

ZERSTÖRUNGSFREIE MATERIALPRÜFUNG MITTELS AKTIVER THERMOGRAFIE

Eric Rahne, okl. villamosmérnök, igazságügyi szakértő (PIM Kft.)

ÖSSZEFOGLALÁS

A termográfia az egyik leguniverzálisabb, legelterjedtebb vizsgálati eljárás. Ezen belül növekvő gyakorisággal találkozunk az aktív termográfíával, mely pl. roncsolásmentes anyagvizsgálatot is lehetővé teszi. Az aktív termográfia esetében a mérési eredményének eléréséért célzottan közlünk energiát a tárgyal. Lehetőségei pedig a mérések matematikai értékelésében rejlenek a megnövelt termikus felbontás és az emisszió-tényezőtől való függetlenség révén.

INHALT

Die Thermografie ist eines der universellsten und verbreitetsten Prüfverfahren. Hierbei kann man zunehmend oft der aktiven Thermografie begegnen, welche auch zerstörungsfreie Materialprüfung ermöglicht. Bei der aktiven Thermografie wird dem Objekt gezielt Energie zugeführt, um das Messergebnis zu erhalten. Herausragend sind hierbei die mathematisch erzielbare hohe thermische Auflösung und die Emissionsgrad-Unabhängigkeit.

1. BEVEZETŐ

A termográfia mára az egyik legsokoldalúbb, legelterjedtebb vizsgálati eljárás - nemcsak az iparban, hanem a kutatás-fejlesztésben is. Az alkalmazások zöme a passzív termográfíához sorolható. Egyre növekvőbb gyakorisággal találkozunk aktív termográfíával is, ami roncsolásmentes anyagvizsgálatra is lehetőséget ad.

Azokat a termográfiai méréseket/eljárásokat soroljuk az aktív termográfíához, melyek esetén a mérési eredményének elérése érdekében célzottan közlünk energiát a mérendő tárggyal. E közben teljesen mintegy, hogy ezt milyen energiaátadás formájában, elektromágneses hullámokkal (fény illetve hősugárzással) vagy konvekció révén, esetleg mechanikus módon (például ultrahanggal) tesszük.

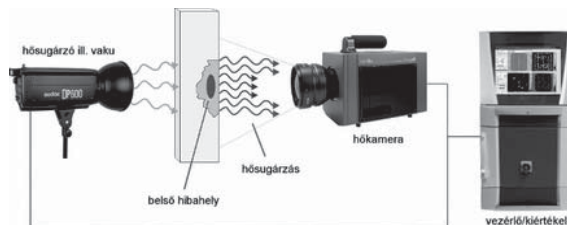
Az aktív termográfia lehetőségei pedig a mérési eredmények matematikai feldolgozásában rejlenek. A matematika alkalmazásával egyrészt akár egy nagyságrenddel kisebb hőmérsékletkülönbségek is kimutathatók, mint amire az alkalmazott hőkamera képessége (NETD értéke) lehetőséget adna.

Másrészt minden (az előadásban bemutatásra kerülő) matematikai kiértékelő eljárás eredménye független a tárgyfelület emissziós tényezőjétől. Ez főleg különböző emissziós tényezőjű tárgyfelületek egyidejű jelenléte esetében jelent felbecsülhetetlen előnyt.

2. AKTÍV TERMOGRÁFIA ELJÁRÁSOK

2.1. Átvilágítási módszer (transzmissziós hő)

Vékony, jó hővezető anyagok esetében jó eredményekre számíthatunk e módszer alkalmazásával. Mivel a tárgy hátoldaláról történik az energiabevitel, majd az elülső, a megfigyelési oldal felületén regisztráljuk az energiabevitel hatására bekövetkező hőmérsékleteket illetve hőmérséklet-változásokat, az anyagon belüli inhomogenitások okozta hővezetési képesség-eltérések a megfigyelési oldalon eltérő hőmérsékletekhez vezetnek. Nem csak a hőmérséklet csúcsértékekben várható különbség, hanem a hőmérsékletválasz megjelenésének időpontja szerint is.



