bio oslabljen. Samo deo ovakvog signala koji ulazi u vidno polje kamere biće dalje prenet optičkim sistemom, koji obezbeđuje prenošenje prikupljene energije zračenja dalje na detektore fokalne matrice FPA. Detektorska matrica vrši elektronsko skaniranje, prostornu diskretizaciju polja zračenja iz vidnog polja optičkog sistema i obaviće se takav prenos energije zračenja na detektorsku matricu, tako da svaki detektor iz matrice praktično u jednom trenutku prima zračenje iz jednog dela prostora.

Struktura detektorske matrice FPA termovizijske kamere omogućava konverziju energije IC zračenja u električni signal. Odziv detektora se prenosi dalje na elektronske podsklopove, koji treba da pojačaju signal i da ga transformišu po amplitudi u vremenskom formatu pogodnog oblika za vizuelno prikazivanje na displeju. Ovo je najjednostavnije put koji prolazi signal od posmatrane raspodele temperatura objekta do vizuelnog prikazivanja toplotnih slika. Svaka signatura scene se sastoji od beskonačnog broja radijansi koje doprinose temperaturnoj slici. Mi pod određenim uslovima snimamo sliku raspodele temperature na površini TP, tj dobijemo termogram.

Metod za otkrivanje defekata u sceni (na površini TP), zasnovan je na praćenju temperaturnog kontrasta ΔT , dok nas egzaktna vrednost T ne zanima. Kako prepoznamo defekt? Što je manja površina koju gledamo (IC piksel-tačke), manji je i prostorni ugao, a time i veća rezolucija. Za svaki IC piksel smatramo da jetako male površine $\epsilon = \text{const}$ za dati spektralni opseg rada kamere.

Kako materijali imaju emisivnost manju od 1; termovizijska kamera ispred nekog objekta ne detektuje samo emitovanu radijansu koja potiče od tog objekta, detektuje ukupnu radijansu, čiji je jedan deo radijansa usled refleksije fluksa zračenja ambijemta

Moguća primena termovizijske kamere za ispitivanje defekata u materijalu spada u jednu sve rašireniju aplikaciju NDT IC termografijom. Termovizijske kamere kojima su izvođena eksperimentalna snimanja ozračene površine TP aluminijumskih uzoraka spadaju u komercijalne uređaje i imale su respektivno po: 25 slika/s, 33 slike/s i 120 slika/s. Odgovarajući softver koji je bio na raspolaganju pružao je mogućnost naknadne obrade snimljenih termograma u cilju otkrivanja potpovršinskih defekata.

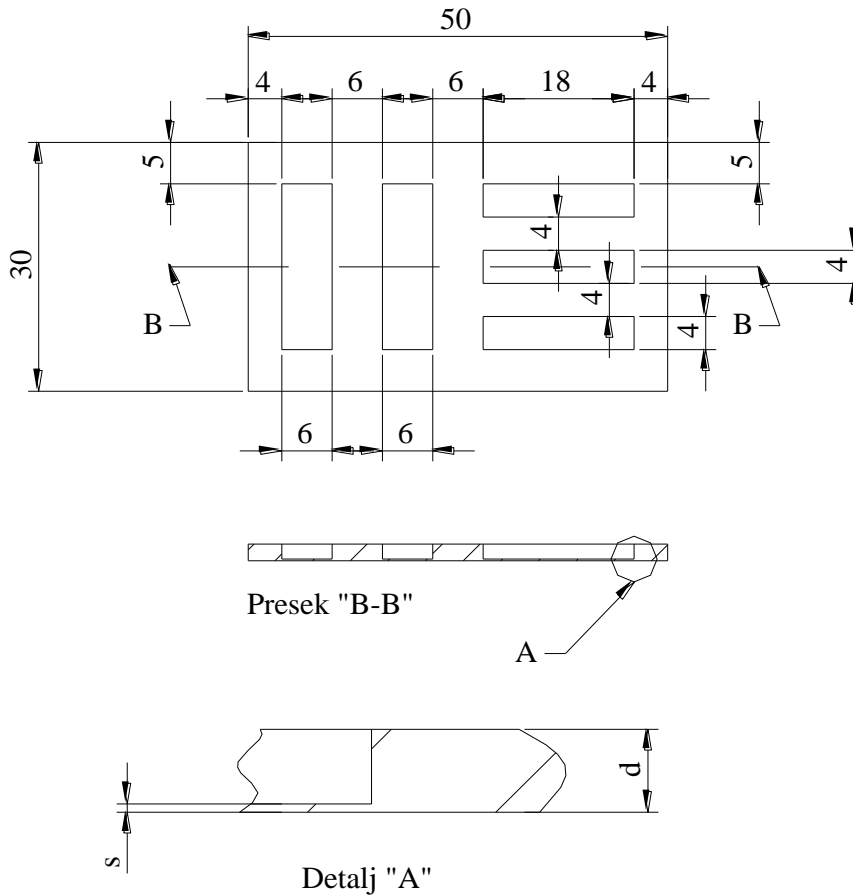
U naknadnoj obradi snimljenih termograma softverskim programom ThermaCAM Researcher Pro. 2.9 moguće je dobiti neke od sledećih podataka po želji (koordinate IC piksela u slici markiranih spotmetrom SP01, temperature temperaturnih profila duž centralne linije IC piksela LI01, dobijanje srednje temperature određene oblasti markirane pravougaonom ili kružnom oblašću AR01, ...), u više tačaka snimljene površine uzorka obradom snimljene sekvence frejm po frejm u vremenskom nizu od npr. 33 slike/s ili 120 slika/s, za dobijanje vremenski promenljivih profila.

4.1 Priprema eksperimenta i test ploče - TP

U uvodnom delu ovog poglavlja ukratko je dat cilj eksperimenta. Izbor termovizijske kamere, sinhronizacija 2 blica. Izbor uzorka, priprema uzorka (crtež, prethodni proračuni u

cilju izbora materijala za uzorke i dimenzije defekata) izrada TP, priprema površine za eloksiranje i eloksiranje (cilj i zašto je to rađeno).

1. Snimanje pločice III i N standardnom termovizijskom kamerom bez mogućnosti naknadne obrade rezultata (eng. *frejm by frejm* - FBF), daje vizuelnu potvrdu postojanja defekta u materijalu i može se koristiti u cilju otkrivanja defekata metodom IVT. Međutim za sprovođenje kvantitativne i kvalitativne analize potrebna je upotreba kamere sa mogućnošću naknadne obrade rezultata u realnom vrenenu.

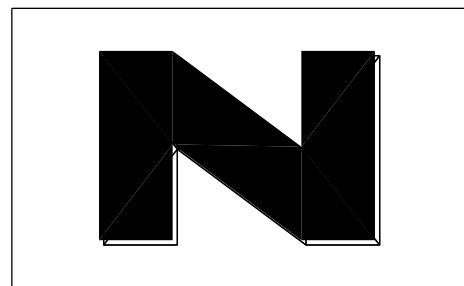
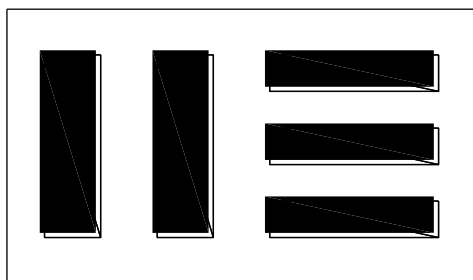


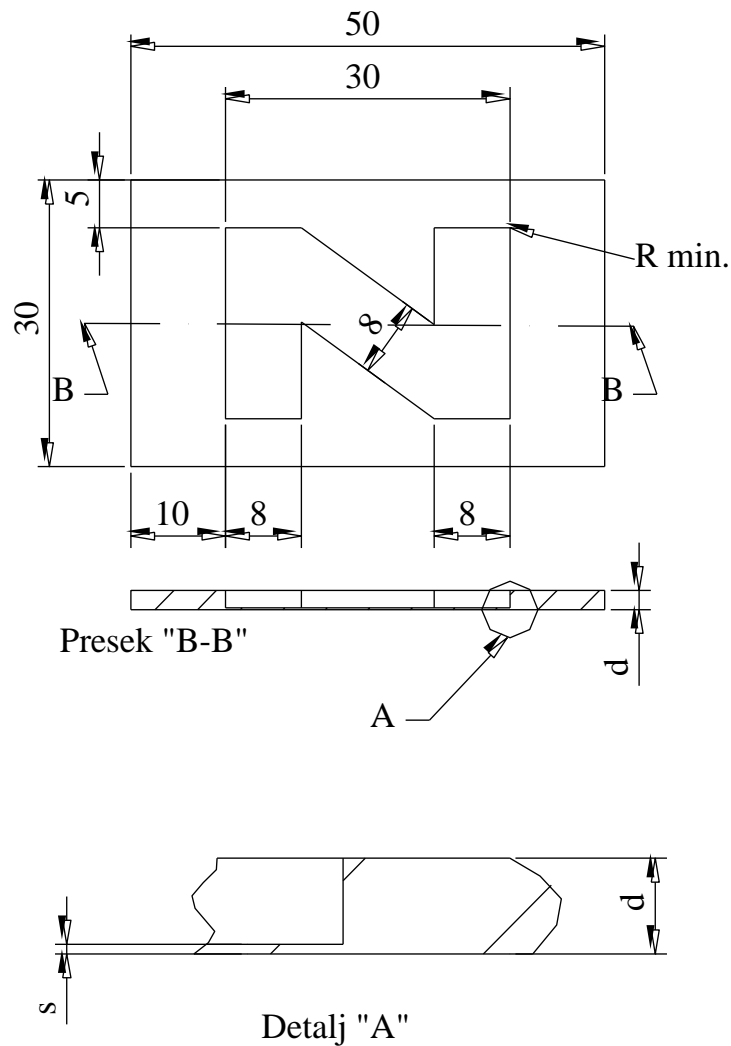
$$d = 1,3 \quad s = 0,2^{+0,1}$$

$$d = 2,0 \quad s = 0,2^{+0,1}$$

$$d = 4,0 \quad s = 0,5 \pm 0,05$$

Tolerancija slobodnih mera je $\pm 0,2$





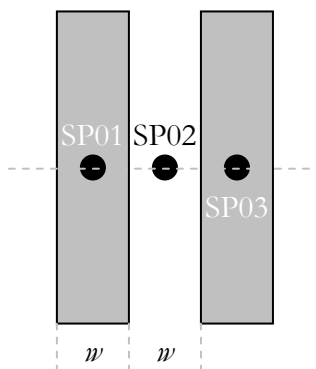
$$d = 1,3 \quad s = 0,2^{+0,1}$$

$$d = 2,0 \quad s = 0,2^{+0,1}$$

$$d = 4,0 \quad s = 0,5 \pm 0,05$$

Tolerancija slobodnih mera je $\pm 0,2$

Slika 4.2: Pripremljeni uzorci.

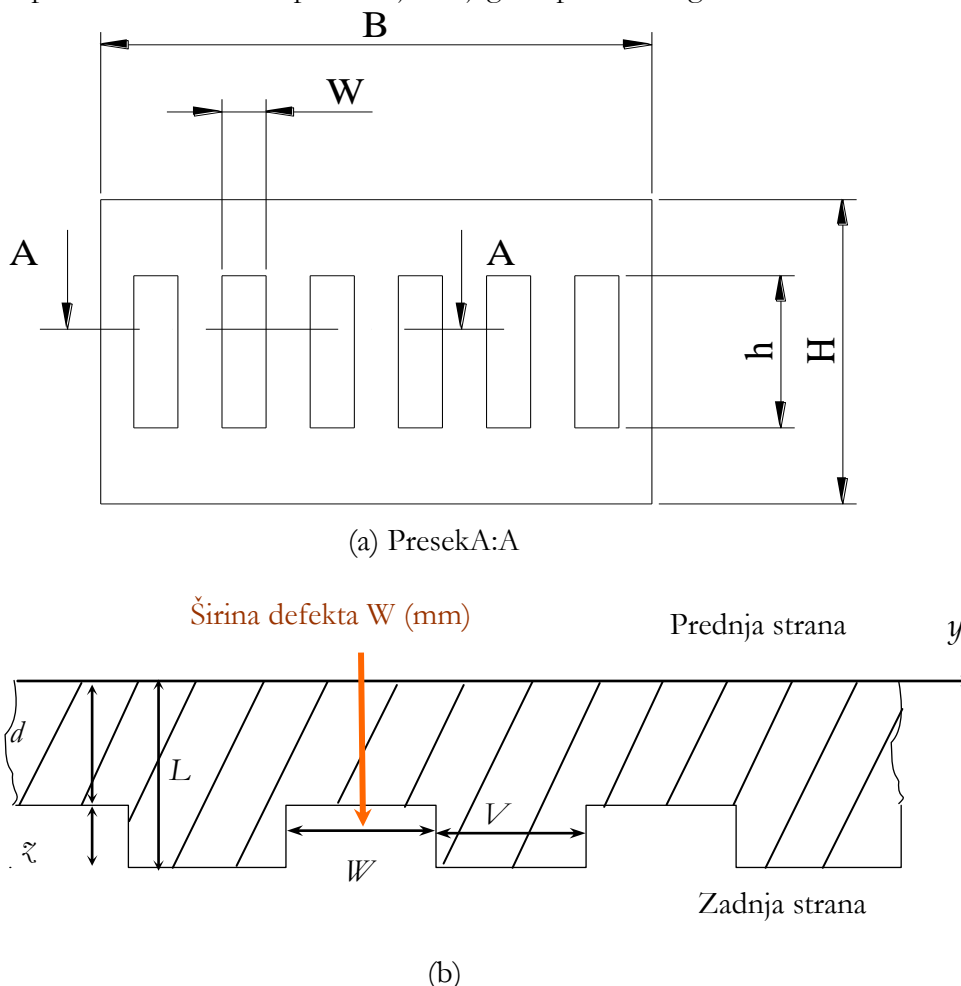


Dimenzije žljebova – defekata u aluminijumskoj ploči test uzorku (IP), su merene nonijusom “TESA” Swiss pri temperaturi ambijenta 20 °C.

Formiranje kanala zadate širine i dubine sa ravnim dnom izvršeno je specijalnim alatom za lasersko graviranje. Izvršeno je lasersko urezivanje kanala sa ravnim dnom (KRD).

Pokretnim spotom (eng. *flying spotmeter*) izmerena je temperatura određenog piksela: SP01, SP02 i SP03, na sredini kanala širine w . Termovizijska kamera za detekciju defekata u materijalu u toku, 1 pixel u slici = 0.25 (mm²). Omogućava detekciju defekata u

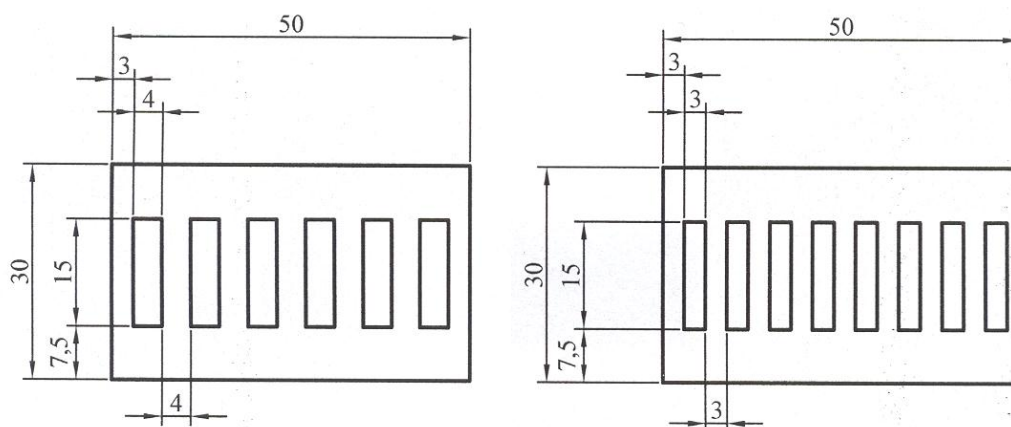
realnom vremenu. Strana koja se posmatra treba da bude obrađena posebnim postupkom eloksiranjem i da nema ogrebotine i oštećenja. w (m) $\cong 0,0174 \times R$ (m) \times FOV ($^\circ$). Geometrijski odnosi: širina vidnog polja i udaljenost objekta. FOV- vidno polje kamere izraženo u stepenima, R- udaljenost kamere i objekta i w - širina polja u ravni objekta. Interesuje nas da iz eksperimentalnih rezultata za $T_1(t)$ temperatura tačke SP01 i $T_2(t)$ temperatura tačke SP02 vidimo šta se očekuje sa energijom. Izvršena je priprema uzorka- eloksiranjem površine uzorka radi postizanja boljeg temperaturnog kontrasta.



Slika 4.3: Šema model uzorka TP 13: (a) slika modela uzorka sa označenim presekom duž centralne linije (b) Slika poprečnog preseka žljeba, Presek A:A.

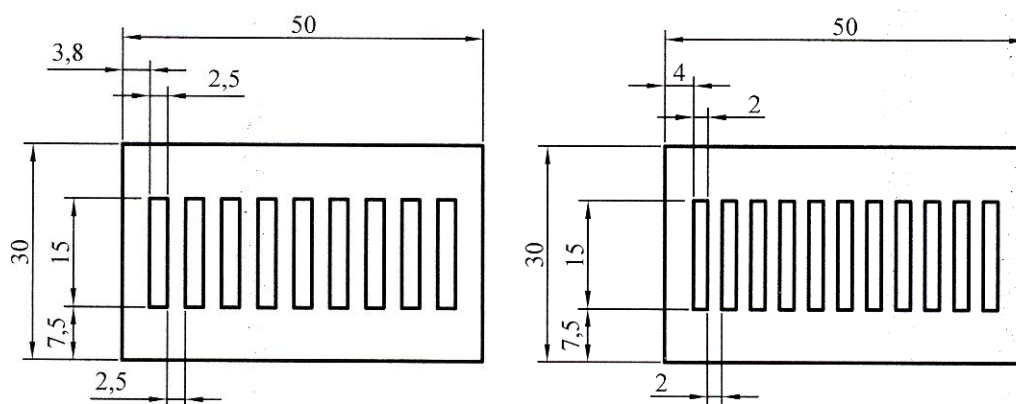
Na Slici 4.3 prikazan je model uzorka na kome se eksperimentalno ispituje radijansa scene površine test pločice u cilju otkrivanja i analize defekata u sceni kao temperaturne odraze vidljive na displeju termovizijske kamere kojom se posmatra.

Model uzorka na kome je eksperimentalno ispitivana radijansa scene, površine ispod koje su defekti, planirana je kroz veliki broj uzoraka preko 18 u cilju određivanja granica primenljivosti metode za ovako složenu periodičnu (sa određenom prostornom frekvencijom i određenom dubinom), strukturu defekata. U ovom radu će biti tretirani svi uzorci ali će više pažnje biti poklonjeno karakterističnim uzorcima u cilju eksperimentalnog utvrđivanja uslova i granica primenljivosti metode PVT na unutrašnju defektoskopiju. Uzorci test ploča supodeljeni u 3 grupe sa po 6 uzoraka po dubini defekta. Međutim analiza zavisnosti širine i dubine defekta zahtevala je njihovo pregrupisanje po širini i dubini defekta.



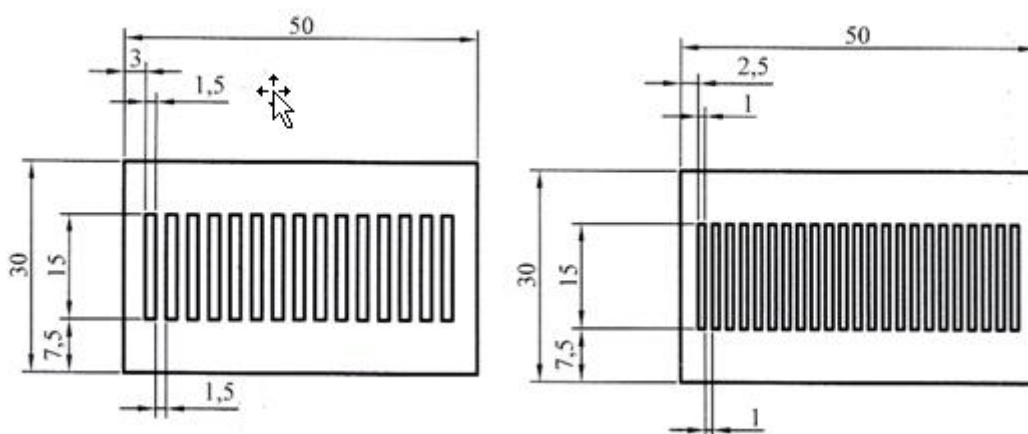
Slika 4.4: Izgled ispitne test ploče TP13: Broj defekata: 6, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm i TP14: Broj defekata: 8, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm.

Na Slici 4.4 su prikazani crteži dve test ploče (TP), sa širinom defekta $w = 4.0$ mm, slika levo i $w = 3.0$ mm slika desno (npr. TP13, TP7 i TP1 za širinu defekta $w = 4.0$ mm i TP14, TP8 i TP2 za širinu defekta $w = 3.0$ mm). Ukupan uzorak se sastoji od 18 aluminijumskih test ploča. Visina defekta je ista kod svih 18 TP i iznosi $b=15$ mm. Sa ovakvim rasporedom defekta na tri različite dubine $d = 0.5$ mm; 1.5 mm i 1.5 mm izrađeno je 6 pločica. Test ploča na slici levo ima $N_d = 6$ defekta, sa korakom 4.0 mm, dok na slici desno TP sa korakom defekta od 3.0 mm ima ukupan broj defekta $N_d = 8$.



Slika 4.5: Izgled ispitne test ploče TP15: Broj defekata: 9, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm i TP16: Broj defekata: 11, Dubina defekta: 0.5, 1.0 i 1.5 mm.

Na Slici 4.5. su prikazani crteži dve test ploče slično kao i na Slici 4.3, ali ovde se radi o dvema pločicama sa širinom defekta $w = 2.5$ mm (slika levo) i $w = 2.0$ mm (slika desno). Karakteristike ostalih pločica (npr. TP15, TP9 i TP3 za širinu defekta $w = 2.5$ mm i TP16, TP10 i TP4 za širinu defekta $w = 2.0$ mm). Visina kod svih defekata je ista i iznosi $b = 15$ mm. Test ploča TP15 ima $N_d = 9$ defekta sa korakom 2.5 mm prikazana na slici levo, dok je na slici desno sa korakom defekta 2 mm prikazana TP16 sa $N_d = 11$ defekta.



Slika 4.6: Izgled ispitne test ploče TP17: Broj defekata: 15, Dubina defekta: 0,5, 1,0 i 1,5 mm i TP18: Broj defekata: 23, Dubina defekta: 0,5, 1,0 i 1,5 mm.

Na Slici 4.6 prikazani su crteži dve test ploče sa širinom defekta $w = 1,5$ mm (slika levo) i $w = 1,0$ mm (slika desno), oznake ovih ploča su TP17, TP11 i TP5 za širinu defekta $w = 1,5$ mm i TP18, TP12 i TP6 za širinu defekta $w = 1,0$ mm. Visina defekta je ista kao i za prethodne ploče na Slikama 4.3 i 4.4 ($b = 15$ mm). Sa ovakvim rasporedom defekta na tri različite dubine $d = 1, 5$ mm; $1, 5$ mm i $0, 5$ mm izrađeno je 6 pločica. Vidi se da je broj defekta $N_d = 15$ sa korakom $1,5$ mm na slici levo, i na slici desno za korak defekta $1,0$ mm broj defekta $N_d = 23$. Ukupan broj uzoraka je 18 test pločica, izrađenih od materijala aluminijuma (Al), čije površine su eloksirane, boja je crna mat. Debljina aluminijumske pločice je $L = 2$ mm.

U Tabeli 4.1 prikazane su karakteristične dimenzije test uzoraka, ploče sa najširim (TP1, TP7 i TP13) i najužim defektima (TP6, TP12 i TP18). I takođe druga vrsta karakterističnih defekata su defekti sa najplićim (TP13, TP14, TP15, TP16, TP17 i TP18), i nadubljenim defektima (TP1, TP2, TP3, TP4, TP5 i TP6).

Tabela 4.1: Geometrija testiranih uzoraka, za svaku dubinu defekta d date su dimenzije najširih i najužih karakterističnih uzoraka.

DIMENZIJE TEST UZORAKA $B \times H \times L = 50 \times 30 \times 2$					
Broj uzorka	Širina defekta W [mm]	Širina međupr $V = W$ [mm]	Dužina defekta h [mm]	Dubina defekta d [mm]	Debljina uzorka L [mm]
1	4	4	15	1,5	2
6	1	1	15	1,5	2
7	4	4	15	1	2
12	1	1	15	1	2
13	4	4	15	0,5	2
18	1	1	15	0,5	2

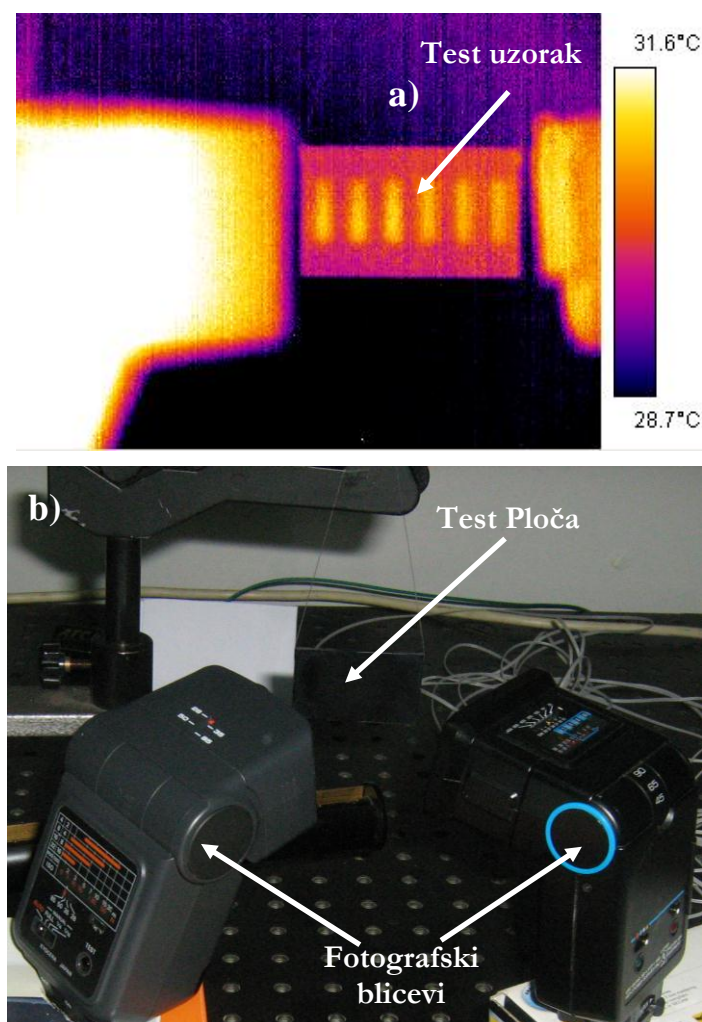
U Tabeli 4.1, navedene su vrednosti geometrijskih karakteristika za dve karakteristične test grupe, prva grupa ima dve podgrupe sa po 3 test uzork i druga grupa takođe dve podgrupe sa po 6 test ploča. Prvo je dat najširi defekt, a ispod njega najuži za istu vrednost dubine defekta npr. za $d = 1,5$ mm za prvu grupu najdubljih defekata. Dakle prvu grupu od TP1 do TP6 su najdublji defekti $d = 1,5$ mm poređanih od najšireg defekte $w = 4$ mm do najužeg defekte $w = 1$ mm. Potom sledi grupa test uzoraka od TP7 do TP12 kod koje su svi defekti na istoj dubini $d = 1$ mm što je u stvari sredina debljine pločice. I na kraju treća

grupa su najplići defekti za $d = 0,5$ mm test uzorci od TP13 do TP18 su takođe poređani od najširih do najplićih defekata.

Merenja debljine ploče i dubine žljebova su izvršena mikrometrim sa maksimalnom apsolutnom neodređenošću od 5 (μm). Merenja širine žljeba i njihovog međusobnog rastojanja su merena nonijusom tačnosti 0.1 (mm), npr. za izmerena vrednost širine defekta $w = 4$ mm, stvarna širina defekta može biti 4 ± 0.1 (mm). Test uzorci-ploče su od homogenog materijala aluminijuma sa termalnim osobinama nezavisnim od temperature.

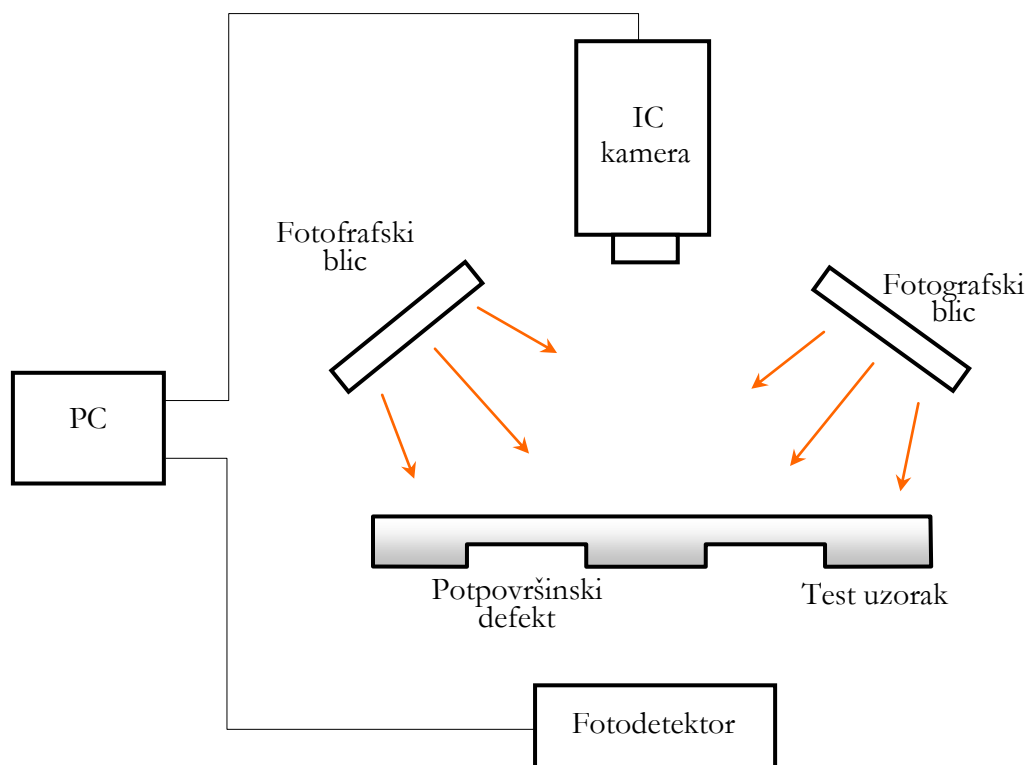
4.1.1 Postavka eksperimenta

Eksperimentalna postavka je prikazana na Slici 4.7. Dva fotografska blica (YASHICA CS-250AF) su korišćena kao impulsni svetlosni izvori za zagrevanje površine uzorka. Intenzitet svetlosnog impulsa meren je fotodetektorom pozicioniranim iznad uzorka. Termovizijskom kamerom (SC 620 FLIR), sa nehladenom fokalnom matricom osetljivom u opsegu 7.5-13 μm i koja radi na frekvenciji slike od 120 fps (eng. *frame per seconds* - fps), sniman je toplotni odziv površine uzorka izazvan zagrevanjem svetlosnim impulsom.



Slika 4.7: Eksperimentalna postavka sa dva sinhronizovana blica (test uzorak je u obliku ploče dimenzije površine 50 x 30 mm²): a) termogram i dva blica u okolini i b) Fotografija eksperimentalne postavke sa dva blica svetlosni izvor fotografski blic YASHICA CS-250AF.

Uopštena struktura sistema za analizu primenom tehnike impulsne video-termografije prikazana je na Slici 4.7. Eksperimentalni termografski sistem sa 2 svetlosna izvora. U radu je dat naglasak na jednu od tehnika za nedestruktivnu detekciju defekata u materijalu. Doprinos rada je u razvoju teorijskog modela koji podržava bolju obradu rezultata merenja u postavljenoj eksperimentalnoj konstelaciji prikazanoj na Slici 4.8. Pored toga prikazani rezultati se mogu koristiti i za određivanje toplotnih karakteristika materijala ili struktura.



Slika 4.8: Šematski prikaz eksperimentalne postavke u refleksnom modu fotografjski blic i termovizijska kamera.

4.1.2 Tehničke karakteristike kamere i impulsnog izvora

U ovom radu je korišćena kamera FLIR SC620 (Slika 4.9), sa nehladenim mikrobolometarskim detektorom koji radi u talasnom opsegu od 7.5-13 μm . Tehničke karakteristike kamere date su u Tabeli 4.2 [3].



Slika 4.9: Kamera Flir SC 620.

IC slike (termogrami) se snimaju na SD kartici, a radi dalje obrade se prebacuju na računar i analiziraju u nekom od komercijalnih programa FLIRQuick Report ili ThermaCAM Researcher Professional 2.9. Termovizijska kamera je opremljena odgovarajućim priborom za direktno povezivanje sa računarom i na taj način omogućava kontinualno snimanje objekat.

U tezi je prikazana termovizijska kamera FLIR SC 620, čiji se rad zasniva na nehlađenom mikrobolometarskom matičnom detektoru. Ona formira termalnu sliku merenjem infracrvene radijacije određenog tela ili celokupne scene. Softver, koji kamera sadrži, vrši neophodnu korekciju pri konverziji termalne slike u odgovarajući termogram, koji predstavlja aproksimaciju tačne temperature snimljenog objekta, ili temperaturnu raspodelu u sceni. Jedna od prednosti kamere FLIR SC 620 je, širok temperaturni opseg, odnosno ona može, u jednoj slici, da prikaže velike razlike u temperaturi. Napaja se pomoću standardne baterije za video kamere. Slike se prikazuju u boji na LCD ekranu dijagonale 14.224 cm. Temperaturna raspodela površine koje se snima prikazuje se varijacijom boja, [2, 3].

Termogrami se mogu snimmiti na memorijskoj PC kartici, i kasnije se analizirati. SC620 je uređaj za ručnu upotrebu, ali se, uz odgovarajući pribor, može instalirati kao nepokretni senzor i njime upravljati preko kompjutera. Opremljena odgovarajućim priborom za povezivanje i softverom, omogućava kontinualno snimanje objekata. Kamera i kompjuter se mogu, na jednostavan način programirati, tako da se termogrami snimaju u redovnim vremenskim intervalima. Moguće je, čak, kameru programirati da identifikuje, na termogramu, temperature koje odstupaju od propisanih vrednosti, i pošalje alarmni signal računaru. Alarmi mogu biti odstupanje maksimuma, minimuma, srednje vrednosti i/ili temperature tačke, skupa tačaka, linije ili oblasti termograma od dozvoljenih vrednosti.

Memorijska PC kartica omogućava memorisanje brojnih termograma, koji se po želji mogu preneti na kompjuter. Zatim je moguće, na kartici, memorisati individualne parametre podešavanja kamere, pri čemu se, prethodno memorisana konfiguracija kamere može veoma brzo učitati. Svaki korisnik kamere može da poseduje sopstvenu PC karticu za memorisanje, tako da su mu uvek na raspolaganju potrebna podešavanja. Tehničke karakteristike termovizijske kamere FLIR SC620 prikazane su u [Tabeli 4.2](#).

Tabela 4.2: Tehnička specifikacija termovizijske kamere FLIR SC620.

Tip detektora	Fokalna matrica u žižnoj ravni (eng. <i>Focal Plane Array</i> – FPA)
Vidno polje (eng. <i>Field of View</i> – FOV)	24° horizontalno i 18° vertikalno
Spektralni opseg	7.5 μm – 13 μm
Temperaturna osetljivost/NETD	< 0.045 °C pri 30 °C
Frekvencija slike	30 Hz (opciono 120 Hz)
IC rezolucija	640 × 480 piksela (opciono 640 × 120 piksela)
Minimalno rastojanje fokusa	0.3 m; zavisi od sočiva kamere (24° sočivo)
Žižna dužina	38 mm; (24° sočivo)
Prostorna rezolucija (IFOV)	0.65 mrad; (24° sočivo)
F-broj	1.1

Tačnost	2 °C ili 2% pune skale
Domen merenja temperature	0 do 500 °C (sa mogućnošću proširenja do 1500 °C)
Radna temperatura	- 40 °C do 120 °C
Vreme snimanja po slici	< 33.33 ms (opciono 8.33 ms)
Memorija za snimanje slika	1 GB kartica, Preko 1000 slika
Komunikaciona veza	Firewire, USB, Bluetooth, composite video
Displej	LCD
Video izlaz	NTSC/PAL
Funkcije	Fokus, snimanje, memorisanje, ponovni poziv
Masa	1,8 kg sa sočivom i baterijom

Relacija između vidnog polja FOV (eng. *field of view*) i rastojanja od objektiva do test uzorka je R (m). R je rastojanje objektiva termovizijske kamere do cilja - test pločice, a veličina termograma je određena: VFOV - vertikalnim vidnim poljem, HFOV - horizontalnim vidnim poljem i IFOV – trenutnim vidnim poljem (eng. *instantaneous field of view*), veličina jednog detektorskog elementa.

Standardno IC sošivo termovizijske kamere SC620 ima žižnu daljinu $f = 38$ mm, 24° (HFOV 23.9°), žižnu daljinu: 37.64 (mm). R je rastojanje do cilja.

Tabela 4.3: Tabela vrednosti širine vidnog polja (H), visine vidnog polja (V) i trenutnog vidnog polja (IFOV) za različite udaljenosti objektiva termovizijske kamere.

R (m)	0.50	1.00	2.00
HFOV (m)	0.21	0.43	0.85
VFOV (m)	0.16	0.32	0.64
IFOV (m)	0.33	0.66	1.33

Detektor termovizijske kamere ThermaCAM™ P65 je nehladna FPA matrica 320×240 IC senzora. Dimenzija detektora na pikselu je $50 \mu\text{m}$ sa čipom koji ima 14 nožica. Savremena ThermaCAM™ P640 sa detektorom na novom nosaču sa tehnologijom poslednje generacije. Rezolucija ovog detektora je 640×480 piksela, a to je ukupno 307 200 pix (mernih tačaka) a dok je dimenzija piksela na detektoru $25 \mu\text{m}$.

Savremena FPA tehnologija sa korakom piksela $25 \mu\text{m}$ znači visoku gustinu piksela. Na oblasti površine $1 \text{ (mm}^2\text{)}$ ima $40 \times 40 = 1600$ piksela. Detektor ima dobre radiometrijske karakteristike.

Jedna od nekoliko savremenijih termovizijskih kamera koje su upotrebljavane za eksperimentalna istraživanja u okviru ovog rada je i ThermaCAM P640. Upotrebljeni senzor kod ove vrste kamere je nehladni mikrobolometarski detektor u obliku fokalne matrice. Dakle, detektor ThermaCAM™ P65 je tipa FPA (eng. *Focal Plane Area*) detektorski niz u žižnoj ravni, nehladni mikrobolometar. Data matrica detektora je 320×240 piksela, a to je ukupno 76 800 pix (mernih tačaka). Spektralni opseg je od $7,5 \mu\text{m}$ do $13 \mu\text{m}$. Kamera poseduje objektiv sa standardnim sočivom, koji omogućava elektronsko skeniranje vidnog polje $24^\circ \times 18^\circ$, a minimalna razdaljina fokusa je 0.3 (m), sa trenutnim vidnim poljem IFOV (eng. *Instantaneous field of view*), je 1.3 mrad. Prostorna rezolucija kamere ili minimalna

geometrijska rezolucija (eng. *Spatial resolution*), je bitan parametar termovizijske kamere kod upotrebe u impulsnoj videotermografiji. Toplotna rezolucija odnosno, toplotna osetljivost je 0.08 (°C) (eng. *Thermal sensitivity*) na 30 (°C).

Slika temperature testirane površine čija je veličina jednaka projektovanoj površini piksela na detektoru. Sočivo je visoke performanse koje je razvio i usavršio FLIR. Bolje razlaganje kamere zahteva više performanse optike. Optika sa sočivom 35 mm je dizajnirana i proizvedena sa najvišom preciznošću podešena na 25 μm dimenzije piksela. Performanse standardnog sočiva su F #1.2 / f=8 mm FOV / 32° Pri korišćenju termovizijske kamere mora se voditi računa o geometrijskim odnosima između širine polja u ravni objekta, udaljenosti od objekta i karakteristika objektiva koji su povezani relacijom: $H(m) \approx 0.01744 \cdot R(m) \cdot FOV(^{\circ})$. Kamera se može programirati da snima termograme u zadatim vremenskim intervalima. U toku snimanja na termogramu se mogu prikazati minimalna, maksimalna i srednja vrednost temperature. Kamera poseduje opciju identifikacije temperature koje odstupaju od zadatih i aktiviranje alarma.

Snimljene sekvence IC slika termovizijskom kamerom se se prebacuju na personalni računar. Potrebno je da na računaru bude odgovarajući softver koji, u principu, treba da omogući sledeće funkcije:

- upravljanje režimom snimanja termograma,
- prenos termograma sa termovizijske kamere na PC računar,
- obradu termograma,
- organizovanje termograma po direktorijumima,
- potpunu analizu termograma,
- postavljanje uslova u pogledu temperature (minimalne i maksimalne) pojedinih zona na termogramu,
- upozoravanje korisnika kada su postavljeni uslovi prekoračeni i
- pravljenje izveštaja za odabrani termogram.

Imajući u vidu male dimenzije ugrađenog LCD displeja (142.24 mm), proizvođač je omogućio povezivanje kamere i eksternog monitora (televizora) preko NTSC/PAL video konektora, koji se standardno isporučuje uz kameru.

U sistemima za nadzor, preventivno održavanje ili upravljanje tehnološkim procesima, potrebno je termovizijsku kameru povezati na personalni računar, tj. formirati računarski upravljani termovizijski sistem.

Impulsni izvor

Sinhronizacija vremena akvizicije frejma kamere sa okidačem blica se ostvaruje sinhronizacionom jedinicom namenjenom tome i napravljenom oko ATmega 162 mikrokontrolera.

Izlazni video signal kamere (VIDEO) se dekodira i vertikalni sinhronizacioni impulsi su odvojeni da se obezbedi nulti trenutak u vremenu (TRIG). Ovaj impuls omogućuje da 2 tajmera koji su taktovani iz 1 MHz izvora davača takta, koji broji naniže od prethodno unetog koda.

Kada tajmer TIMER 1 odbroji do nule, DTR linija PC RS232 porta (COM2) se potvrđuje, što obezbeđuje okidanje softvera za kontrolu kamere u PC-u koji zatim šalje okidački impuls ka kameri preko IEEE-1394 FireWire linka. Kada je akvizicija inicirana dobijene slike se skladište na hard disku (HDD) za kasnije analize.

Oba tajmera se mogu programirati sa PC-a pomoću RS232 porta (COM1) i MCU ATmega 162 RS232 porta (COM). Ovaj link se koristi za fino podešavanje tačaka okidanja za blic i kameru. Rezolucija tajmera je 1 μ s što je dovoljno za ovu aplikaciju pošto je značajno manje nego vremena ekspozicije blica.

Vremena signala su verifikovana pomoću TDS2014 osciloskopa. Rad blica se pratio pomoću brze fotodiode sa transimpedansnim pojačavačem (PD & TIA).

Ovo je pripisano Windows XP vremenu prebacivanja jezgra operativnog sistema, softverskom procesiranju ulaznog trigera i u paketu trigera poslatom ka kameri pomoću softvera, koristeći mrežu preko IEEE-1394 (FireWire). Pošto treba izvršiti sinhronizuju blic atačno na početak perioda ekspozicije prvog frejma, ovo je problem. Pošto je kod komercijalnih termovizijskih kamera ne postoji način za eksterno okidanje ThermaCAM™ SC640 termovizijske kamere pomoću digitalnog signala u tačno određenom trenutku.

Ako ne postoji način da se ovo ostvari, otežano je tačno odrediti vreme maksimalnog kontrasta ΔT_{\max} iz eksperimentalnih podataka i vreme njegovog dostizanja t_{\max} . Greška određivanja vremena maksimalnog temperaturnog kontrasta t_{\max} eksperimentalnim putem je reda $2-3\tau$ vremenske konstante, odnosno oko 6 (ms). Za kameru SC640 vremenska konstanta je $\tau = 2$ (ms) koju smo dobili eksperimentalno pomoću čopera.

4.1.3 Metodologija snimanja termograma u eksperimentima PVT

Toplota, koju površina objekta zrači, prolazi kroz atmosferu, preko objektiva kamere stiže na detektor gde se prevodi u električni signal, koji se prikazuje na ekranu u boji. Snimak termičke slike je termograf. Kamera snima izlazno zračenje sa površine objekta i zračenje atmosfere. Izlazno zračenje koje potiče od objekta umanjeno je zbog slabljenja pri prolasku kroz atmosferu (koeficijent transmisije).

Eksperiment je izvršen na test uzorku (TP), izrađenom od aluminijumskih ploča sa defektima u obliku žljebova sa ravnim dnom. Širine defekata w su: 1, 1.5, 2, 2.5, 3 i 4 mm na dubinama 0.5, 1.0 i 1.5 mm (videti Slike 4.3, 4.4 i 4.5). Na površini uzorka naneta je prevlaka eloksiranjem aluminijumskog uzorka u crnoj boji, a površina je uniformno zagrevana korišćenjem fotografskog blica promenljivog intenziteta impulsa. Intenzitet impulsa opadne na oko 10% maksimalne vrednosti za 2 ms. Vremenska zavisnost impulsa je eksponencijalna tako da impuls ima beskonačno trajanje. Rastojanje fotografskog blica do uzoraka je 5 cm. Temperaturna raspodela na površini uzorka tokom procesa njenog hlađenja je posmatrana termovizijskom kamerom FLIR SC620 sa brzinom kadrova (eng. *frame rate*), 30 i 120Hz. Snimane su sekvence u cilju kasnije analize termograma u realnom vremenu.

Daljinsko upravljanje kamerom putem personalnog računara ipak je moguće ostvariti putem, u kameru ugrađenog komunikacionog, serijskog priključka. Potrebno je povezati komunikacioni port kamere i serijski port *desktop* ili prenosivog personalnog računara. Na taj način je hardverski potpuno konfigurisan računarski upravljani termovizijski sistem koji može biti upotrebljen u različitim sistemima za nadzor, upravljanje i preventivno održavanje industrijskih procesa. Na [Slici 4.10](#) prikazana je šema računarski upravljane termovizijske kamere SC620, [4, 5, 53-62].



Slika 4.10: Upravljanje snimanjem preko PC računara ili LT računara.

4.2 Merenje temperature pomoću IC zračenja

Termovizijske kamere predstavljaju najsavršenije i najsavremenije instrumente za beskontaktno merenje temperature preko praćenja IC zračenja. Termovizijske kamere predstavljaju dijagnostičke instrumente koje karakteriše veoma intenzivan tehnološki razvoj naročito u poslednjih desetak godina.

Savremeni sistem za IC termografiju sastoji se iz termografske kamere i PC računara sa odgovarajućim softverom. U samoj termovizijskoj kameri integrisani su sledeći osnovni funkcionalni podsistemi:

- optički sistem,
- detektor IC zračenja,
- elektronika za obradu signala sa detektora i njegovo pretvaranje u video signal; memorijski deo za pamćenje rezultata merenja i
- monitori za prikaz termovizijskih slika.

Materijali koji se koriste za izradu optičkih sočiva moraju biti propusni za IC zračenje u talasnom opsegu za koji je kamera konstruisana (germanijum, cink sulfid, cink selenid, silikon, safir, kvarc, magnezijum, itd.). Savremeni i napredni optički sistemi osim direktnog uticaja na kvalitet snimaka mogu obezbediti i opciju optičkog zumiranja objekta. Da bi se na osnovu nivoa IC zračenja, koje registruje detektor, izračunale odgovarajuće vrednosti temperature objekta potrebno je definisati niz faktora kao što su:

- karakteristike površine objekta, odnosno koeficijent emisije,
- temperatura okoline i eventualno relativna vlažnost vazduha i
- udaljenost kamere od posmatranog objekta.

Sve navedene faktore potrebno je uneti kao polazne parametre u interni softver kamere. Savremene kamere obično imaju i mogućnost da se na osnovu unete vrednosti

površinske temperature nekog objekta (izmereno kontaktim termometrima) izvrši i autokalibracija, odnosno određivanje koeficijenta emisije materijala od koga je objekat izrađen.

4.2.1 Osnovne karakteristike IC termografskih kamera

Može se zaključiti da što se tiče vrste detektora IC zračenja dominiraju nehladeni FPA detektori, i to prvenstveno oni zasnovani na mikrobolometarskoj tehnologiji. Generalno se može reći da kamere sa nehladenim detektorima imaju potpuni primat u grupi prenosnih instrumenata. Nehladieni IC detektori u fokusnoj ravni (FPA) su jeftiniji od nehladenih i imaju sve širu primenu.

4.2.2 Greška merenja temperature IC kamerom

Za određivanje temperature tela merodavna je samo energija koju telo emituje, a koja je jednaka njegovoj apsorbovanoj energiji. Uprkos prednostima beskontaktnog merenja temperature, postoji i niz faktora koji dovode do odstupanja između prave i izmerene temperature objekta.

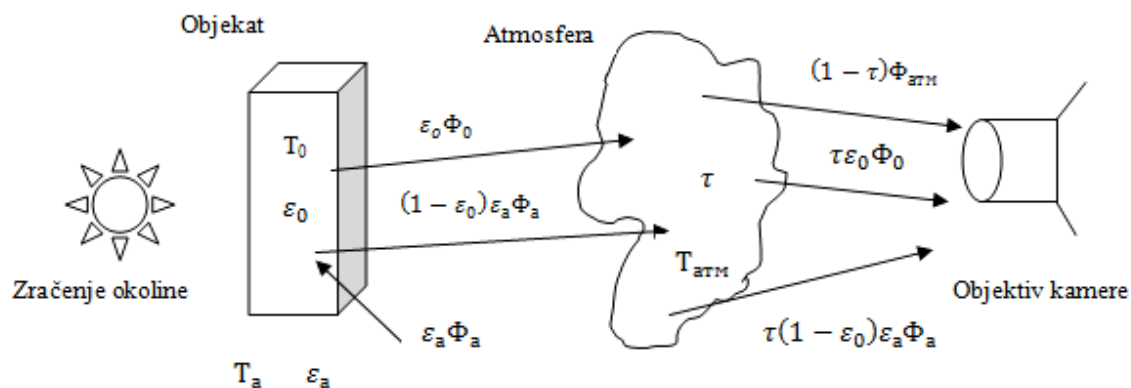
Na samom početku merenja važno je unapred odrediti koje su vrednosti greške prihvatljive prilikom merenja i raditi u okviru tih granica. Suviše termografa veruje da su podaci dobijeni kamerom tačni, i da se sve pojave mogu razumeti. Jedino se pažljivim razmatranjem svih promenljivih može smanjiti greška prilikom merenja. Tumačenje rezultata dobijenih termovizijskom kamerom zahteva iskustvo i teorijsko znanje.

Koliko god se trudili uticaje okoline ne možemo u potpunosti eliminisati [1]. Realna situacija i problemi koje možemo očekivati tokom merenja prikazani su na [Slici 4.11](#). Sledećom jednačinom prikazana je količina zračenja koja dolazi na detektor kamere:

$$\Phi_e = \epsilon_o \tau \Phi_o + \tau(1 - \epsilon_o) \epsilon_a \Phi_a + (1 - \tau) \Phi_{atm} \quad (4.1)$$

gde je:

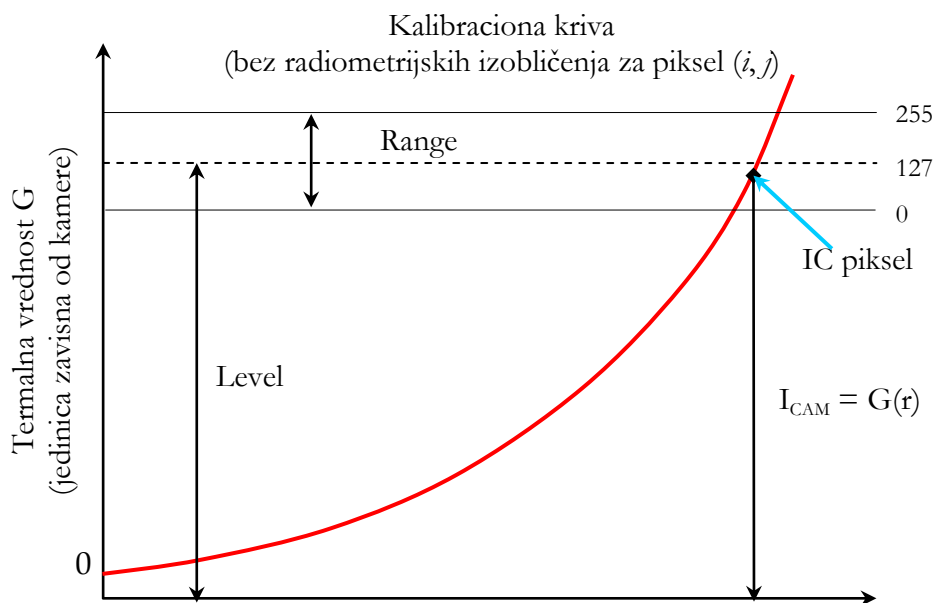
- Φ_e - zračenje koje beleži detektor kamere,
- Φ_o - zračenje objekta (zavisi od T_o i ϵ_o),
- Φ_a - zračenje okoline (zavisi od T_a i ϵ_a),
- Φ_{atm} - zračenje atmosfere (zavisi od T_{atm} i τ),
- ϵ_o - emisivnost posmatranog objekta,
- ϵ_a - emisivnost objekata okoline,
- τ - transmisija atmosfere,
- T_o - temperatura posmatranog objekta,
- T_a - temperatura okoline,
- T_{atm} - temperatura atmosfere.



Slika 4.11: Šematski prikaz opšte termografske merne situacije: 1) Okolina, 2) Objekat, 3) Atmosfera i 4) Kamera.

Izlazno zračenje sa površine objekta umanjeno je zbog slabljenja pri prolasku kroz atmosferu, što je pokazano sa $\varepsilon_0 \tau \Phi_0$. Treba naglasiti da je uticaj okoline veći što je emisivnost objekta koji posmatramo manja. U prethodnoj formuli zanemareni su uticaji optičkog sistema kamere [2]. Njih treba uzeti u obzir kao i uticaj drugih komponenti od kojih je kamera napravljena. Odnosno, treba razmatrati putanju zračenja od objektiva do detektora kamere. I detektor može da unosi grešku u merenju. Deo zračenja se reflektuje od njegove površine na optički deo sistema a zatim ponovo pada na detektor [63-78].

Signali detektora (termički ekvivalent) je nelinearna funkcija temperature, a ta zavisnost određuje se kalibracijom IC senzora. Fluks IC zračenja na ulaznoj aperturi senzora usmerava se na detektor koji ga transformiše u električni signal koji je srazmeran fluksu koji prima detektor senzora.



Slika 4.12: Kalibraciona kriva IC kamere i postavljanje nivoa i opsega za temperaturno izračunavanje (primer jednog 8-bitnog sistem)

Električni signal detektora senzora zavisi od fluksa primljenog zračenja, odzivnosti detektora i pojačanja elektronskog lanca za obradu signala. Fluks primljenog zračenja je funkcija temperature, pa je amplituda električnog signala funkcija temperature objekta, tako da se može definisati tzv. termički ekvivalent detektora koji određuje prenosnu funkciju mernog uređaja:

$$I_{CAM} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (4.2)$$

Termički ekvivalent koji odgovara ukupnom fluksu koji prima detektor se dobija integraljenjem (2) i iznosi:

$$I_{CAM} = \varepsilon_o \tau_{atm} I_o + \tau_{atm} (1 - \varepsilon_o) I_a + (1 - \tau_{atm}) I_{atm} \quad (4.3)$$

gde su:

I_{CAM} – termički ekvivalent fluksa zračenja na ulazu aperture senzora (termički ekvivalent ukupnog fluksa zračenja koji prima IC senzor),

$R(\lambda)$ – spektralna odzivnost detektora,

(λ_1, λ_2) – spektralni opseg odzivnosti IC senzora,

I_o – termički ekvivalent fluksa zračenja objekta na temperaturi T_o ,

I_a – termički ekvivalent fluksa zračenja okoline na temperaturi T_a i

I_{atm} – termički ekvivalent fluksa zračenja atmosfere na temperaturi T_{atm} ,

4.3 Merna nesigurnost

Merna nesigurnost je pozitivna veličina i pripisuje se celokupnom mernom procesu, odnosno kameri koja se primenjuje. Na primer, za termovizijsku kameru Greška kojom se meri termički ekvivalent ukupnog zračenja I_{CAM} je, ustvari, greška koju daju proizvođači predstavlja instrumentalnu grešku merenja ukupnog termičkog ekvivalenta zračenja pri kalibraciji IC mernog sistema pomoću crnog tela.

Prema podacima proizvođača IC sistema FLIR SC620, može se smatrati da iznosi 0.02, odnosno 2%. Iako to proizvođači navode kao grešku merenja temperature, to jeste greška merenja temperature samo ako se meri temperatura crnog tela ($\varepsilon_o = 1$), i u realnim uslovima se ne može smatrati greškom određivanja temperature, jer realna tela nisu crna tela (emisivnost im je po pravilu manja od jedan). Može se lako pokazati da se greška određivanja termičkog ekvivalenta ukupnog zračenja I_{CAM} svodi na grešku određivanja termičkog ekvivalenta zračenja objekta I_o pri uslovima $\tau = 1$, $\varepsilon_a = 1$ i $\varepsilon_o = 1$. To je, u stvari, instrumentalna greška sistema i može se smanjiti boljom konstrukcijom sistema, što se ovde neće detaljnije analizirati.

