TELJESÍTMÉNYMODULÁCIÓS HEGESZTÉS HŐFORRÁS MODELLJE

Kollár Dénes

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék
adjunktus, EWE/IWE hegesztőmérnök

kollar.denes@emk.bme.hu

BUDAPESTI MŰSZAKI
ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta
Hidak és Szerkezetek Tanszék

MAHEG Korszerű ívhegesztés mesterkurzus, Dunaújváros, 2022.09.15.

Előadás felépítése

Előzmények

Problémafelvetés

Hőforrás modellek

Hegesztőív teljesítményének megosztása

Termikus hatásfok

Hegesztési hőciklus alakítása teljesítménymodulációval

Konklúzió

ELŐZMÉNYEK

Kezdetek: építőmérnök MSc hallgatóként TDK és diplomamunka hegesztésszimuláció témakörében (2014)

Doktori disszertáció: Welding simulation in advanced manufacturing and design of steel structures (2020)

Kutatási téma: hegesztés numerikus vizsgálata és méretezéselméleti specialitásai (MTA-BME Lendület Új Generációs Acélhidak Kutatócsoport, vezető: Dr. Kövesdi Balázs Géza)

Oktatás: Gyártástechnológia c. tantárgyban való részvétel EWE/IWE képzésen (2022-)

Problémafelvetés

1) Hőforrás modellek különbségei hagyományos (nonwaveform controlled) és teljesítménymodulációs (waveform controlled) hegesztésnél?

2) Hegesztőív teljesítményének megosztása az elektróda és hegfürdő között?

3) Termikus hatásfok eljárásváltozatoknál?

4) Hegesztési hőciklus hogyan alakítható teljesítménymodulációval?

Hőforrás modellek - általános

Hő- és anyagáramlás: hegesztőív, illetve hőforrás–hegfürdő kölcsönhatások } komplex leírás, egyszerűsítések

Hőforrás modell generációk (Goldak & Akhlaghi, 2005)

Első generáció

- *hővezetés differenciál-egyenletének analitikus megoldása*

Második generáció (ekvivalens hőforrás modellek)

- ***felületi/térbeli teljesítménysűrűség függvények***

Harmadik generáció

- *ívnyomáseloszlás*
- *tömegáramlás a hegfürdőbe*

Negyedik generáció (hőforrás–hegfürdő kölcsönhatás)

- *folyadékáramlás (Navier–Stokes-egyenlet)*

Ötödik generáció (hegesztőív modellje)

- *elektromágnességtan Maxwell-egyenletei*
- *magneto-hidrodinamikai leírás Navier–Stokes-egyenlettel kiegészítve*

Számítási igény ↓

Gyakorlati alkalmazás ↑

Hőforrás modellek – általános

Második generációs hőforrás modellek: **felületi/térbeli** teljesítménysűrűség függvények (eloszlásfüggvények) végeselemes modellekben

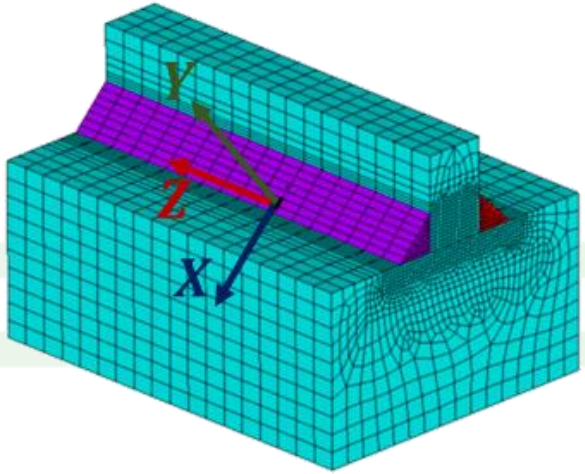
Felületi hőforrás modellek [q - W/mm^2]: $P = \eta_t UI = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} q(x,y)\ dy\, dx$

Térbeli hőforrás modellek [q - W/mm^3]: $P = \eta_t UI = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} q(x,y,z)\ dy\, dx\ dz$

$Q = \frac{\eta_t UI}{v}$ ⟵ hagyományos vs. teljesítménymodulációs?

