

OSNOVNI PRINCIPI INFRACRVENE TERMOGRAFIJE BASIC PRINCIPLES OF INFRARED THERMOGRAPHY

Stručni rad / Professional paper
UDK /UDC: 620.179.13
Rad primljen / Paper received: 10.05.2006.

Adresa autora / Author's address:
¹) JKP „Beogradske elektrane“, Centar za ispitivanje,
kvalitet i ekologiju

Ključne reči

- infracrveno zračenje
- termografija
- emisivnost, reflektivnost
- izlazno, emitovano, reflektovano zračenje

Izvod

Prikazani su osnovni principi infracrvene termografije sa posebnim osvrtom na dijagnostiku tehničkih sistema. Fizički koncepti metode ilustrovani su primerima primene i rezultatima izvedenih ispitivanja.

UVOD

Danas se infracrvena termografija koristi u skoro svim sferama ljudske delatnosti (medicina, kriminalistika, biologija, tehnika, svakodnevni život). Ona je posebno značajna u dijagnostici stanja tehničkih sistema, kao beskontaktna metoda za čije sprovođenje nije neophodno zaustavljati proizvodni proces. Može se primenjivati, i primenjuje se, u svim slučajevima gde promena termičke slike ukazuje na neku anomaliju. Omogućava rano otkrivanje oštećenja i samim tim, uslove za sprečavanje ozbiljnijih otkaza. Između ostalog, koristi se za ispitivanje stanja elektroenergetske opreme, obrtnih agregata, izolacije, kotlova i posuda pod pritiskom, građevinskih konstrukcija.

Infracrvena (IR) termografija predstavlja otkrivanje infracrvenog (toplotnog) zračenja koje emituje neki objekt i prevodenje tog zračenja (koje je inače nevidljivo za ljudsko oko) u vidljivu sliku, termogram /1/. Na termogramu (sl. 1) se mogu uočiti površine koje emituju različitu količinu infracrvenog zračenja (različite boje: veće zračenje → svetlije boje), dok su iste boje izotermalne površine koje emituje jednake količine toplote.

TEORIJSKI KONCEPT

Prenos toplote: To je zajednički pojam za prenos toplote provođenjem, konvekcijom i zračenjem /2/, koji se javljaju nezavisno jedan od drugog. Uslov za razmenu toplote je temperaturna razlika. Odvija se spontano sa toplijeg na hladnije telo. Kada nema temperaturne razlike (termodinamička ravnoteža) nema ni razmene toplote.

Keywords

- infrared radiation
- thermography
- emissivity, reflectivity
- exitant, emitted, reflected radiation

Abstract

Basic principles of infrared thermography are presented with the emphasis to the diagnostics of technical systems. Physical concepts of the method are illustrated by examples of application and by the results of performed tests.

INTRODUCTION

Today the infrared thermography is applied in almost all spheres of human activities (medicine, criminalistics, biology, technics, every day life). It is of special importance in diagnostics of technical systems state and as a contactless method it is not necessary to stop the production process for applying it. It may be applied and is applied in all situations where the variation of thermal image indicates some irregularity. It enables early detection of damage and consequently, conditions to prevent serious failures. Among others, it is applied in the inspection of the state of power energy equipment, rotating assemblies, insulations, boilers and pressure vessels, and civil engineering structures.

Infrared (IR) thermography presents the detection of infrared (thermal) radiation emitted by the object and transformation of this radiation (invisible for human eye) into a visible picture, a thermogram, /1/. On the thermogram (Fig. 1) one can differ the areas emitting different amounts of infrared radiation (different colours: higher radiation → lighter colours), while the areas of the same colour are isothermal, emitting equal amounts of heat.

THEORETICAL CONCEPT

Heat transfer: This is common notion for heat transfer by conduction, convection and radiation /2/, occurring independently. The condition for heat transfer is temperature difference. It occurs spontaneously, from warmer to cooler object. For equal temperatures (thermodynamic equilibrium) there is no heat transfer.

Provođenje: Toplota se unutar tela prenosi sa čestice na česticu intermolekularnim dejstvom. Čestice su u stanju mirovanja, /2/. Ovo je jedini način prenosa toplote koji se javlja unutar čvrstih tela. Zavisí od svojstva materijala – koeficijenta provođenja toplote (λ) i debljine (d), odnosno dužine puta kroz koji prolazi toplota. Na mestima promene veličine koeficijenta λ i debljine menja se termička slika zbog različitog provođenja toplote. Ova osobina se koristi u građevinarstvu pri ispitivanju fasada zgrada i ravnih krovova. Na sl. 2 prikazan je termogram ravnog krova fabričke hale, snimljen u grejnom periodu sa unutrašnje strane, /3/. Mogu se uočiti hladnije linije koje odgovaraju nižoj temperaturi metalnih podvlaka-rožnjača (temperatura 20–21°C, skala desno, sl. 2), kao i proširene hladne zone koje odgovaraju mestima sa skupljenim kondenzatom. Na ovim mestima je intenzivnije odvođenje toplote zbog većeg koeficijenta provođenja toplote metala i vode u odnosu na okolnu (suvu) izolaciju.

Konvekcija: Toplota se konvekcijom prenosi sa tečnosti ili gasa na čvrsto telo, ili obrnuto, sl. 3. Čestice su u stanju kretanja /2/. Unutar čvrstog tela nema konvekcije. Konvekcija se može smatrati i nepovoljnim faktorom, jer smanjuje temperaturu površine ispitnog uzorka (prelaz toplote sa površine u atmosferu), što je izraženo pri jakom vetru. Tada se toplota intenzivno odvodi konvekcijom sa površine, čime se smanjuje temperaturna razlika između objekata. Molekuli vazduha sudaraju se s molekulima zida i između njih dolazi do razmene toplote. Topliji molekuli zida predaju toplotu molekulima vazduha, hladeći zid. Sa pojačanjem strujanja molekula vazduha (vetar) intenzivira se i hlađenje zida.