4.3.1 Merna oprema i metode merenja

Sa povećanjem upotrebe termovizijskih kamera za apsolutna merenja temperature, raste potreba za njihovom kalibracijom. U radovima [3,4], koji se bave mernom nesigurnošću (MN) za odgovarajuća temperaturna merenja definisani su parametri termovizijskih kamera koji utiču na MN. Ovde je predložena procedura kalibracije zasnovana na ispitivanju parametara za komercijalne termovizijske kamere sa detektorom u obliku fokalne matrice nehladenih mikrobolometara FPA u temperaturnom opsegu od -20 (°C) do 1500 (°C). Tehničke specifikacije termovizijskih kamera su date u [Tabeli 4.4](#).

Tabela 4.4: Tehničke specifikacije termovizijskih kamera.

Termovizijska	SC65	P640	SC640	SC620
---------------	------	------	-------	-------

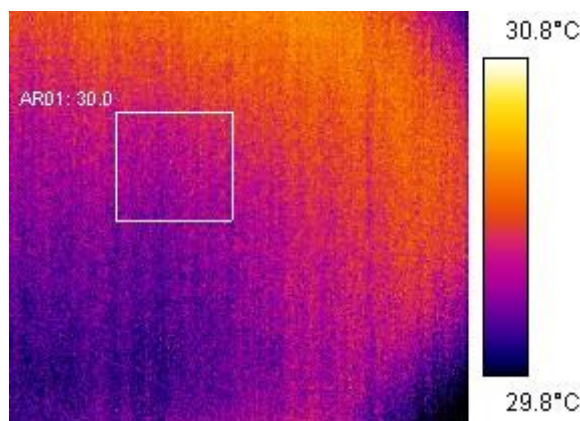
kamera				
Detektor rezolucije	320×240	640×480	640×480	640×480
NETD	80 mK	65 mK	65 mK	45 mK
Maksimalna dozvoljena greška	± 2 °C ili ± 2 %	± 2 °C ili ± 2 %	± 2 °C ili ± 2 %	± 2 °C ili ± 2 %

Greška merenja koju daje proizvođač kao grešku merenja temperature ustvari predstavlja instrumentalnu grešku merenja ukupnog termičkog ekvivalenta fluksa IC zračenja i ne može se smatrati greškom merenja temperature, već samo jednom od ulaznih veličina u model za proračun standardne relativne greške merenja dat je izrazom (4.4). Na primer ta greška za termovizijsku kameru FLIR SC620, prema navodima proizvođača, iznosi ± 2%. Izvedena funkcija greške omogućuje proračun greške, analizu uticajnih faktora i modeliranje uslova merenja radi smanjenja greške merenja, odnosno postizanja odgovarajuće tačnosti merenja. Greška određivanja temperature površine materijala primenom IC senzora može se smanjiti smanjivanjem instrumentalnih grešaka merenja direktno merenih veličina, ali i izborom pogodnih uslova merenja koji dovode do eliminacije uticaja, odnosno redukcije pojedinih veličina iz uopštenog modela za određivanje temperature.

$$e_{T_o} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{T_o} \frac{\partial T_o}{\partial x_j} e_{x_j} \right)^2} \quad (4.4)$$

Izračunavanje standardnog odstupanja merenja površine crnog tela poznate emisivnosti, izvršeno je u laboratoriji (za najčešće korišćenu kameru u eksperimentima FLIR SC620), za precizno kontrolisane temperaturne uslove ambijenta.

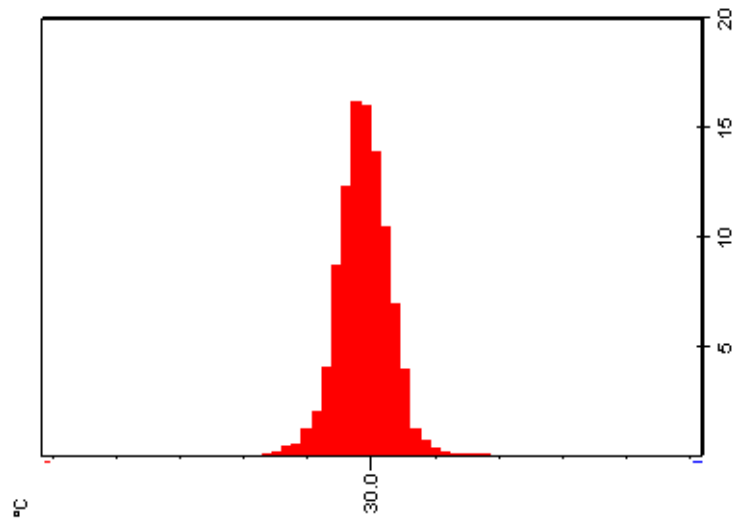
Standardno odstupanje σ za normalnu Gausovu raspodelu (beli šum), na osnovu merenja temperature u oblasti AR01 (dimenzija 63 × 63 piksela, ukupno 3969 mernih tačaka) na površini crnog tela iznosi $\sigma = 0.039579$ (°C) što je približno jednako vrednosti NETD, manje od 40 (mK) po specifikaciji za kameru SC620. Srednja vrednost iznosi $T_{sr} = 30.00985$ (°C).



Slika 4.13: Oblasti AR01 na površini crnog tela iz koje su uzete vrednosti temperatura IC piksela za određivanje standardnog odstupanja Gausove normalne raspodele.

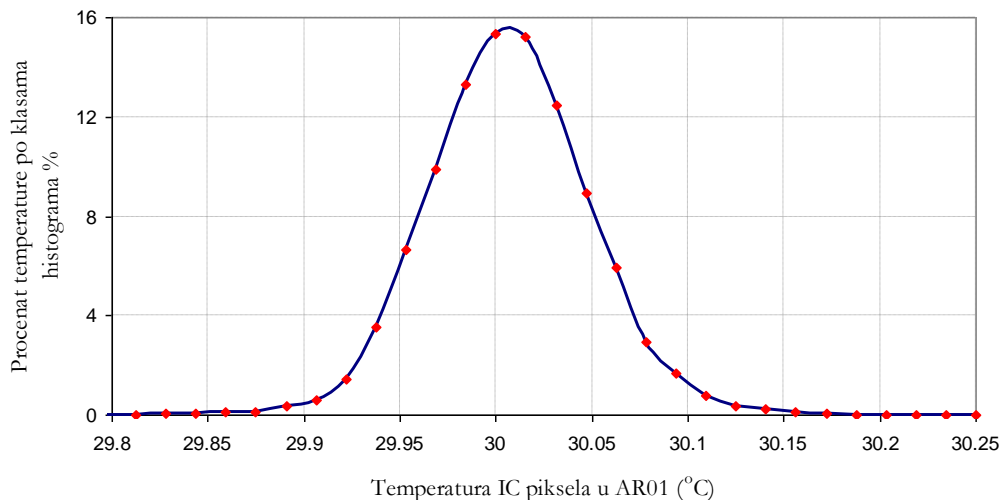
IC senzor SC620 ima karakteristike 2D FPA detektora sa veličinom IC slike od 640×480 piksela za 30 Hz frekvenciju slika (opciono 640×120 za 120 Hz), šum, vremenske i prostorne osobine IC slike. Za komercijalne IC sisteme kakav je SC620 može se za potrebe teze izmeriti standardno odstupanje σ . Izmerene temperature će se nalaziti u $2\sigma = 2 \cdot$

0.039579 (°C) opsegu, tj. 95% izmerenih temperatura u oblasti AR01 se nalazi u opsegu $T_{sr} \pm \sigma = 30.00985 \pm 0.039579$ (°C).



Slika 4.14: Histogram merenja temperature IC piksela u oblasti AR01 za klasu 64.

Matrica detektora ima na stotine hiljada detektora u žižnoj ravni. Metodi određivanja prostorne rezolucije i jasnoće slike, za FPA detektore se bave parametrima prostorne rezolucije za današnje sisteme u fokusnoj ravni.



Slika 4.15: Procentualna zastupljenost izmerenih temperature po klasama histograma: temperaturni opseg jedne klase je 0.0156 (°C) u opsegu izmerenih temperature od 29.75 do 30.73 (°C). Histogram merenja temperature IC piksela u oblasti AR01 za klasu 64.

Termovizijska kamera komercijalnog tipa je odličan ručni IC sistem za analizu scene i merenje temperature predmeta u njoj. Izrađen je od 640×480 LW nehladene mikrobolometarske FPA. Nastanak IC slika kod ove kamere karakteriše činjenica da svaki elementarni senzor trajno gleda površinu ciljane zone. Trenutno vidno polje (IFOV) stoga zauzima posebno mesto pošto je direktno povezana sa najmanjom površinom koju je moguće detektovati – pikselom. Idealan slučaj je da su površine slika objekta i piksel iste veličine isavršeno su centrirane poravnate. Na pikselu I je odziv 100%. Ustvari to uopšte nije realno. Urealnom slučaju piksel i objekat su iste veličine ali netačno poravnati (centrirani). Na pikselu I odziv je ispod 100% i na pikselu $I-1$ je ispod 100%.

Mali bočni pomeraj i slika objekta mogu da se prošire na 2 piksela, pri čemu ni jedan od njih ne daje 100%. Signal ustvari zavisi od lošeg centriranja između objekta i termovizijske kamere. Stoga je nemoguće uopštiti ideju da tačno merenje može biti postignuto na objektu čija je slika veličine piksela. To važi ali ne u svakom slučaju. Najmanja teorijska površina koja garantuje potpuno prekrivanje piksela je reda 2×2 piksela. To zavisi od faktora popunjenosti koji može biti različit za vertikalni i horizontalni pravac. Sa praktične tačke gledišta tačku 2×2 piksela je opet teško razmatrati. Pretpostavka o savršeno pravougaonom ili kvadratnom objektu, savršeno viženom kroz optički sistem nije realna. Uvek su prisutne aberacije, distorzija, itd.

Rezolucija efektivnog merenja zavisi od kvaliteta koji proizvođač daje projektovanju kamere i njenog optičkog sistema. Bez obzira na primenu, najbolja FPA kamera za merenje:

- Ima najmanje IFOV,
- Najmanje minimalno radno rastojanje i
- I najmanju moguću mernu tačku. U testiranim uzorcima FLIR SC620 za postizanje 95% modulacije bili su potrebni samo 3×3 IFOV, Otuda kod Wiener filtra smo koristili najčešće usrednjavanje površine 3×3 IC piksela.

Pri korišćenju funkcije analize tačke FLIR kamere, merenje je tačno dok ciljani objekat prekriva centar cilja TP. Prirodno pokretanje operatera dok se kamera ručno drži je eliminisana fiksiranjem kamere na stativ.

Šum se može redukovati primenom različitih metoda filtriranja. U ovoj tezi za snimljene termograme primenjeno filtriranje usrednjavanjem i Wiener filter.

Šum slučajne raspodele (fotoelektrični, termički, od senzora) i izraženog intenziteta (*salt and paper*) veoma uspešno se uklanja zamenom piksela degradiranog šumom, sa srednjom vrednošću okolnih piksela. Ovaj filter vrlo efikasno eliminiše visokofrekventni šum, međutim zamagljuje sliku, posebno na ivicama objekta. Na [Slici E.1](#) data je grafički ilustracija dvodimenzionalnog filtriranja usrednjavanjem. Mada su teorijski rezultati oskudni u praksi se vrlo dobro potvrdilo da Wiener filter veoma pogodan za uklanjanje impulsnog šuma (*salt and paper*) tj. Šuma čija amplituda je slučajna veličina i za periodični šum, ada pri tome ne menja ivice i druge značajne visokofrekventne pojave na slici. Wiener filter dimenzije $[m \times n]$ (neparni brojevi), je slika $[Y_{ij}]$, gde je Y_{ij} srednja vrednost svih elemenata u prozoru $m \times n$. Veličinom prozora je određena i veličina impulsnog šuma koja se može otkloniti.

Za predstavljanje termograma zbog specifičnosti informacija koje treba memorisati, uveden je format digitalna slika. Digitalne slike iz termovizijskih kamera različitih proizvođača mogu biti različitih formata ali im je ista uloga da sačuvaju informaciju o temperaturi za svaku tačku na termogramu. IC slike se pamte u osnovno obliku, tj., svaka tačka termograma je opisana npr., 16-bitnim brojem koji je jednak vrednosti apsolutne temperature, a same su u rezolucijama do 640×480 tačaka.

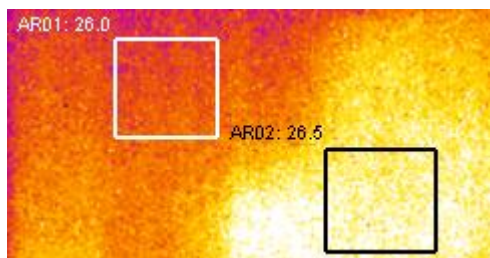
Da bi termogram bio prikazan na ekranu računara potrebno je 65536 boja. Kako većina današnjih računara podržava 256 nivoa sjajnosti za svaku od tri primarne boje, bilo je potrebno pronaći adekvatno preslikavanje vrednosti temperature u vrednost boje. Vrší se konverzija temperature u paletu boja.

Termogram može prikazati najviše $2^{16} = 65536$ različitih temperatura, Danas je u upotrebi desetak paleta boja za prikaz termograma na računaru. Najčešće korišćena paleta boja u ovom radu je Iron-10, tako da viša temperatura predstavlja svetlija boja. Ova paleta omogućava 10 ekvidistantnih temperatura (prva boja označava najnižu, a poslednja najvišu temperaturu), a ostale se mogu izračunati interpolacijom.

Programski paket MATLAB® poseduje obiman skup funkcija za obradu slike, od učitavanja slika u memoriju računara, preko jednostavnih prostornih transformacija, do obrade u frekvencijskom domenu (filtriranje, isticanje ivica) [22]) Termogram na Slici 4.7, koji na izgled predstavlja ravnomerno zagrejanu površinu crnog tela, dobijen je infracrvenom kamerom SC620 [22] i sadrži 640×480 tačaka. Rezolucija kamere je bolja od 40 (mK), tačnost je bolja od ± 2 (°C). Termo slika je konvertovana u .jpg format pomoću palete Iron-10, u crno belu sliku sa nivoom sivog.

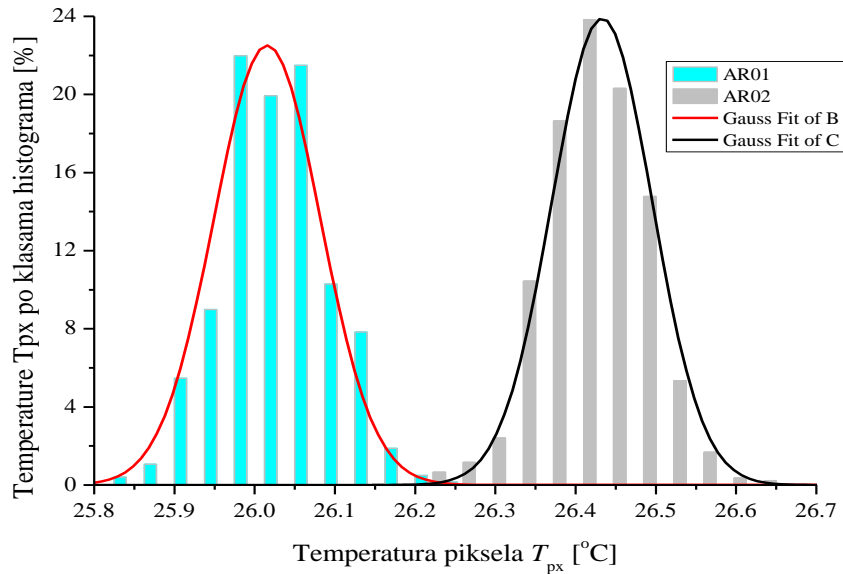
Temperaturni kontrast zavisi od dubine i širine defekta u zavisnosti od promenljivih parametara materijala i izvora, što predstavlja osnovnu veličinu u karakterizaciji materijala sa defektima i oštećenjima impulsnom video termografijom. Na referentnoj hladnoj ploči se analizira uticaj parazitnih IC zračenja okoline i zašumljenost korisnog signala. Smanjenje šuma temperature piksela vrši se metodom eliminacije viših harmonika filtriranjem nultim harmonikom, usrednjavanjem i primenom Wiener-ovog filtra za filtriranje IC slika.

Procena rezolucije termovizijske kamere za merenje temperature piksela duž centralne linije LI01 urađena je na osnovu temperature 5000 piksela za izabrane oblasti AR01 i AR02 na površini hladne test pločice. Trajanje jednog merenja je 8,33 (ms) za jedan snimljen kadar. Usled uticaja spoljašnjeg parazitnog toplotnog zračenja greška rezultata je oko 0,41735 (°C). Naime, u toku 2,383 (ms) (286 snimljenih kadrova u sekvenci), koliko traje celokupno merenje, promene položaja spoljašnjeg toplotnog zračenja su zanemarljive. Na Slici 4.17 je prikazani su histogrami dobijen statističkom obradom rezultata za dve oblasti AR01 i AR02 na IC slici. Anvelope histograma su simetrične, što pokazuje da su izmerene vrednosti raspodeljuju po normalnim zakonima statistike, tačnije Gausovom zakonu slučajnih grešaka. Standardne devijacije rezultata iznose 0.06255 (°C) i 0,06633 (°C), za obadve posmatrane oblasti na IC slici. Njihova razlika od 3.78 (mK) što pokazuje da su odstupanja standardne devijacije ispod vrednosti NETD za korišćenu kameru FLIR SC 620.



Slika 4.16: Oblasti na površini hladne test ploče za određivanje oblika histograma.

Na Slici 4.16 prikazan je termovizijski snimak (termogram) test ploče, dobijen kamerom FLIR SC 620. Na slici se mogu uočiti oznaka dve oblasti AR01 i AR02, pored kvadrata oznake prikazane su njihove srednje temperatura.



Slika 4.17: Statističko rasipanje rezultata.

4.4 Eksperimentalne procedure i rezultati

Zavisnost temperature u funkciji vremena dobijena je za zone površine iznad defekta i iznad zdravog materijala. Iz ovih podataka standardni termalni kontrast $\Delta T(t)$ se proračunava, definisan na sledeći način:

$$\Delta T(t) = \frac{T_{def}(t) - T_{def}(t_0)}{T_{bdef}(t) - T_{bdef}(t_0)}, \quad (4.5)$$

gde je T_{def} temperatura površine iznad defekta, T_{bdef} temperatura površine iznad zdravog materijala, t_0 vreme pre zagrevanja i t tekuće vreme procesa.

Na Slici 4.2 je prikazan vremenski razvoj standardnog temperaturnog kontrasta, za defekt širine $w = 4$ mm, na raznim dubinama defekta. Na njoj se vidi da zavisnost ima maksimum. To je karakteristika da standardni temperaturni kontrast $\Delta T(t)$ ima maksimum koji zavisi od dubine defekta. Manje dubine defekta pliciji defekti odgovaraju kraćem vremenu dostizanja maksimalne vrednosti $\Delta T(t)$.

Vremenska zavisnost dubine defekta d u funkciji maksimuma termalnog kontrasta je prikazana na Slici 4.3, Na njoj se može videti da za svaku širinu defekta ova zavisnost je prava linija sa istim nagibom. Određivanje dubine defekta je moguće samo kada je širina defekta poznata. Ovaj parametar može biti procenjen za površinsku raspodelu vremenskog izvoda temperature.

4.4.1 Metodologija prikupljanja eksperimentalnih podataka

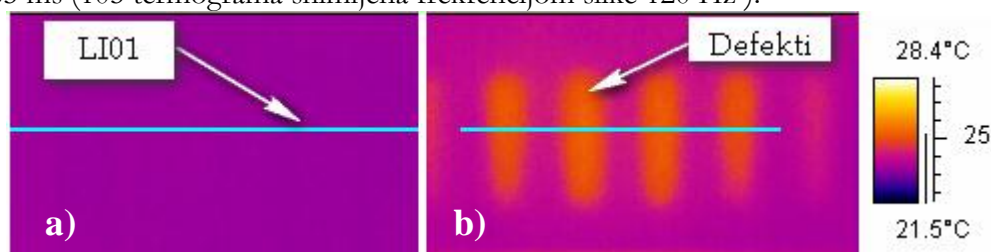
Dvodimenzionalni model nestacionarnog provođenja toplote kroz uzorak u obliku planparalelne ploče sa defektom u obliku žljeba sa ravnim dnom je opisan u poglavlju 3, a njegova numerička rešenja za temperaturni odziv sa prednje strane uzorka su data u obliku vremenske zavisnosti T_2 i T_1 kao i vremenska zavisnost razlike $T_2 - T_1$ u slučaju uniformnog grejanja svetlosnim impulsom.

U cilju dobijanja vremenskog razvoja promene temperature izabranog IC piksela na centralnoj liniji SP01 na sredini odraza defekta na površini termograma (IC slike), označene

kao $T2(t_f)$. Određivanje stvarne sredine oblasti iznad defekta je otežano, i postavljanje spota SP01, na poziciji merenja temperature IC piksela je poziciono sa greškom ± 1 piksel.

Kao primer, dobijanja vremenskog razvoja $T2$ i $T1$ dati su rezultati izvršene analize snimljene sekvence SEQ0014. SEQ(325), koja je snimljena komercijalnom termovizijskom kamerom FLIR SC620 u laboratoriji TOC-a 07. 03 2012. Širina slike je $W_{px} = 640$ px (eng. *Image width*) i (eng. *Image frequency*) frekvencija slike $f_f = 120$ Hz. Snimljena sekvenca SEQ0014. SEQ(325) sadrži ukupno 325 IC slika – termograma (eng. *frame*). Na slici 1. prikazan je termogram hladne test ploče, SEQ(220). To je referentni termogram i to je trenutak početka snimanja vremenskog profila temperatura $T2$ i $T1$. Na površini test ploče, postavljena je centralna linija LI01 IC piksela normalno na defekte za četiri “linijska para“ t.j. preko 4 defekta.

Vremenski razvoj se prati od SEQ(230) do SEQ(325) što vremenski odgovara 874.9965 ms (105 termograma snimljena frekvencijom slike 120 Hz).



Slika 4.18: Termogram površine test uzorka: a) Početni termogram za analizu SEQ(220) i b) Temperaturni odraz niza od 6 defekta na ozračenoj površini test uzorka, termogram SEQ(233).



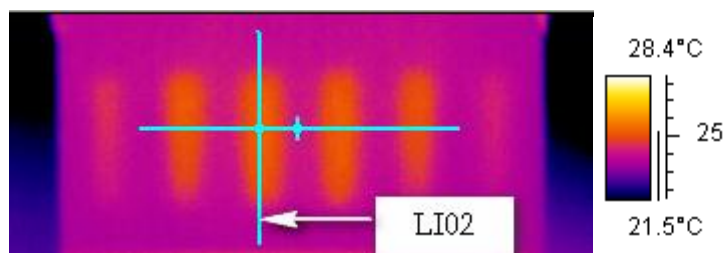
Slika 4.19: Neravnomerno ozračena površina test uzorka, termogram SEQ(230).

Uzimanje rezultata počinje od termograma SEQ(228) do SEQ(230) za temperaturu IC piksela duž centralne linije LI01, za kasniju analizu temperaturnog kontrasta. Rezultati uzeti za 12 termograma pre i posle ozračavanja se memorišu u excel-u. Temperatura IC piksela duž centralne linije LI01, predstavlja temperaturni profil za svaki od termograma. Temperaturni profil dobijen na ovaj način pokazuje jako zašumljen signal. Smanjenje šuma temperature IC piksela se može vršiti na više načina, jednostavnijim konvencionalnim metodama sa više ili manje grešaka ili primenom Wiener-ovog filtra. Najgrublja analiza temperaturnog kontrasta je uzimanje temperature IC piksela na sredini defektne oblasti i na sredini oblasti između njih.

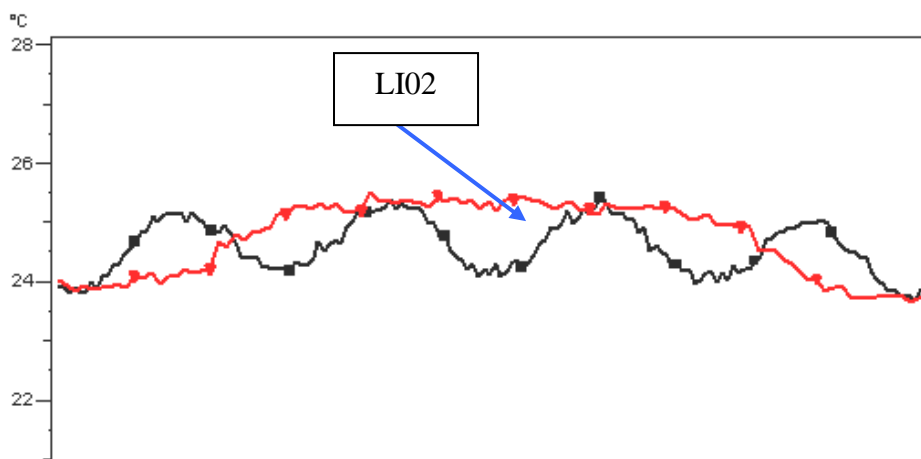
Za dosta grublju analizu može se uvesti filtriranje temperaturnog kontrasta ΔT (razlika $T2_{max}$ i $T1_{min}$) određivanjem $T2_{max}$ kao srednje vrednosti temperature IC piksela uzete sa sredine temperaturnog odraza za 6 defekta (npr. TP 13) i $T1_{min}$ kao srednja vrednost 5 temperatura IC piksela uzete sa sredine između defekta. Konvencionalne metode smanjena šuma- filtriranja termograma su: metod eliminacije viših harmonika filtriranja nultim harmonikom. Rezultati temperature IC piksela duž centralne linije se u programskom

paketu Origin Pro 8. fituju nelinearnom sinusnom funkcijom za sve posmatrane termograme uzimanjem konstantne periode i početne faze koje zavise od širine defekta (broj piksela duž centralne linije LI01).

Smanjenje šuma temperature IC piksela za filtriranje termograma može se vršiti usrednjavanjem po vertikali nalaženjem srednje vrednosti duž vertikalne linije IC piksela normalne na centralnu liniju LI01, kao na slici 4. Temperaturni profil filtriran primenom ove metode pokazuje značajno glatku krivu u odnosu na temperaturni profil duž centralne linije LI01.

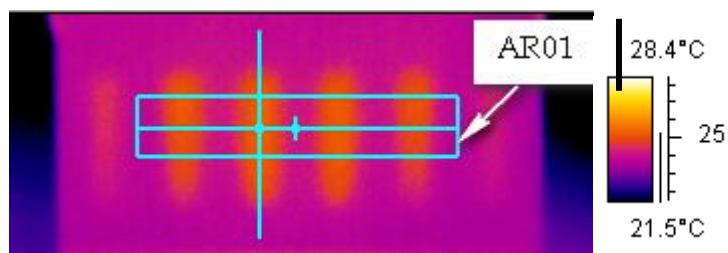


Slika 4.20: Vertikalna linija IC piksela za termogram SEQ(233).

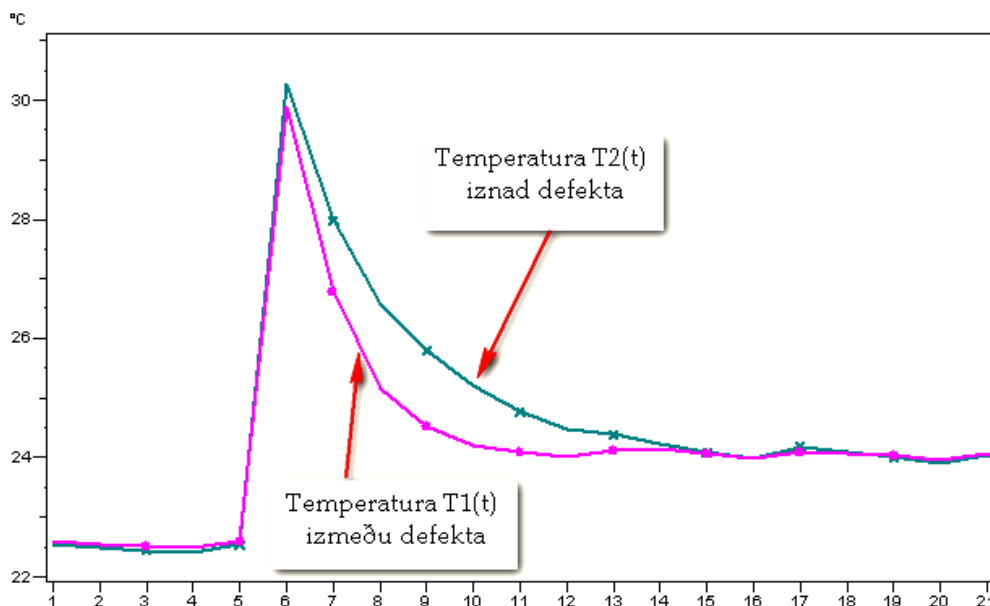


Slika 4.21: Temperaturni profil:

- a) Promena temperature IC piksela duž vertikalne linije LI02 (crvena linija) i
- b) Promena temperature IC piksela duž LI01 normalne na defekte (crna linija)



Slika 4.22: Oblast AR01 IC piksela za termogram SEQ(233).

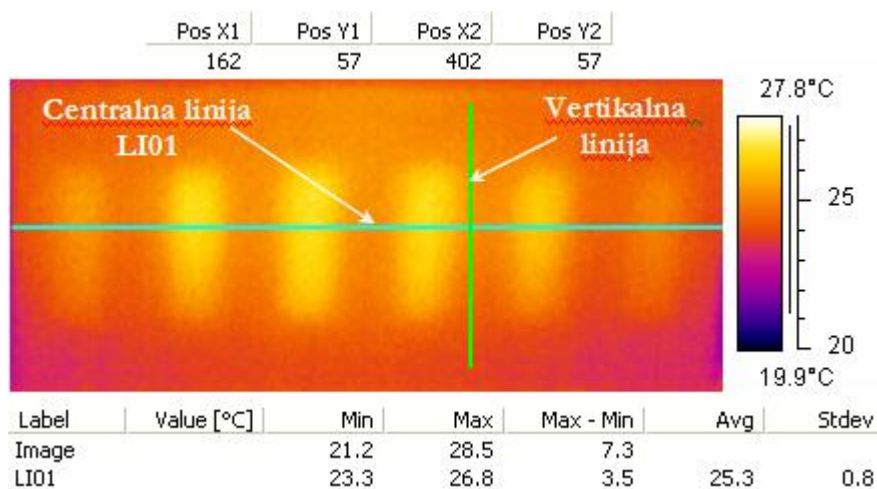


Slika 4.23: Temperaturni razvoj $T1(t)$ i $T2(t)$, za termograme od SEQ.847(187) do SEQ.847(207).

4.4.2 Analiza podataka u impulsnoj videtermografiji

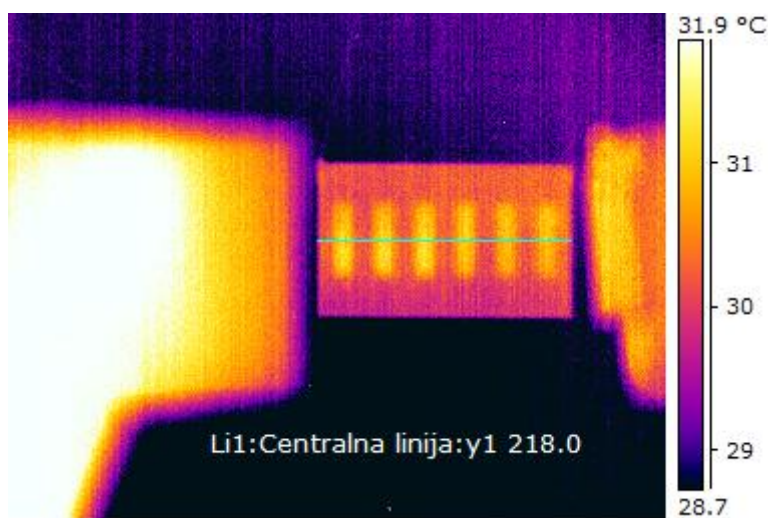
Kada su dobijeni eksperimentalni podaci iz termografskih merenja primenom metode impulsne videtermografije kako je prethodno opisano, sprovodi se odgovarajuća analiza podataka koja može da omogući karakterizaciju defekata. Ovo uključuje generisanje termograma iz snimljenih sekvenci što treba da nam omogući kvantitativnu karakterizaciju defekata koristeći poznatu inverznu proceduru [23, 79-91].

Klasičan prilaz često upotrebljavan u PVT analizi podataka usvojen je u ovoj tezi. Apsolutni termalni contrast definisan u poglavlju 2.1 je usvojen za cilj kvantitativne analize od interesa u ovoj tezi. Da bi odredili njegovu vremensku zavisnost, pad temperature krive generisani su termogrami iz snimljenih sekvenci.



Slika 4.24: Primer termogram sa višom temperaturom: Podaci se uzimaju sa centralne linije LI01 normalna na defekte i vertikalna linija paralelne na taj pravac.

Na [Slici 2.6](#) prikazan je prvi termogram sa višom temperaturom u snimljenoj sekvenci, termovizijskom kamerom SC620 (120 Hz frekvencija generisanja IC slika). U cilju dobijanja promene temperaturnog kontrasta u vremenu iz temperaturnog profila duž centralne linije LI01, prethodno se izvrši pozicioniranje linije LI01 po sredini aluminijumske ploče normalno na pravac defekta-žljeba. Na [Slici 2.6](#) iznad termograma date su pozicije centralne linije LI01 u prozoru IC slike-termograma. Vertikalna linija zauzima po potrebi neku od pozicija u intervalu od početka centralne linije $X1 = 162$ do $X2 = 402$ piksela. Desno od termograma prikazana je temperaturna skala temperatura IC piksela u termogramu. Ispod termograma prikazane su karakteristične temperature IC slike i IC piksela duž centralne LI01: minimalne i maksimalne temperature i njihova razlika. Za podatke temperature IC piksela duž linije LI01, analizom termograma u softverskom paketu ThermaCAM Researcher Pro 2.9 može se dobiti srednja vrednost temperatura Avg i $Stdev$ standardno odstupanje od srednje vrednosti.



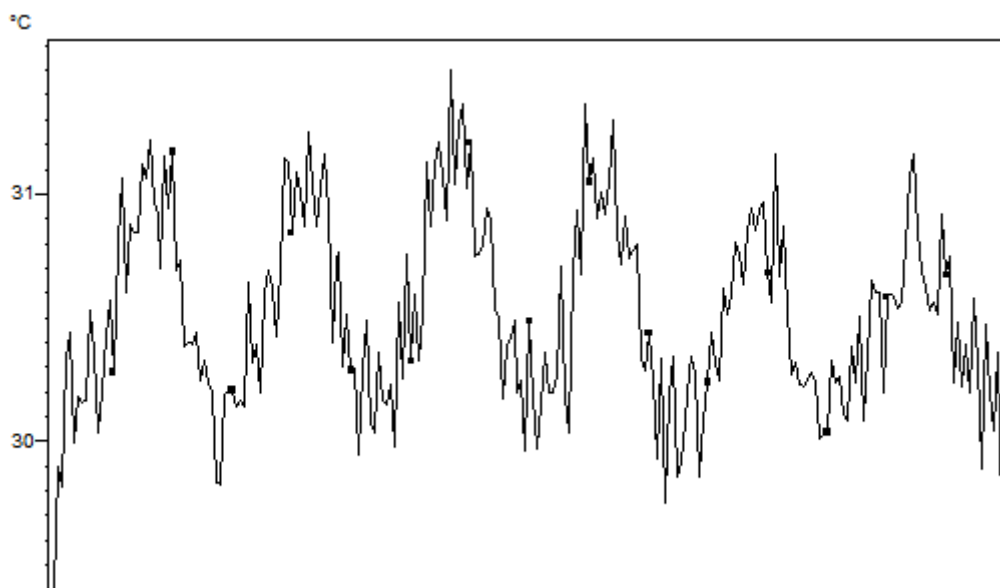
Slika 4.25: Primer trećeg termograma od početka sekvence: Snimljena sekvenca NEW0040.SEQ. Podaci se uzimaju sa centralne linije Li1 normalna na defekte.

Na [Slici 4.23](#) prikazan je termogram dobijen termovizijskom kamerom SC 640 (30 Hz frekvencija generisanja IC slika). Dimenzija IC slike je 640 piksela po horizontali i 480 piksela po vertikali. Temperaturni profil predstavlja skup temperatura duž linije Li1.

Tabela 4.5: Parametri Centralne linije, njena pozicija u IC slici i karakteristične temperature.

Parametri Centralne linije LI01	Vrednost
IC slika 2 frejma snimljene sekvence	NEW0040.SEQ
Tip termovizijske kamere ThermaCAM	SC640
LI01:Centralna linija: Maksimalna temperatura T_{max}	31.5 (°C)
LI01:Centralna linija: Minimalna temperatura T_{min}	29.2 (°C)
LI01:Centralna linija: Razlika $\Delta T = T_{max} - T_{min}$	2.3 (°C)
LI01:Centralna linija: Emisivnost TP	0.95
LI01:Centralna linija: Rastojanje TP- kamera	35.0 (cm)
LI01:Centralna linija: Leva X-Pozicija	311
LI01:Centralna linija: Leva Y-Pozicija	218
LI01:Centralna linija: Desna X-Pozicija	548
LI01:Centralna linija: Desna Y-Pozicija	218

Duž centralne linije koja je na poziciji 218-og piksela odozgo na [Slici 4.23](#), generisan je grafik promene temperature duž centralne linije specificirane u [Tabeli 4.5](#).

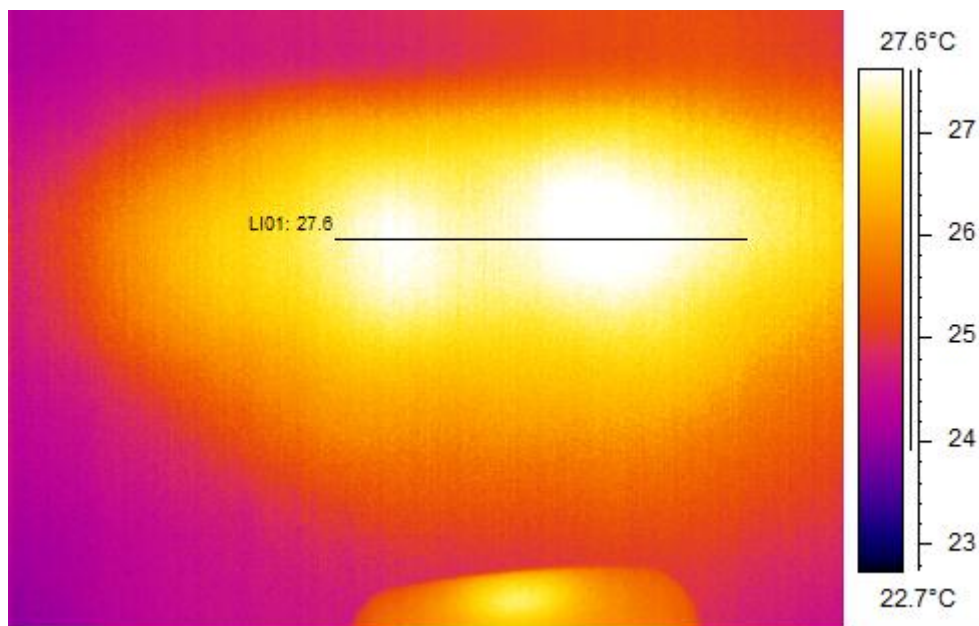


Slika 4.26: Temperaturni profil duž linije specificirane u [Tabeli 4.5](#) trećeg termograma od početka snimljene sekvencu NEW0040.SEQ.

Kada pomoću prethodno pozicionirane centralne linije LI01, generišemo temperaturni profil (podatak u analizi termograma dobijenik PVT) iz koga želimo da dobijemo temperaturni kontrast $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ susrećemo se sa problemom jako zašumljenog signala. Iz ovako zašumljenog signala teko je jednostavno odrediti centralni IC piksel na sredini oblasti iznad defekta, odnosno maksimalnu temperaturu T_{\max} . Takođe isti problem je i kod određivanja T_{\min} za centralni piksel oblasti između dva defekta. Na [Slici 4.26](#) je prikazan izvorni temperaturni profil duž centralne linije Li01, koji prikazuje jako zašumljn signal i razliku između dva susedna piksela i do 0.5 (°C). Precizno određivanje T_{\max} i T_{\min} maksimalne i minimalne temperature temperaturnog profila u granicama merne nesigurnosti je uslov najboljeg fita eksperimentalnih podataka temperaturnog kontrasta ΔT sa teorijskom krivom dobijenom iz numeričke simulacije. Kada centar oblasti iznad defekta bude određen, odgovarajući piksel oblasti bez defekta (između dva defekta) se odredi na sredini oblasti između dva centra defektne oblasti.

Na [Slici 4.26](#) prikazana je zašumljena kriva temperaturnog profila, iz koje je teško odrediti tačno temperaturni kontrast za svaki termogram u snimljenoj sekvenci.

Pored velike razlike u temperaturi dva susedna IC piksela na termogramu što se manifestuje u velikoj zašumljivosti temperaturnog profila, ograničenje uspešnosti kvantitativne analize podataka dobijenih metodom PVT za NDT materijala aluminijuma predstavlja i neuniformno zagrevanje površine.

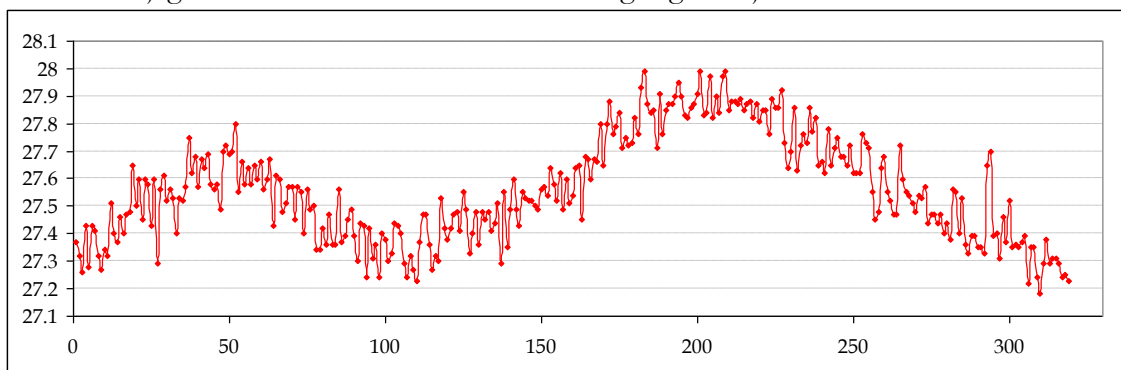


Slika 4.27: Prvi primer neuniformnog zagrevanja.

Termogram prikazan na [Slici 4.27](#) pokazuje da fotografski blic upotrebljen kao impulsni svetlosni izvor zagreva neuniformno ravnu površinu koja je obasjana svetlosnim impulsom. Na slici se vide dve površine kružnog oblika različite po veličini u centru termograma, koje su najviše zagrejane. Neuniformnost površine ravne drvene ploče ofarbane u crno, je očigledna. Pošto je njena površina višestruko veća od površine aluminijumske ploče (50 mm × 30 mm) od koje je izrađen test uzorak. Prostorna raspodela svetlosnog fluksa fotografskog blica YASHICA CS-250AF (korišćen kao impulsni izvor toplote), sa odabranim parametrom 28, kada radi u AUTO režimu.

Za svrhu PVT eksperimenta u ovoj tezi upotrebljavana su dva komercijalna fotografska blica kao pobudni izvor impulsne svetlosti čiji je oblik snimljen osciloskopom. Slika A.1 u dodatku A, pokazuje vremenski oblik svetlosnog impulsa sa izmerenim specifišnim vrednostima intenziteta u 25 karakterističnim tačkama.

Optimizacijom položaja fotografskog blica u odnosu na rastojenje do test ploče može se donekle stvoriti preduslov homogenog zagrevanja njene površine. Pozicionira se test uzorak da njegov centar bude u sredini intenzivnog zagrevanja.



Slika 4.28: Temperaturni profil duž linije LI01 po sredini dve sjajne oblasti sa [Slike 4.27](#): Na ordinati su vrednosti temperature u (°C) a na apscisi broj piksela N_{pix} od 1 do 319 piksela.

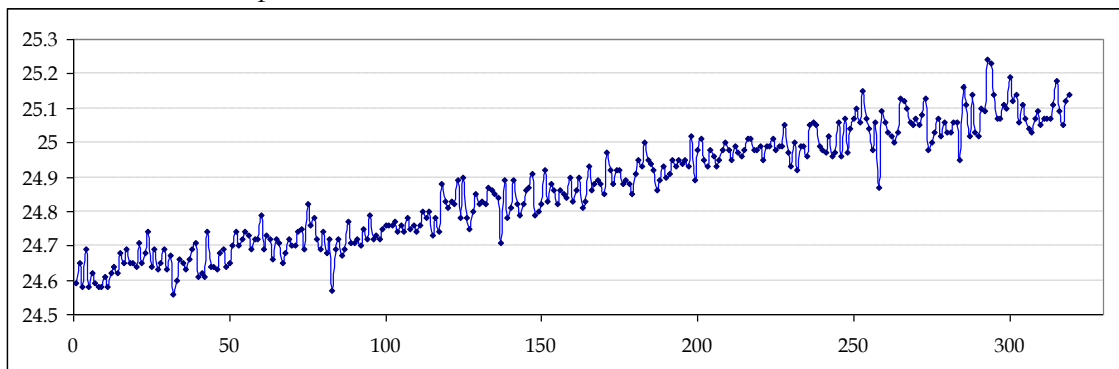
Na Slici 4.28 prikazan je temperaturni profil neuniformno zagrejene drvene ploče ofarbane u crno. Oblast desno je šira i u sredini ove zamišljene krive osvetljene površine ima temperature oko 27.9 (°C), dok temperature manje površine ima maksimum 27.6 (°C) u odnosu na temperature između njih koja ima vrednost 27.3 (°C) u granicama merne nesigurnosti.



Slika 4.29. Drugi primer neuniformnog termograma.

Na Slici 4.29 prikazan je termogram površine ravne drvene ploče ofarbane crnom bojom, nalazi se na temperaturi ambijenta pre zagrevanja svetlosnim mimpulsom. Posmatrajući termogram u desnom uglu se može uočiti toplija površina, radi se o parazitnom zračenju toplih predmeta u okolino test uzorka. Naravno ova dva primera u mnogome doprinose pojavi šuma u podacima dobijenim primenom PVT nedestruktivnog testiranja.

Rastojanje između prednjeg dela fotografskog blica do površine ploče je najkraće i iznosi 15 cm. Linija LI01 prikazana na oba termogram (Slika 4.27 i Slika 4.29), je pozicionirana i njene koordinate su po horizontali od $X1=250$ do $X2 = 568$ piksela i po visini $Y1= Y2 = 177$ piksela.



Slika 4.30: Temperaturni profil duž linije LI01 za termogram na Slici 2.10 Na ordinati su vrednosti temperature u (°C) a na apscisi broj piksela N_{pix} od 1 do 319 piksela.

Na Slici 4.30, prikazan je temperaturni profil pre ozračavanja površine drvenog zida svetlosnim impulsom fotografskog blica. Usled parazitne refleksije zračenje zagrejanih predmeta u okolini scene test ploče, unosi grešku pokazivanja u temperaturnom profilu do 0.5 (°C).

Zašumljeni signali, usled prostornih neuniformnosti u zagrevanju i parazitnom refleksnom zagrevanju toplih predmeta u okolini predmeta u centru scene predstavljaju značajan problem i potrebu filtriranja takvih signala pogotovo kada su defekti na većim dubinama i očekuju se vrednosti temperaturnog kontrasta bliski mernoj nesigurnosti merenja temperature primenom metode PVT za NDT defekata u materijalu. Ovo predstavlja ograničenje PVT i IC termografije kao metodu NDT defekata u materijalu kada su defekti dublji i kada je njihova veličina manja u poređenju sa njihovom dubinom.

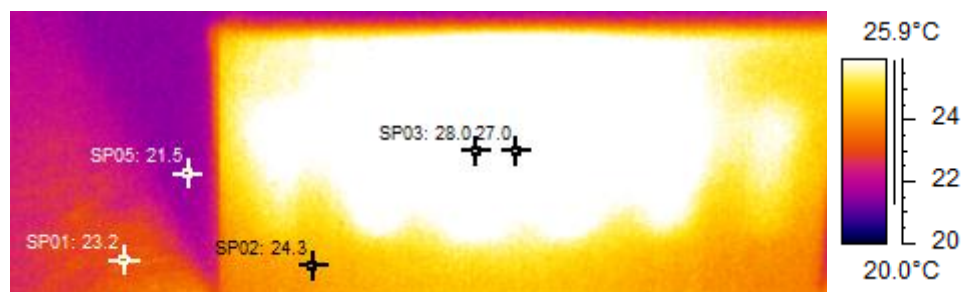


Slika 4.31: Termogram snimljen posle pozicioniranja i optimizacije položaja fotografskog blica kao i eliminacije parazitnih vrućih predmeta iz okoline test uzorka.

Na Slici 4.31 prikazan je termogram neosvetljene aluminijumske ploče na idealnom rastojanju od fotografskog blica na rastojanju 5 cm. Homogene temperature na površini neosvetljene ploče dobar je preduslov uz druge uslove koji će biti naknadno spomenuti u ovoj tezi, za uspešnu izvođenu eksperimenta u metodi NDT materijala PVT.

Takođe na Slici 4.31, vide se oznake 5 IC tačaka-piksela postavljenih na različitim pozicijama na termogramu: spot SP02 u levom donjem uglu test ploče, spotovi SP03 i SP04 pozicionirani su na sredini test ploče, dok su dva spota u okolini test ploče i to spot SP01 pozicioniran dalje od test ploče a spot SP05 je u neposrednoj njenoj blizini. Pored svakog od spotova nalazi se izmerena temperatura te tačke. Temperatura IC piksela na hladnoj ploči se kreće od 22.3 do 22.5 (°C), temperatura okoline je od 21.5 do 21.6 (°C) što znači da je temperatura ploče viša od 1 do 1.2 (°C) u odnosu na okolinu..

Posle osvetljavanja površine aluminijumske ploče svetlosnim impulsom fotografskog blica, temperatura na površini naglo skoči na nekoliko stepeni. Analiza

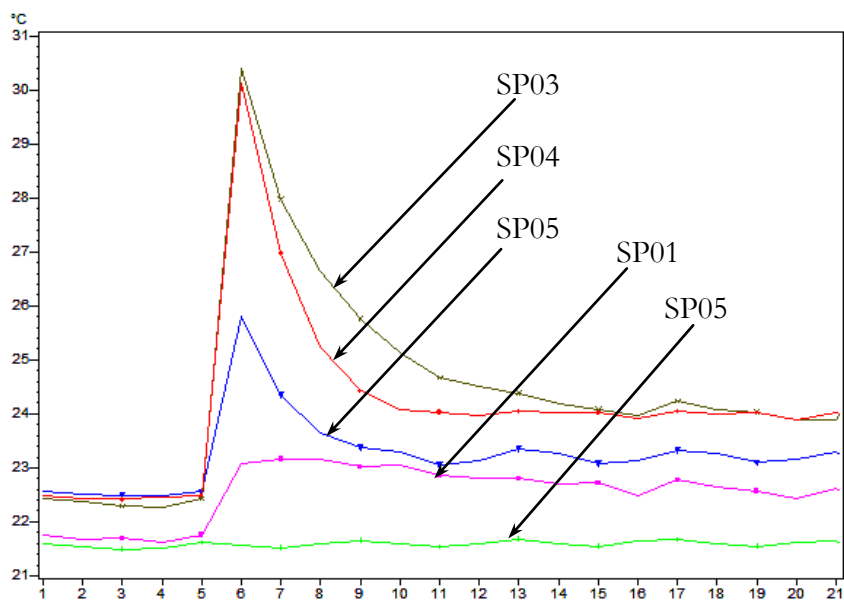


Slika 4.32: Drugi termogram sa višom temperaturom u snimljenoj sekvenci.

Na Slici 4.32 prikazan je termogram spot SP02 u levom donjem uglu test ploče, predstavlja temperaturu oblasti bez defekta, spot SP03 na sredini oblasti iznad defekta i

SP04 na sredini između dva defekta, dok je spot SP01 pozicioniran na površini okoline koja je takođe osvetljena svetlosnim impulsom fotografskog blica a spot SP05 je u neposrednoj blizini (u senci test ploče zaklonjen osvetljaju svetlosnim impulsom fotografskog blica).

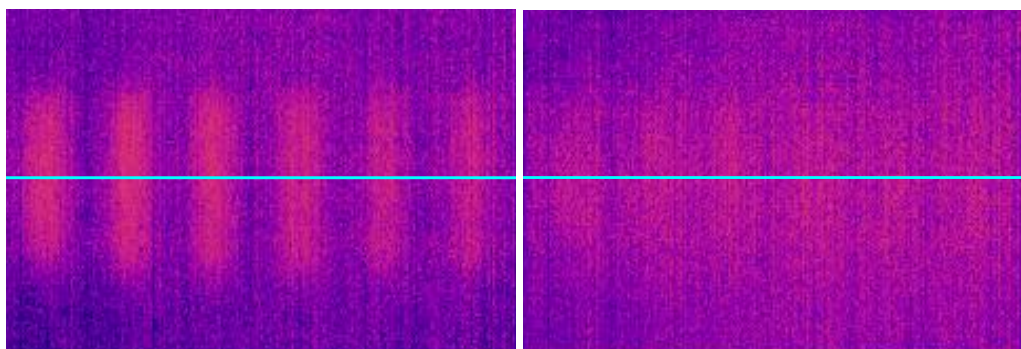
Termogram prikazan na [Slici 4.32](#), pokazuje veći deo IC piksela u zasićenju i zato je određivanje temperaturnog kontrast iz zasićenog temperaturnog profila sa greškom. Spot SP03 i SP04 koji su predstavnici zasićenog dela termograma pokazuju temperature od 27 do 28 (°C), a spot SP03 u levom donjem uglu ploče temperaturu 24.3 (°C). Spot u senci test ploče pokazuje nepromenenu temperature okoline od 21.5 (°C) i na kraju spot SP05 u okolini osvetljenoj svetlosnim impulsom 23.2 (°C). Pojava jednog termograma sa IC pikselima u zasićenju u mnogome otežava korišćenje eksperimentalnih podataka u ranoj fazi razvoja temperaturnog kontrasta u vremenu $\Delta T(t)$.



Slika 4.33: Zavisnost temperature IC piksela SP01, SP02, SP03, SP04 i SP05 u vremenu (od broja frejma N_f u snimljenoj sekvenci SEQ.847.

SP01 – Roze linija predstavlja vremensku promenu temperature IC piksela lociranog u levom donjem uglu termograma van površine pločice ($X1=125, Y1=98$) i SP02 – Plava linija predstavlja vremensku promenu temperature IC piksela lociranog u levom donjem uglu pločice ($X2=199, Y2=100$).

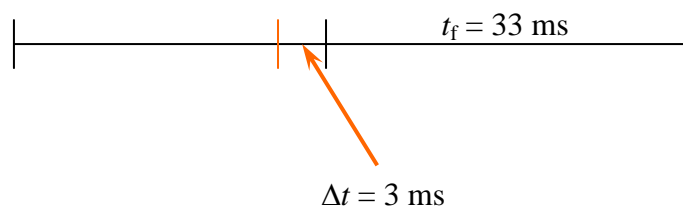
Na [Slici 4.33](#) su respektivno prikazani vremenske zavisnosti promene temperature spot tačaka od SP01 do SP05 označenih na termogramu [Slika 4.31](#) i [Slika 4.32](#).



Slika 4.34: Termogrami 2 sukcesivna frejma vremenski pomerena za $t_f = 33.33$ (ms).

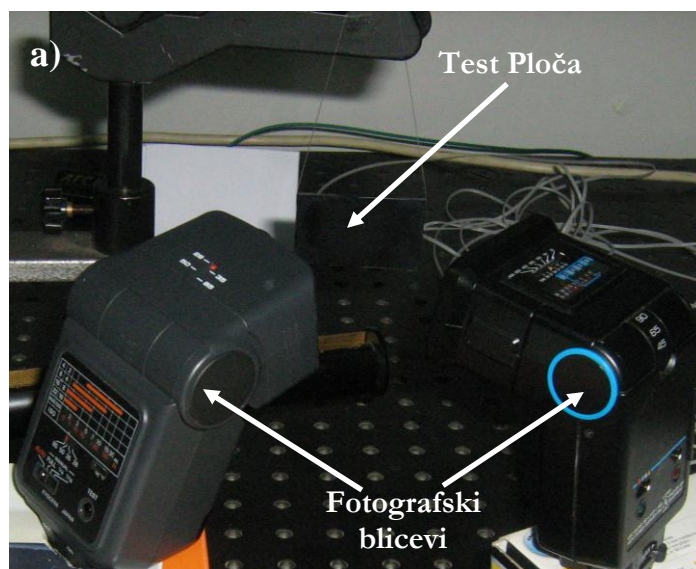
Na Slici 4.32 prikazana su dva termograma generisana jedan za drugim u snimljenoj sekvenci 129. SEQ test pločice TP13. Vreme trajanja snimljene sekvence je $t_s = 133.32$ (ms) i ima ukupno 5 memorisanih termograma. Na termogramu Slika 4.32 mogu se uočiti temperaturni odrazi defekta širine $w = 4$ mm periodične strukture defekata pravougaonog oblika. Već u sledećem frejmu nakon 33. 33 (ms) dolazi do zamućenja slike odraza tako da se defekti nemogu uočiti, i tada počinje izjednačavanje temperature na površini test pločice.

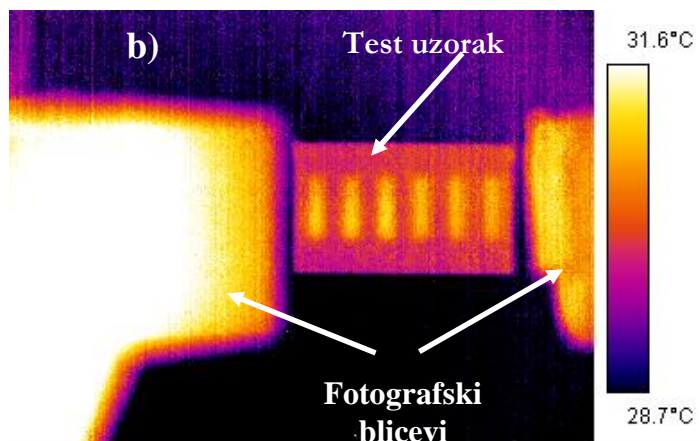
IC scena se beleži svakih 33 ms koliko iznosi vreme trajanja jednog frejma t_f . Režim pri snimanju se zauzimaju pre snimanja. Parametar za podešavanje snimanja koji želimo da menjamo je vreme od trenutka okidanja dva sinhronizovana fotografska blica do početka start frejma, što znači da su blicevi okinuli 30 ms od početka snimanja. Na ovaj način smo definisali trenutak okidanja bliceva u odnosu na start blica, što je promenljivo.



