

Zavisnost emisivnosti od temperature na površinama delova turbomlaznih motora

Dr Slavko Pokorni, dipl. inž.¹⁾

Razmatra se zavisnost emisivnosti nekih materijala za spoljašnje tople delove turbomlaznih motora od temperature površine materijala, a na osnovu analize analitičkih relacija i eksperimentalnih merenja. Eksperimentalni podaci pokazuju, da je primena analitičkih relacija nepouzdana. Radne temperature nekih materijala za spoljašnje tople delove turbomlaznih motora nemaju značajnog uticaja na njihovu emisivnost. Zaključeno je da je moguće pri određivanju temperature IC senzorom koristiti emisivnost izmerenu na bilo kojoj temperaturi u opsegu radnih temperatura materijala spoljašnjih toplih delova turbomlaznog motora.

Ključne reči: Emisivnost, merenje emisivnosti, merenje temperature, turbomlazni motor.

Uvod

KONTAKTNE metode merenja temperature (otporni termometri, termoparovi) imaju niz nedostataka, posebno kada se mere visoke temperature i kada je potrebno da se istovremeno meri temperatura u velikom broju tačaka [1, 2]. Na primer, za evaluaciju termičkih naprežanja sklopova turbomlaznih motora (TMM) u njihovom razvoju, bilo bi potrebno da se ugradi veliki broj termoparova što bi stvaralo velike tehničke probleme i moglo da uzrokuje promene uslova merenja, ali i promene strukturnih karakteristika materijala. Osim toga, temperature pojedinih sklopova savremenih turbomlaznih motora, i težnja da se te temperature povećaju radi povećanja efikasnosti motora, prelaze dozvoljene granice temperatura raspoloživih materijala za termoparove. Zbog toga se razvijaju nekontaktne metode merenja temperature. Jedna od metoda je određivanje temperature primenom infracrvenog (IC) senzora.

Određivanje temperature površine materijala, na osnovu merenja fluksa IC zračenja, pripada grupi indirektnih metoda merenja temperature, pri čemu se koristi odgovarajući matematičko-fizički model za povezivanje temperature objekta sa direktno merenim veličinama. Greška merenja zavisi od kompletnosti, odnosno, greške matematičko - fizičkog modela (metodska greška) i od greške direktno merenih veličina (instrumentalne greške) [1-4].

U matematičko - fizičkom modelu određivanja temperature primenom IC senzora, pored ostalih parametara, javlja se i emisivnost materijala čija se temperatura meri [1-4]. Jedan od ključnih problema kod primene IC senzora za merenje temperature jeste, kako odrediti stvarnu temperaturu čvrstog tela sa nepoznatom emisivnošću i nepoznatim zračenjem iz okoline, konstatuje se u [15]. Podaci o emisivnosti materijala mogu da se nađu u [5 i 6]. Emisivnost zavisi od niza faktora (npr: spektralni

opseg zračenja, ugao zračenja, temperatura, stanje površine materijala čija se temperatura meri), koji obično nisu u publikovanim podacima o emisivnosti adekvatno specificirani (najčešće nije stanje površina materijala), pa su takvi podaci nepouzdati i njihovo korišćenje može da dovede do velikih grešaka u određivanju temperature. Mogućnosti analitičke predikcije emisivnosti materijala su isto tako ograničene [7], a posebno je teško ili nemoguće uzeti u obzir stanje površine materijala. Za pojedine vrste materijala, kao što su materijali za turbomlazne motore (TMM), podataka o emisivnosti nema. Zbog toga je potrebno da se merenjem dođe do podatka o emisivnosti materijala.

Precizno merenje (određivanje) emisivnosti je složeno zbog uticaja velikog broja parametara, od kojih neki, kao što je stanje površine, matematičko - fizički model za određivanje emisivnosti i ne mogu da se obuhvate [8,9]. Zbog toga je od značaja da se utvrdi pod kojim uslovima izmereni podaci važe, kako bi se obezbedila potrebna tačnost, a izbeglo merenje emisivnosti na svakom delu objekta od istog materijala.

Definicija emisivnosti

Poznavanje emisivnosti površine materijala je veoma važno, kako za interpretaciju termičkih slika (termograma) kod otkrivanja objekata pomoću IC uređaja, tako i kod merenja temperature pomoću IC senzora [2,11,13]. Kod interpretacije termograma, nepoznavanje emisivnosti objekata može dovesti do pogrešnih zaključaka, a kod merenja temperature do znatnih odstupanja izmerene od stvarne temperature [1-4]. Radi korišćenja podataka o emisivnosti dobijenih merenjem, ili raspoloživih u literaturi, potrebno je poznavati definicije pojedinih vrsta emisivnosti i njihove međusobne odnose. O ovome se često ne vodi računa, pa mnogi podaci o emisivnosti postaju neupotrebljivi za precizna merenja, ili mogu da dovedu do

¹⁾ Vojna akademija VJ, 11000 Beograd, Veljka Lukića Kurjaka 33

značajnih grešaka [2].

