

Uporedna analiza termograma podpovršinskih defekata pri različitim vremenima integracije

Ljubiša Tomić, Vesna Damnjanović, Katarina Mišković, Goran Dikić,
Boban Bondžulić, Slobodan Petričević

Apstrakt—Podpovršinski defekti, simulirani u aluminijumskoj test pločici, ispitani su metodom impulsne termografije. Pri ispitivanjima je korišćena savremena merna termovizijska kamera FLIR SC7200 sa hladenim detektorom. Radi poređenja kvaliteta generisanih termograma, podpovršinski defekti snimani su pri različitim vremenima integracije.

Ključne reči—Impulsna termografija; nedestruktivno testiranje; vreme integracije.

I. UVOD

JEDNA od rasprostranjenih metoda za nedestruktivno testiranje i procenu homogenosti materijala (Nondestructive Testing and Evaluation – NDT&E) u aktivnoj termografiji [1] je impulsna termografija (Pulsed Thermography – PT) [2]. Kod navedene metode se za zagrevanje ispitivane površine koristi impulsni izvor zagrevanja. Poslednjih godina, usled sve boljeg kvaliteta termovizijskih kamera i impulsnih izvora svetlosti (bliceva) ova metoda sve više dobija na značaju [3-5]. Naime, savremene termovizijske kamere sa hladenim infracrvenim (IC) detektorima, pored primene u vojsci, izuzetno su pogodne kako za primenu u industriji, tako i za naučne istraživačko-razvojne aplikacije kao što su termografska snimanja. U termovizijskim kamerama koje sadrže matricu detektora u fokusnoj ravni (Focal Plane Array, – FPA) [6], integrisana kola za očitavanje (Readout Integrated Circuits – ROIC) pružaju mogućnost podešavanja trajanja integracionog vremena, pri generisanju termograma. Kratko integraciono vreme, ispod jedne mikrosekunde, kod termovizijskih kamera ovog tipa, izuzetno je važno kada je neophodno praćenje brzih procesa u sceni, koje po pravilu prate i velike fluktuacije temperaturnog opsega. Promenom integracionog vremena automatski se menja i temperaturni opseg. Pored toga, ROIC omogućava rad u linearnom režimu,

što nije bio slučaj ranije, a osnovna prednost rada u ovom režimu je izbegavanje zamućenja termograma, što je česta pojava pri snimanjima brzih dinamičkih procesa kao što su brzo kretanje cilja ili vibriranje cilja. Naime, ove kamere imaju najveću osetljivost, tačnost, prostornu rezoluciju i brzinu generisanja termograma, a savremene primenjene tehnologije CNUC™ & Hipercal™ omogućuju korekciju i ujednačavanje šuma, kao i izbor velikog dinamičkog opsega.

U slučaju naših istraživanja, nakon impulsnog zagrevanja ispitivane površine jakim svetlosnim bljeskom (blicem), dolazi do brzog pojavljivanja, ali i isčezavanje obrisa simuliranih podpovršinskih defekata. Međutim, broj frejmova na kojima se može uočiti postojanje defekata kao i oštrina njihovih obrisa na njima određeni su kako karakteristikama kamere tako i izborom adekvatnih parametara od kojih su odlučujući frekvencija njihovog generisanja i vreme integracije.

II. PRIPREMA TEST UZORKA

Aluminijum je komercijalni materijal koji ima široku primenu u industriji. Tipični defekti u građevinskim materijalima izrađenim od aluminijumskih ploča su šupljine i serije pukotina. U cilju proučavanja ovakvih defekata, specijalno je izrađen test uzorak - aluminijumska pločica dimenzija 50 mm × 30 mm × 2 mm u kojoj su simulirani periodični defekti pravougaonog oblika dimenzija 15 mm × 4 mm × 1,5 mm, tj. defekti se nalaze na 0,5 mm ispod površine.

Obično nije neophodna posebna priprema površine uzorka koji će se ispitivati. Međutim, u slučaju visoko-refleksivnih površina, što je slučaj kod metalnih uzoraka, površina se mora premazati farbom koja će apsorbovati energiju blica, što će za termovizijsku kameru predstavljati emiter IC zračenja. Upravo zato je aluminijumski uzorak, nakon urezivanja defekata, eloksiran crnom bojom.

III. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Za zagrevanje površine ispitivanog test uzorka korišćen je fotografski blic tipa YASHICA CS-250AF optimalno pozicioniran ispred njega a simulirani podpovršinski defekti i proces njihovog hlađenja, praćeni su savremenom mernom termovizijskom kamerom FLIR SC7200 sa hladenim detektorima (Sl. 1).