1. ábra: az átvilágítási módszer elrendezése

2.2. Rávilágításos eljárás (hőelvezetés)

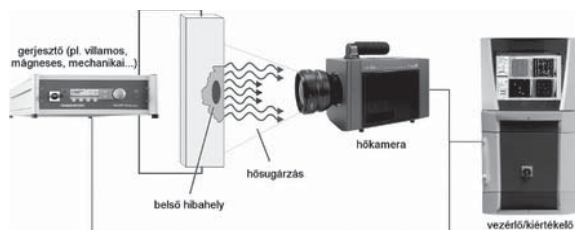
Ezeknél az eljárásoknál az energiabevitel a megfigyelési oldalról történik. Alkalmazása tehát akkor javasolt, ha felület-közelbeli hibákat akarunk felfedezni gyengén hővezető vagy éppen kifejezetten vastag anyagokban. Az eljárástól függően vagy az energiabevitel hatására bekövetkező felületi hőmérsékleteket illetve hőmérséklet-változásokat érzékeljük az emittált sugárzás alapján, vagy a felületen reflektált sugárzás érzékelésére fektetjük a hangsúlyt.



2. ábra: a rávilágításos eljárás elrendezése

2.3. „Belső gerjesztésű” hőhatás mérése

Mivel az energiát a tárgy belsejébe juttatjuk, a mérési elrendezés a szükséges hőhatást kiváltó energiaforrás kialakításától függően leginkább az átvilágításos eljárás mérési elrendezéséhez hasonlítható. A gerjesztés lehet bármilyen elektromos vagy mechanikai folyamat, mely a tárgy belsejében hőt képes gerjeszteni. A hibahely fizikai sajátosságától függően a hozzá közeli felületen mérhető hőmérséklet akár alacsonyabb, akár magasabb is lehet.



3. ábra: belső hőgerjesztésű eljárás elrendezése

3. ENERGIABEVITELI LEHETŐSÉGEK

Ahhoz, hogy az aktív termográfiahoz szükséges hőmérséklet-változásokat előidézzük, megfelelő időpontban kellő mértékű, de nem túl nagy energiát kell közölnünk a bevizsgálandó tárggyal. A mérendő tárgy tulajdonságaira és a szükséges energiamennyiségre való tekintettel ehhez különféle eszközöket szokás alkalmazni. Az energiaközlés külső vagy belső gerjesztést jelent. A külső gerjesztés besugárzás (hő ill. fény) vagy konvekció, a belső pedig közvetlen villamos, indukciós, vagy mechanikai lehet.

A leginkább megfelelő energiaforrás kiválasztásának elsődleges szempontja, hogy minél kisebb, de célzott energiabevittel lehessen elérni azt az energiaszintet, mely az aktív termográfiai megfigyeléshez szükséges hőmérséklet-változásokat idézi elő.

4. AZ AKTÍV TERMOGRÁFIA ELMÉLETE

Kezdjük azzal a kérdéssel, hogy mitől más az aktív termográfia, mint a passzív termográfia?

A passzív termográfia sok esetben állandósult, statikus vagy kvázi-állandósult termikus állapotokból indul ki, mint ahogy például az épületek hőszigetelésének felmérése esetében látjuk. A méréseknél kihasználjuk a tárgy saját hőmérsékletét, hőtermelését vagy hőkapacitását. A folyamatokat figyelése közben viszont könnyen észrevehetjük, hogy nagyon sok termikus folyamat inkább dinamikusnak mondható. Mechanikus vagy elektromos jelenségekhez képest legfeljebb nagyon hosszú az idő-állandója. Hogy milyen hosszú? Egy jó borospincének például olyan vastag a földrétege, hogy a nyári meleg éppen a hideg tél idején jut le a boltozatig.

