

# Primjena infracrvene termografije kod mehaničkog ispitivanja materijala

Mihaela Berković-Šubić, Ivanka Boras, Joško Frančeski, Janoš Kodvanj,  
Gordan Plačko, Alan Rodić, Martina Surjak, Srećko Švaić, Zdenko  
Tonković

Fakultet strojarstva i brodogradnje  
Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb

## SAŽETAK

U radu je prikazana analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja procesa deformiranja plosnatih epruveta. Eksperimentom je obuhvaćeno statičko vlačno ispitivanje epruveta izrađenih od nodularnog lijeva pri dvije brzine deformiranja. Raspodjele pomaka i temperatura na vanjskim plohama epruveta za vrijeme eksperimenta određene su pomoću metoda fotogrametrije (optičkim sustavom ARAMIS) te pomoću termoparova i infracrvene termografije. Cilj rada je bio dovesti u korelaciju elastoplastične deformacije i prirast površinskih temperatura u opterećenim epruvetama. Dobiveni eksperimentalni rezultati će omogućiti točnije kalibriranje parametara materijala u termoplastičnim konstitutivnim modelima.

## KLJUČNE RIJEČI

Infracrvena termografija; termopar; digitalna korelacija slike; termoelastičnost

## UVOD

### Statičko vlačno ispitivanje

Statički vlačni pokus koristi se pri ispitivanju elastičnog i plastičnog ponašanja materijala pri jednoosnom statičkom vlačnom naprezanju. Uslijed djelovanja sile u svim točkama poprečnog presjeka javlja se vlačno naprezanje (1):

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (1)$$

Vlačno naprezanje  $\sigma$  uzrokuje produljenje, odnosno relativno produljenje (2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [\text{mm/mm}] \quad (2)$$

Deformacija epruvete izražava se jednačbom (3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (3)$$

Naprezanje u materijalu kod najveće sile ( $F_m$ ) naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom (5):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (4)$$

### **Termoelastična analiza naprezanja**

Termoelastična analiza naprezanja temelji se na promjeni temperature opterećenog uzorka te je na taj način moguće odrediti iznos naprezanja i mjesta koncentracije naprezanja u promatranom uzorku. Teorijsko objašnjenje termoelastičnog efekta je 1853. godine objavio Wiliam Thomson te postavio osnovnu jednačbu termoelastičnosti (5) [1]. Pri tome je potrebno napomenuti kako navedena jednačba vrijedi samo za adijabatsko stanje i elastično područje naprezanja [2].

$$\Delta T = - \frac{\alpha T}{\rho c_p} \Delta \sigma \quad (5)$$

## **OBJEKT MJERENJA I MJERNA OPREMA**

### **Objekt mjerenja**

Eksperimentalno istraživanje provedeno je na pet plosnatih epruveta (nodularni lijev) standardiziranih dimenzija za statičko vlačno ispitivanje. Plosnata epruveta pravokutnog je presjeka, u obliku štapa sa zadebljanim krajevima. Prijelaz iz zadebljanog dijela u tanji dio epruvete je blag kako bi se postigao lom unutar stanjenog, središnjeg dijela.

### **Mjerna oprema**

*Servohidraulička kidalica* (LFV-50-HH; Walter Bai, Switzerland) s digitalnom upravljačkom jedinicom DIGWIN 2000-EDC120 koristi se za provedbu statičko vlačnog testa. Prije početka ispitivanja u upravljačku jedinicu se unose vrijednosti parametara ispitivanja, odnosno oblik i iznos opterećenja.

Upravljačka jedinica prati pomak gornje čeljusti umaralice na način da se pri konstantnom opterećenju prate vršne vrijednosti pomaka.

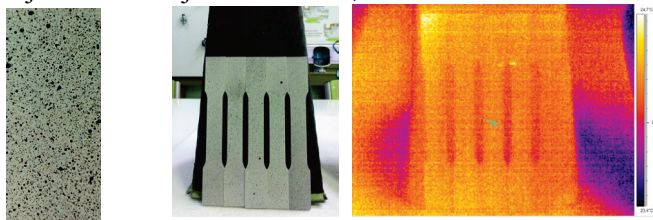
Optički mjerni sustav (ARAMIS 4M, GOM, Njemačka). Beskontaktni 3D i materijalno neovisni mjerni sustav za analizu raspodjele pomaka i deformacija na opterećenim objektima. Sustav se pri radu koristi metodom fotogrametrije. Mjerenjem se određuje raspodjela pomaka po čitavom mjernom području i to bez utjecaja na rezultat mjerenja. Sustav se koristi za mjerenje deformacija epruvete, na čiju površinu se prethodno nanese stohastički raster. Preko deformacije rastera mjeri se pomak i deformacija promatrane zone te na temelju usporedbe sustav daje informaciju o pomaku svake točke na površini te posredno o raspodjeli površinskih naprežanja.

