

PRIMJENA TERMOGRAFIJE U ANALIZI POGONSKOG OPTEREĆENJA KONSTRUKCIJA

Lovre **KRSTULOVIĆ-OPARA**, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, R. Boškovića 32, HR-21000 Split, www.fesb.hr/kk, lovre.krstulovic-opara@fesb.hr

SAŽETAK – Termografija, kao nerazorna metoda, ima sve veću primjenu u istraživanjima i industriji. U radu je prikazana primjena termografije u procjeni koncentracije naprezanja te zamora materijala i konstrukcija. Na primjerima uzoraka s koncentratorima naprezanja prikazana je primjena termografije u analizi metalnih materijala. U tu svrhu uspoređeni su rezultati klasičnih ispitivanja na umarlici s tri termografske metode: termoelastičnom analizom naprezanja, Risitanovom metodom te metodom praćenja širenja zone plastifikacije i loma. Termoelastičnom analizom naprezanja na ciklički opterećenim uzorcima dobiva se raspodjela naprezanja te koncentracije naprezanja na površini materijala. Risitanova metoda na temelju mjerenja porasta temperature ciklički opterećenog uzorka s porastom opterećenja predviđa dinamičku čvrstoću uzorka. Zbog velike disipacije topline u zoni plastifikacije i pukotine, brze srednjovalne kamere omogućuju praćenje tijeka plastifikacije i širenja pukotine. Opisane metode primjerene su za dinamička ispitivanja, nerazorne su i beskontaktno te ne utječu na rezultate ispitivanja.

Ključne riječi: termoelastična analiza naprezanja, Risitanova metoda, plastifikacija, propagacija pukotine, zamor, cikličko opterećenje

1. UVOD

Infracrvena termografija u širokoj je primjeni kao nerazorna metoda ispitivanja materijala, bilo kao pasivna bilo kao aktivna termografija, o čemu je pisano u nekim našim prethodnim radovima [1-3]. Aktivna termografija igra značajnu ulogu u nerazornom ispitivanju kompozita. Pasivna termografija ima značajnu ulogu u analizi materijala i konstrukcija, a jedno bitno područje primjene jest evaluacija pogonske čvrstoće konstrukcija, točnije određivanje dinamičke čvrstoće materijala, odnosno konstrukcija. Termografija je primjenjiva metoda u analizi loma, dok se u analizi zamora i procjeni dinamičke čvrstoće može smatrati nerazornom metodom s obzirom da je procjenu moguće provesti bez loma ispitivanog materijala, odnosno uzorka.

Analiza na zamor materijala i konstrukcija uglavnom podrazumijeva razarajuće ispitivanje uzoraka, odnosno čitavih segmenata konstrukcija s ciljem utvrđivanja životnog vijeka dinamički opterećenih konstrukcija. Otkrivanje i izbjegavanje koncentracija naprezanja, kao najčešćeg uzroka otkazivanju konstrukcija, uglavnom se ograničava na numeričko modeliranje i simuliranje opterećenja te mjerenje nekom od metoda eksperimentalne analize

naprezanja poput metode elektrootpornih mjernih traka (tenzometri), fotoelastičnosti i sl. Realni prikaz stanja raspodjele naprezanja, odnosno deformacija, na čitavoj površini ispitivanog objekta teško se dobije. Tenzometri daju pouzdane informacije i primjereni su dinamičkim ispitivanjima konstrukcija u eksploataciji, no manjkavost im je što očitavaju deformacije samo na mjestu lijepljena tenzometra. Infracrvena termografija relativno je novija metoda, razvoj koje je omogućio razvoj kvalitetnijih i cijenom pristupačnijih digitalnih detektora. Ako se razmatraju tipična ispitivanja u pogonskoj čvrstoći, termografija u okviru metode termoelastične analize naprezanja (*Thermoelastic Stress Analysis – TSA*) [3-12] omogućuje prikaz raspodjele sume glavnih naprezanja po čitavoj površini opterećenog tijela. Utvrđivanje dinamičke čvrstoće pojedinog materijala moguće je metodama poput Risitanove metode [13, 14] ili Meneghettijeve metode [15, 16], temeljene na disipaciji energije. Ovim metodama moguće je bitno smanjiti broj potrebnih uzoraka za ispitivanje, odnosno ispitivanje se može svesti samo na jedan uzorak, što nije slučaj kod klasičnog ispitivanja na zamor koje iziskuje cijeli niz ispitivanja i epruveta.