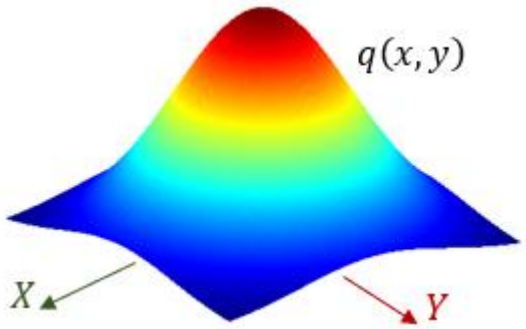
η_t – termikus hatásfok

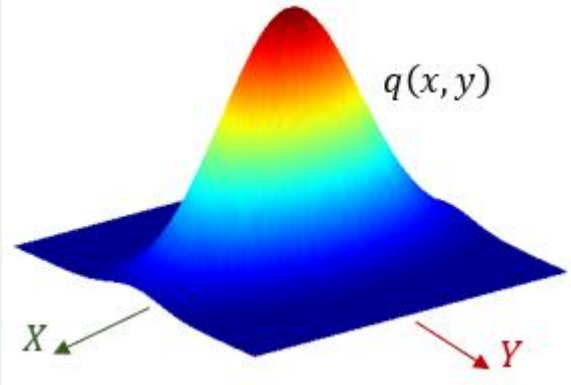
v a hegesztési sebesség (lokális koordinátarendszer)



Hőforrás modellek – hagyományos

Felületi hőforrás modellek





$$q(x,y) = q_{max} \cdot \exp(-kr^2)$$

Normál Gauss-eloszlású hőforrás

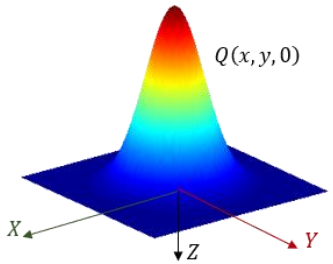
$$q(x,y) = q_{max} \cdot \exp\left(-k\frac{x^2}{\sigma_a^2} - k\frac{y^2}{\sigma_b^2}\right)$$

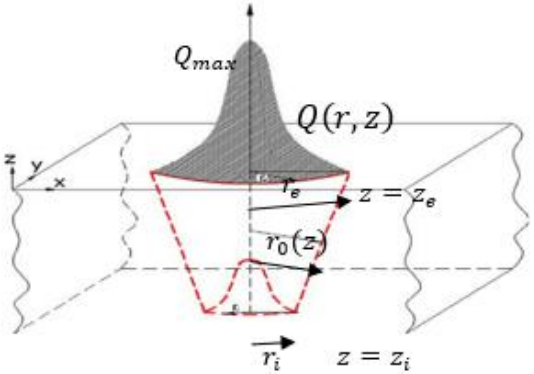
Elliptikus (kétváltozós Gauss-eloszlású) hőforrás

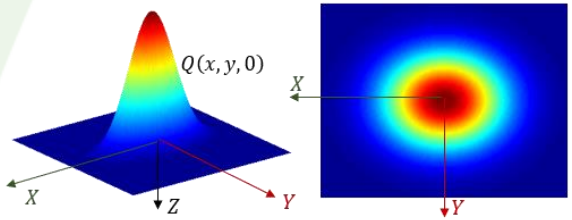
Alkalmazás: sekély beolvadás modellezése, egyszerűen leírható beolvadási zóna

Hőforrás modellek - hagyományos

Térbeli hőforrás modellek







$$Q_{max} \cdot \exp\left(-3\frac{r^2}{{r_h}^2}\right)$$

Gömb alakú hőforrás

$$Q_{max}\, e^{-3r^2/r_0(z)^2}$$

Kúp alakú hőforrás

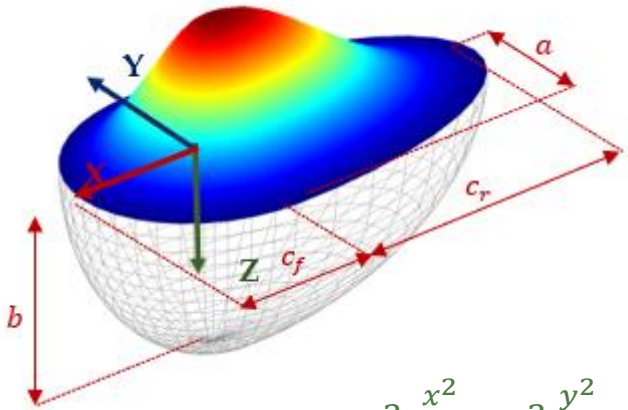
$$Q_{max} \cdot exp\left(-\frac{3x^2}{c_h^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right)$$

