

Analiza uporednog praćenja temperature površine ohlađenih materijala pri njihovom zagrevanju do ambijentalne temperature

Stevan Đenadić, Ljubiša Tomić, Vesna Damnjanović i Katarina Nestorović

Apstrakt—U datom eksperimentalnom radu su termografskim metodama ispitivane termofizičke karakteristike različitih materijala. Za ispitivanja su izabrani mesingani novčić, uglj i pelet, jer imaju različita termoizolaciona svojstva i različito stanje površine. Uzorci su najpre hladeni, a zatim je njihovo zagrevanje na sobnoj temperaturi praćeno termalnom kamerom. U drugom delu eksperimenta, korišćena je impulsna termografija, a zagrevanje površine uzoraka vršeno je svetlosnom pobudom.

Ključne reči—termografija; impulsna termografija; nedestruktivno testiranje materijala; mesing; uglj; pelet.

I. UVOD

Metode infracrvene termografije koje se koriste za otkrivanje zagrejanih tela, beskontaktnu procenu temperature površine objekata i nedestruktivno testiranje materijala, danas imaju široku primenu ne samo u bezbednosnom sektoru već i u mnogobrojnim privrednim i naučnim granama [1,2]. Još neke mogućnosti primene termografskih metoda odnose se na praćenje procesa neželjenog zapaljenja pojedinih gasova, tečnosti, lako zapaljivih čvrstih supstanci, ali i na praćenje procesa sagorevanja materijala različitih kalorijskih vrednosti [3-6]. Širokoj rasprostranjenosti termografskih metoda, doprinele su sve pristupačnije cene odgovarajuće komercijalne opreme.

II. TEST UZORCI

Kao uzorak broj 1 izabran je novčić od pet dinara [7]. Na njegovoj prednjoj strani je brojem i slovima oznaka nominalne vrednosti, a na njegovoj zadnjoj strani je reljef manastira Krušedol i oznaka godine kovanja. Prečnik novčića je 24 mm a masa 5,78 g. Novčić je višeslojni. Jezgro je izrađeno od legure niskougljeničnog čelika. Obostrano je dvostruko presvučen galvanskom prevlakom, i to prvim slojem bakra (do jezgra), i drugim slojem mesinga (na površini). Mesing kao legura bakra i cinka široko se koristi ne

samo u kovnici novca za prevlaku apoena, već i u elektrotehnici, kao konstruktivni ukrasni materijal, za izradu muzičkih instrumenata, i dr. Mesing koji se koristi za kovanice (oznaka: CuZn49) sadrži 65% bakra i 35% cinka. Gustina mu je 8,7 g/cm³, specifični toplotni kapacitet 380 J/(kg °C), toplotni kapacitet po jediničnoj zapremini 3,2 J/(cm³ °C), toplotna provodnost 130 W/(m °C), koeficijent toplotne difuzije 32×10⁻⁶ m²/s, a poseduje i antibakterijsko dejstvo. Mesingana legura koja je na površini novčića je termoprovodni materijal, neravna je ali je reljef pravilnih oblika.

Kao uzorak broj 2, izabran je pljevaljski uglj [3], koji spada u kategoriju visokokaloričnog mrkog lignita. Njegova kalorijska vrednost (toplotna moć) se kreće u granicama od 15424 kJ/kg do 14021 kJ/kg. Uglj je po svojoj prirodi nehomogeni materijal. Ovu vrstu uglja karakteriše izuzetno mali sadržaj sumpora, nizak procenat vlage i pepela, a granulacija ove vrste uglja je od 40 mm do 80 mm. Masa uzorka iznosila je oko 3,5 g. Uglj je termoizolacioni materijal a njegova površina je hrapava.

Za uzorak broj 3, izabran je bukov pelet [6]. Pelet je čvrsto gorivo u vidu briketa koje se dobija u specijalnim presama koje rade na principu kompresije prethodno prerađenog materijala. Materijal se sastoji od 70% tvrdog drveta i 30% mekog drveta. U procesu proizvodnje, drvo se najpre usitnjava, zatim se separira u krupnu i sitnu piljevinu (brašno) i skladišti u velike silose, odakle se kao pripremljena drvena smeša presuje u pelet. Briketi su valjkastog oblika, visina valjka je do 4 cm, a prečnik do 6,1 mm. Gustina bukovog peleta je 6,36 g/cm³, toplotna moć je 17300 kJ/kg a masa po briketu je približno 2,97 g. Pelet je termoizolacioni materijal a površina briketa je glatka.

III. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

U prvom delu eksperimenta primenjena je metoda pasivne termografije. Sva tri uzorka, najpre su postavljena na izolacioni materijal od plastike (fotografija prikazana na slici 1.) a zatim hlađena zajedno sa njim u zamrzivaču. Nakon jednog sata, uzorci na plastičnoj podlozi izneti su iz zamrzivača i postavljani na sto za snimanje termalnom kamerom FLIR S60.

Neposredno nakon hlađenja, u nastavku eksperimenta, snimljena je serija termograma u odgovarajućim vremenskim intervalima, sa ciljem praćenja zagrevanja ohlađenih uzoraka, različitih termofizičkih svojstava sve do ambijentalne

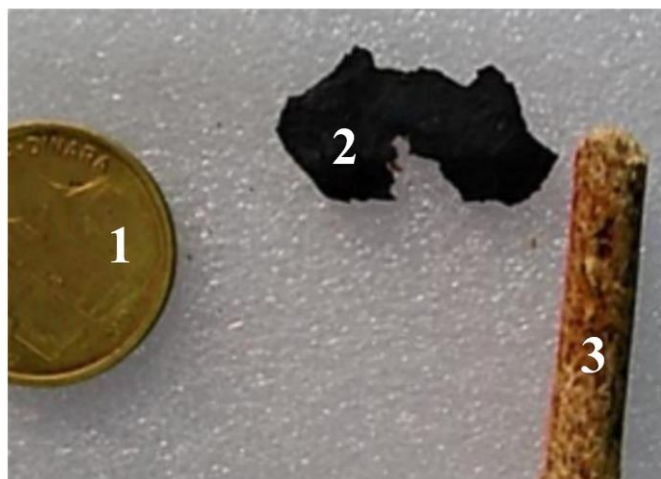
Stevan Đenadić—Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Dušina 7, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: stevan.djenadic@rgf.bg.ac.rs)

Ljubiša Tomić—Vojnotehnički institute, Ratka Resanovića 1, 11030 Beograd, Srbija (e-mail: ljubisa.tomic@gmail.com)

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

Katarina Nestorović—Vojnotehnički institute, Ratka Resanovića 1, 11030 Beograd, Srbija (e-mail: katarina.nestorovic933@gmail.com)

temperature. Temperatura ambijenta, mereno termografski, iznosila je 21 °C.



Sl. 1. Fotografija uzoraka postavljenih na termoizolacionom materijalu od plastike

U drugom delu eksperimenta, za ispitivanja je primenjena metoda impulsna termografija (PT – *Pulse thermography*), koja spada u metode aktivne termografije. Pobuda uzoraka je impulsna - svetlosnim fluksom u kratkom vremenskom intervalu. Naime, u eksperimentalnoj postavci sada je, pored termalne kamere FLIR S60, kao impulsni svetlosni izvor za osvetljavanje uzoraka (za zagrevanje njihovih površina) korišćen fotografski blic YASHICA CS-250AF. Trajanje i intenzitet svetlosnog impulsa je kalibrisano [8]. Dakle, uzorci nisu bili hladeni, ali je jedan od uzoraka (briket od peleta), pre snimanja, jednim delom, bio neko vreme potopljen u vodi. Briket peleta je i posle kraćeg sušenja bio po dužini homogeno vlažan.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Eksperiment je osmišljen tako da se “uporedo” pod “istim uslovima” prate promene temperatura površina ohlađenih materijala sve do njihovog zagrevanja do ambijentalne temperature. Cilj je bio da se utvrdi brzina promene temperature (zagrevanja) u zavisnosti od termofizičkih svojstava uzoraka, sa ciljem da se potom izvrši procesiranje snimljenih termograma u infracrvenom programskom paketu ThermaCAM Researcher 2.9 i analiza praćenja zagrevanja.