Još je lord Kelvin ustanovio da je karakteristika elastično deformiranih tijela da djelovanjem opterećenja dolazi do promjene temperature, pri čemu vlačno naprezanje izaziva lokalno pothlađivanje, a tlačno lokalno zagrijavanje tijela. Na mjestima gdje su naprezanja veća i ove su promjene veće. Promjene temperature za tipične konstrukcijske materijale poput čelika i aluminija iznose nekoliko desetinki stupnja Celzija ili Kelvina. Kod naprezanja i deformacija kod kojih dolazi do plastičnih deformacija i lomova materijala temperature su znatno više, nekoliko desetaka stupnjeva, pa termografija omogućuje praćenje načina plastifikacije i širenja pukotine sve do loma konstrukcije ili uzorka. Navedene metode primjenjive su na gotovo svim konstrukcijskim materijalima, a mogućnost primjene uglavnom ovisi o stupnju emisivnosti površine, što se lako rješava bojanjem bojama visokog stupnja emisivnosti (u radu je korištena boja Nextel Velvet-Coating 881-21 [17], koeficijenta emisivnosti 0,95, slika 1). U ovom članku bit će dan pregled tri metode kojima se omogućuje procjena raspodjele naprezanja, određivanje dinamičke čvrstoće te praćenje tijekom plastifikacije i širenja pukotine. Rezultati će se usporediti s klasičnim ispitivanjem na zamor u koju svrhu su aluminijske epruvete (legura Al2024) dimenzija poprečnog presjeka 20x4 mm opterećivane vlačno sinusoidno (frekvencija 20 Hz, $r=F_{min}/F_{max}=0$). Na epruvetama su izrezani koncentratori naprezanja u obliku rupe u sredini promjera 6 mm te u obliku polukružnog (radijus R3 mm) i V koncentrata (dubina utora 3mm). Na mjestu koncentrata površina poprečnog presjeka za sve je uzorke ista.

Slika 1. (vidi strana 4)

Iako su opisane metode u potpunosti primjenjive na polimerne kompozite, ovdje će se komentirati samo primjena na metalima. Polimerne kompozite karakterizira daleko veća toplinska tromost (manja toplinska difuzivnost) te je za njihovu evaluaciju u nekim metodama moguće koristiti i dugovalne mikrobolometarske kamere. Zbog svoje velike toplinske

vodljivosti i malog toplinskog kapaciteta (velika difuzivnost), metale karakteriziraju brze promjene temperature te su za njihovu evaluaciju nužne brze hladene srednjovalne kamere. Za razliku od mikrobolometarskih dugovalnih kamera, srednjovalne kamere omogućuju akvizicije od preko 700 Hz. Ovo omogućuju detektori koji se temelje na tehnologiji fotonskog izbijanja, gdje granicu u brzini akvizicije ne predstavlja sam detektor nego prebacivanje signala u računalo. Brzi detektori i pri ovim velikim frekvencijama opterećenja (20 Hz u korištenim primjerima) osiguravaju oštre snimke, što kod mikrobolometarskih kamera nije slučaj. Kamera korištena u ovdje prikazanim primjerima je srednjovalna hladena kamera Flir SC 5000, rezolucije 320x256 piksela i osjetljivosti 0,02K. Trenutačno su na tržištu i kamere dvostruke rezolucije, iste osjetljivosti, no brzina akvizicije u punoj je rezoluciji manja. Ograničavanjem kadra (polja aktivnih piksela kamere) povećava se brzina akvizicije do vrijednosti preko 700 Hz. U punoj rezoluciji (320x256 piksela) brzina je akvizicije oko 150 Hz.

1. EVALUACIJA NAPREZANJA METODOM TERMOELASTIČNOSTI

Još 1850. god. lord Kelvin opisuje termoelastični efekt, odnosno činjenicu da pod djelovanjem sila dolazi do promjene u temperaturi tijela. God. 1915. Compton i Webster provode prvi eksperimentalni dokaz, a 1967. Belgen vrši prva beskontaktna mjerenja [18]. Metoda dobiva na značaju kada se razvila tehnologija beskontaktnih mjerenja putem termokamera. Godine 1982. dobivaju se prvi snimci uređajem Ometron SPATE 8000, a za akviziciju naprezanja bilo je potrebno nekoliko sati s obzirom da se uređaj temeljio na samo jednom detektoru (diodi) i setu pomičnih zrcala koja su sinkroniziranim radom omogućivala prenošenje temperature s cijele površine uzorka. God. 1994. uređajem StressPhotonic, odnosno razvojem digitalnih detektora s nizom piksela, omogućena je akvizicija raspodjele naprezanja u nekoliko minuta.

