Dr Slavko Pokorni,
pukovnik, dipl. inž.
Vojna akademija VJ,
Beograd

MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA PREDIKCIJE EMISIVNOSTI MATERIJALA

UDC: 534.521.001.575:537.867.001.57

Rezime:

Merenje temperature ili detekcija temperaturnih anomalija na osnovu IC zračenja zahteva podatke o emisivnosti materijala, koji se mogu naći u odgovarajućim priručnicima, dobiti merenjem ili proračunom na osnovu određene matematičke relacije, što je do sada retko razmatrano. U ovom radu prikazane su mogućnosti i ograničenja predikcije (prognoziranja-predviđanja) emisivnosti materijala na osnovu zakona teorijske elektromagnetike. Dat je pregled relacija za proračun emisivnosti metala i dielektrika i prikazane su zavisnosti emisivnosti od optičkih i električnih parametara koje ukazuju na tendencije ovih zavisnosti. Upotrebna vrednost prognostičkih modela je u tome što daju opšte trendove zavisnosti emisivnosti pojedinih materijala od talasne dužine temperature, i ugla zračenja u odnosu na normalu na površ materijala, i pružaju mogućnost ekstrapolacije u drugi opseg u slučajevima kada se raspolaze ograničenim brojem eksperimentalnih podataka u jednom opsegu vrednosti parametara.

Ključne reči: emisivnost materijala, IC zračenje, analitičko određivanje, merenje temperature, metali, dielektrici.

POSSIBILITIES AND LIMITS OF MATERIAL EMISSIVITY PREDICTION

Summary:

The temperature measurement and the detection of temperature anomalies based in IR radiation demand material emissivity data which can be found in manuals or obtained by measurements or calculations on the basis of a particular mathematical relation — the case rarely considered up to now. This paper presents possibilities and limits of material emissivity prediction based on the laws of theoretical electromagnetics. The review of relations for the calculation of metals and dielectrics emissivity is given as well as the dependence of emissivity on optical and electrical parameters. The usability of prognostic models is in their general trends of dependence of particular materials on wave length, temperature and radiation angle in relation to the vertical to the material surface; they can be also extrapolated into another range in cases of the reduced number of experimental data in one range of parameter values.

Key words: material emissivity, IR radiation, analytical determination, temperature measurement, metals, dielectrics.

Uvod

Fluks zračenja materijala u infra-crvenom (IC) opsegu zavisi od temperature površi i emisivnosti materijala

(koeficijent emisije, emisiona moć). Zbog toga je, pri merenju temperature ili detekciji temperaturnih anomalija na osnovu IC zračenja, odnosno pomoću IC senzora ili termovizije, bilo

značajno poznavati vrednosti emisivnosti materijala [1, 2, 4, 5, 6, 7].

Poznavanje emisivnosti je značajno kako sa stanovišta merenja temperature, tako i sa stanovišta osmatranja i otkrivanja objekata. Naime, zbog različite emisivnosti materijala objekta koji se otkriva ili čija se temperatura meri, moguće je da dva različita objekta na različitim temperaturama termovizija prikaže kao objekte sa istim temperaturama (neće se razlikovati na termičkoj slici — termogramu) ili da dva različita objekta na istim temperaturama termovizija prikaže kao objekte sa različitim temperaturama. Pri osmatranju bojišta termovizijom ili otkrivanju objekata to može da dovede do zabune i pogrešnih interpretacija snimaka (termograma) dobijenih termovizijom.

Podatke o emisivnosti materijala moguće je naći u stručnim priručnicima [8, 9] ili putem merenja. Podaci o emisivnosti materijala koji se nalaze u priručnicima, iako se do njih najlakše dolazi, nisu uvek pouzdani, zbog toga što nisu potpuno specificirani uslovi pod kojima su dobijeni, odnosno uslovi za koje ti podaci važe (temperatura, talasna dužina, a posebno stanje površi materijala). Za specijalne materijale, kakvi se koriste u vojnoj tehnici, podaci o emisivnosti se i ne mogu naći. S druge strane, precizno merenje emisivnosti materijala nije jednostavno, a zahteva i skupu opremu. Međutim, postoji još jedna mogućnost dobijanja podataka o emisivnosti materijala, koja se ređe razmatra, a to je proračun na osnovu analitičkih relacija.