Korišćena kamera radi u spektralnom opsegu od 1,5 μm do 5,1 μm sa mogućnošću variranja parametara pri snimanju. Temperatura IC detektora u hladnjaku kamere je -196,9 °C, sa optikom od 50 mm (vidno polje kamere je 11° × 8.8°).

Ljubiša Tomić – Vojnotehnički Institut, Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: ljubisa.tomic@gmail.com).

Vesna Damnjanović – Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Dušina 7, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: vesna.damnjanovic@rgf.bg.ac.rs).

Katarina Mišković – Vojnotehnički Institut, Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: katarinasavic@gmail.com).

Goran Dikić – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Generala Pavla Jurišića Šturma 33, 11000, Beograd, Srbija (e-mail: goran.dikic@mod.gov.rs).

Boban Bondžulić – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Generala Pavla Jurišića Šturma 33, 11000, Beograd, Srbija (e-mail: bondzulici@yahoo.com).

Slobodan Petričević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: slobodan@etf.bg.ac.rs).

Neki važni parametri korišćene termovizijske kamere su: izabrani temperaturni opseg od 5 °C do 300 °C sa mogućnošću podešavanja vremena integracije sa korakom od 1 μ s da bi se dobio odgovarajući temperaturni podopseg; vreme integracije kamere se može menjati u opsegu od 3 μ s do 20 ms; temperaturna osetljivost (NETD <25 mK).



Sl. 1. Eksperimentalna postavka.

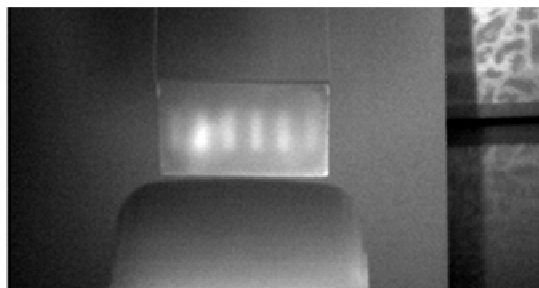
Fiksirani eksperimentalni parametri pri našim istraživanjima su: blic i termovizijska kamera pozicionirani su u odnosu na uzorak na rastojanjima 5 cm i 1 m, respektivno; sobna temperatura tj. temperatura vazduha izmerena termometrom iznosila je 23,9 °C; ambijentalna temperatura tj. temperatura procenjena termovizijskom kamerom iznosila je 19,4 °C; transmisija 100 %; i emisivnost test uzorka 0,95.

Sa ciljem poređenja kvaliteta termograma tj. što jasnijeg utvrđivanja položaja i dimenzija simuliranih periodičnih defekata (šupljina) širine 4 mm, vršene su tri serije snimanja, pri identičnim eksperimentalnim uslovima, ali pri različitim vremenima integracije.

Vreme integracije zapravo predstavlja dužinu ekspozicije detektora, odnosno vreme za koje je detektor izložen prijemu signala iz okoline. Vreme integracije je softverski direktno spregnuto sa temperaturnim opsegom u kome termovizijska kamera radi. Naime, duže vreme integracije zapravo znači da detektor duže prima energiju iz okoline, pa je samim tim moguća detekcija nižih temperatura. Skraćanjem vremena integracije otvara se mogućnost detekcije viših temperatura. Dakle, kako bi se adekvatno detektovale više temperature iz okoline, vreme integracije mora da bude kraće i obrnuto. Temperaturni opsezi koji su u eksperimentu pratili vreme integracije od 300 μ s, 600 μ s, i 900 μ s navedeni su u Tabeli I. Vreme integracije, temperaturni opseg i aktivna površina detektora, direktno su, takođe, spregnuti i sa frekvencijom generisanja termograma. Korišćena termovizijska kamera omogućava da aktivna površina detektora bude: 320 \times 256 piksela, 160 \times 128 piksela, 64 \times 120 piksela i 64 \times 8 piksela. Skraćivanjem vremena integracije i aktivne površine detektora moguće je uraditi akviziciju brzinom od 1500 Hz. Iako kamera ima mogućnost akvizicije signala od 10000 Hz

nemoguće je postići tu brzinu akvizicije za temperaturu ambijenta od 19,4 °C.