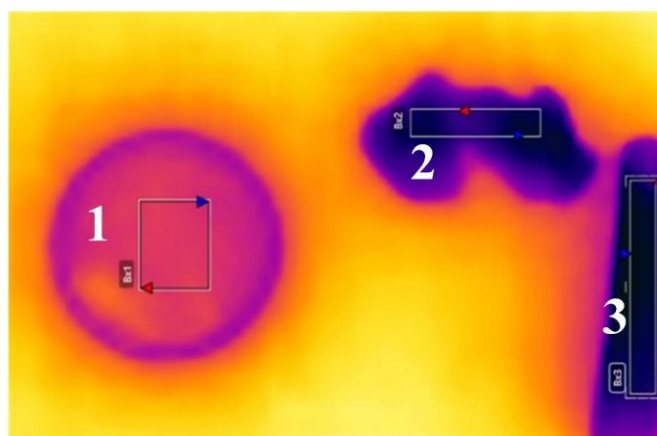
Na slici 2, prikazan je termogram iste scene kao i na slici 1 (u vidljivoj oblasti elektromagnetskog spektra), nastale u istom trenutku kao i termogram u infracrvenoj oblasti elektromagnetnog spektra (8–14 μm). Termogram prikazan na slici 2 snimljen je neposredno posle iznošenja iz zamrzivača (oko 1 minut kasnije), nakon čega su, u nastavku eksperimenta, snimljeni termogrami u određenim vremenskim intervalima sa ciljem praćenja “zagrevanja” ohlađenih uzoraka sve do ambijentalne temperature. Uzorci su bili izloženi početnim stacionarnim uslovima dovoljno dugo da dođe do uspostavljanja termičke ravnoteže. Naglim pomeranjem uzoraka iz stacionarnog temperaturnog stanja

(pothlađenog) u odnosu na ambijentalnu temperaturu, tj. sa niže na višu ambijentalnu temperaturu, dolazi do zagrevanja uzoraka.

Procesi zagrevanje uzoraka nisu identični, iako su isti eksperimentalni uslovi, usled njihovih različitih termofizičkih svojstava. Na brzinu zagrevanja uzoraka uticali su različiti faktori - pre svega njihova fizička svojstva, ali i parazitni toplotni izvori, čiji je uticaj više dolazio do izražaja kod glatkih (refleksivnih) površina. Naime novčić ima reljefnu ali refleksivnu površinu, pa parazitna refleksija njegove površine stvara lažnu sliku o pravoj radijacionoj temperaturi njegove površine. Dok kod uzorka sa višim koeficijentom emisivnosti a niskim koeficijentom refleksije (tj. kod ugalja i briketa od peleta) parazitna refleksija slabije utiče na radijacionu temperaturu površine.

Na termogramu predstavljenom na slici 2, radi termografske procene njihove radijacione temperature, markirane su tri oblasti označene kao: Bx1, Bx2, i Bx3. Prosečna temperatura uzorka 1 (novčić) iznosila je 7,2 °C. Masa novčića znatno je različita od masa uzorka peleta i uzorka uglja. Prosečna temperatura uzorka 2 (ugalj) iznosila je - 3,6 °C. Prosečna temperatura uzorka 3 (pelet) iznosila je - 4,4 °C.

Na istom termogramu, uočljiva je i refleksija toplih predmeta u okolini koja je dominantna na površini visokorefleksionog materijala (novčića) prekrivenog slojem blage kondenzacije vlage iz okolnog vazduha na hladnoj površini.

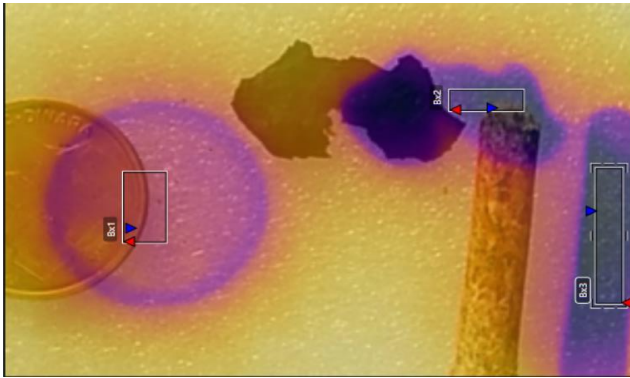


Sl. 2. Termogram uzoraka postavljenih na izolacioni materijal od plastike (ista scena kao na Sl. 1.)