U nastavku teksta se definiše emisivnost značajna za praktične primene. Na primer, kod IC instrumenata sa termoelektričnim detektorom, značajna je emisivnost u širokom spektralnom opsegu, a kod instrumenta sa fotonskim detektorom emisivnost na određenoj talasnoj dužini (spektralna), odnosno, u određenom spektralnom opsegu. Ako se zračenje prima u uskom prostornom uglu, s obzirom na površinu objekta, od interesa je emisivnost u određenom pravcu. Tako se, s obzirom na opseg talasnih dužina primanog zračenja i veličinu prostornog ugla, dobija više različitih emisivnosti, odnosno, definicija emisivnosti.

Emisivnost realnih objekata je mera odstupanja intenziteta realnog zračenja u odnosu na crno telo, za koje se smatra da ima emisivnost jednaku 1 i da zavisi samo od talasne dužine zračenja i temperature površine objekta. Na osnovu toga, a imajući u vidu prethodne napomene, mogu se definisati sledeće emisivnosti [2,6,13]:

– *spektralna emisivnost po pravcu*:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T; \theta, \beta) = \frac{w_{\lambda}(\lambda, T; \theta, \beta)}{w_{\lambda CT}(\lambda, T)} \quad (1)$$

gde su:

$w_{\lambda}(\lambda, T; \theta, \beta)$ - spektralna radijansa elementa površine objekta u pravcu (θ, β) ,

$w_{\lambda CT}(\lambda, T)$ - spektralna radijansa crnog tela na istoj temperaturi;

– *ukupna emisivnost po pravcu*, do koje se dolazi integriranjem spektralne radijanse u pravcu (θ, β) po svim talasnim dužinama i deljenjem sa eksitansom crnog tela na temperaturi T :

$$\varepsilon(T; \theta, \beta) = \frac{\pi}{M_{CT}} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T; \theta, \beta) w_{\lambda CT}(\lambda, T; \theta, \beta) d\lambda \quad (2)$$

gde je:

M_{CT} - eksitansa zračenja crnog tela na temperaturi T ;

– *polusferna spektralna emisivnost*, do koje se dolazi integriranjem spektralne radijanse u pravcu (θ, β) po svim uglovima zračenja polusfere, ili odnosa spektralne eksitanse površine materijala objekta i crnog tela na temperaturi T i talasnoj dužini λ :

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T; \theta, \beta) \cos \theta \sin \theta d\theta d\beta \quad (3)$$

– *polusferna ukupna emisivnost*, do koje se dolazi integriranjem spektralne radijanse u pravcu (θ, β) po svim uglovima zračenja polusfere i po svim talasnim dužinama:

$$\varepsilon(T) = \frac{1}{M_{CT}} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T; \theta, \beta) \cos \theta \sin \theta d\theta d\beta d\lambda \quad (4)$$

– *polusferna emisivnost u spektralnom opsegu*:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} w_{\lambda}(\lambda, T; \theta, \beta) \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T; \theta, \beta) \cos \theta \sin \theta d\theta d\beta d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda CT}(\lambda, T) d\lambda} \quad (5)$$

Za posebne slučajeve, mogu da se uspostave i druge relacije kada se radi o realnim telima čije je zračenje

lacije kada se radi o realnim telima čije je zračenje nezavisno od talasne dužine u nekom spektralnom opsegu (tzv. siva tela), difuzno i sl.[2,6,13].

Vrednost emisivnosti je najčešće u granicama između 0 i 1. Metali, posebno glatke i sjajne površine, imaju malu emisivnost (najčešće manju od 0,5), dok dielektrici imaju veliku emisivnost [2,6,11]. Mala emisivnost otežava precizno određivanje temperature pomoću IC senzora, a kod emisivnosti manjih od 0,1 precizno merenje temperature postaje praktično nemoguće [1-3]. Za određivanje temperature IC senzorom, potrebno je poznavanje emisivnosti. Zbog velikog broja faktora od kojih emisivnost zavisi i nepouzdanosti podataka publikovanih u priručnicima, uslovi pod kojima je određivana emisivnost nisu uvek adekvatno specificirani. Zato je najpogodnije emisivnost izmeriti na objektu čija se temperatura i meri. To je moguće obaviti istim IC instrumentom kojim se meri temperatura, ali je u ovom slučaju, potrebno temperaturu objekta poznavati (izmeriti) da bi se na osnovu toga odredila emisivnost.