Osnova je metode jednadžba termoelastičnosti:

$$\Delta T = \frac{-\alpha T}{\rho C_p} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

gdje je α koeficijent temperaturne ekspanzije, T sobna temperatura uzorka, ρ gustoća, C_p toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, a σ_1 i σ_2 glavna naprezanja. Uzme li se da su koeficijenti α , T , ρ i C_p za jedan promatrani uzorak konstantni, jednadžba (1) daje izravnu vezu između prirasta temperature i invarijante naprezanja (suma glavnih naprezanja, gdje je na površini tijela $\sigma_3=0$). Jednadžba (1) vrijedi samo za adiabatsko stanje (nema dovođenja ili odvođenja topline), što nije moguće postići, no ako su promjene naprezanja dovoljno brze (oko 10 Hz) zadovoljen je uvjet adiabatičnosti. Dakle, potrebna je brza hladena srednjovalna kamera, uzbuda od približno 10 Hz (iako su moguće i uzbude od 3 Hz), te dovoljni iznos energije (naprezanja) da bi detektor zabilježio učinak. Uzbuda može biti magnetno polje, ultrazvuk i dinamičko opterećenje što je ovdje slučaj. Promatra li se dinamički opterećeni uzorak (slika 1) pri frekvenciji uzbude od 20 Hz, vide se uzastopni toplinski bljeskovi (slika 2). Na mjestima gdje su naprezanja veća, veći su i toplinski bljeskovi. Slika 2 prikazuje snimak vlačno dinamički opterećenog uzorka, pri čemu hladnije zone predstavljaju mjesta s većim vlačnim naprezanjem. Kako je frekvencija kamere namještenja na 50 Hz (kamera omogućuje i veće frekvencije), niz slika upravo demonstrira problem da je teško kamerom zabilježiti trenutak maksimalnih naprezanja.

Slika 2. (vidi strana 5)

I kada bi se snimilo maksimalno naprezanje, korištenjem jednadžbe (1) dobila bi se prevelika odstupanja od realnih iznosa naprezanja. U cilju kvalitetnog računanja sume glavnih naprezanja potrebno je koristiti hardversku komponentu, tzv. *Lock-in*, kojom se vrši spajanje na signal uzbude (mjerna doza kidalice), te se uz softversku obradu cijelog niza snimaka vrši obrada, a korištenjem jednadžbe (1) dobiva

raspodjela naprezanja na površini tijela. Slika 3 prikazuje primjer ispitne epruvete kutnog zavora [19], gdje je na prvom termogramu neobrađeni snimak kamere, a drugi termogram predstavlja obradu uz pomoć *Lock-in* hardverske komponente.

Slika 3. (vidi strana 6)

Iako vrlo pouzdana metoda, TSA se relativno rijetko koristi te je vrlo malo objavljenih radova na primjerima primjene TSA. Razlog je tomu što je nužno ostvariti promjenjiva naprezanja, što ta naprezanja moraju biti dovoljnog iznosa da bi IC kamera zabilježila učinke i što je metoda ograničena na skupe srednjovalne hladene kamere. Primjeri primjene metode mogu se pronaći u referencama [6,20-23]. Metoda je nerazorna i predstavlja tzv. „*Full field method*“, metodu punog polja koja omogućuje vizualizaciju raspodjele naprezanja po površini. Slična je metodi fotoelasticimetrije, s razlikom da je rezultat suma glavnih naprezanja.