Infracrvena kamera (FLIR ThermaCAM SC 2000) koristi se za nerazarajuće, beskontaktno bilježenje temperaturne raspodjele na površini ispitivanog uzorka bez utjecaja na toplinsko stanje uzorka.

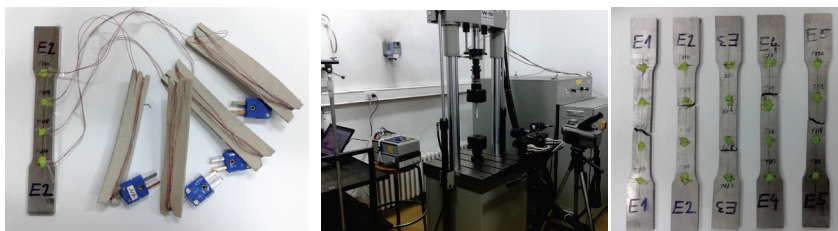
A/D converter "Agilent" (tip 34970A switch unit s.br. MY 41022529, 34901A 20-channel multiplexer module) povezuje termoparove s računalom čime je omogućeno praćenje promjene temperatura tijekom perioda mjerenja. Sva očitavanja temperature prikupljaju se i pohranjuju na računalu u zadanom vremenskom intervalu.

## PRIPREMA EKSPREIMENTA

Površina epruvete je tretirana tankim slojem boje u spreju. Prvo je nanesen tanki sloj bijelog mat laka radi uklanjanja refleksije, a zatim je sprejem nanesen crni stohastički raster čije se deformiranje mjeri optičkim sustavom. Kontaktnim termoparom ALMEMO 2690-8 zabilježene su vrijednosti temperatura površine epruveta te je određena srednja temperatura površine epruvete [Slika 1]. IC kamerom je određena temperatura ambijenta te u konačnosti emisijski faktor koji iznosi  $\varepsilon = 0,98$ .



Slika 1. Stohastički raster (lijevo), postav epruveta pri određivanju emisijskog faktora (sredina), IC prikaz epruveta (desno)



Slika 2. Smještaj termoparova duž epruvete E2 (lijevo), eksperimentalni postav (sredina), epruvete nakon eksperimenta (desno)

