

# PREIZKUŠANJE NA VAKUUMSKO TESNOST – NEPORUŠITVENA TERMOVIZIJSKA METODA

Jože Gasperič<sup>1</sup>, Branislav Arsenijevič<sup>2</sup>

STROKOVNI ČLANEK

<sup>1</sup>Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Medivak, d. o. o., Šolska 21, 1230 Domžale

## POVZETEK

Članek obravnava iskanje netesnosti z neporušitveno termovizijsko metodo. Obstajajo tri vrste preizkušanja tesnosti z uporabo termovizije, ki temeljijo na: (1) IR-emisivnosti, (2) IR-apsorpciji in (3) IR-fotoakustiki. Metoda je uporabna predvsem za iskanje netesnosti zakopanih ali izoliranih vodov (za pline, vodo, nafto, kemikalije itd.). Opisane so tudi naprave za detekcijo.

**Ključne besede:** vakuumaska tesnost, termovizijska metoda, termovizijska kamera, IR-svetloba, IR-laser

## Leak testing – Non-destructive thermovision technique

### ABSTRACT

In this paper the nondestructive thermovision leak testing is described. Three methods of leak testing, based on the (1) IR-emissivity, (2) IR-absorption and (3) IR-photoacoustics are presented. Thermovision leak testing is used for buried and insulated lines. IR-sensors and detectors are also described.

**Keywords:** vacuum tightness, thermovision method, thermovision camera, IR-light, IR-laser

## 1 PRINCIPI TERMOVIZIJSKEGA PREIZKUŠANJA TESNOSTI

### 1.1 Uvod

Telesa sevajo toplotno energijo, vendar tega t. i. infrardečega sevanja človeško oko ne zazna. Termovizijske naprave, ki razširjajo vidno področje v infrardeči del svetlobnega spektra, imenujemo tudi infrardeče ali toplotne kamere, ki spreminjajo nevidni del spektra v vidnega.

Toplotna slika nekega predmeta je rezultat spreminjanja lastnega sevanja, ki je posledica temperaturnih razlik. Uporabnost termovizijskih naprav je omejena na območja, ki jih prepušča zračna atmosfera in jih zato imenujemo »atmosferska okna«. Za termovizijo sta pomembni dve okni, ki sta v valovnem območju med 3  $\mu\text{m}$  in 5  $\mu\text{m}$  ter med 8  $\mu\text{m}$  in 14  $\mu\text{m}$ . Predmeti pri temperaturi 300 K (27 °C) sevajo največ energije v valovnem območju med 8  $\mu\text{m}$  in 14  $\mu\text{m}$ . Največji del termičnega (IR) sevanja z valovno dolžino od 2  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$  absorbirajo vodna para, ogljikov dioksid in ozon, ki omejujejo prepustnost ozračja na prej omenjenih »atmosferskih oknih«. Poleg naštetih snovi močno slabijo toplotno sevanje tudi aerosoli, prah, dim, meglice, megla in oblaki. Slabjenje je tem manjše, čim manjši so delci in čim daljša je valovna dolžina sevanja. To pomeni, da je sla-

benje IR-sevanja z valovnimi dolžinami med 8  $\mu\text{m}$  in 14  $\mu\text{m}$  bistveno (2- do 3-krat) manjše kot vidne svetlobe v ozračju v enakih razmerah.

## 2 NAČINI PREIZKUŠANJA TESNOSTI Z UPORABO TERMOVIZIJE

Obstajajo tri vrste preizkušanja tesnosti z uporabo termovizije, ki temeljijo na:

- 1) IR-emisivnosti
- 2) IR-apsorpciji
- 3) IR-fotoakustiki

Pri prvi vrsti uporabljamo termovizijske kamere, ki zaznavajo toplotno (IR) sevanje, ki ga oddaja predmet oz. netesno mesto in vpliva na okolico. Pri drugi opazujemo absorpcijo energije, ki jo oddaja laser pri specifični valovni dolžini sevanja. Pri tretji vrsti preizkušanja tudi uporabljamo laser z določeno valovno dolžino svetlobe v IR-spektru, ki povzroči, da začne uhajajoči plin oddajati akustični signal. Oprema za to vrsto preizkušanja je zelo zahtevna.

