

Módszer a fémek emisszivitásának becslésére

Method for Emissivity Estimation of Metals

Filep Emőd,¹ Kutasi Dénes Nimród,² Kenéz Lajos³

Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Marosvásárhely, Románia

¹ *efilep@ms.sapientia.ro*

² *kutasi@ms.sapientia.ro*

³ *l_kenez@yahoo.com*

Összefoglalás

A fémek emisszivitásának ismerete egyre fontosabb anyagtudományi és folyamatmodellezési szempontból. Az eddigi vizsgálatok megmutatták, hogy a legtöbb anyag emisszivitása hőmérsékletfüggő, és a legérdekesebb a 300-1000 K hőmérséklettartomány, ahol a változás a legintenzívebb és a folyamatszabályozás szempontjából a leglényegesebb [1]. Hőmérsékletfüggő emisszivitást észleltünk az alacsonyán ötvözött acélok plazmanitridálása során [2], és egy most futó téma kapcsán az alacsonyán ötvözött alumínium (AlMg1, AlMg3) emisszivitását kell vizsgálnunk. A dolgozatban bemutatjuk az általunk kifejlesztett módszert, részletesen tárgyaljuk az alumíniumötvözetre kapott mérési és számítási eredményeket, és összehasonlítjuk a szakirodalomban található eredményekkel.

Kulcsszavak: *fémek emisszivitása, alumínium, acél, folyamatirányítás, plazmanitridálás.*

Abstract

Knowledge of the surface emissivity of metals is becoming more and more important both from the material science, process modelling and control point of view. Previous research results have shown that the emissivity of most metals depends on the temperature of the surface. It has also been reported that the most important temperature region is between 300 – 1000 K degrees, where the change of the emissivity is the most intense, which is also the most significant from a process control point of view [1]. We also report temperature dependent emissivity observed during plasma nitriding of low alloy steels [2]. Related to one of our present research topics the study of low alloy Aluminum (AlMg1, AlMg3) emissivity has proven relevant. In this article the developed emissivity estimation model is presented. In the first part a literature overview and the theoretical approach of the new method is discussed, followed by the experimental results for low alloy Aluminum emissivity determination and a comparison with the results available in the literature.

Keywords: *emissivity of metals, aluminum, steel, process control, plasma nitriding.*

1. Emisszivitásmérési módszerek

Az emisszivitás mérésének egyik módja a radiometrikus módszer, amely jól felszerelt laboratóriumot igényel [3]. Az ismeretlen emisszivitású anyagot és egy laboratóriumi fekete testet egymás mellé helyezve azonos stacionárius hőmérsékletre hevítik és egy össz sugázmérővel felváltva figyelik. Az emisszivitás a mért értékek átlagának aránya.

A VTT (Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus) [1] által előnyösebbnek, könnyebben megvalósíthatónak tekintett módszer szerint a jól meghatározott méretű, téglalap alakú mintát egy 1000 K-re melegített kemencébe helyezik, regisztrálva a hőmérséklet növekedését az egyensúly beálltáig. Matematikailag modellezve a radiatív, konduktív és konvektív hőátadást, a radiatív részt elkülönböztetik és meghatározzák az emisszivitást. Az

eredmények szórása 20% nagyságrendű, ezt elfogadhatónak tekintik. Ötvözetlen acél esetében hőmérsékletfüggő, rozsdamentes acél esetében nagyjából állandó emisszivitást észleltek. A különböző alumíniumötvözetek emisszivitásának a részletes vizsgálatát végezték a [4]-ben. Radiometrikus módszert kombináltak hőelemes méréssel, vizsgálták az emisszivitást különböző hullámhosszokon, széles hőmérséklet-tartományon és változó felületi tulajdonságokra. A dolgozat rámutat arra, hogy az emisszivitás mennyire függ a fent említett tényezőktől, ezáltal a pirométeres hőmérsékletmérés nehézségeire is, ahol általában csak egy hullámhosszon mérik a hőszugárzást és nem veszik figyelembe a többi tényezőt.