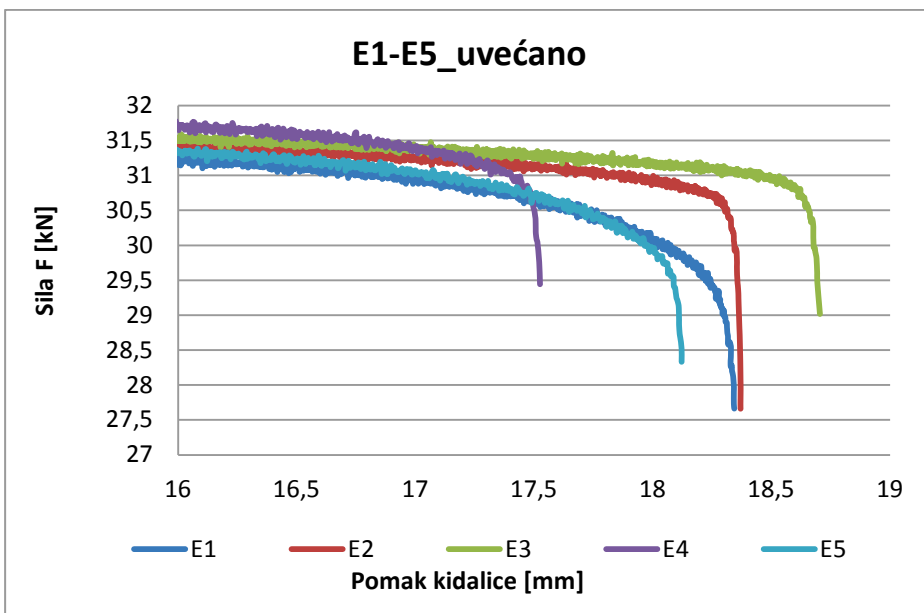
## REZULTATI EKSPREIMENTA

Statičko vlačni test proveden je pri dvije različite brzine deformiranja. Epruvete E1, E2 i E3 ispitivane su pri brzinama deformiranja od 0,1 m/s, a epruvete E4 i E5 pri brzinama deformiranja od 0,2 m/s. Optički mjerni sustav bilježi podatke o pomacima epruvete, servohidraulička kidalica bilježi podatke o opterećenju, a IC kamera i termoparovi bilježe promjene temperature epruvete [Slika 2].

Servohidraulička kidalica tijekom ispitivanja postupno povećava i bilježi vlačnu silu  $F$  i pripadajući pomak kidalice  $\Delta L$ . Za svih 5 epruveta dijagram kidanja kvalitativno izgleda jednako. Prvi dio dijagrama sila – pomak pokazuje linearno ponašanje. Ukoliko bi se epruveta rasteretila u ovom području, vratila bi se na početne mjere zbog postojanja samo elastičnih deformacija u materijalu. Nakon postizanja granice razvlačenja (najveće naprezanje kod kojeg nakon rasterećenja neće doći do trajne deformacije) epruveta se nastavlja produljivati te je za daljnje rastezanje materijala potrebno povećanje sile. Granica plastičnosti/popuštanja/tečenja je ono naprezanje kojim započinje intenzivnije produljenje epruvete – tečenje materijala. Za nodularni lijev uočava se kontinuirani prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija. Opterećenje se povećava sve do maksimalne sile  $F_m$ , nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz sve manju silu. Vlačna čvrstoća/granica razvlačenja je maksimalan iznos omjera maksimalne sile i početne površine presjeka epruvete. Dijagramom [Slika 3] je prikazan dio nakon postizanja maksimalne sile pa do trenutka loma. Uočava se kako je povećanjem brzine deformiranja sve manje izražena ploha tečenja te raste vlačna čvrstoća, no do loma dolazi pri ukupno manjoj deformaciji (Epruvete E4 i E5) [3]. Podaci potrebni za izračun vlačne čvrstoće prema izrazu (4) kao i dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće epruveta su dani u [Tablica 1].

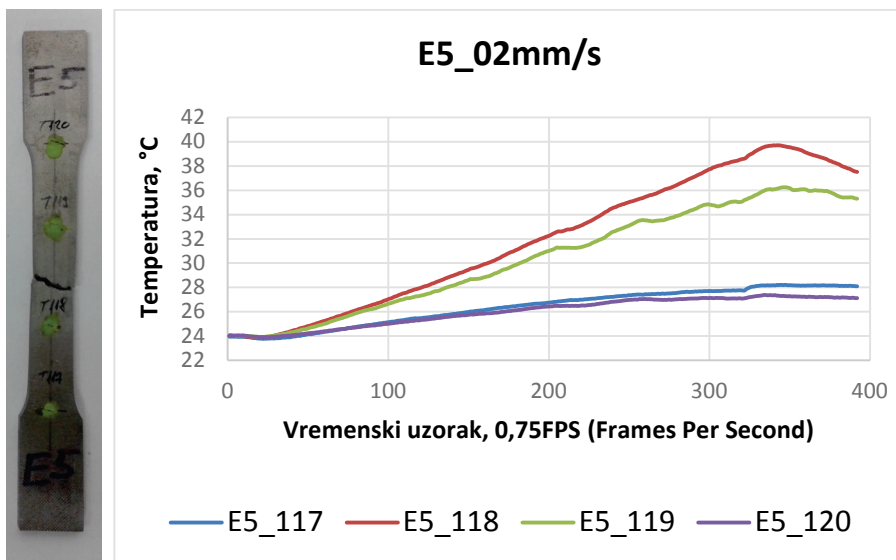
Tablica 1. E1 – E5 - Vlačna čvrstoća

	E1	E2	E3	E4	E5
$F_{\max}$ [N]	31532,7	31609,8	31745,5	32034,4	31655
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] (za $A_{0,E_1} = 80$ mm <sup>2</sup> )	394,158	395,123	396,819	400,43	395,687