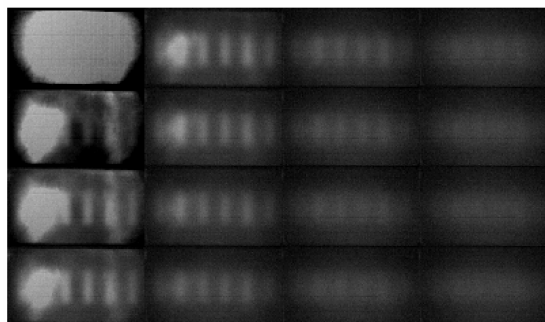
Snimanja su vršena frekvencijom od 150 Hz (\approx 7 ms) u tri serije sa integracionim vremenima 300 μ s, 600 μ s i 900 μ s (samim tim i u različitim temperaturnim opsezima – Tabela I.). Format termograma bio je 320 \times 256 piksela. Primera radi, na Sl. 2 prikazan je jedan od snimljenih termograma ambijenta sa uzorkom registrovan u procesu hlađenja.



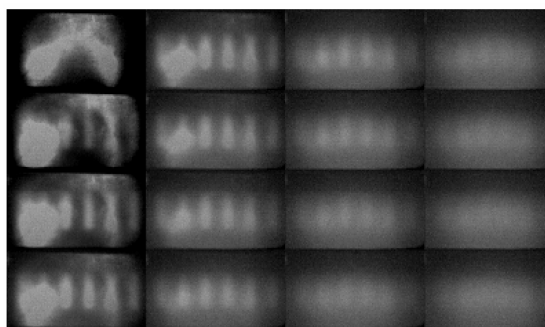
Sl. 2. Termogram ambijenta sa uzorkom registrovan u procesu hlađenja.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Vizualizacija termalnog procesa ostvarena je kroz prikaz šesnaest sukcesivnih isečaka iz frejmova registrovanih neposredno nakon aktiviranja blica, odnosno nakon zagrevanja test uzorka, koji su prikazani na slikama 3, 4 i 5 u matricnoj formi (po kolonama s leva na desno).

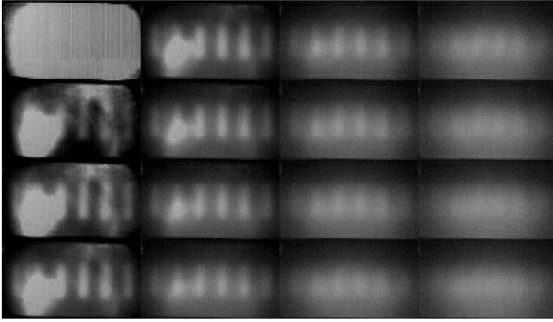


Sl. 3. Prikaz isečaka iz frejmova u matricnoj formi pri vremenu integracije od 300 μ s.



Sl. 4. Prikaz isečaka iz frejmova u matricnoj formi pri vremenu integracije od 600 μ s.

Prikazani isečci iz frejmova su registrovani pri vremenima integracije od 300 μ s, 600 μ s i 900 μ s.



Sl. 5. Prikaz isečaka iz frejmova u matricnoj formi pri vremenu integracije od 900 μ s.

Poređenjem prvih frejmova u okviru tri prikazane sekvence uočava se razlika u obliku termalnog odraza. Imajući u vidu da okidanje blica nije sinhronizovano sa start frejmom kamere, očigledno odvijanje termalnog procesa, unutar vremena od približno 7 ms (određeno frekvencijom generisanja frejma) najduže je trajalo u slučaju kada je vreme integracije 600 μ s.

U Tabeli I., pored temperaturnih opsega koji odgovaraju vremenima integracije od 300 μ s, 600 μ s i 900 μ s, navedena je i temperaturna razlika Δt između maksimalnih temperatura iznad sredine četvrtog defekta i sredine susedne bezdefektne oblasti, frejmova odgovarajućih sekvenci.

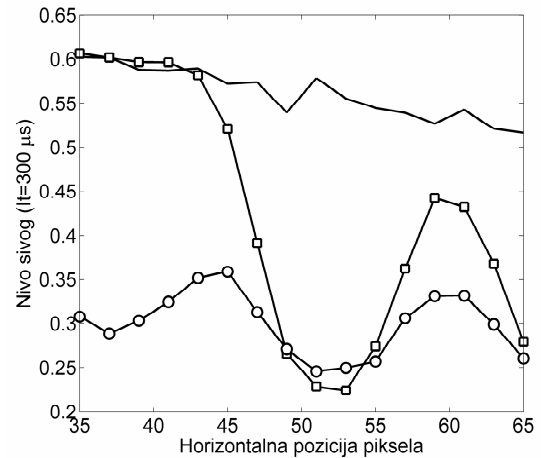
TABELA I
MAKSIMALNA TEMPERATURNI RAZLIKA ZA TRI RAZLIČITA VREMENA INTEGRACIJE

Vreme integracije [μ s]	Sekvenca N_0	Temperaturni opseg [$^{\circ}$ C]	Δt [$^{\circ}$ C]
900	879	5 - 27	0.81
600	882	5 - 44	0.69
300	885	5 - 73	0.91

Poređenjem poslednjih frejmova unutar tri prikazane sekvence uočava se da povećanje vremena integracije omogućava duže uočavanje podpovršinskih defekata. Sa druge strane, ovo je praćeno pogoršanjem oštine likova podpovršinskih defekata, odnosno pojavom razmazanih temperaturnih profila što otežava određivanje tačnih dimenzija defekata.