Ellipszoid alakú hőforrás

Alkalmazás: mély beolvadás modellezése, egyszerűen leírható beolvadási zóna

Hőforrás modellek - hagyományos

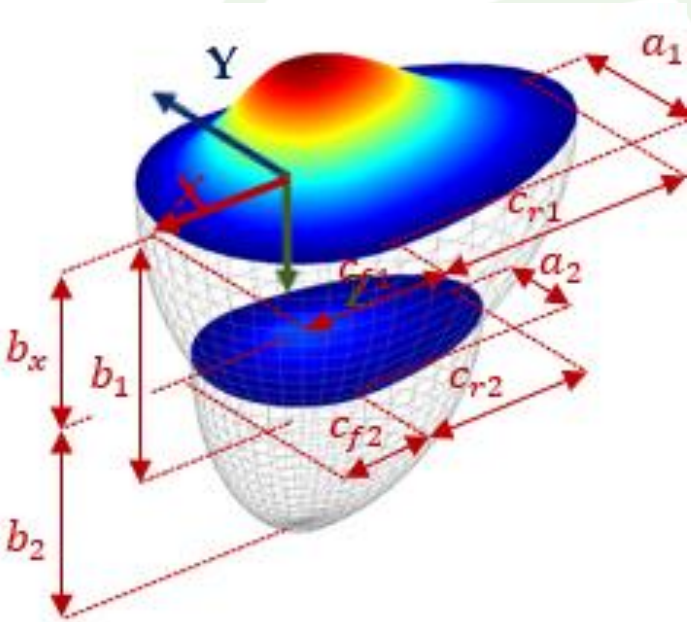
Térbeli hőforrás modellek



$$Q_{f,r}(x,y,z) = Q_{\max} \cdot e^{-3\frac{x^2}{c_{f,r}{}^2} - 3\frac{y^2}{a^2} - 3\frac{z^2}{b^2}}$$

Dupla (kettős) ellipszoid

Goldak et al. (1984)



Hibrid dupla (kettős) ellipszoid

Nguyen et al. (2000)

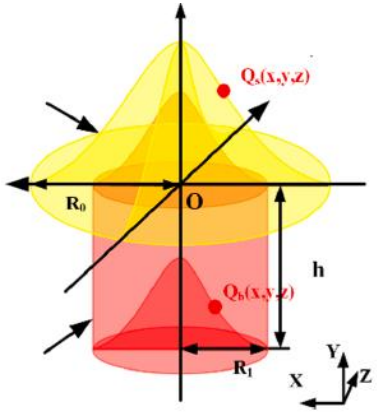
Alkalmazás: mély beolvadás modellezése, komplexebben leírható beolvadási zóna

HŐFORRÁS MODELLEK - HAGYOMÁNYOS

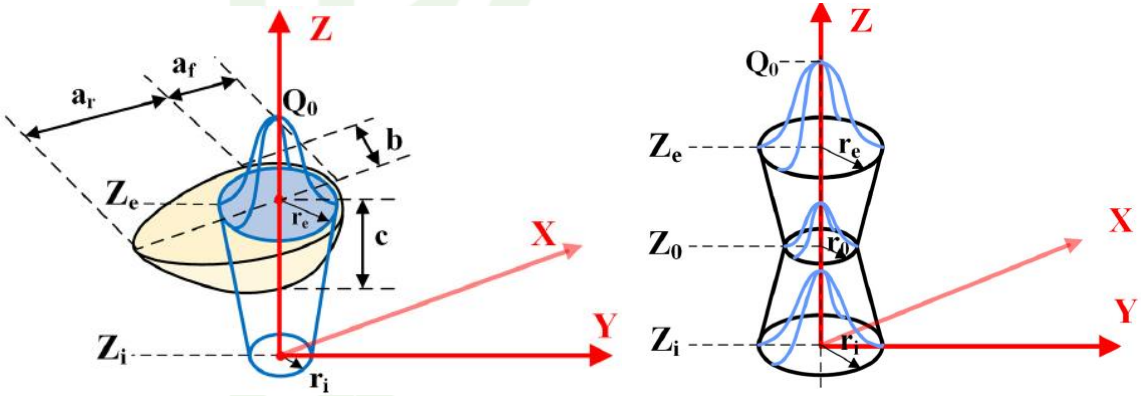
Kombinált hőforrás modellek

Felületi + térbeli hőforrás modellek

Térbeli hőforrás modellek



Yan et al. (2022)



Chen et al. (2019)

Hasznosuló teljesítmény megosztására vonatkozóan kalibrálás!