Mivel a teljes elméleti háttér tárgyalása egy húszperces előadás során lehetetlen, csak a két leggyakoribb gerjesztési móddal és annak matematikai kiértékelésével foglalkozunk a következőkben.

4.1. Gerjesztés hőmérséklet-színusz hullámmal

A tárgyra ható szinuszos hőmérséklet-változásos gerjesztés esetében a hővezetési egyenlet egy extrém erősen csillapított - távolság mentén terjedő, időben változó - hőmérséklet-hullám választ ad.

A hőmérséklet-hullám terjedési egyenlete szinuszos gerjesztés esetében:

$$\vartheta(s, t) = \vartheta_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega \rho c}{2\lambda}} \cdot s} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega \rho c}{2\lambda}} \cdot s\right)$$

képlet (1)

Jelmagyarázat:

ϑ ... hőmérséklet (idő- és helyhez kötött) [°C]

c ... fajhő [J/kg · K]

ρ ... fajsúly [kg/m³]

λ ... hővezetési tényező [W/m · K]

s ... hőmérséklet-hullám mélysége [m]

ω ... az energiabevitel körfrekvenciája

A szinuszos gerjesztés feltételezése mellett a termikus behatolási mélység (μ) egyenlete pedig:

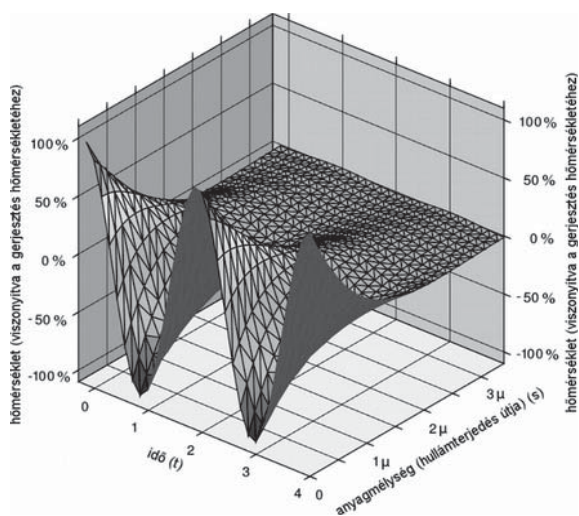
$$\mu = \sqrt{\frac{2\lambda}{\omega \cdot \rho \cdot c}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad \text{képlet (2)}$$

Mivel az (1)-es egyenletben szereplő csillapítás (második szorzó) messze nagyobb, mint maga a hullámformára utaló tényező, a hőmérséklet-hullám térben és időben elkenődik / eltűnik. Matematikai szakmai elnevezéssel élve: a jelenség aperiodikus.

Az előzőek alapján pedig értelmezhető a hőmérséklet-gerjesztés révén még számottevően befolyásolható maximális mélység. Egy egységnyi μ (behatolási mélység) értékű anyagmélységben (s) már csupán a gerjesztési hőmérséklet egyharmada (pontosan: 37%-a) keletkezik.

Ha a felületi hőmérséklet 10%-os értékét vesszük küszöbértéknek, akkor kapjuk az ehhez tartozó, termikus behatolási mélység gyakorlati „határértékét” ($\mu_{10\%}$):

$$\mu_{10\%} \approx 3 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\omega \cdot \rho \cdot c}} \quad \text{képlet (3)}$$



4. ábra: hőmérséklet hullám terjedése szinuszos gerjesztés esetében

4.2. Gerjesztés hőmérséklet-impulzussal

Ha a szinuszos hőmérséklet-ingadozás helyett egy hőmérséklet-impulzus jelformájú gerjesztést választunk, akkor a hőmérséklet-hullám szinusz-gerjesztésre kifejtett matematikai modellje a következőképpen módosul:

$$\vartheta(s, t) = \frac{\Theta}{\sqrt{\pi \cdot t \cdot b}} \cdot e^{-\frac{s^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}} \quad \text{képlet (4)}$$