Zračenje: Prenos toplote elektromagnetnim talasima. Prenos toplote sa jednog na drugo telo se ostvaruje bez materijalnih nosilaca, /2/. Na termogramu se snima samo toplota prenetá zračenjem sa objekta na objektiv kamere. Količina te toplotne energije E zavisi od temperature objekta T i emisivnosti njegove površine. Definisana je Štefan-Bolcmanovim zakonom

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

σ je Štefan-Bolcmanova konstanta: $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, /2/; ε – koeficijent emisivnosti: sposobnost tela da zrači. Zavisí, između ostalog, od vrste materijala i stanja površine (zapríljanost, oksidiranost).

Ovaj zakon pokazuje energiju koju telo zrači, a koja može da se otkrije kamerom. Ako se ispravno snimi ta energija i unese tačna vrednost ε , kamera preračunava temperaturu na osnovu

$$T = \left(\frac{E}{\sigma \varepsilon} \right)^{1/4} \quad (2)$$

Slika 4 prikazuje stanje u posudi podeljenoj na dva dela: a) fluid iste temperature se nalazi u oba dela, ali je emisivnost površine različita; b) emisivnost površine je ista, a fluidi različite temperature.

U oba slučaja leva (siva) polovina ima veću energiju zračenja i prikazuje se kao svetlija na termogramu.

Izlazno zračenje: Zračenje koje se odaje sa površine objekta (sl. 5). Sastoji se od dve komponente: emitovanog (potiče od toplote samog objekta, $\varepsilon E_\varepsilon$) i reflektovanog zračenja (potiče od toplote okolnih objekata, ρE_ρ)

Conduction: The heat within the object is transmitted from one particle to the other by intermolecular action. The particles are in a standstill state, /2/. This is the only means of heat transfer inside solids. It depends on material properties – heat conduction coefficient (λ) and thickness (d) regarding the length for heat to pass. At locations of changed values for λ and thickness the thermal image is also changed due to different heat conduction. This property is used in civil engineering for testing building facades and flat roofs. In Fig. 2 the thermogram of an industrial building flat roof is presented, taken from the inside during the heating period, /3/. Cooler lines can be seen, corresponding to metal beam corners (temperature 20–21°C, scale in Fig. 2), as well as extended cool zones corresponding to places with formed condensate. At these locations heat loss is more intense due to higher heat conduction coefficient of metal and water compared to the surrounding (dry) insulation.

Convection: Heat is transmitted by convection from liquid or gas to the solid, or vice-versa (Fig. 3). The particles are moving /2/. Inside the solid there is no convection. Convection can be considered as a negative factor, reducing surface temperature of tested sample (transfer of heat from surface to atmosphere), and is pronounced in conditions with strong winds. Then heat is intensely dissipated by convection from the surface, reducing the temperature difference between objects. Air molecules collide with wall molecules and exchange heat. Warmer wall molecules transfer heat to air molecules, cooling the wall. Intensified flow of air molecules (wind) increases the cooling of the wall.

Radiation: heat transfer by electromagnetic waves. Heat is transferred from one body to another without a supporting medium, /2/. The thermogram records only heat radiated from the object onto the camera lens. The amount of transferred heat energy E depends on the object temperature T and its surface emissivity. It is defined by Stefan-Boltzmann law

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

σ is Stefan-Boltzmann constant: $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, /2/; ε – emissivity coefficient: the capability of a body to radiate. It depends, among other, on material type and the state of surface (stains, rust).

This law defines energy radiated by the object which can be detected by camera. If this energy is recorded properly and an accurate value of ε is introduced, the camera calculates the temperature based on

$$T = \left(\frac{E}{\sigma \varepsilon} \right)^{1/4} \quad (2)$$

Figure 4 shows the state in a vessel, divided in two parts: a) fluid at the same temperature is contained in both parts, but the emissivity of the surface is different; b) emissivity of the surface is the same, but the fluids are at different temperatures.

In both cases the left (shaded) part is of higher radiation energy and is presented as lighter on the thermogram.

Exitant radiation: Radiation emitted from the surface of the object (Fig. 5). It consists of two components: emitted (originating from object heat, $\varepsilon E_\varepsilon$), and reflected radiation (originating from heat of surrounding objects, ρE_ρ)

$$E = \varepsilon E_\varepsilon + \rho E_r \tag{3}$$

gde je ρ koeficijent refleksivnosti, i

$$\varepsilon + \rho = 1 \tag{4}$$

Izlazno zračenje treba da se vidi na slici, dok je reflektovano zračenje nekorisno, jer potiče od okolnih objekata. Iz formule (4) se vidi da se sa smanjenjem ε povećava ρ , a time i udeo reflektovane energije u ukupnoj izlaznoj energiji zračenja, zbog čega su za termografiju nepovoljni objekti sa malim ε .

Istovremeno, određivanje tačne veličine ε je u praksi problematično, naročito za materijale manje emisivnosti (bakar, aluminijum, beli metali), pa se za njih ne preporučuje kvantitativno ispitivanje.