Poznato je da emisivnost materijala zavisi od temperature, talasne dužine, ugla zračenja i stanja površi (hrapavost, kontaminacija npr. slojem ulja, oksidacija, premazi). Veličina emisivnosti teoretski se kreće između vrednosti nula i jedan. Tela sa emisivnošću jedan predstavljaju idealizaciju i nazivaju se crnim telima. Praktično

se mogu realizovati veštačka crna tela čija je emisivnost vrlo bliska vrednosti jedan. Sva realna tela imaju emisivnost manju od jedan.

Realna tela, kod kojih emisivnost zavisi od talasne dužine IC zračenja, nazivaju se telima sa selektivnim zračenjem. Realna tela kod kojih emisivnost ne zavisi od talasne dužine zračenja nazivaju se sivim telima. Grafička predstava emisivnosti za crno telo, sivo telo i telo sa selektivnim zračenjem, prikazana je na slici 1.

Sl. 1 — Emisivnost crnog i sivog tela i tela sa selektivnim zračenjem

S obzirom na to da instrumenti koji se koriste za određivanje temperature na osnovu IC zračenja, zavisno od vrste senzora, rade u širem ili užem spektralnom opsegu, i primaju energiju IC zračenja iz uskog prostornog ugla, to su od interesa i različito definisane emisivnosti materijala. U teoriji se definiše više vrsta emisivnosti materijala, a najčešće su: spektralna emisivnost po pravcu (emisivnost na talasnoj dužini primanog zračenja posmatrano pod uglom u odnosu na normalu na površ materijala), ukupna emisivnost po pravcu (predstavlja emisivnost po pravcu integriranu po celokupnom spektru talasnih dužina zračenja), polusferna spektralna emisivnost (predstavlja spektralnu emisiv-

nost integriranu po svim pravcima polusfere) i polusferna ukupna emisivnost (integrirana po svim pravcima polusfere i po svim talasnim dužinama spektra zračenja materijala). Pored toga, za praksu je interesantna emisivnost u pravcu normale (normalna emisivnost), bilo spektralna, bilo ukupna, kao i srednja emisivnost u opsegu talasnih dužina, jer većina IC instrumenta prima zračenje u određenom IC opsegu, na primer 2—5 ili 8—14 μm .

Izvori podataka o emisivnosti materijala i teorijske osnove predikcije

Podaci o emisivnosti materijala dobijeni merenjem se, za razne materijale, mogu naći u literaturi o IC instrumentima, najčešće su dati kao brojčana vrednost ili opseg vrednosti na određenoj temperaturi ili za određeni opseg temperatura, kao što je prikazano u tabeli 1, a uzeti su iz [8, 9, 10]. U literaturi [2, 8, 9, 10] mogu se naći podaci o emisivnosti ostalih materijala. Takođe se, iako ređe, mogu naći grafičke zavisnosti emisivnosti od temperature i talasne dužine.

Za predikciju emisivnosti materijala najčešće se koriste zaklone teorijske elektromagnetike, zasnovani na uopštenim Maksvelovim jednačinama [6]. Međutim, takve relacije imaju niz ograničenja koja utiču na njihovu primenljivost u praktičnim proračunima. Pored niza pretpostavki koje se uvode pri izvođenju, ova teorija ne važi kada su razmatrane učestanosti reda učestanosti vibracija molekula. To ograničava primenljivost ovih relacija na talasne dužine veće od vidljivog, pa i bliskog IC opsega, odnosno primenjive su na srednji i daleki IC spektralni opseg ($\lambda > 3 \mu\text{m}$).

Mogućnosti i ograničenja predikcije emisivnosti

Do relacija između karakteristika zračenja i optičkih i električnih osobina materijala dolazi se analizom inci-

dentnog zračenja iz jedne sredine na graničnu površ sa drugom sredinom. Pri ovoj analizi pretpostavlja se optički ravna (glatka), čista površ, kada se vrši refleksija i prelamanje po zakonima geometrijske optike. Površ se smatra optički glatkom, ako je srednja vrednost neravnina površi znatno manja od talasne dužine incidentnog zračenja.