Prva vrsta temelji na IR-emisivnosti predmetov, uporabljajoč termovizijo za gledanje velikih površin, ki omogočajo operaterju, da opazuje splošne termične anomalije, tj. toplejša in hladnejša mesta, kot je okolica, da bi ugotovil npr. podzemne ali podpovršinske netesnosti cevovodov. Za ta način se uporabljajo prenosne termovizijske kamere, ki se lahko montirajo tudi na tovornjake ali helikopterje. S takim načinom se da na dan pregledati več deset kilometrov podzemnih cevovodov.

Druga vrsta temelji na absorpciji določenih valovnih dolžin v IR-pasu frekvenc, ki jih oddaja IR-sevalo (laser). Termovizijske naprave, ki jih uporabljamo za gledanje majhnih in srednje velikih področij, omogočajo operaterjem opazovanje celotnega področja. Tam, kjer je slika nekega območja temna, je znak, da se je energija IR-sevala absorbirala. Termovizijska naprava je lahko prirodna ali pa montirana na tovornem vozilu. Ta tehnika se uporablja za ugotavljanje uhajajočih plinov iz kemijskih naprav ali majhnih netesnosti v proizvodnji in pri delovanju naprav oz. sestavnih delov.

Tretja vrsta pa temelji na svetlobnem vzbujanju slednega plina z lasersko IR-svetlobo, ki povzroči, da ta plin oddaja specifični akustični signal, ki ga zazna bližnji mikrofoni.

## 2.1 Preizkušanje tesnosti z metodo infrardeče emisivnosti

Termovizijske naprave merijo samo energijo, ki jo oddaja površina predmetov, toda temperatura, ki jo merimo na talnih površinah nad zasutimi (zakopanimi) cevovodi, je odvisna od podzemnih razmer. Toplotna energija se pretaka iz toplejših mest na hladnejša, ta pretok pa se da upočasniti samo s toplotnoizolacijskimi materiali. Poznamo tri načine pretoka toplotne energije: (1) prevajanje ali kondukcijo, (2) konvekcijo in (3) sevanje. Dobri, trdni zasipi naj bi imeli najmanj upornosti pri prevajanju energije, konvekcija (prenos toplote po zračnih molekulah) naj bi bila pri tem zanemarljiva. Tako kot sonce greje zemljo podnevi, ponoči pa zemlja oddaja toploto, je s podzemnimi cevovodi, po katerih se pretaka voda, druge tekočine ali plini. Cevovodi so torej lahko viri ali ponori energije, odvisno od okoliške temperature. V vsakem primeru pa mora teči energija skozi zemljo.

### 2.1.1 Vpliv talne površinske plasti na meritev temperature

Talna površinska plast je drugi pomembni dejavnik za spremembo temperature, ki je povezana z različno emisivnostjo tal. Zmožnost materiala, da seva energijo, se meri z njegovo emisivnostjo. Za izračun sevanja črnega telesa uporabljamo Planckovo enačbo. Sevanje realnega telesa ali površine pa je manjše za neki faktor  $\epsilon$ , čigar vrednost je 0 za belo telo in 1 za črno. Celotno sevano moč ( $W/m^2$ ) pa izračunamo po znanem Stefanovem zakonu, iz katerega izhaja, da je moč sevanja odvisna od četrte potence absolutne temperature. Pri izračunu sevanja realnih teles pa je treba izračunano moč po tem zakonu pomnožiti s faktorjem emisivnosti  $\epsilon$ . Ta faktor pa se glede na opazovano področje lahko močno spreminja, kar je osnova termovizije. Sprememba emisivnosti za 1 % pri temperaturi 300 K (27 °C) pomeni enako spremembo sevanje moči kot sprememba temperature za 0,76 K. Emisivnost je pri grobih površinah večja, pri gladkih manjša. Grobi beton ima lahko emisivnost npr. 0,95 (približuje se emisivnosti absolutnega črnega telesa), svetle površine tanke folije pa imajo  $\epsilon$  samo 0,05.

Ko opazujemo velike talne površine, predvsem pa, ko s termovizijskimi napravami iščemo npr. pod cesto zakopane cevovode, moramo biti pozorni na npr. asfaltno površino, na kateri so sledi pnevmatik, oljnih madežev in druge umazanije, ki imajo drugačno emisivnost  $\epsilon$ .