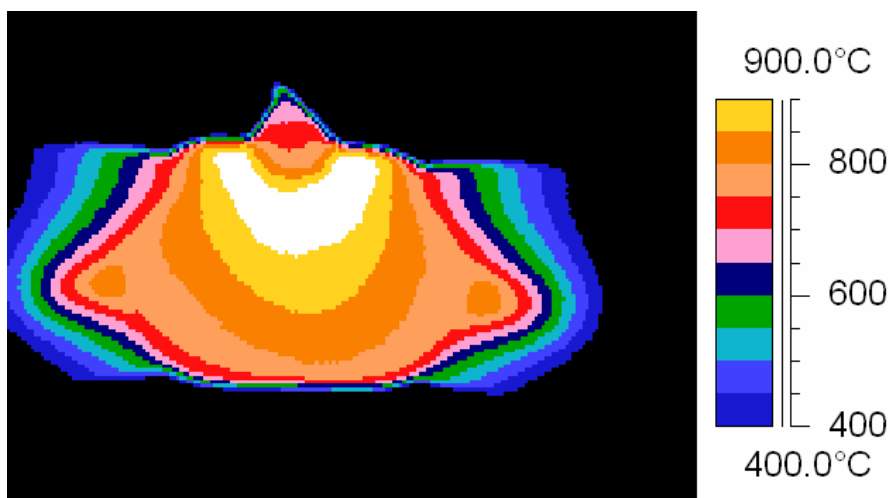
$$E = \varepsilon E_\varepsilon + \rho E_r \tag{3}$$

where ρ is reflexivity, and

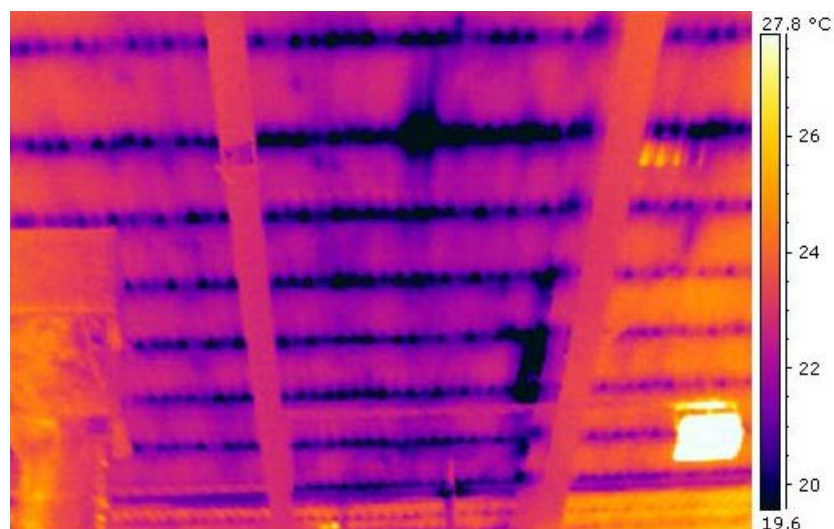
$$\varepsilon + \rho = 1 \tag{4}$$

Emitted radiation should be visible on the image, but the reflected radiation, originating from surrounding objects, is useless. From equation (4) a decrease in ε increases ρ , and thus the portion of the reflected energy in the total output radiant energy, so objects with low ε are not convenient for thermography.

At the same time, accurate determination of ε is questionable in practice, particularly for materials with lower emissivity (copper, aluminium, white metal), so quantitative examination is not recommended for them.



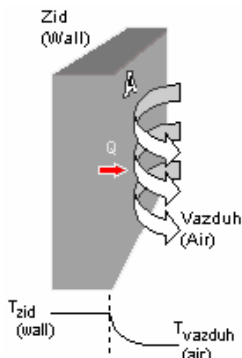
Slika 1. Karakterističan termogram, /5/
Figure 1. Typical thermogram, /5/.



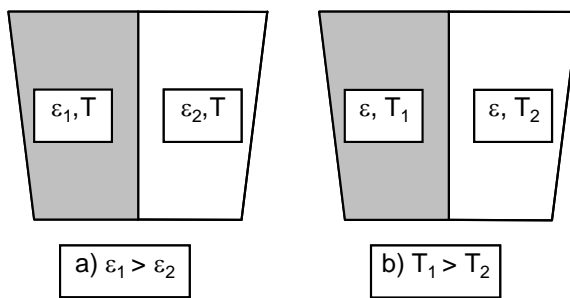
Slika 2. Termogram ravnog krova industrijske hale sa mestima kondenzacije, /3/
Figure 2. The thermogram of the industrial building roof at locations of condensation, /3/.

Infracrveno zračenje (IR): vid elektromagnetne emisije (deo elektromagnetnog spektra), čije su talasne dužine (λ) u opsegu 0,7–1000 μm (sl. 6), /1/. Predstavlja toplotno zračenje koje proizvode sva tela zagrejana iznad temperature apsolutne nule. Sa povećanjem temperature objekta raste i intenzitet emitovanog IR zračenja.

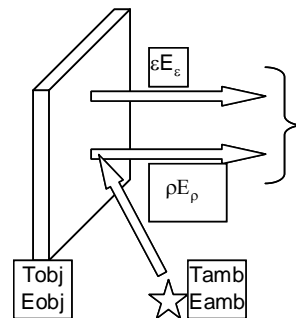
Infrared radiation (IR): A form of electromagnetic emission (part of the electromagnetic spectrum) of wave lengths (λ) in the range 0.7–1000 μm (Fig. 6), /1/. It is the thermal radiation that all bodies produce when heated above absolute zero. When a body temperature increases the intensity of emitted IR radiation also increases.



Slika 3. Prelaz toplote-konvekcija
Figure 3. Heat transfer by convection.