Problem merenja emisivnosti

Zbog većeg broja različitih uticajnih faktora, kao što je već poznato, emisivnost bi trebalo uvek meriti na materijalu objekta čija se temperatura određuje. Međutim, uticaj nekih od tih faktora se može izbeći unapred postavljenim ograničenjima za uslove pod kojima se vrši merenje i aparaturu kojom se meri. Uticaj nekih od faktora se može ispitati, kako bi izmereni podaci o emisivnosti mogli da se koriste u određivanju temperature na delovima od istog materijala, a da se ne degradira potencijalna tačnost određivanja temperature.

Uticaj spektralnog opsega zračenja na emisivnost se može izbeći, ako se merenje emisivnosti obavlja istim IC sistemom kojim se određuje i temperatura. Tada se podatak o emisivnosti dobija upravo u spektralnom opsegu u kome radi IC senzor za merenje temperature, a takav je podatak i neophodan kao ulazni podatak u matematički model za proračun temperature koja se određuje na osnovu IC zračenja materijala [1].

Uticaj ugla zračenja se može izbeći ili ublažiti ako je optička osa IC senzora za vreme merenja normalna, ili približno normalna, na površinu materijala čija se emisivnost, odnosno temperatura određuje.

Međutim, problem stanja površine i uticaja temperature materijala na njegovu emisivnost ostaje, jer značajno zavisi od konkretne situacije u kojoj se vrši merenje. U ovom radu se vršilo ispitivanje zavisnosti emisivnosti od temperature površine materijala za spoljašnje tople delove TMM. Emisivnost je određivana primenom termovizijske kamere. Uslovi i greške pri merenju emisivnosti detaljnije su opisane u [8,9].

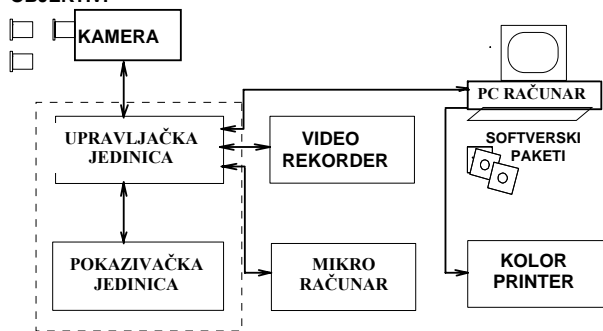
Merna aparatura

Merna aparatura korišćena u ovom ispitivanju predstavlja termovizijski sistem (*Thermovision 870 SWB*, švedske firme *AGEMA*) [10]. Blok-šema aparature je predstavljena na sl.1.

Laboratorijska konfiguracija termovizijskog mernog sistema *Thermovision 870 SWB* obuhvata:

- IC kameru koja radi u SWB (Short Wave Band) - kratkotalasnom IC spektralnom opsegu (2-5) μ m sa termoele-ktrično hlađenim *SPRITE* IC detektorom,
- upravljačko-pokazivačku (displej) jedinicu,

- mikroračunar za proračun i očitavanje temperature (Temperature Readout Computer - TRC),

OBJEKTIVI

Slika 1. Konfiguracija termovizijskog mernog sistema

- personalni računar sa odgovarajućim interfejsima i softverom za snimanje i analizu termičkog stanja i proračun stvarne temperature objekta (Temperature Image Computer - TIC-8000),
- video rekorder,
- kolor printer.

Sistem je modularne konstrukcije i pogodan je za korišćenje u tri varijante: prenosnoj, mobilnoj i stacionarnoj (laboratorijskoj). U prenosnoj varijanti koriste se kamera, upravljачko-pokazivačka jedinica i mikroračunar. U mobilnoj varijanti (na kolicima) koriste se kamera, upravljачko-pokazivačka jedinica i video-rekorder, koji snima termičko stanje. Dobijene vrednosti temperature se kasnije mogu da analiziraju u laboratoriji. U stacionarnoj varijanti, pored kamere i upravljачko-pokazivačke jedinice, koristi se i personalni računar sa potrebnim interfejsima i softverom koji omogućuje snimanje termičke slike (termograma) na disk ili diskete i analizu stanja za vreme samog snimanja ili sa snimljenim termograma na disku ili sa trake video-rekordera.

Osetljivost kamere je, prema podacima proizvođača [10], 0,1 K na temperaturi objekta od 30 K a tačnost $\pm 2\%$ ili ± 2 K. Mogu da se mere temperature od 253 K do 723 K bez primene filtera, odnosno do 1773 K uz primenu filtera. Rezolucija iznosi 90 elemenata/liniji mereno na 50% modulacije. Kamera ima mogućnost promene otvora dijafragme i postavljanja objektivna različitog otvora vidnog polja ($7^\circ, 12^\circ, 20^\circ$ i 40°).