Jelmagyarázat:

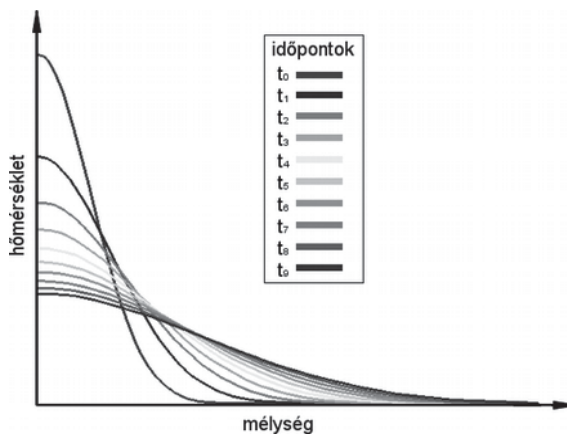
ϑ ... hőmérséklet (idő- és helyhez kötött) [°C]
 Θ ... bevitt energiamennyiség [J]
 b ... hőabszorpciós anyagjellemző [$\text{W}\sqrt{\text{s}}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
 α ... hőmérséklet-terjedési tényező [m^2/s]
 s ... hőmérséklet-hullám mélysége [m]
 t ... impulzus óta eltelt idő [s]

Mivel jelen esetben is a csillapítás messze túlhaladja a hőmérséklet-hullám értékét, a szinuszos gerjesztéshez hasonlóan most is becsülhető a maximális behatolási mélység.

A korábbi gerjesztéshez hasonlóan feltételezett 10%-os felületi hőmérséklet-küszöbvel kapjuk most a következő becslést:

$$\mu_{10\%} \approx \frac{s^2}{2 \cdot \alpha \cdot t} \quad \text{képlet (5)}$$

A következő ábra magyarázattal szolgál a behatolással kapcsolatosan.



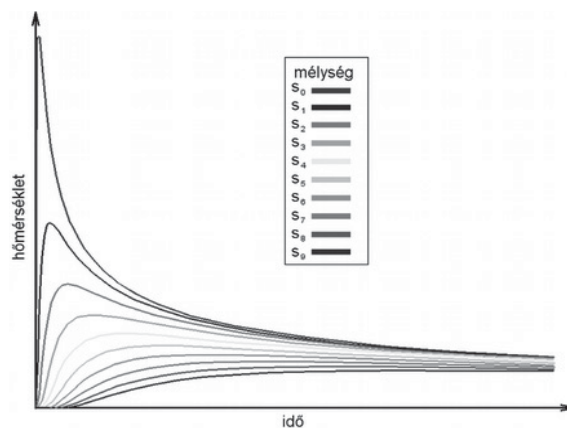
5. ábra: hőmérséklet mélység-függvénye impulzusos hőenergia-bevitel után (metszet egymást követő időpontokról)

Az előző ábrákból felismerhető, hogy a hőmérséklet-csúcsértéke egy-egy adott mélységben csak egy (anyagtulajdonságoktól függő) idő után keletkezik. Az időpont a következő egyenlettel számolható ki:

$$t_{\max} = \frac{s^2}{2 \cdot \alpha} \quad \text{képlet (6)}$$

Jelmagyarázat:

α ... hőmérséklet-terjedési tényező [m^2/s]
 s ... hőmérséklet-hullám mélysége [m]
 t ... impulzus óta eltelt idő [s]