2. ODREĐIVANJE DINAMIČKE ČVRSTOĆE RISITANOVOM METODOM

Risitanova metoda [13, 14] temelji se na činjenici da prilikom započinjanja cikličkog opterećenja uzorka dolazi do blagog rasta temperature. Porast se nakon par ciklusa stabilizira te temperatura ostaje konstantna sve do loma, zanemari li se rast temperature cijelog mjernog sustava. Neposredno pred lom temperatura naglo raste. Slika 4 prikazuje, za slučaj trokutnog koncentrata, porast temperature na početku cikliranja te nagli skok temperature neposredno pred lom (slučaj opterećenja od 4 kN). Efekt je sličan efektu kad se ciklira uzorak u umaralici pri ispitivanju na zamor, gdje prvih par ciklusa u dijagramu sila-pomak (naprezanje-deformacija) postoji histereza koja nakon par ciklusa iščezava te se pojavljuje neposredno pred lom. Za razliku od klasičnog ispitivanja gdje je potrebno slomiti čitav niz epruveta, Risitanova metoda omogućuje ispitivanje na samo jednom uzorku, gdje se za zadane

priraste opterećenja IC kamerom bilježe prirasti u temperaturi uzorka. Pri tom do loma epruvete ne mora nužno doći. Iz trenda porasta i činjenice da se traži naprezanje pri kojem porasta nema, slijedi dinamička čvrstoća materijala odnosno ispitnog uzorka ili dijela konstrukcije. Metoda je jednostavna i primjenjiva na dugovalnim mikrobolometarskim kamerama. Kod primjene na preciznijim hlađenim srednjovalnim kamerama, zbog veće osjetljivosti, kamera bilježi sinusoidne skokove temperature te je potrebno zaglađivanje krivulje kako bi se lakše očitali podaci. Gornji dijagram na slici 5 prikazuje signal dobiven kao srednju vrijednost očitavanja u području koncentratora. Donji dijagram na slici 5 predstavlja obradu signala (filtriranje) s ciljem lakšeg očitavanja porasta temperature. Toplinski skokovi na gornjem dijagramu slike 5 toplinski su bljeskovi prikazani slikom 2. Potreba za ovakvom obradom podataka ne postoji kod dugovalnih kamera s obzirom da kamere ne uspijevaju zabilježiti kolebanje topline, kako radi osjetljivosti, tako radi frekvencije akvizicije i tehnologije detektora.

Slika 4. (vidi strana 7)

Slika 5. (vidi strana 7)

3. EVALUACIJA TIJEKA PLASTIFIKACIJE I ŠIRENJA PUKOTINE

Pri elastičnim deformacijama vlačna naprezanja izazivaju pad temperature, a tlačna rast temperature prema jednadžbi (1). U plastičnom području zbog tečenja materijala i znatnog oslobađanja toplinske energije (nekoliko desetaka stupnjeva), IC kamerom moguće je zabilježiti proces plastifikacije uzorka. Za materijale s velikim toplinskim kapacitetom i malom vodljivosti (niska difuzivnost) moguće je korištenje dugovalnih mikrobolometarskih kamera. Za metale nužne su brze hlađene srednjovalne kamere. Na slikama 6-8 niz termograma prikazuje zonu početka tečenja te širenje pukotine sve do loma epruvete. Razlika u

temperaturi između gornje i donje polovine epruvete uslijed je toplinskog toka između donje toplije čeljusti (spojena na hidraulički klip) i gornje hladnije čeljusti (spojena na mjernu dozu).

Slika 6. (vidi strana 7)

Slika 7. (vidi strana 7)

Slika 8. (vidi strana 7)

4. USPOREDBA METODA S KLASIČNIM PRISTUPOM ODREĐIVANJU DINAMIČKE ČVRSTOĆE

U cilju prikaza mogućnosti termografije u procjeni zamora provedeno je klasično ispitivanje na zamor epruveta sa slike 1. S-N dijagrami, odnosno iznosi sinusoidnog vlačnog naprezanja prema broju ciklusa do loma prikazani su u logaritamskom mjerilu slikama 9 - 11. Oznakama „x” u dijagramima označava se lom, a crvenim oznakama prikazane su usrednjene vrijednosti za slučaj kad je nekoliko epruveta ciklirano s istim iznosom opterećenja. Frekvencija cikliranja na servo-hidrauličkoj pet tonskoj dinamičkoj kidalici (umaralici) Instron 8800 50kN je iznosila 20Hz. Zbog dostupne količine uzoraka nisu za sve iznose opterećenja provedena uobičajena tri ispitivanja na lom, no dijagrami pokazuju trend i usporedivi su s kasnijim rezultatima opisanih IC metoda.