Analiza pokazuje da rezultati koji se, za idealne uslove na graničnoj površi, dobijaju primenom složenijih relacija nisu adekvatni uloženom trudu, u odnosu na rezultate dobijene uprošćenim relacijama, pogodnijim za inženjerske proračune, iz jednostavnog razloga što ni složenije relacije ne mogu uzeti u obzir stanje i osobine razdvojne površi. Odstupanja osobina realnih materijala i stanja površi od idealnih, kakve se pretpostavljaju u teoriji, razlog su velikih razlika u vrednostima emisivnosti materijala dobijenih teorijskim modelima i na osnovu merenja. Ova odstupanja uslovljena su, pre svega, faktorima kao što su nečistoća, hrapavost površi, premazi i slično. Pokazuje se da emisivnost više zavisi od osobina površi materijala nego od materijala osnove. U predikciji emisivnosti na osnovu zakona teorijske elektromagnetike potpuno se zanemaruju uticaji uslova na površi materijala na karakteristike zračenja. To je i najveće ograničenje primene ove teorije, jer se veoma čiste, optički glatke granične površi retko sreću u praksi.

Najveća upotrebnost vrednost primene teorije elektromagnetskog zračenja za predikciju emisivnosti je u tome što objašnjava postojanje bitnih razlika u karakteristikama provodnih i izolacionih materijala (dielektrika), daje opšte trendove zavisnosti i pruža mogućnost ekstrapolacije u drugi opseg kada se raspolaze ograničenim brojem eksperimentalnih podataka u jednom opsegu.

Tabela 1

Materijal i obrada površi	T [°C]	Emisivnost
Metali		
ALUMINIJUM		
sjajna folija	20	0,04
izložen atmosferilijama	20	0,83—0,94
BAKAR		
poliran	100	0,05
jako korodiran	20	0,78
ČELIK		
poliran	100	0,07
oksidiran na 800°C	200	0,79
GVOŽĐE		
odlivak, oksidirano	100	0,64
liveno	38	0,44
lim, jako oksidiran	20	0,69—0,96
MAGNEZIJUM		
poliran	38—260	0,07—0,13
NIKL		
poliran	20	0,05
galvanski nanet na gvožđe (nepoliran)	20	0,11
PLATINA		
elektrolitička	260—538	0,06—0,10
ploča polirana	227—627	0,054—0,104
SREBRO		
polirano	38—538	0,01—0,03
TANTAL	1371—2760	0,2—0,3
ZLATO		
jako polirano	93—593	0,018—0,035
polirano	130	0,018
VOLFRAM		
grejno vlakno	27	0,032
grejno vlakno	3315	0,39
Ostali materijali		
OPEKA, obična crvena	20	0,93
ČAD, sveće	20	0,95
BETON, suv	35	0,95
ULJE		
za podmazivanje	17	0,87
sloj debljine 0,03 mm	20	0,27
sloj debljine 0,13 mm	20	0,72
debeo sloj	20	0,82
HARTIJA, bela	20	0,70—0,90
TLO		
suvo	20	0,92
zasićeno vodom	20	0,95
KOŽA, ljudska	32	0,98
VODA, destilovana	20	0,96
DRVO, blanjana hrastovina	20	0,90

Teorijski modeli emisivnosti materijala

Ovde se neće izvoditi relacije za emisivnost materijala već se u tabeli 2 daje pregled relacija koje se nalaze u literaturi (za emisivnost u opsegu talasnih dužina relaciju je izveo autor ovog rada u [5]). Relacije u tabeli 2 važe za emisivnost materijala u vazduh, za materijale sa optički glatkim površima, tj. površima za koje važi da je talasna dužina zračenja mnogo manja od srednje kvadratne vrednosti visine neravnina površi. Za relacije iz table 2 urađen je program na računaru za proračun emisivnosti, u zavisnosti od optičkih i električnih parametara, čije su mogućnosti prikazane na slici 2. Program omogućava proračun naznačenih emisivnosti dielektrika i metala ili tabeliranje zavisnosti emisivnosti od ugla pod kojim se prima zračenje, indeksa prelamanja, talasne dužine i temperature za različite optičke i električne parametre materijala, kao što su konstanta slabljenja, indeks prelamanja, specifična električna otpor-

nost, specifična toplotna provodnost, koji se mogu naći u odgovarajućim priručnicima o specifikacijama materijala.

U tabeli 2, date su zavisnosti i od optičkih i od električnih parametara. Električni parametri materijala su, pogotovo inženjerima elektrotehnike, češće poznati nego optički parametri materijala.

Primeri rezultata za spektralnu emisivnost, u zavisnosti od parametara indeksa prelamanja n i konstante slabljenja k , kao i od specifične otpornosti materijala ρ za karakteristične materijale za koje su n , k i ρ nađeni u [6] dati su u tabeli 3.