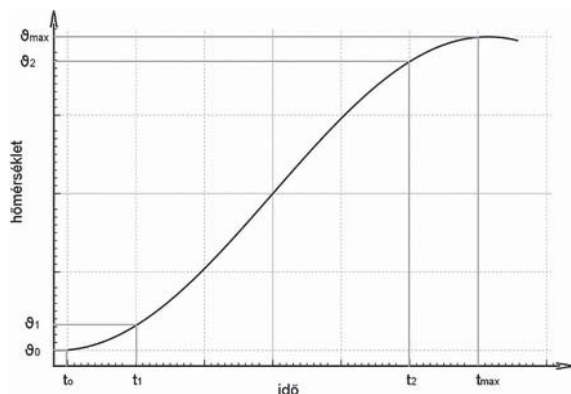
6. ábra: hőmérséklet időfüggvénye impulzusos hőenergia-bevitel után (különböző mélységi rétegekben)

5. MATEMATIKAI KIÉRTÉKELÉS

Az aktív termográfia mérési eredmények matematikai feldolgozása és értékelése többféleképpen történhet. A legegyszerűbb módszer az abszolút hőmérsékletértékek értékelése mindenféle matematikai elemzés nélkül. Ez azonban se nem hatékony, se nem használja ki az aktív termográfiában rejlő lehetőségeket. Helyette a következő három módszert szokás alkalmazni:

5.1. Hányadosképzés alapú eljárás

Ez a módszer a matematikailag legegyszerűbb. Csupán két hőképet kell rögzítenünk: egyet a melegítési folyamat elején, egyet pedig a végén. Annak érdekében, hogy a környezeti hőmérsékletek, valamint a kiinduló állapot egyenletlen hőmérséklet-eloszlása minél kevésbé befolyásolja a mérési eredményünket, a két értéket a folyamat teljes idejének első 1/10-e után, majd 9/10-e időpontjában célszerű rögzítenünk. A két adatot pedig csupán osztani kell egymással. Mivel mindkét adat esetében a tárgyfelület emissziós értéke azonos, emissziós-érték független eredményt kapunk!



7. ábra: hányadosképzés alapú kiértékelés mintavételezésének időzítése

A számítás módja pedig hihetetlen egyszerű:

$$\Theta = \frac{\vartheta_{t_2} - \vartheta_{t_0}}{\vartheta_{t_1} - \vartheta_{t_0}} \quad \text{képlet (7)}$$

5.2. Impulzusgerjesztéses termográfia

A tárgyunk egyetlen egy hőimpulzussal való gerjesztésre adott hőhatás-válaszát diszkrét Fourier-transzformációval vizsgálhatjuk meg a különböző frekvenciájú amplitúdókra és fázisokra. Ehhez N darab hőképet kell rögzítenünk, mely az n-edik (max. N/2 [Hz]) frekvenciára megvizsgálható a következő matematikai lépések szerint.

Diszkrét Fourier-transzformáció az n-edik frekvenciára (pixelenként!):

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-j2\pi k t / N} = \text{Re}_n + j\text{Im}_n \quad \text{képlet (8)}$$

Jelmagyarázat:

F_n ... n-edik frekvencia [Hz]
 N ... rögzített időjelminták száma
 Δt ... mintavételezési időköz
 T ... hőmérséklet
 Re_n ... valós számérték n-edik frekvencián
 Im_n ... képzetes számérték n-edik frekvencián

Az n-edik frekvenciájú amplitúdó-hőkép pixeljei:

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2} \quad \text{képlet (9)}$$

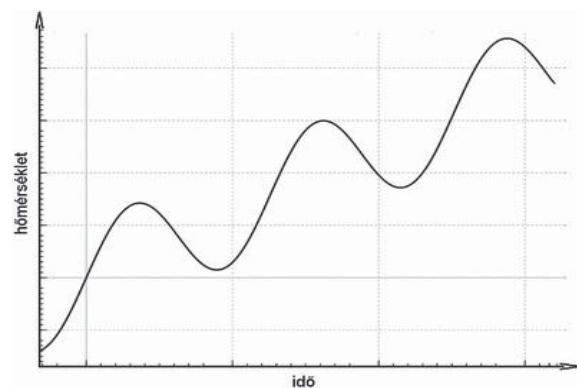
Az n-edik frekvenciájú fáziskép pixeljei:

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n} \right) \quad \text{képlet (10)}$$

Fentiek alapján kiszámolt pixelenkénti adatok ismételten ábrázolhatóak a termográfiában szokásos színskálákkal. Gyakran a fáziskép jobban jeleníti meg az anyagok inhomogenitásait.