U cilju optimizacije dobijanja najjasnijih odraza termograma vremena Δt pri automatskom snimanju IC scene se menjaju, režimi za snimanje su unapred automatski podešeni softverski na PC, tako da odgovaraju određenim uslovima pri snimanju. Ostvarena je potpuna kontrola procesa snimanja zadaje se broj frejmova u kadru odnosno dužina snimljenog kadra. Softverski se zadaje režim sinhronizacije u vremenu ekspozicije dva eksterna blica. Snaga svetlosnog impulsa 2 blica je varirala tokom snimanja u zavisnosti od kapaciteta baterija.

4.4.3 Elektronski sklop za sinhronizaciju dva svetlosna izvora





Slika 4.35: Eksperimentalna postavka sa dva sinhronizovana blic (test uzorak je u obliku ploče dimenzije površine 50 x 30 mm²): a) Fotografija eksperimentalne postavke sa dva blica i b) termogram i dva blica u okolini.

Razmatrano je zagrevanje uzorka svetlosnom impulsnom pobudom i analizirano je povećanje i slabljenje temperature na površini ploče u vremenu.

4.4.4 Degradacija slike

Degradacija slike se javlja u 3 oblika (forme): radiometrijska distorzija, geometrijska distorzija ili izobličenje slike i šum. Formalno mi možemo izraziti ukupan akvizicioni proces za poziciju (i, j) u slici pomoću (Arconada et. al. 1987, Bumbaca and Smith 1988; Chen 1988; Hershey and Kim 1990).

$$I_{CAM,T}(i, j) = S[h(i, j) * T(i, j)] + n(i, j) \quad (3.2)$$

Gde $*$ predstavlja operator konvolucije, $S[. . .]$ se odnosi na radiometrijsko izobličenje, $b(. . .)$ je linearni prostorni operator koji se odnosi na geometrijske faktore i sa širinom opsega, $n(. . .)$ je slučajni šum koji se razmatra aditivni, $T(. . .)$ je idealna temperaturna slika i $I_{CAM,T}(. . .)$ je snimljeni signal koji odgovara

$$I_{CAM,T}'(i, j) \sim b(i, j) * T(i, j) + n(i, j) \quad (3.3)$$

Sledeće, dok filter može poslužiti da se eliminiše šum održavajući ivice u slici. Rezultantna slika je data pomoću doprinosa

$$I_{CAM,T}''(i, j) \sim b(i, j) * T(i, j) + n(i, j) - n'(i, j) \quad (3.4)$$

Poslednja jednačina pokazuje da je dekonvolucija neophodna da se povрати originalna slika $T(i, j)$ iz $I_{CAM,T}''(i, j)$. U frekventnom domenu, ovo je izraženo pomoću jednog inverznog filtra. Drugačije napisana jednačina 3.4. glasi:

$$IF''(u, v) \sim HF(u, v) TF(u, v) \quad (3.5)$$

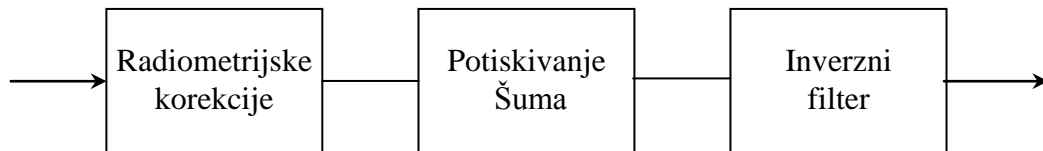
Gde su $IF''(u,v)$, $HF(u,v)$ i $TF(u,v)$ Fourier-ove transformacije $I_{CAM,T}''(i,j)$, $b(i,j)$ i $T(i,j)$ respektivno. Iz $HF(u,v)$, jedan inverzni filter $R(u,v)$ može biti zasnovan na odnosu:

$$R(u,v) = \frac{HF^*(u,v)}{|HF(u,v)|^2} \quad (3.6)$$

Gde je $HF^*(u,v)$ označena konjugovana vrednost Fourier-ove transformacije linearnog prostornog operatora $HF(u,v)$. Razmatran je elementaran filter koji je poznat tačno i koji prikazan bez šuma; takođe nije efikasan blizu nule $HF(u,v)$ gde $R(u,v)$ uzima beskonačnu vrednost. Na kraju se dobija

$$TF(u,v) \sim R(u,v) IF''(u,v) \quad (3.7)$$

Svi koraci restauracije signala mogu se sumirati prikazati blok dijagramom kao na slici 2. Koraci obnavljanja signala.

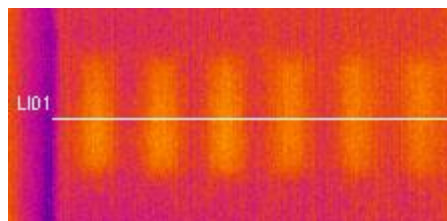


$$T(i,j) = S^{-1} [I_{CAM,T}(i,j)] * r(i,j) + n(i,j) - \hat{n}(i,j) \quad (3.8)$$

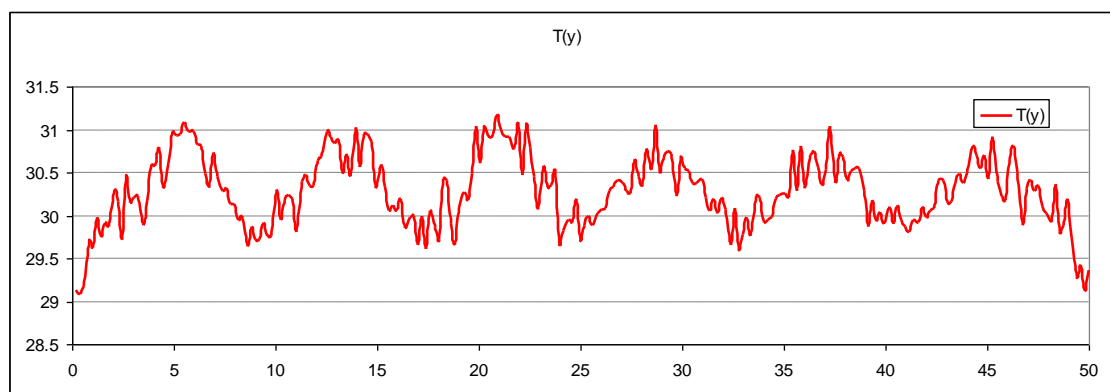
To je interesantno razmatranje prikladnosti ovih operacija koje govori o sadržaju njihovog aproksimativnog karaktera i potrebe da budu zadovoljne u kontekstu TNDE:

1. *Radiometrijska distorzija.* Razmatra se jednostavan test. Aluminijska test ploča (visoke toplotne provodnosti) je dovedena na iznad ambijentalne temperature. Ploča je posmatrana sa jednom termovizijskom kamerom, i snimljena je jedna slika. U mnogim slučajevima snimljene slike neće biti uniformne; osim toga, posmatračemo da neuniformnost slike koja zavisi od temperature ploče! Slika 3.24 (videti sekciju u boji) prikazuje jedan primer takvog testa. Ovaj jednostavan test pokazuje da radiometrijske korekcije su osnovne postupku prikazivanja kvantitativnih merenja.

2. *Efekte prostorne geometrije.* Razmatranje jednostavnog testa. Crno obojena aluminijska ploča, na kojoj su uzani kanali 1 cm su obrađeni mašinom na površini, posmatrana je termovizijskom kamerom i slike su snimane. Na Slici 4.36 prikazan je termogram sa centralnom linijom LI01 profila duž centralne linije LI01. Iz ovih slika, mi opažamo jasan prelaz žlebova širine preko deset piksela oko 12-13 piksela umesto



Slika 4.36: Profil duž centralne linije LI01 (u 38 redu odozgo), šest žlebova se jasno razlikuju.



Slika 4.37: Profil duž centralne linije (u 38 redu odozgo na Slici 4.34): Horizontalna skala je koordinata duž centralne linije normalno na žlebove y (mm) ili kordinate piksela duž reda 38 i vertikalna skala temperature piksela T_{pix} .

Oscilacije temperaturnog profila $T(y)$ duž centralne linije mogu biti vrlo različitog oblika jer se u opštem slučaju kod periodične strukture defekata javljaju složene oscilacije. Sinusne oscilacije ima samo čist IC signal bez prisutnih viših harmonika i šumova u slici.

Fizičke osnove pomoću kojih oko razlikuje razne vrste temperaturnih signala duž centralne linije normalne na žljebove u materijalu mogu se analizirati pomoću Fourierove analize. Svaku složenu oscilaciju moguće je razložiti u veći broj sinusnih oscilacija koje predstavljaju više harmonike.

Savremeni programski paketi npr. MATLABR2008, OriginPro 8 koršćeni u ovom radu i mnogi drugi, omogućuju brzu i preciznu harmonijusku analizu termografskog signala. Cilj harmonijske analize termografskog signala koji u osnovi predstavlja temperaturni profil promene temperature IC piksela duž centralne linije normalne na žljebove u materijalu, je eliminisanje viših harmonika i dobijanje temperature na sredini defekta.

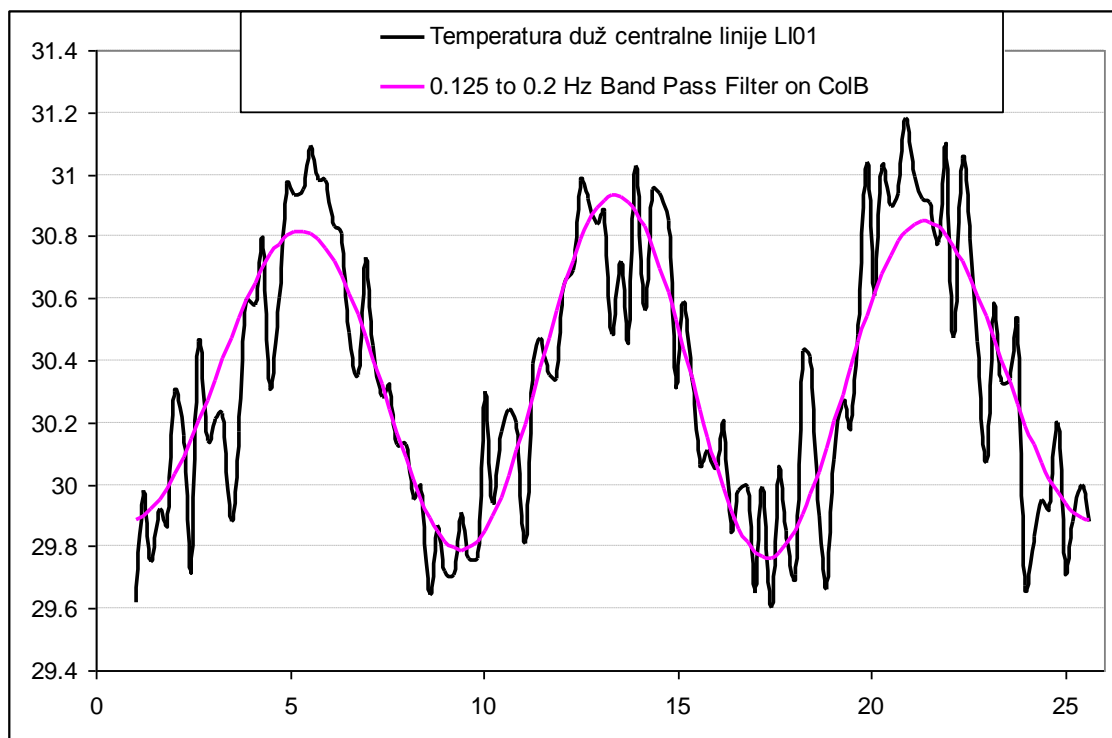
Osnova analize se sastoji u konstatovanju i merenju svakog harmonika sem onih koji su po intenzitetu beznačajni i leže ispod tačnosti merenja. Za svaki harmonik moguće je na ovaj način odrediti frekvenciju, amplitudu i fazu. Grafikon na sl. 1-1 jedan primer rezultata pomenute harmonijske analize načinjene pomoću OriginPro 8 programskog paketa na eksperimentalnim rezultatima temperaturnog profila IC piksela duž centralne linije LI01 prikazane na sl. 1-2. Grafik se odnosi na temperaturni profil za test pločicu TP 13 sa periodičnom strukturom defekta prostorne frekvencije $f_p = 0.125$ lp/mm i širinom defekta $w = 4$ mm na dubini defekta $d = 0.5$ mm.

Maksimumi na grafikonu predstavljaju razne harmonike čiju amplitudu predstavljaju ordinate maksimuma. Uzimajući u obzir činjenicu da se frekvencije harmonika ne mogu menjati kontinualno smatra se da svakom maksimumu odgovara po jedna vertikalna linija čija je visina proporcionalna amplitudi odnosno ordinati maksimuma. Ovakav grafikon ima slično značenje kao i spektar neke svetlosti, pa se zato naziva *spektar frekvencija termografskog signala* duž centralne linije normalne na periodičnu strukturu defekata. Kvalitet termografskog signala periodične strukture za određenu širinu defekta na određenoj dubini zavisi od broja harmonika njihove frekvencije i amplitude. Analiza spektra nekim od programskih paketa omogućili su da se preciznije analiziraju kako razne širine defekta tako i dubine defekata pa i šumovi koji se javljaju u signalu.

Sprovedene analize pokazuju da kvalitet termografskog signala zavisi od broja harmonika, njihovih međusobnih relacija, frekvencije i jačine. Na spektru frekvencija periodične strukture najširih defekata $w = 4$ mm, vidi se izrazita grupa intenzivnih harmonika na frekvencijama $f_p = 0.125$ lp/mm i $f_p = 0.25$ lp/mm. Ova karakteristika ostaje

kod ove širine i dubine defekta. Ove grupacije harmonika omogućavaju da se IC kamerom raspozna ovakva struktura defekata. Drugačije strukture defekata imaju drugačije karakteristične raspodele harmonika.

Pri reprodukciji stvarnog IC signala potrebno je zadržati sve harmonike. Međutim, reprodukcija harmonika viših frekvencija je tehnički nepodesna, i u analizi se koriste samo osnovni i nekoliko viših harmonika.



Slika 4.38: Profil duž centralne linije (u 38 redu odozgo na Slici 4.36): Harmonijska analiza signala u OriginPro. 8 programu od 0.125 Hz do 0.2 Hz (Hz predstavlja prostornu frekvenciju 1/mm).

Fizičke osnove pomoću kojih oko razlikuje razne vrste temperaturnih signala duž centralne linije normalne na žljebove u materijalu mogu se analizirati pomoću Fourierove analize. Svaku složenu oscilaciju moguće je razložiti u veći broj sinusnih oscilacija koje predstavljaju više harmonike.

Savremeni programski paketi npr. MATLAB[®] R2008, OriginPro 8 koršćeni u ovom radu i mnogi drugi, omogućuju brzu i preciznu harmonijsku analizu termografskog signala. Cilj harmonijske analize termografskog signala koji u osnovi predstavlja temperaturni profil promene temperature IC piksela duž centralne linije normalne na žljebove u materijalu, je eliminisanje viših harmonika i dobijanje temperature na sredini defekta.

Osnova analize se sastoji u konstatovanju i merenju svakog harmonika sem onih koji su po intenzitetu beznačajni i leže ispod tačnosti merenja. Za svaki harmonik moguće je na ovaj način odrediti frekvenciju, amplitudu i fazu. Grafikon na sl. 1-1 jedan primer rezultata pomenute harmonijske analize načinjene pomoću OriginPro 8 programskog paketa na eksperimentalnim rezultatima temperaturnog profila IC piksela duž centralne linije LI01 prikazane na sl. 1-2. Grafik se odnosi na temperaturni profil za test pločicu TP 13 sa periodičnom strukturom defekta prostorne frekvencije $f_w = 0.125$ lp/mm i širinom defekta $w = 4$ mm na dubini defekta $d = 0.5$ mm.

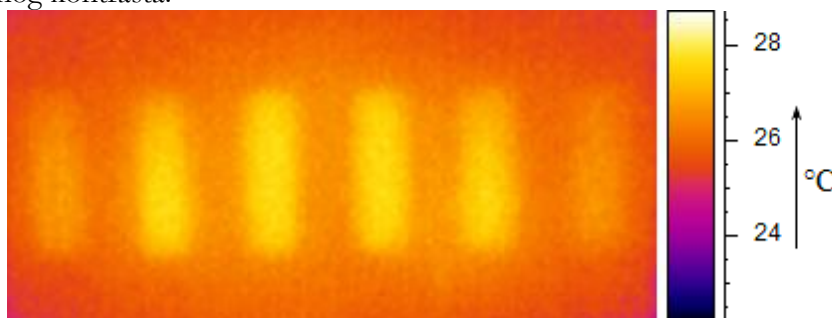
Maksimumi na grafikonu predstavljaju razne harmonike čiju amplitudu predstavljaju ordinate maksimuma. Uzimajući u obzir činjenicu da se frekvencije harmonika ne mogu menjati kontinualno smatra se da svakom maksimumu odgovara po jedna vertikalna linija čija je visina proporcionalna amplitudi odnosno ordinati maksimuma. Ovakav grafikon ima slično značenje kao i spektar neke svetlosti, pa se zato naziva *spektar frekvencija termografskog signala* duž centralne linije normalne na periodičnu strukturu defekata. Kvalitet termografskog signala periodične strukture za određenu širinu defekta na određenoj dubini zavisi od broja harmonika njihove frekvencije i amplitude. Analiza spektra nekim od programskih paketa omogućili su da se preciznije analiziraju kako razne širine defekta tako i dubine defekata pa i šumovi koji se javljaju u signalu.

Sprovedene analize pokazuju da kvalitet termografskog signala zavisi od broja harmonika, njihovih međusobnih relacija, frekvencije i jačine. Na spektru frekvencija periodične strukture najširih defekata $w = 4$ mm, vidi se izrazita grupa intenzivnih harmonika na frekvencijama $f_w = 0.125$ lp/mm i $f_w = 0.25$ lp/mm. Ova karakteristika ostaje kod ove širine i dubine defekta. Ove grupacije harmonika omogućavaju da se IC kamerom raspozna ovakva struktura defekata. Drugačije strukture defekata imaju drugačije karakteristične raspodele harmonika.

Pri reprodukciji stvarnog IC signala potrebno je zadržati sve harmonike. Međutim, reprodukcija harmonika viših frekvencija je tehnički nepodesna, i u analizi se koriste samo osnovni i nekoliko viših harmonika.

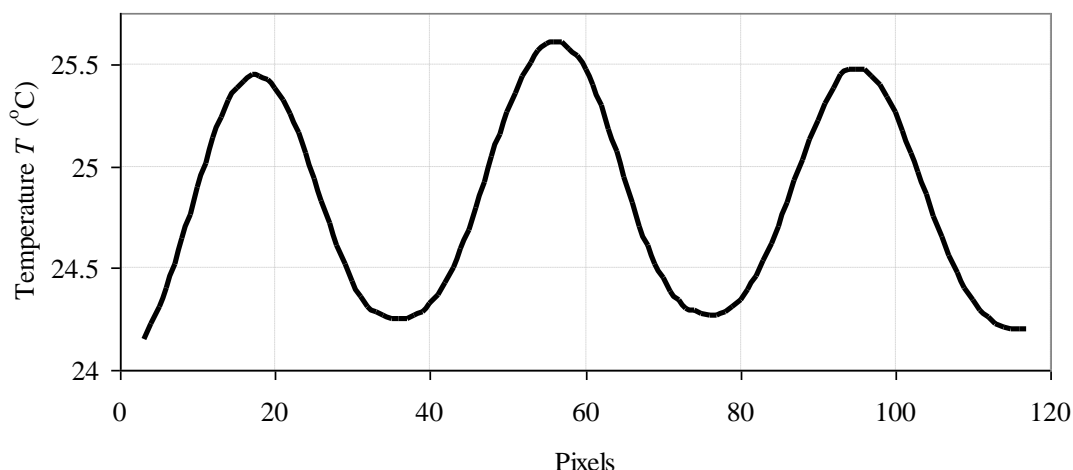
4.5 Filtriranje eksperimentalnih rezultata - termograma

Intenzivan šum koji se javlja u infracrvenoj slici - termogramu (zašumljena slika), čini njenu analizu otežanom. Smanjenje šuma u IC slici se postavlja kao prioritetan zadatak u cilju kvalitativne analize uticaja dubine i širine defekata na maksimalnu vrednost temperaturnog kontrasta.



Slika 4.39: Tipična toplotna slika površine uzorka posle zagrevanja svetlosnim impulsom.

Šum prisutan u toplotnoj slici čini njenu analizu otežanom, tako da se postavlja nužnim smanjenje šuma što se može izvesti u dva koraka. Najpre, korišćenjem standardne funkcije Wiener filtra iz MATLABA sa pretpostavkom belog šuma (Gausov šum), bio je primenjen na IC sliku [31,38, 39]. U drugom koraku, jednodimenzionalna (1D) priroda periodične strukture defekata olakšana je nalaženjem prosečne temperature za preko 20 piksela duž linije paralelne na pravac žljebova (kanala). Prostorna temperaturna raspodela uzorka merena je sa slike prikazane na Slici 4.39, posle filtriranja šuma na ovaj način je prikazana na Slici 4.40.



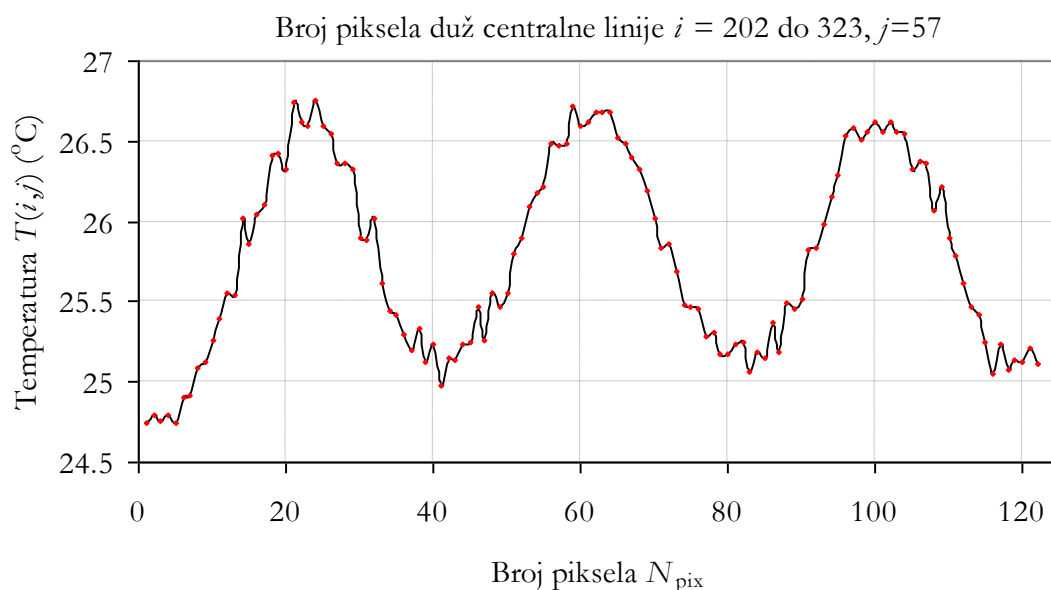
Slika 4.40: Prostorna temperaturna raspodela na površini uzorka dobijena sa termograma prikazanog na Slici 4.39, pošto se izvrši filtriranja šuma.

Sada, je jednostavno da se pročita razlika temperature $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ između maksimalne i minimalne temperature na površini uzorka, kao i da se prati njen vremenski razvoj od kadra do kadra (eng. *from frame to frame*), posle zagrevanja svetlosnim impulsom. Međutim, pošto nije moguće da se izvrši sinhronizacija kadra termovizijske kamere sa pobudom svetlosnog izvora fotografskog blica, nije bilo moguće tačno odrediti poziciju u vremenu toplotnog impulsa. Shodno tome, nije bilo moguće odrediti maksimalnu vrednost temperaturne razlike ΔT . Ta vrednost, koja se može javiti u bilo kom trenutku između dva frejma, veoma je važna za karakterizaciju defekta u materijalu. Da bi se dobila maksimalna vrednost za temperaturnu razliku ΔT , neophodno je da se fituju eksperimentalne vrednosti sa krivom dobijenom numeričkom simulacijom procesa provođenja toplote u uzorku. Fit će obezbediti referentno vreme i tačnu vrednost za ΔT_{\max} .

U ovom delu rada objašnjava se ključni cilj ovog rada, a to je prikaz primene *Wiener*-ovog filtra za poboljšanje kontrasta temperature. Treba ovde naglasiti da zašumljenost termograma generalno zavisi od prostorne komponente (optika) i unutrašnje (elektronski šum) i treba izvršiti filtriranje u cilju poboljšanja kontrasta. Dakle ne zavisi od oblika i forme defektne strukture. Akcenat je detaljnije objašnjenje kako se pomoću digitalnog filtriranja može poboljšati u svakom slučaju degradacije [91-125].

4.5.1 Opis metodologije određivanja temperaturnog kontrasta

U ovom delu teze opisana je metodologija određivanja temperaturnog kontrasta ΔT , bez filtriranja jako zašumljenih eksperimentalnih rezultata. Vrednost temperaturnog kontrasta ΔT iz originalnih IC slika snimljene sekvence SEQ_193. frame (57) na direktan način određivanjem temperaturnog kontrasta na osnovu razlike temperature srednjeg piksela IC tačke na sredini oblasti iznad defekta T_{Sp1} (temperatura T_{\max}) i temperature oblasti između defekta T_{Sp2} (temperatura T_{\min}). Radi se o dosta grubom načinu određivanja ovih temperatura sobzirom da između dva susedna piksela razlika u temperaturi može da bude i ± 0.25 °C.



Slika 4.41: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 bez filtriranja šuma: Sekvenca 847.Seq_193. frame(57).

Dimenzija IC slike je 640×480 piksela (vidi u [Tabeli 4.2](#) karakteristike termovizijske kamere), u horizontalnom pravcu ima 640 piksela a u vertikalnom pravcu odozgo ima 480 piksela. Pozicija IC piksela u termogramu je označena za (i, j) , gde i predstavlja broj IC piksela u horizontalnom pravcu s leva na desno u pravcu x ose ako se koordinatni početak pravouglonog koordinatnog sistema postavi u gornjem levom uglu IC slike. Respektivno u pravcu y ose odozgo na dole na IC slici j predstavlja broj piksela. (i, j) par u koordinatnom početku ima poziciju (1,1) a u donjem desnom uglu IC piksel ima poziciju (640×480) .

Na [Slici 4.41](#) prikazana je temperaturna raspodela na gornjoj površini uzorka duž centralne linije LI01 normalne na defekte. i je redni broj piksela (dat na na IC slici sleva na desno u horizontalnom pravcu) dok je $j = 57$ redni broj piksela u vertikalnom pravcu odozdo na gore.

4.5.2 Fourier-ova analiza temperaturnog profila

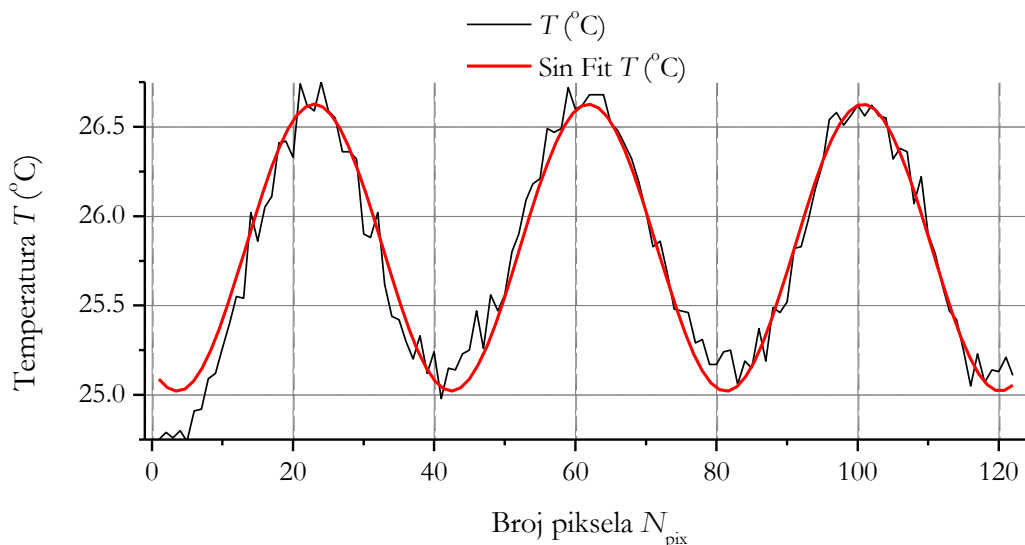
Fourier-ova analiza temperaturnog profila $T(y)$ duž centralne linije treba da nam pomogne da odredimo temperaturni kontrast $\Delta T = T_{max} - T_{min}$. Temperaturni profil predstavlja jednu vrlo zašumljenu složenu sinusoidu kod periodične strukture defekata. Sinusne oscilacije ima samo čist IC signal bez prisutnih viših harmonika i šumova u slici.

Postupak procene merne nesigurnosti merenja temperature na površini test pločice, IC piksela duž centralne linije Li1 normalne na defekte. Na slici 1. prikazana je centralna linija IC piksela normalna na defekte u prvom frejmu posle ozračavanja površine test pločice svetlosnim impulsom fotografskog blica. Pikseli IC slike – termograma koji su predmet analize nalaze se duž centralne linije Li1 normalne na defekte periodične strukture, predstavljaju temperaturu prostora koji kroz objektiv termovizijske kamere gledaju pikseli FPA matrice na zamišljenoj liniji u horizontalnom pravcu.

Postupci procene merne nesigurnosti kod merenja temperature IC piksela $T_{px}(i, j)$. Procena merne nesigurnosti je vršena u skladu sa dokumentima EA-4/16: EA *Guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing* i proceduri procene merne nesigurnosti merenja temperature IC piksela na test ploči duž centralne linije Li1 primenjene u ovom

radu. Postupak procene merne nesigurnosti sproveden je za pojedine oblasti linija na TP sa prikazom proračuna i konačnog rezultata procene merne nesigurnosti, odnosno proširene merne nesigurnosti. Način sprovođenja merenja IC piksela na površini TP termovizijskom kamerom.

Kalibracija IC sistema (termovizijske kamere) je jedno od važnih pitanja kojim se bavio Fraedrich 1991. Ovo poglavlje se odnosi na promenljive radne uslove koje je potrebno ostvariti kod korekcije degradirane slike. Biće razmatrani samo oni parazitni efekti – smetnje koje unosi instrumentacija (merna oprema); drugi efekti kao što su parazitna refleksija i niska emisivnost su već bili predmet tretiranja u poglavlju 2.



Slika 4.42: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 bez filtriranja šuma: Sekvenca 847.Seq_193.frame (57): Za $X1 = 202$ i $X2 = 323$ piksela za $Y1=Y2=57$ piksela.

Na Slici 4.11 prikazan je temperaturni profil zašumljene slike centralne linije na poziciji $Y1=Y2=57$ piksela 193 frejma u snimljenoj sekvenci 847.Seq_193. Na Slici 4.11 prikazan je zašumljeni temperaturni profil za tri defekta duž LI01 posle 24.99 (ms) od trenutka ozračavanja fotografskim blicem njene površine.

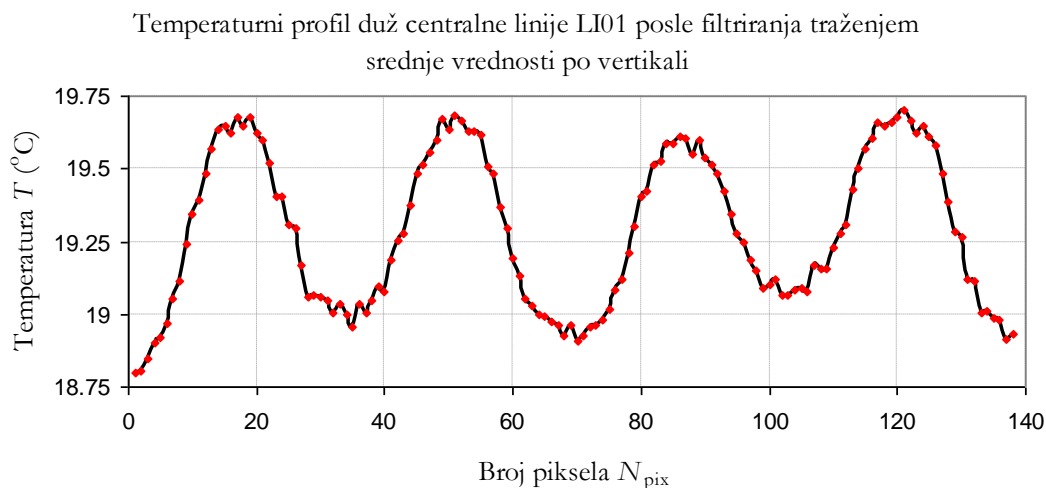
Tabela 4.6: Parametri fita sinusnom funkcijom za centralnu liniju LI01 sa Slike 4.42.

Parametri fita <i>Sin</i> funkcijom	Vrednosti parametara	Standardna Greška
xc	13.28218	0.23661
w	19.4402	0.07874
A	0.803	0.01657
y0	25.82382	0.01225

U Tabeli 4.6 prikazni su parametri najboljeg fita sinusnom funkcijom zašumljenih podataka dobijen za centralnu liniju LI01 za 3 defekta sa Slike 4.11. Cilj filtriranja je odrediti tačnu vrednost T_{max} na sredini defektne oblasti i T_{min} oblasti između dva defekta, pošto je izvorni temperaturni profil zašumljen cilj je eliminisati šum uzimanjem samo I harmonika najboljeg fita sinusne funkcije.

4.5.3 Određivanja temperaturnog kontrasta usrednjavanjem IC piksela

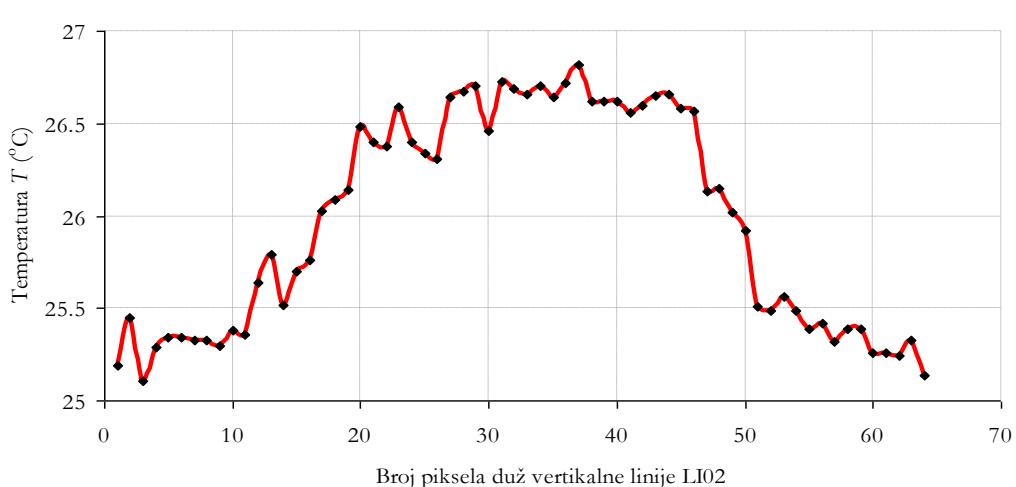
U ovom delu će biti opisana metodologije određivanja temperaturnog kontrasta ΔT_{SR} , filtriranjem eksperimentalnih rezultata traženjem srednje vrednosti (usrednjavanjem), po vertikalnoj liniji IC piksela. Srednja vrednost se računa duž vertikalne linije IC piksela LI02, i na taj način može se izvršiti filtriranje šuma u temperaturnom profilu duž centralne linije LI01 i preciznije odrediti vrednost temperaturnog kontrasta ΔT u odnosu na način direktnog određivanja temperaturnog kontrasta na osnovu razlike temperature srednjeg IC piksela.



Slika 4.43: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 posle izvršenog filtriranja šuma usrednjavanja duž vertikalnih linija: Sekvenca SEQ_192. frame(56).

IC tačke na sredini oblasti iznad defekta T_{Sp1} (temperatura T_{max}) i temperature oblasti između defekta T_{Sp2} (temperatura T_{min}). Radi se o dosta grubom načinu određivanja ovih temperatura s obzirom da između dva susedna piksela razlika u temperaturi može da bude i ± 0.25 °C. Temperaturni kontrast metodom usrednjavanja označimo sa ΔT_{SR} .

Na **Slici 4.43** prikazana je temperaturna raspodela na gornjoj površini uzorka duž centralne linije LI01 normalne na defekte posle izvršenog filtriranja usrednjavanjem po vertikalnoj liniji piksela.

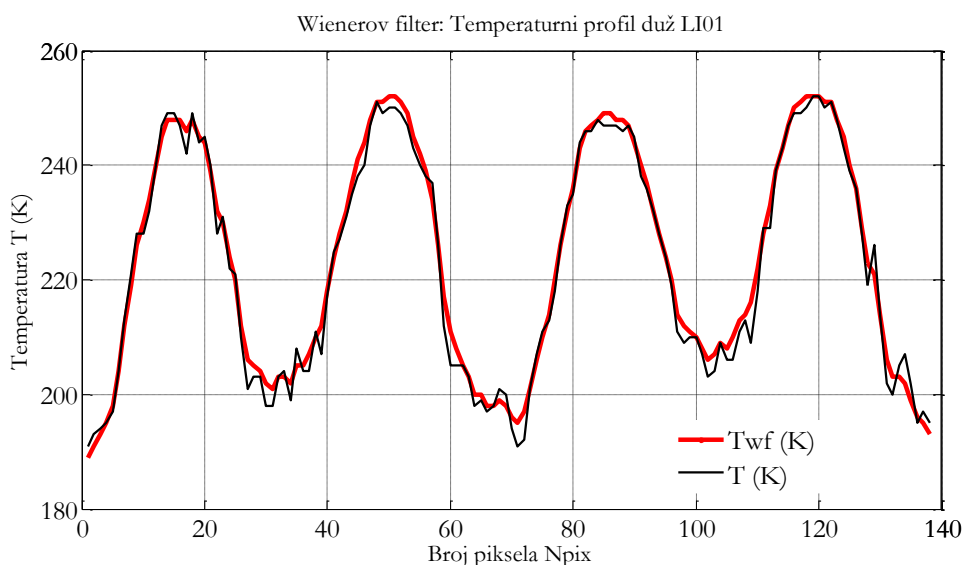


Slika 4.44: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 posle izvršenog filtriranja šuma usrednjavanja duž vertikalnih linija: Sekvenca SEQ_192. frame(56).

Vertikalna linija LI02 ($X1=336$ px, $X2=336$ px i $Y1=39$ px, $Y2=106$ px) Na liniji se uočavaju oblast iznad defekta od 24 piksela do 50 piksela sa približno konstantnom temperaturom iznad defekta po vertikali samo sa prisutnim šumom. Zaključujemo da dvadeset četiri piksela će ići na usrednjavanje i izračunavanje srednje temperature kod 26 piksela po vertikali za dalju analizu signala duž centrale linije LI01.

4.5.4 Određivanje temperaturnog kontrasta filtriranjem Wiener filtrom

Ovde je opisana metodologija određivanja temperaturnog kontrasta ΔT_{WF} , filtriranjem eksperimentalnog rezultata Wiener filtrom. U tezi su pokazani rezultati Wiener-ovog filtriranja IC slika dobijenih Wiener-ovim filtrom. Snimljene sekvence termovizijskom kamerom naknadno se pregledavaju frejm po frejm odgovarajućim softverom ThermaCAM Researcher Professional 2.9, za analizu u realnom vremenu. Kada su rezultati merenja temperaturni profili zašumljeni, računanje temperaturne razlike (ΔT) između IC piksela u centru defektne i oblasti između dva defekta je različita, vrednost koja metodom najmanjih kvadrata odgovara najboljem fitu sa eksperimentalnim rezultatima. Treba napomenuti da su pojedina merenja rađena u laboratorijskim uslovima i da su na taj način eliminisani neki od uzroka koji utiču na tačnost merenja a koji se ne mogu izbeći u realnim uslovima.

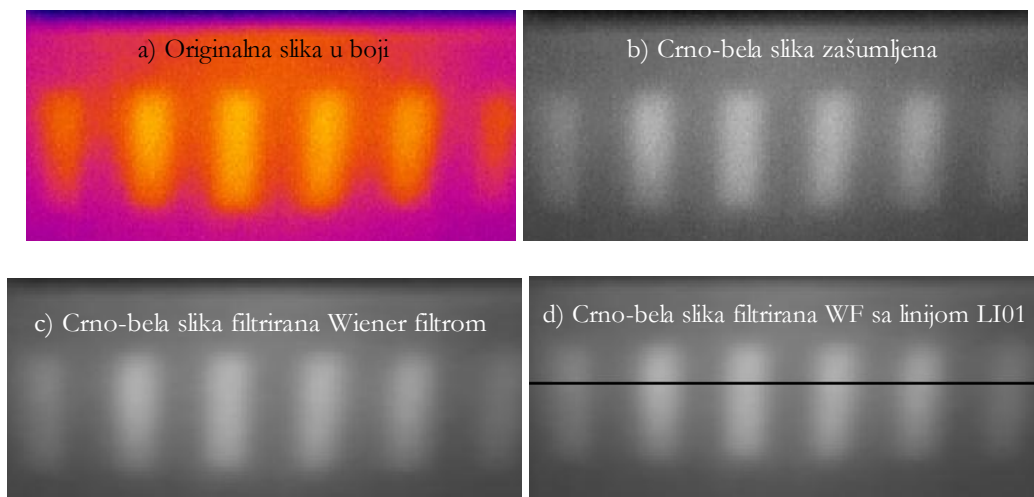


Slika 4.45: Temperatura T duž centralne linije LI01: Broj piksela od $i = 297$ do 434 , $j = 22$, za sekvencu '**Seq_0192_11.jpg**', temperaturni profil (crna linija) za original Wiener-ovim filtrom filtrirana slika (parametri WF: odnos signa-šum $nr = 0.01$ i $K = 0.00011$).

Obrada rezultata Wiener-ovim filtrom je u digitalnom domenu, pomoću programa napisanog u programskom paketu Matlab 2008a. 2D Wiener-ova funkcija adaptivnog filtra za filtriranje šuma ima oblik $J = wiener2(I, [m n], noise)$, I je zašumljena slika u digitalnom .jpg formatu. Wiener2 je niskopropusni filter koji crno-belu degradiranu sliku šumom konstantne spektralne snage, koristeći statističku metodu vrši estimaciju lokalne srednje vrednosti, estimaciju varijanse oko svakog piksela. Filtriranje se vrši usrednjavanjem vrednosti nivoa sivog, a prvi korak u tome je niskofrekvencijsko filtriranje, t.j. primena Wiener-ovog filtra, zasnovanog na izračunavanju srednje vrednosti grupe piksela. Srednja vrednost nivoa sivog, grupe $m \times n$ piksela.

Procesom filtriranja postiže se efekat glačanja, koji može da dovede do gubitka značajnih detalja ili razmazivanja ivica slike. Na slici koja je filtrirana ovom metodom svaki piksel je zamenjen usrednjenom vrednošću nivoa sivog nekoliko susednih piksela.

```
RGB = imread('SEQ.847_192.jpg');
I = rgb2gray(RGB);
K = wiener2(I,[3 3], 0.0144);
```



Slika 4.46: Rezultati simulacije filtriranja: a) Originalna IC slika izvorni termogram Al test ploče za 24.99 ms nakon zagrevanja blicem, b) Zašumljena crno-bela IC slika, c) filtrirana IC slika metodom *wiener2* (3 8) i d) Crno-bela IC slika sa linijom LI01 sa koje su uzeti podsci.

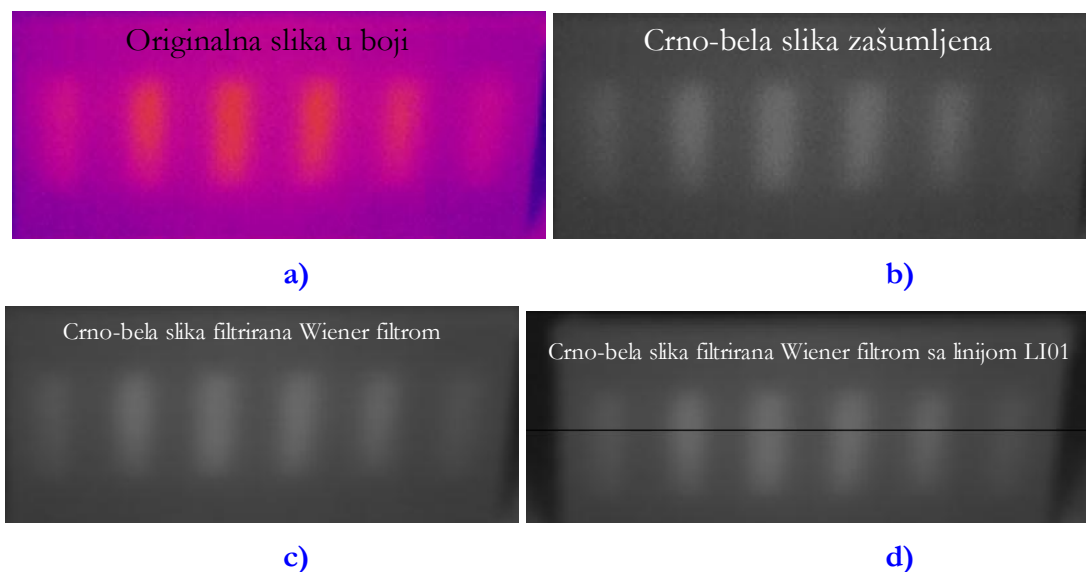
Posmatranje prednje površine ispitne ploče i praćenje promene temperaturnog profila duž centralne linije LI01 moguće je analizom termovizijskog snimka koji daje potpunu raspodelu temperaturnog polja [1] (videti Sliku 4.36). Akvizicija IC slike pomoću polja FPA IC senzora polja $p = 120$ (broj piksela po vertikali digitalne IC slike) i $n = 640$ (broj piksela po horizontali digitalne IC slike). IC scenu sačinjava periodična prostorna struktura radijanse (topla polja), to su odrazi periodične strukture defekata na površini Al ploče. Iz formirane originalne digitalne IC slike u boji, najpre se izvrši njeno konvertovanje u crno-belu sliku a potom filtrira Wiener filtrom. Odredi se pozicija centralne linije sa koje se potom uzorkovanjem duž centralne LI01 dobija temperaturni profil $T = f(N_{\text{pix}})$. Na crno-beloj zašumljenoj IC slici (prikazanoj na Slici 4.46 b) slike c) i d)) temperatura T_{NS} IC piksela na slici je izražena u nivou sivog. Koeficijent konverzije nivoa sivog k_{NS} određen je:

$$k_{\text{NS}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{256} = \frac{7.9}{256} = 0.030859 \text{ (}^\circ\text{C/nivo sivog)} \quad (4.2)$$

Temperaturni opseg na temperaturnoj skali originalne IC slike ($T_{\text{min}} = 21.1 \text{ }^\circ\text{C}$ i $T_{\text{max}} = 29.9 \text{ }^\circ\text{C}$). Temperaturu u nivou sivog T_{NS} bilo zašumljene IC slike prikazane na Slici 4.15 pod b) ili pod c) i d), konvertuju se pomoću koeficijenta konverzije k_{NS}

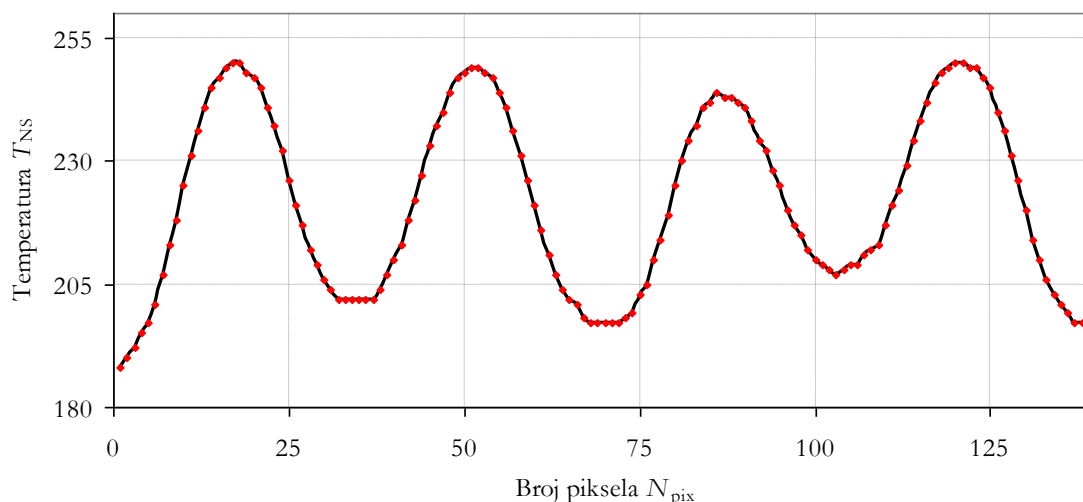
$$T(\text{ }^\circ\text{C}) = T_{\text{min}} + T_{\text{NS}} \cdot 0.030859 \quad (4.3)$$

Primer filtrirana IC slika 194 frejma sekvence Seq.847.jpg, koja za 56 red ima temperaturni profil posle WF filtriranja maksimalnu temperaturu na sredini defekta $N_{\text{pix}} = 56$, $T_{\text{NS}} = 176$ nivo sivog. $T(\text{ }^\circ\text{C}) = T_{\text{NS}} \cdot k_{\text{NS}} + 21.1 \text{ }^\circ\text{C} = 26.6312 \text{ }^\circ\text{C}$.



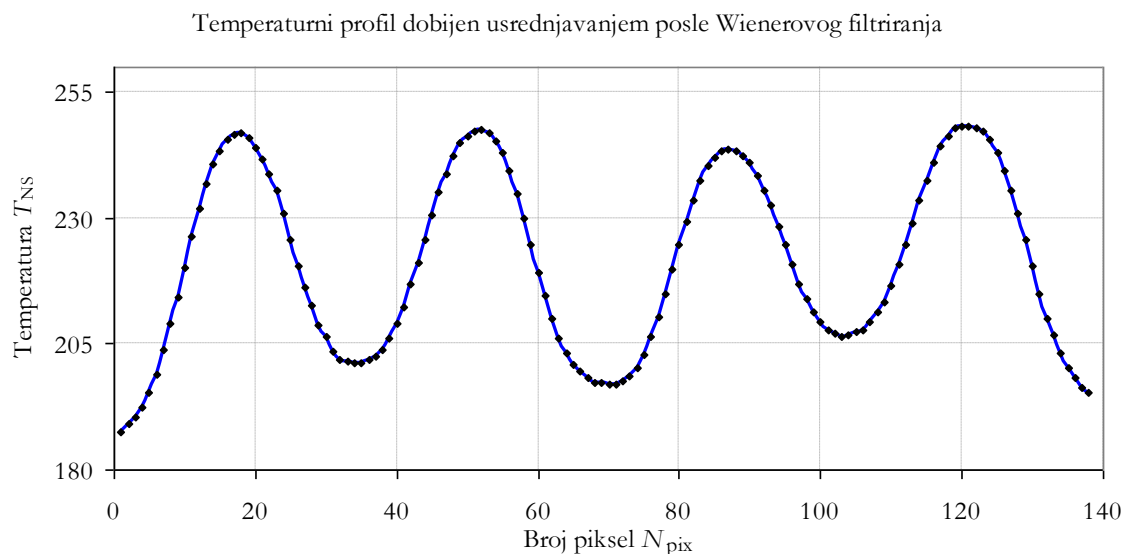
Slika 4.47: IC slike u .jpg formatu 194-og frejma snimljene sekvencu SEQ.847: a) Originalna IC slika u boji b) Konvertovana IC slika a) crno-bela (W&B format), temperatura je predstavljena u nivou sivog c) Crno-bela slika b) filtrirana Wiener filtrom i d) Crno-bela slika sa linijom duž koje su uzeti podaci.

Temperaturni profil duž LI01 posle Wiener filtra



Slika 4.48: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 posle izvršenog filtriranja šuma Wiener filtrom: Sekvenca SEQ_192. frame(56) i LI01 na poziciji 56-og reda odozgo.

Na [Slici 4.486](#) prikazan je temperaturni profil duž centralne linije LI01 normalne na žljebove. Usrednjavanje prethodno filtrirane IC slike – termograma SEQ_192. frame (56) je izvršeno duž vertikalnih linija LI02 koje su normalne na centralnu liniju LI01 dužine $N_{pix} = 138$ piksela, (ukupno ima 138 vertikalnih linija LI02 dužine svaka po 31 piksel po vertikali paralelne sa žljebovima. Pošto grejanje aluminijumske ploče ipak nije homogeno, tako da su za analizu odstranjeni krajnji defekti. Ponovimo da dužina linije LI01 od 138 piksela ustvari predstavlja četiri defekta periodične strukture i 3 širine oblasti između defekta jednake širini defekta od 4 mm, tako da dužina 138 piksela ima ukupno 32 mm. Gustina piksela po mm je 4.3125 pix/mm. Dužina žljeba je 15 mm što predstavlja 65.69 piksela, pošto je samo centralni deo linije od 31 piksel uzet za izračunavanje srednje vrednostipo vertikalnoj Liniji LI02.



Slika 4.49: Temperaturni profil duž centralne linije LI01 posle izvršenog filtriranja šuma Wiener filtrom i usrednjavanja duž vertikalnih linija: Sekvenca SEQ_192. frame(56).

Upoređujući rezultate temperaturnog profila sa [Slika 4.48](#) i [4.49](#) očigledno da temperaturni profil za Wienerov filter sa usrednjavanjem po vertikali 31 piksela daje glatku krivu sinusnog oblika kakva se očekuje za periodičnu strukturu defekta bez šuma..

Vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT izračunat iz ovako pripremljenik temperaturnih profila daje odlične rezultate fitovanja sa teorijskom krivom dobijenom numeričkom simulacijom. Temperaturni kontrast ΔT [33], (razlika T_{\max} i T_{\min}), kada su T_{\max} temperatura IC piksela na sredini defekta širine 4 mm i T_{\min} temperatura na sredini oblasti između dva susedna defekt iste širine kao i širina defekta $w = 4$ mm, različiti za defekte izračunava iz jednačine:

$$\Delta T_{\text{SR}} = T_{\max} - T_{\min} = \sum [T_i(\text{sredina žljeba}/4 - T_i(\text{sredina između žljeba})/3] \quad (4.4)$$

Označićemo ΔT_{SRWF} temperaturni kontrast dobijen metodom filtriranja i određivanja srednje vrednosti duž 31-og piksela po vertikali kao najprecizniji način određivanja temperaturnog kontrasta. Da ne bude zabune po prethodno pomenutom metodu filtriranja traćenjem srednje vrednosti originalne slike za 28 piksela oznaka temperaturnog kontrasta je ΔT_{SR} .

4.5.5 Analiza rezultata filtriranja termograma

Rezultati Wiener-ovog filtriranja sa usrednjavanjem temperatura IC piksela duž vertikalne linije su upotrebljeni za poređenje sa eksperimentalnim rezultatima. Prethodno je sprovedena uporedna analiza više načina filtriranja a rezultati su dati tabelarno.

U [Tabeli 4.5](#) prikazani su rezultata ΔT temperaturnog kontrasta za 11 frejma sekvence SEQ.847: ΔT_{ω_0} – filtriranje osnovnim harmonikom, ΔT_{SR} – srednja vrednost 28 piksela duž vertikalnih linija normalnih na centralnu liniju LI01, ΔT_{8H} – Filtriranje metodom 8 harmonika (harmonijska analiza sa 8 harmonika), ΔT_{8H^*} – metod 8 harmonika sa fiksiranom periodom w , ΔT_{WF} – filtriranje Wiener-ovim filtrom i sada tako filtrirana slika usrednjena po vertikalnoj liniji piksela - ΔT_{WFSR} .

Tabela 4.7: Uporedni rezultati 6 različitih načina filtriranja temperature $T(i, j)$ duž centralne linije LI01 i dobijanje filtriranih vrednosti temperaturnog kontrasta: ΔT_{SR} $\Delta T_{\omega 0}$ ΔT_{8H} plus ΔT_{8H}^* ΔT_{WFSR} i ΔT_{WF} .

N_{frame}	ΔT_{SR} (°C)	$\Delta T_{\omega 0}$ (°C)	ΔT_{8H} (°C)	ΔT_{8H}^* (°C)	Noise	ΔT_{WFSR} (°C)	ΔT_{WF} (°C)
190.	0.023	0.0306	0.09	0.02	0.0721	0.00119	0.0125
191.	0.199	0.3429	0.3	0.272	0.0368	0.231585	0.234
192.	1.086	1.2658	1.23	1.198	0.0529	1.067296	1.173
193.	1.361	1.5517	1.53	1.528	0.0305	1.402151	1.511
194.	1.233	1.3439	1.37	1.302	0.0295	1.228121	1.275
195.	0.935	1.1132	1.16	1.09	0.0270	0.920528	0.961
196.	0.683	0.8401	0.9	0.80	0.0270	0.675499	0.735
197.	0.516	0.6493	0.74	0.612	0.0290	0.491358	0.538
198.	0.294	0.4071	0.47	0.368	0.0285	0.305496	0.338
199.	0.101	0.1935	0.27	0.147	0.0352	0.125348	0.108
200.	0.0585	0.1646	0.31	0.127	0.0368	0.091481	0.123

* w perioda nije fiksirana.