Treba imati u vidu da indeks prelamanja sredine n , u opštem slučaju, zavisi od talasne dužine λ , pa su, prema tome, i sve emisivnosti proračunate na osnovu njega spektralno zavisne.

Kod dielektrika, za relacije u tabeli 2, važi sledeća veza uglova χ i β :

$$\chi = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin\beta\right)$$

Sl. 2 — Mogućnosti prognostičkog proračuna emisivnosti

R. br.	Emisivnost	Relacija
Dielektrici		
1	Spektralna po pravcu, horizontalna polarizacija	$\varepsilon_{II}(\beta) = 1 - \left[\frac{\operatorname{tg}(\beta - \alpha)}{\operatorname{tg}(\beta + \alpha)} \right]^2$
2	Spektralna po pravcu, vertikalna polarizacija	$\varepsilon_I(\beta) = 1 - \left[\frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin(\beta + \alpha)} \right]^2$
3	Spektralna po pravcu, nepolarizovana	$\varepsilon(\beta) = 1 - \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{2 \sin^2(\beta + \alpha)} \left[1 + \frac{\cos^2(\beta + \alpha)}{\cos^2(\beta - \alpha)} \right]$
4	Spektralna normalna	$\varepsilon_n = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$
Metali		
5	Spektralna po pravcu, horizontalna polarizacija	$\varepsilon_{II}(\beta) = \frac{4n \cos \beta}{(n^2 + k^2) \cos^2 \beta + 2n \cos \beta + 1}$
6	Spektralna po pravcu, vertikalna polarizacija	$\varepsilon_I(\beta) = \frac{4n \cos \beta}{\cos^2 \beta + 2n \cos \beta + n^2 + k^2}$
7	Spektralna po pravcu, nepolarizovana	$\varepsilon(\beta) = \frac{\varepsilon_{II}(\beta) + \varepsilon_I(\beta)}{2}$
8	Spektralna normalna	$\varepsilon_n = 1 - \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$
9	Polusferna nepolarizovana	$\begin{aligned} \varepsilon = & 4n - 4n^2 \ln \left(\frac{1 + 2n + n^2 + k^2}{n^2 + k^2} \right) + \\ & + \frac{4n(n^2 - k^2)}{k} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{k}{n + n^2 + k^2} \right) + \\ & + \frac{4n^2}{n^2 + k^2} - \frac{4n}{(n^2 + k^2)^2} \ln(1 + 2n + n^2 + k^2) - \\ & - \frac{4n(k^2 - n^2)}{k(n^2 + k^2)^2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{k}{1 + n} \right) \end{aligned}$

R. br.	Emisivnost	Relacija
10	Spektralna normalna, polariz. ili nepolarizovana	$\varepsilon_{\lambda n}(\lambda) = 1 - \frac{2n^2 - 2n + 1}{2n^2 + 2n + 1}$
11	Spektralna normalna ($\lambda > 5 \mu\text{m}$)	$\varepsilon_n(\lambda) = 0,365 \sqrt{\frac{\rho_{20^\circ\text{C}}}{\lambda}}$
12	Spektralna	$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda) = & 0,365 \sqrt{\rho[1 + \alpha(T - 293)]} \frac{1}{\lambda} - \\ & - 0,0667 \rho[1 + \alpha(T - 293)] \frac{1}{\lambda} \\ & + 0,006 \sqrt{\left\{ \rho[1 + \alpha(T - 293)] \frac{1}{\lambda} \right\}^3} \end{aligned}$
13	Spektralna	$\varepsilon(\lambda, T) = 5445,9 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{3T}{\omega \cdot \lambda}}$
14	Ukupna, normalna ($T < 1000 \text{ K}$)	$\varepsilon_n(T) \cong 0,574 \sqrt{\rho_{0^\circ\text{C}} \cdot T}$
15	Ukupna, normalna	$\varepsilon_n(T) \cong 0,576 \sqrt{\rho \cdot T} - 0,124 \cdot \rho \cdot T$
16	Srednja normalna (2—5) μm	$\bar{\varepsilon}_n(\rho) \cong 19,988 \sqrt{\rho(T)}$
17	Ukupna	$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda) = & 0,5737 \sqrt{\rho[1 + \alpha(T - 293)]} T - \\ & - 0,1769 \rho[1 + \alpha(T - 293)] T \end{aligned}$
18	Srednja (2—5) μm	$\bar{\varepsilon}(T) = 2983,827 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{T}{\omega}}$