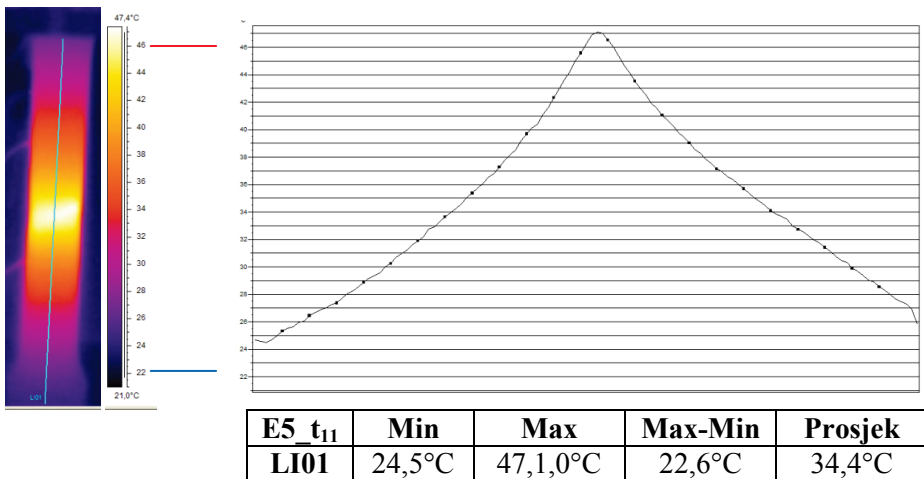
Slika 3. E1 – E5 – Promjena sile i pomaka - uvećano

Termoparovima se bilježe podaci o promjeni temperature površine epruvete tijekom trajanja statičko vlačnog ispitivanja [Slika 4]. Na svim ispitanim epruvetama primjećuje se temperaturni pad pri početnom opterećenju epruvete. Uočeni temperaturni pad odgovara termoelastičnom ohlađivanju elastično opterećene epruvete. Nakon temperaturnog pada slijedi povećanje temperature što je uzrokovano nepovratnom plastifikacijom materijala epruvete. Termoparovi koji su smješteni na srednjem dijelu epruvete bilježe najviše temperature te se uočava izražajni porast temperature sve do trenutka loma. Nakon loma epruvete, bilježe se smanjene temperature. Na druga dva termopara, koji su smješteni prema krajevima epruvete, temperature su tijekom cijelog ispitivanja nešto niže te ih karakterizira sporiji porast temperature. Valja napomenuti kako ispitivanja svih epruveta nisu savršeno usklađena. Naime, pri ispitivanju pet epruveta A/D converter "Agilent" za prikupljanje podataka o temperaturi nije započeo bilježenje podataka istovremeno kada i kidalica. Stoga postoji početni vremenski period u kojem je temperatura konstantna (prije početka opterećivanja epruvete), a trajanje tog perioda razlikuje se kod svake ispitivane epruvete.



Slika 4. E5 - Dijagram promjene temperature mjerene termoparovima

Infracrvenom kamerom se bilježe podaci o promjeni temperature površine epruvete tijekom trajanja statičko vlačnog ispitivanja [Slika 5]. Raspodjela temperature na površini epruvete tijekom ispitivanja dobivena je pomoću software-a „FLIR ThermoCAM Researcher 2.10 PRO“ [4]. Za odabrani vremenski trenutak prikazan je termogram snimljen IC kamerom, odgovarajuća temperaturna skala, položaj linije uzdužnog presjeka epruvete te popratni dijagram raspodjele temperature na liniji presjeka. Linija presjeka prikazana na svakom termogramu određena je na način da se poklapa sa zamišljenom linijom koju čine četiri termopara postavljena duž epruvete. Također su tablično ispisani podaci o najnižoj, najvišoj i prosječnoj temperaturi na liniji uzdužnog presjeka. Dijagram opisuje trenutak ( $t = t_{11}$ ) neposredno prije loma epruvete u kojem se bilježe najviše temperature tijekom statičko vlačnog ispitivanja. Unutarnja energija materijala mijenja se s pojavom unutarnjih nepravilnosti poput šupljina, međuprostora i dislokacija. Pohranjena unutarnja energija ovisi o broju nepravilnosti i njihovom smještaju unutar materijala. Energija generirana djelovanjem vanjske sile na materijal se ili odvede u okolinu (izmjena topline s okolišem) ili ostaje u materijalu i uzrokuje povećanje temperature materijala (povećanje unutarnje energije). Kada je iznos te generirane energije veći od iznosa toplinskih gubitaka u okoliš, temperatura materijala se povećava. Tablica podno dijagrama prikazuje najviše postignute temperature na površini epruveta za svaku ispitivanu epruvetu.