Slika 4. Uticaj koeficijenta emisivnosti ϵ i temperature T na izlaznu energiju zračenja
Figure 4. Effect of emissivity coefficient ϵ and temperature T on exitant radiance energy.



Slika 5. Izlazno zračenje
Figure 5. Exitant radiation.

Na donjoj skali sl. 6 vidi se da se u termografiji koriste dve vrste detektora:

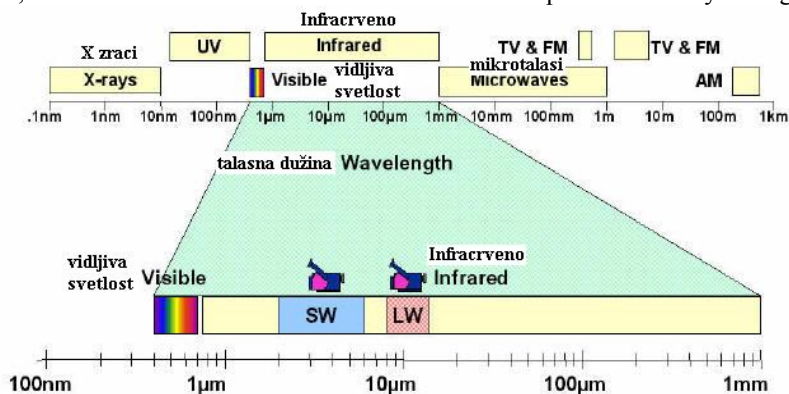
- kratkotalasni (SW), otkriva talasne dužine u opsegu 3–5 μm ;
- dugotalasni (LW), u opseg 8–14 μm .

Korišćenje ova dva opsega nije slučajno. Ovo su takozvani atmosferski prozori u kojima je veća propustljivost atmosfere za IR zrake, sl. 7, /1/.

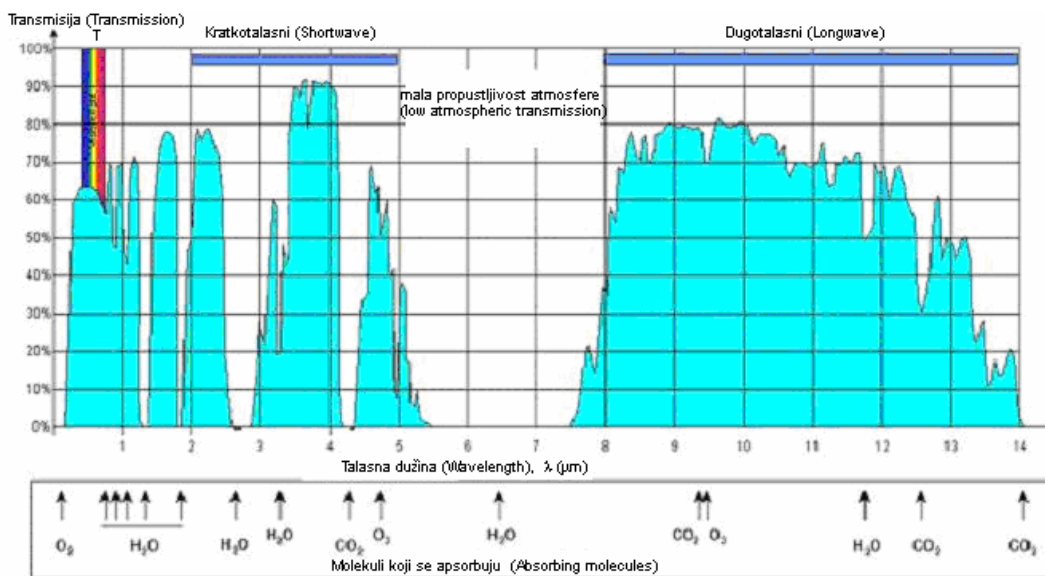
In the lower scale in Fig. 6 one can see that two detector types are used in thermography:

- short wave (SW) detects wave lengths in range 3–5 μm ;
- long wave (LW), in the range 8–12 μm .

The use of these two ranges is not accidental. They are so-called atmospheric windows in which the transmittivity of the atmosphere for IR rays is higher, Fig. 7, /1/.



Slika 6. Elektromagnetni spektar, /5/
Figure 6. The electromagnetic spectrum, /5/.



Slika 7. Propustljivost atmosfere u trakama različite talasne dužine, /1, 5/
Figure 7. Atmospheric transmissivity in different wavelength bands, /1, 5/.

STANDARDI ZA TERMOGRAFSKA ISPITIVANJA

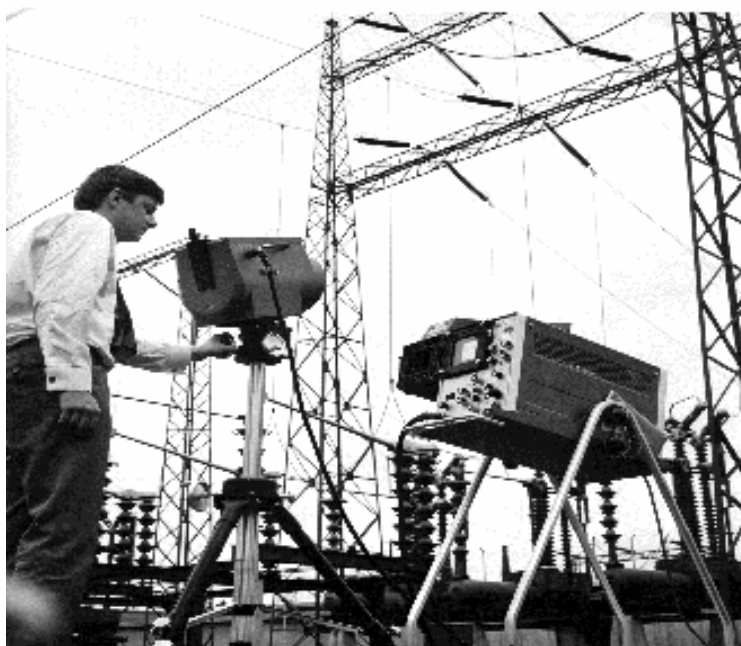
Sa sve većom primenom termografije raste i potreba da se uvedu standardne metode ispitivanja. U daljem tekstu dat je pregled objavljenih standarda primene, kao i smernica za sprovođenje infracrvenog ispitivanja /5/. Ovaj pregled ujedno ukazuje na oblasti u kojima je do sada termografija najzastupljenija.