Alkalmazás: komplexebben leírható beolvadási zóna

HŐFORRÁS MODELLEK - TELJESÍTMÉNYMODULÁCIÓS

1. Csekély szakirodalom (Azar, 2015; Zapico et al., 2018)
2. Rövidzárlatos eljárásváltozatra koncentrálnak

$$F_t(a) = a\left|\sin(\tilde{f}\pi t) + a_{min}\right|$$

$$F_t(b) = b\left|\sin(\tilde{f}\pi t) + b_{min}\right|$$

$$F_t(c_f) = c_f\left|\sin(\tilde{f}\pi t) + c_{f_{min}}\right|$$

$$F_t(c_r) = c_r\left|\sin(\tilde{f}\pi t) + c_{r_{min}}\right|$$

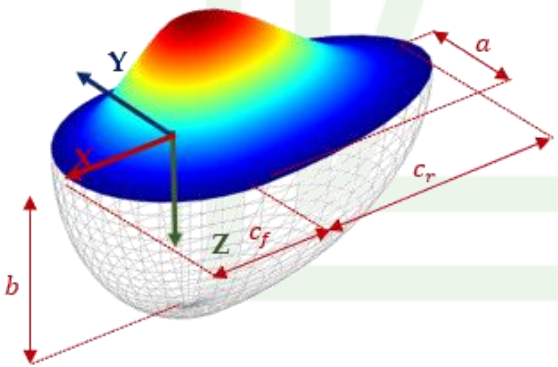
$$F_t(Q) = Q_{max}\left|\sin(\tilde{f}\pi t) + Q_{min}\right|$$

$$\dot{f}_f = 2\frac{F_t(c_f)}{F_t(c_f) + F_t(c_r)} = 2 - \dot{f}_r$$

$$\begin{cases} Q_{max} = \eta \cdot \{I_{peak} \cdot U_{peak}\}_t \\ Q_{min} = \eta \cdot \{I_{base} \cdot U_{base}\}_t \end{cases}$$

Időfüggő, periodikus hőforrás paraméterek

Azar (2015)

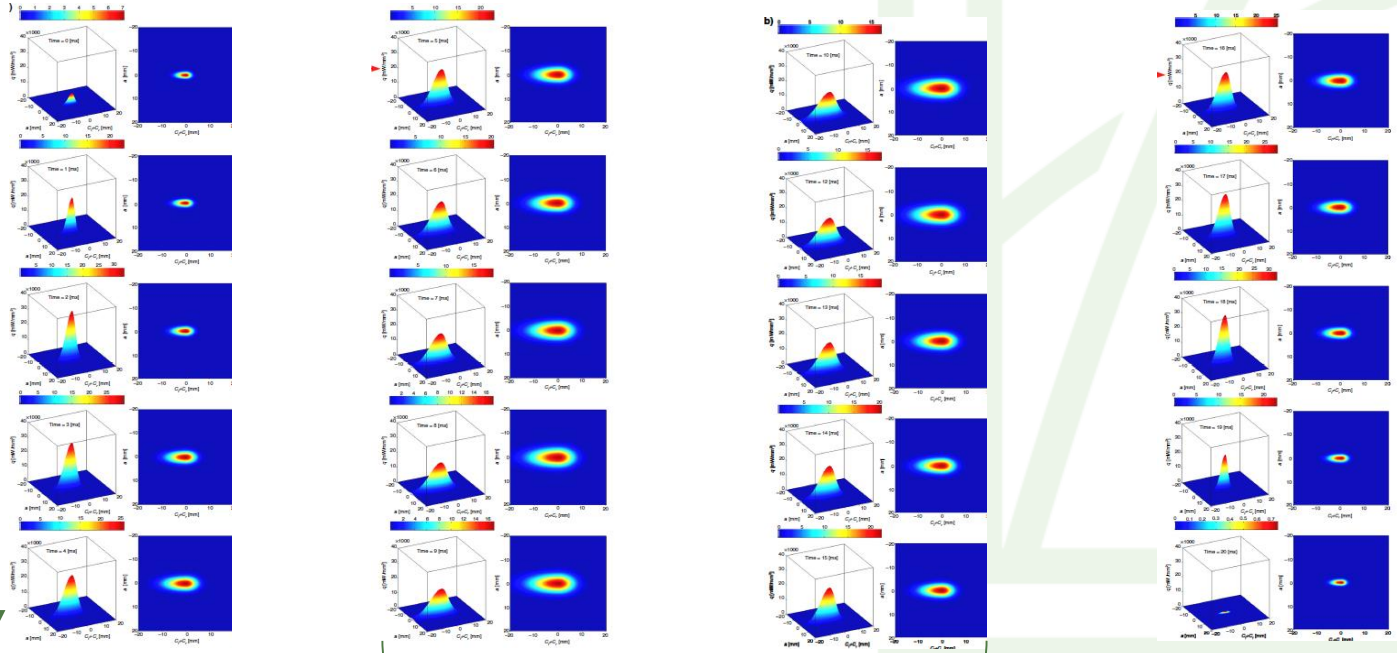


a_{min}	4 (mm)
b_{min}	4 (mm)
c_{rmin}	13 (mm)
c_{fmin}	7 (mm)
$\tilde{f}$	50 (Hz)
η	80 %
Q_{max}	6000 (VA)
Q_{min}	10 (VA)

HŐFORRÁS MODELLEK - TELJESÍTMÉNYMODULÁCIÓS

Azar (2015): 1 periódus bemutatása → 20 ms ($\tilde{f}$ = 50 Hz)

Ívgyújtás (nagy q)



Ív kialszik

rövidzárlat

cseppleválás?