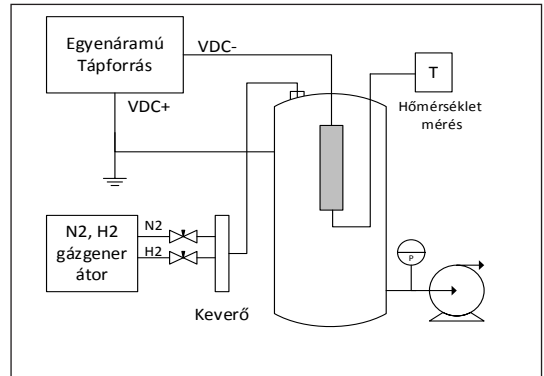
A következőkben bemutatunk egy módszert, amellyel egyszerűen mérhető a különböző fémek emisszivitása, a hőmérséklet-függőséget polinomiális közelítéssel jól modellezhetjük, tehát a kapott függvényt alkalmazható a vizsgált darabok hőmérséklet-változásának matematikai modellezésére. A módszert egy alumínium hengerrúd emisszivitásának a mérésén keresztül szemléltetjük.

2. A módszer

Az általunk javasolt módszer a plazmareaktor működési tulajdonságain alapszik. A hosszú, henger alakú mintát koncentrikusan helyezük a plazmareaktorba, a henger alján a tengely mentén mérjük a hőmérsékletet. Előkészítés után, 300 Pa nyomáson a hengert 900 K körüli hőmérsékletre melegítjük abnormális gázkiszűléssel tiszta nitrogénben, majd a beömlő gáz szelepet lezárjuk. Az állandóan működő szivattyú a nyomást gyorsan csökkenti, a sötét katódter megdő, eléri az anódot, ami a reaktor fala, és emiatt a kialsulás kiárad. Ettől kezdve a minta 1 Pa-nál kisebb nyomáson hűl, a hőmérsékletet a folyamatvezérlő számítógép rögzíti. Az alacsony nyomás és a nitrogén alacsony hővezető képessége miatt a konvektív hőátadás teljesen kizárt, a konduktív hőátadás erősen lecsökken, a minta sugárzásos hőleadással hűl. A matematikai modellt tovább egyszerűsíti az a tény, hogy a minta felülete nagyságrenddel kisebb, mint a reaktor belső felülete. A kísérleti berendezés elvi rajza az 1. ábrán látható, részletes leírása a [5]-ben.

2.1. A módszer elméleti alapozása

A fenti feltételeket figyelembe véve, a minta által leadott sugárzott hőteljesítmény [6]:



1. ábra. A plazmareaktor elvi rajza

$$P = \sigma \cdot S \cdot (e_1 \cdot T^4 - e_2 \cdot T_2^4) \quad (1)$$

ahol:

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$ a Stefan–Boltzmann-állandó;

S : a minta felülete, $d=0,06 \text{ m}$; $h=0,24 \text{ m}$; $S=0,05 \text{ m}^2$;

T : a minta hőmérséklete;

e_1 : a minta általában hőmérsékletfüggő emisszivitása;

$T_2 = 300 \text{ K}$ a reaktor vízhűtött falának hőmérséklete;

$e_2 = 0,3$ a reaktor belső falának (anód) emisszivitása.

A reaktor belső fala is alumíniumból készült, de figyelembe vettük, hogy a több száz órás nitridálási kísérletek során a felületet porlasztott vasatomok és vasnitridekből alkotott réteg borította. Így a fal emisszivitására adott érték előző vizsgálataink alapján [4] indokolt.