U izdavanju ovih standarda je vrlo aktivno Američko društvo za ispitivanje i materijale (ASTM). Ovo su neki od njihovih standarda:

- **C 1060** Termografsko ispitivanje postavljene izolacije u obuhvaćenim šupljinama skeleta zgrade
 - **C 1153** Standardno ispitivanje položaja ovlažene izolacije u krovnim sistemima primenom infracrvene metrografije
 - **D 4788** Standardna metoda ispitivanja za otkrivanje raslajavanja mostnih puteva primenom infracrvene termografije
 - **E 1186** Standardno ispitivanje za otkrivanje mesta ispuštanja vazduha u prostorima zgrada i sistemima vazdušne izolacije
 - **E 1934** Standardno uputstvo za ispitivanje električne i mehaničke opreme infracrvenom termografijom
- Objavljen je i jedan standard Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO):
- **ISO-ANSI 6781:** Toplotna izolacija – Kvalitativno otkrivanje toplotnih nepravilnosti u prostorima zgrade

OPREMA ZA ISPITIVANJE

Industrijska primena infracrvene termografije je počela sredinom šesdesetih godina, kada je firma Aga (kasnije Agema, danas Flir) proizvela prvu opremu za tu namenu – Model Thermovision 651, prikazanu na sl. 8, /6/. Naziv ranijih modela „termovizija“ je ušao u svakodnevnu upotrebu i danas se koristi da označi termografsko ispitivanje.



Slika 8. Stari model kamere „Thermovision 651“ tokom ispitivanja
Figure 8. Old camera model “Thermovision 651” during testing.

STANDARDS FOR THERMOGRAPHIC INSPECTION

With increasing applications of thermography the need to introduce standard inspection methods increases. In the following text a list of published application standards is given and directives for conducting infrared tests, /5/. This list also indicates areas where thermography is most present.

In publishing these standards the American Society for Testing and Materials (ASTM) is very active. Some standards published by ASTM are:

- **C 1060** Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings
 - **C 1153** Standard Practice for the Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging
 - **D 4788** Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography
 - **E 1186** Standard Practice for Air Leakage Site Detection in Building Envelopes and Air Retarder Systems
 - **E 1934** Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography
- One standard of International Standardization Organization is also published:

- **ISO-ANSI 6781:** Thermal Insulation – Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes – Infrared Method

TESTING EQUIPMENT

Industrial application of thermography started in the mid sixties when the company Aga (later Agema, today Flir) produced the first equipment for this purpose – Model Thermovision 651, presented in Fig. 8, /6/. The name of early models “Thermovision” has entered every day use and today is accepted to indicate thermographic inspection.



Slika 9. Novi model kamere „ThermaCAM P60“
Figure 9. New camera model “ThermaCAM P60”.

Moderna oprema je u odnosu na prvobitne modele znatno unapređena. Hlađeni detektori su zamenjeni nehlađenim (mikrobolometarskim), /1/, što je opremu učinilo manjom i prikladnijom za rukovanje /5, 6/. Novi model kamere malih dimenzija prikazan je na sl. 9, /6/. Kvalitet dobijene slike (termograma) je takođe unapređen, što se može zaključiti poređenjem termograma dobijenih starom i novom opremom (sl. 10). Kompenzacije, koje su se u ranijim modelima unosile ručno, sada kamera izračunava automatski pomoću instaliranog softvera.

Osnovni deo opreme je infracrvena kamera koja se sastoji od sledećih elemenata (sl. 11):

- objektiv (1) sakuplja zračenje (analogno objektivu foto­grafskog aparata),
- filter (2) propušta zračenje određene talasne dužine,
- detektor (3) očitava zračenje i prevodi ga u elektronski oblik,
- monitor (4) elektronski oblik prikazuje kao sliku – termogram.

Objekt koji emituje detektovano zračenje je na sl. 11 obeležen sa O.

POSTUPAK ISPITIVANJA

Termografsko ispitivanje može biti:

- *kvalitativno*, kada se detektuju površine sa odstupanjem temperaturnog polja, i
- *kvantitativno*, kada se određuje vrednost temperature u odabranim tačkama.

Trenutno ne postoje evropske norme, kao ni domaći standardi u oblasti termografije, ali postoji predlog da se ova metoda uvrsti u standardne metode ispitivanja bez razaranja, /6/.

U načelu se izvodi kvalitativno ispitivanje kojim se otkrivaju zone sa odstupanjima toplotnog polja. Kada je to potrebno, prvenstveno radi procene stepena oštećenja i prioriteta, određuje se nivo temperature izabranih tačaka termograma. Za pouzdano merenje temperature potrebno je uneti tačnu vrednost za koeficijent emisivnosti.

Primer kvalitativnog ispitivanja je prikazan na sl. 2. Zone kondenzacije je bilo moguće otkriti na površinama sa odstupanjem temperaturnog polja.