Slika 9. (vidi strana 8)

Slika 10. (vidi strana 8)

Slika 11. (vidi strana 8)

Termoelastičnom analizom naprezanja dobiva se raspodjela naprezanja na uzorcima s trokutnim, polukružnim i kružnim koncentratorima. Slika 12 prikazuje raspodjelu naprezanja za maksimalni iznos opterećenja od 8 kN (odgovara naprezanju 143 MPa). Skala naprezanja pokazuje da se maksimalna naprezanja javljaju za trokutni koncentrator (94,26 MPa), dok polukružni koncentratori imaju najmanju razinu

naprezanja, što je u skladu s rezultatima S-N dijagrama gdje se vidi da najnižu dinamičku čvrstoću ima trokutni kondenzator. Okrugli koncentrator (rupa u sredini) ima nešto nižu dinamičku čvrstoću od polukružnih koncentratora, što odgovara maksimalnim očitanim naprezanjima na slici 12, odnosno 48,87 MPa za rupu u sredini, prema 42,97 MPa za polukružne koncentratore.

Slika 12. (vidi strana 8)

Pri većem je opterećenju termoelastični učinak izraženiji, što ukazuje na činjenicu da nije samo dovoljno postići frekvenciju, već treba postići i određeni iznos naprezanja kako bi se termoelastični učinak uočio. Na slici 13 nije prikazan trokutni koncentrator jer je već pri iznosima opterećenja od 16 kN (286 MPa) došlo do loma epruvete s trokutnim koncentratorom.

Slika 13. (vidi strana 9)

Risitano metoda se sastoji u snimanju temperature uzorka koji se ciklira na umaralici (kidalici). Na slici 14 prikazan je dijagram srednje temperature ispitnog pravokutnog polja za 6000 ciklusa sinusoidnog opterećenja frekvencije 20 Hz. Frekvencija snimanja kamere iznosila je 50 Hz. Iako su moguće veće frekvencije snimanja, za ovu vrstu analize za to nema potrebe jer bi količina podataka bila prevelika. Period dužine snimanja se odabire na način da dođe do stabilizacije porasta temperature. Na dijagramima temperatura (slike: 4, 14-17), pred sam početak sinusoidnog cikliranja (slika 15) vidljiv je pad temperature. Do pada temperature nastaje prelaskom iz nultog opterećenja u vlačno opterećenje cikliranja, koje zbog prije opisanih razloga izaziva pad temperature.

Slika 14. (vidi strana 9)

Temperaturni dijagrami na slikama 15-17 prikazuju snimanje temperaturnog porasta za 6000 ciklusa opterećenja i razne stupnjeve sinusoidnog opterećenja frekvencije 20 Hz, pri čem je odnos ekstrema opterećenja $r = F_{min}/F_{max} = 0$.

Početna temperatura ispitivanja određena je lokalnim temperaturnim uvjetima u laboratoriju i nije bitna za metodu ispitivanja jer se prati samo porast temperature obzirom na porast opterećenja. Na svim dijagramima vidljivo je da je porast temperature veći za veće iznose opterećenja. Sam lom karakterizira nagli skok u temperaturi, nakon kojeg slijedi hlađenje slomljenog uzorka, što više nije predmet ispitivanja.

Slika 15. (vidi strana 9)

Slika 16. (vidi strana 9)

Slika 17. (vidi strana 9)

Dijagrami na slikama 18-20 predstavljaju temperaturne priraste očitane s dijagrama na slikama 15-17. Linearnom aproksimacijom definiran je pravac čije sjecište s nultim porastom temperature predstavlja dinamičku čvrstoću koja za trokutni koncentrator iznosi 44 MPa, za provrt u sredini 123 MPa, a za polukružni koncentrator 126 MPa. Ovo odgovara usporedbi iznosa maksimalnih naprezanja dobivenih TSA metodom za isti stupanj opterećenja (slika 12), gdje je maksimalno naprezanje za trokutni koncentrator 94 MPa, za rupu u sredini 49 MPa, a za polukružni koncentrator 43 MPa. Uvrste li se vrijednosti dinamičke čvrstoće dobivene Risitanovom metodom u S-N dijagrame (slike 9-11), iznosi dinamičkih čvrstoća odgovaraju očekivanim vrijednostima iz S-N dijagrama. U klasičnim ispitivanjima umaralicom broj ciklusa uglavnom nije nadilazio milijun ciklusa (10^6 ciklusa), no trend je vidljiv. Za preciznije određivanje dinamičke čvrstoće trebalo je provesti ispitivanja reda veličine 10^7 ciklusa.