Uvid u tok termalnog procesa izvršen je analizom srednje vrednosti promene temperature (prikazane normirano u nijansama sivog) u oblasti koja pripada središnjem delu trećeg i četvrtog podpovršinskog defekata (od 25-og do 35-og reda na pozicijama u intervalu od 35-e do 65-e kolone isečka čije su dimenzije 57 piksela visina i 100 piksela širina), između kojih se nalazi i bezdefektna oblast.

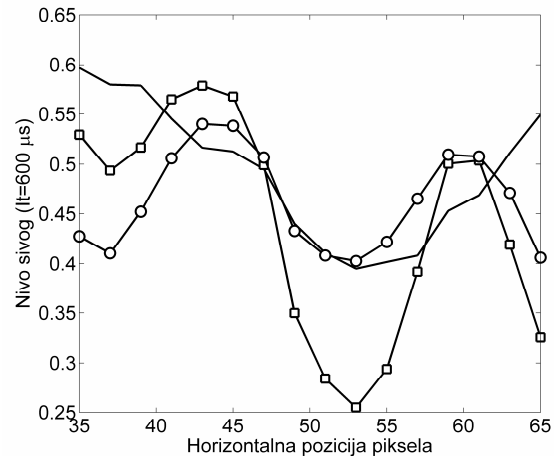
Slike 6, 7 i 8 prikazuju ove promene registrovane u prvom (puna linija), trećem (kvadrati) i sedmom frejmu (krugovi).



Sl. 6. Srednja vrednost nivoa sivog pri vremenu integracije od 300 μ s: prvi frejm - puna linija; treći frejm - kvadrati i sedmi frejm - krugovi.

Oblik krive (Sl.6 – puna linija) ukazuje da je zagrejanost površine test uzorka nakon osvetljavanja približno jednaka kako u defektnim, tako i u bezdefektnim oblastima, ali blagi pad ove krive (slevo na desno) ukazuje da je zagrevanje ipak neravnomerno.

U trećem i sedmom frejmu (kvadrati i krugovi,) na istoj slici, uočava se da je došlo do formiranja temperaturnog obrisa.

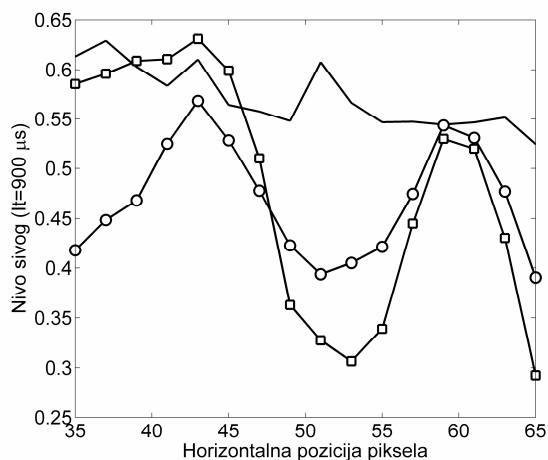


Sl. 7. Srednja vrednost nivoa sivog pri vremenu integracije od 600 μ s: prvi frejm - puna linija; treći frejm - kvadrati i sedmi frejm - krugovi.

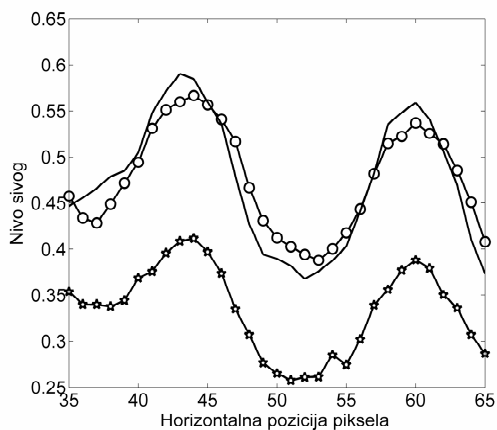
Međutim, kada je integraciono vreme nešto duže - 600 μ s (Sl. 7), već u prvom frejmu dolazi do formiranja jasnog temperaturnog obrisa.