U tabeli 2 oznake imaju sledeće značenje:

β — ugao između incidentnog talasa i normale na razdvojnu površ vazduha i materijala,

α — ugao između prelomljenog talasa i normale na razdvojenu površ vazduha i materijala,

n — indeks prelamanja materijala,

k — koeficijent slabljenja materijala,

ρ — specifična električna otpornost materijala, [$\Omega \text{ cm}$],

λ — talasna dužina zračenja, [μm],

ω — toplotna provodnost materijala, [W/cmK],

α — temperaturski koeficijent promene otpornosti, [$1/^\circ\text{C}$],

T — temperatura površi materijala, [K].

Podaci u tabeli 3 pokazuju da se neki proračunski rezultati, prema rel. 8 u tabeli 2, za nikl i volfram, u dobroj meri slažu sa eksperimentalno izmere-

grupe materijala biti komparativno analizirane. U tu svrhu će se, koristeći relacije u tabeli 2 i program za računar, sa mogućnostima prema slici 2,

Tabela 3

Materijal	$\lambda [\mu\text{m}]$	n	k	$\rho [\Omega\text{m}] \times 10^6$	Izme- reno	Rel. 8	Rel. 11
Bakar	2,25	1,03	11,7		0,041	0,029	
	4,25	1,92	22,8	1,72	0,027	0,014	0,023
Gvožđe	0,589	1,51	1,63		0,43	0,674	
Magnezijum	0,589	0,37	4,42		0,27	0,070	
Nikl	2,25	3,95	9,20		0,152	0,145	
Platina	5,00	11,5	15,7	10	0,050	0,11	0,051
Srebro	2,25	0,77	15,4		0,021	0,013	
	4,50	4,49	33,3	1,63	0,015	0,014	0,022
Zlato	5,00	1,81	32,8	2,44	0,031	0,007	0,026
Volfram	0,589	3,46	3,25		0,49	0,455	

nim vrednostima. Međutim, kod nekih dolazi do značajnih odstupanja. Na primer, za zlato, platinu i magnezij rezultati merenja i proračuna razlikuju se i do četiri puta. Takođe, uočava se da i u rezultatima koji se dobijaju različitim relacijama (rel. 8 gde su ulazni parametri optičke konstante i rel. 11 gde su ulazni podaci električni parametri) ima značajnih razlika. Za slučajeve gde nema dobrog slaganja teško je reći da li je uzrok u netačnosti optičkih konstanti, netačnosti eksperimentalnih podataka ili u samoj teoriji. Najverovatnije je da je uzrok u podacima o optičkim konstantama (n i k koje se koriste kao ulazni podaci u relaciju 8) i da uzorci korišćeni za eksperiment nisu zadovoljavali standarde u pogledu pripreme površi materijala prema zahtevima teorije [6], odnosno da nije adekvatno specificirana obrada površi materijala na kome je vršeno merenje.

Primena teorijske elektromagnetike za predikciju emisivnosti pokazuje da postoje očigledne razlike u emisivnosti metala i dielektrika, pa će te dve

prikazati grafičke zavisnosti emisivnosti nekih metala i dielektrika od ugla pod kojim se prima zračenje u odnosu na normalu na površ materijala, talasne dužine zračenja i temperature površi materijala.

Analizom rezultata dobijenih prikazanim relacijama može se zaključiti da emisivnost dielektrika i metala zavisi od pravca (ugla) pod kojim se prima zračenje (u odnosu na normalu na površ materijala), talasne dužine zračenja i temperature površi materijala. Naravno, moguće je da kod nekih materijala ove opšte tendencije mogu biti veće, a kod nekih manje, a kod nekih čak i da ne važe. Treba napomenuti da emisivnost u svim slučajevima zavisi od stanja površi, ali to u relaciji u tabeli 2 nije uključeno.

Zavisnost emisivnosti dielektrika i metala od optičkih i električnih parametara

Čisti, glatki metali se često karakterišu malom vrednošću emisivnosti (često manjom od 0,1) i, prema tome,

u skladu sa Kirhofovom zakonom, velikom vrednošću koeficijenta refleksije. To je veoma značajno pri merenju temperature na osnovu infracrvenog zračenja, jer se smanjivanjem emisivnosti povećava greška merenja temperature na osnovu IC zračenja, a kod vrlo malih emisivnosti merenje temperature postaje praktično nemoguće [4]. Međutim, mala vrednost emisivnosti nije apsolutno pravilo za metale. Za oksidirane metale emisivnost je, uglavnom, veća od 0,5.