Ív

Zapico et al. (2018) ugyanezt a hőforrást modellt alkalmazzák

Hegesztőív teljesítményének megosztása

Végeselemes modell és második generációs hőforrás modellek korlátai:

- az elektróda (hevítése) nem része a modellnek,
- csak a hasznosuló teljesítményt lehet változtatni (munkadarab hevítése).

Szakirodalmi 'megoldások' teljesítménymodulációs hegesztés modellezésénél:

- Azar (2015) és Zapico et al. (2018): időfüggő teljesítmény ($\tilde{f}$ függvénye)
- VP polaritásbalanszának (B_{EN}) figyelembevétele (Mohanty et al., 2021):
  - egyenes (EN) polaritás: $P \times B_{EN}$
  - fordított (EP) polaritás: $P \times (1\text{-}B_{EN})$

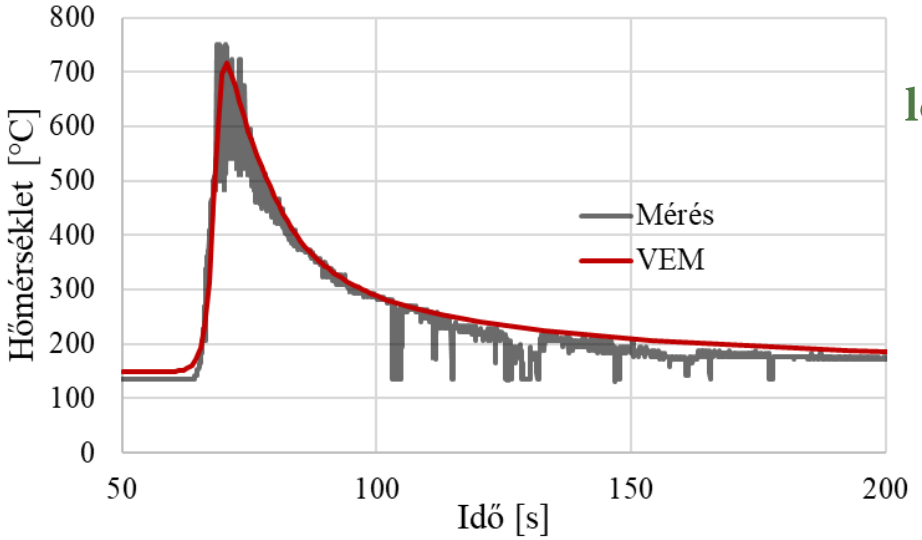
Megjegyzés: két külön dupla ellipszoid!

% TERMIKUS HATÁSFOK

η_t vs. k – szabványosított termikus hatásfoktényező (MSZ EN 1011-1)?

Nemzetközi szakirodalomban leggyakoribb: k alkalmazása (tévesen, **teljesítmény-modulációs hegesztéshez nem használható!)**

Szofisztikáltabb módszer: η_t **kalibrálása mért T alapján** (hőelem, hőkamera)



↓

beolvadási/hőbefolyásolt zónán kívül a **lokális** jellegű jelenségeknek **kicsiny hatása** van

↓

VEM (2. gen.) vagy analitikus képlet (1. gen.)