Sa rastom, vremena integracije (Sl. 8) ponovo dolazi do istog efekta u prvom frejmu kao i kod kratkog - 300 μ s integracionog vremena.

Sa ciljem da se prouči uticaj vremena integracije na praćenje termalnog procesa izvršena je istovetna analiza unutar 6-og frejma (Sl. 9).



Sl. 8. Srednja vrednost nivoa sivog pri vremenu integracije od 900 μ s: prvi frejm - puna linija; treći frejm - kvadrati i sedmi frejm - krugovi.



Sl. 9. Srednja vrednost nivoa sivog u šestom frejmu pri vremenu integracije: 900 μ s – puna linija; 600 μ s – krugovi i 300 μ s – zvezdice.

Šesti frejm (Sl. 9) analiziran je upravo zbog najpravilnijeg temperaturnog profila koji takođe obuhvata dva defekta i bezdefektnu oblast između njih, kada je jak uticaj ambijenta, najviše usled zagrejanosti blica nakon okidanja, smanjen.

Vreme integracije manje od 300 μ s u našim istraživanjima nije korišćeno iako kamera pruža takvu mogućnost, jer u takvom režimu rada donja granična temperatura takva da ne obuhvata temperaturni opseg ambijenta. Takođe, vreme integracije duže od 900 μ s nije uzimano u obzir jer dovođenjem energije na test uzorak, detektor kamere ulazi u zasićenje.

V. ZAKLJUČAK

Radi utvrđivanja mogućnosti nedestruktivnog ispitivanja test uzoraka metodom impulsne termografije koje može da pruži savremena merna termovizijska kamera FLIR SC7200

sa hlađenim detektorom, izvršeno je poređenje kvaliteta i analiza generisanih termograma od podpovršinskih simuliranih defekata, u različitim režimima rada. Broj frejmova na kojima se može uočiti postojanje defekata, kao i oštrina njihovih obrisa na njima, nisu određeni isključivo karakteristikama termalne kamere, već i izborom adekvatnih parametara, od kojih su odlučujući frekvencija generisanja termograma i vreme integracije (koje je automatski spregnuto sa temperaturnim opsegom). Naime, neophodno je izabrati optimalni temperaturni opseg, kako bi se dobilo što više termograma (frejmova) sa korisnim zapisom. Eksperimentalni podaci ukazuju na to da je optimalno vreme integracije tj. dužine ekspozicije infracrvenog detektora pri prikupljanju korisnog signala, u istraživanjima ovog tipa oko 600 μ s, pri frekvenciji generisanja termograma od 150 Hz.

ZAHVALNICA

Istraživanje je podržano od strane Laboratorije za optoelektroniku Vojnotehničkog instituta u Beogradu.

LITERATURA

- [1] X. P. V. Maldague, "Active Thermography in *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*", ch. 9, sec. 9.2, pp. 347–348, New York, USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [2] G. Dikić, L. Tomić, V. Damnjanović, B. Milanović, "Characterization of periodic cylindrical subsurface defects by pulsed thermography", *Surface Review and Letters*, vol. 22, No. 2, pp. 1550032, 2015.
- [3] L. Tomić, J. Elazar, "Pulse thermography experimental data processing by numerically simulating thermal processes in a sample with periodical structure of defects", *NDT&E International*, vol. 60., pp.132-138, 2013.
- [4] L. Tomić, D. Jovanović, R. Karkalić, V. Damnjanović, B. Kovačević, D. Filipović, S. Radaković, "Application of pulsed flash thermography method for specific defect estimation in aluminum", *Thermal Science*, vol. 19, No.5, pp. 1835-1844, 2015.
- [5] Ljubiša Tomić, Vesna Damnjanović, Goran Dikić, Boban Bondžulić, Bojan Milanović, Rade Pavlović: "Aluminium tiles defects detection by employing pulsed thermography method with diferent thermal cameras", 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies, OTEH 2016, Belgrade, Serbia pp. 370-375, October 2016.
- [6] J. A. Rogalsky, "Infrared detector materials: history, status and outlook", *Reports on Progress in Physics* vol. 68, pp. 2267-2336, 2005.

ABSTRACT

Simulated subsurface defects in an aluminum test plate are examined applying the pulsed thermography method. A modern measuring FLIR SC 7200 thermal camera with cooled detectors is used. In order to compare the quality of the generated thermal images, the subsurface defects are captured at different integration times.

Comparative Analysis of the Thermogram with Subsurface Defects at Diferent Times of Integration

Ljubiša Tomić, Vesna Damnjanović, Katarina Mišković, Goran Dikić, Boban Bondžulić, Slobodan Petričević