A gázkiszűlés kialakása után a mintából kiáramló hőteljesítményt a minta belső energiájának csökkenése fedezi, ez

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= m \cdot c_{Al}(T) \cdot \frac{dT}{dt} = \\ &= \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \cdot c_{Al}(T) \cdot \frac{dT}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

ahol:

$$m = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h = 1,832 \text{ kg}, \text{ a minta tömege;}$$

$$\rho = 2700 \text{ kg / m}^3 \text{ az alumínium sűrűsége;}$$

$c_{Al}(T_0) = 910 \text{ J / kgK}$ az alumínium fajhője normál hőmérsékleten, a fajhő változását a hőmérséklet függvényében a 6. ábra mutatja.

$$\frac{dT}{dt} \text{ a hűlési sebesség.}$$

A modell tovább finomítható, ha figyelembe vesszük a katódáram átvezetésén fellépő hőteljesítményt. Az áramátvezető egy 12 mm átmérőjű,

120 mm hosszú, kerámia szigetelésű refraktár acélrúd, amely a vízűtött reaktorfedélnek adja át a vezetett hőt. Ez a P_{cd} konduktív hőteljesítmény a katód szárán keresztül:

$$P_{cd} = \lambda_{rf} \cdot \pi \cdot R_{rf}^2 \cdot (T - T_2) / l_{rf} \quad (3)$$

ahol:

$\lambda_{rf} = 16$ W/mK a refraktár acél katódszár hővezető képessége;

$R_{rf} = 6 \cdot 10^{-3}$ m a refraktár acél katódszár sugara;

$l_{rf} = 0,12$ m a refraktár acél katódszár hossza.

P_{cd} konduktív hőteljesítmény maximális értéke az egyensúlyi állapot és a kisülés kialakulásának pillanatában a (900 K-300 K) hőmérséklet különbségnek felel meg, a számítások szerint:

$$P_{cd}(max) = 9,06 W \quad (4)$$

ami kevesebb, mint a mért összteljesítmény 2%-a. Az (1), (2) és (3) alapján számolt hőegyensúly a minta hűlése során:

$$\frac{dQ}{dt} = P_{rad} + P_{cd} \quad (5)$$

ahonnan behelyettesítés, rendezés és kifejtés után:

$$e_1 = \frac{m \cdot c_{Al}(T) \cdot \frac{dT}{dt} + e_2 \cdot \sigma \cdot S \cdot T_2^4}{\sigma \cdot S \cdot T^4} - \frac{\lambda_{rf} \cdot \pi \cdot R_{rf}^2 \cdot (T - T_2)}{l_{rf} \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4} \quad (6)$$

A (6) kifejezésbe a hűlésgörbéből meghatározott T hőmérsékletet és a hozzá tartozó dT/dt hűlési sebességet kell behelyettesíteni. Így megkapjuk az $e_1(T)$ függvényt az egész vizsgált hőmérséklet-tartományra.

2.2. Mérések, eredmények

Az extrudált alumínium rúdból készült mintát forró vízzel, detergenssel, desztillált vízzel és abszolút alkohollal mostuk, majd koaxiálisan felfogtuk a katódra M12-es menettel. A hőmérséklet mérésére a minta aljába fűrtünk egy 4 mm átmérőjű koaxiális lyukat. A hőmérsékletet 2 mm átmérőjű, köszörlött alumínium-oxid tokkal szigetelt Cromel-Alumel hőelemmel mértük, galvanikus leválasztón keresztül. Az abnormális gázkiszűlést tiszta hidrogénben gyűjtöttük meg 50 Pa nyomáson, hogy a felület megtisztuljon a szennyeződésektől.

A **2. ábra** feszültség- és áramgörbéje mutatja, hogy a tisztítás állandó ívképződés mellett háromnegyed órát tartott. Ezután a kisülés stabilizálódott és beindult a melegedés. Nitrogénadagolással a nyomást 220 Pa-ra növelve a melegedés felgyorsult, ugyanakkor újabb szikrák jelentkeztek, amíg a hőmérséklet a 300 °C-t meg nem haladta. 1200 W teljesítmény mellett (600 V, 2 A) a gázadagolást megszüntettük, az elektromos táp a feszültséget 1000 V-ra növelte, a szivattyú a nyomást 1 Pa-ra csökkentette (**2.** és **3. ábra**). Látható az áram gyors csökkenése és megszakadása. Észleltük a sötét katódtér növekedését, az 1000 V-nál a tápot kikapcsoltuk.