Termovizijski sistem *Thermovision 870SWB* omogućuje trenutno određivanje (merenje) temperature velikog broja tačaka površine nekog objekta. Pored pokazivanja vrednosti temperature svake tačke, omogućuje prikazivanje profila temperature duž željene linije, raspodelu temperature i praćenje dinamike promene temperature u realnom vremenu.

Postupak merenja emisivnosti materijala TMM

Merenje je vršeno u laboratoriji *VZ ORAO*, na uzorcima materijala TMM *VIPER*. Uzorci su posebno izrađeni za potrebe merenja emisivnosti i prilagođeni su po dimenzijama otvoru peći, kojom je vršeno zagrevanje uzoraka. Uzorci su bili prečnika 86 mm i debljine 10 mm. Zavrtnjevima su učvršćivani na nosač za termostabilizaciju uzorka valjkastog oblika. Nosač je trebalo da obezbedi što homogenije zagrevanje uzorka po njegovoj snimanoj površini. U središtu površine uzorka varen je termopar za merenje temperature površine uzorka. Korišćen je termopar hromel - alumel (tip K). Kalibrisan je u kalibracionom kupatilu EC6, firme *Scandura* (tačnost ± 2 K u opsegu 500-900 K). Očitavanje temperature je vršeno digitalnim

vanje temperature je vršeno digitalnim multimetrom *Takeda Riken*. Uzorci su zagrevani u peći za topljenje uzoraka *Carbolite*, u čiji je otvor, okruglog oblika, stavljan nosač sa uzorkom materijala. Maksimalna temperatura zagrevanja ove peći je 1473 K.

Za vreme merenja su preduzete potrebne mere za otklanjanje uticaja zračenja iz okoline. Uzorak je bio postavljen na rastojanju od 1m od termovizijske kamere, normalno u odnosu na osu kamere. Temperatura peći je podešavana pomoću termostata. Nakon dostizanja zadate temperature i njene stabilizacije, obavljano je snimanje termograma, na osnovu koga je, korišćenjem opisanog modela [8,9] proračunata emisivnost. Dobijena emisivnost u stvari predstavlja srednju vrednost emisivnosti po pravcu (normalnom u odnosu na površinu uzorka) u spektralnom opsegu korišćene kamere (2-5 μ m).

Emisivnost je pretežno računata za centralni deo površine uzorka, gde se moglo očekivati da je temperatura ista u svim tačkama uzorka, bez obuhvatanja delova na kojima su se nalazili zavrtnji kojima je uzorak pričvršćivan za nosač za termostabilizaciju uzorka. Zavrtnji nisu bili od istog materijala kao uzorak (pa ne moraju imati ni istu emisivnost), a tokom zagrevanja uzorka do visokih temperatura, dolazilo je i do korodiranja glava zavrtnjeva (čime se takođe menja njihova emisivnost) što nije bio slučaj sa površinom uzorka, jer se radi o termostabilnim materijalima namenjenim za rad na visokim temperaturama, kakve se javljaju na odgovarajućim delovima TMM u toku njegovog rada.

Zavisnost emisivnosti od temperature površine materijala

U [6] su dati aproksimativni izrazi, koji opisuju zavisnost emisivnosti materijala od temperature. Takođe se, za znatan broj materijala, mogu naći podaci o izmerenoj emisivnosti, koji ilustruju, kako podudaranje eksperimentalnih podataka sa rezultatima dobijenim matematičkim izrazima, tako i velika odstupanja. Međutim, za materijale toplih delova TMM takvih podataka, u raspoloživoj literaturi nije bilo. Stoga će se, za neke karakteristične materijale spoljašnjih toplih delova TMM, ispitati zavisnost emisivnosti od temperature, prvo analitički, a zatim i eksperimentalno radi poređenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata i ocene mogućnosti primene analitičkih relacija.

Matematički modeli zavisnosti emisivnosti od temperature

Analitičko razmatranje zavisnosti emisivnosti od temperature obično polazi od Hagen-Rubensove relacije za spektralnu emisivnost, u smeru normale na površinu materijala [6] koja je izvedena preko indeksa prelamanja, približna je, i u kojoj figuriše specifična električna otpornost, koja je temperaturno zavisna, pa preko nje i emisivnost:

$$\varepsilon_n'(\lambda) = \frac{2}{\sqrt{\frac{0,003\lambda}{\rho}}} \quad (6)$$

Ova relacija se češće u literaturi nalazi u obliku:

$$\varepsilon_n'(\lambda, T) = 36,5 \sqrt{\frac{\rho(T)}{\lambda}} \quad (7)$$

gde su: ρ - specifična električna otpornost u [Ω cm], i λ - talasna dužina zračenja u [μ m].

Izraz (7) važi, prema nekim autorima, za talasne dužine veće od $4 \mu\text{m}$, odnosno $5 \mu\text{m}$.