Slika 18. (vidi strana 10)

Slika 19. (vidi strana 10)

Slika 20. (vidi strana 10)

Ono što je bitno jest da su se Risitanovom metodom polomile samo tri epruvete, što je daleko manje od priloženih S-N dijagramima gdje su polomljene 23 epruvete, s tim da

dinamička čvrstoća nije određena zbog nedovoljnog broja podataka i što se samo za polukružni koncentrator poštovalo pravilo od barem tri epruvete za jednu razinu opterećenja. Vrijeme ispitivanja za Risitanovu metodu iznosilo je par sati, dok je za klasično umaranje na umaralici potrošeno dva tjedna rada kidalice (kidalica nije bila stalno opsluživana).

5. ZAKLJUČAK

U prethodnim poglavljima dan je pregled primjene termografije kod procjene zamora i pogonskih opterećenja metalnih konstrukcija. Sve tri opisane metode; TSA, Risitanova metoda te praćenje propagacije plastifikacije i pukotine, u potpunosti su primjenjive kod kompozitnih materijala. Za slučaj metala, odnosno materijala velike difuzivnosti, dugovalne mikrobolometarske kamere jedino se mogu primijeniti u Risitanovoj metodi. Za TSA metodu potrebno je uz hladenu srednjovalnu kameru imati i hardverski *Lock-in* dodatak te pripadajući softver, što sve dodatno poskupljuje cijenu opreme. Prateći cijene na tržištu nema vidljivih pomaka u tehnologiji dostupnih srednjovalnih kamera, osim u dvostrukoj rezoluciji. Dvostruka rezolucija za opisane metode nije bitna s obzirom da se dvostrukom rezolucijom gubi brzina akvizicije (frekvencija kamere). Cijene opreme u posljednjih se desetak godina nisu promijenile, odnosno ostale su iste. Kupnjom tvrtki koje su razvijale ovu vrstu srednjovalnih kamera i pripadajućih softverskih aplikacija (Agema, Cedip) od strane multinacionalnih tvrtki orijentiranih ka tržištu dugovalnih mikrobolometarskih kamera došlo je do zastoja u razvoju softvera i metoda mjerenja. Osim usamljenih znanstvenih radova uglavnom nema većih pomaka u industrijskoj primjeni.

Ovo je područje vrlo široko i još dovoljno neistraženo te ima smisla i dalje istraživati mogućnosti razvoja opisane metode. Opadanjem istraživanja i primjene u industriji šire regije došlo je do usporavanja tempa razvoja opisanih metoda, što drži tržište srednjovalnih kamera ograničenim, a time cijene opreme ne padaju.

TSA metoda omogućuje prikaz raspodjele sume glavnih naprezanja po površini te time i procjenu koncentracije naprezanja. Usporedbom triju uzoraka zaključuje se da uzorak s polukružnim koncentratorom ima najmanje naprezanje, a samim time i najveću dinamičku čvrstoću, što potvrđuju i klasična ispitivanja na zamor. Isto vrijedi i za Risitanovu metodu kojom su se, uz znatnu uštedu vremena i broja uništenih uzoraka, dobila rješenja koja se također podudaraju s klasičnim ispitivanjima na zamor. Brze hladene srednjovalne kamere omogućuju i dobro praćenje širenja zona plastifikacije te nastanka pukotine i loma. Prikazom posljednjih kadrova neposredno pred lom može se odrediti gdje nastaje inicijalna pukotina te je usporediti s TSA. Ako se lokacije poklapaju, koncentracija naprezanja uzrok je loma, a ako se ne poklapaju, razlog lomu treba tražiti u greškama materijala i obradi uzoraka. TSA, Risitanova metoda i praćenje plastifikacije pouzdani su pristupi u procjeni zamora i koncentracije naprezanja konstrukcija. Metode su dinamičke, nerazorne (s iznimkom praćenja loma) i beskontaktna. Uz navedene metode, kao i ostale metode primjene termografije za nerazorna ispitivanja, termografija se dokazala kao pouzdana i primjenjiva metoda eksperimentalne analize naprezanja.