Ispitivanja na osnovu snimljenih termograma ukazuju da se ponašanje ohlađenih uzoraka različitih termofizičkih svojstava, u odnosu na topliju okolinu ambijenta, tokom vremena odvija svojstveno fizičkoj prirodi materijala.

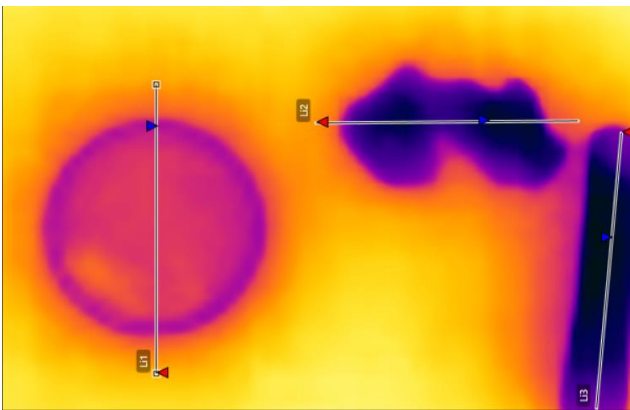
Na slici 3 prikazana je fotografija uzoraka u formatu *thermal blending* zajedno sa termogramom uzoraka u istoj sceni. Istovremeno su prikazane i slika snimljena video kamerom i termogram snimljen termalnom kamerom, jer se radi o različitim objektivima koji su pomereni prostorno za oko 1 cm od centra do centra otvora jednog i drugog objektiv. Upravo iz tog razloga su u horizontalnoj ravni

pomerene slike uzoraka (rastojanja jednog i drugog sočiva objektivna od ravni scene).



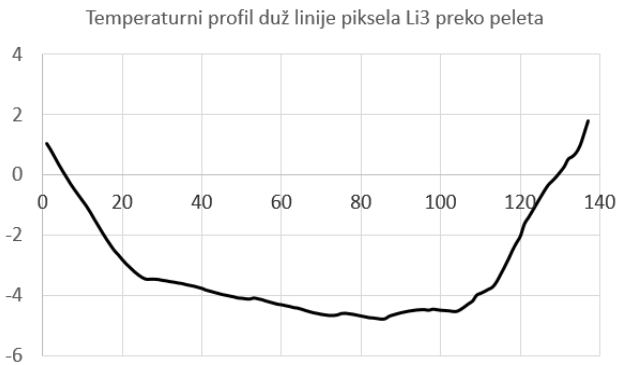
Sl. 3. Fotografija (format thermal blending) uzoraka postavljenih na plastičnom izolacionom materijalu i termogram iste scene

Na slici 4 prikazan je termogram (flir_20210527T15:18:30) uzoraka postavljenih na plastičnom izolacionom materijalu na kome su povučene marker linije radi određivanja temperaturnog profila, obeležene kao Li1-novčić, Li2-ugalj, i Li3-pelet.



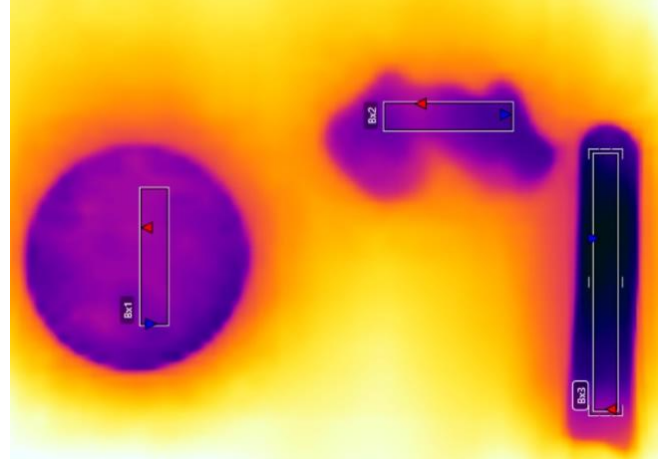
Sl. 4. Termogram uzoraka postavljenih na plastičnom materijalu na kome su povučene marker linije radi određivanja temperaturnog profila

Temperaturni profil duž marker linija Li3 povučene preko briketa peleta prikazan je na slici broj 5.