Ukupna emisivnost u smeru normale dobija se integraljenjem u celom spektralnom opsegu i na taj način se dolazi do izraza:

$$\varepsilon'_n(T) \cong 0,574 \sqrt{\rho_{00} T} \quad (8)$$

gde su: T - temperatura površine materijala u K, ρ - specifična električna otpornost u Ωcm .

Neki autori smatraju da (8) važi za temperature ispod 573 K, a drugi autori smatraju da važi za temperature do 1000 K.

Nešto tačnija relacija za emisivnost u smeru normale, glasi [6]:

$$\varepsilon'_n(T) = 0,576 \sqrt{\rho T} - 0,124 \rho T \quad (9)$$

Polazeći od Widemann-Franzovog zakona, koji daje vezu toplote provodnosti metala i specifične otpornosti, dolazi se do sledećeg izraza za emisivnost:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 5445,9 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{3T}}{\omega \lambda} \quad (10)$$

gde su: T - temperatura površine materijala u K, ω - toplotna provodnost u $\text{W}/(\text{cmK})$, λ - talasna dužina zračenja u μm . Kako je pri određivanju temperature IC senzorom potrebno u model za izračunavanje temperature, ili u instrument koji obično radi u određenom spektralnom opsegu, uneti podatak o emisivnosti, a ne funkcionalnu zavisnost, to je za potrebe poređenja sa rezultatima za emisivnost dobijenim termovizijskom kamerom koja radi u opsegu $2-5 \mu\text{m}$, integraljenjem izvedena sledeća relacija za srednju emisivnost u opsegu $2-5 \mu\text{m}$:

$$\bar{\varepsilon}(T) = 2983,827 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{T}{\omega}} \quad (11)$$

Na sličan način se dolazi do relacije za srednju emisivnost u opsegu $2-5 \mu\text{m}$, ali u funkciji specifične električne otpornosti:

$$\bar{\varepsilon} \cong 19,988 \sqrt{\rho} \approx 20 \sqrt{\rho} \quad (12)$$

U [11] je nađena i relacija koja daje zavisnost ukupne emisivnosti od temperature i temperaturnog koeficijenta promene otpornosti:

$$\varepsilon = 0,5737 \sqrt{\rho [1 + \alpha(T - 293)] T} - 0,1769 \rho [1 + \alpha(T - 293)] T \quad (13)$$

gde je: α - temperaturni koeficijent promene otpornosti u $1/^\circ\text{C}$.

S obzirom da su i toplotna provodnost i specifična električna otpornost, u opštem slučaju, zavisne od temperature, potrebno je, da se u navedene relacije uvrste njihove vrednosti na odgovarajućoj temperaturi.

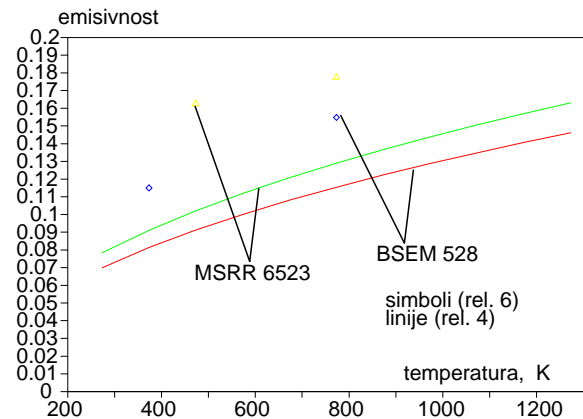
U literaturi se mogu naći i nešto složenije relacije, međutim, sve su one približne i ne doprinose značajnije tačnosti proračunatih rezultata za emisivnost.

Iz navedenih analitičkih modela emisivnosti metala zavisno od temperature se zaključuje, da emisivnost raste sa porastom temperature. Jednačine pokazuju, da je spektralna emisivnost metala proporcionalna kvadratnom korenu iz specifične električne otpornosti, odnosno temperature, a to je potvrđeno u većini slučajeva [6]. Međutim, kod malih talasnih dužina (npr. za volfram za $\lambda < 1,27 \mu\text{m}$) uticaj temperature je suprotan i spektralna emisivnost opada i kod

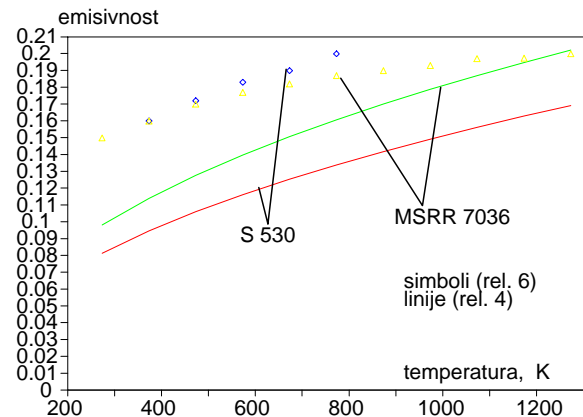
perature je suprotan i spektralna emisivnost opada i kod metala kada temperatura raste. Neki metali imaju veliku ukupnu emisivnost koja s porastom temperature opada, kao npr. magnezijumoksid [6].