A kikapcsolás után rögzített $T=f_1(t)$ hűlésgörbe (**4. ábra**) és az annak alapján meghatározott $dT/dt = f_2(t)$ derivált (**5. ábra**) összetartozó értékeit a (6) kifejezésbe helyettesítve meghatároztuk a minta emisszivitását.

A számításnál figyelembe kell vegyünk a fajhő hőmérséklet szerinti változását, az általunk vizsgált hőmérséklet-tartományban a fajhő változása a **6. ábrán** látható.

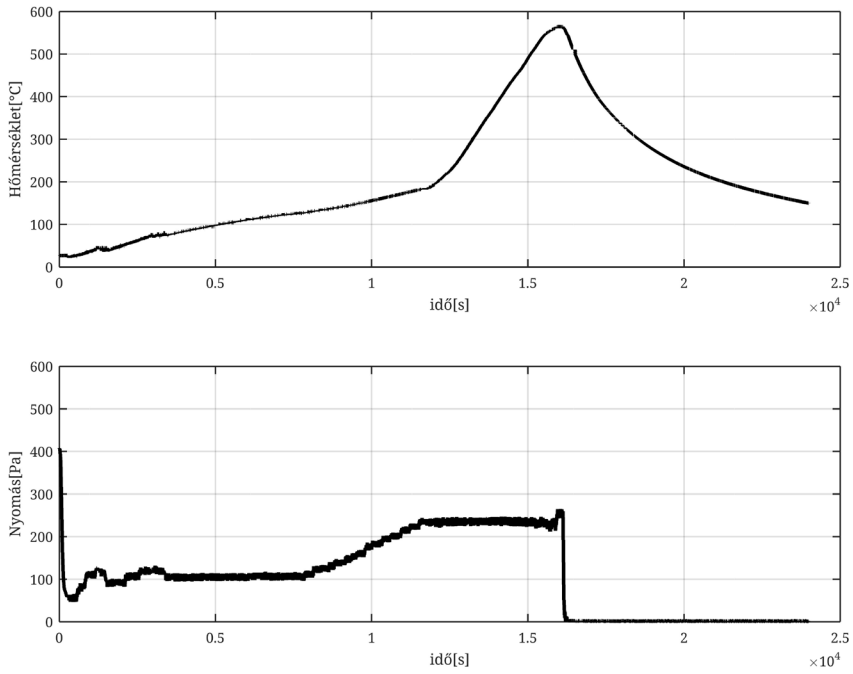
Az emisszivitászámítás eredményét a **7.** és a **8. ábra** mutatja. A leírt körülmények között vizsgált alumínium emisszivitása 0,34 és 0,39 között változik, nő a hőmérséklet növekedésével. Az eredmények szórása nagy, 10% körüli, de ez nem nagyobb az [1] irodalomban közölt értéknél.

Az emisszivitászámításban a hűlésgörbe deriváltja nem sima, ugyanis a mérési zajok felerősödnek a deriválás során. Elvégeztük a számításokat a kisimított derivált görbével is (**9. ábra**). Az eredmények a **10.** és **11. ábrán** láthatók. A kapott eredmények nem térnek el számottevően az előző eredményektől, a számított emisszivitás itt is hullámzik a derivált görbén látható enyhe hullámzásokat követve.