Sl. 5. Temperaturni profil duž marker linije Li3 (na Sl. 4) ohlađenog uzorka briketa peleta snimljen na početku zagrevanja na sobnoj temperaturi

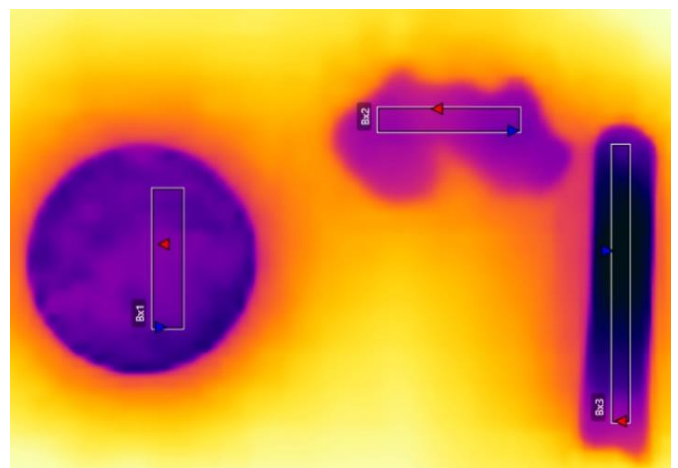
Na slici 6 prikazan je termogram (flir_20210527T15:19:23) snimljen 53 s nakon iznošenja uzoraka iz zamrzivača. Sa navedenog termograma se očitava da je srednja temperature mesinganog novčića 10,7 °C, a temperature komada uglja pljevlja 10,0 °C, što je za 0,7 °C niže od temperature novčića. Dakle, uočava se da je temperatura uglja niža od temperature mesinganog novčića.



Sl. 6. Termogram uzoraka snimljen 53 s nakon hlađenja

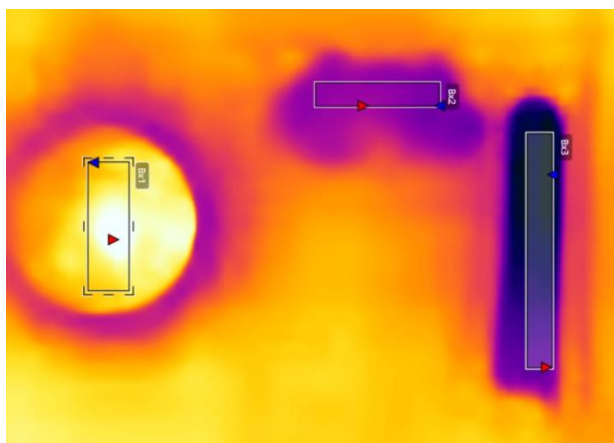
Na slici 7 prikazan je termogram (flir_20210527T15:20:06) snimljen 96 s kasnije nakon hlađenja, tj. 43 s kasnije u odnosu na termogram prikazan na slici 6. Sa navedenog termograma se očitava da srednja temperature mesinganog novčića iznosi 13,2 °C, a temperature komada uglja 14,4 °C, što je za 1,2 °C više od temperature novčića.

Uočava se da je sada prikazan „obrnut slučaj“, tj. temperatura uglja je viša od temperature mesinganog novčića. Dakle, može da se zaključi da zbog visokorefleksivne mesingane prevlake novčić sporije prima toplotu od okoline. Viši koeficijent emisivnosti ima uglj pljevlja u odnosu na novčić presvučen mesinganom prevlakom.