Prema tome, relacije za emisivnost metala date zavisno od temperature, važe za određeni spektralni opseg. Pored opštih ograničenja navedenih uz prethodne relacije, u [6] se navode i pojedinačna ograničenja za određene vrste metala. Na primer, za volfram za $\lambda > 2 \mu\text{m}$, za zlato i srebro za $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$, za nikel i gvožđe za $\lambda > 5 \mu\text{m}$. Literaturni podaci za ove uslove se često razlikuju, što treba imati u vidu pri korišćenju ovih relacija.

Korišćenjem (4) za određivanje ukupne normalne emisivnosti, proračunata je zavisnost emisivnosti od temperature, za nekoliko različitih materijala za spoljašnje tople delove TMM, (slike 2 i 3). Zavisnost je proračunata na osnovu podataka za specifičnu električnu otpornost ovih materijala, (tabela 1).



Slika 2. Zavisnost ukupne normalne i srednje emisivnosti materijala MSRR 6523 BSEM 528 od temperature



Slika 3. Zavisnost ukupne normalne i srednje emisivnosti materijala MSRR 7036 i S 530 od temperature

Tabela 1. Specifične otpornosti materijala spoljašnjih toplih delova TMM VIPER

Red. broj	Naziv materijala	Oznaka materijala	ρ [$\text{cm}\Omega$] $\times 10^6$
1	Zaštitni omotač komore sagorevanja	MSRR 6629 (BSEM 528)	57
2	Obloga - termoizolaciona	MSRR 6523 (S 526)	72
3	Konus izduvni, spoljašnji	S 530	78
4	Omotač komore dopunskog sagorevanja, spoljašnji	MSRR 7036	115

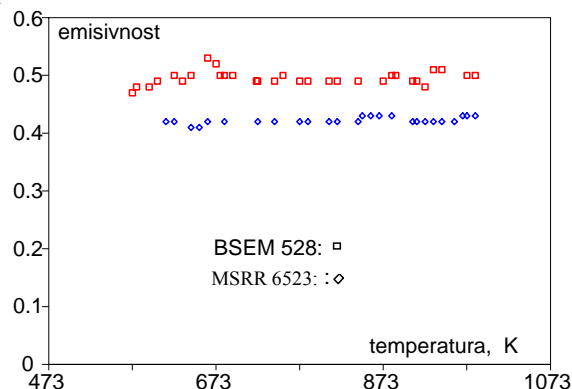
Za iste materijale proračunata je srednja emisivnost u opsegu 2-5 μ m, na osnovu relacije (6), i takođe, radi lakšeg poređenja, prikazana na slikama 2 i 3. Za toplotnu provodnost materijala TMM za relaciju (6) korišćeni su podaci dati u tabeli 2. Uočava se da se dobijaju znatno veće emisivnosti. Izuzetak je materijal MSRR 7036 kod koga na temperaturama iznad 1100 K, emisivnosti na osnovu obe relacije, postaju veoma bliske. Međutim, treba imati u vidu, da se kod prve relacije radi o ukupnoj emisivnosti (po svim talasnim dužinama), a kod druge o srednjoj (u opsegu 2-5 μ m).

Tabela 2. Toplotne provodnosti materijala spoljašnji toplih delova TMM VIPER

Naziv materijala	T [K]	ω [W/(mK)]	T [K]	ω [W/(mK)]
MSRR 6629 (BSEM 528)	373	24,93	553	28,73
MSRR 6523 (S 526)	373	0,2	773	21,64
	473	15,9		
S 530	373	12,98	673	16,44
	473	14,19	773	17,31
	573	15,23		
MSRR 7036	293	11,72	873	21,35
	373	12,98	973	23,03
	473	14,65	1073	24,70
	573	16,33	1173	26,80
	673	18,00	1273	28,47
	773	19,68		

Eksperimentalni rezultati zavisnosti emisivnosti od temperature

Rezultati eksperimentalnih merenja zavisnosti emisivnosti od temperature do 973 K, metodom termopara, za materijal BSEM 528 (zaštitni omotač komore sagorevanja) i MSRR 6523 (termoizolaciona obloga), prikazani su na sl.4.