Šum je računat za svaki frejm pre filtriranja i iznosio je od minimalne vrednosti 0.0721 za frejm TP pre ozračavanja $N_f = 190$, ima najveću vrednost u termogramu frejma $N_f = 192$ od 0.0529 slučaj kada se defekt vidi najbolje i za frejm $N_f = 200$ na kraju kada se temperature defektne i bezdefektne oblasti izjednače 0.0368.

Tabela 4.8: Metod određivanja temperaturni kontrast ΔT (°C): bez filtriranja i sa filtriranjem:

Metod	ΔT (°C)
Bez filtriranja	1.4
Srednja vrednost 28 piksela po vertikalnoj liniji	1.233
Prvi harmonik	1.3439
Osmi harmonik	1.37
Wiener filter	1.275
Wiener filter sa srenjom vrednošću 28 piksela po vertikalnoj liniji	1.2281

Kao rezultat filtriranja IC slika i dobijanje filtriranog temperaturnog profila a na osnovu njega preciznije određivanje temperaturnog kontrasta ΔT (°C), tako da sa tako određenim eksperimentalnih rezultatom dobijamo najbolje fitovanje sa teorijskom krivom dobijenom iz numeričke simulacije. Pošto se unosi greška određivanja ΔT uzimanjem temperature tačke IC piksela na sredini defektne oblasti i između njih. Pored preciznijih rezultata određivanja ΔT postupkom filtriranja dobijaju se i jasnije slike. Filtriranje WF sa usrednjavanjem preciznije određujemo ΔT pošto tačnije određujemo piksel sa T_{max} i T_{min} a ne kao kod metode bez filtriranja gde se postavlja pitanje koji piksel uzeti pošto je razlika dva susedna piksela veća od 0.2 °C.

U ovom delu teze rešavan je problem filtriranja temperaturnog profila duž centralne linije normalne na žljebove-defekte, na više načina. Metodom najmanjih kvadrata dobijene vrednosti temperaturnog kontrasta na jednom od načina filtriranja fitovani su sa teorijskom krivom dobijenu numeričkom simulacijom. Najbolje uklapanje je pokazano kada je izvršeno filtriranje Wienerovim filtrom IC slike i potom izvršeno usrednjavanje po vertikalnoj liniji LI02 IC piksela.

Teorijski rezultati provođenja toplote su dobijeni numeričkom simulacijom na modelu koji je izrađen na osnovu fizičkog modela aluminijumske ploče sa simuliranim žljebovima u obliku periodične strukture.

IC signal – temperaturni profil duž centralne linije LI01 normalne na IC sliku defekata na površini aluminijumske ploče. Temperaturni profil T dobijen za originalnu sliku je jako zašumljen, usled neravnog zagrevanja i IC karakteristike površine materijala, tj. nehomogenosti i neravnomernosti površinske emisivnosti.

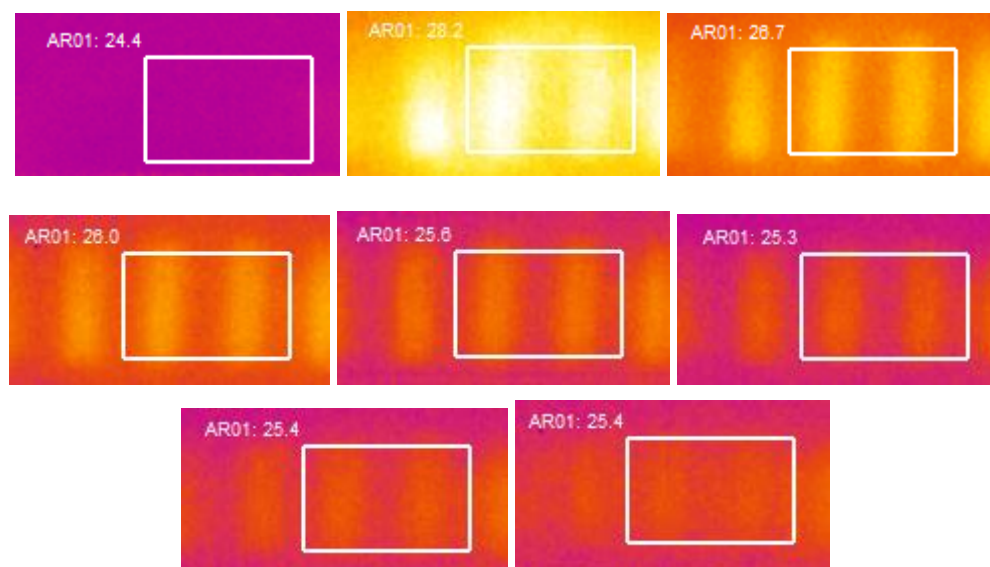
Uzroci šuma su spoljašnji i unutrašnji. Unutrašnji šum potiče od toplotne difuzije u bočnom pravcu a spoljašnji faktori su osetljivost kamere i elektronski šum kamere, impulsna energija svetlosnog izvora i reflektovanog zračenja pozadine i okoline. Prikazani su eksperimentalni rezultati aluminijumske ploče sa simuliranim žljebovima različite širine i dubine dobijeni metodom reflektivnom impulsne videtermografije.

Temperaturni šum se može smanjiti na više načina (uzimanjem samo prvog harmonika, usrednjavanjem - srednja vrednost 28-30 piksela duž vertikalne linije, jedna od njih je prikazan na [Slici 4.49](#)), harmonijskom analizom sa 8 harmonika sa i bez fiksiranja periode i kao najbolji metod filtriranja 2D funkcija iz MATLAB-a wiener2 Wienerovo VF inverzno filtriranje sa srednjom vrednošću po vertikali WFSR.

4.6 Termogrami test uzorka

U ovom radu, smo izvršili poređenje krive numeričke simulacije i eksperimentalnih rezultata. Fitovali smo rezultate numeričke simulacije eksperimentalnim nizom tačaka. Iz ovog fitovanja, kriterijumom MVKR (metod najmanjih kvadrata razlike, eng. *least square method*), određivali smo početni trenutak svetlosnog impulsa a time i maksimalnu vrednost temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} , odnosno trenutak dostizanja maksimalnog kontrasta t_{\max} .

Iz eksperimentalnog niza tačaka određujemo maksimalnu razliku temperature $\Delta T_{\max, \text{exp}}$ između defektne i bezdefektne oblasti, tako što smo najpre fitovali krivu temperaturne razlike $\Delta T_{\text{sim}}(t)$ dobijene numeričkom simulacijom.



Slika 4.50: Termogrami Sekvenca 847.SEQ: IC slike od 190. frejma (pre blica) i frejmovi od 191 do 197 (posle blica). AR01 oblast i pored njega prikaz srednje temperature za dati frejm.

Ekperimentalna oprema koju smo koristili sadržala je pored fotografskog blica, uobičajenu opremu za akviziciju snimljenih sekvenci i standardnu termovizijsku kameru. Snimanjem standardnom kamerom imali smo nesigurnost određivanja početka svetlosnog impulsa, gde nema mogućnost određivanja trenutka start frejma, trenutak početka osvetljavanja svetlosnim impulsom i početak prvog frejma. Tipične IC slike TP jedan frejm pre i posle zagrevanja (7 frejmova) svetlosnim impulsom su prikazana na [Slici 4.50](#).

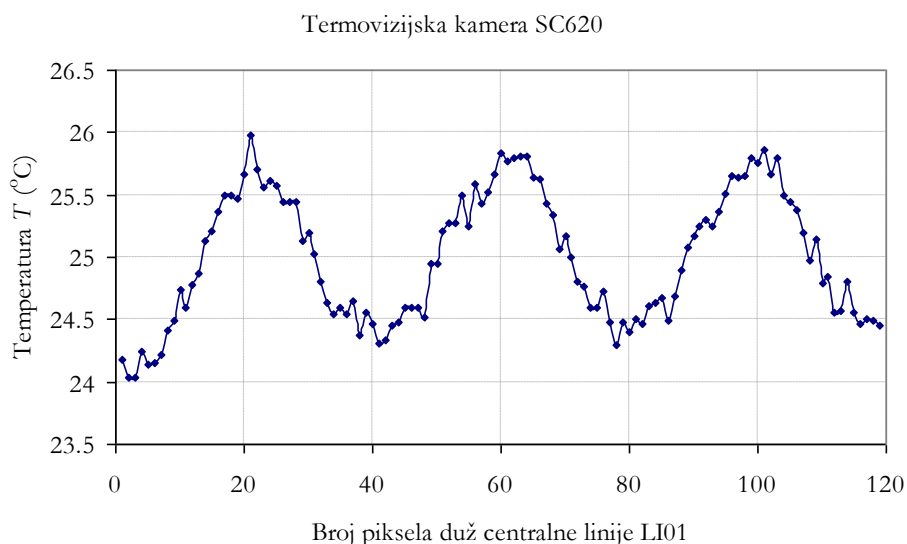
4.6.1 Termogrami dobijeni termovizijskom kamerom SC620 (120 Hz)

Prikazani su eksperimentalni rezultati za termovizijsku kameru SC620 koja ima mogućnost rada sa maksimalnim frekvencijom IC slike od 120 Hz, dok je veličina IC slike 640×120 piksela. Rezultati su prikazani u vidu termograma gde se defekt najbolje vidi i grafika promene temperature duž centralne linije LI01.



Slika 4.51: Termogram iz sekvence 847.SEQ: IC slike 194 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 281.

Centralna linija LI01 ima poziciju u IC slici definisanu koordinatama $X1 = 205$ i $X2 = 324$ piksela, vertikalna pozicija LI01 je $Y1=Y2= 61$ piksel. Maksimalna temperatura na liniji je $T_{\max} = 24.0$ ($^{\circ}\text{C}$), $T_{\min} = 26.0$ ($^{\circ}\text{C}$) a temperaturna razlika maksimalne i minimalne temperature na liniji je $\Delta T = 2.0$ ($^{\circ}\text{C}$). Srednja temperatura na termogramu iznosi 25.0 ($^{\circ}\text{C}$).

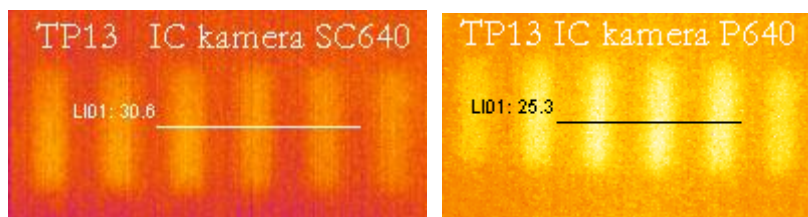


Slika 4.52: Termogram iz sekvence 847.SEQ: IC slike 194 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 281.

Na [Slici 4.52](#) prikazan je temperaturni profil duž centralne linije LI01 prikazane na [Slici 4.51](#) za termogram snimljen termovizijskom kamerom FLIR SC620.

4.6.2 Termovizijska kamera sa $f = 30 \text{ Hz}$ (SC 640 i P 640)

Prikazani su eksperimentalni rezultati za termovizijsku kameru SC640 i P640 u vidu termograma gde se defekt najbolje vidi i grafika promene temperature duž centralne linije LI01. Oblik profila kod ovih kamera su dosta zašumljeni i slični. Za ove kamere su prikazane IC slike posle osvetljavanja svetlosnim impulsom iste TP13.

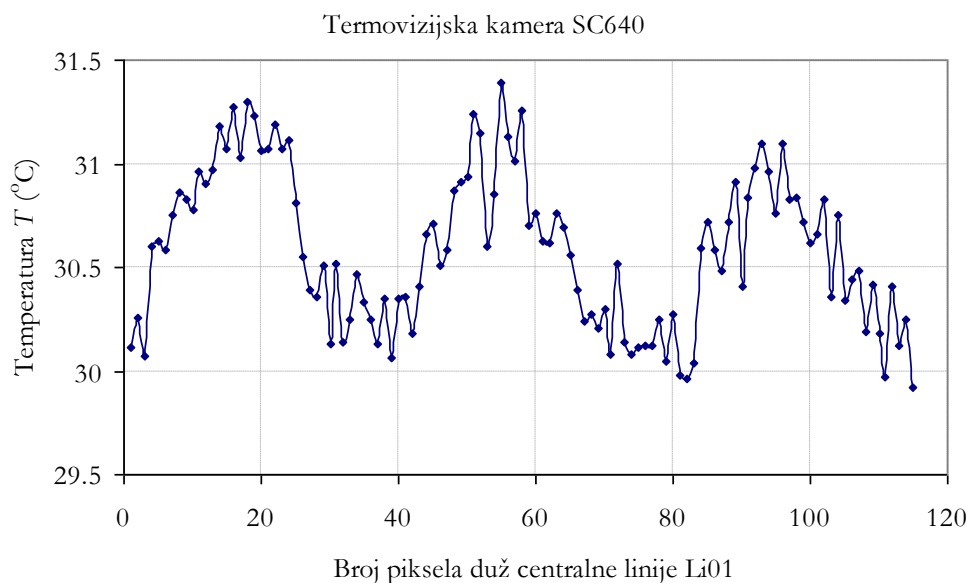


Slika 4.53: Termogram levo TP13 za termovizijsku kameru SC640, za 3 frejm snimljene sekvence NEW0040 sa ukupno 6 frejmova. Termogram desno za termovizijsku kameru P640, za 34 frejm snimljene sekvence SEQ.005 sa ukupno 84 frejma.

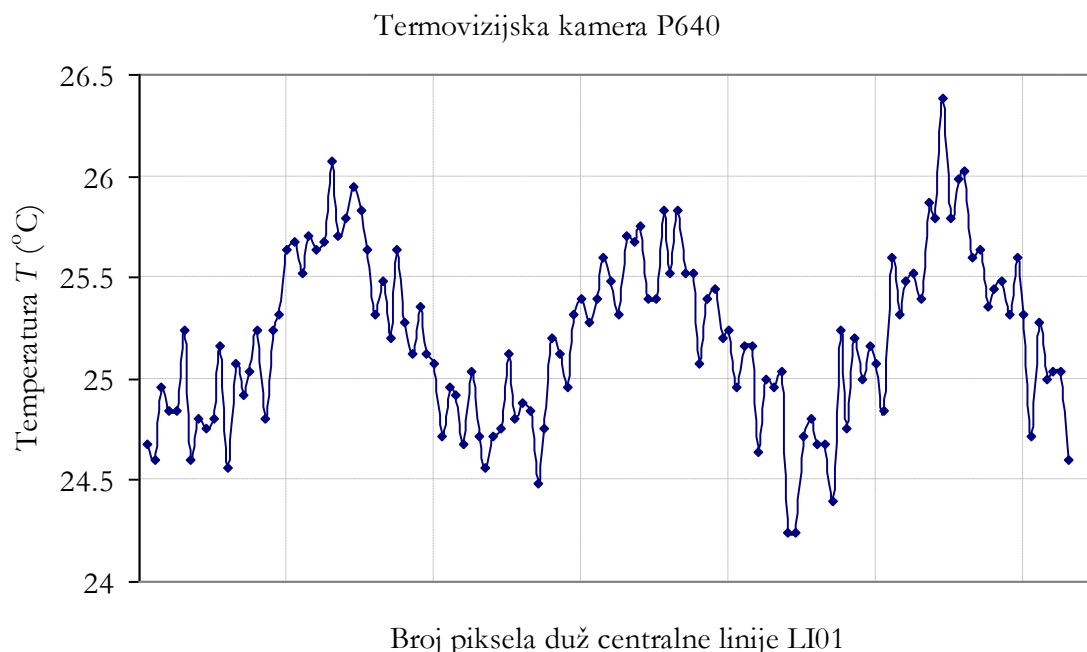
Centralna linija LI01 ima poziciju u IC slici definisiranu koordinatama:

1) Za SC640 $X1 = 396$ i $X2 = 510$ piksela, vertikalna pozicija LI01 je $Y1 = Y2 = 216$ piksel. Maksimalna temperatura na liniji je $T_{\max} = 31.4$ ($^{\circ}\text{C}$), $T_{\min} = 29.9$ ($^{\circ}\text{C}$) a temperaturna razlika maksimalne i minimalne temperature na liniji je $\Delta T = 1.5$ ($^{\circ}\text{C}$). Srednja temperatura je prikazana na termogramu i iznosi 30.6 ($^{\circ}\text{C}$).

2) Za P640 $X1 = 289$ i $X2 = 414$ piksela, vertikalna pozicija LI01 je $Y1 = Y2 = 357$ piksel. Maksimalna temperatura na liniji je $T_{\max} = 26.1$ ($^{\circ}\text{C}$), $T_{\min} = 24.3$ ($^{\circ}\text{C}$) a temperaturna razlika maksimalne i minimalne temperature na liniji je $\Delta T = 1.8$ ($^{\circ}\text{C}$). Srednja temperatura je prikazana na termogramu i iznosi 25.3 ($^{\circ}\text{C}$).



Slika 4.54: Termogram iz sekvence NEW0040: IC slike 3 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 6.

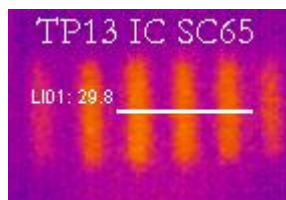


Slika 4.55: Termogram iz sekvence SEQ.005: IC slike 34 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 84.

Na Slici 4.24 prikazan je temperaturni profil duž centralne linije LI01 prikazane na Slici 4.23 levi termogram snimljen termovizijskom kamerom ThermaCAM SC640. Dok je na Slici 4.25 prikazan je temperaturni profil duž centralne linije LI01 prikazane na istoj Slici 4.23 desni termogram snimljen termovizijskom kamerom ThermaCAM P640. Frekvencija slika ovih kamera je 30 Hz i ista veličina slike 640×480 piksela. U odnosu na termogram za kameru SC620 dijagrami temperaturnog profila su izrazito zašumljeni pa je bez filtriranja teško odrediti središnji piksel defektne oblasti i između dve defektne oblasti. Minimalnu razliku temperature za sve kamere može se videti u Tabeli 4.1. u poglavlju 4.

4.6.3 Termovizijska kamera sa $f = 25$ Hz (SC 65)

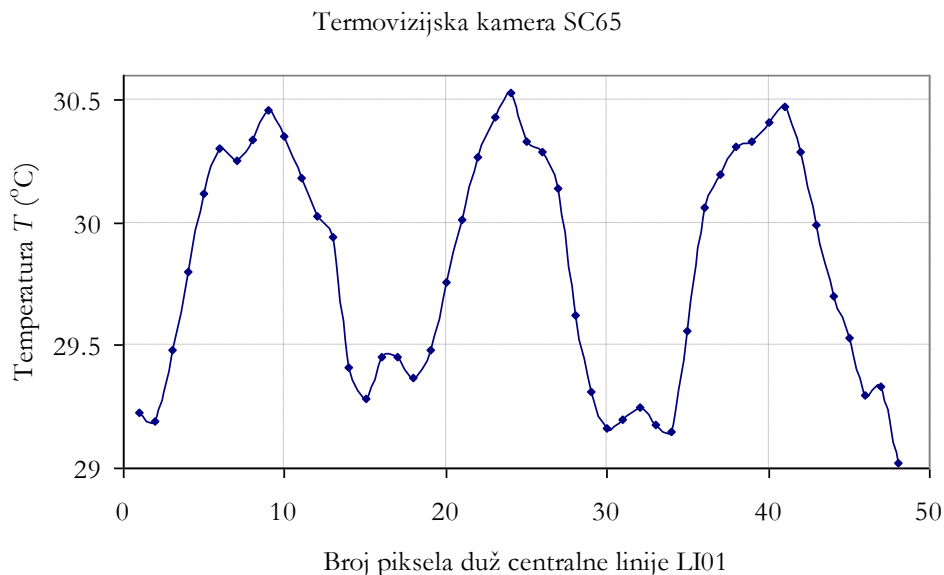
Prikazan je eksperimentalni rezultati za termovizijsku kameru SC65, u vidu termograma gde se defekt najbolje vidi i grafika promene temperature duž centralne linije LI01. Oblik temperaturnog profila je prikazan na Slici 4.56. I za ovu kameru je prikazana IC slika posle osvetljavanja svetlosnim impulsom iste TP13.



Slika 4.56: Termogram iz sekvence SEQ_210706_001: IC slike 71 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 107.

Centralna linija LI01 ima poziciju u IC slici definisanu koordinatama $X1 = 153$ i $X2 = 200$ piksela, vertikalna pozicija LI01 je $Y1=Y2= 120$ piksel. Maksimalna temperatura na

liniji je $T_{\max} = 30.5$ (°C), $T_{\min} = 29.0$ (°C) a temperaturna razlika maksimalne i minimalne temperature na liniji je $\Delta T = 1.5$ (°C). Srednja temperatura je prikazana na termogramu i iznosi 29.8 (°C).



Slika 4.57: Termogram iz sekvence SEQ.005: IC slike 34 frejma (posle osvetljavanja svetlošću fotografskog blica) ukupan broj frejmova u sekvenci 84.

Na [Slici 4.57](#) prikazan je temperaturni profil duž centralne linije LI01 prikazane na [Slici 4.26](#) za termogram snimljen termovizijskom kamerom ThermaCAM SC65. Frekvencija slika ovih kamera je 50 Hz i veličine slike 320×240 piksela. U odnosu na termograme za kamere SC640 i P640 dijagrami temperaturnog profila su manje zašumljeni pa filtriranje i prvim harmonikom daje dobre rezultate. Naravno ovde kamera ima manje piksela i 1 njen piksel pokriva prostor kao kod ovih drugih 4 piksela. Lakše je odrediti određiti središnji piksel defektne oblasti i između dve defektne oblasti.

5. Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata

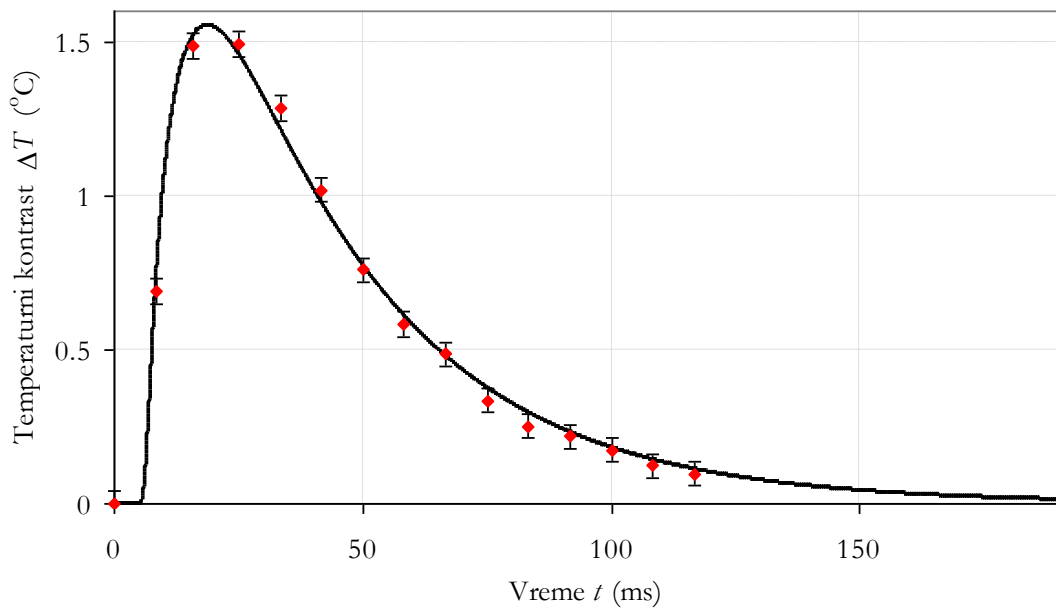
5.1 Maksimalni temperaturni kontrast

Temperaturni kontrast je izračunat pomoću jednačine (5.1) za različite vrednosti dubine defekta. Rezultati ovog proračuna, slika 2 ilustruje tipičan profil kontrasta. Ovi profili dostižu maksimalnu vrednost ΔT_{\max} za svaku vrednost dubine defekta.

$$\Delta T = \frac{T_d(i, j, t) - T_d(i, j, 0)}{T_{bd}(t) - T_{bd}(0)}, \quad (5.1)$$

gde je ΔT termalni kontrast, T_d je temperatura spoljašnjeg piksela - tačke iznad defekta, i i T_{bd} temperatura spoljašnjeg piksela iznad oblasti bez defekta, (i, j) su koordinate u termografskoj slici i t je vremenska promenljiva.

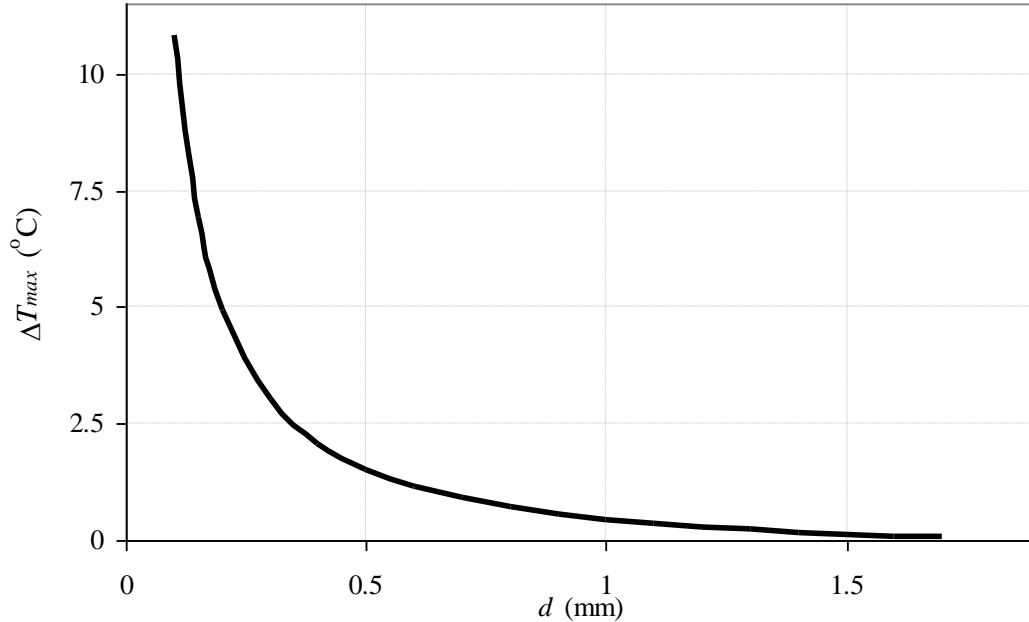
Jedan od rezultata numeričke simulacije predviđa dobijanje krive koja predstavlja promenu temperaturne razlike na površini uzorka $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ sa vremenom. U cilju određivanja vremenske neodređenosti u eksperimentalnim rezultatim, a takođe dobijanje i maksimalne vrednosti temperaturne razlike ΔT_{\max} , ova kriva se upotrebljava da fituje eksperimentalne rezultate. Metod najmanjih kvadrata (eng. *least squares method* – LSM), bio je primenjen za fitovanje, kod rezultata prikazanih na [Slici 5.1](#).



Slika 5.1: Eksperimentalni rezultati za temperaturnu razliku $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ u seriji frejmova fitovanih sa krivom dobijenom numeričkom simulacijom, za aluminijumski uzorak debljine $L = 2$ mm, sa defektima širine $w = 4$ mm i dubine $d = 0.5$ mm.

Može se videti na [Slici 5.1](#) da postoji odlična slaglasnost između eksperimentalnih i numeričkih rezultata, omogućavajući određivanje vrednosti ΔT_{\max} , što nije bilo moguće samo sa eksperimentalnim rezultatima. Fitovani eksperimentalni podaci potvrđuju da je model upotrebljen za numeričku simulaciju korektan.

Numerički kod se zatim koristi za proračun zavisnosti maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} na površini uzorka od dubine, za iste širine defekta i pod istim uslovima grejanja.



Slika 5.2: Zavisnost maksimalne temperaturne razlike ΔT_{\max} na površini uzorka od dubine defekta, za defekte širine $w = 4$ mm, u aluminijumskom uzorku.

Crtanje maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} u zavisnosti od karakteristika dubine prikazano je na Slici 5.2. Ova slika prikazuje opadanje temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} sa porastom dubine.

Na Slici 5.2 prikazana je zavisnost maksimalnog temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} na površini uzorka od dubine defekta d , za širine = 4 mm, u aluminijumskom uzorku nakon istog uslova zagrevanja svetlosnim impulsom kao što je prikazano na Slici 5.1. Kriva $\Delta T_{\max} = f(d)$ ima eksponencijalni oblik, tako da se može zaključiti da je zavisnost temperaturnog kontrasta ogromna za pliće defekte ispod $d = 0.5$ (mm) i slaba za dublje defekte pa je i uspeh primene PVT metode otežana.

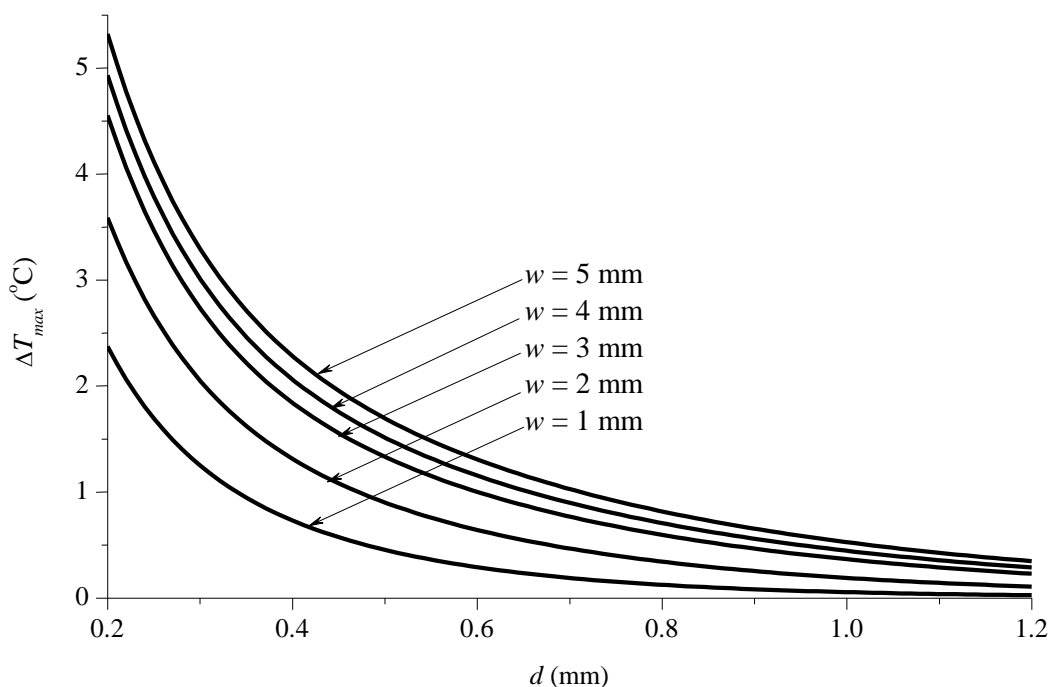
Zavisnosti temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(d)$ od dubine defekta lepo se fituje nelinearnom eksponencijalnom funkcijom modela (*ExpAssoc*) iz programa OriginPro 8, koja ima oblik:

$$\Delta T_{\max} = y_0 + A_1 \cdot \left(1 - \exp \left[-\frac{d}{t_1} \right] \right) + A_2 \cdot \left(1 - \exp \left[-\frac{d}{t_2} \right] \right) \quad (5.1)$$

Na osnovu parametara najboljeg fita za vrednosti dubine defekta od $d = 0.25$ (mm) do $d = 1.75$ (mm) koji odgovaraju vrednostima na Slici 5.1, jednačina (5.2) glasi:

$$\Delta T_{\max} = 27.59 - 22.41 \cdot \left(1 - \exp \left[-\frac{d}{0.06} \right] \right) - 5.16 \cdot \left(1 - \exp \left[-\frac{d}{0.29} \right] \right) \quad (5.2)$$

Numerički kod se zatim koristi za proračun zavisnosti maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} na površini uzorka od dubine, za iste širine defekta i pod istim uslovima grejanja, kao što je prikazano na Slici 5.2.



Slika 5.3: Zavisnost maksimalne temperaturne razlike ΔT_{\max} na površini uzorka od dubine defekta, za različite širine defekta.

Na Slici 5.3 prikazana je zavisnost maksimalnog temperaturnog kontrasta na površini uzorka od dubine defekta nakon istog uslova zagrevanja svetlosnim impulsom, ali za različite širine defekta. Iz zavisnosti maksimalnog temperaturnog kontrasta na površini uzorka od dubine defekta, ali za različite širine defekta može se zaključiti da se defekti manje širine mogu metodom PVT za NDT kvantitativno analizirati ako se radi o plitkim defektima ispod površine.

5.1.1 Poređenje eksperimentalnih rezultata pomeranjem teorijske krive

Pomeranjem krive numeričke simulacije, duž y – ose koja predstavlja temperaturni kontrast ΔT_{sim} , vrši se u koracima rezolucije pojačanja dA koje može da se menja (npr. 0.001, što je objašnjeno u poglavlju 3), traži se minimalna vrednost razlike kvadrata sa eksperimentalnim podacima ΔT_{exp} . Pomeranje krive duž x – ose (vremenske ose) t , od minimalne vrednosti pomeraja 0 (ms) do maksimalne vrednosti pomeraja 34 (ms).

U programskom paketu MATLAB[®] napisan je kod *RazlikaKvadrata.m*, za fitovanje eksperimentalnih podataka krivom temperaturnog kontrasta iz numeričke simulacije. U realizaciji koda se najpre vrši učitavanje podataka numeričke simulacije iz datoteke *T2minusT1.dat*, a potom se učitaju eksperimentalni podaci (npr. videti u primeru krivih sa Slika D5.1 i D5.2 datih u prilogu teze), u formi niza tačaka $\Delta T_{\text{exp}}(t_i) = [0.007 \ 0.78 \ 0.37 \ 0.21 \ 0.11 \ 0.077]$.

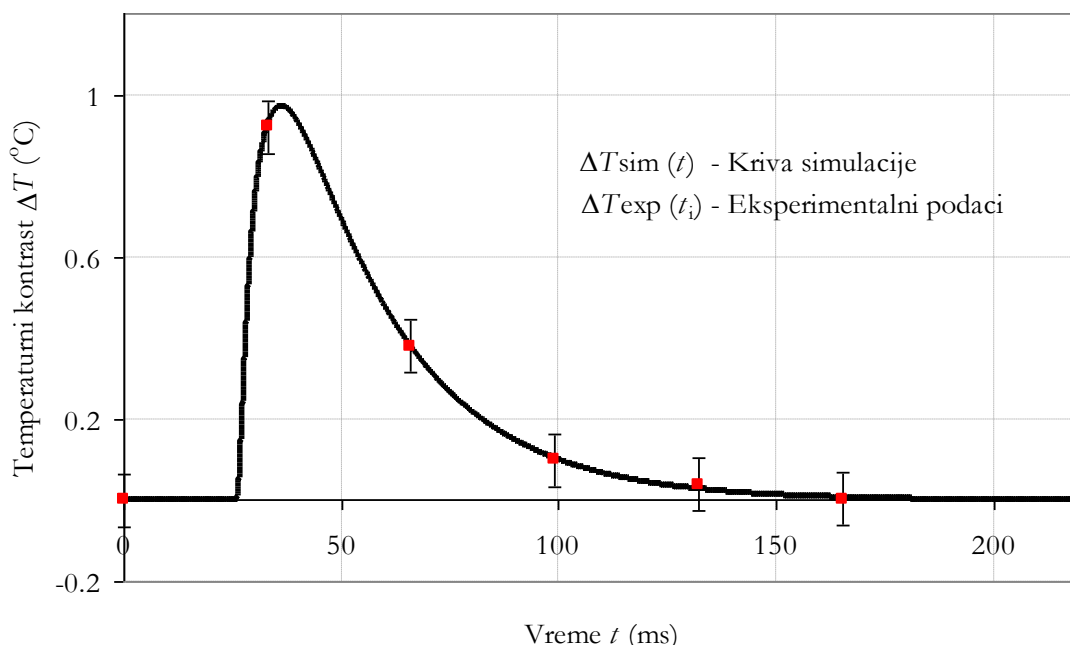
Korak očitavanja numeričkih podataka je zadat u simulaciji i iznosi $T_frame = 50 \mu\text{s}$, na osnovu kojih je nacrtana kriva $\Delta T_{\text{sim}}(t)$, dok vremenski razmak sa kojim su uzimani

eksperimentalni podaci zavisi od frekvencije generisanja termograma termovizijskom kamerom, npr. za 30 frejma u sekundi (eng. *frame per second* - fps) što je $t_f = 33.33$ (ms) ili frekvencija IC slike od 120 (fps) sa kojom su načešće snimane sekvence prezentovane u delu 4. ove teze. Kao rezultat izvršenja koda *RazlikaKvadrata.m*, dobija se minimalna vrednost kvadrata razlike (MVKR), kao kriterijum za određivanje nove teorijske krive najboljeg fita eksperimentalnih podataka ΔT_{exp} i krive numeričke simulacije ΔT_{sim} iz datoteke. Kriva najboljeg fita predstavlja teorijsku krivu za date početne parametre simulacije.

Dakle, rezultat poređenja je pomena kriva za optimalno pojačanje A_{opt} u pravcu y – ose i optimalni pomeraj Δt_{opt} u pravcu x – ose. Iz fitovane teorijske krive dobijaju se maksimalna vrednost temperaturnog pomeraja ΔT_{max} , i vreme dostizanja maksimalne vrednosti pomeraja t_{max} . Kao što je ranije napomenuto (u poglavlju 2 teze), vrednosti ΔT_{max} i t_{max} predstavljaju osnovne parametre za karakterizaciju defekta odnosno njegove dubine i širine a koji nisu mogli da se dobiju samo iz eksperimentalnih podataka.

Optimalna vrednost pojačanja je $A_{\text{opt}} = A_{\text{min}} + (J(p)-1) \cdot dA$; dok je optimalna vrednost pomeraja Δt_{opt} u (ms). Poređenje eksperimentalnih i teorijskih rezultata maksimalne vrednosti razlike kvadrata – MVRK. Pomoću jednačine 5.3 izračunava se razlika kvadrata (detaljnije objašnjena (pogledati u [Prilogu F](#)), vršeci pomeranje krive numeričke simulacije temperaturnog kontrasta po x i y osi.

$$R(i,j) = R(i,j) + (\Delta T_{\text{exp}}(b) - a \cdot \Delta T_{\text{sim}}((b-1) \cdot k + j))^2 \quad R(i,j) = R(i,j) \quad (5.3)$$



Slika 5.4: Eksperimentalni rezultati za temperaturnu razliku $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ u seriji frejmova $\Delta T(t_i)$ fitovanih sa krivom dobijenom numeričkom simulacijom, za aluminijumski uzorak debljine $L = 2$ mm, sa defektima širine $w = 4$ mm i dubine $d = 0.5$ mm.

Na [Slici 5.4](#) su prikazani eksperimentalni rezultati $\Delta T(t_i) = [0 \ 0.92 \ 0.38 \ 0.1 \ 0.04 \ 0.003]$, koji su generisani termovizijskom kamerom SC 840 (formira 30 slika u sekundi, sa vremenom jednog frejma od 33.33 (ms)). Rezultat najboljeg fita dobijeni programom *RazlikaKvadrata.m* imaju sledeće parametre:

- Kolona u kojoj se nalazi minimum kvadrata razlike je 153,
- Red u kome se nalazi minimum kvadrata razlike je 822,

- Minimalna vrednost kvadrata razlike je 0.000173,
- Optimalna vrednost pojačanja je $\Delta t_{\text{opt}} = 1.321000$ i
- Optimalna vrednost pomeraja je $A_{\text{opt}} = 7.6$ (ms).

5.1.2 Promena maksimalnog temperaturnog kontrasta za periodične defekte

U Tabeli 5.1 prikazane su rezultati promene maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} po širini defekta u 6 kolona od $w = 4$ (mm) do $w = 1$ (mm) koje predstavljaju širine aluminijumskih test ploča (dimenzije širine i dubine defekta TP1 do TP18, prema Tabeli u poglavlju 4 teze), [1-15].

Tabela 5.1: Maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{max} : Dubine defekta u rasponu od $d = 0.25$ mm do 1.75 mm (korak 0.25 mm). Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm.

d (mm)	w 4.0 (mm)	w 3.0 (mm)	w 2.5 (mm)	w 2.0 (mm)	w 1.5 (mm)	w 1.0 (mm)
0.25	3.0554	2.7434	2.5191	2.2231	1.8162	1.2221
0.5	1.2212	1.0384	0.9124	0.7472	0.5392	0.2808
0.75	0.6397	0.5179	0.4335	0.3296	0.2069	0.0807
1	0.3616	0.2789	0.2232	0.1575	0.0863	0.0252
1.25	0.2022	0.1481	0.1132	0.0743	0.0358	0.0081
1.5	0.1028	0.0712	0.0519	0.0317	0.0135	0.0023
1.75	0.0396	0.0258	0.0179	0.0101	0.0038	0.0005

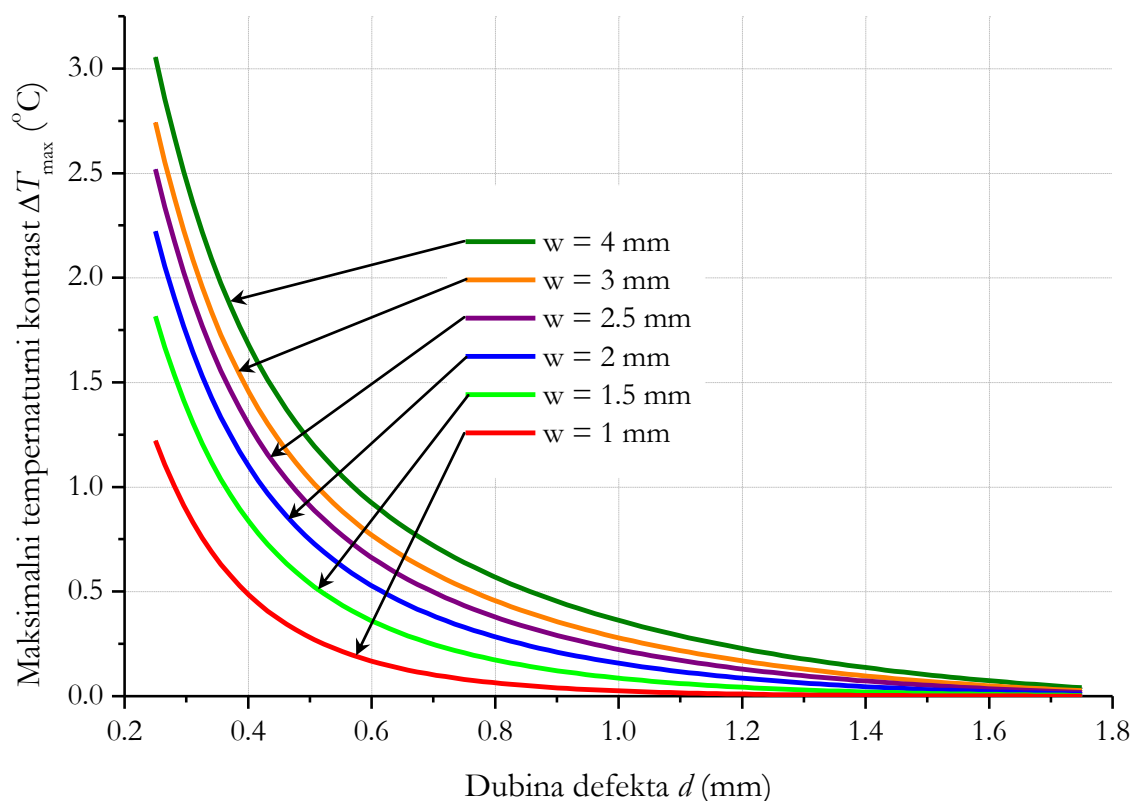
Naprimera za dubinu defekta periodične strukture od $d = 0.5$ (mm) i širinu defekta $w = 4$ (mm), maksimalni temperaturni kontrast ima vrednost od $\Delta T_{\text{max}} = 1.2212$ (°C), ako se širina defekta smanji za 50% na $w = 2$ (mm), maksimalna vrednost temperaturnog kontrasta ima nižu vrednost $\Delta T_{\text{max}} = 0.7472$ (°C). Duplo smanjenje širine defekta izaziva smanjenje maksimalne vrednosti termalnog kontrasta za 0.474 (°C) odnosno 38.8%.

U drugom slučaju kada se dubina, na kojoj se defekt nalazi u ovakvoj strukturi, poveća duplo sa $d = 0.5$ (mm) na $d = 1.0$ (mm) za istu vrednost širine defekta $w = 4$ (mm), maksimalna vrednost temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\text{max}} = 1.2212$ (°C), se smanji na $\Delta T_{\text{max}} = 0.3616$ (°C). Duplo povećanje dubine defekta izaziva smanjenje maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta za 0.859 (°C) odnosno 70.34%.

Može se zaključiti da dubina na kojoj se defekt nalazi ima veći uticaj na smanjenje temperaturnog kontrasta. Smanjenje ΔT ispod granice osetljivosti metode PVT za otkrivanje i karakterizaciju defekata gubi prednost koju ima na mogućnost otkrivanja potpovršinskih defekata. Naravno i smanjenje širine defekta utiče ali u manjoj meri u poređenju sa uticajem povećanja dubine.

Zavisnosti temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\text{max}} = f(d)$ od dubine defekta lepo se fituje nelinearnom eksponencijalnom funkcijom modela (*ExpAssoc*) iz programa OriginPro 8, koja ima oblik:

$$\Delta T_{\text{max}} = y_0 + A1 \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{d}{t1}\right]\right) + A2 \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{d}{t2}\right]\right) \quad (5.4)$$



Slika 5.5: Zavisnost maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta od dubine defekta $\Delta T_{\max} = f(d)$ za nekoliko vrednosti širine defekta izrađenih žljebova u Al ploči: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm.

Na Slici 5.5 prikazane su krive zavisnosti $\Delta T_{\max} = f(d)$ za širine defekta od $w = 4$ (mm) sa korakom smanjenja širine defekta od 0.5 (mm) do 1 (mm) i pri istom uslovu zagrevanja svetlosnim impulsom kao što je prikazano na Slici 5.1.

U Tabeli 5.2 prikazani su parametri najboljeg fita za promenljive vrednosti širine defekta koje odgovaraju vrednostima na Slici 5.5.

Tabela 5.2: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} funkcijom *ExpAssoc*: Offset y_0 , pojačanja $A1$ i $A2$ i širine $t1$ i $t2$. Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm.

ΔT_{\max} (°C)	w	w	w	w	w	w
	4.0 (mm)	3.0 (mm)	2.5 (mm)	2.0 (mm)	1.5 (mm)	1.0 (mm)
y_0	11.75641	11.40368	11.01483	10.34692	9.25528	7.53726
$A1$	-2.65398	-2.54171	-8.57667	-2.3679	-2.26041	-5.43167
$t1$	0.54521	0.47947	0.12492	0.37859	0.30935	0.10708
$A2$	-9.16961	-8.90218	-2.46415	-7.99228	-6.99904	-2.106
$t2$	0.13526	0.1286	0.43433	0.12102	0.11611	0.22591

Ako sada posmatramo periodičnu strukturu defekata kao linijske parove (test mete u obliku bar-koda poznate kod razlaganja ciljeva optičkih sprava) analogno se može definisati prostorna frekvencija defekata. Veličinu koja zavisi od širine defekta w , prostorna frekvencija izražena u broju linijskih parova po milimetru (lp/mm) označena je sa f_w .

Prostornu frekvenciju definisali smo u skladu sa oznakom širine defekta u ćeliji numeričke simulaciji w jednačinom (5.4):

$$f_w = \frac{1}{2w} \quad (5.5)$$

Prostorna frekvencija defekata uzimala je vrednost 0.125 (lp/mm) za najšire defekte kod TP 13 kod kojeg je širina defekta $w = 4$ mm (videti Tabelu 4.1), do 1 (lp/mm) za najuže defekte $w = 1$ mm

Tabela 5.3: Maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} : Dubina defekta: $d = 0.5$ mm, 1 mm i 1.5 mm. Prostorna frekvencija defekata f_w za nekoliko vrednosti od 0.125 (lp/mm) do 1 (lp/mm).

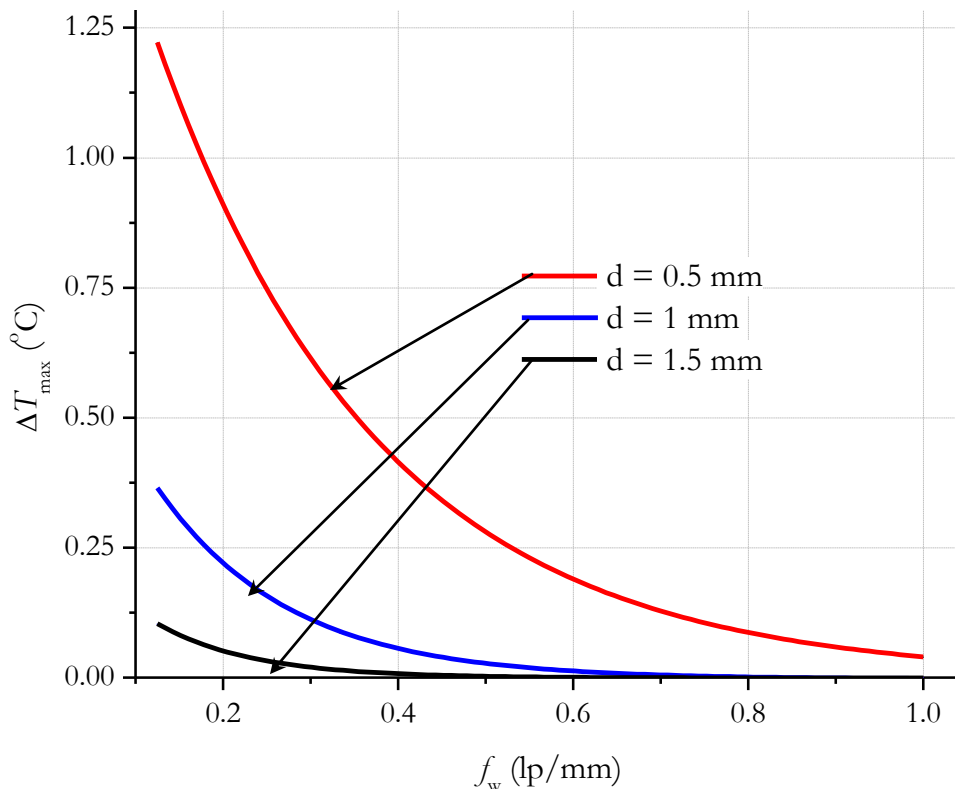
f_w (lp/mm)	$d = 0.5$ (mm)	$d = 1$ (mm)	$d = 1.5$ (mm)
0.125	1.221	0.3616	0.1028
0.142857	1.14	0.3246	0.08821
0.166667	1.038	0.2789	0.07115
0.2	0.91	0.2232	0.05189
0.25	0.7472	0.1575	0.03165
0.333333	0.5392	0.08625	0.01345
0.5	0.2808	0.02522	0.002324
1	0.03994	0.000668	0.0000126

U Tabeli 5.3 prikazane su maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta za različite dubine defekta d (mm) i različite prostorne frekvencije f_w (lp/mm) periodične structure defekata.

Prezentacija rezultata eksperimentalnih istraživanja termovizijskom kamerom SC65 (veličina slike 320×240 piksela i frekvencija dobijanja termograma u sekvenci, 50 Hz) u ranim radovima [35-40] da je osetljivost metode PVT za NDT periodičnih defekata u aluminijumskim pločama dobra za prostornu frekvenciju do 0.2 (lp/mm) za dubinu defekata $d = 0.5$ (mm).

Tabela 5.4: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} funkcijom $ExpAssoc$: Offset y_0 , pojačanja A_1 i A_2 i širine t_1 i t_2 . Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm.

ΔT_{\max} (°C)	d 0.5 (mm)	d 1.0 (mm)	d 1.5 (mm)
y_0	1.99664	0.84128	0.33149
A_1	-0.99789	-0.42213	-0.16612
t_1	0.2544	0.15054	0.10802
A_2	-0.99789	-0.42213	-0.16612
t_2	0.2544	0.15054	0.10802



Slika 5.6: Zavisnost temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} od prostorne frekvencije f_w (lp/mm): Dubina defekta $d = 0.5$ mm; 1 mm i 1.5 mm.

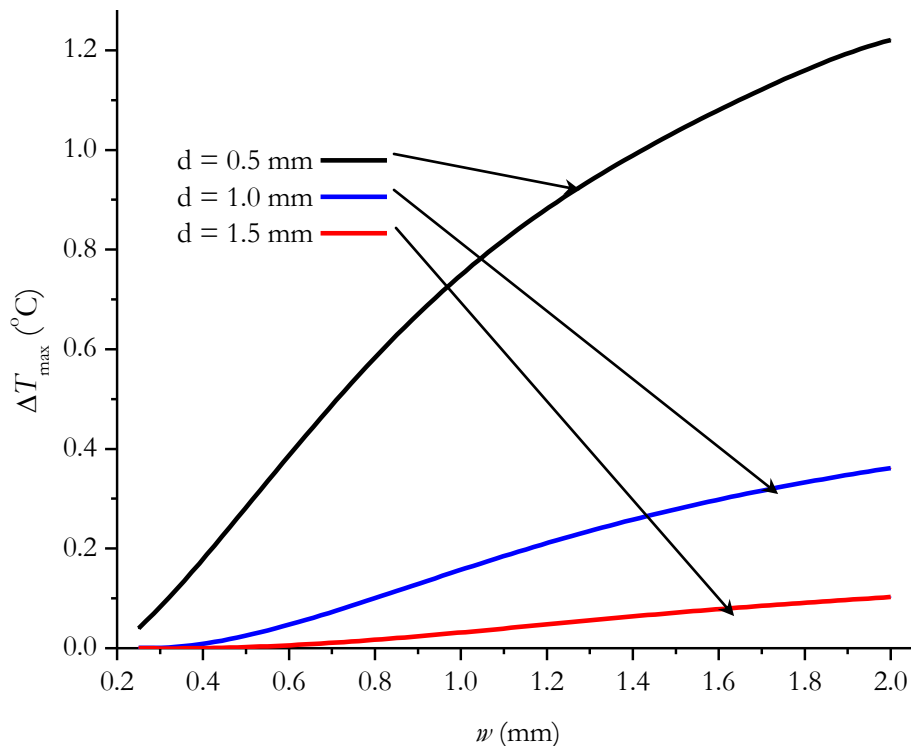
Zavisnosti temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(f_w)$ od prostorne frekvencije defekta f_w (lp/mm) lepo se fituje nelinearnom eksponencijalnom funkcijom modela (*ExpAssoc*) iz programa OriginPro 8, koja ima oblik jednačina 5.6:

$$\Delta T_{\max} = y_0 + A1 \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{f_w}{t1}\right]\right) + A2 \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{f_w}{t2}\right]\right) \quad (5.6)$$

U Tabeli 5.4 prikazani su parametri najboljeg fita za vrednosti dubine defekta koji odgovaraju vrednostima na Slici 5.6.

Tabela 5.5: Maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} : Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm, 2 mm, 1.5 mm i 1 mm Dubine defekta: $d = 0.5$ mm, 1 mm i 1.5 mm.

w (mm)	$d = 0.5$ (mm)	$d = 1$ (mm)	$d = 1.5$ (mm)
0.25	0.03994	0.0006675	0.0000126
0.5	0.2808	0.02522	0.002324
0.75	0.5392	0.08625	0.01345
1	0.7472	0.1575	0.03165
1.25	0.91	0.2232	0.05189
1.5	1.038	0.2789	0.07115
1.75	1.14	0.3246	0.08821
2	1.221	0.3616	0.1028



Slika 5.7: Promena temperaturnog kontrasta od širine defekta $\Delta T_{\max} = f(w)$: Dubina defekta $d = 0.5$ mm; 1 mm i 1.5 mm.

Zavisnosti temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(w)$ od širine defekta w (mm) lepo se fituje polinomom 5-tog stepena iz programa OriginPro 8, koja ima oblik jednačina 5.7:

$$\Delta T_{\max} = A0 + A1 \cdot w + A2 \cdot w^2 + A3 \cdot w^3 + A4 \cdot w^4 + A5 \cdot w^5 \quad (5.7)$$

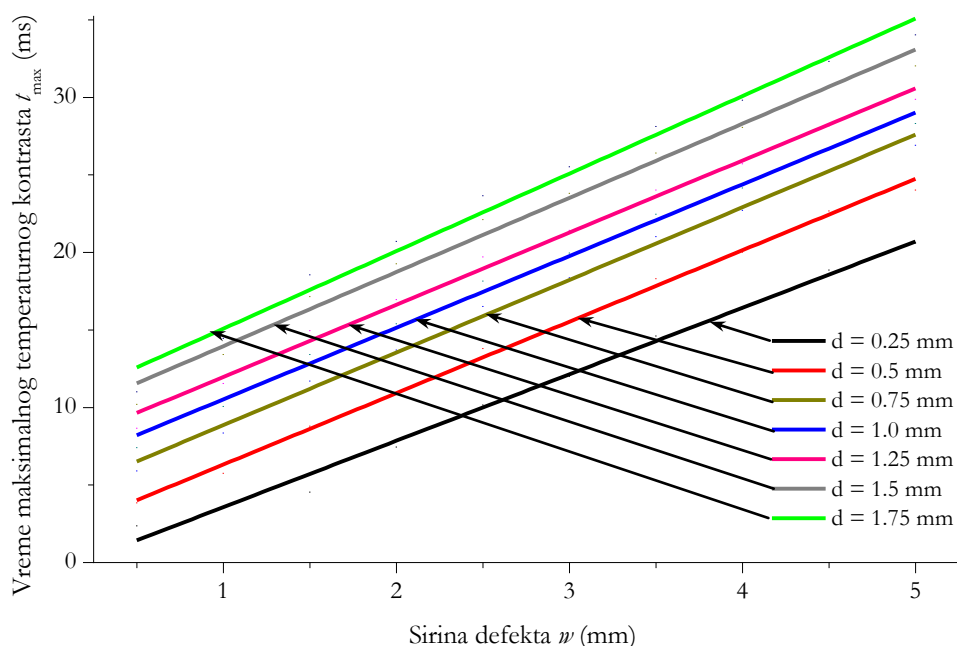
U Tabeli 5.6 prikazani su parametri najboljeg fita za vrednosti dubine defekta koje odgovaraju vrednostima na Slici 5.7.