5.3. Szinuszerjesztéses (Lock-In) termográfia

A szinuszos gerjesztés esetén kézenfekvő, hogy az erre a periodikus gerjesztésre adott hőmérsékletválaszt a Fourier-transzformációval az amplitúdó- és fázis komponenseire elemezzük.



8. ábra: szinuszos gerjesztés hőhatásának időfüggvénye

Amennyiben a referenciajel egy harmonikus jel (pl. szinusz), akkor kétcsatornás korrelációról beszélhetünk. Ilyenkor az amplitúdó és a fáziszög korrelációja is kiszámolható. Az egyenlet:

$$F(t) = \vartheta_{\text{mert}} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\text{ref}} \cdot t + \varphi) \quad \text{képlet (11)}$$

Jelmagyarázat:

ϑ_{mert} ... mért hőmérséklet amplitúdója [°C]
 f_{ref} ... gerjesztés frekvenciája [Hz]
 φ ... fáziszög

A hőkamerák diszkrét mintavételezésű adat-rögzítése miatt lép a fenti egyenlet helyébe a diszkrét Fourier-transzformáció, ami alapján kifejezhető a következő korreláció-összefüggés:

$$\vartheta_{korr} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \vartheta_{mert}(k) \cdot \vartheta_{ref}(k) \quad \text{képlet (12)}$$

Jelmagyarázat:

ϑ_{korr} ... keresztkorrelációs hőmérsékletérték [°C]
 $\vartheta_{mert}(k)$... k-adik mintájú mért hőmérséklet [°C]
 $\vartheta_{ref}(k)$... k-adik mintájú gerjesztés-hőmérséklet [°C]
 n ... rögzített minták száma

Ha $k \rightarrow \infty$ érvényesül, és a jelsorozat mintavételezése pont a referenciajel frekvenciájára és fázisszögére kerül szinkronizálásra, akkor megfelelő mintaszámmal nemcsak a gerjesztéssel való egyezőséget állapítható meg, hanem még egy igen zajos jelből is kiszűrhető a hasznos jel.

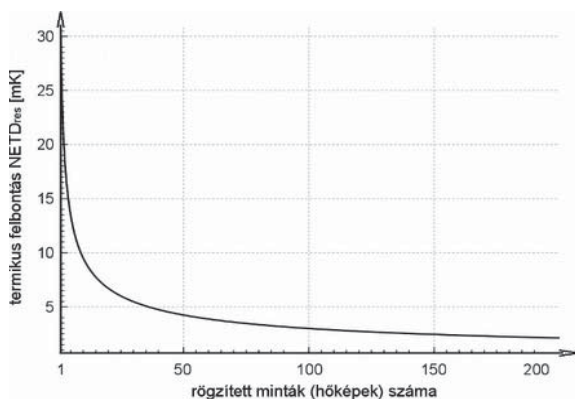
A zajsűrés egyenlete:

$$NETD_{res} = \frac{2}{\sqrt{n_p \cdot p}} \cdot NETD \quad \text{képlet (13)}$$

ahol: $n_p = \{1/a \text{ vagy } a, a = \text{pozitív egész szám}\}$
 $p = \text{pozitív egész szám}$