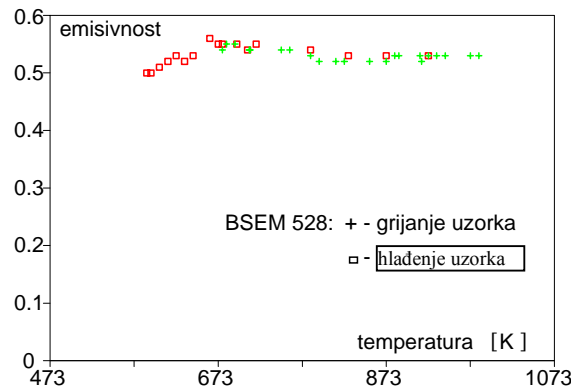


Slika 4. Eksperimentalno dobijena zavisnost emisivnosti materijala BSEM 528 i MSRR 6523 od temperature

Poređenje rezultata na slikama 3 i 4 pokazuje, da je eksperimentalno izmerena emisivnost znatno veća od proračunate. Na sl.4 se takođe uočava, da je eksperimentalno dobijena zavisnost emisivnosti od temperature veoma mala, znatno manja nego kod emisivnosti dobijenih na osnovu analitičkih relacija. Zapaža se, takođe, odstupanje emisivnosti dobijeno analitičkim jednačinama (sl.2 i sl.3) za isti materijal, zavisno od toga da li se kao ulazni podatak koristi specifična električna otpornost ili toplotna provodnost materijala. Ove razlike su logične, jer su analitičke relacije približne. Prilikom njihovog izvođenja uvedeno je niz aproksimacija, a stanje površine, kao što je oksidiranost i hrapavost, ne mogu se ili, samo približno, mogu uzeti u obzir (u literaturi ima pokušaja uzimanja u obzir hrapavosti materijala pri izvođenju relacija za emisivnost materijala [12]). Drugi

Drugi razlog može biti tačnost podataka o materijalu koji se unose u relacije (specifična električna otpornost ili toplotna provodnost).

Za materijal BSEM 528 merena je emisivnost i pri zagrevanju i pri hlađenju materijala. Dobijeni rezultati su prikazani na sl.5. Uočava se prilično dobro poklapanje rezultata, posebno kod viših temperatura.



Slika 5. Emisivnost materijala BSEM 528 pri povišavanju i snižavanju temperature

Na temperaturama ispod 700 K (sl.5) uočava se disperzija rezultata. Takođe, (sl.4) se uočava da dolazi do malih skokovitih promena emisivnosti koja zatim, u određenom opsegu temperatura, zadržava određenu vrednost. Uočeno je da se ovo događa pri promeni parametara mernog sistema, odnosno promeni režima rada kamere (otvor dijafragme, merni opseg, merni nivo, vrsta filtra), što navodi na zaključak da su te promene posledica merne aparature, a ne stvarne promene emisivnosti. Promene ovih parametara merne aparature su neophodne i normalne da bi se odgovarajućom kombinacijom dijafragme i filtra omogućilo preciznije merenje u određenom opsegu temperature. Analiza rezultata dobijenih sa slika 5 i 6, može da se zaključi, da u opsegu 500-900 K emisivnost materijala BSEM 528 (zaštitni omotač komore sagorevanja) i MSRR 6523 (termoizolaciona obloga) ne zavisi bitno od temperature. Za BSEM 528 izmerena je srednja vrednost emisivnosti $0,53 \pm 0,012$, a za MSRR 6523 $0,47 \pm 0,09$.

Snimljeni termogrami su pokazivali da se postizala dobra homogenost zagrevanja uzorka po njegovoj površini. Pri obradi rezultata, odnosno proračunu emisivnosti, poređeni su rezultati dobijeni za tačku u sredini uzorka i za veću površinu uzorka oko te tačke, i uočena je razlika. Emisivnost dobijena za jednu tačku je uglavnom veća, nego kada se emisivnost računa za veću površinu uzorka, čemu je najverovatnije jedan od uzroka stanje površine uzorka, npr. mesto zavarivanja termopara na uzorak je korodirano pa je na tom mestu emisivnost veća. Kako je već ranije napomenuto, mesta na uzorku gde je dolazilo do korodiranja glava zavrtnejeva nisu uzimana u proračun emisivnosti, pa je na taj način izbegnut taj uticaj na izmerenu emisivnost uzorka. Mesto zavarivanja termopara, koje se nalazilo u centru uzorka, ulazilo je u sastav površine za koji je računata emisivnost, ali je njegov udeo bio zanemarljiv u odnosu na ukupnu površinu uzetu za proračun emisivnosti.

Zaključak

U radu je analitički razmatrana i eksperimentalno proveravana zavisnost emisivnosti nekih materijala spoljašnjih toplih delova turbomlaznog motora od temperature njihove površine.