Tabela 5.6: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} funkcijom *Poly5*: Članovi polinoma A0, A1, A2, A3, A4 i A5. Dubina defekta: $d = 0.5$ mm; 1.0 mm i 1.5 mm.

ΔT_{\max} (°C)	d 0.5 (mm)	d 1.0 (mm)	d 1.5 (mm)
A0	-0.06952	0.05727	0.00841
A1	-0.0765	-0.46697	-0.05348
A2	2.67738	1.14914	0.07321
A3	-2.78224	-0.80925	0.03692
A4	1.18783	0.25949	-0.04297
A5	-0.18792	-0.03238	0.0094

Nepoznata dubina defekta d (mm) može da se odredi na osnovu dobijenih kalibracionih relacija [10,15,16], vremena dostizanja temperaturnog kontrasta t_{\max} (ms) u zavisnosti od njegove širine w (mm) je prikazana na Slici 5.8. Linearne zavisnosti $t_{\max}(w) = A0 + A1 \cdot w$, za seriju različitih dubina od $d = 0.25$ (mm) (korak 0.25 mm), do $d = 1.75$

(mm) prikazane su na Slici 5.8. Dakle dubinu defekta možemo odrediti ako poznajemo njegovu veličinu (širinu w).



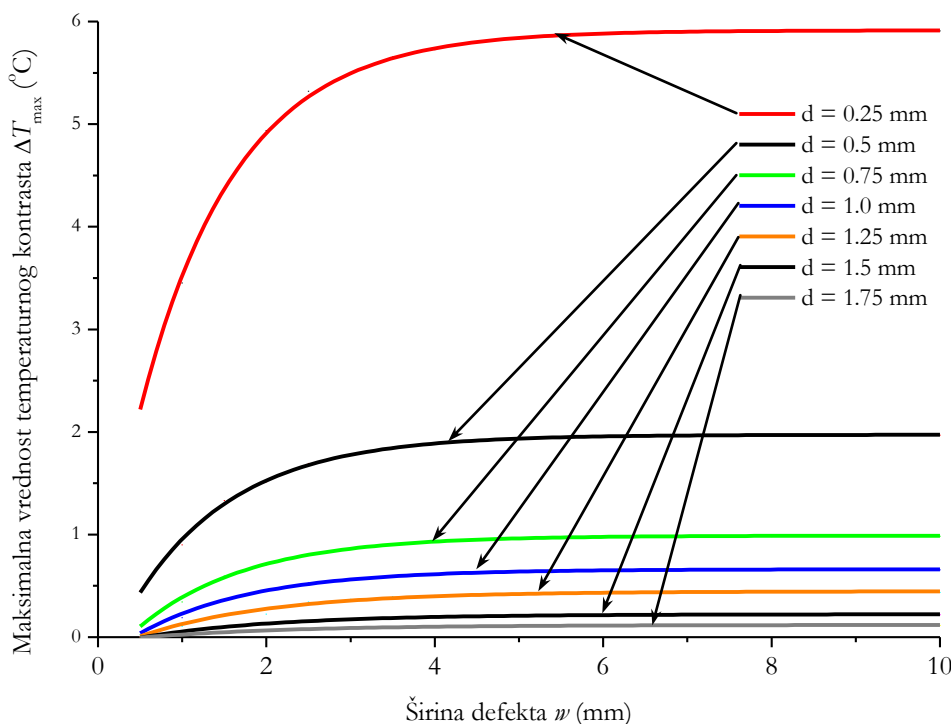
Slika 5.8: Zavisnost vremena dostizanja maksimalnog temperaturnog kontrasta od širine defekta $t_{\max} = f(w)$: Dubina defekta se kreće od $d = 0.25$ (mm) u koraku od 0.25 (mm); do $d = 1.75$ mm.

Rezultati vremena dostizanja maksimalnog kontrasta za defekte poznate širine $w = 4$ (mm) na različitim dubinama, prikazani su u Tabeli 5.7. U tabeli su predstavljene i parametri najboljeg fita linearne zavisnosti $t_{\max}(w) = A_0 + A_1 \cdot w$.

Tabela 5.7: Parametri najboljeg fita zavisnosti vremena dostizanja maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta t_{\max} za poznatu širinu $w = 4$ (mm), linearnom funkcijom: wA_0, A_1, R^2 . Dubina defekta: $d = 0.25$ mm; 0.5 mm; 0.75 mm; 1.0 mm; 1.25 mm; 1.5 mm i 1.75 mm.

d (mm)	$t_{\max}(w)$	A_0	A_1	R^2
0.25	7.456	-0.372	4.1514	0.9979
0.5	10.86	2.3771	4.3425	0.9982
0.75	13.71	5.1338	4.3043	0.9972
1.0	15.41	6.7744	4.3021	0.9956
1.25	16.96	8.3362	4.2497	0.9965
1.5	19.27	10.474	4.2686	0.994
1.75	20.72	11.522	4.4156	0.9932

Linearna zavisnost vremena izvedenog iz temperature, određena je na osnovu odgovarajućih vremena dostizanja maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta i dubine defekta. Poređenje izvedene vrednosti širine defekta sa realnim vrednostima prikazanim u Slici 5.1 i prikazanim u Tabeli 5.8.



Slika 5.9: Zavisnost vremena dostizanja maksimalnog temperaturnog kontrasta od širine defekta $t_{\max} = f(w)$: Dubina defekta se kreće od $d = 0.25$ (mm) u koraku od 0.25 (mm); do $d = 1.75$ mm.

Na Slici 5.9 prikazane su zavisnosti $t_{\max} = f(w)$, za poznate dubine defekta. Osnova određivanja vrednosti dubine defekta za poznatu širinu defekta, izvedena je na osnovu kalibracione linearne zavisnosti za dati materijal aluminijumske ploče i vremena dostizanja maksimalne vrednosti od poznate širine w .

Da bi verifikovali prikazani prilaz, defekti periodične strukture sa ravnim dnom, izrađeni su na različitim dubinama od 0.5 (mm), 1 (mm) i 1.5 (mm) i širine 4 (mm) od aluminijuma. Eksperimentalni uslovi bili su isti za sve primere dubina defekta.

Zavisnosti temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(w)$ od prostorne frekvencije defekta f_w (lp/mm) lepo se fituje nelinearnom eksponencijalnom funkcijom modela (*ExpAssoc*) iz programa OriginPro 8, koja ima oblik jednačina 5.6:

$$\Delta T_{\max} = y_0 + A1 \cdot \exp\left[-\frac{w}{t1}\right] \quad (5.8)$$

U Tabeli 5.4 prikazani su parametri najboljeg fita za vrednosti dubine defekta koji odgovaraju vrednostima na Slici 5.8.

Tabela 5.8: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} funkcijom *ExpDec1*: Offset y_0 , pojačanja $A1$ i konstanta slabljenja $t1$. Dubina defekta: $d = 0.25$ mm; 0.5 mm, 0.75 mm, 1.0 mm, 1.25 mm, 1.50 i 1.75 mm. Širina defekta $w = 4$ mm.

d	ΔT_{\max} (°C)	y_0	$A1$	$t1$
0.25	4.94	5.91369	-5.71341	1.1478

0.5	1.516	1.97272	-2.32399	1.21195
0.75	0.7083	0.98964	-1.30315	1.29027
1.0	0.4503	0.66166	-0.90092	1.36182
1.25	0.2261	0.44672	-0.59988	1.58515
1.5	0.1283	0.22315	-0.30952	1.62975
1.75	0.06255	0.11889	-0.16407	1.7743

Procedura određivanja veličine defekta metodom impulsne videotermografije (eng. *Pulse Video Thermography* – PVT), [Ludvig 33] je uobičajena za nedestruktivno testiranje materijala i struktura. U literaturi su poznati različiti modeli koji opisuju zavisnost u vremenu promene termalnog kontrasta za materijale sa podpovršinskim defektima. U slučaju pravougaonih defekata sa periodičnom strukturom vremenska zavisnost poluširine na pola maksimuma (eng. Full width half maximum – FWHM) za termalni kontrast ΔT (t) analiziran je teoretski i eksperimentalno. Odlično slaganje između veličine defekta između eksperimentalnih rezultata i numeričke simulacije bio je poznat.

6. Temperaturna modulaciona transfer funkcija

6.1 Definicija temperaturne modulacione transfer funkcija

Metoda impulsna termografija PT (Pulse Thermography) je usled brzog razvoja i jednostavnosti postala veoma moćan alat u ispitivanju potpovršinskih defekata. Osetljivost metode PT je ograničena dubinom ispitivanih defekata u materijalu. Pa je primenljivost metode PT ograničena na otkrivanje karakterističnih vrsta defekata čiji su odnosi prečnika i dubine (takozvani aspektni odnos) reda 1 i veći.

Da bi se proširila primenljivost metode PT na otkrivanje i dubljih defekata ispod posmatrane površine ispitivanog materijala, program infracrvene termografije izvan ove granice obuhvata nekoliko pristupa optimizacije koliko optimizacionih pristupa. Ovi pristupi se mogu svrstati kao (1) optimizacija zasnovana na analizi i rutinama procesiranja, kao što su korišćenje filtera za procesiranje slike sa lokalnim statičkim proračunima [2] (ovaj rad spada u ovu kategoriju) i manipulacija oblikom, trajanjem i amplitudom impulsa u impulsnim termografskih rutinama kao u [4,5].

Napredna tehnika filtriranja je nastavak koncepta termalne modulacione transfer funkcije (Thermal Modulation Transfer Function [1] TMTF), što omogućava da kritične veličine defekta w (širina defekta) na određenoj dubini d bude određena za određeni tip defekta uzorka. Kalibracioni standardi (uzorci) sa programiranim defektima se često koriste za procenu performansi instrumenata za NDE i za modelovanje njihovih performansi na realnim uzorcima (ispitnim komadima). Nažalost, koncept kritične veličine defekta w u termografiji komplikuje činjenica da se ona povećava kao funkcija dubine usled bočne difuzije termalne energije dalje od defekta. U praksi, uzorci se tipično procenjuju od slučaja do slučaja. Iako se često koriste kalibracioni standardni uzorci, oni se uzimaju prilično doslovno i samo su indikator performanse na uzorcima koji su skoro identični kalibracionom standardnom uzorku.

U vidljivoj oblasti elektromagnetskog spektra, modulaciona transfer funkcija (MTF) se dosta koristi da opiše performanse optičkog sistema. MTF se definiše kao stepen modulacije izlaznog signala određenog cilja test mete (određena grupa linijskih parova), izražena kao funkcija prostorne frekvencije cilja, ili ekvivalentno kao Furijeova transformacija funkcije širenja tačke (PSF). Kada se zna MTF za određeni optički sistem, može se koristiti za predviđanje rezultatne modulacije za ciljeve sa proizvoljnim sadržajem prostorne frekvencije. Iako MTF pruža izuzetno korisna sredstva za procenu performanse optičkog sistema za formiranje slike, ne odražava sposobnost termografskog sistema za formiranje slike da otkrije defekte ispod površine. U termografskom slučaju, kontrast podpovršinskih defekta (ispod površine koja se posmatra) zavisi od faktora koji uključuje dubinu defekta x , bočne dimenzije defekta w , i ukupnu debljinu uzorka L .

TMTF je zasnovana na odnosu između kontrasta ili modulacije i aspektnom odnosu (položaj) defekta koji se karakteriše prostornom frekvencijom ili širinom najuže dimenzije defekta. Kalibracioni uzorak (Slika 4.3.) labavo zasnovan na standardu AF 1951 za razlaganje ciljeva konstruisan je da demonstrira TMTF (u praksi, da bi se ostvario ekvivalentni rezultat može se koristiti jednostavniji uzorak sa kanalom ravnog dna (defekt u obliku šupljine).

Uzorak je tanka planparalelna aluminijumska ploča debljine $L = 2$ mm sa 6 grupa kanala koje želimo da vidimo, urezanih sa zadnje strane - suprotne strane planparalelne

ploče u odnosu na stranu na kojoj se nalaze pobudni izvor i IC detektor malih temperaturnih razlika. Svaka od 6 grupa nalazi se na istoj dubini, svih 6 grupa ponovljene su na još dve različite dubine.

Uzorak-meta je aluminijumska ploča debljine 2 (mm) sa 6 grupa kanala-proreza koje želimo da vidimo, urezanih sa zadnje strane - druge strane planparalelne ploče. Svaka grupa defekata sastoji se od N_d vertikalnih žljebova - kanala i $N_d - 1$ vertikalna međudefektnih oblasti iste širine kao i žljebovi i nalaze se na istoj dubini ispod površine uzorka. Širina svakog proreza jednaka je rastojanju između proreza. Za svaku dubinu postoje grupe meta velike i male prostorne frekvencije f_w . Kombinacije dubina defekta i prostornih frekvencija rezultuju sa 6 određenih aspektnih odnosa (u ovom slučaju, odnos širine kanala sa dubinom), u opsegu od 8 do 2 za I grupu, od 4 do 1 za II grupu i od 2,67 do 0,67 (Tabela 4.3).

U stvari sposobnost razlaganja pojedinačnog linijskog elementa smanjuje se za dublje ciljeve, sa smanjenjem kontrasta između linija mete i pozadine, i sa zatamnjenjem prostora između linija mete usled bočne difuzije. Ustvari, nije moguće vizuelno razložiti pojedinačne linije mete za grupu III, koja ima najmanji aspektni odnos ($a = 2.67$ i manji).

Kombinacija dubine i prostorne frekvencije može se koristiti za definisanje „termografske MTF“. Na slici 4.3, 4.4 i 4.5, modulacija svake grupe meta je nacrtana kao funkcija bezdimenzionog parametra Q , gde je

$$Q = \frac{1}{d \cdot f_w} = 1/\text{dubina} \times \text{prostorna frekvencija} \quad (6.1)$$

Modulacija je izračunata pomoću varijacije tradicionalne definicije, gde je je

$$M_i = \frac{\sum [I_i(\text{kanala})/3 - I_i(\text{prostora})/2]}{\sum [I_i(\text{kanala})/3 + I_i(\text{prostora})/2]} \quad (6.2)$$

Ova definicija ne zavisi od referentne tačke i koristi periodičnost grupa meta. Amplitude pre-bljeska svakog I_i je oduzeta, tako da su moguće vrednosti M_i od 0 do 1. Puna linija pokazuje fitovanje najmanjim kvadratima od pune linije do podataka sa $R^2 = 0,9765$ i ukazuje da aspektni odnos defekta daje razuman pokazatelj razloživosti defekta. Ne znači ništa što iako postoji merljiv stepen modulacije za svaku grupu mete ispod vrednosti praga elementi cilja nisu vizuelno razloživi. Uopšteno, tačno određivanje praga zavisi od psiho - vizuelnih faktora i zahteva analizu verovatnoće detekcije sa ljudima posmatračima. Ipak, jasno je da za ovaj skup podataka ispod približno 4% modulacije nije više moguće razložiti pojedinačne elemente cilja. Kao posledicu slike 5 definiše minimalni razloživi aspektni odnos za razmatrani tip uzorka.

Tabela 6.1: Potpovršinska rezolucija parametri meta.

Grupa I w (cm)	Dubina defekta d (cm)	Prostorna frekvencija f_w (linije/cm)	Aspektni odnos
0.4	0.05	1.25	8.00
0.3	0.05	1.67	6.00
0.25	0.05	2.00	5.00
0.2	0.05	2.50	4.00
0.15	0.05	3.33	3.50
0.1	0.05	5.00	2.00

Grupa II	Dubina defekta	Prostorna frekvencija	Aspektni
w (cm)	d (cm)	f_w (linije/cm)	odnos
0.4	0.1	1.25	4.00
0.3	0.1	1.67	3.00
0.25	0.1	2.00	2.50
0.2	0.1	2.50	2.00
0.15	0.1	3.33	1.50
0.1	0.1	5.00	1.00
Grupa III	Dubina defekta	Prostorna frekvencija	Aspektni
w (cm)	d (cm)	f_w (linije/cm)	odnos
0.4	0.15	1.25	2.67
0.3	0.15	1.67	2.00
0.25	0.15	2.00	1.67
0.2	0.15	2.50	1.33
0.15	0.15	3.33	1.00
0.1	0.15	5.00	0.67

Iako urezani prorezi predstavljaju defekt velikog termalnog kontrasta u poređenju sa realnim defektima koji se mogu pojaviti u stvarnim pregledima, crtež na slici 5 se odnosi na "najbolji slučaj" za razloživost, tj. nije verovatno da će situacija realnog defekta premašiti pokazanu performansu. Informacije dobijene iz analize rezolucionog cilja mogu se uopštiti na ostale uzorke istog tipa (npr. 0,5 inča deo čelik, pripreme površine rastvorljivom crnom bojom) sa defektima proizvoljne veličine, oblika i dubine. Naravno, pošto parametri kao što su nivo ulazne snage, osetljivost detektora ili priprema površine variraju treba generisati novu TMTF.

6.1.1 Temperaturna modulaciona transfer funkcija za periodične defekte

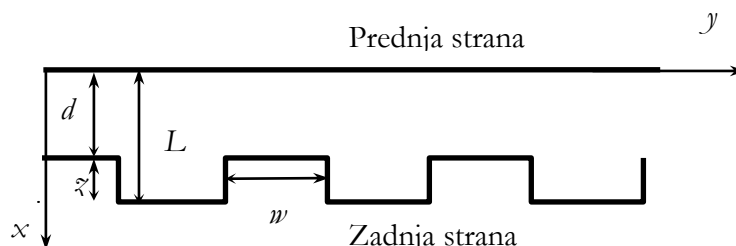
Temperaturna modulaciona transfer funkcija se može definisati po analogiji sa modulacionom transfer funkcijom (MTF) u optici. Temperaturnu modulacionu prenosnu funkciju (eng. *thermal modulation transfer function* - TMTF)[55], prema izrazu (5.3):

$$M = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (6.3)$$

Modulacija (TMTF) je definisana kao količnik razlike i zbira maksimalne i minimalne temperature (T_{\max} , T_{\min}) u temperaturnom profilu duž centralne linije LI01. Naravno, ova funkcija se menja sa vremenom. Najpre raste, odvija se toplotna difuzija u x - pravcu i potom njeno kratkopravno zadržavanje na gornjoj površini žljeba formirajući temperaturni kontrast na posmatranoj površini aluminijumske ploče. Temperaturna modulaciona transfer funkcija M , dostiže maksimum i zatim opada (difuzija u y - pravcu čini da kontrast nestane). Geometrijski faktori: d/L , w/d i eventualno faktor anizotropije a_y/a_x , su parametri koji uzrokuju da termička modulaciona prenosna funkcija (TMTF) dostiže veće ili manje vrednosti, ranije ili kasnije u vremenu u zavisnosti od dubine defekta.

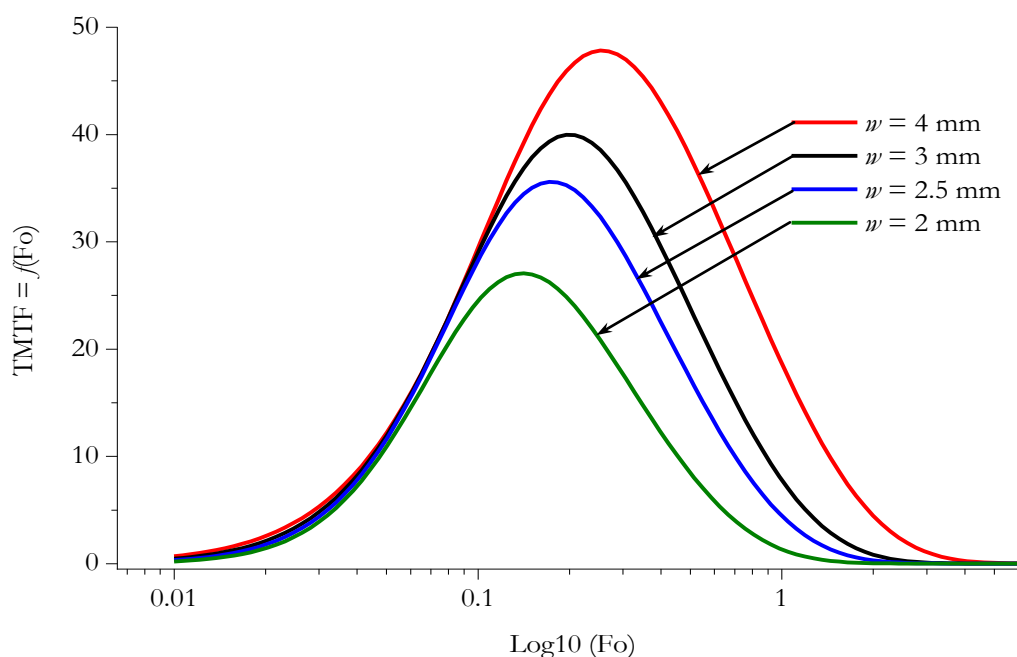
Posebni uzorci (fizički model) bili su korišćeni za dobijanje eksperimentalnih rezultata, na jednoj strani aluminijumske ploče imaju izrađene žljebove podjednako razmaknute, praveći periodičnu defektnu strukturu (videti [Slike 3.1 i 6.1](#)). Primenjena ploča sa više paralelnih žljebova (određene prostorne frekvencije f_w), koji su uzrađeni na zadnjoj strani njihova dubina d u aluminijumu se meri od prednje strane. Prednja strana se greje

svetlosnim impulsom i njeno temperaturno polje se prati. Ukupna debljina aluminijumske ploče L i dubine žljeba $L - d$, je označena sa z (merena sa zadnje strane) a njihova širina je w . Ako je širina žljeba jednaka rastojanju između njih, prema analogiji za periodične "ciljeve" u merenjima optičke rezolucije se kaže da je korak periodičnosti 0.5. Jedan linijski par po ugledu na test mete u optici sačinjavaju žljeb i rastojanje između 2 susjedna žljeba. U poređenju sa optičkim ciljevima, "termički cilj" ima tri dimenzije: mora se uzeti u obzir dubina d periodične strukture defekata (žljebova).



Slika 6.1: Šema periodičnih defekata u obliku žljebova u materijalu.

Očekuje se da niz žljebova iste prostorne frekvencije daje manji temperaturni kontrast $\Delta T(Fo_L)$ sa porastom dubine defekta do prednje površine d . Temperaturna raspodela na površini ploče je takođe periodična sa prostornom frekvencijom f_w a toplotna slika defekta na prednjoj površini je funkcija koja se menja u vremenu.



Slika 6.2: Zavisnost temperaturne modulacione transfer funkcije $TMTF = f(Fo)$: Na ordinati su date vrednosti TMTF u (%) prema jednačini (5.3) za test ploče širine $w = 4$ (mm), 3 (mm), 2.5 (mm) i 2 (mm) na istoj dubini od $d = 0.5$ (mm).

Razmatranje temperaturne modulacione funkcije definisane prema izrazu (6.3) može biti olakšano uvođenjem bezdimenzionih parametara: relativne dubine d/L , Fourier-ovog broja prema debljini ploče Fo_L (ili prema debljini materijala do dubine defekta Fo_d), i normalizovane frekvencije f_w :

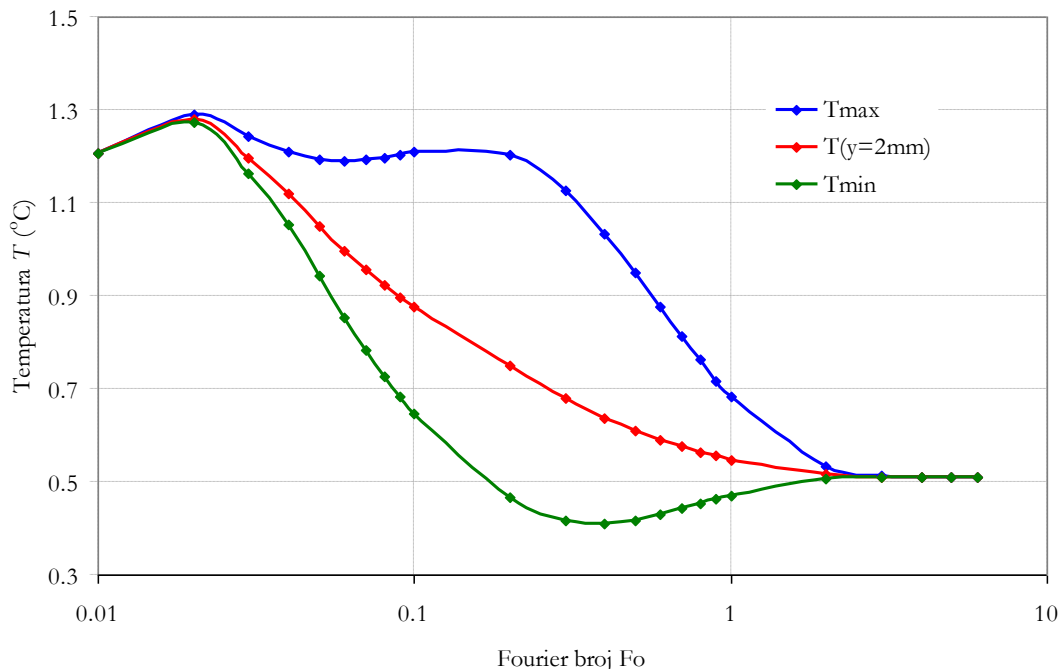
$$Fo_L = \frac{a_x t}{L^2} \quad (4.4)$$

$$f_w = \frac{L}{2w} \sqrt{\frac{a_y}{a_x}} \quad (6.5)$$

gde je L ukupna debljina aluminijumske ploče, a_y i a_x su difuzivnosti u ravni (y pravac) i normalne - pravac x ose (ploča materijala koji se ispituje može biti anizotropna). Naglasimo da se generisanja rešetke sa neuniformnom gustinom čvorova (oblasti sa dve različite gustine) formira na osnovu specifikacije geometrijskih i termičkih parametara modela: d/L , f_w i termalne difuzivnosti a .

Na Slici 6.2 prikazana je promena TMTF od $\text{Log}_{10}(Fo)$ za četiri test ploče sa najplićim defektima. Vremenska zavisnost TMTF $f(Fo)$ pokazuje maksimalnu vrednost za različite vrednosti Fo (u različitim trenucima dostizanja maksimalnog temperaturnog kontrasta ΔT_{\max}). Vremensku promenu TMTF za četiri određene vrednosti širine defekta w i $d/L = 0.25$ (25% zdravog materijala do defekta). Na istoj slici se može videti da se za široke žljebova dobija veća temperaturna modulacija. Istovremeno, maksimalna vrednost funkcije $M(Fo_1)$ se javlja za veće vrednosti Fourier-ovog broja. Dostizanje maksimalne vrednosti $M(Fo_1)$ zavisi od relativne dubine d/L , a ne od normalizovane frekvencije f_w .

Da bi verifikovali prikazani prilaz, izvršeno je poređenje krive numeričke simulacije i eksperimentalnih podataka a defekti periodične strukture sa ravnim dnom, izrađeni su na različitim dubinama od 0.5 (mm), 1 (mm) i 1.5 (mm) i iste širine 4 (mm) u aluminijumu. Eksperimentalni uslovi bili su isti za sve primere dubina defekta.

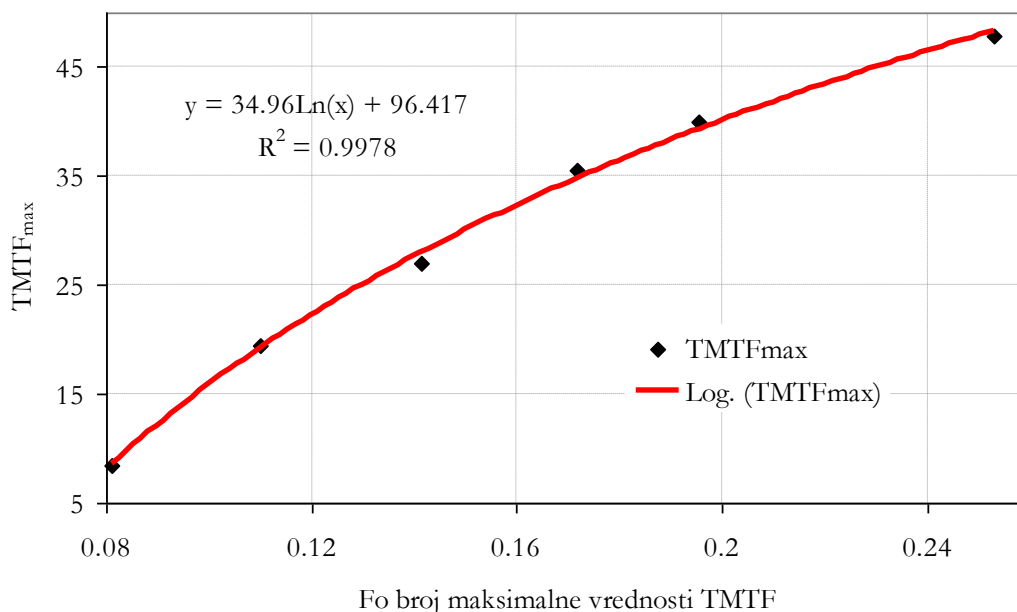


Slika 6.3: Zavisnost temperature od Fourier - ovog broja (Fo): T_{\max} je temperatura na sredini žljeba, T_{\min} na sredini između dva žljeba i $T(y = 2 \text{ mm})$ temperatura na graničnoj ivici između dva žljeba, za TP13 kad koje je širina žljeba $w = 4$ (mm) i dubina $d = 0.5$ (mm). Maksimalna vrednost temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = 1.214$ (°C).

Za aluminijumsku ploču debljine 2 (mm) sa periodičnom strukturom defekata funkcija TMTF(%) je ista za vrednosti manje od $\text{Log}_{10}(Fo) = 0.03$ i za vrednosti veće od 1.25, a

između dostiže različite maksimalne vrednosti prema širini defekta w za istu dubinu defekta. U opsegu $Lod_{10}(Fo)$ ima istu vrednost za sve širine defekta za dubinu od 0.5 (mm).

Grafici na [Slici 6.3](#) prikazani su na drugačiji način upotrebom ranijih termografskih podataka za obrazovanje temperaturnog odraza defekta. Naglasimo i to, da bi se dobili detaljniji podaci o karakteristikama defekata periodične strukture sa visokim prostornim frekvencijama moraju se "generisati" termogrami čim difuzija toplote stigne do defekta na dubini d . Temperaturni odraz širih defekata se zadržava duže vreme, i dobijaju se više vrednosti temperaturne modulacije za defekte periodične strukture niske frekvencije.



Slika 6.4: Zavisnost maksimalne vrednosti temperaturne modulacione transfer funkcije od Fo njegovog dostizanja: Fo_{max} se menja od vrednosti 0.081 najužih defekata (širine 1 mm) do 0.25 najširih defekata (širine 4 mm).

Na [Slici 6.4](#) prikazana je kriva zavisnosti maksimalne vrednosti $TMTF_{max} = f(Fo)$ za istu dubinu defekta $d = 0.5$ (mm) i za promenljivu širinu defekta od $w = 1$ (mm), 1.5 (mm), 2 (mm), 2.5 (mm), 3 (mm) i 4 (mm).

Zavisnosti maksimalne vrednosti temperaturne modulacione transfer funkcije od Fo za različite širine defekta na istoj dubini defekta lepo se fituje nelinearnom funkcijom modela (*Pulse*) iz programa OriginPro 8, koja ima oblik:

$$TMTF_{max} = y_0 + A \cdot \left(1 - \exp \left[-\frac{Fo_{max} - x_0}{t_1} \right] \right)^p \exp \left[-\frac{Fo_{max} - x_0}{t_2} \right] \quad (6.6)$$

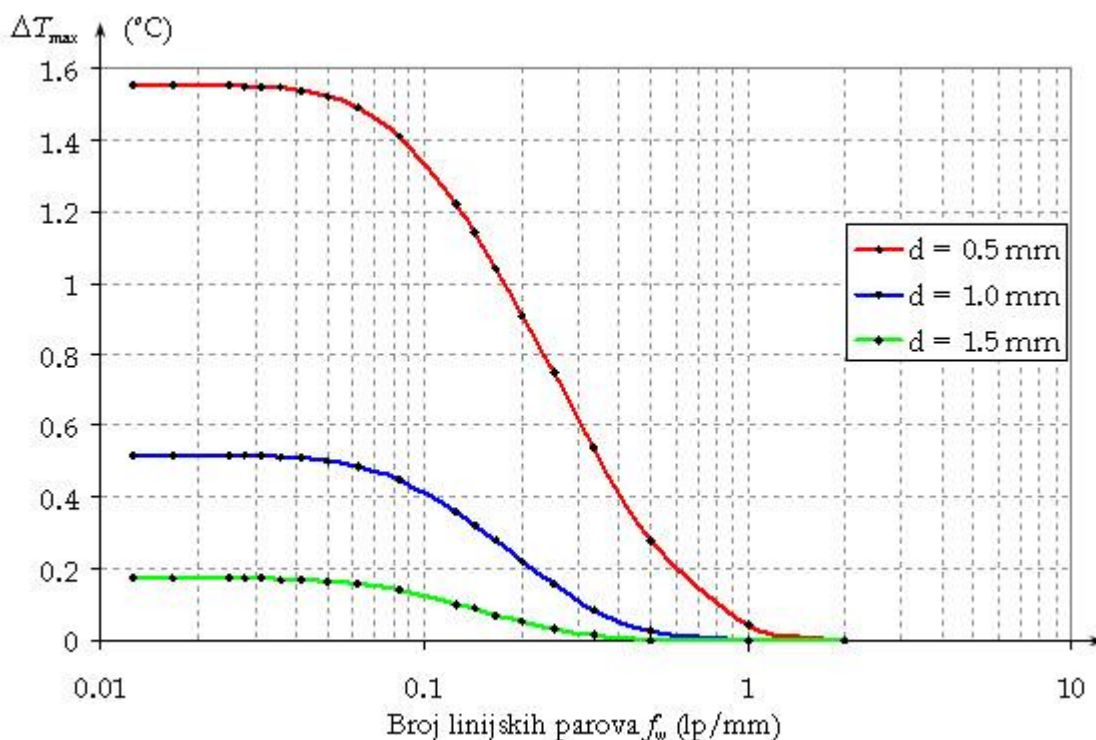
U [Tabeli 6.2](#) prikazani su parametri najboljeg fita za promenljive vrednosti širine defekta koje odgovaraju vrednostima na [Slici 6.4](#).

Tabela 6.2: Parametri najboljeg fita maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta $TMTf_{max}$ funkcijom *Pulse*: Offset y_0 , centar x_0 , pojačanje A , širine t_1 i t_2 . Širina defekta: $w = 4$ mm; 3 mm, 2.5 mm i 2 mm. Parametri x_0 i y_0 su bili tokom fita stalno jednaki 0.

$TMTF_{max}$ (%)	w 4.0 (mm)	w 3.0 (mm)	w 2.5 (mm)	w 2.0 (mm)
A	78.14	72.93	66.72	54.00

t1	0.09	0.07	0.06	0.05
p	2.10	2.49	2.85	0.38
t2	0.70	0.44	0.37	0.27

U cilju eksperimentalnog određivanja TMTF na test uzorcima pošlo se od analize temperature piksela duž centralne linije (pravac y ose). Za TP13 sa 6 defekata širine 4 (mm), defektna oblast ima širinu 7-8 piksela, sredina je na 4 ± 1 piksel, pa je za T_{\max} uzeta temperatura tog piksela, slično i za temperaturu T_{\min} .



Slika 6.5: Zavisnost maksimalne vrednosti promena temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(f_w)$, za iste vrednosti dubine defekta d od 0.5 (mm), 1.0 (mm) i 1.5 (mm).

Na **Slici 6.5** prikazana su 3 grafika zavisnosti maksimalne vrednosti temperaturnog kontrasta u funkciji broja linijskih parova po milimetru. Sve krive pokazuju brzo opadanje temperaturnog kontrastata kada prostorna frekvencija f_w raste. Za Fourier-ove brojeve 0.3 do 0.5, dobija se poboljšanje za najniže vrednosti f_w . Ipak, modulacija je istovremeno smanjena za frekvencije više od oko 0.5. Izabrali smo relativno kratko vreme: $FO_L=0.3$ i jedno duže: $FO_L=0.5$.

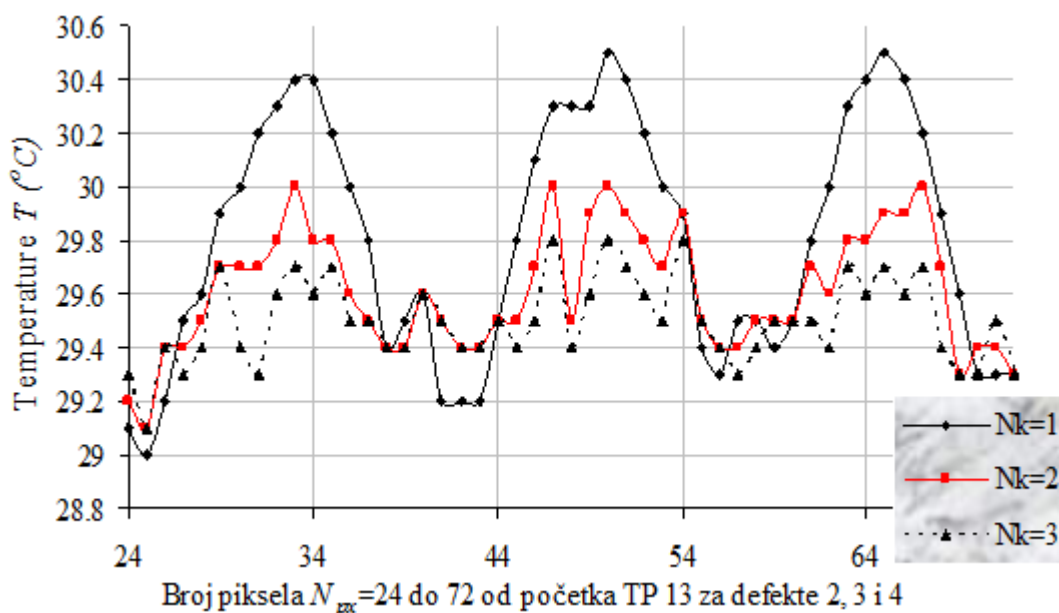
Tabela 6.3: Parametri Promena temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(w)$ u funkciji širine defekta w , za iste vrednosti dubine defekta d od 0.5 (mm) do 1.5 (mm).

w (mm)	$f_w = 1/2w$ (lp/mm)	$d = 0.5$ (mm)	$d = 1.0$ (mm)	$d = 1.5$ (mm)
40	0.0125	1.55	0.5165	0.1723
30	0.016667	1.55	0.5165	0.1723
20	0.025	1.55	0.5165	0.1721
18	0.027778	1.549	0.5162	0.172
16	0.03125	1.548	0.5157	0.1717
14	0.035714	1.545	0.5143	0.171
12	0.041667	1.538	0.5112	0.1694

10	0.05	1.523	0.5041	0.1659
8	0.0625	1.49	0.4873	0.158
6	0.083333	1.411	0.45	0.1404
4*	0.125	1.221	0.3616	0.1023
3.5	0.142857	1.14	0.3246	0.08821
3	0.166667	1.038	0.2789	0.07115
2.5	0.2	0.91	0.2232	0.05189
2	0.25	0.7472	0.1575	0.03165
1.5	0.333333	0.5392	0.08625	0.01345
1	0.5	0.2808	0.02522	0.002324
0.5	1	0.03994	0.000668	0.0000126
0.25	2	0.001298	1.22E-06	1.65E-08

* Za vrednosti širine defekta w urađeni eksperimentalni uyorci za praćenje promene $\Delta T_{\max} = f(w)$.

Na Slici 6.5 na apscisi su date vrednosti u logaritamskoj razmeri $\text{Log}_{10}(f_w)$ linijskih parova f_w (za širine defekta od $w = 0.5$ mm do $w = 40$ mm), dok je na ordinate naneta promena temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = f(f_w)$.



Slika 6.6: Izgled temperaturnog profila duž linije Li i Y=120.

Na Slici 6.6 temperaturni profil dobijen tokom eksperimenta za tri sukcesivna frejma pokazuje sve veću zašumljenost signala smanjenjem temperature iznad defekta. Temperaturni profil su temperature IC piksela duž X ose za stalnu vrednost Y ose (u ovom primeru Y=120 IC piksela) za test pločicu TP13.

Prethodno se markira IC piksel čiju temperaturu želimo da očitamo. Izvrši se očitavanje temperature piksela na istoj poziciji po koordinati Y = 120, dok se po koordinati X izaberu karakteristični pikseli u intervalu od X1 = 100 do X2 = 225.

Uzete temperature karakterističnih piksela na sredini defekta i na sredini međudefektne prostora su označene kao T_{\max} i T_{\min} . Prethodno je izvršena selekcija korisnih piksela od 17 do 111, gde je N_{pix} broj korisnih piksela od početka test pločice.

Za aluminijumsku ploču širine 50 (mm) ukupan broj IC piksela (za termovizijsku kameru SC65) je oko 120. Za date geometrijske uslove snimanja, i trenutno vidno polje od 1,3 mrad dimenzije piksela su $d_{\text{pix}} \approx 0,5279$ mm.

Temperatura iznad žljeba je, maksimalna temperatura T_{max} , respektivno temperatura između dva proreza je T_{min} . Temperatura na površini između dva žljeba najpre opadne ispod adijabatskog nivoa $T_2 = Q_0 / \rho C_p d$ i onda poraste ponovo do ove vrednosti. To je rezultat protoka toplote u x – pravcu ka zadnjoj površini i protoka toplote u y- pravcu iz oblasti iznad defekta na okolnim oblastima. Temperaturna modulacija, $M = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})$ nacrtana je zavisnost za vrednosti širine defekta w od 4 mm do 2,5 mm.

Izvršeno je određivanje TMTF Termičke modulacione prenosne funkcije upotrebom termovizijske kamere ThermoCAM SC65 [5], u opštem slučaju se svodi na merenje temperature IC piksela termograma koji generiše termovizijska kamera u uslovima vremenske rezolucije formiranja toplotne slike. Analizom sekvenci frejm po frejm i određivanja T_{max} i T_{min} , određene su termičke modulacione transfer funkcije i dati su dijagrami za test pločice 13, 14, 15 i 16.

Jedan lep način da se shvati koliko utiče efekat bočne difuzije na sliku defekta, je da se podeli TMTF sa vrednošću koja se odnosi na beskonačno nisku frekvenciju (1D model difuzije), da se dobije normalizovana modulacija. Prvi zanimljiv rezultat je da su krive u snopu, krive se skoro preklapaju. Stoga postoji vrsta generalnog trenda za TMTF najplićih proreza ($d/L \leq 0,5$, tj. onih koji simuliraju koroziju u njenom najranijem stadijumu), normalizovana TMTF opada od 1 do 0, u funkciji normalizovane prostorne frekvencije za najšire defekte f_w , između otprilike 0.1 i 1. Za $Fo_L = 0,5$ normalizovane TMTF počinje da opada čak iza niže vrednosti f_w .

Termička difuzija se očigledno ponaša kao nisko propusni filter. A Slika 6.5 pokazuje na naročit način dobro poznatu osobinu da se defekti male širine teško mogu otkriti termičkim metodama.

6.1.2 Inverzni pristup u impulsnoj videotermografiji

Kad se dobije MTF, može se pokušati upotrebiti za inverznu namenu, kao u vizuelnom ili IC formiraju slike. Naravno, ovde je prosto transponovanje - premeštanje procedure koje je samo validno za linearni proces. Ovde je funkcija "degradacije" ta koja povezuje kao ulaz, temperaturno polje na prednjoj površini koje bi se dobilo u odsustvu laterarne difuzije, i kao izlaz, stvarno, "zamrljano" temperaturno polje. Može se razmatrati normalizovana TMTF, kao *Fourier*-ova transformacija ove funkcije "degradacije". Od te tačke može se primeniti inverzna procedura pomoću npr. Wiener-ovog inverznog filtriranja. Polazeći od stvarnog temperaturnog polja, tj. polja degradiranog lateralnom difuzijom, očekuje se da inverzno filtriranje pruži temperaturnu raspodelu bez lateralne difuzije. Ovakvo virtuelno polje će stoga dati oštriju predstavu pružanja defekata. Ova procedura je primenjena na temperaturno polje dobijamo pomoću modela korišćenog u prvom delu, tj. periodične strukture defekata (Slika 3.1). Ovo "degradirano" pogoršano polje je skoro sinusoidalna funkcija za $Fo_L = 0,3$ (visoke frekvencije su dosta prigušene). Bez bočne difuzije, dobila bi se funkcija sa 2 nivoa (visoki nivo iznad žljeba i nizak nivo između njih).

Rekli smo da za primer idelalnog 1D provođenja toplote za pobudni svetlosni impuls *Dirac*-ovog oblika jednačina može biti rešena uz dva uslova: (a) za fazu zagrevanja gde treba uzeti u obzir samo stranu koja se greje i tada se primenjuje polubeskonačni model i (b) u fazi hlađenja se posmatra razlika temperatura u funkciji vremena.

$$T_2 = \frac{Q_0}{\rho C_p \cdot d} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-n^2 \pi^2 F_o) \right] \quad (5.4)$$

$F_o = at/d^2$ je *Fourier*-ov broj u uzorku. Fizičko značenje *Fourier*-ovog broja će biti jasnije, ako se uzme npr. u obzir da je *Fourier*-ov broj $F_o = 1$ i da to odgovara termalnom propagacionom vremenu $t = d^2/a$ termalnog fronta do dubine defekta d .

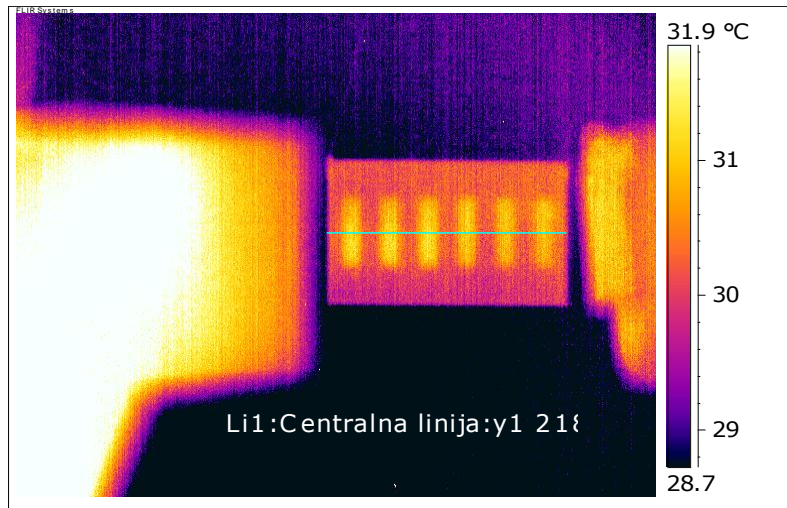


Slika 6.7: Slike 2 aluminijske pločice sa strane simuliranih defekata: a) Test ploča TP14 sa 8 defekata u obliku žljeba i b) Test ploča TP13 sa 6 defekata.

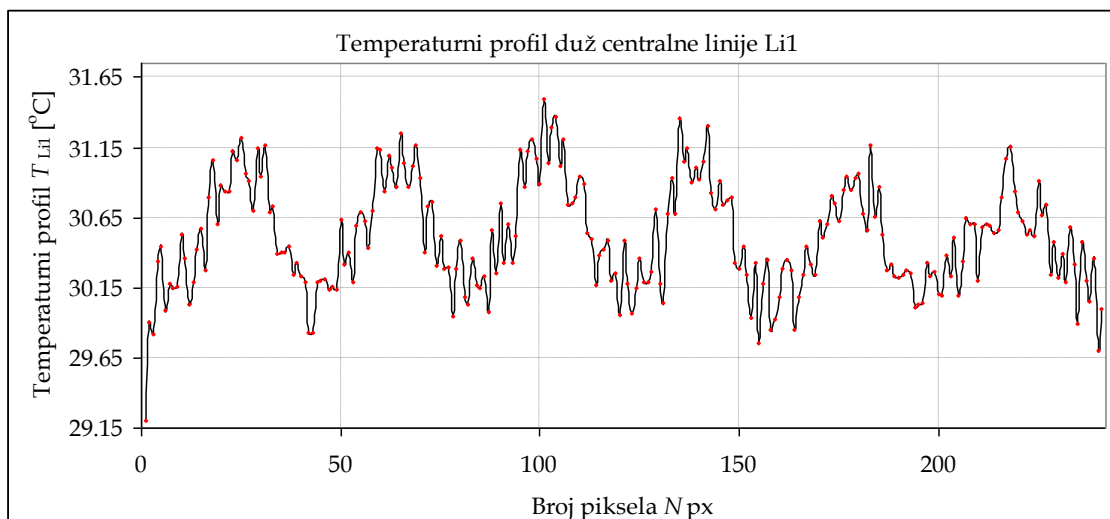
$$\mu \cdot \int_0^{\infty} Q(t) dt = \rho C_p \cdot d \cdot T_{\infty} \Rightarrow \mu \cdot Q_0 = \rho C_p \cdot d \cdot T_{\infty} \quad (6.3)$$

6.2 Analiza pomoću centralne linije termograma

Za analizu je korišćena samo centralna linija normalna na žljebove, kao što je prikazana na slici 6.1 [20]. Temperaturni profili $T_{LI01} = f(N_{pix})$ duž centralne linije LI01 je uziman za analizu iz svakog frejma.



(a)



(b)

Slika 6.8: Temperaturni profil duž centralne linije normalne na žljebove na prednjoj strani aluminijumskog uzorka TP13, u prvom frejmu sa povišenom temperaturom.

Na **Slici 6.1** pod (a) predstavljena je IC slika – termogram, koji je dobijen analizom snimljene sekvence frejm po frejm, dok je na istoj slici pod (2) dat temperaturni profil duž centralne linije Li1 normalne na žljebove širine $w = 4$ (mm), dužine $b = 15$ (mm) i dubine od posmatrane strane ploče do dna žljeba. Temperaturni profil je ustvari skup temperatura piksela u IC slici koji su poređani duž centralne linije normalnoj na žljebove sa pozicijom piksela X, Y čije su koordinate date u Tabeli 6.1.

Tabela 6.4: Eksperimentalni uslovi: Sekvenca NEW 0040.SEQ je snimljena 26. 08. 2008 na ETF u Beogradu, termovizijskom kamerom ThermaCAM SC640 u 14:57:57.

IC Kamera: Minimalni opseg merenja temperature	-40.0 (°C)
IC Kamera: Maksimalni opseg merenja temperature	120.0 (°C)
Centralna linija Li1: Leva Pozicija - X	311
Centralna linija Li1: Leva Pozicija - Y	218
Centralna linija Li1: Desna Pozicija - X	551
Centralna linija Li1: Desna Pozicija - Y	218
Centralna linija Li1: Maksimalna temperatura T_{\max}	31.3 (°C)
Centralna linija Li1: Minimalna temperatura T_{\min}	29.4 (°C)
Centralna linija Li1: Razlika temperatura $T_{\max} - T_{\min}$	1.9 (°C)
Centralna linija Li1: Emisivnost	0.92
Centralna linija Li1: Rastojanje od objektiva do test pločice	2.0 (m)

6.2.1. Koncept prostorne učestanosti

Da bi se omogućio jednoznačni pristup analizi prostorne rezolucije temperaturne raspodele određenom prostornom frekvencijom, uveden je koncept prostorne učestanosti. Definišimo periodičnu raspodele energije u prostoru objekta (površini test ploče), odnosno u posmatranoj IC slici.

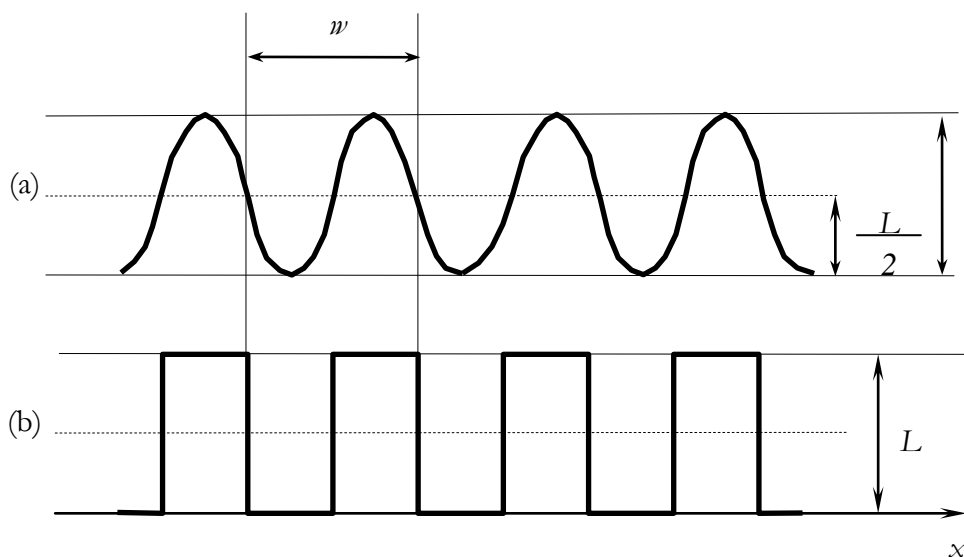
(a) *Sinusna* - prostorna raspodela radjanse u ravni test uzorka (ravni IC slike) je sinusna funkcija položaja (**Slika 6.9.** (a)) odnosno:

$$L(x) = \frac{L_0}{2} \left(1 + \sin\left(\frac{x}{w} 2\pi\right) \right) \quad (6.1)$$

gde je L_0 – amplituda, w – periode raspodele radijanse a x – tekuća koordinata položaja u slici.

(b) *Pravougaona* - prostorna raspodela je periodični raspored je periodični raspored svetlih i tamnih polja (slika 6.1. (b)) odnosno:

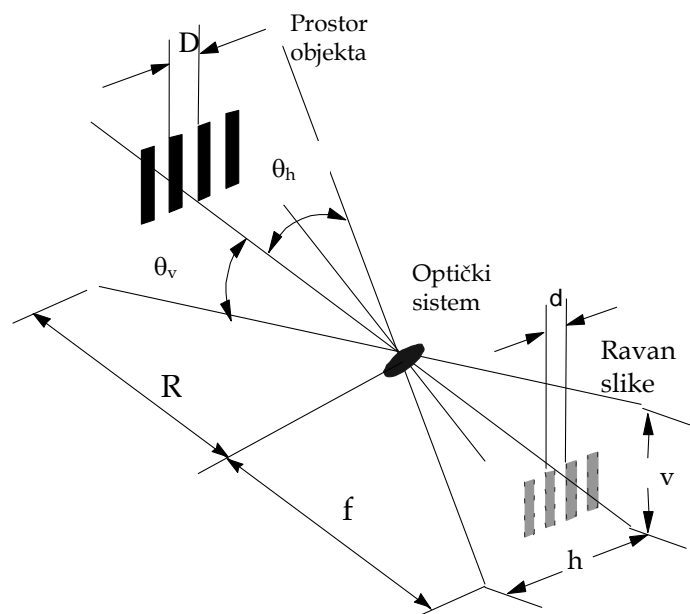
$$L(x) = \begin{cases} L_0, & x - nw \leq \frac{w}{2}, & n \text{ ceo broj} \\ L_0, & x - nw \geq \frac{w}{2}, & n \text{ ceo broj} \end{cases} \quad (6.2)$$



Slika 6.9: Periodične strukture (prostorna učestanost): (a) Sinusna - raspodela (b) pravougaona raspodela radijanse.

Između sinusne i pravougaone raspodele radijanse može se uspostaviti jednoznačna veza primenom Furijeove transformacije.

Sinusna raspodela je pogodnija za teorijsku analizu dok je pravougaona raspodela pogodnija za praktičnu realizaciju. Geometrijski odnosi detalja u prostoru objekta, površina test pločice na kojoj se vidi periodična struktura defekata i bezdefektne oblasti i ravni slike, prikazani su na slici 6.10.



Slika 6.10: Geometrijski odnosi i osnovne definicije karakteristične prostorne učestanosti.

Osnovna ćelija periodične raspodele radijanse u sceni (slici) je perioda i u slučaju pravougaone prostorne raspodele se najčešće naziva **linijski par** (temperaturni odraz defekta - žljeba i oblasti između dva žljeba). Učestanost ponavljanja osnovne ćelije u periodičnoj prostornoj raspodeli radijanse se izražava preko broja linijskih parova po jedinici dužine (lp/mm) ili preko broja linijskih parova po jediničnom uglu u okviru vidnog polja (lp/mr).

Funkcija za fitovanje promene temperature na liniji piksela T_{LI01} ima oblik:

$$T_{LI01} = T_0 + A \sin \left(\pi \frac{x - x_c}{w} \right) \quad (6.3)$$

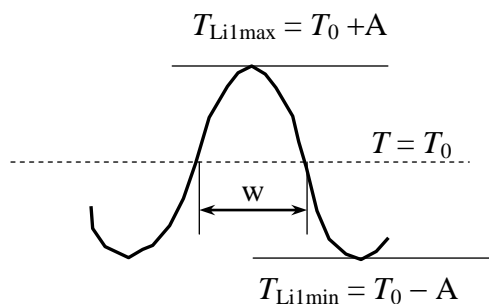
Pošto nema promena početne faze x_c i periode w , to se sinusne promene temperature duž marker linije pozicionirane po sredini test frejma sa povišenom temperaturom. Naime položaj oblik i veličina periodičnih defekata u strukturi materijala je konstantna za jedan uzorak. Temperaturni kontrast (razlika temperature oblasti iznad defekta i između defekta), izazivan pobudom blica menja se od frejma do frejma amplitudno a menja se i njena jednosmerna komponenta. Pratimo promenu temperature na površini materijala duž zamišljene marker linije LI01 povučene popreko defekata (žljebove) dužine b i širine w (videti Sliku 4.2). Širina defekta w je dvostruko manji od periode ove sinusne funkcije promenljive duž pločice $W=2w$.

Za test uzorak TP13 širina defekta je $w = 4$ (mm), pa je perida promene temperaturnog kontrasta duž centralne linije normalne na žljebove (defekate) sa periodom linijskog para od $W=8$ (mm).