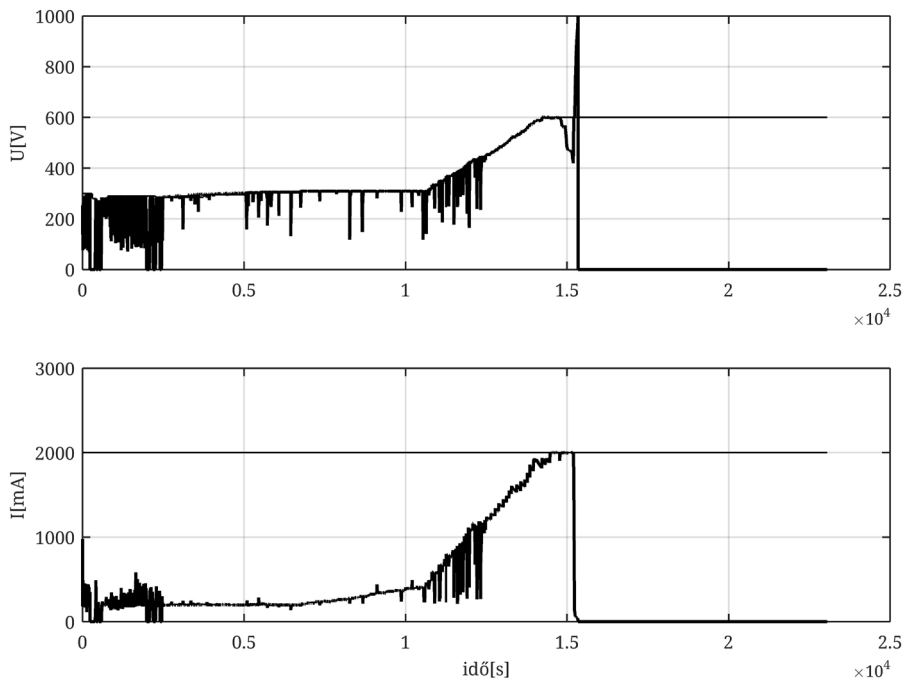
Megvizsgáltuk, hogy a mérés folyamán mennyire egyenletes a radiális hőmérséklet-eloszlás a végtelen hosszú rúdnak tekintett mintában. Az alumínium különösen jó hővezető képessége miatt a sugármenti hőmérséklet-gradiens kicsi, a hőmérséklet sugármenti eloszlását a **12. ábra** mutatja.

3. Következtetések

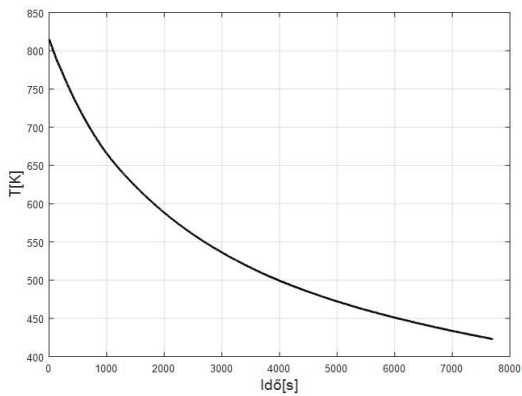
A dolgozatban bemutattunk egy emisszivitásmérési eljárást, amit egyszerűen elvégezhetünk a rendelkezésünkre álló plazmareaktorban. Az eredmények jól használhatók a plazmanitridálási folyamatok modellezésében, ahol a mintadarab hőmérséklet-változását modellezzük, használha-



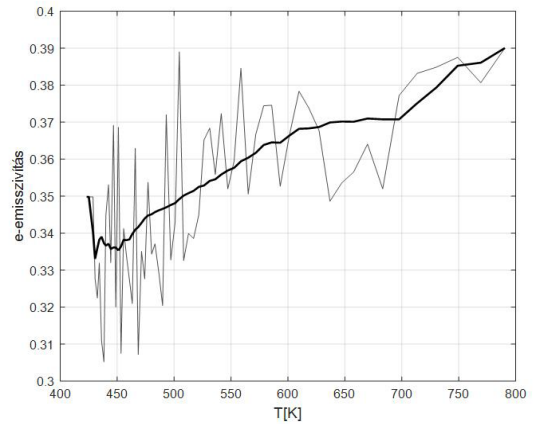
2. ábra. Hőmérséklet és gáznomás a reaktorban



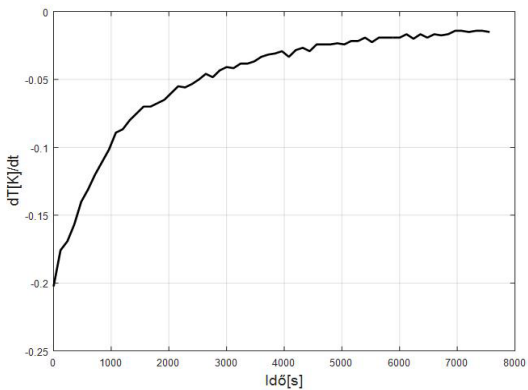
3. ábra. Az elektródák közti feszültség és áram a reaktorban