Jelmagyarázat:

n_p ... periódusonként rögzített minták száma
 p ... periódusok száma

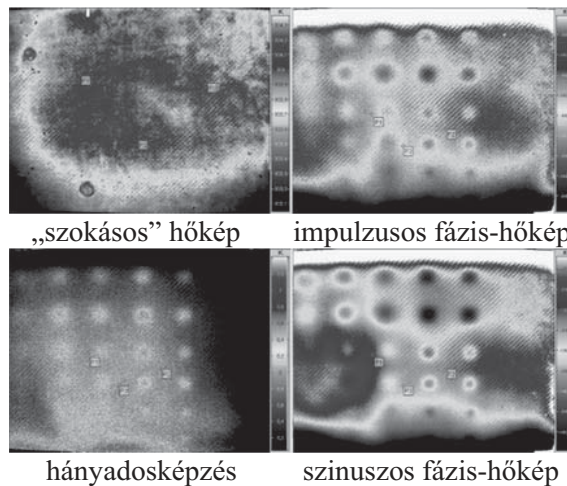


9. ábra: a mintaszám függvényében elérhető termikus felbontás (kiindulás: 30 mK)

6. ALKALMAZÁSI PÉLDÁK

6.1. Réteges szerkezetű műanyagok vizsgálata

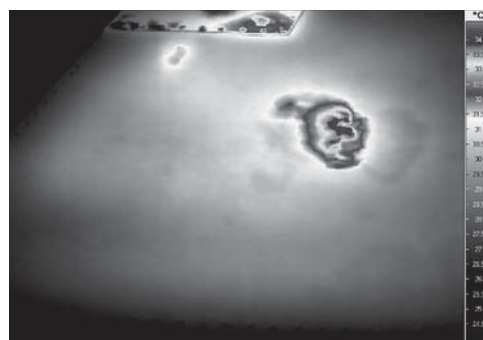
A réteges vagy szálerősítésű műanyagok minőségének, törésmentességének, homogenitásának roncsolásmentes ellenőrzése egyre fontosabb a repülő- és autóiparban. A hagyományos ultrahang-, vagy röntgenvizsgálatok nem mindenre tudnak kellőképpen pontos választ adni, illetve alkalmazhatóságuk korlátozott. Az aktív termográfia új lehetőségeket nyújt.



10. ábra: műanyagtábla bevizsgálása [1]

6.2. Repülőgép fékszárnyai bevizsgálása

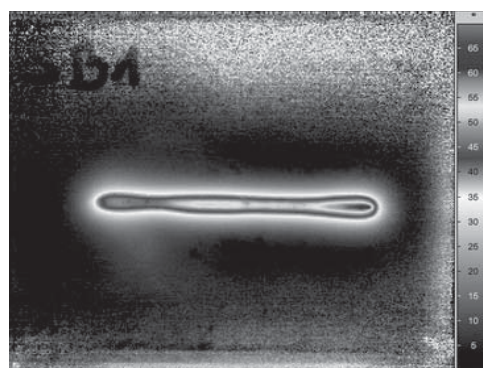
Az aktív termográfia egyik, mérőeszköz követelmény és matematikai kiértékelés szempontjából legegyszerűbb, alkalmazása a nagy utasszállító gépek fékszárnyainak ellenőrzése.



11. ábra: repülőgép-fékszárny hőképe

6.3. Hegesztések bevizsgálása, minősítése

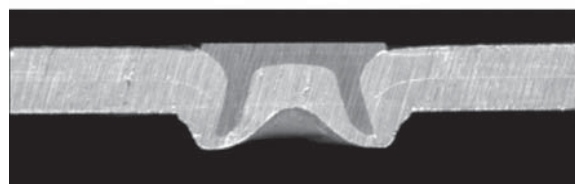
Akár hagyományos ponthegesztés vagy lézeres hegesztésről van szó, az ellenőrzés céljából a hegesztés helyére bejuttatott rövid energia-bevitel nyomán az ellenkező oldalon megjelenő növekvő hőmérséklet gyakorlatilag lerajzolja a hegesztés helyét és az összeolvasztott fémfelület alakját.