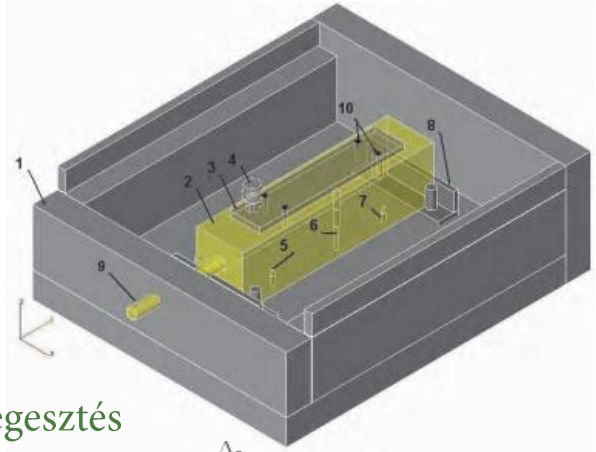
η_t kalibrálása = P kalibrálása

↓

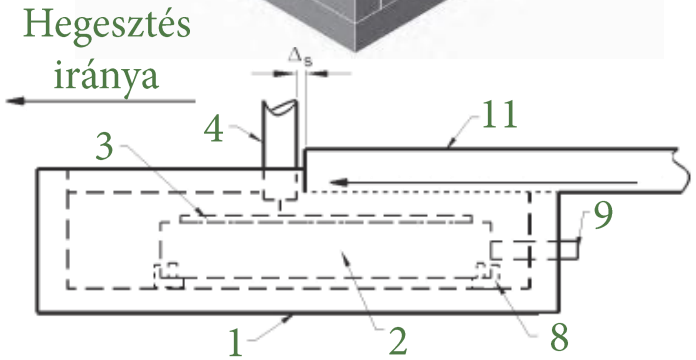
ISO/TR 18491-ben foglalt képletek (ívenergia/teljesítmény) kevésbé relevánsak VEM esetén (**hasznosuló teljesítmény!**)

% TERMIKUS HATÁSFOK

Legkifinomultabb módszer: η_t **mérése kaloriméterrel** (akár $\pm$ 1% pontosság)



1 Hőszigetelt doboz (alumínium fóliával laminált poliuretán)
2 Réz tömb (bb: 'backing bar')
3 Munkadarab (wp: 'workpiece')
4 Hegesztőpisztoly
5-7 Hőelemek (TC1-TC3)
8 Poliamidimid hőszigetelő tomb
9 Réz csatlakozó földelőkábelnek
10 Rögzítő furatok
11 Hőszigetelt fedél



(Egerland & Colegrove, 2011)

Elve: energiamegmaradás törvénye, egyensúlyi hőmérséklet

$\Delta T = T_e - T_0$ (egyensúlyi - kezdeti)

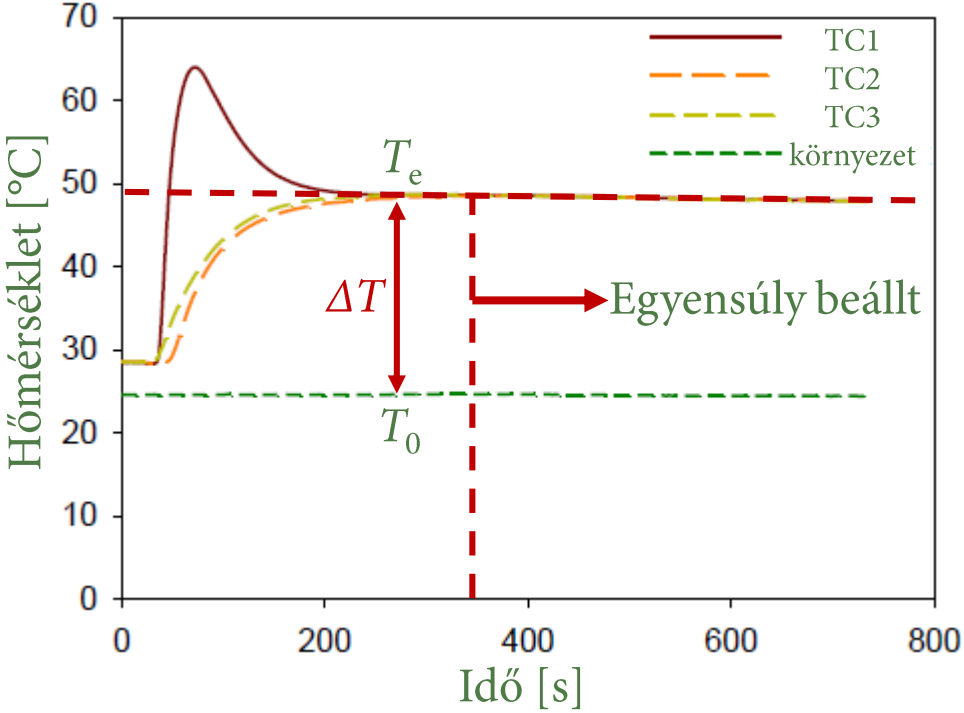
$Q_{weld} = c_{wp} m_{wp} \Delta T + c_{bb} m_{bb} \Delta T$

$P = \frac{Q_{weld}}{t} = \eta_t UI$ vagy $\eta_t \mathrm{IP}$

$\eta_t = \frac{P}{UI}$ vagy $\frac{P}{\mathrm{IP}}$

% TERMIKUS HATÁSFOK

Legkifinomultabb módszer: η_t **mérése kaloriméterrel** (Pépe et al., 2011)