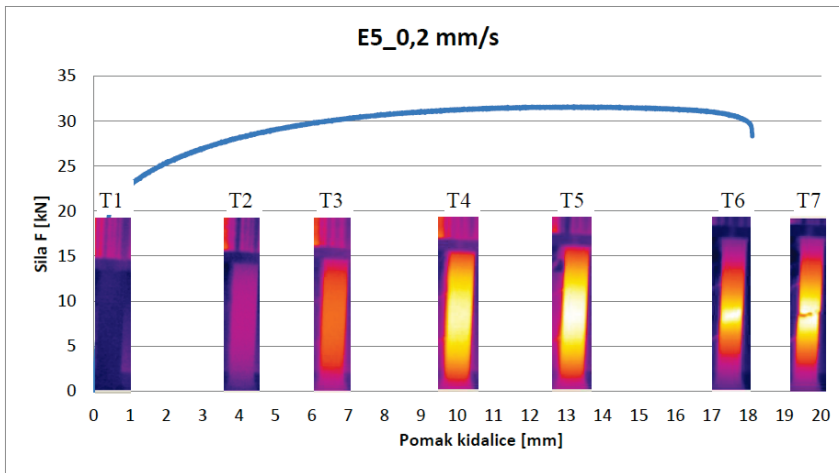


Slika 1. E5 - Dijagram promjene temperature mjerene IC kamerom te karakteristične temperature mjerene IC kamerom ( $t = t_{11}$ )

Kao poveznica eksperimentalnih rezultata statičko vlačnog ispitivanja (mjerjenja servohidrauličkom kidalicom) i mjerjenja površinskih temperatura (rezultati zabilježeni IC kamerom) [Slika 6] [Tablica 2] odabrana je epruveta E5 iz razloga vrlo dobrog poklapanja vremenskih trenutaka u kojima su rezultati zabilježeni, čime je omogućena vrlo precizna poveznica praćenih veličina u vremenu. Za nekoliko odabranih vremenskih trenutaka dana je slikovita usporedba raspodjele sile i pomaka zajedno s prikazom raspodjele temperature u svim točkama površine epruvete. Unutar elastičnog područja na IC kameri slabo su vidljiva mjesta koncentracije naprezanja (T1). Unutar područja plastičnih deformacija vidljive su na termogramima promjene temperature duž epruvete (T2,T3,T4). Značajan trenutak je trenutak pojave maksimalne sile kidalice (T5), no najveća zabilježena temperatura IC kamerom nije zabilježena u tom trenutku. Daljnjim opterećivanjem epruvete temperature se i dalje povećava te doseže svoj maksimum neposredno prije loma epruvete (T6). Nakon loma, temperature epruvete se smanjuje (T7).

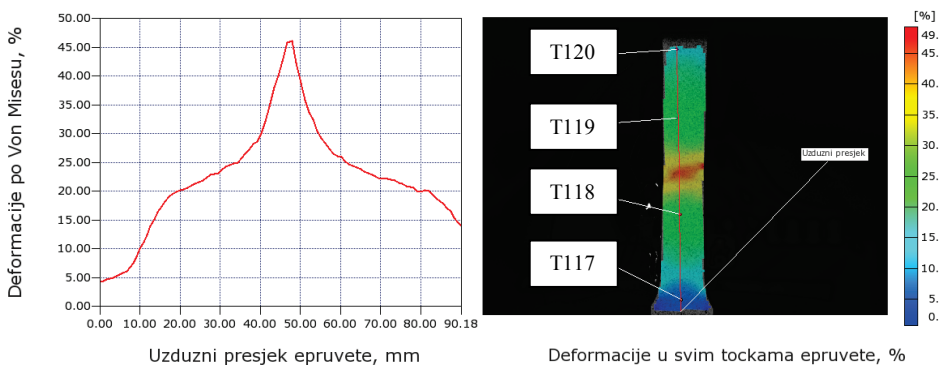
Tablica 2. Eksperimentalne vrijednosti u odabranim točkama T1-T7