Veličina piksela na rastojanju objektiv kamere - test uzorak od $R=40$ cm je $l_{pix} = 2$ mm, 240 piksela ima duž marker linije Li, pločica je širine 50 mm, pa se može izračunati dimenzija piksela $l_{pix} = 240 \text{ px}/50 \text{ mm} = 4,8 \text{ px/mm}$, odnosno $l_{pix} = 0,208$ mm. Za periodu dobijamo $W = 8 \text{ mm} \times 4,8 \text{ px/mm} = 38,4 \text{ px}$. Za ovaj uzorak eksperimentalno se dobijaju sledeće vrednosti maksimuma temperature (između prvog i drugog maksimuma) dobija se $W_1 = 40 \text{ px}$, a respektivno za sledeće maksimume $W_2 = 40 \text{ px}$, $W_3 = 38 \text{ px}$, $W_4 = 38 \text{ px}$ i $W_5 =$

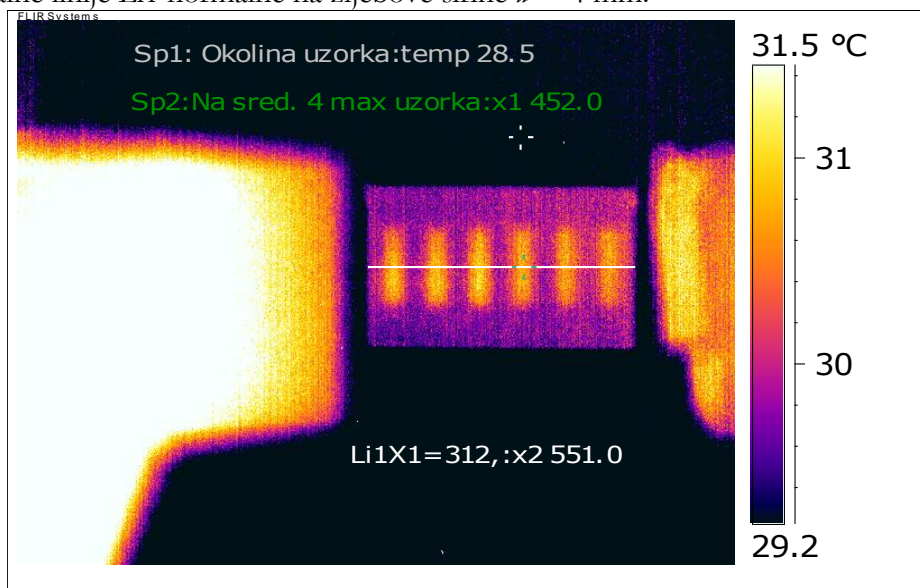
38 px. Srednja perioda je 38,8 px greška određivanja pozicije piksela sa očekivanom maksimalnom temperaturom sa greškom termičkog šuma detektora je oko 1 %.

Parametri se zadaju za sve kadrove prema rezultatima parametara za kadar sa maksimalnom temperaturnim kontrastom a to je na primer, sekvenca NEW 0039.SEQ je snimljena 26. 08. 2008 na ETF u Beogradu, termovizijskom kamerom ThermaCAM SC640 u 14:55:477, $N_f=3$.

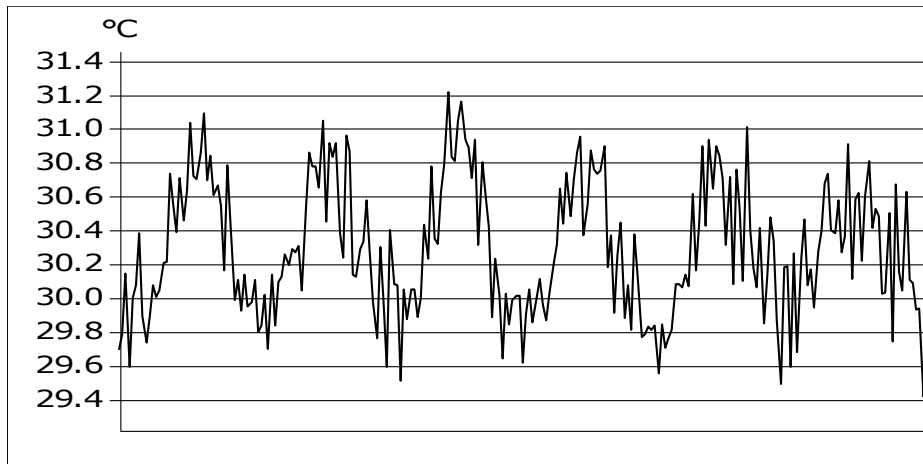


Primer krive sinusnog oblika: $A > 0$, $-W < x_c < W$, $A = 1$, $T_0 = (T_{Li1max} + T_{Li1min})/2 = (29,2 + 31,3)/2 = 30,25$ °C. Dati su kompletni eksperimentalni rezultati termogram 3 kadra sekvence NEW 0039.SEQ, temperaturni profil T_{Li1} i tabela u kojoj su dati parametri eksperimenta.

Na Slici 6.3 pod (a) predstavljena je IC slika – termogram, koji je dobijen analizom snimljene sekvence kadar po kadar, dok je na istoj slici pod (b) dat temperaturni profil duž centralne linije Li1 normalne na žljebove širine $w = 4$ mm.



(a)



(b)

Slika 6.11: Termogram uzorka TP13 za broj frejma $N_f=3$ duž marker linije Li1.

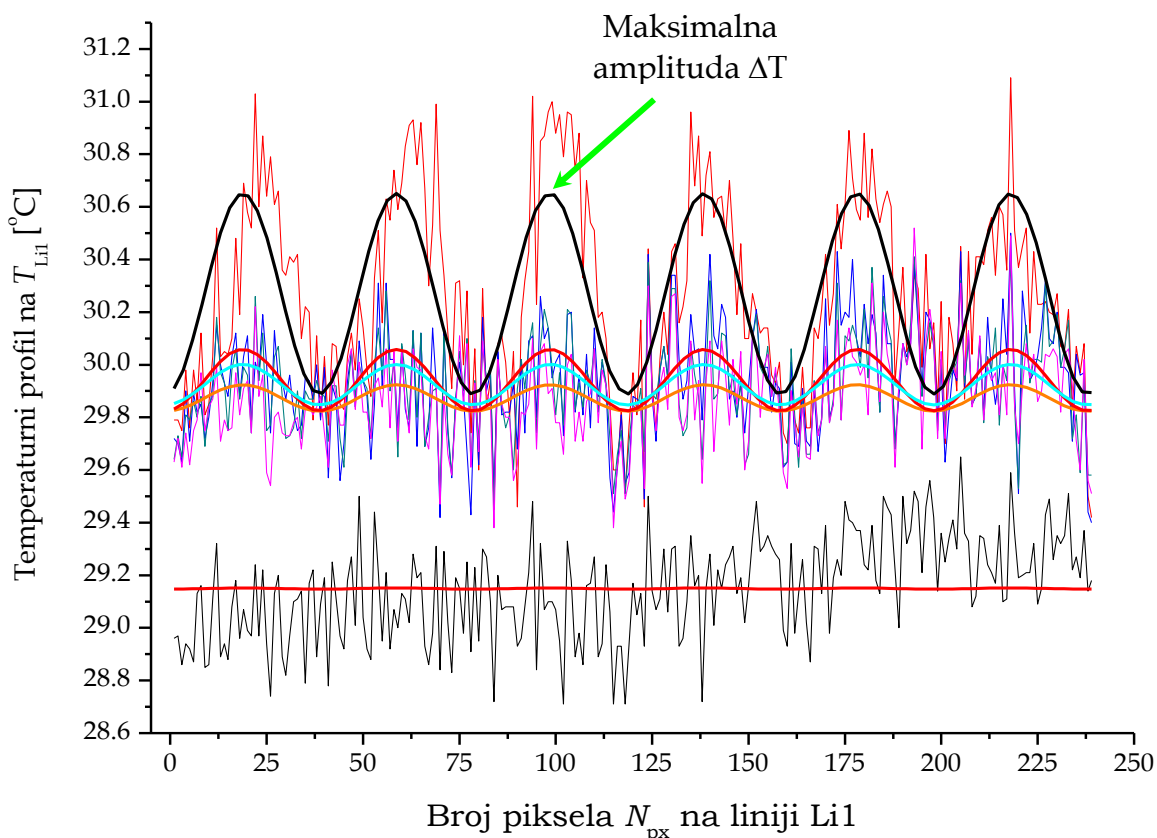
Fitovanje je izvršeno sinusnom funkcijom, napre kada su sva četiri parametra najboljeg fita promenljiva (amplituda A , početna faza x_c , perioda w i $y0$ nivo temperature offset). Dobijeni su rezultati, takvi da vrednost standardne greške određivanja amplitude A ima približno istu vrednost, a njena srednja vrednost $\sigma_{sr} = 0,017624$ °C odgovara mernoj nesigurnosti za IC kameru ThermaCAM SC640, koja se dobija i drugim metodama statističke obrade rezultata koje su primenjene u glavi 5. u delu o mernoj nesigurnosti (MN).

Potom je izvršeno fitovanje sinusnom funkcijom kada su 2 od četiri parametra (početna faza x_c , perioda w), fiksirana na konstantnu vrednost tokom obrade rezultata za sve kadrove u sekvenci. Ova pretpostavka je fizički opravdana i odgovara realnom stanju. Vrednost početne faze x_c i perioda w su za najbolji fit prvog kadra sa najbolje vidljivim defektima i zavise od širine defekta w raspoređenih na međusobno istom rastojanju. U tabeli 6.2. su navedeni rezultati fitovanja temperaturnog profila $T_{Li1} = f(N_{pix})$ duž centralne linije Li1 za istu sekvencu kao i u prethodnom delu NEW 0039.SEQ. Srednja vrednost standardne greške za slučaj kada imamo samo dva stepena slobode najboljeg fita $\sigma_{sr} = 0,018132$ °C.

Tabela 6.5: Rezultati fitovanja sinusnom funkcijom temperaturnog profila $T_{Li01} = f(N_{pix})$ duž centralne linije LI01. Parametri $w = 19.75$ i $x_c = 10.125$ su konstantni za sve kadrove N_f .

N_f	A	Standardna greška za A	$y0$	Standardna greška za $y0$	Temperaturni kontrast ΔT
0	0,0005	0,0184	29,313	0,0013	0,0009
1	0,4192	0,021	30,53	0,0146	0,8383
2	0,1236	0,018	30,113	0,01289	0,2472
3	0,062	0,017	30,018	0,01201	0,124
4	0,0263	0,016	29,976	0,01161	0,0525

U Tabelama 6.1. i 6.2. su dati rezultati eksperimenta za 2 snimljene sekvence na istoj test pločici TP 13 istom termovizijskom kamerom, pa su i standardne greške najboljeg fita su iste približno 0.018 °C.



Slika 6.12: Temperaturni profil T_{Li01} (°C) duž centralne linije normalne na žljebove, od $N_{pix} = 1$ pix do $N_{pix} = 241$ pix na prednjoj strani aluminijumskog uzorka TP13.

Crna linija - temperaturni profil $T_{Li1_fit} = f(N_{pix})$, rezultat fita sinusnom funkcijom eksperimentalnih rezultata za prvi kadar sa povišenom temperaturom.

Crvena linija (gornja) - za drugi kadar sa povišenom temperaturom.

Svetloplava linija - za treći kadar sa povišenom temperaturom.

Crvena linija (donja) – za četvrti kadar sa povišenom temperaturom.

Crvena linija – za kadar sa nižom temperaturom pre prvog kadra.

6.2.2. Fitovanje sinusnom funkcijom

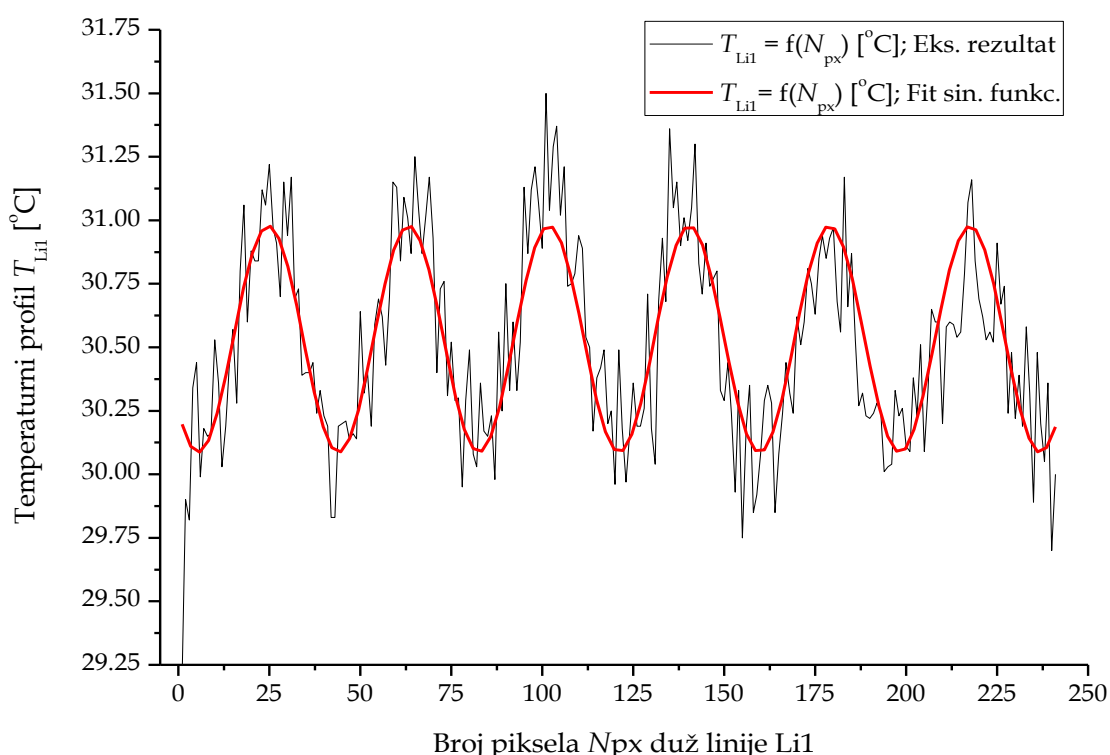
Temperaturni profili $T_{Li1} = f(N_{pix})$ duž centralne linije Li1 uzima se za analizu iz svakog frejma dobijen iz eksperimenta ima jasno vidljiv šumovit signal. U ovom radu šum je eliminisan filtriranjem svih, osim osnovne prostorne frekvencije temperaturne raspodele i iz toga su određene minimalne i maksimalne temperature na površini za taj frejm. Temperaturna razlika dobijena na ovaj način je predstavljena kao funkcija vremena u trenucima vremena koji odgovaraju brzini generisanja IC slika kamere.

Na Slici 6.1. pod (2) je prikazan je temperaturni profil centralne linije Li1 koja je pozicionirana po sredini pločice TP 13 (test pločica se nalazi u centralnom delu IC slike dimenzije 640×480 piksela), koji se fituje sinusnom funkcijom. U tabeli 6.1. su date koordinate piksela levo X1 i Y1 na početku linije LI01, dok su za piksel desno coordinate X241 i Y241.

Za analizu promene temperature IC piksela na liniji LI01 fitovanjem sinusnom funkcijom upotrebljen je program OriginPro 8. Sinusna funkcija se izabere iz većeg broja

ponuđenih nelinearnih krivih $f(x)$ u odgovarajućoj opciji za fitovanje nelinearnom krivom "Nonlinear Curve Fit" programa OriginPro 8. Izabere se sinusna funkcija "Sine function" oblika $y = y_0 + A \sin\left(\pi \frac{x - x_c}{w}\right)$, gde su parametri: y_0 , A , x_c i w . Parametar A je amplituda sinusne funkcije i $A > 0$, a x_c je početne faze, perioda je w i y_0 je nivo temperature offset.

U tabeli 6.3 su navedeni rezultati fitovanja temperaturnog profila $T_{Li01} = f(N_{pix})$ duž centralne linije LI01 za istu sekvencu kao i u prethodnom delu NEW 0040.SEQ. Uslovi fitovanja za sve analizirane frejmove N_f od 0 za frejm pre dejstva svetlosne pobude i frejm od 1 do 4 su bili isti. Parametri sinusne funkcije početna faza x_c i perioda w su imali konstantne vrednosti tokom fitovanja tako da je $x_c = 15.0717$ dobijen sa standardnom greškom 0.51527 i $w = 19.28174$ dobijen sa standardnom greškom 0.07912 iz najboljeg fita za frejm sa najvidljivijim odrazom defekta.



Slika 6.13: Temperaturni profil T_{Li01} (°C) duž centralne linije Li1 normalne na žljebove, od $N_{pix} = 1$ pix do $N_{pix} = 241$ pix na prednjoj strani aluminijumskog uzorka TP13, u prvom frejmu sa povišenom temperaturom.

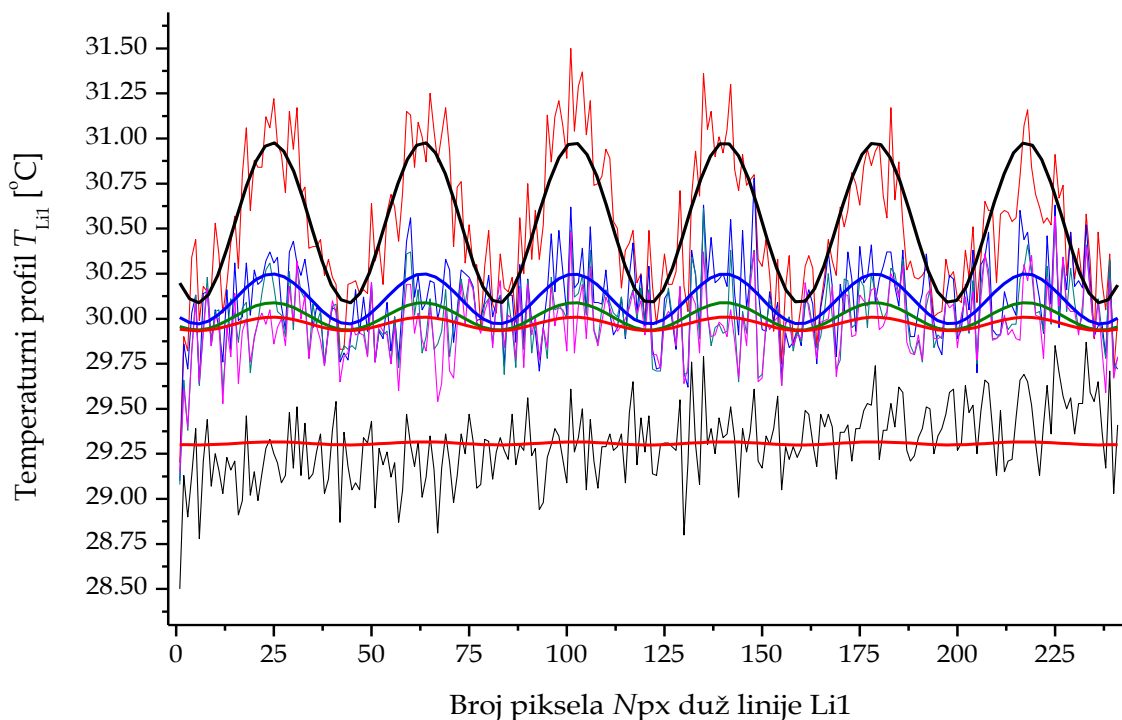
Crna linija – temperaturni profil T_{Li01} , rezultat eksperimenta. Crvena linija - temperaturni profil T_{Li01} , fitovana vrednost, rezultat fita *sin* funkcijom eksperimentalnih rezultata.

Tabela 6.6: Rezultati fitovanja sinusnom funkcijom temperaturnog profila $T_{Li01} = f(N_{pix})$ duž centralne linije Li1. Parametri $w = 19.28174$ i $x_c = 15,0717$ su konstantni za sve kadrove N_f .

N_f	A	Standardna greška za A	y_0	Standardna greška za y_0	Temperaturni kontrast ΔT
0	0,0082	0,0186	29,308	0,01331	0,01648

1	0,4459	0,0196	30,532	0,014	0,89198
2	0,1387	0,0185	30,109	0,01322	0,27758
3	0,0759	0,0174	30,013	0,01246	0,15194
4	0,0375	0,0168	29,976	0,01205	0,07518

Temperaturni profil $T_{Li01} = f(N_{pix})$ duž centralne linije LI01 normalne na žljebove, od $N_{pix} = 1$ pix do $N_{pix} = 241$ pix na prednjoj strani aluminijumskog uzorka TP13, za frejm broj $N_f = 1$ sa povišenom temperaturom dat je na Slici 6.2. Srednja vrednost standardne greške amplitude \mathcal{A} za slučaj kada imamo samo dva stepena slobode najboljeg fita $\sigma_{sr} = 0,018166$ (°C). Iz krive sinusnog oblika: za svaki frejm eliminisali smo šum filtriranjem svih osim osnovnog harmonika, naš cilj je očitavanjem amplitude \mathcal{A} da se dobije minimalna $T_{Li01min}$ i maksimalna $T_{Li01max}$ temperatura na površini za određeni frejm. Razlika minimalne i maksimalne temperature za svaki frejm (tzv. temperaturni kontrast), dobijena na ovaj način je predstavljena kao funkcija vremena u trenucima vremena koja odgovaraju brzini frejmova kamere. Razlika $\Delta T = T_{Li01max} - T_{Li01min}$, npr. za podatke iz Tabele 6.3. za drugi frejm $\Delta T = T_{Li1max} - T_{Li1min} = (T_0 + \mathcal{A}) - (T_0 - \mathcal{A}) = 2 \cdot \mathcal{A}$, pa je $\Delta T(N_f = 1) = 2 \cdot 0,44599 = 0,89198$ °C.



Slika 6.14: Temperaturni profil T_{Li01} (°C) duž centralne linije Li1 normalne na žljebove, od $N_{pix} = 1$ pix do $N_{pix} = 241$ pix na prednjoj strani aluminijumske ploče TP13.

Crna linija - temperaturni profil $T_{Li01_fit} = f(N_{pix})$, rezultat fita sinusnom funkcijom eksperimentalnih rezultata za prvi frejm sa povišenom temperaturom.

Plava linija - za drugi kadar sa povišenom temperaturom.

Tamno zelena linija - za treći frejm sa povišenom temperaturom.

Crvena linija (gornja) – za četvrti frejm sa povišenom temperaturom.

Crvena linija (donja) – za frejm sa nižom temperaturom pre prvog frejma.

Gausov šum se eliminiše fitovanjem sinusnom funkcijom uzimanjem samo osnovnog harmonika a filtriranjem svih ostalih. Harmonijska analiza pruža mogućnost nalaženja:

efektivne vrednosti, srednje kvadratne vrednosti i odnosa efektivne vrednosti signala $S_{\text{eff}}/N_{\text{eff}}$ (temperaturni profil T_{LI01} (°C) duž centralne linije LI01 normalne na žljebove), i efektivne vrednosti šuma.

Cilj analize sinusnom funkcijom na pločici koja se hladi procesom toplotne difuzije sa konstantnom fazom i prostornom frekvencijom, može da bude merenje šuma. Cilj određivanje minimalnih uslova da može doći do detekcije defekata i dobijanje spektralnih karakteristike za promenljivu širinu defekta na raznim dubinama defekta. Standardne greška σ brojčano odgovara efektivnoj snazi šuma.

7. Zaključak

U ovoj doktorskoj disertaciji je korišćena impulsna termografija sa standardnom termovizijskom kamerom da bi se eksperimentalno posmatrali simulirani defekti u specijalno pripremljenim test uzorcima, pri čemu su karakteristični parametri defekta menjani da bi se ispitao njihov uticaj na mogućnost otkrivanja defekta. Defekti su imali periodičnu strukturu koja je značajno olakšala analizu termalne slike. Ispitivanje je bilo fokusirano na maksimalnu temperaturnu razliku na površini test uzorka koja se javlja nakon zagrevanja svetlosnim impulsom, koju nije bilo moguće dobiti eksperimentalno.

Pri merenju je nedostajala vremenska referenca, jer nije bilo moguće sinhronizovati frejmove kamere sa svetlosnim impulsom za zagrevanje. Još jedan faktor je doprinosa nemogućnosti eksperimentalnog određivanja maksimalne temperaturne razlike na površini uzorka – ona se mogla pojaviti u bilo kom trenutku između dva frejma, zavisno od parametara defekta.

Da bi dobili maksimalnu temperaturnu razliku na površini test uzorka fizički model i numerički kod koji simuliraju procese termalnog prenosa u materijalu razvijeni su i prilagođeni geometriji test uzorka. U disertaciji je razvijena metodologija određivanja maksimalnog temperaturnog kontrasta.

Test pločice sa simuliranim defektima u obliku periodične strukture su relativno jednostavnog geometrijskog oblika pa je stoga bilo opravdano koristiti uprošćen matematički model sa jednom ćelijom u programskom paketu MATLAB[®]. Geometrija i uslovi eksperimenta omogućavali su dvodimenzionalno modelovanje prostiranja toplote metodom konačnih razlika.

Odlično slaganje između eksperimentalnih i numeričkih rezultata je potvrdilo ispravnost i fizičkog modela i numeričkog koda. U ovoj doktorskoj disertaciji to je korišćeno za računanje zavisnosti maksimalne temperaturne razlike na površini test uzorka od dubine defekta, za različite širine defekta u aluminijumskoj ploči. Numerički kod može dalje biti korišćen za ispitivanje mogućnosti otkrivanja defekta u zavisnosti od drugih parametara defekta i u drugim materijalima, ali takođe i za određivanje termalnih osobina materijala.

Disertacija sadrži teorijsku analizu fizičkih procesa u uzorku u toku i nakon osvetljavanja svetlosnim impulsom. Formiranje fizičkog modela, njegov opis odgovarajućim matematičkim jednačinama odnosno formiranje matematičkog modela, numeričku simulaciju procesa transporta toplote u uzorku i, na kraju, eksperimentalnu proveru i verifikaciju dobijenih rezultata.

Ovde treba istaći, da je posebna pažnja posvećena metodologiji kako samog eksperimenta, tako i prikupljanju i obradi dobijenih rezultata.

Metodologija istraživanja sastojala se u sledećem:

- detaljno je proučen i analiziran proces difuzije toplote u materijalu u okolini defekta;
- model provođenja toplote u periodičnim strukturama aluminijumske ploče, razvijen u disertaciji, primenjen je na impulsnu infracrvenu termografiju u nedestruktivnoj defektoskopiji;
- izrađeni su specijalni test uzorci od aluminijuma sa simuliranim defektima periodične strukture;

- sprovedena je odgovarajuća metodologija snimanja komercijalnom termovizijskom kamerom prilagođena uzorcima i svetlosnom izvoru,
- eksperiment je ponovljen sa četiri različita modela komercijalnih termovizijskih kamera a termogrami iste test pločice su upoređeni i pokazana je jasna zavisnost metode od kvaliteta termovizijske kamere;
- upoređeni su rezultati dobijeni numeričkom simulacijom i eksperimentalni rezultati i izvedeni odgovarajući zaključci.

Oprema koja je korišćena pri istraživanju je komercijalna, ali predstavlja poslednju reč u razvoju IC tehnologije. Karakteristike te opreme su iskorišćene do samog maksimuma, a ostvaren je novi i originalni način njene primene, tj. razvijena je metoda impulsne termografije sa standardnom termovizijskom kamerom za masovnu primenu u industriji.

Doktorska disertacija je, u osnovi, eksperimentalnog karaktera, što je u istraživanje unelo niz eksperimentalnih problema koji su uspešno rešeni. Dobijeni rezultati eksperimentalnih istraživanja su detaljno analizirani, posebno oni koji se odnose na najpliće i najdublje defekte, da bi se pokazao uticaj bočne difuzije toplote na obrise defekata na površini materijala test pločice.

Izvršena je sveobuhvatna sistematizacija eksperimentalnih rezultata po širini defekta periodične strukture za različite dubine.

Svi dobijeni rezultati potpuno su novi, tako da su doprinosi disertacije u ovoj oblasti originalni i sastoje se u sledećem:

- sumirani su i sistematizovani rezultati iz oblasti primene impulsne IC termografije objavljeni u dostupnoj literaturi;
- razvijen je fizički model apsorpcije i transporta toplote u uzorku sa periodičnom strukturom defekata;
- razvijen je numerički kod u programskom paketu MATLAB[®] za izračunavanje temperaturnog polja u elementarnoj ćeliji periodične strukture defekata, čija je validnost eksperimentalno potvrđena;
- otklonjena je teškoća u analizi termograma prouzrokovana nemogućnošću kontinualne akvizicije podataka termovizijskom kamerom, i to tako što su eksperimentalni rezultati fitovani krivom dobijenom numeričkom simulacijom;
- definisana je temperaturna prenosna funkcija po analogiji sa optičkom prenosnom funkcijom;
- temperaturna prenosna funkcija je iskorišćena za analizu slike temperaturnog polja, na osnovu koje se detektuju defekti u materijalu nevidljivi na njegovoj površini;
- unapređena je metoda impulsne termografije pri primeni standardne termovizijske kamere, i to tako što je povećana njena osetljivost pogodnom obradom termovizijske slike.

Sagledavanjem ciljeva istraživanja, postavljenih hipoteza i ostvarenih rezultata može se konstatovati da je uspešno odgovoreno na sva bitna pitanja i dileme koje suštinski proizilaze iz obrađivane problematike i da je ukazao na puteve daljeg rada.

U toku istraživačkog rada na doktorskoj disertaciji naučni doprinosi su verifikovani saopštavanjem ukupno 18 radova, od toga jedan rad je objavljen u međunarodnom

časopisu sa SCI liste, osam radova je prezentovano na međunarodnim konferencijama i devet radova na domaćim konferencijama.

Sveobuhvatan i sistematizovan pregled rezultata dosadašnjih istraživanja, koji je neophodan za sticanje punog uvida u trenutno stanje u oblasti detekcije defekata primenom impulsne termografije, kao i definisanje i uvođenje u analizu temperaturne prenosne funkcije, biće od velike koristi za dalja istraživanja u ovoj oblasti. Kako je u disertaciji unapređena jedna metoda koja se već koristi u industriji, može se očekivati da će rezultati disertacije naći značajnu primenu u preksi.

8. Literatura

- [1] Balageas D. L., Krapez J. C., and Cielo P., "Pulsed photothermal modeling of layered materials", *J. Appl. Phys.*, (1986), Vol. 59, No. 2, pp. 348-357, 15 January 1986.
- [2] Santos R., and Miranda L. C. M., "Theory of the photothermal radiometry with solids", *J. Appl. Phys.* 52 (2) 15 June 1981.
- [3] Thomas R. L., Favro L. D., Kuo P. K., and Bruno R., "Using Thermal Wave Imaging to See Below the Surface", *Photonics Spectra*, January 1993, pp. 148-150.
- [4] Reynolds W. N. and Wells G. M., "Video-Compatible Thermography", *British Journal of NDT*, (1984), January 1984, pp. 40-44
- [5] Madague X., Krapez J. C., and Cielo P., "Subsurface flaw detection in reflective materials by thermal transfer imaging", *Optical engineering*, (1991), Vol. 30, No1, pp. 117-129
- [6] Cielo P., Madague X., Deom A. A., and Lewak R., "Thermographic Nondestructive Evaluation of Industrial Materials and Structures", (1987), *Materials Evaluation*, April 1987., Vol. 45, pp. 452-465
- [7] Imhof R. E., Birch D. J. S., et al: "Optothermal transient emission radiometry", (1984), *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 17, pp. 521-525
- [8] Tam A. C., "Pulsed Photothermal Radiometry for noncontact spectroscopy, material testing and inspection Measurements", (1985), *Infrared Phys.* Vol. 25, No 12., pp. 305-313
- [9] Milne J. M. and Reynolds W. N., "Application of thermal pulses and infrared thermal imagers for observing sub-surface structures in metals and composites", (1985), *Proc. SPIE.*, Vol. 590, Infrared Technology and Applications, pp. 283-327
- [10] Williams J. H., Mansouri S. H., Lee S. S., "One-dimensional Analysis of Thermal Nondestructive Detection of Delamination and Inclusion Flaws", (1980), *British Journal of NDT*, May 1980, pp. 113-118
- [11] Tomić Lj., Livada B.: "Detekcija defekata u materijalu primenom termovizije", *XLIV ETRAN*, Sokobanja, 26-29. 06. 2000.
- [12] Tomić Lj., Livada B., i Senčanić M., : "Primena impulsne video termografije za detekciju potpovršinskih defekata u aluminijumu", *XLV ETRAN*, Bukovička Banja, Aranđelovac, 4-7. 06. 2001.
- [13] Knezević D., i Tomić Lj.: "Analiza primene termovizijskih uređaja za bezkontaktno merenje temperature površine", Semestralni rad, ETF, Beograd, jun 1988.
- [14] Knezević D., i Tomić Lj.: "Bezkontaktno merenje temperature površine", Semestralni rad /dopuna/, ETF, Beograd, jul 1988.

- [15] Milojević A., : "Talasna optika", Beograd,1970.
- [16] Sayers C. M., : "Detectability of defects by thermal non-destructive testing", *British Journal of NDT*, January 1984, pp. 28-33.
- [17] Carslaw H. S., Jaeger J. C.: "Conduction of heat in solids", (1955), *Oxford Univ. Press*, London
- [18] Lloyd J. M. : "Thermal imaging systems ", (1975), *Plenum Press*, New York
- [19] Gaussorges. G.: " LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE: Principes-Technologie-Applications", (1984), *Technique et Documentation*, Paris, (prevod na ruski – 1988) *Mir* Moskva
- [20] Livada B. : "Radiometrija optičkog zračenja: Kalibracija mernih uređaja", (1992) *Naučno-tehnički Pregled*, vol. XLII, No. 10, pp. 44-58
- [21] Livada B. : "The role of emissivity in the interpretation of thermal images", *MIOPEL 93 2nd Serbian conference on microelectronics and optoelectronics*, Niš - Serbia 26.-28. october 1993 god.
- [22] Wolfe W. L., Zissis G. J. (ed.) "The Infrared Handbook", (1978), *Office of Naval Research, Department of Navy*, Washington
- [23] Livada G. Branko: "Uticaj Mos-Burštajnovog efekta na neke parametre InSb n⁺-p fotodioda ", Magistarski rad, (1990), Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu;
- [24] Dodić Nenad: "Laserski daljinomeri u protivvazdušnoj odbrani", *Vojnotehnički glasnik*, 1/99;
- [25] Colin H. Jones, PhD, Cphys, FInstP: "Medical thermography", *IEE PROCEEDINGS*, Vol. 134, Pt. A, No. 2, February 1987;
- [26] Livada B.: "Analiza uticaja radijacionih smetnji na primenu termovizijskih uređaja", *ETRA 96.*, Budva, 4-7. Juna 1996., Sveska IV, pp 345-349
- [27] Burch S. F., Burton J.T., and Cocking S., J.: "Detection of Defects by transient thermography: A Comparison of predictions from two computer codes with experimental results", (1984), *British Journal of NDT*, January 1984., pp. 36-39
- [28] Oliver J. R., Barnes F. S., : "A Comparison of Rare-Gas Flashlamps", (1969), *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-5, No. 5, 1969. pp. 232-237
- [29] Holmsten D., "Precision Infrared On-Line Scanning for Process Control", (1986), *Proc. SPIE.*, Vol. 581, Thermosense VIII 1986., pp. 35-46, pp. 283-327
- [30] Markiewicz and Emmett: "Design of Flashlamps Driving Circuits ", (1966), *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-2, No. 11., 1966. pp. 707-711
- [31] ILC Tehnical Bulletin: No. 1., (1967), *ILC Technology air-cooled linear FLASHLAMP* 1967

- [32] Livada B. : "Karakteristike termovizijskih uređaja", (1998) *Naučno-tehnički Pregled*, vol. XLVIII, No. 4, pp. 86-94
- [33] Dr Slavko Pokorni: "Problemi primene termovizije pri merenju temperaturnih stawa", *Vojnotehnički glasnik*, 6/98;
- [34] Dr Slavko Pokorni: "Mogućnosti i ograničenja predikcije emisivnosti materijala", *Vojnotehnički glasnik*, 3/97;
- [35] Dr Slavko Pokorni: "Greška određivanja emisivnosti površi čvrstih materijala IC kamerom", *Vojnotehnički glasnik*, 4/98;
- [36] Dr Slavko Pokorni: " Greška određivanja temperature površi čvrstih materijala IC kamerom ", *Vojnotehnički glasnik*, 1/98;
- [37] Tam A. C., and Sullivan B.: "Remote Sensing Applications of Pulsed Photothermal Radiometry ", (1983), *Appl.Phys. Lett.* Vol. 43, No 4., August 1983 pp. 333-335
- [38] Uwe S., Ton. T. N. L., Heinz G. W., Bernhard S., Jürgen G., Gert G.: "Quantitative Characterization of Material Inhomogeneities by Thermal Waves", *Optical engineering*, (1997)., Vol. 36, No2, pp. 376-390
- [39] Zürcher Ch.: "IR in Building Physics", (1985), *Infrared Phys.* Vol. 25, No 112., pp. 497-503
- [40] Lang S. B.: "Theoretical Analysis of the Pulse Technique for Measuring Thermal diffusivity utilizing a pyroelectric detector", *Ferroelectrics.* Vol. 11, 1976.pp. 315-319
- [41] Williams J. H., Lee S. S.: "Thermal Nondestructive Testyng of Fiberglass Laminate Delamination and Inclusion Flaws", (1980), *British. Journal of NDT*, May 1980, pp. 113-118
- [42] Cowan R. D.: "Proposed Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperatures", *J. Appl. Phys.* Vol. 32 No. 7 July 1961. pp. 1363-1369
- [43] A Cruz U., and Trefny J. U.: "The Thermal Properties of Thin Films at Low Temperatures using an improved Heat-Pulsed Method", *J. Phys. E: Sci. Instrum.* Vol. 15. 1982. pp. 1054-1059
- [44] Nordal P. E., and Kandstad S. O.: "Visible-Light Spectroscopy by Photothermal Radiometry using an Incoherent source", (1981), *Appl.Phys. Lett.* Vol. 38, No 7., Apryl 1981 pp. 486-488
- [45] Leung W. P., Tam A. C., "Thermal diffusivity in thin films measured by noncontact single-ended pulsed-laser-induced thermal radiometry", (1984), *Optics Letterss.* Vol. 9. No.3, pp. 93-95
- [46] Degiovanni A.: "Diffusivité et méthode flash", (1977), *Rev.Gén. Therm.,Fr.* No.185, pp. 420-442

- [47] Steffens H. D., and Crostack.: "Methods based on Ultrasound and Optics for the Nondestructive Inspection of Thermally Sprayed Coatings", (1981), *Thin Solid Films*. No.83, pp. 325-342
- [48] Mazumder J., and Steen W. M.: "Heat transfer model for cw laser material processing", (1980), *J. Appl. Phys.* Vol. 52. No.2, pp. 941-947
- [49] Dallaire S., and Cielo P.: "Pulsed Laser Glazing", (1983), *Thin Solid Films*. No.108, pp. 19-27
- [50] Andreas O., Andreas M., Marios N., Constantinos C.: "Laser photothermal diagnostics of genuine and counterfeit British and United States banknotes", *Optical engineering*, (1997)., Vol. 36, No2, pp. 400-407
- [51] Franc G., Richard J. B., : "Optical Radiation Measurements: Volume 1 Radiometry", (1979), *Academic Press*, New York
- [52] Madague X., Krapez J. C., and Poussart D., "Thermographic Nondestructive Evaluation (NDE): an Algorithm for Automatic Defect Extraction in Infrared Images", *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*. (1990)., Vol. 20, No3, pp. 722-725
- [53] Busse G.: "Photothermal Transmission Probing of a Metal", (1980), *Infrared Phys.* Vol. 20, pp. 419-422
- [54] Stillwell P. F. T. C.: "Thermal Imaging", *J. Phys. E: Sci. Instrum.* Vol. 14. 1981. pp. 1113-1118
- [55] C. T. Elliott, D. Day, and D. J. Wilson: "An Integrating Detector for Serial Scan Thermal Imaging", (1982), *Infrared Phys.* Vol. 22, pp. 31-42.
- [56] Khalil Seyrafi., Hovannessian.: "Introduction to Electro-Optical Imaging and Tracking Systems", (1992), *Artech House*, Boston · London
- [57] B. Livada: "Uticaj vode na primenu termovizijskih uređaja", Doktorska disertacija, (2000), Vojnotehnička akademija VJ, Beograd.
- [58] M. N. Özişik: "Finite difference methods in heat transfer", (1994), *CRC Press, Boca Raton Ann Arbor*, London Tokyo.
- [59] Ljubiša D. Tomić: "Primena impulsne radiometrije za ispitivanje defekata u materijalu", Magistarski rad, (2001), Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- [60] Lj. Tomić, B. Livada, i M. Senčanić: "Detekcija defekata u gvožđu primenom termovizije", *Zbornik radova 46. Konferencije za ETRAN*, tom IV, 118-121, Banja Vrućica, Teslić, 4-7. 06. 2002.
- [61] M. Knežević, D. Knežević, Lj. Tomić, i M. Knežević: "Primena termovizije u medicinskoj dijagnostici", *Zbornik radova 46. Konferencije za ETRAN*, tom III, 205-208, Banja Vrućica, Teslić, 4-7. 06. 2002.
- [62] D. Knežević, Lj. Tomić, M. Knežević, M. Knežević i S. Rabrenović: "Primena termovizije u medicinskoj dijagnostici raka dojke", *Zbornik radova XLVII Konf za ETRAN*, tom III, 281-283, Herceg Novi, 8-13 juna 2003.

- [63] Lj. Tomić, D. Knežević, M. Knežević, M. Knežević i S. Rabrenović: "Lečenje retinopatije metodom koherentne optike", Zbornik radova XLVII Konf za ETRAN, tom III, 284-287, Herceg Novi, 8-13 juna 2003.
- [64] Lj. Tomić: "Primena termovizije za detekciju štetnih gasova", Zbornik radova 49. Konferencije za ETRAN, tom III, 277-280, Budva, 5-10. juna 2005.
- [65] Lj. Tomić: "Analiza primene impulsne videotermografije za otkrivanje defekata u materijalima", 2.07, 188, TOC Vojna naučno istraživačka ustanova, JUS ISO 9001, Zbornik radova, Naučno-stručnog skupa, decembar 2003.
- [66] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", ISO, (1995), [ISBN 92-67-10188-9] Geneva;
- [67] D. Stanković: "O mernoj nesigurnosti", Zbornik radova 44. konferencije ETRAN-a, tom III, 4-7 juna (2002), Banja Vrućica – Teslić.
- [68] D. Stanković: "Fizičkotehnička merenja - senzori", Univerzitet u Beogradu, 1997, Beograd, [ISBN 86-81019-58-9].
- [69] Lj. Tomić: "Detekcija defekata u materijalima primenom IC termografije", Zbornik radova, 1. Naučni skup, OTEX 2005, Odbornbene tehnologije u funkciji mira, 6-7. decembar 2005, Vojna akademija, Beograd.
- [70] Waldemar Minkina and Sebastian Dudzik: "Infrared Thermography", Errors and Uncertainties, Czestochowa University of Technology, Poland; (2009), John Wiley & sons, Ltd, [ISBN 978-0-470-74718-6].
- [71] Lj. Tomić i J. Elazar: "Termička modulaciona prenosna funkcija", MO5.5-1-4, *Zbornik radova 51. Konferencije za ETRAN*, Herceg Novi, 8-12 juna, 2007.
- [72] Lj. Tomić: "Analiza termičke modulacione prenosne funkcije", Zbornik radova, 2. NAUČNO-STRUČNI SKUP, Odbornbene tehnologije OTEH 2007, 3-5 oktobar, Beograd, 2007.
- [73] Lj. Tomić i J. Elazar: "Analiza termičke modulacione prenosne funkcije", MO5.5-1-4, *Zbornik radova 52. Konferencije za ETRAN*, Palić, 8-12 juna, 2008, [ISBN 978-86-80509-63-1];
- [74] Lj. Tomić i J. Elazar: "Detekcija defekata u materijalu primenom impulsne termografije" *Teorija i eksperimenti u Srbiji*, FOTONIKA 2009, Vinča, Beograd, 22 - 24. april, 2009.
- [75] Lj. Tomić i M. Milinović: "Jedan pristup detekciji klasifikaciji potpovršinskih defekata u materijalu", MO5.2-1-4, *Zbornik radova 53. Konferencije za ETRAN*, Vrnjačka banja, 15-18. juna, 2009, [ISBN 978-86-80509-64-8];
- [76] R. Karkalić i Lj. Tomić: "Analiza maskirnih karakteristika vojničke uniforme IC termografijom", ML2.6-1-4, *Zbornik radova 53. Konferencije za ETRAN*, Vrnjačka banja, 15-18. juna, 2009, [ISBN 978-86-80509-64-8].
- [77] Lj. Tomić and M. Milinović: "Experimental research of limits for thermal modulation transfer function", THERMAL SCIENCE, Vol. 13 (2009), No. 4, pp. 119-128, UDC:

620.1:66.085.1:772.96, DOI: 10.2298/T SC10904119T.

- [78] Lj. Tomić i M. Milinović: "Uticaj širine i dubine defekata na amplitudu temperaturnog kontrasta", Zbornik radova, 3. NAUČNO-STRUČNI SKUP iz oblasti odbrambenih tehnologija OTEX 2009, 8-9. oktobar 2009, Beograd, [ISBN 978-86-81123-40-9].
- [79] X. P. Maldague, "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing", John Wiley & Sons, Inc., New York, (2001), [ISBN 0-471-18190-0].
- [80] Z. Petrović i S. Stupar, "Projektovanje računarom metod konačnih razlika", Zavod za grafičku tehniku TMF, (1996), Beograd.
- [81] N. Matthew and O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press, (2000).
- [82] Lj. Tomić, J. Elazar and B. Milanović: "The influence of subsurface defects in material on differences in numerical and experimental detection results, applying pulse thermography", Proc. Abstr. 3rd Conference MediNano 77, 18-19 October, Belgrade, Serbia 2010, [ISBN 978-86-82441-28-1].
- [83] Lj. Tomić, J. Elazar i B. Milanović: "Numerička simulacija temperaturnog polja u impulsnoj radiometrijskoj defektoskopiji", Proc. 54th ETRAN Conference, MO1.5-1-4, 2010, [ISBN 978-86-80509-65-5].
- [84] Akbar Darabi: "Detection and Estimation of Defect Depth in Infrared Thermography Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic", Thèse, pp. 17-38, Université Laval Québec, 2000, [ISBN 0-612-55806-1].
- [85] C. Ibarra-Castanedo, M. Genest, P. Servais, X. Maldague and A. Bendada: "", NDT & E, 22 2007.
- [86] Clemente Ibarra Castanedo: "Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase", Doctor Thèse (Ph.D.), pp. 17-38, Université Laval Québec, 2000, [ISBN 0-612-55806-1].
- [87] Lj. Tomić, J. Elazar i B. Milanović: "Uticaj potpovršinskih defekata u materijalu na razlike između numeričkih i eksperimentalnih rezultata detekcije, primenom impulsne termografije", 14-8-1, Zbornik apstrakata, Konferencija Fotonika 2010, Institut za fiziku, 32, 21-23 April, Beograd, Srbija 2010, [ISBN 978-86-8244-127-4].
- [88] D. Knežević i Lj. Tomić: "Analiza brzine odziva sistema prilikom praćenja objekata IC mrežom senzora", 79-4-1, Zbornik apstrakata, Konferencija Fotonika 2010, Institut za fiziku, 31, 21-23 April, Beograd, Srbija 2010, [ISBN 978-86-8244-127-4].
- [89] Lj. Tomić, J. Elazar and B. Milanović: "Numerical Simulation of the Temperature Field in Pulse Radiometric Defectoscopy", Proc. Abstr., 14th International Conference on *AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT- 14*, 052-TH, 99, Military Technical College, Kobry Elkobbah, May 24 – 26, 2011, Cairo, Egypt.
- [90] N. Munić, D. Ostojić, Lj. Tomić, D. Pijevčević and M. Moskovljević: "Monte Carlo Simulation Method Applied for Availability Estimation of a Complex Communication Network", Proc. Abstr., 14th International Conference on *AEROSPACE SCIENCES*

- ✉ *AVIATION TECHNOLOGY, ASAT- 14*, 091-MO, 115, Military Technical College, Kobry Elkobbah, May 24 – 26, 2011, Cairo, Egypt.
- [91] D. Knežević i Lj. Tomić: "Analiza IC scene u cilju dobijanja boljih karakteristika termovizijskih uređaja", Zbornik apstrakata, Konferencija Četvrta radionica FOTONIKE 2011, 28, Kopaonik, 2. - 6. mart, 2011, [ISBN 978-86-8244-129-8].
- [92] I. Kostić, Lj. Tomić and J. Elazar: "Analiza slike snimljenih termograma primenom impulsne videotermografije", Proc. 55th ETRAN Conference, MO1.3-1-4, Banja Vrućica, 6-9 juna 2011, [ISBN 978-86-80509-66-2].
- [93] Lj. Tomić, J. Elazar and B. Milanović: "Numerical simulation of the temperature field in active infrared thermography" , Proc. 55th ETRAN Conference, MO1.4-1-4, Banja Vrućica, 6-9 Juna 2011, [ISBN 978-86-80509-66-2].
- [94] D. Ostojić, Lj. Tomić, D. Brkić i S. Pokorni: "Obezbeđenje zahtevane pouzdanosti komunikacione mreže", 14. DQM Međunarodna konferencija, Upravljanje kvalitetom i pouzdanošću, 2nd International Conference, Life Cycle Engineering and Management, ICDQM-2011, Zbornik radova–Proceedings, 401-406, 29-30 Jun 2011, [ISBN 978-86-86355-05-8].
- [95] Lj. Tomić, J. Elazar, B. Milanović: "Maximal Temperature Difference Determination in Pulse Infrared Thermography by Fitting Experimental Results with Numerical Simulation Curve", Book of Abstr. III International School and Conference on Photonics Conference, Photonica2011 66, August 29-September 2, 2011, Belgrade, Serbia, [ISBN 978-86-7306-110-8].
- [96] Lj. Tomić, J. Elazar and B. Milanović: "Characterization of subsurface defects by radiometric non-destructive defectoscopy", Proceedings, 4th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2011 pp. 587-591, 6-7 October 2011, Belgrade, [ISBN 978-86-81123-50-8].
- [97] I. Kostić, R. Karkalić and Lj. Tomić: "One approach to analysis of thermograms recorded using watershed algorithm", Proceedings, 4th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2011 pp. 575-578, 6-7 October 2011, Belgrade, [ISBN 978-86-81123-50-8].
- [98] Lj. Tomić, J. Elazar: "Comparision of Pulse Thermography and Numerical Modeling Results for a Sample with Periodic Structure of Defects", QIRT 2012 paper accepted for POSTER presentation,
- [99] K. Savić, I. Božić, Lj. Tomić, D. Panić, I. Lazić i M. D. Petrović: "Termovizijske metode u savremenom medicinskom imidžingu: prednosti i nedostaci", Zbornik apstrakata, Peta konferencija fotonike (2012), 02.-06.3.2012, Kopaonik.
- [100] Lj. Tomić, J. Elazar: "Optimizacija dubinske i prostorne rezolucije termograma u impulsnoj video defektoskopiji", Elektronski zbornik radova 56. Konferencije za ETRAN, MO4.4-1-4, Zlatibor, 11-14. juna 2012, [ISBN 978-86-80509-67-9].
- [101] I. Kostić, Lj. Tomić, A. Kovačević, S. Nikolić: "Određivanje temperaturnog kontrasta na veštački generisanim test metama", Elektronski zbornik radova 56. Konferencije za ETRAN, MO4.4-1-4, Zlatibor, 11-14. juna 2012, [ISBN 978-86-80509-67-9].

- [102] Lj. Tomić, J. Elazar, V. Damnjanović and B. Milanović: "Defect Detection in Aluminum using Pulse Thermography for a sample with Periodic Structure", ICOM 2012 paper accepted for ORAL presentation, Book of Abstracts, The 3rd International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices, ICOM 2012 269, September 3rd – September 6th, 2012, Belgrade, Serbia, [ISBN 978-86-7306-116-0].
- [103] D. Jovanović, R. Karkalić, Lj. Tomić, Z. Veličković and Z. Bajić: "Effects of the Liquid Circulation Cooling Vest on a Physiological Strain Level in Solders During Exertional Heat Stress", Scientific Technical Review, Vol.62, No.2, pp. 76-83, 2012, [UDK: 616.166-001.16:614.8.086], [COSATI: 23-04, 15-02].
- [104] Nenad D. Milošević: "Određivanje toplotne difuzivnosti i toplotnog kontaktnog otpora tankih čvrstih slojeva na podlozi laserskom impulsnom metodom", Doktorska disertacija, (2004), Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- [105] Nenad D. Milošević: "Doprinos povećanju tačnosti određivanja temperature čvrstih materijala laserskom impulsnom metodom", Magistarski rad, (1999), Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- [106] Suša Mirela: "Numerical Modeling of Pulse Thermography Experiments for Defects Characterisation Purposes", Philosophiae Doctor Thèse, (2009), Université Laval, Québec.
- [107] I. Perez, X. Han, "Pulsed thermography modeling", CP615, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D.O. Thomson and D.E. Chimenti American Institute of Physics, 0-73546-0061-X/02, 2002, 21, 564-571.
- [108] Lugin Sergey: "Algorithms for efficient and quantitative nondestructive testing by pulsed thermography", des Doktors der Ingenieurwissenschaften Dissertation, (2007), der Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- [109] Lj. Tomić, J. Elazar, B. Milanović, V. Damnjanović and A. Kovačević: "Temperature contrast enhancement techniques in pulse video thermography applications", Proceedings, 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2012 pp. 427-431, 18-19 September 2012, Belgrade, [ISBN 978-86-8123-58-4].
- [110] I. Kostić, Lj. Tomić, A. Kovačević, P. Rakonjac, and S. Nikolić: "Energy distribution on aluminium plate testing by active thermography", Proceedings, 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2012 pp. 567-569, 18-19 September 2012, Belgrade, [ISBN 978-86-8123-58-4].
- [111] Lj. Tomić, J. Elazar: "Pulse thermography experimental data processing by numerically simulating thermal processes in a sample with periodical structure of defects", *NDT & E International* 2012, xx, xxx-xxx. U procesu recenzije NDTEINT-S-12-00437[1].
- [112] G. C. Holst: "Testing and evaluation of infrared imaging systems", JCD Publishing co, Maitland, USA, 1993.
- [113] D. Sullivan: "Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method", Wiley-IEEE Press, 2000.
- [114] K. P. Möllmann, D. Karstädt, F. Pinno, M. Vollmer: "Thermal image quality –

- Visualization of spatial and thermal resolution in thermal imaging", *Leicht veränder Nachdruck aus: Inframation Proceedings Vol. 7, 79 – 91, 2006.*
- [115] G. C. Holst: "Testing and evaluation of infrared imaging systems", JCD Publishing co, Maitland, USA, 1993.
- [116] G. C. Holst: "Common sense approach to thermal imaging", SPIE, Bellingham, USA, 2000.
- [117] K. Chrzanowski: "Evaluation of commercial thermal cameras in quality systems", *Optical Engineering*, Vol. 41, No. 10, 2002.
- [118] V. Feuillet, L. Ibos, M. Fois, J. Dumoulin and Y. Candau: "Defect detection and characterisation in composite materials using active IR thermography coupled with SVD analysis and thermal quadrupole modeling", *Book of Extended Abstr. Conference QIRT 2010*, 180-181, Quebec, Canada.
- [119] M. Maj, W. Oliferuk and O. Wysocka: "Relation between defect depth and standard thermal contrast on the steel surface in pulsed thermography", *Book of Extended Abstr., Conference QIRT 2010*, Quebec, Canada.
- [120] Infrared Training Center -itc™: "Thermography Level 1 Course Manual" , Publ No 1 560 093 E, Rev 1.1 2006-01-01, published FLIR Systems AB Stockholm.
- [121] G. Grgić, I. Pušnik: "Analysis of Thermal Imagers", *Int. J. Thermophys.*, DOI 10.1007/s10765-011-0932-z, 32:237-247, 2011.
- [122] G. Vendt, M. Juurma, P. Jaanson, V. Vabson, T. Kübarsepp, M. Noorma: "Effects of Environmental Conditions on the Performance of Thermal Imagers", *Int. J. Thermophys.*, DOI 10.1007/s10765-010-0896-4, 32:248-257, 2011.
- [123] S. Nayak, H. Wang and N. B. Dahotre: "Thermography during laser surface melting of cast aluminium" , *Material Science and Technology*, Vol 20, December 2004.
- [124] C. Gruss, R. Huttner, B. K. Bein: "Theoretical and experimental analysis of a photothermal modul technique for application to moving samples", *Proceedings, 13th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry THERMO*, 18-20 June, 2003, Budapest, Hungary;
- [125] Olga Wysocka-Fotek, Wiera Oliferuk, Michal Maj: "Reconstruction of size and depth of simulated defects in austenitic steel plate using pulsed infrared thermography", *Infrared Physics & Technology*, 55 (2012), 363–367.
- [126] Parker, W.J.; Jenkins, R.J.; Butler, C.P.; Abbott, G.L. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity, *J. Appl. Phys.* 1961, 32 No9, 1679-1684.
- [127] Cowan, D.R. Pulse Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperatures, *J. Appl. Phys.* 1963, 34 No4, 926-927.
- [128] Cape, J.A.; Lehman, G.W. Temperature and Finite Pulse-Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity, *J. Appl. Phys.* 1963, 34 No7, 1909-1913.
- [129] Larson, K.B; Koyama, K. Correction for Finite-Pulse-Time Effects in Very Thin

- Samples using the Flash Method of Measuring Thermal Diffusivity, *J. Appl. Phys.* 1967, 38 No2, 465-474.
- [130] Larson, K.B; Koyama, K. Measurement by the Flash Method of Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity in Two-Layer Composite Samples, *J. Appl. Phys.* 1968, 39 No9, 4408-4416.
- [131] Leung, W.P.; Tam, A.C. Techniques of flash radiometry. *J. Appl. Phys.* 1984, 56 No1, 153-161.
- [132] Maldague, X. Non-destructive testing monographs and tracts. In *Infrared Methodology and Technology*; Gordon and Breach: New York, USA, 1994; Volume 7.
- [133] Terumi, I.; Toshimitsu I.; Toshikatsu, I. On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography, *NDT & E International* 1999, 32, 247-257.
- [134] Ziadi, A.; Galmiche, F.; Maldague, X. Pulse shaping in infrared thermography for nondestructive evaluation, *Review of Scientific Instruments* 2003, 74 No1, 411-413.
- [135] Omar, M.; Hassan, M.I.; Saito, K.; Alloo, R. IR self-referencing thermography for detection of in-depth defects, *Infrared Phys. & Tech.* 2005, 46, 283-289.
- [136] Shepard, S.M.; Lhota, J.R.; Ahmed, T. Flash thermography contrast model based on IR camera noise characteristics, *Nondestructive Testing and Evaluation* 2007, 20, 113-126.
- [137] Pickering, S.; Almond, D. Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDT techniques, *NDT & E International* 2008, 41, 501-509.
- [138] Yong-Kai, Z.; Gui-Yun, T.; Rong-Sheng, L.; Hong, Z. A Review of Optical NDT Technologies. *Sensors* 2011, 11, 7773-7798.
- [139] Plotnikov, Y.A.; Winfree, W.P. Temporal treatment of a thermal response for defect depth estimation, CP509, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D.O. Thomson and D.E. Chimenti American Institute of Physics, 1-56396-930-0, 2000, 587-594.
- [140] Ludwig, N.; Teruzzi, P. Heat losses and 3D diffusion phenomena for defect sizing procedures in video pulse thermography, *Infrared Phys. & Tech.* 2002, 43, 297-301.
- [141] Ibarra-Castanedo, Castanedo. Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase. Philosophiae Doctor Thèse, Université Laval, Québec, 2005.
- [142] Gleiter, A.; Spiessberger, C.; Busse, G. Decay time analysis in pulse thermography, *Eur. Phys. J. Special Topics* 2008, 153, 377-381.
- [143] Cielo, P. Pulsed photothermal evaluation of layered materials. *J. Appl. Phys.* 1984, 56, No1, 230-234.
- [144] Giorleo, G.; Meola, C. Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates, *NDT & E International* 2002, 35, 287-292.
- [145] Maierhofer, Ch.; Brink, A.; Rölling, M.; Wiggenhauser, H. Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental

- results and numerical simulations, *Construction and Building Materials* 2005, 19, 731-737.
- [146] Krell, T.; Brandenburg, R.; Lauterborn, E. Comparative Investigation of Pulse Thermographic and Shearographic Testing of Composite Materials, *ECNDT 2006*, Tu.4.6.1, 1-11.
- [147] Maierhofer, Ch.; Arndt, R.; Rölling, M. Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography, *Infrared Phys. & Tech.* 2007, 49, 213-217.
- [148] Omar, A.M.; Zhou, Yi.; Parvataneni, R.; Planting, E. calibrated Pulse-Thermography Procedure for Inspecting HDPE, *Research Letters in Materials Science* 2008, ID 186427, doi: 10.1155/2008/186427, 4 page.
- [149] Flores-Bolarin, J.M.; Royo-Pastor, R. Infrared thermography: A good tool for non-destructive testing of plastic materials, *5th European Thermal-Sciences Conference*, 2008, The Netherlands, 1-8.
- [150] Anghel, V.; Constantin, N.; Găvan, M.; Sorohan, Ş.; Borîtu, A. Some applications of pulse thermography in NDE of structures, *SISOM and Session of the Commission of Acoustics*, 2009, Bucharest, 65-70.
- [151] Yang, Z.; Zhang, W.; Tian, G.; Song, Y.; Li, R. Numerical Simulation and Experiment for Defect Detection of Composites by Thermal wave NDT, *International Journal of Intelligent Information Technology Application*, 2009, 2, No3, 132-135.
- [152] Wysocka-Fotek, O.; Oliferuk, W.; Maj, M. Reconstruction of size and depth of simulated defects in austenitic steel plate using pulsed infrared thermography, *Infrared Phys. & Tech.* 2012, 55, 363-367.
- [153] Ok, J.J.; Young, H.K. Application of an IR Thermographic Device for the Detection of a Simulated Defect in a Pipe. *Sensors* 2006, 6, 1199-1208.
- [154] Byoung, C.K.; Young, G.H.; Yong, K.S.; Young, H.K. Detection of Simulated Defect Using IR Temperature Sensors and One Point Heating. *Sensors* 2008, 8, 3345-3354.
- [155] Perez, I.; Kulowitch, P. Thermography for the Characterization of Corrosion Damage, *Expo 2000 National Association of Corrosion Engineers (NACE)*, 2000, Orlando, Fl., 7 pages.
- [156] Krapez, J.C. Deconvolution of thermography images obtained on corroded parts by using the thermal modulation transfer function (TMTF), *4th Int. Workshop on Advances in Signal Processing for NDE of Materials*, 2001, Québec, Canada, 1-6.
- [157] Dujardin, N.; Feuillet, V.; Fois, M.; Ibos, L.; Poilâne, C.; Candau, Y. IR Thermography: a useful tool to determine porosity in composite materials, *Proc. QIRT 2012 Conf.*, 2012, ID-248, 2 page.
- [158] Omar, M.; Hassan, M.; Saito, K.; Alloo, R. IR thermography inspection of adhesion integrity *Proc. of IMECE2004-61501 ASME Int. Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo*, 2004, Anaheim, California, USA, 1-7.
- [159] Suša, Mirela. Numerical Modeling of Pulse Thermography Experiments for Defects Characterisation Purposes. Philosophiae Doctor Thèse, Université Laval, Québec, 2009.