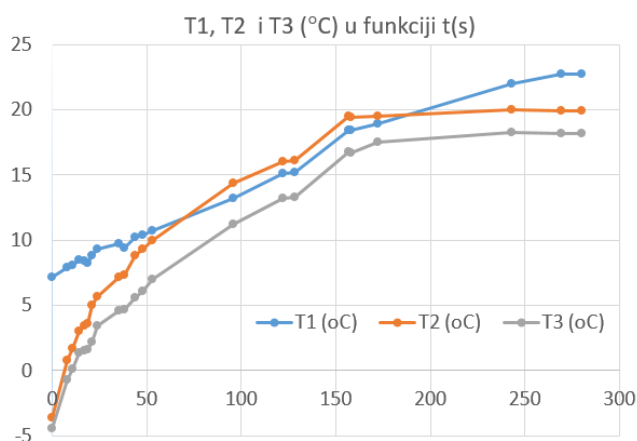
Sl. 7. Termogram uzoraka snimljen 96 s nakon hlađenja

Očigledno da od oko 70-te sekunde od početka zagrevanja, pa do 170-te sekunde, dolazi do isparavanja filma vodene pare na novčiću i sporije apsorpcije toplote iz okoline u odnosu na uglj. Na slici 8, termogram (flir_20210527T15:23:44) nastao 280 s nakon hlađenja, vodena para je isparila sa njegove površine (novčić se osušio), pa do izražaja dolazi (dominantna je) njegova visokorefleksivna prevlaka na površini, u odnosu na parazitnu refleksiju zračenja toplih predmeta iz okoline scene (na primer tople ruke eksperimentatora).



Sl. 8. Termogram nastao 280 s nakon hlađenja

Na slici 9 predstavljen je grafik zavisnosti temperature od vremena pri zagrevanju hlađenog uzorka: novčića T_1 , uglja T_2 i peleta T_3 . Početne temperature uzorka uglja i peleta su $-3,6^\circ\text{C}$ i $-4,4^\circ\text{C}$ respektivno – radi se o toplotnim izolatorima sa visokim vrednostima emisivnosti. Početna temperaturu novčića je $7,2^\circ\text{C}$ – radi se o toplotnom provodniku visokorefleksivne površine pa na njega veliki uticaj ima parazitno zračenja okoline.



Sl. 9. Zavisnost temperature od vremena pri zagrevanju hlađenog uzorka: novčić – plava serija T1; uglj – narandžasta serija T2; i peleta – siva serija T3

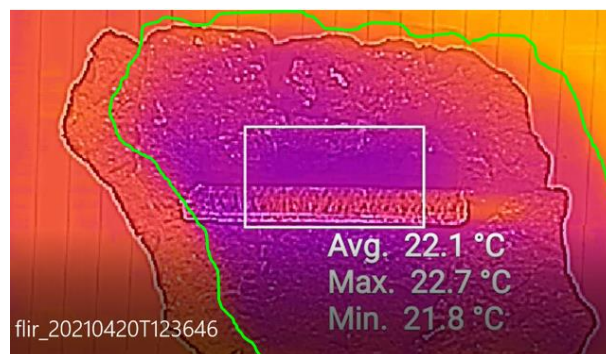
U tabeli broj 1 navedeni su rezultati termografskog merenja temperature tokom vremena u procesu zagrevanja hlađenih uzoraka 1, 2, i 3 do sobne temperature.

TABLE I

RAST TEMPERATURE TOKOM VREMENA U PROCESU ZAGREVANJA HLAĐENIH UZORAKA (NOVČIĆ – T_1 ; UGLJ – T_2 ; IPELET – T_3)