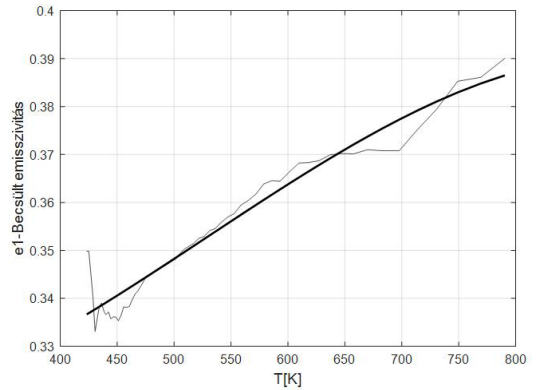
4. ábra. $T=f(t)$ hűlésgörbe



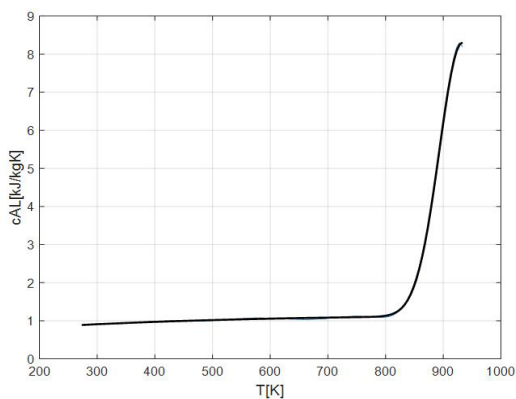
7. ábra. Az alumínium emisszivitása a hőmérséklet függvényében. Az ábrán látható a számolt emisszivitás, valamint a középértéke



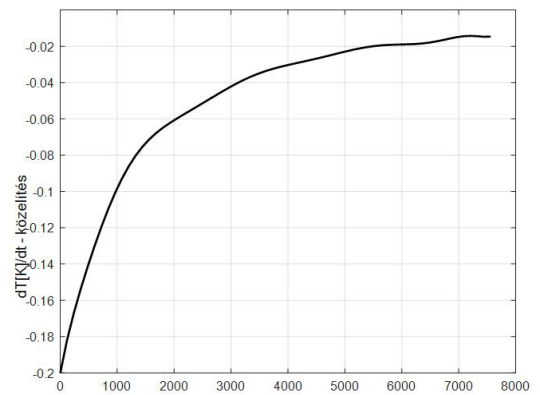
5. ábra. A hűlésgörbe idő szerinti deriváltja az idő függvényében



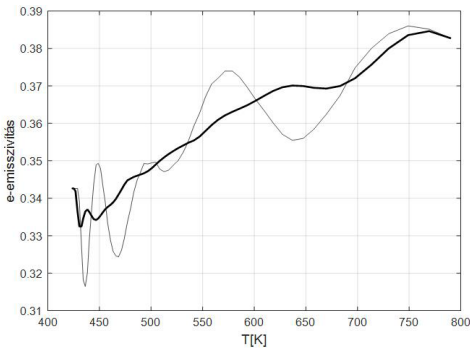
8. ábra. Az alumínium emisszivitásának közelítése egy harmadfokú polinommal



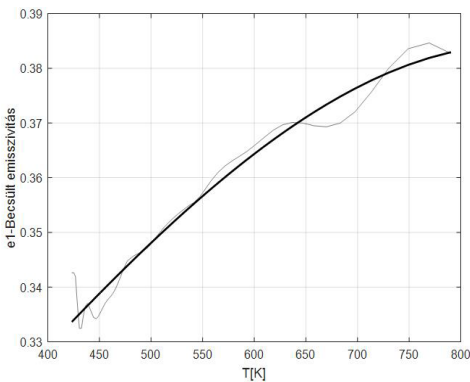
6. ábra. Az alumínium fajlagos hőkapacitása a hőmérséklet függvényében