Kvantitativnim merenjem temperatura, termogram na sl. 12, procenjen je stepen oštećenja kontakata na dve faze elektro instalacije /3/.

Postupak ispitivanja može se podeliti u dve faze: snimanje termograma i analiza termograma.

Snimanje termograma

Izostavljajući probleme koji se sreću, postupak snimanja se može opisati prema prikazu na sl. 13. Toplota, koju površina objekta zrači (sl. 8), prolazi kroz atmosferu (sl. 14), preko objektiva kamere stiže na detektor gde se prevodi u električni signal, koji se prikazuje na ekranu u boji. Snimak termičke slike je termogram.

Kamera snima izlazno zračenje sa površine objekta i zračenje atmosfere (sl. 14). Izlazno zračenje koje potiče od objekta umanjeno je zbog slabljenja pri prolasku kroz atmosferu (koeficijent transmisije – τ).

Kako je za ispitivanje bitna samo energija emitovana od objekta ($\varepsilon E_\varepsilon$, sl. 5) potrebna je kompenzacija.

Modern equipment has significantly improved compared to early models. Cooled detectors are replaced by non-cooled ones (microbolometrical), /1/, making equipment smaller and more convenient for handling, /5,6/. A new camera model of small dimensions is presented in Fig. 9, /6/. The quality of the obtained image (thermogram) is also improved, as concluded by comparing thermograms obtained by old and new equipment (Fig. 10). Manually introduced compensations in former models now are such that the camera automatically calculates through installed software.

Basic part of the equipment is the infrared camera, consisting of following elements (Fig. 11):

- lens (1) collects the emission (analog to photographic camera lens),
- filter (2) passes the emission of determined wave length,
- detector (3) reads emission and transfers it into electronic form,
- monitor (4) shows electronic form as image–thermogram.

The object emitting radiation to be detected is designated by O in Fig. 11.

TESTING PROCEDURE

Thermographic testing can be:

- *qualitative*, when detecting surfaces with a temperature field deviation, and
- *quantitative*, when temperature values at selected points are determined.

At this moment there are no European codes or domestic standards in the area of thermography, but an existing proposal to involve this method in standard non-destructive test methods, /6/.

Principally, qualitative testing is performed for detecting zones of temperature field deviations. When necessary and primarily for assessing the degree of damage and priority, temperature levels at selected points of the thermogram are determined. It is necessary to apply exact values of emissivity coefficients for reliable temperature measurements.

An example of qualitative testing is presented in Fig. 2. It was possible to detect zones of condensation on surfaces with temperature field deviations.

Damage degree on connections of two phases of electrical installation is assessed by quantitative temperature measurement, thermogram in Fig. 12, /3/.

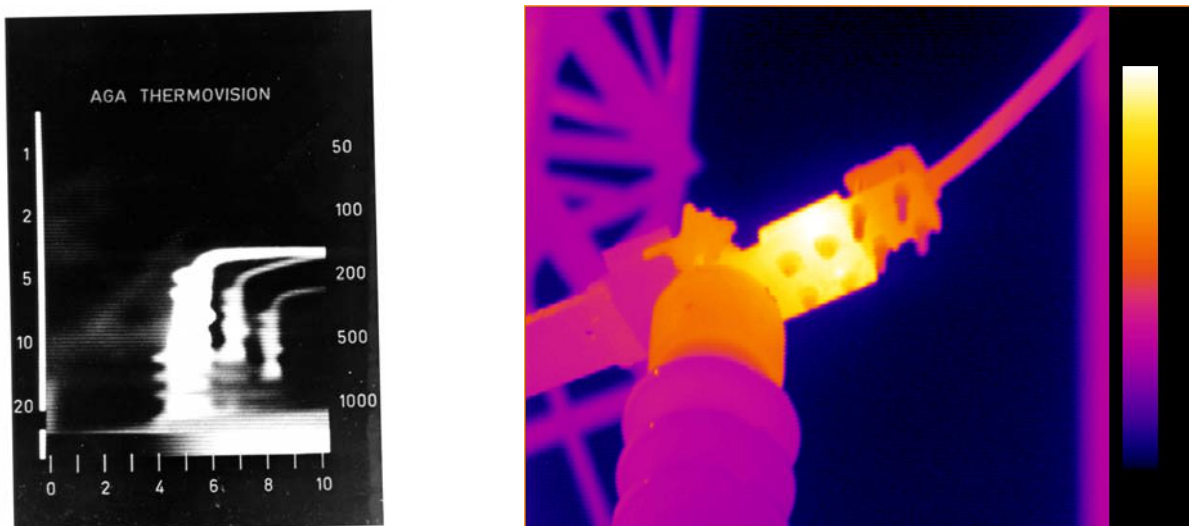
Testing procedure can be divided into two phases: recording of thermogram and thermogram analysis.

Recording the thermogram

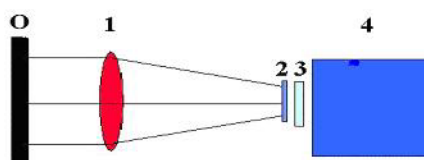
When omitting the encountered problems, the recording procedure can be briefly described according to Fig. 13. The heat radiated from object surface (Fig. 8), passes the atmosphere (Fig. 14), and reaches the detector through camera objective, and is transferred into electrical signal, shown in colour on the monitor. Thermal picture record is a thermogram.

Camera records exitant radiation from object surface and from the atmosphere (Fig. 14). Radiation from the object is reduced due to attenuation through the atmosphere (transmission coefficient – τ).