	t (s)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)
flir_20210527T15:18:30	0	7.2	-3.6	-4.4
flir_20210527T15:18:38	8	7.9	0.8	-0.7
flir_20210527T15:18:41	11	8.1	1.7	0.1
flir_20210527T15:18:44	14	8.5	3	1.4
flir_20210527T15:18:47	17	8.4	3.4	1.5
flir_20210527T15:18:49	19	8.2	3.6	1.6
flir_20210527T15:18:51	21	8.8	5	2.2
flir_20210527T15:18:54	24	9.3	5.7	3.4
flir_20210527T15:19:05	35	9.7	7.2	4.6
flir_20210527T15:19:08	38	9.4	7.3	4.7
flir_20210527T15:19:14	44	10.2	8.8	5.6
flir_20210527T15:19:18	48	10.4	9.3	6.1
flir_20210527T15:19:23	53	10.7	10	7
flir_20210527T15:20:06	96	13.2	14.4	11.2
flir_20210527T15:20:32	122	15.1	16	13.2
flir_20210527T15:20:38	128	15.2	16.1	13.3
flir_20210527T15:22:07	157	18.4	19.5	16.8
flir_20210527T15:22:08	158	18.4	19.4	16.7
flir_20210527T15:22:22	172	18.9	19.5	17.5
flir_20210527T15:23:07	243	22	20	18.3
flir_20210527T15:23:33	269	22.7	19.9	18.2
flir_20210527T15:23:44	280	22.7	19.9	18.2

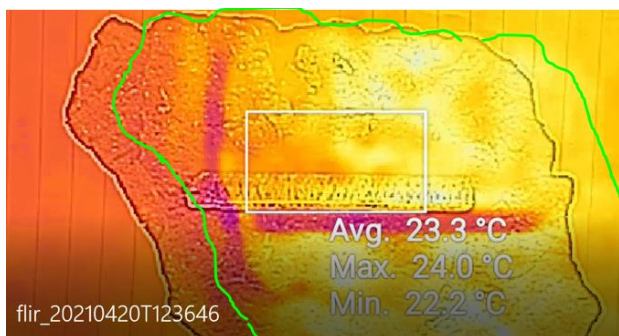
U drugom delu eksperimenta, u merenjima je primenjena PT termografija. Na slici 10 prikazan je termogram površine drvenog peleta i uglja dok su u termodinamičkoj ravnoteži, tj. neposredno “pre” okidanja blica.



Sl. 10. Termogram površine drvenog peleta i uglja neposredno pre okidanja blica

Na slici 11 prikazan je termogram površine peleta i uglja pola sekunde nakon osvetljavanja blicem, tj. nakon primanja toplotnog impulsa. Nakon okidanja blica dolazi do generisanja površinski homogenog toplotnog impulsa, koji se procesom toplotne difuzije prostire kroz materijale, usled čega dolazi do temperature perturbacije na površini uzorka. Toplotni impuls koji se formirao na nehomogenoj površini uglja, prostire se kroz uzorak različito, u zavisnosti od sastava uglja,

to jest koeficijenta difuzivnosti, na primer čistog uglja i uglja sa više primesa gline. Toplije i hladnije oblasti na površini uglja su nastale usled heterogenog sastava uglja (više i manje gline), razlike u emisivnosti oblasti sa glinom i čistog uglja, gde je apsorbovano više energije od svetlosnog impulsa. Pelet je homogenije zagrejan pošto je kompaktnijeg od uglja koji je „ljuspastog“ sastava. Deo potapanog briketa peleta, iako ponovo suv, bio je hrapaviji od dela peleta koji nije potapan u vodu (tj. hrapavije površine), što znači da mu je hrapavost površine degradirana trajno pa ima promenjenu emisivnost. Na termogramu se za uzorak 3 (pelet) u donjem delu uočava svetlija površina koja odgovara delu uzorka koji je bilo potopljena u vodu kratko vreme, nakon čega se osušio ali sa degradacijom koeficijenta emisivnosti u odnosu na nepokvašeni gornji deo koji nije bio u dodiru sa vodom.



Sl. 11. Termogram površine drvenog peleta i uglja pola sekunde nakon osvetljavanja blicem

Dati rad je pionir ideje da se utvrdi može li se termografija koristiti i za grubu procenu kalorijske vrednosti uglja, zasnovanoj na vremenskoj promeni površinske temperature. Inače, utvrđivanje kalorijske vrednosti uglja, koji u termoelektranama Srbije pokriva oko 80% proizvodnje električne energije, je izuzetno složen proces. Propisan je ISO standardom B.H8 318:1972 koji dozvoljava mernu nesigurnost u proceni čak iznad 20 % [9]. Vrednost toplotnog kapaciteta uzorka jeste povezana sa promenom temperature površine, ali da bi se utvrdila veza i sa njegovom kalorijskom vrednošću, treba izvršiti merenja sa uzorcima potpuno istih masa i oblika, uz uzimanje u obzir svih navedenih uticaja u datom eksperimentu, ali i njihovu minimizaciju kroz dizajn eksperimenta.