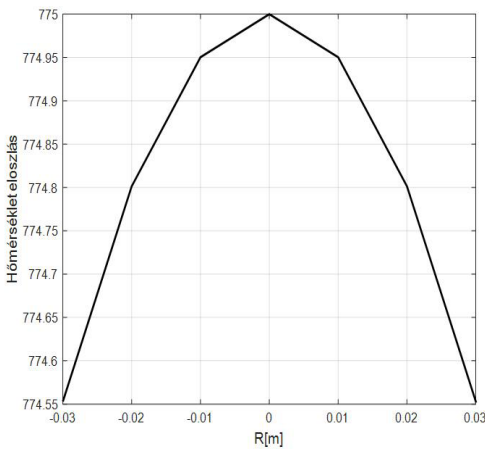
9. ábra. A hűlésgörbe idő szerinti deriváltjának a szűrés után kapott értékei



10. ábra. Az alumínium emisszivitása a szűrt derivált görbével számítva



11. ábra. Az emisszivitás polinomiális közelítése



12. ábra. Sugármenti hőmérséklet-eloszlás a mintában

tó nitridált felületű darabok emisszivitásának a mérésére, vagy bármilyen esetben, ahol a katódporlasztás és az ívkisülés hatása a felületre nem zavaró tényező. Következésképpen fényes felületek emisszivitásának a számítására nem alkalmas a módszer. Előbbi kutatásaink eredményeképpen

elmondhatjuk, hogy a mért emisszivitással pontosan modellezhető a mintadarab hőmérséklet-változása, és vannak olyan alacsonyán ötvözött acélok, ahol az emisszivitás jelentősen változik a hőmérséklettel, ebben az esetben nagyon fontos a bemutatott módszerrel való mérés. A jelen dolgozatban vizsgált alumíniumötvözet emisszivitása majdnem állandónak tekinthető a hőmérséklet függvényében.

Köszönetnyilvánítás

A munkánkat a Sapientia Alapítvány Kutatási Programok Intézete (KPI) támogatta. Köszönjük Kelemen András kollégánknak a lektorálás során tett javaslatait, nagyon fontos észrevétel volt az, hogy az alumínium hőkapacitása nem tekinthető állandónak, erősen hőmérsékletfüggő, ennek figyelembevételével az eredményeink is sokkal pontosabbak lettek.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Paloposki T., Liedquist L.: *Steel emissivity at high temperatures*. VTT Research Notes 2299, Otamedia Oy, Espoo, 2005.
<https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2299.pdf>
- [2] Kutasi N., Filep E., Kenéz L.: *Heat transport modelling and adaptive model predictive temperature control of the direct current plasma nitriding process performed in a linear non-isotherm plasma reactor*. Journal of Control Engineering and Applied Informatics, 19/4. (2017) 52–60.
<http://www.ceai.srait.ro/index.php?journal=ceai&page=article&op=view&path%5B%5D=4468&path%5B%5D=1466>
- [3] Liedquist L.: *A radiometric method for measurement of emissivity of metallic surfaces*. Non Nuclear Energies Workshop on Optical Property Measurement Techniques, Ispra, 1987. 277–280.
- [4] Wen C. D., Mudawar I.: *Experimental investigation of emissivity of aluminum alloys and temperature determination using multispectral radiation thermometry (MRT) algorithms*. Journal of Materials Engineering and Performance, 11/5. (2002) 551–562.
<https://doi.org/10.1361/105994902770343818>
- [5] Filep E., Kutasi N., Kenéz L.: *A Sapientia EMTE marosvásárhelyi karának plazmareaktora*. Műzeumi Füzetek – Acta Scientiarum Transylvanica, Chimica, 25/3. (2017) 69–76.
<http://hdl.handle.net/10598/30171>
- [6] Siegel R., Howell J. R.: *Thermal radiation heat transfer*. McGraw–Hill, New York, 1972.