Uticaj ugla zračenja

Emisivnost zavisi od ugla pod kojim se prima zračenje sa površi materijala i od polarizacije zračenja. Zbog zavisnosti od ugla, emisivnost je različita u različitim tačkama materijala kod kojeg je ona, u pravcu normale, ista u svim tačkama.

Kod dielektrika se emisivnost po pravcu neprekidno smanjuje sa povećanjem ugla u odnosu na normalu za male vrednosti indeksa prelamanja

Sl. 3 — Zavisnost spektralne emisivnosti dielektrika od pravca zračenja (rel. 3)

(slika 3). Međutim, za veće indekse prelamanja emisivnost je, za manje uglove, relativno konstantna, a kod većih uglova prvo raste, a zatim naglo opada kod uglova bliskih 90° .

Kod metala (slika 4) emisivnost je relativno konstantna za uglove 40° — 70° , a kod većih uglova, prvo dolazi

Sl. 4 — Zavisnost spektralne emisivnosti metala od pravca zračenja (rel. 7)

do porasta, a zatim do naglog opadanja emisivnosti, što je tipično za polirane metale. Eksperimentalno je utvrđeno da, kod nekih metala, za male talasne dužine ($\lambda < 1 \mu\text{m}$) emisivnost po pravcu opada u celom opsegu uglova, na primer, kod titana. Teoretski rezultati dobijeni primenom teorijske elektromagnetike veoma dobro su potvrđeni eksperimentalno, na primer, za platinu. Ovakva zavisnost emisivnosti od ugla pod kojim se prima zračenje u odnosu na normalu na površ materijala upućuje na zaključak da je najpogodnije merenje temperature kada je optička osa instrumenta normalna na površ materijala.

Uticaj talasne dužine zračenja

Sa porastom talasne dužine, emisivnost metala (u pravcu normale) relativno slabo opada u celom spektralnom opsegu (slika 5), a dielektrika raste, mada je zavisnost emisivnosti dielektrika od talasne dužine manja, jer ona ulazi u relacije preko indeksa prelamanja koji se malo menja sa promenom talasne dužine za većinu nemetala. Zavisnost spektralne normalne emi-

sivnosti metala od indeksa prelamanja prikazana je na slici 6. Za razliku od analitičkih, eksperimentalni rezultati pokazuju da je kod metala izuzevak bakar, kod kojeg je emisivnost relativno konstantna u većem spektralnom opsegu, što znači da je dobar primer sivog tela. Kod talasnih dužina koje su na donjoj granici infracrvenog opsega ne važe pretpostavke na kojima se zasnivaju uprošćene relacije dobijene primenom teorijske elektromagnetike. Praktično se potvrđuje da većina metala ima maksimum emisivnosti na granici sa vidljivim spektrom, a zatim emisivnost brzo opada sa smanjivanjem talasne dužine.

Za razliku od čvrstih materijala, emisivnost gasova i tečnosti se znatno više menja po spektru zračenja. Među-

Sl. 5 — Spektralna zavisnost normalne emisivnosti metala (rel. 11 i 13)

tim, sneg se praktično ponaša kao crno telo u infracrvenoj spektralnoj oblasti.

Očigledno je da podaci o emisivnosti, koji su dati u obliku neke brojne vrednosti, predstavljaju ili spektralnu emisivnost (emisivnost na određenoj talasnoj dužini zračenja) ili srednju emisivnost u određenom spektralnom opsegu zračenja. Za merenje temperature IC instrumentom neophodni su ili jedni ili drugi podaci o emisivnosti, zavisno od toga da li rade na

jednoj talasnoj dužini ili u određenom spektralnom opsegu.

Sl. 6 — Zavisnost normalne emisivnosti metala od indeksa prelamanja (rel. 8)

Uticaj temperature

Sa porastom temperature emisivnost metala raste (slika 7), dok je kod dielektrika obrnuto. Relacije za emisivnost metala pokazuju da je spektralna emisivnost metala proporcionalna kvadratnom korenu iz specifične električne otpornosti (rel. 11), a kako ona raste sa porastom temperature, to, u većini slučajeva, i emisivnost raste. Međutim, kod malih talasnih dužina (na primer za volfram za $\lambda < 1,27 \mu\text{m}$) uticaj temperature je suprotan i spektralna emisivnost opada sa porastom temperature. Neki metali imaju veliku ukupnu emisivnost koja opada sa porastom temperature, kao, na primer, magnezijumoksid.