### 2.1.2 Vpliv okolice na meritev temperature

Pri meritvah temperature talnih površin pa ne smemo prezreti vpliva okolice. To so sončna svetloba, oblaki, okoliška temperatura zraka, veter, vlaga po tleh (rosa) ipd. Vedeti moramo tudi naslednje:

- Za sončno svetlobo je značilno, da hitro ogreje tla. Če je ni, se tla hitro ohladijo.
  - Oblaki reflektirajo IR-sevanje, kar upočasnjuje ohlajanje tal (zemlje). Pri preizkušanju (npr. pri iskanju cevovodov) želimo čim bolj učinkovit prenos toplote, zato preizkušamo ob jasnem vremenu.
  - Temperatura zraka v okolici naj bi imela le neznaten vpliv na natančnost preizkušanja, ker je pomembno le hitro ogretje oz. ohladitev talne površine. Okoliška temperatura vpliva na dolžino časa, med katerim se opravijo meritve skrajnih temperatur.
  - Veter hladi površino. Meritve je treba opravljati pri brezvetrju oz. pri hitrostih vetra največ 24 km/h.
  - Vlaga na tleh ima lastnost, da razprši površinsko toploto in pokrije (maskira) temperaturne razlike in s tem površinske anomalije. Preizkusov ne opravljamo, če so na tleh luže.
- Če torej »ujamemo« pravi čas za termovizijsko preizkušanje, lahko pregledamo velike površine.

### 2.1.3 Naprava za preizkušanje

Za preizkušanje talne površine na podpovršinske praznine, netesnosti zasutih cevovodov in drugih anomalij bi bil potreben zelo občutljiv kontaktni termometer. Vendar bi morali narediti na tisoče meritev, zato raje uporabimo termovizijo, ki daje sliko z različno intenziteto sivih tonov na črno-belem zaslonu ali različne barve na barvnem zaslonu. Kljub temu pa je potrebnih še veliko različnih pripomočkov in aparatov za pripravo snemanja, analizo slike in poročanje o ugotovitvah.

Termovizijsko napravo sestavljajo naslednji štirje podsestavci:

- optika
- skener z detektorjem
- elektronika
- prikazovalnik slike

### 2.1.4 Primeri uporabe termovizijskih naprav za iskanje netesnih mest

Uporabnost termovizijskih naprav, ki izkoriščajo učinek emisivnosti predmetov, je zelo velika.

V tem podpoglavju bomo našli nekaj značilnih primerov uporabe.

- 1) Iskanje netesnosti podzemnih cevovodov za vodo. Voda je v njih navadno pod tlakom nekaj barov in pri temperaturi okoli 10 °C. Že pri najmanjšem pritisku lahko voda, ki se izteka iz netesne (počene) cevi in se pod zemljo razliva po okolici, s seboj odnaša tudi zasipni material. Tako sčasoma nastane votlina, ki na površini tal povzroči udornino (npr. na cesti).
- 2) Iskanje netesnosti drenažnih cevi, ki lahko povzročijo enake težave, kot so navedene pred tem.

- 3) Netesnost pokritih (zasutih) plinovodov iščemo na podoben način, kajti uhajajoči plin iz netesnosti ohladi okolico zaradi znanega učinka (Venturijevo hlajenje), ki se pojavi pri ekspanziji plinov.
- 4) Cevovodi z vročo vodo, izolirani nadzemni ali podzemni, povzročijo v okolici toplejša mesta, ki jih zaznamo s termovizijskimi napravami, vendar je težko natančno ugotoviti mesto puščanja, ker se topla voda razliva ob cevi pod izolacijo in si nekje poišče izhod.
- 5) Netesnosti v izoliranih cevovodih za paro (parovodi) je lažje odkriti, ker s termovizijsko napravo hitro odkrijemo osrednje toplo mesto in postopno ohlajanje vzdolž parovoda.
- 6) Naftovodi. Opozorilo, da je nastala netesnost v naftovodu, je nenaden padec tlaka. Ker pa so navadno naftovodi napeljeni pod zemljo in so posamezni odseki dolgi do 10 km, je nemogoče iskati netesnosti brez uporabe helikopterja in snemati s termovizijsko kamero z višine 300 m. Slika tudi pokaže, koliko okoliške zemlje je onesnažena z nafto.