Rezultati merenja za materijale BSEM 528 (zaštitni omotač komore sagorevanja) i MSRR 6523 (termoizolaciona obloga) su pokazali, da njihova emisivnost ne zavisi značajno od temperature u opsegu temperatura 500-900K, te da se za emisivnost može da koristi podatak dobijen merenjem na nižim temperaturama, kada je izvođenje merenja jednostavnije. Ovaj zaključak je potrebno proveriti za ostale materijale TMM.

Rezultati takođe pokazuju značajno odstupanje vrednosti za emisivnost dobijenih proračunom na osnovu analitičkih relacija i eksperimentalno. S obzirom da su u procesu merenja preduzete mere da se isključe svi uticaji koji mogu da degradiraju tačnost izmerenog podatka o emisivnosti (ekranizacija zračenja iz okoline, merenje normalno u odnosu na površinu objekta, izbor udaljenosti tako, da se eliminiše uticaj sredine kroz koju se prostire zračenje [8,9] itd.) to se sa mnogo sigurnosti može pretpostaviti, da do ovih razlika dolazi prvenstveno zbog toga što su analitičke relacije približne i ne uzimaju u obzir sve uticajne faktore (pretpostavlja se pri izvođenju idealna radvojna granična površina dva materijala, a ne može se uzeti u obzir stanje površine kao što je oksidacija i sl.), a može uzrok biti i tačnost podataka o parametrima materijala koji ulaze u analitičke relacije, što bi svakako zahtevalo detaljnije istraživanje. Zapaža se, takođe, odstupanje emisivnosti dobijeno analitičkim relacijama, za isti materijal, zavisno od toga, da li se kao ulazni podatak koristi specifična električna otpornost ili toplotna provodnost materijala, što opet ukazuje ili na same relacije ili na ulazne podatke u relacije.

Literatura

- [1] POKORNI,S. Prilog analizi greške određivanja temperature površine materijala pomoću IC senzora, *Naučnotehnički pregled*, 1996, vol.XLVI, no.9-10, p.18-24.
- [2] POKORNI,S. *Određivanje temperaturskog stanja toplih delova turbomlaznog motora metodom infracrvenog zračenja, doktorska disertacija*, VTA VJ, Beograd, 1994.
- [3] POKORNI,S. *Analiza greške određivanja temperature površi materijala primenom IC senzora*. ETRAN'96, Budva, 4-7.juni 1996, zbornik radova, sveska IV, p.103-106.
- [4] POKORNI,S. *Analiza greške određivanja temperature površi čvrstih materijala IC kamerom*, *Vojnotehnički glasnik*, 1998, no.1., p.75-86.
- [5] OMEGA ENGINEERING INC., *The Temperature Handbook*, 1991.
- [6] SIEGEL,R., HOWELL,J. *Thermal Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill, Kogakusha, Ltd., 1972.
- [7] POKORNI,S.: *Mogućnosti i ograničenja predikcije emisivnosti materijala*. *Vojnotehnički glasnik*, 1997, no.3, p.313-325.
- [8] POKORNI,S. *Analiza greške određivanja emisivnosti materijala pomoću IC senzora*. ETRAN'97, Zlatibor, 3-6.juni 1997, zbornik radova, sveska IV, p.133-136.
- [9] POKORNI,S. *Greška određivanja emisivnosti čvrstih materijala pomoću IC senzora*. *Naučnotehnički pregled*, 1997, vol. XLVII, no.3, p.7-11.
- [10] AGEMA INFRARED SYSTEMS, *Thermovision 870, Operating Manual*, 1991.
- [11] GOSSORG,Ž. *Infrakrasnaja termografija, osnovi, tehnika, primenenie*. Mir, Moskva, 1988, (prevod sa francuskog)
- [12] PSAROUTHAKIS,J. *Apparent Thermal Emissivity from Surfaces with Multiple V-Shaped Grooves*. *AIAA Journal*, 1963, vol.1, no.8,p.
- [13] LIVADA,B. *The role of emissivity in the interpretation of thermal images*. MIOPEL 93 2nd Serbian conference on microelectronics and optoelectronics, Niš – SRJ, 26.-28.october 1993.
- [14] ZHANG,Y-W, ZHANG,C-G, KLEMAS,W. *Quantitative measurements of ambient radiation, emissivity, and truth temperature of a graybody: methods and experimental results*. *Applied Optics*, 1986, vol.25, no.20, p.3683-3689.
- [15] CHEN,L., YANG,T.B., HU,X-R. *Design principle for simultaneous emissivity and temperature measurement*. *Optical Engineering*, 1990, vol.29, no.12, p.1449-1458.
- [16] WOLFE,W.L. *Differences in radiance: relative effects of temperature changes and emissivity changes*. *Applied Optics*, 1975, vol.14, no.8, p.1937-1939.

Rad primljen: 11.9.2000.god.