Zavisnost emisivnosti dielektrika od temperature je mala, jer se temperatura javlja u relacijama preko indeksa prelamanja, koji obično malo zavisi od temperature. Generalno, dielektrici se za razliku od metala, karakterišu većom vrednošću emisivnosti, uglavnom većom od 0,5, a najčešće od 0,8 do 0,95.

Relacije za emisivnost metala, u zavisnosti od temperature, važe za određeni spektralni opseg. Na primer, za

volfram za $\lambda > 2 \mu\text{m}$, za zlato i srebro za $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$, za nikal i gvožđe za $\lambda > 5$

Sl. 7 — Zavisnost srednje emisivnosti metala od temperature u opsegu $2-5 \mu\text{m}$ (rel. 18)

μm . Podaci za ove uslove često se razlikuju u literaturi, što treba imati u vidu pri korišćenju ovih relacija.

Uticaj hrapavosti površi

Može se desiti da navedeni zaključci i pravila o zavisnosti emisivnosti ne važe, zbog znatnih odstupanja karakteristika površi materijala do kojih dolazi zbog premaza i naslaga na površima, hrapavosti površi, oksidiranja površi ili odstupanja strukture materijala. Do sada još nema pogodnih analitičkih postupaka koji mogu uzeti u obzir sve ove faktore, tako da nije moguće analitički odrediti emisivnost, osim za materijale čiji su sastav i obrada površi bliski idealnom (teoretskom).

Empirijska relacija, koja daje vezu emisivnosti hrapave površi u zavisnosti od emisivnosti glatke površi, često se susreće u literaturi, a važi ako je visina neravnina nekoliko puta veća od talasne dužine zračenja:

$$\varepsilon_h = \varepsilon \cdot [1 + 2,8 \cdot (1 - \varepsilon)^2]$$

gde su:

ε_h — emisivnost hrapave površi,
 ε — emisivnost glatke površi.

Postoje pokušaji da se, pored empirijskih, dođe i do analitičkih relacija koje uzimaju u obzir hrapavost, polazeći od odgovarajućeg geometrijskog oblika neravnina. I ove relacije, kao i empirijske, približno daju vezu emisivnosti hrapave u odnosu na glatku površ.

Ako se neravnine posmatraju kao neograničeno dug trouglasti žleb, sa uglom između stranica žleba Θ , i pod pretpostavkom da su stranice žleba sirovo telo sa uniformnom emisivnošću ε i uniformnom temperaturom, koristeći koncept geometrijske optike, za emisivnost takve površi ε_h dobija se analitička relacija

$$\varepsilon_h = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \sin \frac{\Theta}{2} \right]^{-1}$$

Zavisnost emisivnosti hrapave površi, data sa prethodne dve relacije, grafički je prikazana na slici 8.

Sl. 8 — Emisivnost hrapave površi

Pokazuje se da je emisivnost hrapave površi u odnosu na glatku površ to veća što je emisivnost glatke površi manja.

Koristeći prognostičke relacije i eksperimentalne rezultate, dolazi se do opštih tendencija zavisnosti emisivnosti dielektrika i metala. Takve tendencije zavisnosti emisivnosti metala i dielektrika od ugla pod kojim se prima

zračenje u odnosu na normalu na površ materijala koji zrači, talasne dužine zračenja, temperature površi materijala

Sl. 9 — Tendencija zavisnosti emisivnosti dielektrika i metala

rijala i hrapavosti površi materijala, ilustrativno su prikazane na slici 9 i mogu poslužiti za grubu komparaciju.

Zaključak

Pri merenju temperature ili detekciji temperaturnih anomalija na osnovu IC zračenja, neophodno je znati podatke o emisivnosti materijala, do kojih se može doći i proračunom na osnovu odgovarajućih matematičkih relacija.

Zakoni teorijske elektromagnetike, zasnovani na uopštenim Maksvelovim jednačinama, na osnovu kojih su izvedene relacije koje su ovde korišćene za predikciju emisivnosti materijala, imaju niz ograničenja koja utiču na primenjivost ovih relacija u praktičnim proračunima. Pri izvođenju se uvode određene pretpostavke i a-

proksimacije, a teorija prestaje da važi kada su razmatrane učestanosti reda učestanosti vibracija molekula. To ograničava primenjivost ovih modela na talasne dužine veće od onih u vidljivom, pa i bliskom IC spektralnom opsegu. Pri izvođenju se pretpostavlja interakcija na granici između površi dva materijala pod idealnim uslovima (optički ravna, čista granična površ), što je u praksi retko.