- [160] Krishnapillai, M.; Jones, R.; Marshall, I.H.; Bannister, M.; Raic, N. NDTE using pulse thermography: numerical modeling of composite subsurface defects, *Composite Structure* 2006, 75, 241-249.
- [161] Perez, I.; Han, X. Pulsed thermography modeling, CP615, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, edited by D.O. Thomson and D.E. Chimenti American Institute of Physics, 0-73546-0061-X/02, 2002, 21, 564-571.
- [162] Perez, I.; Santos, R.; Kulowitch, P.; Shepard, S. Modeling of pulsed thermography in anisotropic media, *25th Annual Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Conference*, 1998, Snowbird, Utah., USA, 15 pages.
- [163] Maldague, X. Active Thermography. In *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2001; Volume 9, pp. 347-352.
- [164] Poularikas, D.A.; Ramadan, M.Z. In *Adaptive filtering primer with MATLAB*, Taylor Francis Group LLC, ISBN-13: 978-0-8493-7043-4, CRC Press, USA, 2006.
- [165] Darabi, Akbar. Detection and Estimation of Defect Depth in Infrared Thermography Using Artificial Networks and Fuzzy Logic. Philosophiae Doctor Thèse, Université Laval, Québec, 2000.
- [166] Yang, Y.W.; Cao, W.; Chung, T.; Morris, J. In *Applied numerical methods using MATLAB*, John Wiley & Sons, Inc., NJ 07030, USA, 2005.
- [167] Lugin, Sergey. Algorithms for efficient and quantitative non-destructive testing by pulsed thermography, des Doktors der Ingenieurwissenschaften Dissertation, der Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2007.
- [168] Matthew, N.; Sadiku, O. In *Numerical Techniques in Electromagnetics*, ISBN-13: 0-8493-1395-3, CRC Press, 2000.
- [169] Tomić, Lj.; Elazar, J.; Milanović, B. Numerical simulation of the temperature field in active infrared thermography. *Proc. 55th ETRAN Conf.*, 2011, MO1.4, 1-4.
- [170] S. M. Shepard, T. Ahmed and B. C. Chaudhry, in *Review of Progress in QNDE*, Vol. 18, eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Plenum, New York, 1998), p.605.
- [171] R. Gonzalez and R. Woods, *Digital Image Processing*, Addison Wesley, 1992, pp. 261-289.
- [172] L. D. Favro, D. J. Crowther, P. K. Kuo and R. L. Thomas, "Inversion of Pulse-Echo Thermalwave Images", in *Thermosense XV*, Vol. 1933, ed. L. Allen (SPIE, 1993), pp. 138-141.
- [173] A. Vageswar, Krishnan Balasubramaniam, C.V. Krishnamurthy, T. Jayakumar, Baldev Raj: "Periscope infrared thermography for local wall thinning in tubes", *NDT&E International*, 42, No4 (2009), 275–282.
- [174] Martin Weiser, Marthias Röllig, ralf Arndt and Bodo Erdmann, "Development and test of a numerical model for pulse thermography in civil engineering", ZIB-Report 08-45, December 2008.

- [175] Boras, I. Svaic, S. Galovic, A. Mathematical model for simulation of defects under a material surface applied to thermographic measurements, Proc. 4th Conf. Quant. IR Therm, Lodz, Poland, QIRT 1988, pp 53-58.
- [176] Susa, M. Maldague, X. Svaic, S. Boras, I. Bendada, A. The influence of surface coatings on the differences between numerical and experimental results for samples subject to a pulse thermography examination, Proc. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Krakow, Poland, QIRT 2008.

9. Prilozi

Prilog A: Termofizičke osobine materijala

A.1 Termofizičke osobine nekih materijala

U Tabeli A.1 prikazane su vrednosti fizičkih parametara test uzorka.

Tabela A.1: Vrednosti termofizičkih parametara nekih izabranih materijala i njihove tipične maksimalne relativne neodređenosti.

Vrsta materijala	$a, 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	$\delta_a, \%$	$\rho, \text{ kg}/\text{m}^3$	$\delta_\rho, \%$	$c, \text{ J}/\text{kgK}$	$\delta_c, \%$
Aluminijum	96.8	2	2702	0.1	900	2
Aluminijum*	97.1	2	2702	0.1	903	2
Aluminijum*	77.1	2	2700	0.1	1000	2
PTFE	0.08	3	2160	0.1	1400	6
Meko gvožđe	13	2	7900	0.1	440	2
Titanijum	7.6	2	4500	0.1	470	2
Bakar	119	2	8933	0.1	385	2
Alumina	10.0	2	3960	0.1	780	2

*Izvor [13], $k=237 \text{ W}/\text{mK}$; $k=210 \text{ W}/\text{mK}$ za sloj aluminijuma.

U Tabeli A.2 prikazane su vrednosti za primer provodnih materijala.

Neka prvi primer uzorka provodnog materijala bude od aluminijuma, a njegove termofizičke osobine i neodređenosti date su u Tab. 3.1. Neka se posmatrana površina test uzorka, uniformno i u zanemarljivo maloj zapremini ($d_{\text{eff}} \rightarrow 0$), apsorbuje impuls svetlosnog zračenja eksponencijalnog oblika beskonačnog trajanja $\tau \rightarrow \infty$ i neka je apsorbovana energija po površini Q_0 .

Tabela A.2: Termofizičke karakteristike nekih materijala (Maldague 2001) [120, 45] ^a Definicija toplotne difuzivnosti, ^b Carbon Fibre Reinforced Polymer – Ugljeničnim vlaknima ojačani polimer i ^c Glass Fibre Reinforced Polymer – Staklenim vlaknima ojačani polimer.

Materijal	Specifična toplota C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	Gustina ρ (kg m^{-3})	Toplotni kapacitet $\rho \cdot C_p$ ($\text{J cm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	Toplotna provodnost k ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	Toplotna difuzivnost $a \times 10^{-6}$ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)
Vazduh (kao defekt)	700	1.2	0.8×10^{-3}	0.024	33
Aluminijum	880	2700	2.4	230	95
Mesing (65% Cu, 35% Zn)	380	8400	3.2	130	32
CFRP ^b (\perp fiberi)	1200	1600	1.9	0.8	0.42
CFRP ^b (\parallel fiberi)	1200	1600	1.9	7	3.7
Beton	800	2400	1.9	1	0.53
Granit	870	2600	3.65	2.5	1.1
Bakar	380	8900	3.4	380	110

Epoksi Smola	1700	1300	2.2	0.2	0.09
Staklo	670	2600	1.7	0.7	0.41
GFRP ^c (⊥ fiberi)	1200	1900	2.3	0.3	0.13
GFRP ^c (fiberi)	1200	1900	2.3	0.38	0.17
Olovo	130	11300	1.5	35	23
Nikl	440	8900	3.9	91	23
Pleksiglas™	1460	1190	1.7	0.18	0.107
Porcelan	1100	2300	2.5	1.1	0.43
Čelik (meki)	440	7900	3.5	46	13
Čelik (nerđajući)	440	7900	3.5	25	7.1
Teflon™	1050	2170	2.28	0.25	1.1
Titanijum	470	4500	2.1	16	7.6
Uranijum	120	18700	2.2	27	12
Voda	4180	1000	4.2	0.6	0.14
Led	2100	920	1.93	2.21	1.15
Cirkaloj 2	280	6600	1.8	13	11
Guma	1700	1300	2.2	0.2	0.09
Drvo	1250	410	0.51	0.23	0.14
Cigla	830	2600	2.17	0.823	0.38
Pluta	2000	150	0.3	0.041	0.14

Termofizičke karakteristike nekih uobičajenih materijala, kao i karakteristike vazduha kao defekta, navedene su u [Tabeli A.2](#).

Od svih termofizičkih karakteristika materijala navedenih u [Tabeli A.2](#), za nedestruktivno ispitivanja materijala IC termografijom jedan od značajnijih je toplotna difuzivnost a ($10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Navedene karakteristike toplotne difuzivnosti definisane kao $a = k / \rho \cdot C_p$, gde je k toplotna provodnost, ρ gustina i C_p je specifična toplota.

A.2 Merenje mase i gustine

Tabela A.3: Za test pločice različitih širina defekta $2w$, dubina defekta $d = 0.5 \text{ mm}$. precizna vaga iz laboratorije ML 02 TOC-a)

TP	m (g)	V_{def} (mm^3)	V_{bdef} (mm^3)	V_{TP} (mm^3)	ρ (kg/m^3)	V_{TPm} (mm^3)	ρ_m (kg/m^3)
13	6.49	540	3000	2460	2638.21	2453.13	2645.6
14	6.49	540	3000	2460	2638.21		
15	6.52	506.25	3000	2493.75	2614.53		
16	6.495	495	3000	2505	2592.8		
17	6.515	506.25	3000	2493.75	2612.5		
18	6.505	517.5	3000	2482.5	2620.3		
Σ	39.015	3105	18000	14895	2619.3		
m_{uk}	39.27	3105	18000	14895	2636.4		
					2621.53		

Tabela A.4: Za test pločice različitih širina defekta $2w$ i različitih dubina defekta d .

TP	m (g)	V_{def} (mm^3)	V_{bdef} (mm^3)	V_{TP} (mm^3)	ρ (kg/m^3)	V_{TPm} (mm^3)	ρ_m (kg/m^3)
1	7.47	180	3000	2820	2648.9		

7	7.04	360	3000	2640	2666.6
1+7+13	21	1080	9000	7920	2651.5
1+2+7+8+13+14	42.05	2160	18000	15840	2654.67
					2655.41

Iz literature je poznato da materijal Al-Si (AluSil), 70-80% Al, 20-22% Si, ima sledeće termofizičke osobine $k=159$ W/mK, 2627 kg/m³, $c_p = 854$ J/kgK.

Prilog B: Vremenska zavisnost intenziteta svetlosnog impulsa i rezultati numeričke simulacije

B.1 Tabela rezultati intenziteta svetlosnog impulsa

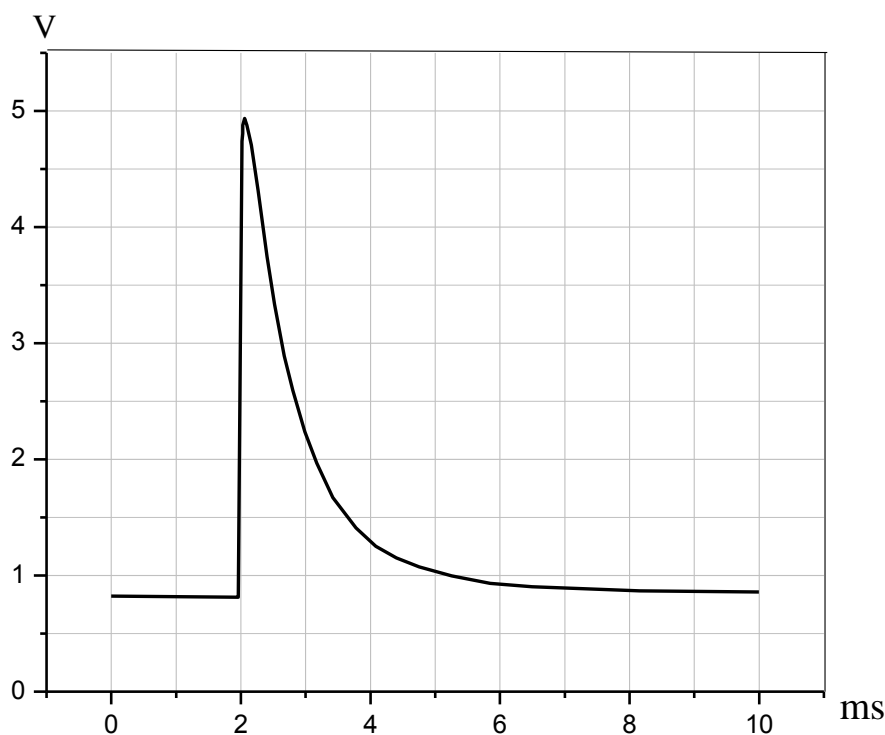
U Tabeli B.1 prikazana je zavisnost intenziteta svetlosnog fluksa u vremenu.

Tabela B.1: Intenzitet svetlosnog fluksa $Q(t)$.

Br. Mer. N_t	t [ms]	$Q(t)$
1	-2.17070810307246e-003	8.23783725115997e-001*
2	1.96096343261308e+000	8.14377323336017e-001
3	2.01649738158335e+000	4.73924368911842e+000
4	2.02949148147813e+000	4.80798277904905e+000
5	2.02931058913621e+000	4.87663142280872e+000
6	2.05550982999135e+000	4.93401951828369e+000
7	2.09518555031973e+000	4.87708365366352e+000
8	2.16151274235805e+000	4.70591427511916e+000
9	2.26793773685591e+000	4.31762886318208e+000
10	2.40119509540564e+000	3.74646129356114e+000
11	2.52085537958751e+000	3.33538344654179e+000
12	2.66695609441374e+000	2.89016216998453e+000
13	2.79948988359578e+000	2.59358917540226e+000
14	2.98487438534290e+000	2.24017076237077e+000
15	3.17004784602444e+000	1.96684243372557e+000
16	3.42115656533681e+000	1.67108345468195e+000
17	3.77757477637184e+000	1.41037236688585e+000
18	4.08102167994718e+000	1.25227246004540e+000
19	4.39749283214095e+000	1.15147020250898e+000
20	4.75342866359753e+000	1.07382216473866e+000
21	5.25428940965784e+000	9.97169034848910e-001
22	5.84734495265143e+000	9.32590468782504e-001
23	6.49301001842087e+000	9.02698009279777e-001
24	8.15317963514015e+000	8.68328464314463e-001
25	9.99773884572597e+000	8.58108046995830e-001

*2 V/cm za y osu i 1 ms/cm za x osu.

B.2 Vremenska zavisnost intenziteta svetlosnog fluksa



Slika B.1: Vremenska zavisnost impulsa svetlosnog fluksa.

B.3 Funkcije modelovanja vremenske zavisnosti intenziteta svetlosnog fluksa

Deo koda *ImpulsnaVideoTermografija.m*, koji se odnosi na matematičku funkciju svetlosnog impulsa podeljenu na 6 segmenata: I $t_f+t(2)$; II $t(2)-t(5)$; III $t(5)-t(8)$; IV $t(7)-t(10)$; V $t(10)-t(22)$; VI $t(22)-t(25)$. t_f je početak delovanja pobude $Q(t)$.

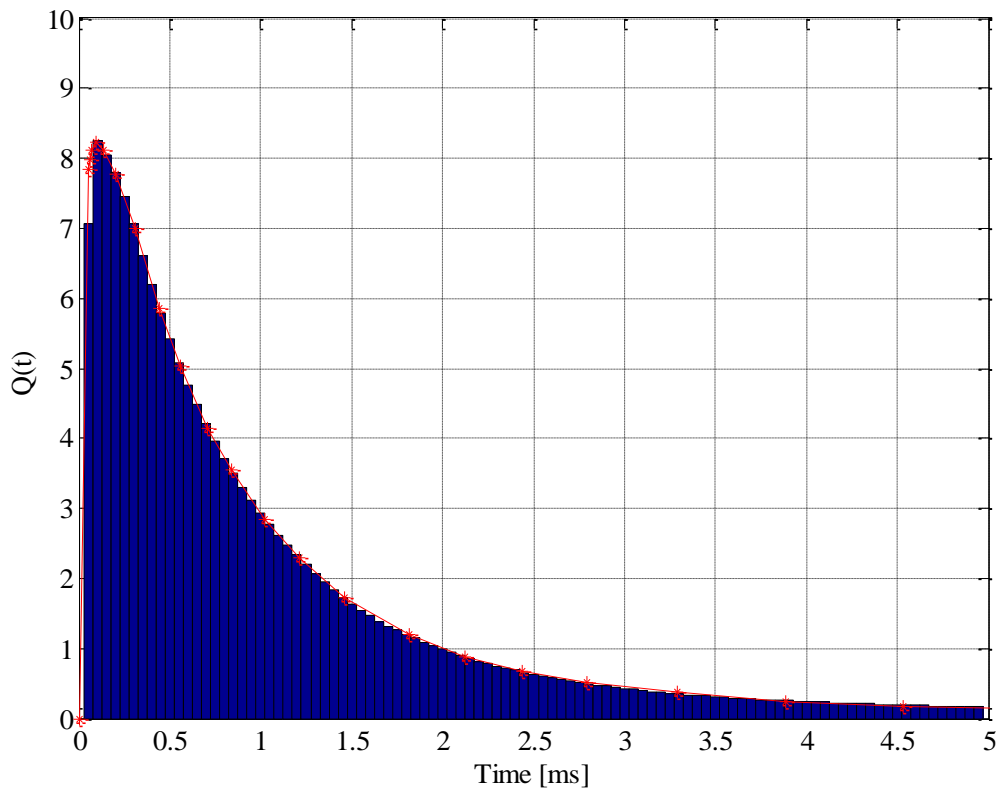
```

n=1;
for i = 0:Nit-1
    if (i*dt)<(t(2)+tf)
        Qt(n) = Q(2)*(i*dt-tf)/t(2);
        n=n+1;
    elseif (i*dt)<(t(5)+tf)
        Qt(n) = -388.65*(i*dt-tf)^2+69.1*(i*dt-tf)+5.2171;
        n=n+1;
    elseif (i*dt)<(t(8)+tf)
        Qt(n) = -12.362*(i*dt-tf)^2-1.0231*(i*dt-tf)+8.4854;
        n=n+1;
    elseif (i*dt)<(t(14)+tf)
        Qt(n) = -0.45668*(i*dt-tf)^5+1.5964*(i*dt-tf)^4-4.06*(i*dt-tf)^3+9.4018*(i*dt-tf)^2-
            14.099*(i*dt- tf)+10.552;
        n=n+1;
    elseif (i*dt)<(t(16)+tf)
        Qt(n) = 1.4694*(i*dt-tf)^2-6.2778*(i*dt-tf)+7.7472;
        n=n+1;
    else
        Qt(n) = 9.344*exp(-1.319*(i*dt-tf)) + 0.5417* exp(-0.2568*(i*dt-tf));
        n=n+1;

```

end

B.4 Rezultat vremenskog modela impulsa fotografskog blica



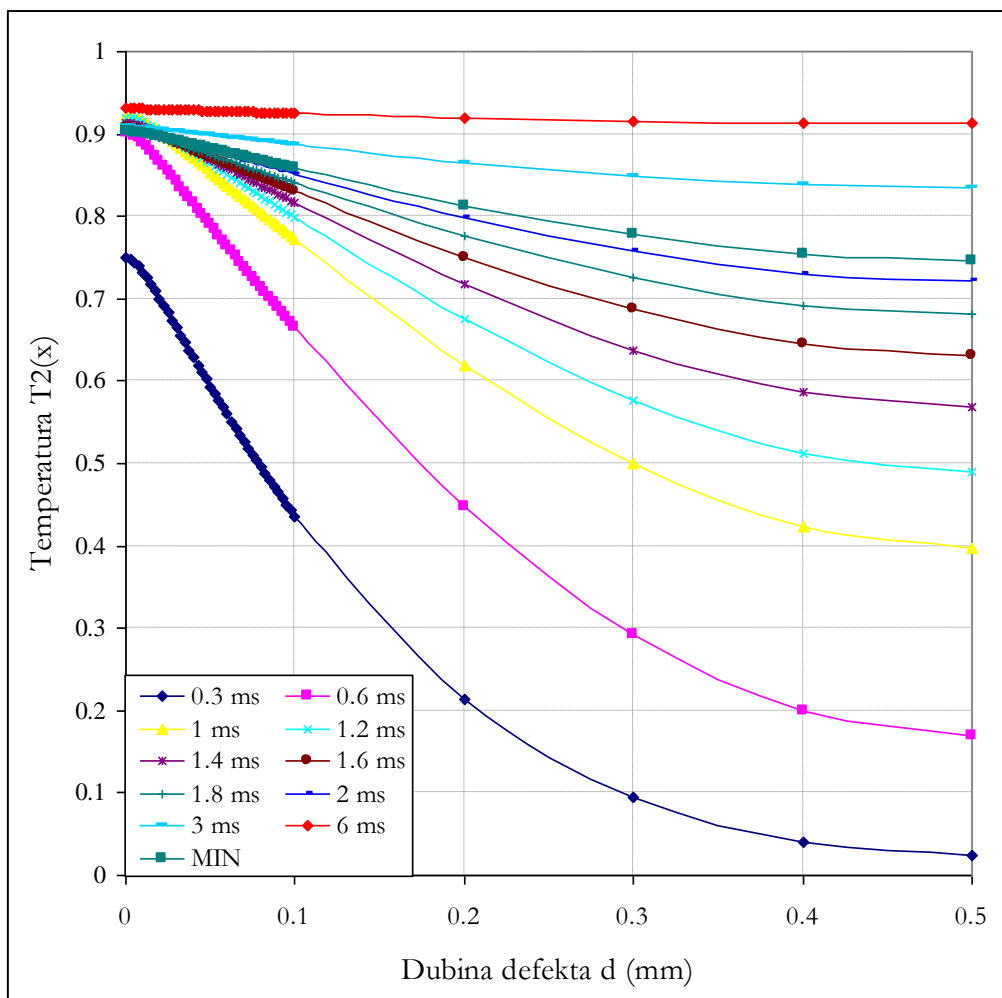
Slika D.2: Vremenski model impulsa svetlosnog fluksa fotografskog blica.

B.5 Rezultati ispitivanja stabilnosti simulacije

Program ImpulsnaVideoTermografija.m je razvijen u programskom paketu MATLAB Verzija 7.6.0 (R2008a), u cilju dobijanja rezultata simulacije za različite početne uslove. U kasnijem procesu fitovanja eksperimentalnih podataka sa tim podacima dobijeni postupkom simulacije.

Poređenje između rezultata 2D numeričkog modela simulacije i eksperimentalnih rezultata korišćenjem software paketa MATLAB 7.6.0 Versia (R2008a) u kome je generisan program ImpulsnaVideoTermografija.m, za rešavanje Furieove parcijalne diferencijalne jednačine drugog reda.

2D model tranzijentnog provođenja toplote kreiran je za razmatranje temperaturne promene u materijale ozračene svetlosnim impulsom (flash front method).



Slika B.3: Promena temperature $T_2(x)$ u aluminijumu: Dve različite gustine mreže po dubini do defekta $d = 0.5$ mm.

Gušća mreža rastojanje od čvora do čvora $dx_1 = 0.005$ mm i ređa mreža $dx_2 = 0.1$ mm.

Tabela B.2: Temperature $T_2(x=0)$ u vremenskim trenucima od $t = 0.3$ (ms) do 6 (ms), za tri različite gustine mreže od $dx_1 = 0.0005$ (mm), 0.0025 (mm) i 0.005 (mm). Dimenzija čvora ređe mreže je $dx_2 = 0.1$ (mm) i $dy = 0.1$ (mm)

t (ms)	$T_2(x=0)$	$T_2(x=0)$	$T_2(x=0)$
	$dx_1 = 0.005$ (mm)	$dx_1 = 0.0025$ (mm)	$dx_1 = 0.0005$ (mm)
0.3 ms	0.76444 °C	0.75935 °C	0.75977 °C
0.6 ms	0.92348 °C	0.9064 °C	0.91022 °C
1 ms	0.94702 °C	0.92495 °C	0.93017 °C
1.2 ms	0.94306 °C	0.92038 °C	0.92592 °C
1.4 ms	0.93594 °C	0.91313 °C	0.91904 °C
1.6 ms	0.92926 °C	0.90661 °C	0.91262 °C
1.8 ms	0.92581 °C	0.90341 °C	0.90949 °C
2 ms	0.92475 °C	0.90251 °C	0.90873 °C
3 ms	0.93033 °C	0.9084 °C	0.915 °C
6 ms	0.95315 °C	0.93047 °C	0.93743 °C
min	0.92445 °C	0.90231 °C	0.90859 °C

U gušćem delu mreže možemo čekivati veći gradijent temperature, pa u skladu tim postoji potreba za smanjenjem veličine čvora Al moptdela. Korak čvorova u pravcu x ose je zauzima sledeće vrednosti: $dx1 = 0.005$ mm, $dx1 = 0.0025$ mm, i na kraju uzeta vrednost je uzeta $dx1 = 0.0005$ mm. U slučaju simulacije kada se uzme čvor gušće mreže $dx1 = 0.0005$ (mm), računarsko vreme je 4-5 puta duže za simulaciju nego za $dx1 = 0.005$ (mm). A uspeh simulacije zavisi od radne memorije računara.

Grafici prikazani na Slici D.3 i Slici D.4, su dobijeni za korošćene sledeće parametre simulacije: $dx1 = 0.0005$ mm, $dx2 = 0.05$ mm $dt = 0.001$ μ s, $T_f = 1.5$ μ s, $T_s = 6$ μ s i $t_{min} = 2.107$ ms.

U Tabeli B.2 su date temperature $T_2(x=0)$, na površini oločice u čvoru modela aluminijumske ploče na sredini defekta za tri simulacije i to: Za veličinu čvora gušće mreže uzete su vrednosti $dx1 = 0.005$ (mm), $dx2 = 0.0025$ i $dx2 = 0.0005$ (mm). Na Slici D.3, prikazane su krive promene $T_2(x)$ po dubini materijala za promenljive veličine čvorova $dx1$ pri konstantnim gustinama $dx2$ i dy , za 11 vremenskih trenutaka od 0.3 (ms) do 6 (ms) i vrednost MIN predstavlja trenutak kada temperatura $T_2(x)$ ima mali minimum posle zagrevanja prednje površine i trenutka kada počinje bočna difuzija hlađenja u y pravcu.

Najpre je proba numeričkog kods izvršena za promenu temperature $T_2(x)$, po dubini do $d = 0.5$ mm za mrežu gustine $dx1 = 0.0025$ mm i $dx2 = 0.1$ mm. Rezultati u odnosu na čvor veličine $dx1 = 0.005$ (mm) pokazuje mala odstupanja ali povećanje računarskog vremena je očigledno.

Sledeći slučaj provere numeričke simulacije je za promena temperature $T_2(x)$, po dubini do $d = 0.5$ mm za za mrežu gustine $dx1 = 0.0005$ mm i $dx2 = 0.05$ mm. Zaključak je isti kao i za slučaj $dx1 = 0.0025$ (mm), s tim što je računarsko vreme 10 sati za komercijalni računar TOSHIBA sa 1GB RAM memorije.

Numerička simulacija je čiji rezultati su prethodno prikazani je izvršena za sledeće uslove pobude $Q_o = 0.134E6$ W/m² veličine čvorova za dve gustine u pravcu x ose i jednom gustinom mreže u bočnom pravcu (y osa): $dx1 = 0.0005$ μ m, $dx2 = 0.05$ mm i $dy = 0.1$ (mm), debljina materijala gušće mreže je $d1 = 0.05$ mm, broj čvorova gušće mreže je $N_{d1} = 101$ a $N_d = 10$ je broj čvorova ređe mreže, vremenski korak iteracije je $dt = 0.001$ μ s i vreme pamćenja rezultata je bilo na svakih $T_{fr} = 1.5$ μ s, zbog ograničenog kapaciteta memorije računara.

Tabela B.3: Geometrijski parametri ćelije sa jednim defektom periodične strukture: Model aluminijumske ploče za defekt širine $w = 4$ mm i dubine $d = 0.5$ (mm)

$d1$ (mm)	$dx1$ (mm)	N_{d1}	dy (mm)	$4w$ (mm)	N_y
0.1	0.0025	41	0.2	8	41
0.1	0.0005	101	0.2	8	41
0.5	0.05	8	0.1	8	81

U Tabeli B.3 prikazani su geometrijski parametri simulacije modela aluminijumske ploče za defekt širine $w = 4$ mm i dubine $d = 0.5$ (mm). Geometrijski parametri ćelije sa jednim defektom periodične strukture defekata za teorijski proračun provođenja temperature u metodi impulsne videtermografije za NDT materijala.

Temperaturski profil za tačku $X2 = 1$ (površina pločice), $Y2 = 21$ (sredina defektne oblasti). $T_2(x)$ se dobija iz datoteke $Y2.dat$. Ukupan broj čvorova po dubini u pravcu x ose, koji imaju dva različita rastojanja (dve gustine mreže u pravcu x ose $dx1 \neq dx2$) uzavisi od usvojenih veličina čvorova. Ukupno vreme simulacije je $T_s = 4.8$ ms, Vremenski korak dt

= 0.03 μ s, Broj frejma $N_f = 1,2,\dots,9,10$. Za vremenski korak iteracije od $dt = 0.03 \mu$ s vreme pamćenja podataka u numeričkoj simulaciji je $T_f = 50 \times dt = 50 \times 0,03 \mu$ s = 1,5 μ s ($dt = 0,03 \mu$ s).

Kod numeričke simulacije je testiran na promene temperature $T_2(x)$, po dubini do $d = 0.5$ (mm) za mrežu gustine $dx_1 = 0.0025$ (mm) i $dx_2 = 0.05$ (mm), za prvih 10 vremenskih koraka i vreme memorisanja podataka u datoteku od $T_f = 0.0015$ (ms). Za istu gustinu mreže $dx_1 = 0.0025$ (mm) i $dx_2 = 0.05$ (mm), kod numeričke simulacije je testiran za prvih 41 vremenskih koraka i $T_f = 0.0015$ (ms).

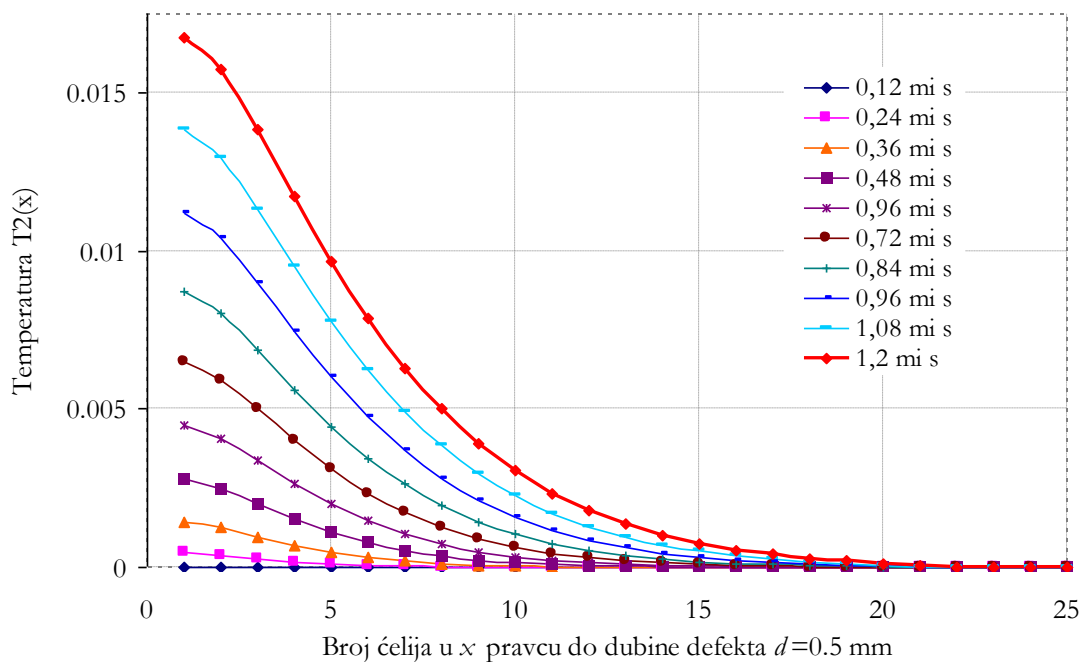
Zatim je vršena promena temperature $T_2(x)$, po dubini do $d = 0.5$ mm za mrežu gustine $dx_1 = 0.0025$ mm i $dx_2 = 0.05$ mm, proverena za 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 i 100-ti korak $T_f = 0.0015$ ms i dala je odlične rezultate. Na kraju provere koda i promena temperature $T_2(x)$, po dubini do $d = 0.5$ mm za mrežu gustine $dx_1 = 0.0025$ mm i $dx_2 = 0.05$ mm, za 10, 100, 200, 300, 400, i 500-ti korak $T_f = 0.0015$ ms.

Tabela B.4: Geometrijski parametri ćelije sa jednim defektom periodične strukture: Model aluminijumske ploče za defekt širine $w = 4$ mm, dubine $d = 0.5$ (mm), $dx_2 = 0.1$ (mm) veličina čvora za ređu mrežu i Broj čvorova ređe mreže je $N_d = 5$.

dt (mm)	dx_1 (mm)	N_{dt}	dy (mm)	$2w$ (mm)	N_v
0.1	0.005	21	0.2	8	41
0.5	0.05	8	0.1	8	81

Izabrali smo da za poređenje simulaciju generisanja temperaturnog profila vršimo za tačku $X_2 = 1$ (površina pločice) i $Y_2 = 21$ (sredina defektne oblasti). $T_2(x)$ se dobija iz datoteke $Y_2.dat$. Ukupan broj čvorova po dubini u pravcu x ose, koji imaju dva različita rastojanja (dve gustine mreže u pravcu x ose). $dx_1 \neq dx_2$ i Ukupno vreme simulacije $T_s = 4.8$ ms. Vremenski korak $dt = 0.12$ (μ s). Broj frejma $N_f = 1, 2,\dots,9, 10$. $T_f = 50 \times dt = 50 \times 0.12$ (μ s).

Promena temperature $T_2(x)$ za 10 koraka



Slika B.4: Promena temperature $T_2(x)$ u aluminijumu: za 10 vremenskih koraka posle početka pobude od 0.12 (μ s), 0.24 (μ s) sa korakom od 0.12 (μ s) do 1.2 (μ s).

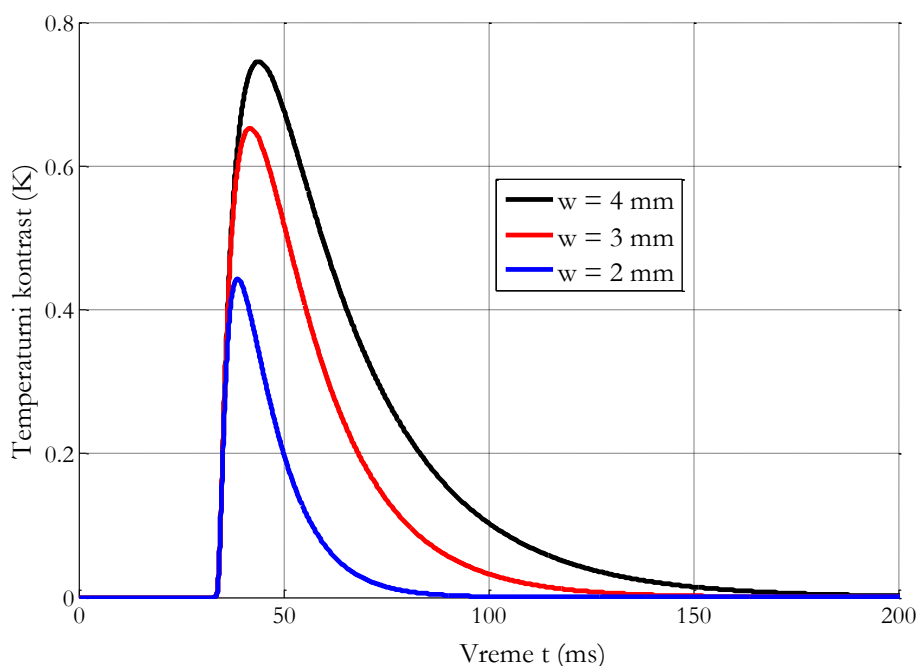
Dve različite gustine mreže po dubini do defekta $d = 0.5$ mm.

Gušća mreža rastojanje od čvora do čvora $dx_1 = 0.005$ mm i ređa mreža $dx_2 = 0.1$ mm.

Na Slici B.4 prikazana je promena temperature $T_2(x)$ u aluminijumu, za 10 vremenskih koraka od početka pobude 0.12 (μ s), 0.24 (μ s) sa korakom od 0.12 (μ s) do 1.2 (μ s). Korišćenne su dve različite gustine mreže po dubini do defekta $d = 0.5$ mm. Gušća mreža rastojanje od čvora do čvora $dx_1 = 0.005$ mm i ređa mreža $dx_2 = 0.1$ mm.

B.6 Rezultati temperaturnog kontrasta u funkciji od vremena

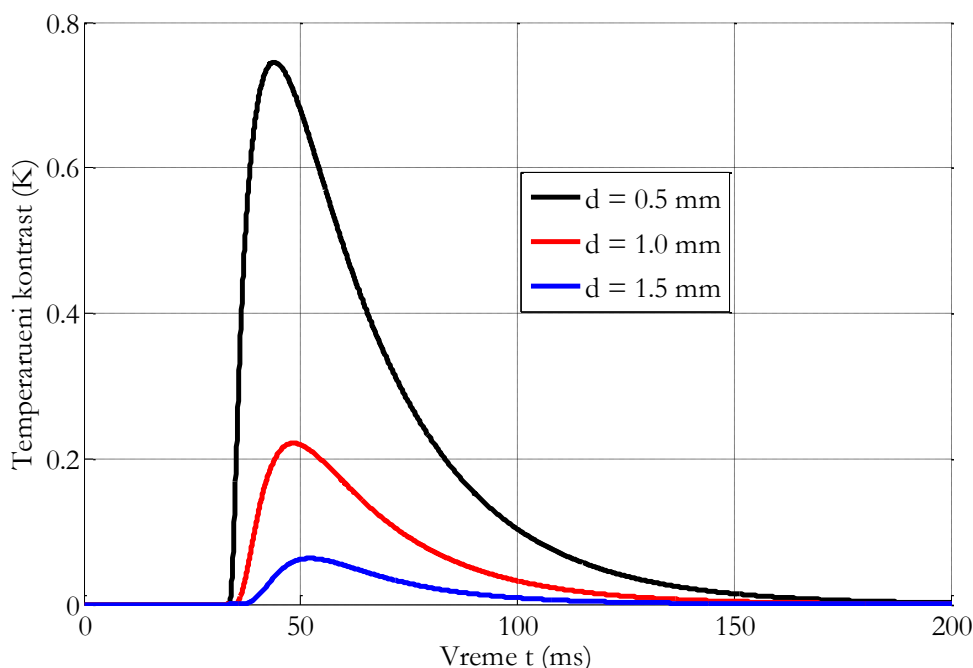
Na Slici B.5 prikazana je promena razlike temperaturnog kontrasta u funkciji vremena po širini defekta w za fiksnu vrednost dubine defekta $d = 0.5$ mm. Za širinu defekta od $w = 4$ mm dobija se maksimalna vrednost temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max_{\text{sim}}} = 0.7452$ ($^{\circ}$ C) u trenutku $t_{\max_{\text{sim}}} = 43.94$ (ms). Početak pobude svetlosnim impulsom bio je postavljen na $t_f = 33.33$ (ms), tako da se maksimalna razlika temperature za defekt na dubini $d = 0.5$ (mm) u aluminijumskoj ploči dobija nakon $t_{\max} = 10.61$ (ms), od početka pobude. Širina defekta uzima vrednost $w = 2; 3$ i 4 mm.



Slika B.5: Rezultati numeričke simulacije temperaturnog kontrasta u funkciji od vremena na površini za dubinu $d = 0.5$ mm i za različite širine defekta.

Tabela B.5: Maksimalna vrednost ΔT_{\max} za širine defekta $w = 4$ mm na različitim dubinama d .

ΔT_{\max} ($^{\circ}$ C)	$d = 0.5$ mm	$d = 1.0$ mm	$d = 1.5$ mm
$w = 4$ mm	0.7452	0.2214	0.0631



Slika B.6: Rezultati numeričke simulacije temperaturnog kontrasta u funkciji od vremena na površini za širinu $w = 4$ (mm) i za različite dubine defekta.

Tabela B.6: Maksimalna vrednost ΔT_{\max} za dubine defekta $d = 1.5$ (mm) na različitim širinama d .

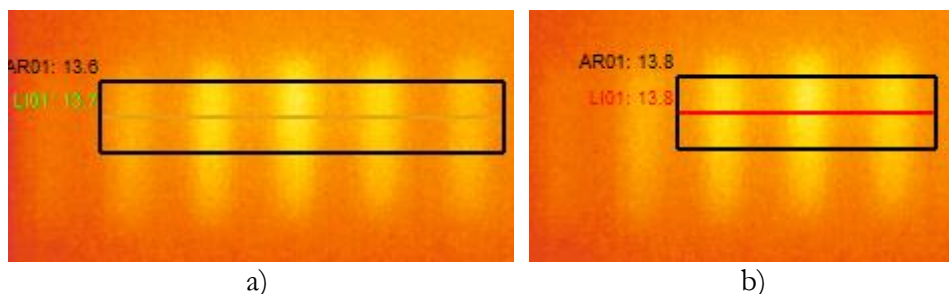
ΔT_{\max} (°C)	$w = 4$ mm	$w = 3$ mm	$w = 2$ mm
$d = 0.5$ mm	0.7452	0.6524	0.4431

U Tabelama B1, B2, B3, B4, B5 i B6 dati su rezultati promene temperaturnog kontrasta za sedam različitih širina defekata $2w = 0.25$ mm, $2w = 0.5$, $2w = 0.75$ mm, $2w = 1$ mm, $2w = 1.25$ mm, $2w = 1.5$ mm i $2w = 1.75$ mm.

Prilog C: Rezultati snimanja termovizijskom kamerom SC620

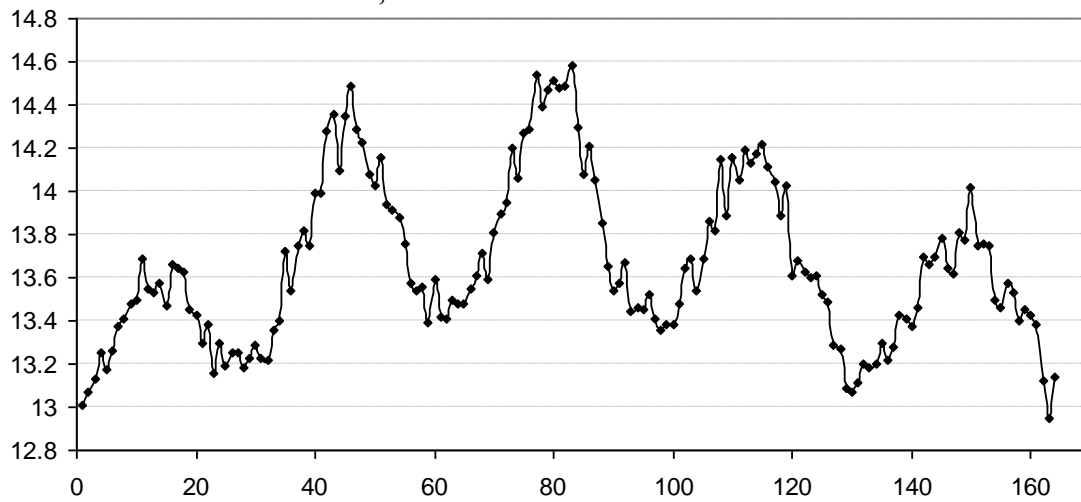
C.1 Rezultati za TP13 snimljeni termovizijska kamera SC620

Test pločica TP 13, Broj defekata 6, širina žljeba (kanala) je $w = 4$ mm, a visina $b = 15$ mm. Dimenzija pločice je $H \times V = 30$ mm \times 50 mm.

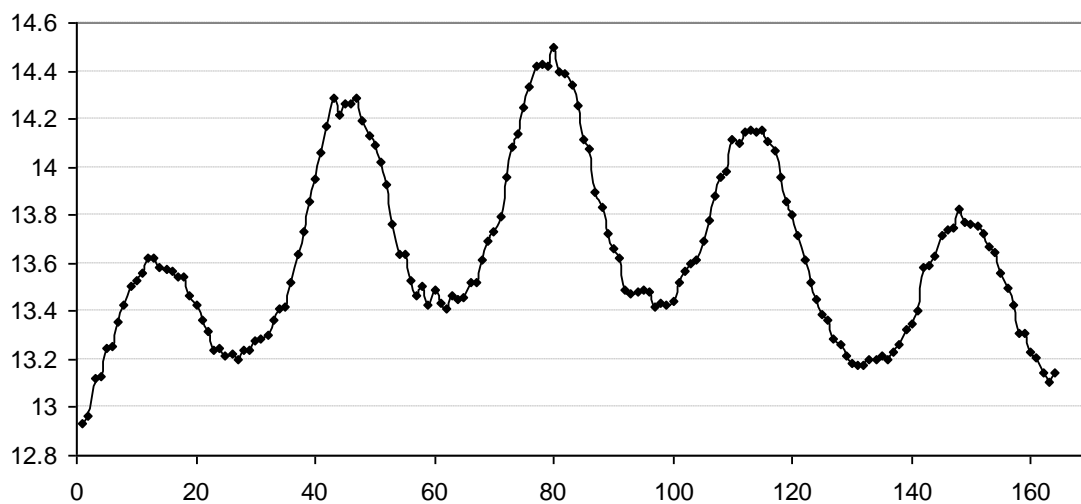


Slika C.1: Termogram maksimalno vidljivih defekata u uzorku TP13: a) LI01: 13.7 (°C) je centralna linija a broj sa leve strane predstavlja srednju temperature duž linije i AR01: 13.6 (°C) je oblast iz koga su uzete linije za usrednjavanje po vertikali, za analizu uzeta 5 defekta u oblasti. b) LI01: 13.8 (°C) je centralna linija a broj sa leve strane predstavlja srednju

temperature duž linije i AR01: 13.8 (°C) je oblast iz koga su uzete linije za usrednjavanje po vertikali, za analizu uzeta 3 defekta u oblasti.



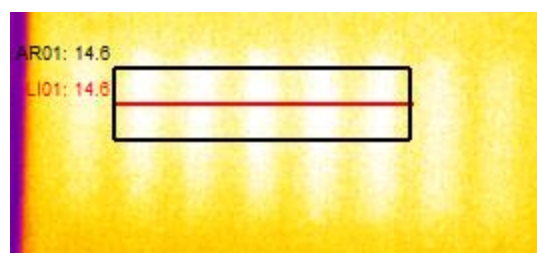
Slika C.2: Temperaturni profil duž centralne linije LI01: 13.7 (°C), originalne slike.



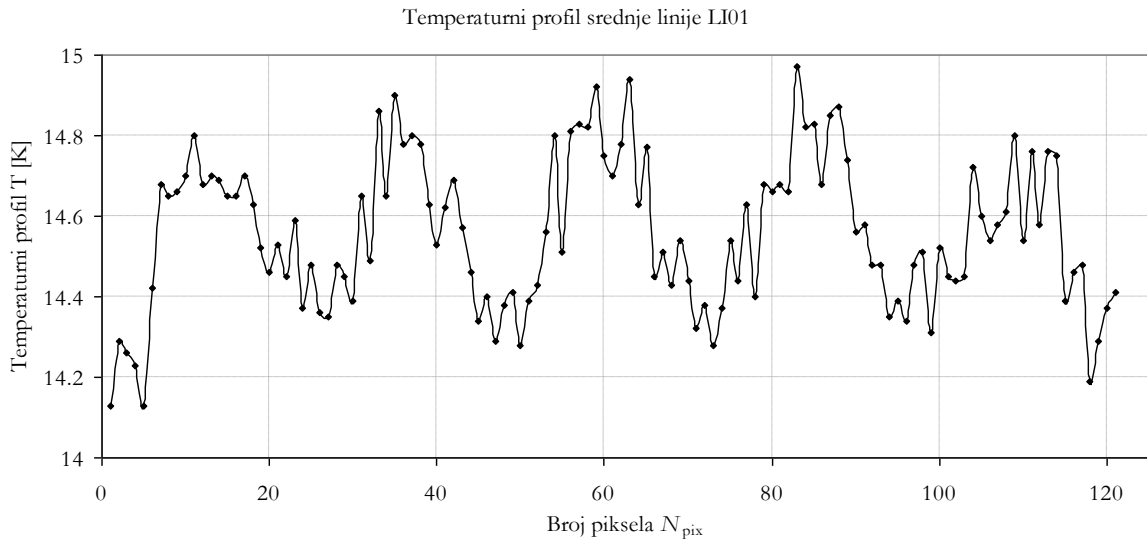
Slika C.3: Temperaturni profil duž centralne linije LI01: 13.7 (°C), posle izvršenog filtriranja originalne slike metodom usrednjavanja po vertikali IC piksela iz oblasti AR01: 13.6 (°C).

C.2 Rezultati za TP15 snimljeni termovizijska kamera SC620

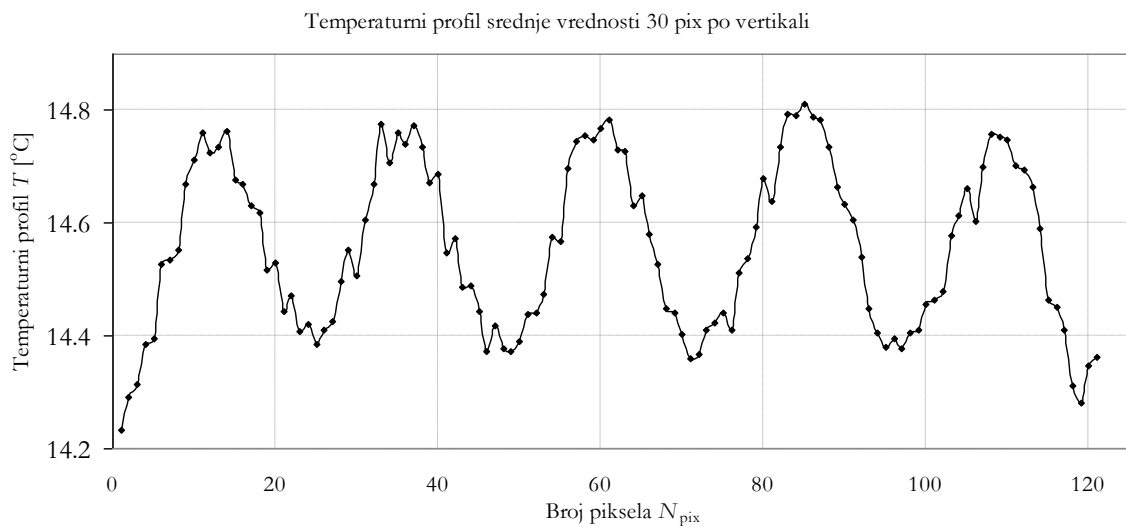
Test pločica TP 15, Broj defekata 9, širina žljeba (kanala) je $w = 2, 5$ (mm), a visina $b = 15$ (mm). Dimenzija pločice je $H \times V = 30$ (mm) \times 50 (mm).



Slika C.4: Termogram maksimalno vidljivih defekata u uzorku TP15: LI01: 14.6 (°C) je centralna linija a broj sa leve strane predstavlja srednju temperature duž linije i AR01: 14.6 (°C) je oblast iz koga su uzete linije za usrednjavanje po vertikali.



Slika C.5: Temperaturni profil duž centralne linije LI01: 14.6 (°C), originalne slike.



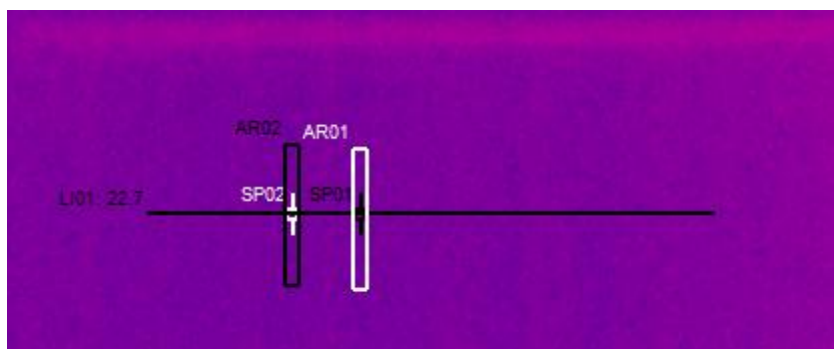
Slika C.6: Temperaturni profil duž centralne linije LI01: 14.6 (°C), posle izvršenog filtriranja originalne slike metodom usrednjavanja po vertikali IC piksela iz oblasti AR01: 14.6 (°C).