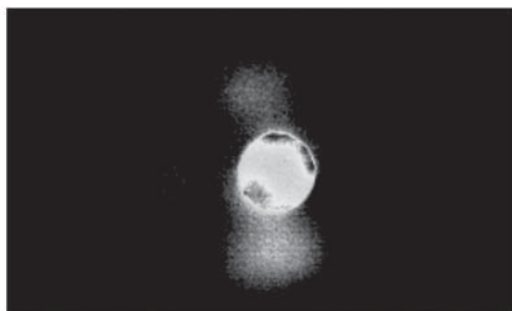
12. ábra: lézerhegesztés fázis-hőképe [2]

6.4. Szegecselések bevizsgálása, minősítése

A következő példa az ultrahang-gerjesztésű aktív termográfia egy repülőgép-karbantartási alkalmazását mutatja be.



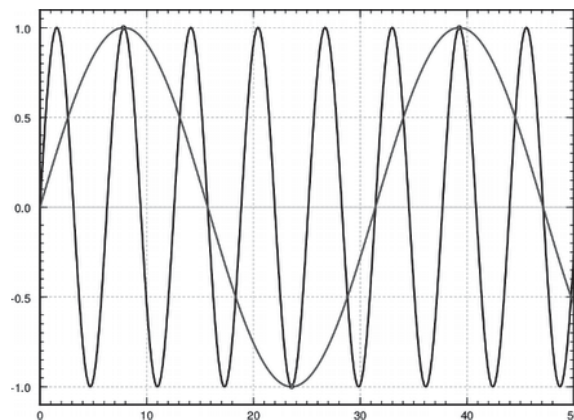
13. ábra: jó szegecs ultrahang-gerjesztés után [3]



14. ábra: rossz szegecs ultrahang-gerjesztés után [3]

6.5. Gyors periodikus folyamatok mérése

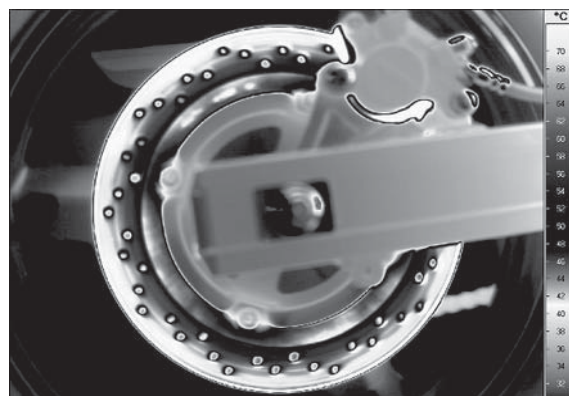
Amennyiben olyan termikus folyamatot kell rögzíteni, mely periodikus jellegű, viszont frekvenciája meghaladja a termográfiai rendszer képfrissítéséből adódó lehetőségeket, akkor is segítségre lehet az aktív termográfia. Ehhez csupán ki kell használni a Lock-In termográfia keresztkorrelációs értékeléséből adódó szűrőhatást! A módszer életképességének bizonyítékát a következő képek szolgálják.



15. ábra: keresztkorrelációs szinkronizálás



16. ábra: szinkronizálás nélküli hőkép



17. ábra: szinkronizált "Lock-In" hőkép

IRODALOM

- [1] Dr. Guido Mahler: Wärmefluss-Thermographie mit Strahlungsanregung im VIS/IR-Bereich, InfraTec GmbH, Dresden, 2010
- [2] Active Thermography - How to boost thermal accuracy... InfraTec GmbH, Dresden, 2014
- [3] G. Busse: Lock-in Thermografie: Prinzip und technische Anwendungen, Uni Stuttgart (IKT-ZfP), VDI Expertenforum, 2010.04.13.
- [4] Rahne Eric: Termográfia - elmélet és gyakorlati mérés technika, Invest-Marketing Bt., Budapest, 2018, ISBN 978-963-87401-6-8