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Vrijeme	13:25:28	13:25:47	13:25:59	13:26:17	13:26:33	13:26:55	13:26:59
Sila [kN]	10,0382	18,1386	30,0582	31,3424	31,655	30,61411	-
Pomak [mm]	0,1842	4,0002	6,4585	10,0018	13,2099	17,59087	-
$\vartheta_{\max}$ [°C]	23,3	25,9	27,8	33,0	34,9	47,4	43,9



Slika 6. E5 - Poveznica servohidraulička kidalica (sila) i IC kamera (površinske temperature)

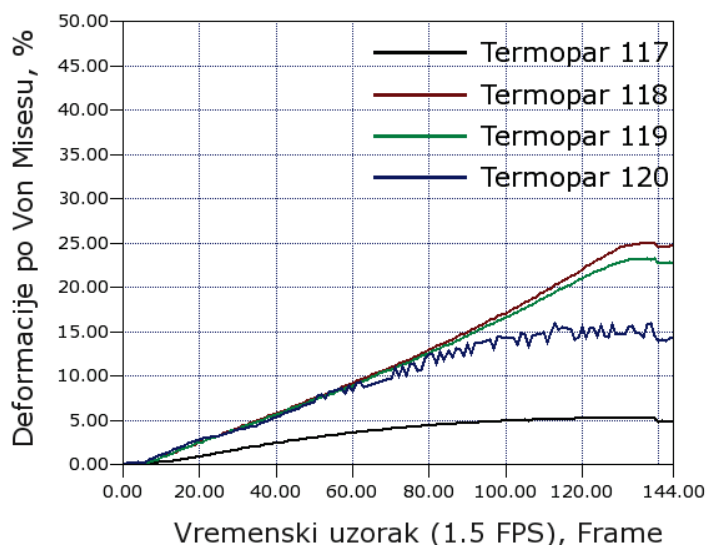
*Sustav ARAMIS* tijekom statičko vlačnog ispitivanja snima dijagram promjene deformacije po uzdužnom presjeku svake epruvete s određenim vremenskim korakom. Deformacije po Von Misesu su izražene u postocima %, a uzdužni presjek epruvete u mm. Računalni program daje prostorni prikaz točaka na površini s prikazom deformacija preko slike iz kamera optičkog sustava kako bi se lakše vizualizirale kritične zone [5]. Boje pokazuju iznose deformacija prema mjernoj skali koja se nalazi s desne strane slike. Također je za svaku epruvetu zabilježena promjena deformacije po vremenu u četiri odabrane točke duž osi epruvete (mjesto postavljenih termoparova T117, T118, T119 i T120) [Slika 7].



Slika 7. E5 – Dijagram promjene deformacija ( $t = t_{11}$ )