Lincoln - Surface Tension Transfer (STT)
Kemppi – FastROOT
Fronius - Cold Metal Transfer (CMT)
$\eta_t = 85\%$

Lincoln – RapidArc → η_t = 78% (impulzusívű)

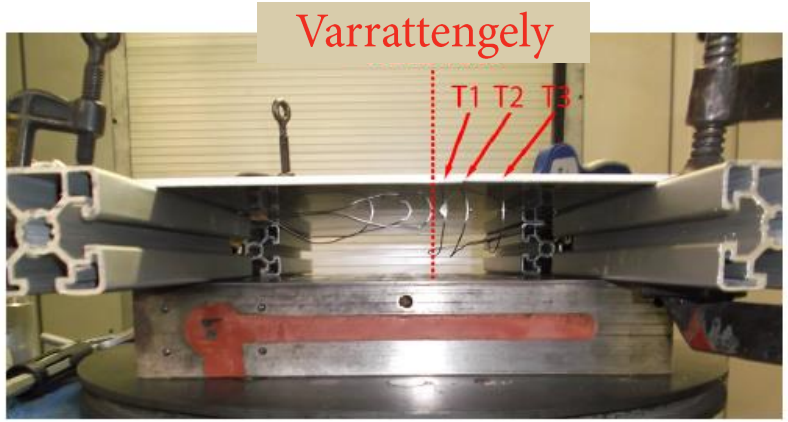
További kaloriméteres módszerek:

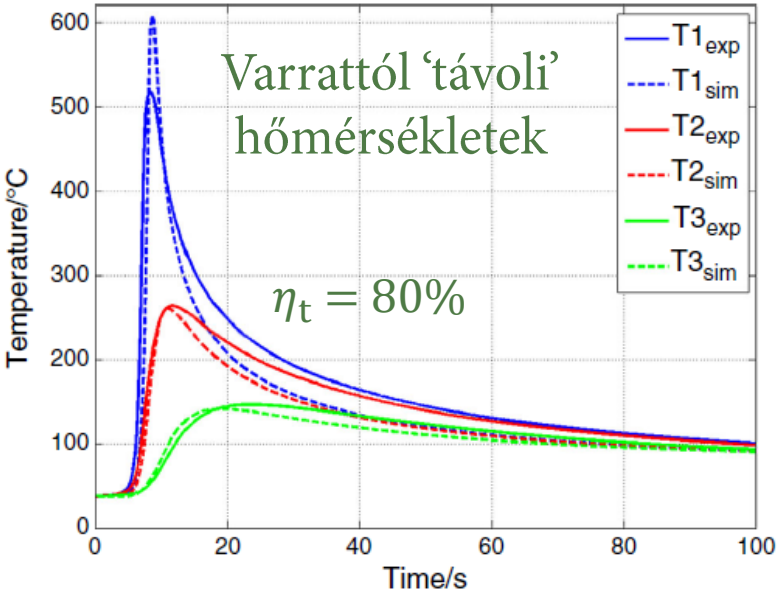
- víz áramoltatása
  - Seebeck-féle kaloriméter
  - $\Delta T = T_{out} - T_{in}$
- cseppfolyós nitrogénnel való hűtés Dewar-edényben
  - vákuum-lombik
  - elgőzölgő nitrogén tömegének meghatározása
- stb.

Hegesztési hőciklus alakítása teljesítménymodulációval

Zapico et al. (2018) – alumínium ötvözet

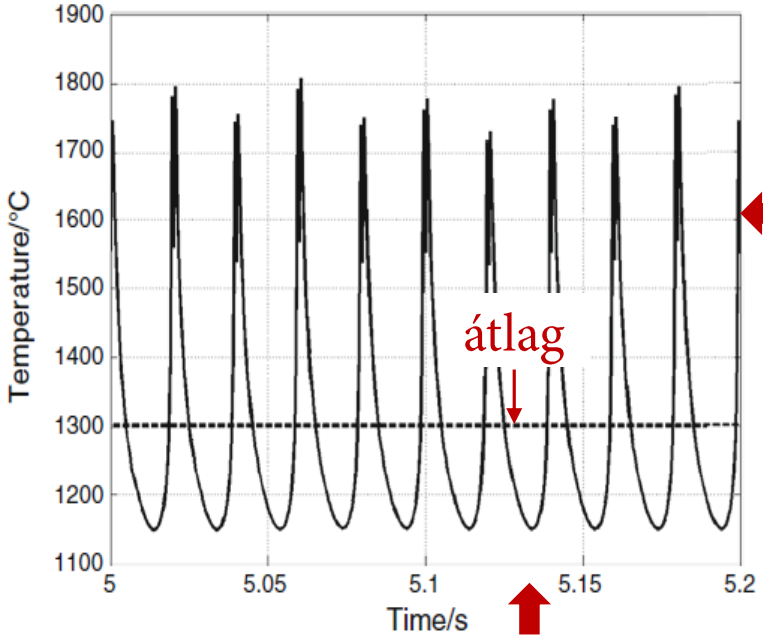
– CMT (kis hőbevitel, rövidzárlatos anyagátviteli mód)