Na podoben način iščemo lahko tudi netesnosti zasutih rezervoarjev za tekoče gorivo, nadzemnih vodov za kemikalije itd.

## 2.2 Preizkušanje tesnosti z metodo IR-absorpcije

Ta metoda omogoča, da normalno nevidno uhajanje plina naredimo vidno na prikazalniku (na standardnem TV-zaslону). Na sliki, ki jo vidi operater na zaslonu, lahko hitro ugotovi mesto puščanja.

Princip delovanja termovizijske naprave temelji na absorpciji laserske svetlobe, ki jo sledni plin močno absorbira. Obstaja lista [1], kjer so navedene vrste (slednih) plinov, še varna količina za delo z njimi, najprimernejša valovna dolžina laserske svetlobe (ki je med 9  $\mu\text{m}$  in 11  $\mu\text{m}$ ) ter občutljivost detektorja za določen plin.

### 2.2.1 IR absorpcijska naprava za preizkušanje tesnosti

Ta naprava je sestavljena iz IR-laserja, ki je povezan s termovizijsko kamero. Optiki obeh sta tudi optično povezani, kar omogoča prenos IR-svetlobe laserja na opazovano področje in odboj le-te. Nastavljivi CO<sub>2</sub>-laser ima značilno moč 5 W. Detektorsko polje gledanja in laserski žarek sta sinhronizirana, zato lahko laser osvetljuje samo področje, ki ga vidi detektor. Laser skenira svojo IR-svetlobo po raziskovani površini.

Laserski žarek, ki smo ga tako usmerili v izhajajoči plin, se zaradi absorpcije v plinu ne vrača v termovizijsko kamero. Izhajajoči plin se kaže na zaslonu kot temna in kot pero oblikovana lisa, vse drugo je svetlo, ker se od tam laserski žarek odbija nazaj proti kameri.

## 2.3 Preizkušanje tesnosti z IR termoakustično metodo

Termoakustični efekt nastane, kadar koli plin absorbira sevanje. Energija sevanja, ki jo plin absorbira, povzroči lokalno povečanje temperature in tlaka, tj. motnjo, in če je ta dovolj velika, povzroči akustično valovanje. Velikost akustične emisije je odvisna od velikosti energije laserske svetlobe, ki jo absorbira uhajajoči plin. Množina absorbirane laserske energije je odvisna od koncentracije plina v tistem volumnu, ki ga je osvetlil laser. Če se laserski žarek odbije od površine predmeta, ki je v bližini netesnega mesta, lahko del odbitega žarka spet presvetli uhajajoči plin in tako poveča količino absorbirane energije.

### 2.3.1 IR termoakustična naprava za preizkušanje tesnosti

Naprava za IR termoakustično preizkušanje je sestavljena iz CO<sub>2</sub>-laserja, ki linearno skenira preizkušanca na tesnost tako, da je le-ta popolnoma osvetljen. Mikrofon je postavljen v bližini preizkušanca, ki je napolnjen s slednim plinom, ki močno absorbira IR-svetlobo, ki jo oddaja laser. Če ima preizkušane netesnost, nastane akustični signal, ko laserski žarek zadane curek uhajajočega slednega plina iz netesnega mesta. Frekvenca akustičnega signala je odvisna od frekvence laserskega skeniranja. Ta periodični akustični signal, ki ga detektira mikrofon, nadalje ojačujemo oz. procesiramo tako, da sproži alarm in napravo, ki izdelek (preizkušanca) izvrže s proizvodnega tekočega traku. S tako napravo in z navedenimi slednimi plini [1] lahko detektiramo netesnosti do 10<sup>-6</sup> mbar L/s, pri majhnih predmetih pa do 10<sup>-5</sup> mbar L/s v 0,2 sekunde. Naprava lahko deluje brez operaterja. Posebno primerna je za preizkušanje cevnih navitij hladilnikov in klimatizacijskih naprav.

## 3 LITERATURA

- [1] Nondestructive testing handbook, Vol. 1: Leak testing, Ed. Patric O. Moore, ASNT, III. izdaja, 1998