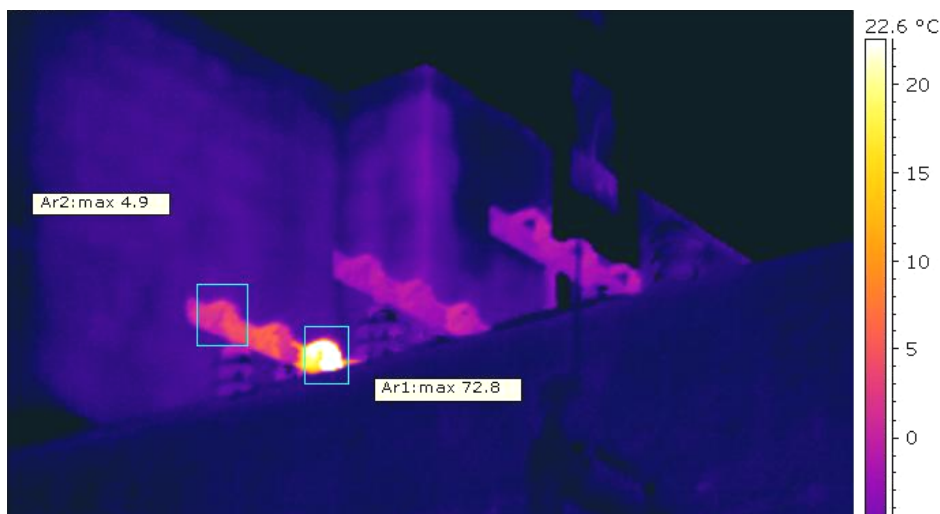
Compensations are necessary because only the energy emitted from the object ($\varepsilon E_\varepsilon$, Fig. 5) is interesting for tests.



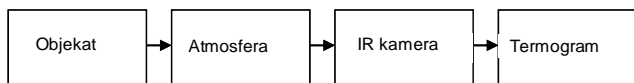
Slika 10. Poređenje termograma dobijenih starom (levo) i novom opremom (desno)
 Figure 10. Comparison of thermograms obtained by old (left) and modern equipment (right).



Slika 11. Sastavni delovi infracrvene kamere.
 Figure 11. Components of an infrared camera.



Slika 12. Termogram kontakata elektro instalacije sa uočenom toplom tačkom, čija je temperatura ukazala na oštećenje
 Figure 12. Thermogram of electrical installation connections with visible hot spot, temperature that indicated damage.



Slika 13. Blok shema procesa termografskog snimanja



Figure 13. Block scheme of thermographic recording process.

Kompensacija zbog uticaja atmosfere

Pri prolasku kroz atmosferu dolazi do slabljenja infracrvenog zračenja zbog apsorpcije od strane čestica iz vazduha, a i atmosfera emituje zračenje u objektiv kamere.

Uticaj atmosfere se kompenzuje unošenjem sledećih vrednosti u kameru:

- rastojanja objekta od kamere; sa većim rastojanjem veća je apsorpcija atmosfere, a smanjenje zračenje veće;

Compensation of atmospheric effect

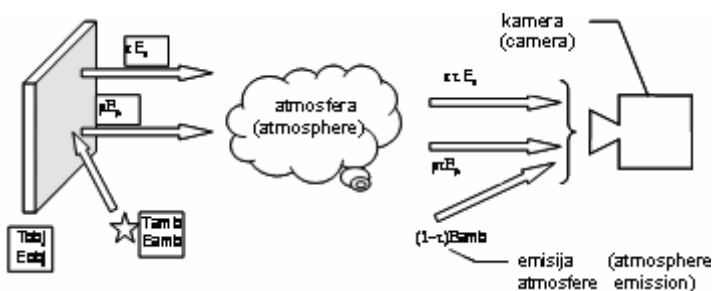
Through the atmosphere infrared radiation loses intensity due to absorption by air particles, and the atmosphere itself emits radiation into the camera objective.

The effect of atmosphere is compensated by inputting following values into the camera:

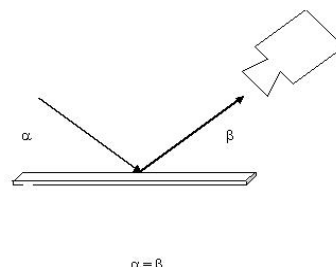
- distance from object to camera; larger the distance, higher is the absorption of atmosphere and attenuation of radiation;

- relativne vlažnosti okoline: povećanje vlažnosti dovodi do većeg slabljenja zračenja pri prolasku kroz atmosferu;
- temperature okoline: sa porastom temperature okoline povećava se atmosfersko zračenje.

- relative humidity of environment: humidity increase leads to higher attenuation of radiation through the atmosphere;
- higher temperature: with increase of environmental temperature the atmospheric radiation increases.



Slika 14. Prikaz energija zračenja koje može da registruje kamera
Figure 14. Presentation of radiation energies recordable by camera.



Slika 15. Položaj izvora reflektovanog zračenja
Figure 15. Position of the source of reflection.

Kompenzacija zbog odbijenog zračenja

Potrebno je, u prvom redu, proceniti odakle dolazi do odbijanja zračenja. Položaj izvora odbijanja određuje se na osnovu odnosa upadnog i izlaznog ugla (sl. 15). U kameru se unosi vrednost temperature izvora odbijanja, na osnovu koje se kompenzuje uticaj odbijenog zračenja tako što kamera sračunava vrednost odbijenog dela izlaznog zračenja i oduzima ga od ukupnog zračenja. Na taj način preostaje samo zračenje koje potiče od zagrejanog predmeta ispitivanja. Unošenjem koeficijenta emisivnosti (ϵ) u jed. (2), softverski se izračunava temperatura snimljene površine.