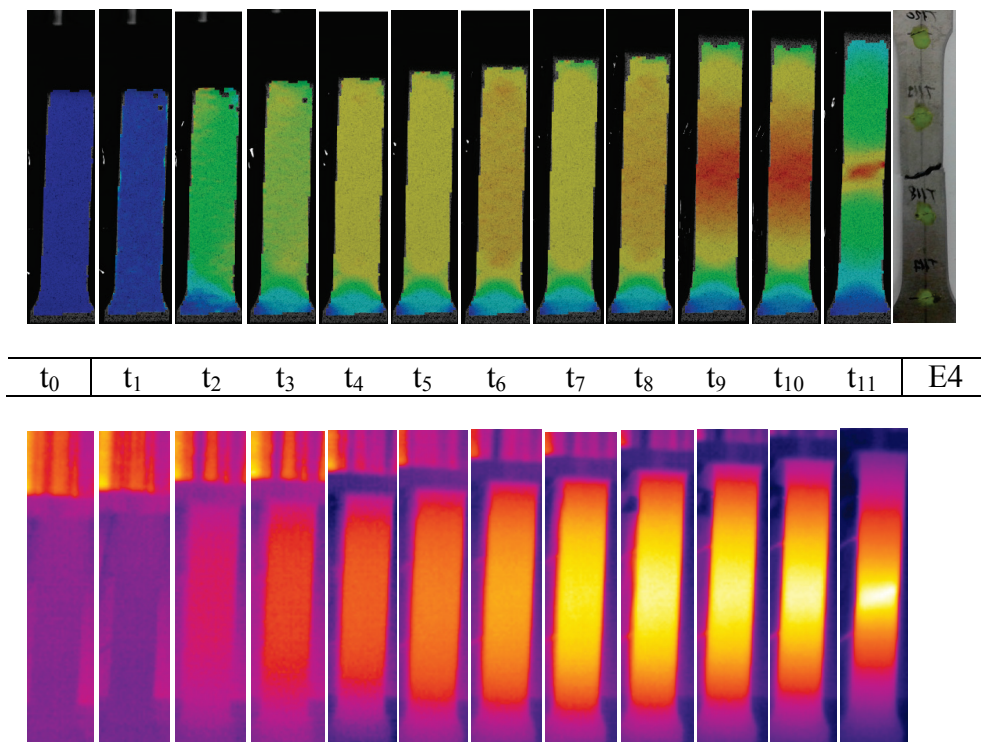
Analizom profila temperaturne raspodjele zabilježene termoparovima [Slika 4] tijekom ispitivanja primjećuje se kako ona upravo odgovara raspodjeli deformacija određenih optičkim sustavom ARAMIS [Slika 8] u tom istom periodu. Sva mjerenja pokazuju kako trend vremenske promjene temperature u četiri točke (mjesto postavljanja termoparova) odgovara trendu promjene deformacija u vlačno opterećenim epruvetama. Uočava se kako sustav ARAMIS ne bilježi promjenu u deformacijama na mjestu gdje se termoparovima bilježi temperaturni pad koji se javlja nakon nekoliko sekundi od početka opterećivanja epruvete. I za prikazanu raspodjelu temperature i za raspodjelu deformacija, jasno se vidi kako one mjerne točke (mjesto postavljanja termoparova) koje se nalaze na rubu epruvete, daju niže vrijednosti kako temperature tako i deformacija. Najveće promjene temperatura i deformacija vidljive su u središnjem dijelu epruvete gdje u konačnosti i dolazi do loma.



Slika 8. E5 - Promjena deformacije na mjestu termoparova

Za 12 odabranih vremenskih trenutaka dan je slikovni prikaz deformacija u svim točkama epruvete te prikaz raspodjele temperatura u svim točkama epruvete. Vidljivo je kako se na oba načina može pratiti plastifikacija epruvete. Tijekom vlačnog opterećenja epruvete dolazi do promjene temperature epruvete. Uspoređivanjem rezultata raspodjele naprezanja dobivenih optičkim sustavom ARAMIS s raspodjelom temperatura dobivenih infracrvenom termografijom [Slika 9] primjećuje se kako temperaturna raspodjela zabilježena infracrvenom kamerom odgovara raspodjeli plastičnih zona određenih optičkim sustavom ARAMIS. Time se omogućuje detaljna analiza korelacije između

elastoplastičnih deformacija i prirasta površinskih temperatura opterećene epruvete, od početka procesa deformiranja pa sve do njenog potpunog loma. Uslijed nepovratne plastifikacije epruvete uočava se povećanje temperature epruvete.



Slika 9. E5 – Usporedba – ARAMIS (gore) i IC kamera (dolje)

## NAZIVLJE

Oznaka	Jedinica	Opis
$c_p$	J/(g K)	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Young-ov modul elastičnosti
$F$	N	Vlačna sila
$F_m$	N	Maksimalna sila
$L_0$	mm	Početna mjerna duljina epruvete
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Površina poprečnog presjeka
$T$	K	Temperatura uzorka
$\alpha$	$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$	Koeficijent temperaturne ekspanzije
$\varepsilon$	-	Emisijski faktor
$\varepsilon$	mm	Relativno produljenje
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća materijala
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačno naprezanje
$\Delta L$	mm	Produljenje epruvete
$\Delta\sigma$	N/m <sup>2</sup>	Razlika naprezanja

## BIBLIOGRAFIJA

1. Prakash, R.V., Pravin, T., Kathirvel, T., Krishnan Balasubramaniam: Thermo-mechanical measurement of elasto-plastic transitions during cyclic loading, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2011.
2. Marenić, P., Veljača, T., Krstulović-Opara, L., Domazet, Ž.: Uvod u termoelastičnu analizu naprezanja, Drugi susret Hrvatskog društva za mehaniku, Split, 2008.
3. Pustaić, D., Cukor, I.: Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti, sažetak predavanja, 2002.
4. ThermaCAM Researcher: User Manual, FLIR
5. ARAMIS: User Manual - Software, GOM.