Prilog D: Vremenski razvoj temperaturnog kontrasta

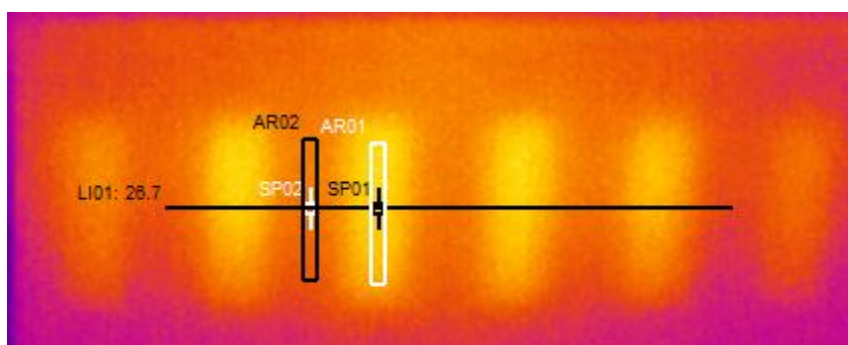
D.1 Vremenski razvoj temperaturnog kontrastat $\Delta T_{\text{eks}}(t)$ Rezultati za TP13 snimljeni termovizijska kamera SC620

Vremensku zavisnost promene temperature na površini defekta analizom frejm po frejm u realnom vremenu izvršili smo na svim snimljenim sekvencama. Ovde je prikazan primer praćenja zavisnosti promene temperature na dva termograma (Slika D.B.1 i Slika D.B.2). Prethodno su označene oblasti AR01 i AR02 (veličine 28×6 piksela) i snimana

funkcija srednja temperatura ovih oblasti $T = f(N_f)$. Na istim slikama su prikazane i oznake IC piksela SP01 i SP02 tako da je snimljena i ta zavisnost promene temperature tokom trajanja sekvence. Centralna linija LI01 je označava liniju IC piksela duž koje pratimo promenu temperaturnog profila u pravcu y ose preko 6 defekata i 5 između defektnih oblasti (za TP1, TP7 I TP13) na različitim dubinama. termogramu sekvence SEQ847), hladne pločice pre zagrevanja svetlosnim impulsom: AR01 – oblast u sredini iznad trećeg defekta s leva gledano, AR02 – oblast između drugog i trećeg defekta, LI01 centralna linija normalna na defekte-žljebove, SP01 – IC piksel u centru žljeba i SP02 IC piksel u centru oblasti između drugog i trećeg defekta.



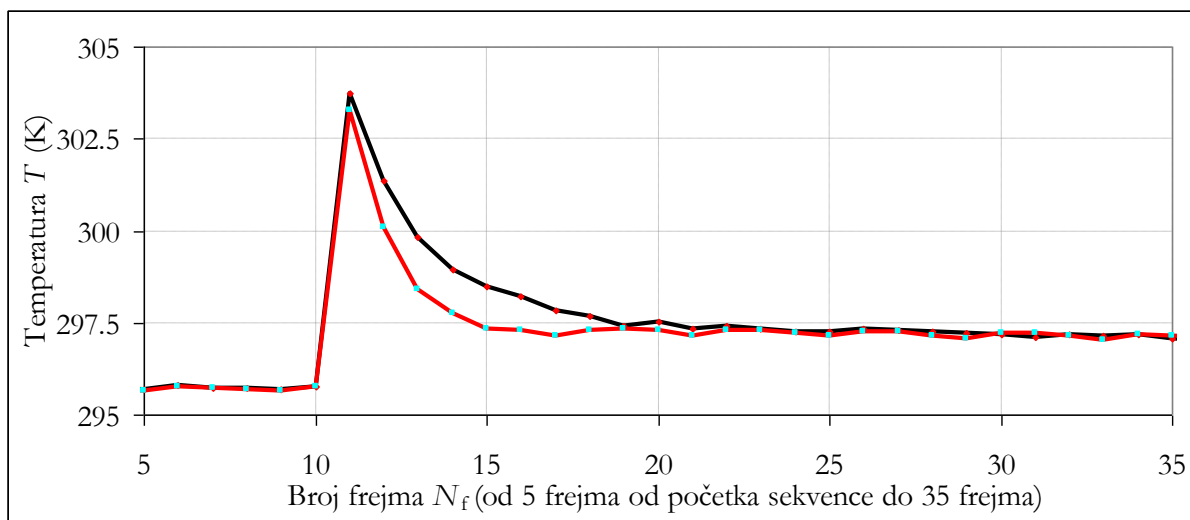
Slika D.1: Termogram (IC slika iz sekvence SEQ847), hladne aluminijumske ploče pre zagrevanja svetlosnim impulsom: Promene temperature na površini ploče se prati u: Oblasti AR01 – srednja temperatura svih IC piksela u oblasti; Oblast AR02 – srednja temperatura svih IC piksela, Centralna Linija LI01 – temperaturni profil duž linije normalne na defekte-žljebove; Tačka SP01 – temperatura IC piksela i Tačka SP02 – temperatura IC piksel.



Slika D.2: Termogram (IC slika iz sekvence SEQ847), zagrejane aluminijumske ploče posle zagrevanja svetlosnim impulsom: AR01 – oblast u sredini iznad trećeg defekta s leva gledano, AR02 – oblast između drugog i trećeg defekta, LI01 centralna linija normalna na defekte-žljebove, SP01 – IC piksel u centru žljeba i SP02 IC piksel u centru oblasti između drugog i trećeg defekta.

Na Slici D.1 pored centralne linije LI01 data je srednja temperatura duž linije IC piksela što je ustvari I temperature hladne aluminijumske ploče pre zagrevanja svetlosnim impulsom. Početna temperatura ploče je $T_0 = 22.7$ (°C). U prvom narednom frejmu (Slika D.2), temperatura aluminijumske ploče je viša od početne T_0 , tako da je prosečna temperatura duž centralne linije $T_{1,LI01} = 26.7$ (°C). Maksimalni porast temperature koji je

izmeren između dva frejma usled zagrevanja uzorka svetlosnim impulsom iznosi $\Delta T = T_{11,101} - T_0 = 4$ (°C).



Slika B.3: Zavisnost promene temperature T za diskretne vrednosti broja frejmova u sekvenci SEQ.847, $T = f(N_f)$: Ukupno trajanje sekvence od početka snimanja je 40 frejma. Frekvencija IC $f_f = 120$ Hz (Veličina IC slike 640×120 piksela).

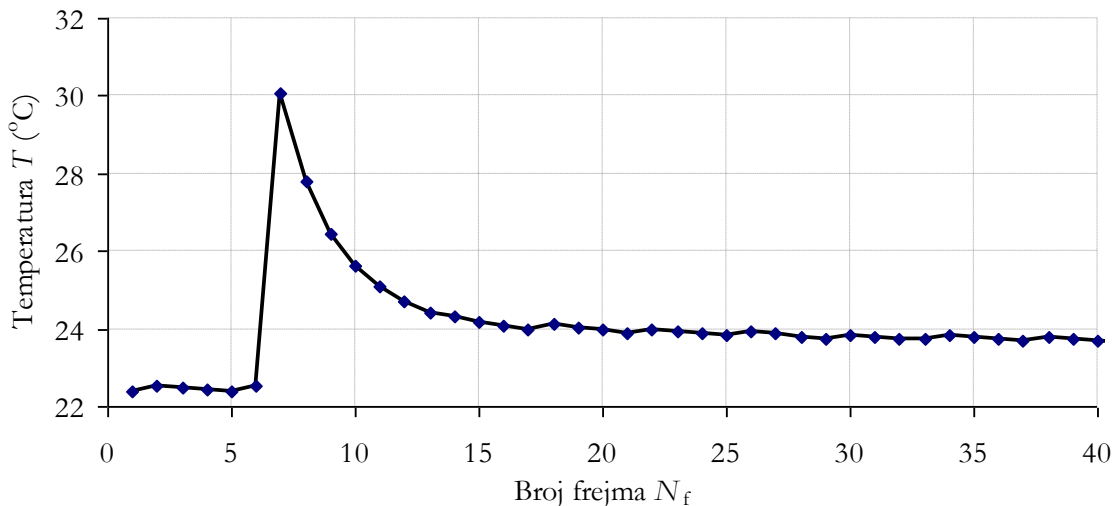
Na [Slici D.3](#) prikazana je istovremena promena prosečnih temperature na površini uzorka TP13 za dve oblasti. Oblast AR01 predstavlja referentnu oblast između dva defekta (kriva ispod - crvena linija) predstavlja promenu niže temperature (tu temperaturu oznašavamo sa T_{\min}). Oblast AR02 predstavlja oblast sa višom prosečnom temperaturom u sredini iznad defekta (kriva iznad - crna linija) predstavlja promenu više temperature (tu temperaturu oznašavamo sa T_{\max}). Na [Slici D.3](#) vide se dve oblasti gde su ove dve temperature iste i to prva oblast pre ozračavanja svetlosnim impulsom i na kraju unutrašnjeg hlađenja procesom difuzije toplote. U prvoj oblasti temperatura aluminijumske ploče uzorka je na temperaturi okoline tj. početna temperatura je T_0 . U drugoj oblasti temperature je viša od T_0 i iznosi T_∞ .

Posmatrajući zavisnost promene temperature $T = f(N_f)$ za određen broj frejmova u sekvenci SEQ.847, ukupnog trajanja sekvence od početka je 40 frejma, frekvencija IC slika $f_f = 120$ Hz (veličina IC slike 640×120 piksela), uočava se da promena nije kontinualna funkcija pošto je merenje temperature izvršeno u diskretnim koracima trajanja jednog frejma $t_f = 8.33$ (ms).

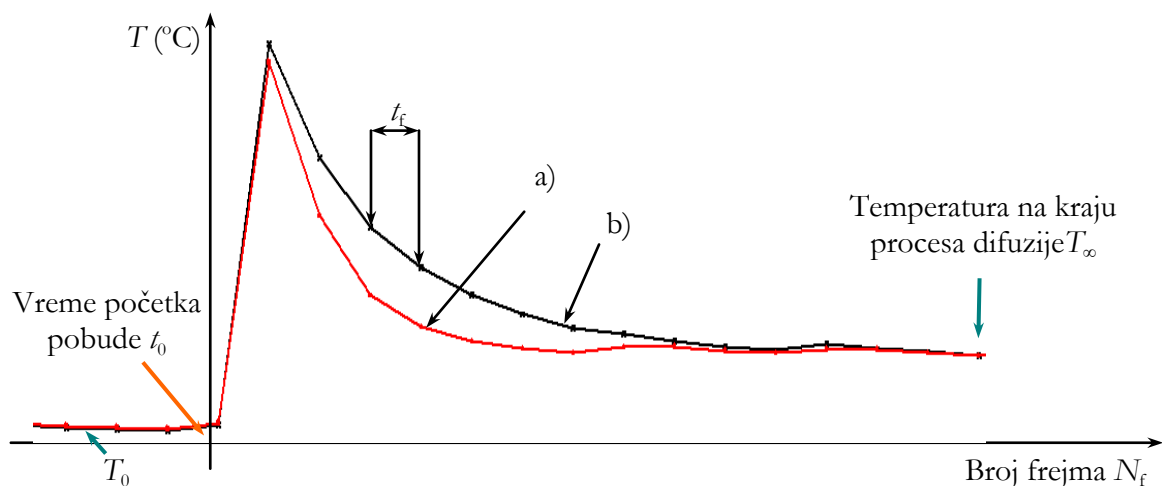
Vreme početka snimanja sekvence je nešto pre okidanja blica između 4 i 5 frejma. Vreme početka zagrevanja (pobude) t_0 se nalazi u koordinatnom početku u intervalu od 4-og do 5-og frejma od početka snimanja sekvence. Pobuda i početak start frejm kamere nisu sinhronizovani (termovizijska kamera FLIR SC620) je komercijalna i postoji problem sinhronizacije zbog nedostatka spoljnog trigera, već samo softverski zadavanje komande za početak snimanja (na kameri ili sa PC računara). Vremenska razlika između početka pobude t_0 i prvog frejma gde je temperatura na površini pločice viša od početne temperature T_0 , nije poznata. Tu razliku nije moguće odrediti samo iz eksperimentalnih podataka, pa samim tim nije moguće precizno određivanje značajnih parametara kao što su maksimalna vrednost temperaturnog kontrasta ΔT_{\max} i vreme njegovog dostizanja t_{\max} . Bez preciznog poznavanja

ovih parametara nema precizne kvantitativne analize veličine i dubine potpovršinskih defekata metodom PVT.

Posmatrajući zavisnost promene prosečne temperature u oblasti AR01 između dva defekta u toku vremena od 1 frejma na početku snimanja sekvence SEQ.847 do kraja sekvence 40 frejm. Prosečna temperatura površine u oblasti AR01 pre okidanja bljeskalice od 1 do 6 frejma je u granicama šuma oko $T_0 = 22.468 \pm 0.0595$ (°C). Prosečna temperatura u oblasti AR01 u 6-om frejmu pre početka zagrevanja iznosi $T_{5AR} = 22.528$ (°C). Prosečna temperatura u prvom sledećem frejmu (frejm broj 7) od početka snimanja poraste na $T_{7AR} = 30.075$ (°C). Razlika temperaturnog porasta između 6-og i 7-og frejma za oblast AR01 (srednja vrednost od 168 piksela) iznosi $\Delta T_{7,6} = T_{7AR} - T_{6AR} = 7.547$ (°C).



Slika D.4: Zavisnost promene temperature za diskretne vrednosti broja frejmova u sekvenci SEQ.847, $T = f(N_f)$: Ukupno trajanje sekvence od početka snimanja je 40 frejma. Frekvencija IC $f_f = 120$ Hz (Veličina IC slike 640×120 piksela).

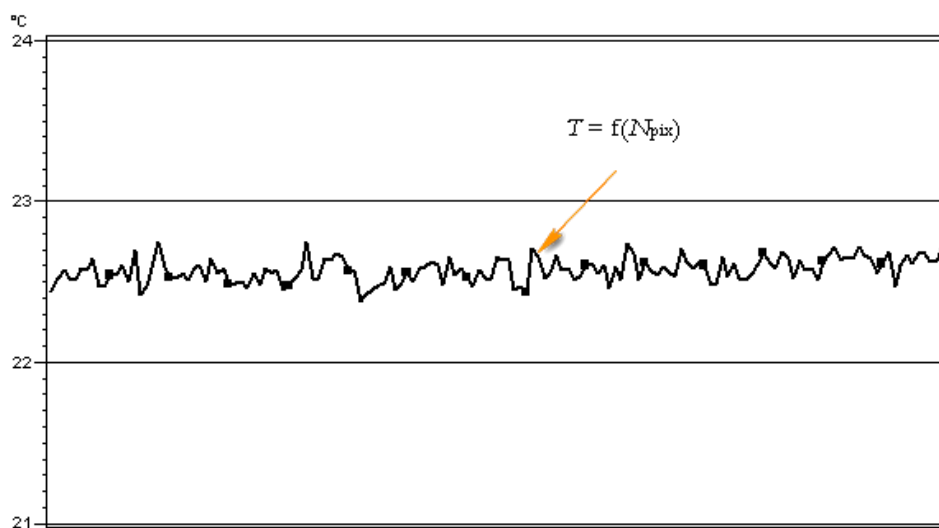


Slika D.5: Zavisnost promene temperature za diskretne vrednosti broja frejmova u sekvenci SEQ.847, $T = f(N_f)$: Vremenska rezolucija snimanja sekvence SEQ.847 iznosi $t_f = 8.33$ (ms).

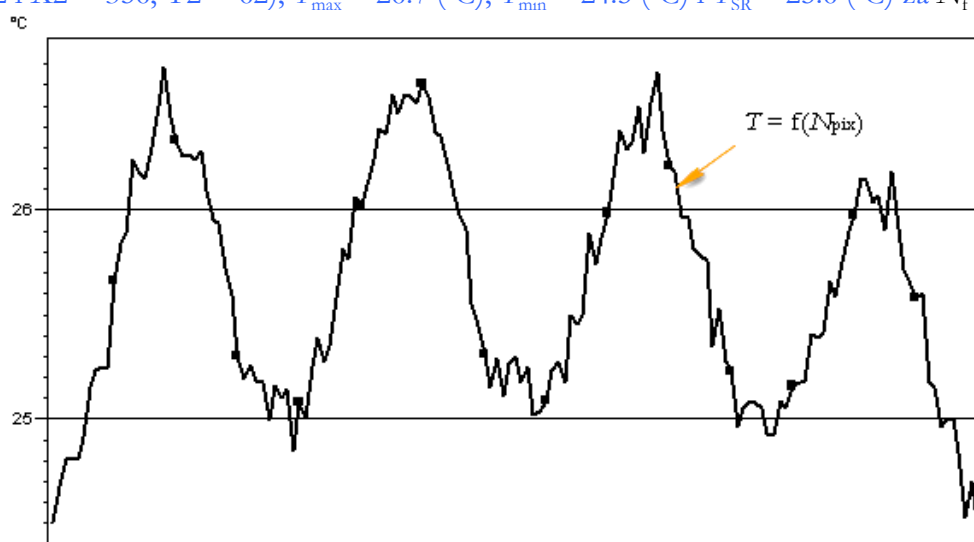
Prosečna temperatura na kraju sekvence u 40-om frejmu je $T_\infty = 23.961$ (°C). Porast temperature ukupnog zagrevanja uzorka zavisi od ukupne apsorbovane energije svetlosnog

zračenja Q_0 . Na kraju procesa difuzije toplote u uzorku (temperature svih IC piksela na površini ploče su homogene i jednake u granicama merne nesigurnosti), odnosno prosečne temperature za oblasti AR01 i AR02 su jednake (vidi Sliku B.5) i iznose $T_\infty = 23.961$ (°C), pa je porast $\Delta T_\infty = T_\infty - T_{6AR} = 1.433$ (°C).

Na Slici D.5, prikazane su dve krive: a) Kriva koja povezuje skup ekvidistantnih tačaka površinske temperature srednje vrednosti za oblast AR02 i b) Kriva temperature na površini srednje vrednosti IC piksela u oblasti iznad defekta AR01. Zavisnost promene prosečne temperature T za oblasti AR01 (crvena linija) i AR02 (crna linija) su diskretne vrednosti broja frejmova u sekvenci SEQ.847, $T = f(N_f)$ i ukupno trajanje sekvence od početka snimanja je 35 frejma. Frekvencija IC slike $f_f = 120$ Hz (Veličina IC slike 640×120 piksela).



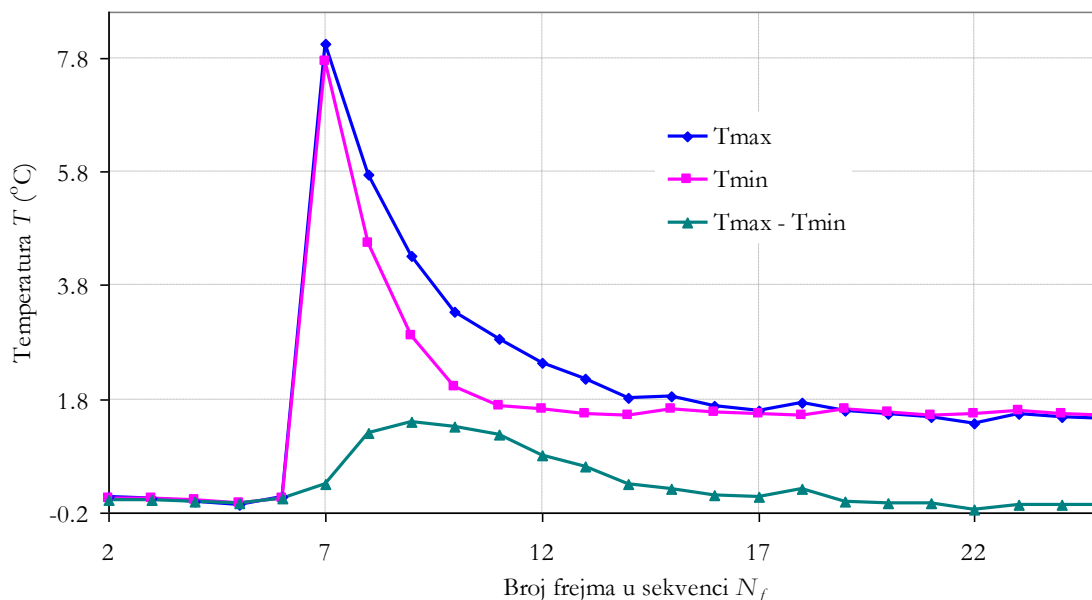
Slika D.6: Temperaturni profil duž linije LI01 prikazane na Slici D.2, termogram sa povećanom temperaturom sekvence SEQ.847 (190): Centralna linija LI01 ($X1 = 205$, $Y1 = 62$ i $X2 = 356$, $Y2 = 62$), $T_{\max} = 26.7$ (°C), $T_{\min} = 24.5$ (°C) i $T_{SR} = 25.6$ (°C) za $N_f = 6$.



Slika D.7: Temperaturni profil duž linije LI01 prikazane na Slici D.2, termogram sa povećanom temperaturom sekvence SEQ.847 (193): Centralna linija LI01 ($X1 = 205$, $Y1 = 62$ i $X2 = 356$, $Y2 = 62$), $T_{\max} = 26.7$ (°C), $T_{\min} = 24.5$ (°C) i $T_{SR} = 25.6$ (°C) za $N_f = 9$.

Eksperimentalni rezultati $\Delta T_{\text{ekspi}}(t_i)$, za $i = 1, 2, 3, \dots, 25, \dots, N_f$. Vremenski trenuci merenja temperaturnog kontrasta $t_i = t_0 + t_f \cdot N_f$, sa t_0 označen je trenutak frejma pre dejtva svetlosne pobude. Problemi akvizicije eksperimentalnih podataka se javljaju pošto standardne termovizijske kamere ne omogućavaju sinhronizaciju vremena dobijanja frejma sa početkom dobijanja toplotnog impulsa, tako da kje često teško odrediti da li prvi dobijeni frejm sa povećanom temperaturom dolazi pre ili posle maksimuma temperaturne razlike na površini uzorka. Takođe vidi se da ovo nije moguće odrediti iz eksperimentalnih rezultata u nijednom slučaju, osim ako se pogodi da trenutak generisanja termograma IC slika frema sa maksimalnom temperaturnom razlikom bude baš u t_{max} kada je ΔT_{max} . Pošto je to vrlo teško skoro nemoguće ostaje mogućnost fitovanja teorijske krive iz numeričke simulacije podacima eksperimenta $\Delta T_{\text{ekspi}}(t_i)$.

Početno vreme zagrevanja površine uzorka t_0 , nije na početku frejma već kako smo videli na Slici D.5 negde između dva frejma $t_f = 8.33$ ms za slučaj $f_f = 120$ Hz. Maksimalna vrednost svetlosnog impulsa (može se videti na Slici svetlosni impuls) iznosi $9.455 \cdot 10^2$ (ms), a impuls za 2 do 3 ms opadne skoro na nulu. Precizno određivanje ključnih parametara maksimalne temperaturne razlike ΔT_{max} i vremena njegovog natanjanja t_{max} su osnova za određivanje dubine i veličine defekta.



Slika D.8: Zavisnost porasta temperature $T = f(N_f)$, za IC piksele SP01 (plava linija) i SP02 (roze linija) u sekvenci SEQ.847_frame (od185 do 209). Zelena linija predstavlja razliku ΔT ove dve temperature.

Karakteristični podaci dobijeni su za vremenske intervale t za $i = 1, 2, 3, \dots, 25, \dots, N_f$. Rezultati $\Delta T(t_i) = T_{\text{max}}(t_i) - T_{\text{min}}(t_i)$ su vrednosti temperaturnog kontrasta po frejmovima (pomereni za 8.33 (ms) za $f_f = 120$ Hz). Ispod su rezultati temperaturnog kontrasta kada je prethodno za temperaturne profile izvršena filtracija zašumljenog signala $T = f(N_{\text{pix}})$, prvim harmonikom sinusnim fitom u programu OriginPro. 8. Svaka vrednost $\Delta T_{\text{ekspi}}(t_i)$ se dobija Sin Fit funkcijom za istu periodu i početnu fazu u svim frejmovima. Detaljnije filtriranje nekom od metoda biće reči u poglavlju 5 ove teze.

$\Delta T_{\text{ekspi}}(t_i) = [0.367 \ 1.172 \ 1.383 \ 1.188 \ 0.946 \ 0.7 \ 0.491 \ 0.291 \ 0.098 \ 0.087 \ 0.064 \ 0.109 \ 0.025 \ 0.025 \ 0.007 \ 0.003]$;

Temperatura T_{\max} je porast temperature IC piksel iznad defekta ali prethodno normalizovana oduzimanjem temperature SP01 frejma pre okidanja blica $T_0 = 0.041$ (°C) od T_{\max} i za SP02 oduzimanjem T_0 od T_{\min} u 6-tom frejmu. U 9-tom frejmu se postiže maksimalna vrednost temperaturnog kontrasta $\Delta T_{\max} = 1.401$ (°C) za $T_{\max} = 4.307$ (°C) i $T_{\min} = 2.906$ (°C). na kraju procesa unutrašnjeg hlađenja (izjednačavanja temperature ploče) $T_{\infty} = 1.508$ (°C).

Prilog E: Filtriranje

E.1 Dodatak Wiener filter inverzni model turbulencije

Program napisan u Matlab programu za inverzno filtriranje temperaturnog profila duž centralne linije LI01 IC piksela. Najpre se pozove slika koja je predmet filtracije npr. Seq_0192_11.jpg. Program poziva sliku, konvertuje je u RGB sliku nivoa sivog. Zadaju se parametri modela turbulencije inverznog filtriranja WF: $K = 0.00011$ i odnos signal-šum ($\text{nsr} - T = 0.01$). Iz isfiltrirane IC slike u nivou sivog treba specificirati centralnu liniju LI01 ($i = 297$ do 434 piksela u pravcu x ose koja je na poziciji duž y ose $j = 221$ normalno na žljebove).

```
clear all; clc; close all;

slika=imread('Seq_0192_11.jpg');
slika1=rgb2gray(slika);
slika2=slika1;
imshow(slika1);

S=size(slika1);
M=S(1); N=S(2);

K=-0.00011;

% Model turbulencije

for u=1:M
    for v=1:N
        H(u,v)=exp(K*((u-M/2).^2 + (v-N/2).^2).^(5/6));
    end
end

G=fft2(slika1, M, N);
T=0.01;
F=G.*(1./H .* (abs(H)).^2./((abs(H)).^2) + T); % Wiener-ov filter
F=F./max(max(F)); % Normiranje
f=real(ifft2(F)); % Inverzna F transformacija
f=f(1:size(slika1,1), 1:size(slika1,2));
a=min(min(f)); b=max(max(f)); c=0; d=255;

% Vracanje u opseg [0, 255]

for i=1:M
    for j=1:N
```

E.2 Dodatak Wiener filter funkcija wiener2 iz MATLABA®

Program napisan u u programskom paketu Matlab 2008a uključuje 2D funkciju *wiener2*. Obrada rezultata Wiener-ovim filtrom je u digitalnom domenu, pomoću 2D Wiener-ove funkcije adaptivnog filtra za filtriranje šuma i ima oblik $J = wiener2(I, [m\ n], noise)$, I je zasumljena slika u digitalnom *.jpg* formatu.

```
RGB = imread('SEQ.847_194.jpg');
I = rgb2gray(RGB);
K = wiener2(I,[3 8], 0.02954);
L=57;
figure(1)
imshow(RGB)
title('Originalna slika u boji')
figure(2)
imshow(K)
title('Crno-bela slika filtrirana Wiener filtrom')
[p,n]=size(I);
figure(3)
plot(I(L,206:323))
title('Izgled signala u 57-om redu zasumljene slike')
grid on
figure(4)
imshow(I)
title('Crno-bela slika zasumljena')
figure(5)
plot(K(L,206:323))
title('Izgled signala u 57-om redu filtrirane slike')
grid on

K(L,:)=0;

figure(6)
imshow(K)
title('Crno-bela slika filtrirana Wiener filtrom sa linijom sa koje su uzeti podaci')
hold on
```

E.3 Dodatak Wiener filter funkcija wiener2 za Seq.847_193.jpg

```
RGB = imread('2011-01-31t131942847_193.jpg');
I = rgb2gray(RGB);
K = wiener2(I,[3 8], 0.0208);
L=57;
M=263;

figure(1)
imshow(RGB)
title('Originalna slika u boji')
```

```

figure(2)
imshow(K)
title('Crno-bela slika filtrirana Wiener filtrom')
[p,n]=size(I);

figure(3)
plot(I(L,208:324))
title('Izgled signala u 57-om redu zašumljene slike')
grid on

figure(4)
imshow(I)
title('Crno-bela slika zašumljena')

figure(5)
plot(K(L,208:324))
title('Izgled signala u 57-om redu filtrirane slike')

K(L,:)=0;
figure(6)
imshow(K)
title('Crno-bela slika filtrirana Wiener filtrom sa linijom sa koje su uzeti podaci')
hold on

```

E.4 Filtriranje zašumljenih termograma na 4 različita načina

U Tabeli F.3 prikazani su uporedni rezultati za SEQ.847, TP13 širine defekta 4 mm i dubine 0.5 mm fitovanja pomoću tri konvencionalne metode i nove predložene metode filtriranja zašumljenog temperaturnog profila Wiener filtrom (2D funkcije *wiener2* iz MATLAB[®]-a).

Tabela F.3: Metode 4 fita (plus ΔT_{8H}^* , ΔT_{WFSR}).

N_f	$\Delta T_{\omega 0}$ [°C]	ΔT_{SR} [°C]	ΔT_{8H} [°C]	ΔT_{8H}^* [°C]	ΔT_{WF} [°C]	ΔT_{WFSR} [°C]	ΔT [°C]
190.	0.0306	0.023	0.09	0.02	0.0125	0.00119	0
191.	0.3429	0.199	0.3	0.272	0.234	0.231585	0
192.	1.2658	1.086	1.23	1.198	1.173	1.067296	0.915
193.	1.5517	1.361	1.53	1.528	1.511	1.402151	1.467
194.	1.3439	1.233	1.37	1.302	1.275	1.228121	1.239
195.	1.1132	0.935	1.16	1.09	0.961	0.920528	0.9405
196.	0.8401	0.683	0.9	0.80	0.735	0.675499	0.6945
197.	0.6493	0.516	0.74	0.612	0.538	0.491358	0.5078
198.	0.4071	0.294	0.47	0.368	0.338	0.305496	0.3698
199.	0.1935	0.101	0.27	0.147	0.108	0.125348	0.2729

200. 0.1646 0.0585 0.31 0.127 0.123 0.091481 0.1982

* w perioda nije fiksirana

Tabela F.4: Uporedni rezultati najboljeg fita rezultata dobijenih primenom metode 4 fita (plus ΔT_{8H}^* , ΔT_{WFSR}). Pošetak pobude u simulaciji $t_0 = 16.66$ (ms)

Temperaturni kontrast ΔT (°C)	Opt. vred. pomeraja Δt_{opt} (ms)	Opt. vred. pojačanja A_{opt}	Min. vred. kvdr. razl. MVKR
Prvi harmonik- ω_0	4.55	1.123	0.178417
Srednja vrednost-SR	4.55	0.968	0.093256
Osam harmonica-8H	4.2	1.15	0.220841
Osam harmonica-8H*	4.45	1.085	0.131222
Wiener filter-WF	4.65	1.038	0.088379
Wiener filter SR-WFSR	4.45	0.972	0.082869

* w perioda nije fiksirana

Posmatrajući rezultate najboljeg fita u Tabeli F.4, za eksperimentalne rezultate filtrirane na jednom od prethodno pomenutih metoda filtriranja i potom na te rezultate primenom metoda minimalne vrednosti kvadrata razlike - MVKR može se zaključiti da je najbolji način filtriranja primena Wiener filtra u kombinaciji sa usrednjavanjem temperature po vertikalnoj liniji. Može se primeniti metod filtriranja Wiener filtrom i usrednjavanje po vertukali 30 piksela.

Prilog F: Rezultati sekvence SEQ.0040

F.1 Tablični rezultati AR01 i AR02 sekvence SEQ.0040 TP13



Slika F.1: Termogram (IC slika iz sekvence SEQ.0040_62 frejm snimljena je termoviziskom kamerom SC620), hladne aluminijumske ploče pre zagrevanja svetlosnim impulsom: Promene temperature na površinisu ploče se prati u: AR01 – srednja temperature svih IC piksela u oblasti.

Na Slikama F.1 i 2 desno pored slike prikazane su pozicije oblasti na termogramu.



Slika F.2: Termogram (IC slika iz sekvence SEQ.0040_65 frejm snimljena je termoviziskom kamerom SC620), zagrejane aluminijumske ploče pre zagrevanja svetlosnim impulsom: Promene temperature na površini ploče se prati u: AR01 – srednja temperatura svih IC piksela u oblasti.

Tabela F.1: Temperaturni podaci, $T_1(i,j)$, za hladnu test ploču (AR02).

(i,j)	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	(i,j)	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$
$j = 1$	20.29	20.32	20.29	$j = 16$	20.29	20.27	20.28
$j = 2$	20.3	20.28	20.33	$j = 17$	20.27	20.3	20.21
$j = 3$	20.34	20.33	20.27	$j = 18$	20.23	20.27	20.32
$j = 4$	20.32	20.3	20.3	$j = 19$	20.27	20.34	20.3
$j = 5$	20.29	20.28	20.29	$j = 20$	20.29	20.42	20.22
$j = 6$	20.28	20.23	20.24	$j = 21$	20.27	20.29	20.29
$j = 7$	20.3	20.27	20.24	$j = 22$	20.3	20.37	20.33
$j = 8$	20.25	20.18	20.21	$j = 23$	20.32	20.29	20.24
$j = 9$	20.21	20.23	20.22	$j = 24$	20.23	20.31	20.36
$j = 10$	20.3	20.26	20.23	$j = 25$	20.31	20.29	20.37
$j = 11$	20.3	20.27	20.3	$j = 26$	20.42	20.35	20.3
$j = 12$	20.26	20.26	20.33	$j = 27$	20.35	20.3	20.3
$j = 13$	20.25	20.34	20.28	$j = 28$	20.38	20.34	20.3
$j = 14$	20.32	20.26	20.32	$j = 29$	20.33	20.34	20.29
$j = 15$	20.24	20.32	20.27	$j = 30$	20.36	20.35	20.26

Tabela F.2: Temperaturni podaci, $T_2(i,j)$, za zagrejani test uzorak.

(i,j)	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	(i,j)	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$
$j = 1$	23.05	23.1	22.93	$j = 16$	23.15	23.13	23.28
$j = 2$	22.95	23.12	23.28	$j = 17$	23.16	23.3	23.2
$j = 3$	23.26	23.17	23.12	$j = 18$	23.19	23.21	23.15
$j = 4$	23.2	23.3	23.25	$j = 19$	23.2	23.26	23.26
$j = 5$	23.32	23.22	23.29	$j = 20$	23.3	23.5	23.07
$j = 6$	23.13	23.21	23.16	$j = 21$	23.13	23.09	23.16

$j = 7$	23	23.2	23.31	$j = 22$	23.32	23.3	23.31
$j = 8$	23.15	23.14	23.16	$j = 23$	23.29	23.32	23.2
$j = 9$	23.1	23.14	23.18	$j = 24$	22.89	23.1	23.33
$j = 10$	23.35	23.17	23.19	$j = 25$	23.16	23.19	23.26
$j = 11$	23.27	23.25	23.26	$j = 26$	23.26	23.31	23.23
$j = 12$	23.18	23.23	23.49	$j = 27$	23.23	23.1	23.24
$j = 13$	23.12	23.49	23.32	$j = 28$	23.23	23.08	23.08
$j = 14$	23.15	23.2	23.26	$j = 29$	22.99	23	23.05
$j = 15$	23.29	23.29	23.26	$j = 30$	23.06	23.28	23.13

Prilog G: Rezultati

G.1 Rezultati eksperimenta, numeričke simulacije i rezultati poređenja

TP 13, $2w = 4$ mm, $d = 0.5$ mm, $t_f = 33$ ms, $t_{\max \text{ sim}} = 43.94$ ms, $t_{\max} + t_f = 43.94$ ms, $43.94 - 33$ ms = 10.94 ms od početka pobude, 0.06 K na 30 °C.

Ekperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	$T_{\infty \text{ exp}}$ [K]
0 0.92 0.38 0.1 0.04 0.003	0.000173	36.3	7.6	1.304	0.7452	0.9718	0.5	0.652	0.45
0 0.94 0.32 0.19 0.1 0.07 0.003	0.019896	34.85	9.05	1.28	0.7452	0.9538	0.5	0.64	0.5
0 0.76 0.23 0.15 0.1	0.013571	32.7	11.2	1.02	0.7452	0.7601	0.5	0.51	0.5
0 0.84 0.25 0.12 0.05	0.003377	30.2	13.7	1.155	0.7452	0.8607	0.5	0.5775	0.5
0 0.06 0.4 0.09 0.05	0.000783	42.55	1.3	1.065	0.7452	0.7936	0.5	0.5325	0.5
0 0.48 0.23 0.09 0.03	0.000819	39.1	5.8	0.76	0.7452	0.5663	0.5	0.38	0.5
0 0.5566 0.39994 0.09168 0.05196	0.000804	40	3.9	1.174	0.7452	0.8748	0.5	0.585	0.5
0 0.96 0.29 0.14 0	0.003931	30.35	13.55	1.317	0.7452	0.9815	0.5	0.6585	0.5
0 0.96 0.28 0.15	0.004995	29.5	14.4	1.336	0.7452	0.9956	0.5	0.668	0.5
0 0.6 0.4 0.15	0.001499	39.85	4.05	1.222	0.7452	0.9107	0.5	0.611	0.5
0 0.84 0.39 0.13	0.000490	37.7	6.2	1.287	0.7452	0.9591	0.5	0.6435	0.5
0 0.49 0.43 0.17	0.002499	40.7	3.2	1.278	0.7452	0.9524	0.5	0.639	0.5
0 0.75 0.39 0.13	0.000489	38.55	5.35	1.243	0.7452	0.9263	0.5	0.6215	0.5
0 1.01 0.26	0.011010	22.45	21.45	1.699	0.7452	1.266	0.5	0.8495	0.5

0.18										
0 0.01 0.95 0.21 0.13 0.08	0.00965	43.2	0.7	2.475	0.7452	1.844	0.5	1.2375	0.45	
0 0.39 0.09 0.05	0.000718	10.45	33.45	1.007	0.7452	0.7504	0.5	0.5035	0.5	
0 0.04 0.39 0.18 0.12	0.012821	42.75	1.15	1.108	0.7452	0.8257	0.5	0.554	0.5	
0 0.04 0.4 0.18 0.09	0.007948	42.7	1.15	1.127	0.7452	0.9399	0.5	0.5635	0.5	
0 1.24 0.67 0.2 0.18 0.08	0.021219	38.8	5.05	2.129	0.7452	1.587	0.5	1.0645	0.5	
0 1.14 0.55 0.25 0.17 0.08	0.029718	38.35	5.55	1.85	0.7452	1.379	0.5	0.925	0.5	
0 0.7619 0.2332 0.15348 0.10032	0.014003	33	10.9	1.022	0.7452	0.7616	0.5	0.511	0.5	
0 0.05566 0.39994 0.09168 0.05196	0.000811	42.65	1.25	1.065	0.7452	0.7937	0.5	0.5325	0.5	
0 0.03976 0.39004 0.18284 0.12162	0.013491	42.75	1.15	1.111	0.7452	0.828	0.5	0.5555	0.5	
0 0.0373 0.40726 0.17964 0.08828	0.007390	42.8	1.1	1.143	0.7452	0.8518	0.5	0.5715	0.5	
0 0.48258 0.2308 0.09412 0.03516	0.001175	38.15	5.75	0.767	0.7452	0.5716	0.5	0.3835	0.5	
0 0.79 0.44 0.26 0.07 0.01	0.019170	39.35	4.55	1.459	0.7452	1.087	0.5	0.7295	0.5	
0 0.95 0.21 0.13 0.08	0.009654	10.4	33.45	2.451	0.7452	1.8265	0.5	1.2255	0.5	
0 0.98 0.26 0.16 0.08 0.06	0.000804	39.95	3.9	1.174	0.7452	0.8748	0.5	0.587	0.5	
0 0.9247 0.30198 0.17808 0.08526 0.06356 0.02226	0.015755	34	9.9	1.246	0.7452	0.9286	0.5	0.623	0.5	
0 0.83058 0.23196 0.1101 0.03952	0.002465	26.35	17.55	1.242	0.7452	0.9256	0.5	0.621	0.45	
0 0.939 0.420 0.182 0.079	0.006259	37.6	6.25	1.433	0.7452	1.068	0.5	0.7165	0.45	
0 0.83058 0.23196 0.1101 0.03952	0.002465	26.35	17.55	1.242	0.7452	0.9256	0.5	0.621	0.5	
0 0.86802 0.26764 0.14372 0.0723	0.007179	32.1	11.8	1.168	0.7452	0.8704	0.5	0.584	0.5	
0 0.90054 0.30332 0.17734 0.10508	0.014694	34.55	9.3	1.221	0.7452	0.9099	0.5	0.6105	0.45	

0 0.88 0.26 0.14	0.004397	30.15	13.75	1.211	0.7452	0.9025	0.5	0.6055	0.5
0 0.66 0.417 0.18	0.003983	39.7	4.2	1.301	0.7452	0.9695	0.5	0.6505	0.5
0 0.84 0.37 0.16	0.003178	37.45	6.45	1.264	0.7452	0.942	0.5	0.632	0.5
0 0.48 0.42 0.18	0.003884	40.75	3.15	1.267	0.7452	0.9442	0.5	0.6335	0.5
0 0.782 0.37 0.21 0.11	0.017313	38.4	5.5	1.275	0.7452	0.8902 0.9502 1.0102	0.5	0.6375	0.45
0 0.82 0.4 0.2	0.007562	38.4	5.5	1.337	0.7452	0.9964	0.5	0.6685	0.5
0 0.9 0.24 0.2	0.016764	28.5	15.35	1.276	0.7452	0.9509	0.5	0.638	0.5
0 0.92 0.386 0.099 0.0435	0.000258	36.4	7.45	1.312	0.7452	0.9777	0.5	0.656	0.45
0 0.86802 0.25764 0.13202 0.05502	0.004694	30.45	13.45	1.189	0.7452	0.8861	0.5	0.5945	0.5
0 0.144 0.62512 0.18654 0.08434	0.001587	42.35	1.5	1.707	0.7452	1.272	0.5	0.8535	0.5
0 0.01424 0.769322 0.31804 0.19078 0.02628	0.027573	43.2	0.75	2.121	0.7452	1.581	0.5	1.0605	0.5
0 0.01 0.95 0.21 0.13 0.08	0.009654	10.45	33.45	2.451	0.7452	1.821	0.5	1.2255	0.5
0 0.96 0.29 0.14 0.02	0.003417	30.5	13.4	1.314	0.7452	0.9792	0.5	0.657	0.5
0 0.98 0.37 0.25 0.13 0.1 0.07	0.043264	36.65	7.25	1.41	0.7452	1.051	0.5	0.705	0.4

Pošto je $\Delta T_{\max} - T_{\infty}$ konstantna veličina za datu pločicu TP13 iznosi 0.2452 (°C). Pošto $A \cdot \Delta T_{\max} - \Delta T_{\max}$ zavisi od Δt može se naći minimum funkcije.

TP 14, $2w = 3$ (mm), $d = 0.5$ (mm), $t_f = 33$ (ms), $t_{\max \text{ sim}} = 41.9$ (ms), $t_{\max} + t_f = 41.9$ (ms), $41.9 - 33$ (ms) = 8.9 (ms) od početka pobude, 0.06 (°C) na 30 (°C).

Ekperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ (ms)	Δt (ms)	A	ΔT_{\max} (K)	$A \cdot \Delta T_{\max}$ (K)	T_{∞} (K)	$A \cdot T_{\infty}$ (K)	T_{∞}^{exp} (K)
0 0.76 0.17 0.16 0.044	0.01913	35.3 5	6.5	1.214	0.655	0.7952	0.498	0.60457 2	0.5
0 0.59 0.38 0.27 0.16	0.066484	39.3	2.55	2.113	0.655	1.384	0.498	1.05227 4	0.5
0 0.54 0.32 0.2 0.11	0.032705	39.2	2.7	1.771	0.655	1.16	0.498	0.88195 8	0.5
0 0.64 0.1 0.04 0.02	0.000910	23	18.85	1.332	0.655	0.8724	0.498	0.66333 6	0.5
0 0.58 0.38 0.14 0.06	0.009144	39.2 5	2.6	2.013	0.655	1.318	0.498	1.00247 4	0.5
0 0.58 0.12 0.07 0.04	0.003983	33.8	8.0	0.89	0.655	0.5829	0.498	0.44322	0.5

		5							
0 0.68 0.12 0.11 0.07 0.06 0.04	0.017830	31.9	9.95	1.045	0.655	0.6845	0.498	0.52041	0.6
0 0.95 0.2 0.08 0.08 0.08	0.014328	33.7 5	8.1	1.456	0.655	0.9537	0.498	0.72508 8	0.55
0 0.61 0.05 0.04 0.03	0.003295	8.4	33.45	2.726	0.655	1.786	0.498	1.35754 8	0.4
0 0.66 0.08 0.04 0.02	0.001358	8.45	33.4	2.958	0.655	1.937	0.498	1.47308 4	0.4
0 0.99 0.4 0.29 0.24 0.01	0.104082	38.3 5	3.5	2.35	0.655	1.539	0.498	1.1703	0.6
0 0.68 0.12 0.06 0.05 0.04 0.03 0.02	0.006775	30.3 5	11.5	1.074	0.655	0.7035	0.498	0.53485 2	0.5
0 1.24 0.65 0.54 0.5 0.25	0.484425	39	2.85	3.766	0.655	2.467	0.498	1.87546 8	0.6
0 0.83 0.23 0.16 0.09	0.02233	36.7 5	5.1	1.468	0.655	0.9615	0.498	0.73106 4	0.5
0 0.54 0.2 0.13 0.12 0.07	0.027675	38.5	3.8	1.183	0.655	0.7749	0.498	0.58913 4	0.5
0 0.48 0.18 0.1 0.04	0.006401	36.7 5	3.8	1.05	0.655	0.9615	0.498	0.5229	0.5
0 0.56 0.24 0.16	0.014861	38.4 5	3.4	1.371	0.655	0.898	0.498	0.68275 8	0.5

TP 15, $2w = 2.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max}^{\text{sim}} = 39.85 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 39.85 \text{ ms}$, $39.85 - 33 \text{ ms} = 6.85 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_∞ [K]	$A \cdot T_\infty$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.75 0.53 0.43	0.159811	38.15	1.6	7.309	0.5268	3.85	0.495	3.6143	0.5
0 0.6 0.2 0.1 0	0.007838	37.65	2.15	2.947	0.5268	1.552	0.4945	1.4573	0.5
0 0.51 0.085 0.04	0.001234	36.8	3.25	1.374	0.5268	0.7238	0.4945	0.6794	0.5
0 0.64 0.1 0.08 0.05	0.007976	36.4	3.4	1.649	0.5268	0.86.87	0.4945	0.8154	0.5
0 0.28 0.12 0.09 0.05	0.009363	37.9	1.9	1.768	0.5268	0.9314	0.4945	0.8743	0.45
0 0.56 0.28 0.24 0.08	0.056329	37.95	1.8	4.020	0.5268	2.118	0.4945	1.9879	0.45
0 0.45 0.19 0.06 0.055	0.005374	37.8	1.95	2.696	0.5268	1.42	0.4945	1.3332	0.4
0 0.31 0.17 0.08 0.07	0.009760	38	1.75	2.38	0.5268	1.254	0.4945	1.1769	0.4

TP 16, $2w = 2 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max}^{\text{sim}} = 38.8 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 38.8 \text{ ms}$, $38.8 - 33 \text{ ms} = 5.8 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_∞ [K]	$A \cdot T_\infty$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.59 0.068 0.01 0.01	0.000164	36.25	2.5	2.328	0.4431	1.031	0.4917	1.144678	0.4
0 0.48 0.27 0.16 0	0.023255	37.45	1.3	8.449	0.4431	3.743	0.4917	4.154373	0.5
0 0.62 0.27 0.23 0.14	0.069026	37.3	1.45	7.981	0.4431	3.536	0.4917	3.924258	0.45
0 0.15 0.1 0.07 0.05	0.006989	37.5	1.25	3.032	0.4431	1.343	0.4917	1.490834	0.45
0 0.165 0.1 0.08 0.06	0.009536	37.45	1.3	2.967	0.4431	1.315	0.4917	1.458874	0.5
0 0.09 0.02 0.01 0.01	0.000189	36.95	1.8	0.656	0.4431	0.2907	0.4917	0.322555	0.45

TP 17, $2w = 1.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 38.8 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 37.85 \text{ ms}$,
 $37.85 - 33 \text{ ms} = 4.85 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.11 0.098 0.039 0.0001	0.001412	36.9	0.9	7.977	0.3423	2.731	0.4872	3.886394	0.4
0 0.15 0.04 0.02	0.000384	36.6	1.2	3.561	0.3423	1.219	0.4872	1.734919	0.5
0 0.63 0.12 0.04	0.005816	36	1.8	4.913	0.3423	1.682	0.4872	2.393614	0.5
0 0.37 0.26 0.21 0.04	0.044091	36.85	0.95	21.37	0.3423	7.316	0.4872	10.41146	0.4
0 0.41 0.12 0.08 0.04	0.007954	36.65	1.15	11.208	0.3423	3.837	0.4872	5.460538	0.45
0 0.165 0.108 0.081	0.006367	36.85	0.95	9.306	0.3423	3.186	0.4872	4.533883	0.4
0 0.26 0.22 0.09	0.007680	36.9	0.9	18.429	0.3423	6.309	0.4872	8.978609	0.4

TP 18, $2w = 1 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 38.8 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 36.9 \text{ ms}$,
 $36.9 - 33 \text{ ms} = 3.9 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.06 0.05 0.009 0.002	0.000148	36.1	0.75	11.702	0.2233	2.613	0.4796	5.612279	0.4
0 0.077 0.048 0.037 0.023	0.001968	36.05	0.8	10.7450	0.2233	2.399	0.4796	5.153302	0.4
0 0.64 0.52 0.36 0.11	0.142738	36.15	0.7	153.653	0.2233	34.31	0.4796	73.69198	0.45
0 0.08 0.07 0.05 0.03 0.02	0.003760	36.15	0.7	19.857	0.2233	4.433	0.4796	9.523417	0.5

TP 1, $2w = 4 \text{ mm}$, $d = 1.5 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 52.3 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 52.3 \text{ ms}$,
 $52.3 - 33 \text{ ms} = 19.3 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.15 0.06 0.019	0.000038	37.95	14.3	2.728	0.06306	0.172	0.3667	1.000358	0.5
0 0.3 0.2 0.1	0.003175	41.35	10.9	8.062	0.06306	0.5084	0.3667	2.956335	0.4
0 0.11 0.1 0.03	0.000074	42.4	9.85	3.687	0.06306	0.2325	0.3667	1.352023	0.4
0 0.08 0.05 0.02 0.008	0.000117	41	11.25	2.023	0.06306	0.1276	0.3667	0.741834	0.4
0 0.09 0.08 0.08 0.06	0.006912	42.85	9.4	3.382	0.06306	0.2133	0.3667	1.240179	0.4

TP 2, $2w = 3 \text{ mm}$, $d = 1.5 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 50.05 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 50.05 \text{ ms}$,
 $50.05 - 33 \text{ ms} = 17.05 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.048 0.032 0.01	0.000049	41.55	8.6	2.517	0.04775	0.1202	0.3663	0.921977	0.4
0 0.2 0.04 0.01	0.000039	36.25	13.25	4.527	0.04775	0.2162	0.3663	1.65824	0.4
0 0.11 0.1 0.09	0.006445	42.4	7.8	7.794	0.04775	0.3721	0.3663	2.854942	0.4
0 0.04 0.03 0.02	0.000293	42.9	8.25	2.37	0.04775	0.1132	0.3663	0.868131	0.4

TP 3, $2w = 2.5 \text{ mm}$, $d = 1.5 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 47.75 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 47.75 \text{ ms}$,
 $47.75 - 33 \text{ ms} = 14.75 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	$T_{\infty} \text{ exp}$ [K]
0 0.05 0.04 0.03 0.02	0.001254	41.75	6.05	11.219	0.02899	0.3253	0.3655	4.100545	0.4
0 0.08 0.02 0.02 0	0.000385	40	7.8	6.964	0.02899	0.2019	0.3655	2.545342	0.4

TP 4, $2w = 2 \text{ mm}$, $d = 1.5 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 46.45 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 46.45 \text{ ms}$,
 $46.45 - 33 \text{ ms} = 13.45 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	$T_{\infty} \text{ exp}$ [K]
0 0.09 0.04 0.03 0.02	0.001287	40.9	5.55	35.307	0.0191	0.6743	0.3649	12.88352	0.3
0 0.1 0.09 0.08	0.006324	41.45	4.95	71.958	0.0191	1.374	0.3649	26.25747	0.3

TP 7, $2w = 4 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 48.4 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 48.4 \text{ ms}$,
 $48.4 - 33 \text{ ms} = 15.4 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	$T_{\infty} \text{ exp}$ [K]
0 0.23 0.12 0.1	0.004630	39.85	8.5	1.453	0.2234	0.3217	0.4236	0.615491	0.4
0 0.18 0.1 0.08	0.002859	40.15	8.25	1.182	0.2234	0.2617	0.4236	0.500695	0.4
0 0.14 0.12 0.08	0.002361	41.75	6.6	1.293	0.2234	0.2862	0.4236	0.547715	0.45
0 0.26 0.15 0.1 0.05	0.005276	40.33	8.1	1.745	0.2234	0.3863	0.4236	0.739182	0.4
0 0.4 0.1 0	0.000618	13.75	34.6	3.184	0.2234	0.7048	0.4236	1.348742	0.4
0 0.25 0.15 0.1 0.04	0.004581	40.4	7.95	1.722	0.2234	0.3812	0.4236	0.729439	0.4
0 0.17 0.1 0.05	0.000593	40.1	8.25	1.114	0.2234	0.2466	0.4236	0.47189	0.45

TP 8, $2w = 3 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 46.45 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 46.45 \text{ ms}$,
 $46.45 - 33 \text{ ms} = 13.45 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	$T_{\infty} \text{ exp}$ [K]
0 0.1785 0.0644 0.0407	0.001036	38.85	7.55	1.417	0.1815	0.2571	0.4225	0.598683	0.4
0 0.21 0.2 0.18	0.023424	41.45	4.95	3.836	0.1815	0.696	0.4225	1.62071	0.4
0 0.5 0.2 0.1 0	0.005453	37.2	7.2	4.24	0.1815	0.7693	0.4225	1.7914	0.4
0 0.2 0.18 0.16 0.15	0.039965	41.4	5	3.528	0.1815	0.6402	0.4225	1.49058	0.4

TP 9, $2w = 2.5 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 44.3 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 44.3 \text{ ms}$,
 $44.3 - 33 \text{ ms} = 11.3 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	$T_{\infty} \text{ exp}$ [K]
0 0.086 0.062 0.054 0.042	0.004402	40.35	3.9	3.458	0.1271	0.4394	0.4206	1.454435	0.4

0 0.64 0.58 0.52	0.246178	40.55	3.7	31.317	0.1271	3.979	0.4206	13.17193	0.35
0 0.13 0.11 0.1 0.08	0.015485	40.5	3.75	6.021	0.1271	0.7651	0.4206	2.532433	0.4

TP 10, $2w = 2 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 43.1 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 43.1 \text{ ms}$,
 $43.1 - 33 \text{ ms} = 10.1 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.058 0.026 0.0075	0.000050	39.5	3.55	3.534	0.09438	0.3335	0.4191	1.481099	0.3
0 0.27 0.03 0	0.000000	37.6	5.45	5.009	0.09438	0.4727	0.4191	2.099272	0.4
0 0.09 0.04 0.02	0.000372	39.5	3.55	5.48	0.09438	0.5172	0.4191	2.296668	0.35

TP 11, $2w = 1.5 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 41.8 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 41.8 \text{ ms}$,
 $41.8 - 33 \text{ ms} = 8.8 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.06 0.032 0.005	0.000024	39.05	2.7	13.4 91	0.05982	0.807	0.416 8	5.62304 9	0.3
0 0.39 0.3 0.13	0.016251	39.95	2.55	118. 937	0.05982	7.112	0.416 8	49.5729 4	0.4

TP 12, $2w = 1 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $t_f = 33 \text{ ms}$, $t_{\max} \text{ sim} = 40.4 \text{ ms}$, $t_{\max} + t_f = 40.4 \text{ ms}$,
 $40.4 - 33 \text{ ms} = 7.4 \text{ ms}$ od početka pobude, 0.06 K na $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eksperimentalni rezultati F	Min KR	$A \cdot t_{\max}$ [ms]	Δt [ms]	A	ΔT_{\max} [K]	$A \cdot \Delta T_{\max}$ [K]	T_{∞} [K]	$A \cdot T_{\infty}$ [K]	T_{∞}^{exp} [K]
0 0.05 0.11 0.08 0.01	0.006855	38.6	1.75	217.0	0.02776	6.024	0.4129	89.5993	0.4
0 0.4 0.15 0.14 0.11	0.053647	6.3	34.05	597.0	0.02776	16.57	0.4129	246.5013	0.35

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Љубиша Д. Томић

број индекса - датум прихватања теме: 25. јануара 2007, године на БУ.

Изјављујем

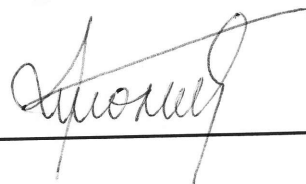
да је докторска дисертација под насловом

**НЕДЕСТРУКТИВНО ИСПИТИВАЊЕ ТЕРМОФИЗИЧКИХ ОСОБИНА
МАТЕРИЈАЛА ИЦ ТЕРМОГРАФИЈОМ**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 28. новембар 2012. године



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Томић Д. Љубиша

Број индекса - датум прихватања теме: 25. јануара 2007. године.

Студијски програм _____

Наслов рада **НЕДЕСТРУКТИВНО ИСПИТИВАЊЕ ТЕРМОФИЗИЧКИХ
ОСОБИНА МАТЕРИЈАЛА ИЦ ТЕРМОГРАФИЈОМ**

Ментор Проф. др Јован Елазар

Потписани/а _____

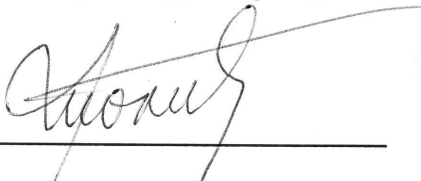
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 28. новембра 2012. године



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НЕДЕСТРУКТИВНО ИСПИТИВАЊЕ ТЕРМОФИЗИЧКИХ
ОСОБИНА МАТЕРИЈАЛА ИЦ ТЕРМОГРАФИЈОМ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 28. НОВЕМБРА 2012 год.