Odstupanja osobina realnih materijala od idealnih, kakve se pretpostavljaju u teoriji, razlog su velikih razlika u vrednostima emisivnosti dobijenih na osnovu predikcionih modela i na osnovu merenja. Ova odstupanja uslovljena su nečistoćom i hrapavošću površi, promenama u strukturi kristalne rešetke nastalim pri obradi površi, itd. Relacije koje uzimaju u obzir hrapavost površi uglavnom su empirijske, iako ima pokušaja dobijanja analitičkih relacija. Zbog poteškoća oko specificiranja uslova na površi i kontrole pripreme površi, teoretski i eksperimentalni rezultati često se ne slažu, čak i za veoma korektno izvedenu teoriju. U stvari, poređenje eksperimentalnih rezultata sa rezultatima dobijenim putem manje egzaktnih, ali jednostavnijih relacija, kakve su date u tabeli 2, pokazuje da, čak i za najčistije materijale sa vrlo pedantnom pripremom površi, jednostavnije relacije često daju tačnije rezultate, zbog toga što aproksimacije učinjene pri izvođenju kompenzuju uticaj površi.

Ako je potrebno doći do tačnijeg podatka o emisivnosti konkretnog materijala na nekom objektu, ipak je preporučljivo da se do tog podatka dođe merenjem odgovarajućom metodom, čija se greška može proceniti.

Upotrebna vrednost ovih prognostičkih modela je u tome što daju opšte trendove zavisnosti emisivnosti pojedinih materijala od parametara, kao što su talasna dužina i temperatura, kao i od ugla zračenja u odnosu na

normalu na površ materijala, i pruža ju mogućnost eksploatacije u drugi opseg u slučajevima kada raspoložemo ograničenim brojem eksperimentalnih podataka u jednom opsegu.

Očigledno je da postoji znatna razlika u ponašanju dielektrika i metala u pogledu emisivnosti. Dielektrici, po pravilu, imaju veću emisivnost od metala, što olakšava otkrivanje objekata i merenje temperature na osnovu IC

zračenja, za razliku od materijala sa niskom vrednošću emisivnosti, kao što su metali (emisivnost uglavnom manja od 0,5, osim ako se ne radi o korodiranim površima ili površima na koje je naneta boja ili neki drugi dielektrik), jer je količina zračenja veća pri istoj temperaturi. Mala emisivnost metala otežava, a vrlo mala i onemogućava precizno merenje temperature na osnovu IC zračenja.

Literatura:

- [1] Snopko, N. V.: Spektralne metode optičeskoj pirometriji nagretoj poverhnosti, Nauka i tehnika, Minsk, 1988.
- [2] AGEMA Infrared Systems: Thermovision 870, Operating Manual, 1991.
- [3] Madding, R.: Thermographic Instruments and Systems, University of Wisconsin — Extension, Department of Engineering and Applied Science, 1979.
- [4] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja temperature površi materijala primenom IC senzora, ETRAN '96, Zbornik radova, sveska IV, p. 103—106, Budva, 4—7. juni 1996.
- [5] Pokorni, S.: Određivanje temperaturskog stanja toplih delova turbomlaznog motora metodom infracrvenog zračenja, doktorska disertacija, VTA VJ, Beograd, 1995.
- [6] Siegel, R., Howell, J.: Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill, Kogakusha, Ltd., 1972.
- [7] Gossorg, Ž.: Infrakrasnaja termografija, osnovi, tehnika primenienie, Mir, Moskva, 1988. (prevod sa francuskog na ruski).
- [8] OMEGA Engineering Inc., An OMEGA Technologies Company: The Temperature Handbook, 1991.
- [9] OMEGA Engineering Inc., An OMEGA Technologies Company: Temperature Measurement Handbook, 1982.
- [10] Pokorni, S., Pljevaljčić, U.: Analiza temperaturskih stanja vanjskih toplih delova TMM »VIPER« u realnim uslovima ispitivanja na probnoj stanici (Eksperimentalno određivanje emisionih moći vanjskih toplih delova TMM »VIPER«), izveštaj o projektu, VZ »ORAO«, mart, 1992.