V. ZAKLJUČAK

Rezultati predstavljeni u radu, dobijeni na osnovu analize termograma pri proučavanju različitih materijala kako pasivnom tako i aktivnom impulsnom termografijom sa ciljem procene njihovih termofizičkih svojstava. Pri istim uslovima, snimani su uzorci sačinjeni od materijala potpuno različitih termofizičkih karakteristika, i to mesingani novčić, ugulj i pelet. Navedeni materijali su izabrani jer imaju različita termoizolaciona svojstava i različito stanje površine. Termogrami nastali pasivnom metodom, tokom procesa prirodnog zagrevanja (na sobnoj temperaturi), prethodno ohlađenih uzoraka od različitih materijala (termoprovodnih i termoizolacionih) ukazuje na to da termografske metode

moгу biti alternativna metoda u proceni termofizičkih svojstava materijala. Problemi koji javljaju pri praćenju promena temperature površina uzoraka kada se primenjuje metoda aktivne impulsne termografije nastaju usled nehomogene strukture (konkretno, naglašene nehomogenosti sastava uglja, hrapavosti površine i nepravilnog oblika) mogu biti svedeni na minimum izborom homogenih, pravilno obrađenih komada (uzoraka) istih oblika.

ZAHVALNICA

Rad je nastao uz podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije - kontakt broj: 451-03-9/2021-14/200126.

LITERATURA

- [1] X. P. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, John Wiley & Sons, New York, USA, 2001.
- [2] G. Gaussorgues, *Infrared Thermography*. English language edition. Springer-Science, Berlin, Germany, 1994.
- [3] S. Đenadić, V. Damnjanović, P. Jovančić, D. Ignjatović, D. Jovković, F. Miletić, „Primena termografije u rudarstvu”, IX Međunarodna konferencija Ugalj 2019, Zlatibor, Srbija, s. 57-66, 23-26 Oktobar 2019.
- [4] S. Đenadić, Lj. Tomić, V. Damnjanović, P. Jovančić, D. Jovković, „Testing the energy value of different types of coal by the method of Active Thermography”, 9th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2020, Belgrade, Serbia, pp. 424-428, 15-16 October 2020.
- [5] Lj. Tomić; M. Milinović: Experimental research of limits for thermal modulation transfer function, *Thermal Science*, vol. 13, no. 4, pp. 119 – 128, 2009.
- [6] Ljubiša Tomić., Vesna Damnjanović., Katarina Mišković., Boban Bondžulić., Dragan Knežević., Aleksandar Kovačević. (2018) Analiza uticaja temperature materijala na primenu metode impulsne termografije. *ETTRAN 2018 (62. konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu fiziku)*. Zbornik radova, MO. s. 314-318, 11-14. jun, Palić, Srbija.
- [7] Народна банка Србије www.nbs.rs/sr_RS/novac-i-p
- [8] Lj. D. Tomić, „Nondestructive evaluation of the thermophysical properties materials by IR thermography“, Ph.D. dissertation, School of Electrical Engineering, University of Belgrade, Serbia, 2013.
- [9] *Solid mineral fuels – Determination of gross calorific value by bomb calorimetric method and calculation of net calorific value*, SRPS ISO 1928:2015 <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:47873>

ABSTRACT

In the given experimental work, thermophysical characteristics of different materials were examined by thermographic methods. Brass coin, coal, and pellets were chosen for the tests - because they have different thermal insulation properties and different surface condition. The samples were first cooled and then let to be warmed to room - temperature was continuously being recorded by a thermal camera. In the second part of the experiment, pulsed thermography was used, and the surface of the samples was heated by light excitation.

Analysis of comparative monitoring of surface temperature of cooled materials during their heating to ambient temperature

Stevan Djenadic, Ljubisa Tomic, Vesna Damnjanovic, Katarina Nestorovic