Kompenzation for reflected radiation

First of all, it is necessary to assess the origin of reflected radiation. The location of reflection source is determined based on the ratio of incident and reflection angle (Fig. 15). The temperature value of reflecting source is input into the camera for compensating reflected radiation effect so that the camera calculates the amount of reflected part of exitant radiation and deducts it from total radiation. In this way only the radiation from the heated test remains. The software calculates the temperature of recorded surface by introducing the emission coefficient (ϵ) into Eq. (2).



Slika 16. Termogram izolacije kotla sa uočljivom refleksijom (levo) i izgled konstrukcije (desno), /3/
Figure 16. Thermogram of boiler insulation with visible reflection (left) and view of structure (right), /3/.



Slika 17. Detekcija curenja ukopanog toplovoda, /3/
Figure 17. Leakage detection of underground pipeline, /3/.

Kompenzacija odbijenog zračenja je složena kod objekata niske emisivnosti, zbog većeg učešća odbijenog zračenja. U nekim slučajevima mogu se pojaviti lažne indikacije, odnosno tople tačke koje potiču od izvora odbijanja zračenja, a ne od predmeta ispitivanja (sl. 16). Promenom položaja snimanja otklanja se pojava ovakvih indikacija.

Analiza termograma

Dobijena slika (termogram) se analizira poređenjem sa referentnom tačkom, utvrđenom za analizirani objekt.

Uglavnom se kao referentna tačka uzima sličan ili identičan deo opreme koji kao takav treba da pokazuje slično toplotno polje.

Referentna i ispitivana komponenta treba da su izloženi istim radnim uslovima i uslovima okoline (npr. susedne faze na elektro instalaciji, sl. 12).

Karakterističan termogram i nađeno stanje su dati na sl. 17. Na termogramu ukopanog kanalnog toplovoda sa asfaltom kao pokrivnom površinom /3/ uočljiva je svetlija deonica (ispod strelice), koja potiče od curenja na toplovodnoj cevi i slivanja vode niz kanal. Desno je prikazan snimak curenja posle otkrivanja.

Referentna tačka može da bude i „početni–nulti“ termogram ispitivane opreme. To je termogram arhiviran u bazi podataka u trenutku kada je oprema radila ispravno, pod normalnim opterećenjem (po puštanju u rad, posle izvršenog remonta). Pri snimanju „početnog“ termograma zapisuju se i arhiviraju radni i ambijentalni uslovi u trenutku snimanja (opterećenje, temperatura okoline, vlažnost). Kasnija ispitivanja je poželjno izvoditi u sličnim uslovima.

ZAKLJUČAK

Prikazani princip infracrvene termografije i postupka za ispitivanje, uređaji koji se koriste i dobijeni rezultati, kao i iskustva iz ranije primene termografije /7/ pokazuju da je ova metoda indirektnog ispitivanja veoma korisna u oceni stanja opreme i otkrivanju oštećenja, sa mogućnošću praćenja razvoja oštećenja. Zbog opisanih prednosti, ispitivanje infracrvenom termografijom je prihvaćeno kao metoda za otkrivanje grešaka, ocenu integriteta i procenu podobnosti za upotrebu.

LITERATURA – REFERENCES

1. Thermography, Level I, Course Manual, Infrared Training Stockholm, Publ No 1 560 093 D
2. Recknagel, Sprenger, Schramek, Čeperković, Grejanje i klimatizacija, Interklima, Vrnjačka Banja, 2002.
3. Izveštaji o termografskom ispitivanju objekata, Centar za ispitivanje, kvalitet i ekologiju, Beogradske elektrane, Beograd, 2003–2005.
4. www.irinfo.org/standards_application_standards.html
5. www.itcnewsletter.com
6. ThermaCAM P60-Operator's manual
7. Kurai, J.,Aleksić, B., Termografija u kontroli opreme u eksploataciji (Thermography in service inspection of equipment), Integritet i vek konstrukcija, Vol 6, No.1-2/2006.

Reflected radiance compensation is complex for objects of low emissivity, due to the higher share of reflected radiation. In some cases false indications can occur, as hot spots caused by source of reflected radiation, and not from tested object (Fig. 16). Such an indication may be averted by changing the position of recording.

Analysis of the thermogram

The obtained image (thermogram) is analysed comparing to reference point, determined for analysed object.

Generally, the reference point is taken as similar or identical part of equipment that, being such, should present similar thermal field.

Reference and analysed components should be exposed to the same operating and environmental conditions (e.g. neiborough phases on electrical installation, Fig. 12).

Typical thermogram and state are given in Fig. 17. The thermogram of the underground placed and asphalt covered heating pipeline /3/ a lighter line segment is visible (bellow arrow), caused from pipeline leakage and water stream through channel. The uncovered stream is presented on the right hand side.

A reference point may also be the “initial–zero” thermogram of tested equipment. This thermogram is saved in the database at the instant of proper equipment operation, under normal load (after operation start, after performed reparations). The records of the “initial” thermogram include and archive operational and environmental conditions (load, environmental temperature, humidity). It is preferable to perform subsequent tests in similar conditions.

CONCLUSION

Presented principle of infrared thermography and testing method, the applied equipment and obtained results, as well as experience gathered in an early stage of its application /7/ has shown that this method of indirect testing is very useful for equipment state assessment and damage detection with the possibility to monitor defect development. Due to advantages described, infrared thermography testing is accepted as the method for defect detection, integrity and fitness for service assessment.