Hegesztési hőciklus alakítása teljesítménymodulációval

Hőmérséklet varrat vonalában



$$a(t) = a_0 \left|\sin\left(\tilde{f}\pi t\right)\right| + a_{\min}$$

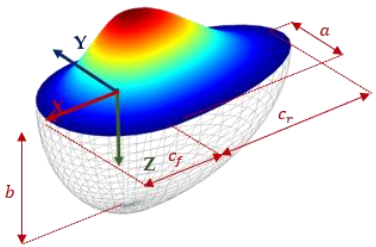
$$b(t) = b_0 \left|\sin\left(\tilde{f}\pi t\right)\right| + b_{\min}$$

$$c_f(t) = c_{f0} \left|\sin\left(\tilde{f}\pi t\right)\right| + c_{f\,\min}$$

$$c_r(t) = c_{r0} \left|\sin\left(\tilde{f}\pi t\right)\right| + c_{r\,\min}$$

$$Q(t) = Q_0 \left|\sin\left(\tilde{f}\pi t\right)\right| + Q_{\min}$$

Időfüggő, periodikus hőforrás paraméterek



IP mérési frekvenciája ISO/TR 18491 alapján: ~$10\tilde{f}$

Időlépés (VEM): ~néhány ms → hullámalak és $\tilde{f}$ függvénye

KONKLÚZIÓ

Hőátadás **mennyiségi** jellemzőinek modellezési lehetőségei:

- hullámalak és $\tilde{f}$ függvényében **periodikus $P(t)$ függvény**,
- η_t termikus hatásfok/P hasznosuló teljesítmény **kalibrálása** szükséges,
- VP **polaritásbalansz**ának (B_{EN}) figyelembevétele:
  - egyenes (EN) polaritás: $P \times B_{EN}$,
  - fordított (EP) polaritás: $P \times (1\text{-}B_{EN})$.

hőbevitel tág határok között változtatható

Hőátadás **minőségi** jellemzőinek modellezési lehetőségei:

- **időfüggő, periodikus** hőforrás modell **paraméterek**
- váltakozóáram esetén két **külön hőforrás modell** (egyenes és fordított polaritáshoz külön-külön)

Modellezési nehézségek:

- ~ms nagyságrendű időlépések lehetnek szükségesek → időigényes számítás

HIVATKOZÁSOK

J.A. Goldak, M. Akhlaghi (2005). Computational Welding Mechanics. Boston MA: Springer Science + Business Media, Inc.

J.A. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby (1984). A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical Transactions B, 15, 299–305.

N.T. Nguyen, Y.W. Mai, A. Ohta (2000). Analytical solution for a new hybrid double-ellipsoidal heat source in semi-infinite body, In: W.R.B.& W.P.D.W. C.A. Brebbia (Ed.), Proceedings of International Conference on Advances in Composite Materials and Structures VII, WIT Pres, Bologna, 207–217.

S. Yan et al. (2022). Prediction of temperature field and residual stress of oscillation laser welding of 316LN stainless steel, Optics and Laser Technology, 145, Paper 107493.

L. Chen, G. Mi, X. Zhang, C. Wang (2019). Numerical and experimental investigation on microstructure and residual stress of multi-pass hybrid laser-arc welded 316L steel, Materials and Design, 168, Paper 107653.

A.S. Azar (2015). A heat source model for cold metal transfer (CMT) welding, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 122, 741–746.

E.P. Zapico et al. (2018). An improved model for cold metal transfer welding of aluminium alloys, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 131, 3003–3009.

U.K. Mohanty et al. (2021). Thermal modelling of alternating current square waveform arc welding, Case Studies in Thermal Engineering, 25, Paper 100885.

N. Pépe et al. (2011). Measuring the Process Efficiency of Controlled Gas Metal Arc Welding Processes, Science and Technology of Welding & Joining, 16(5), 412-417.

S. Egerland, P. Colegrove (2011). Using Solid State Calorimetry for Measuring Gas Metal Arc Welding Efficiency, In: W. Sudnik (Ed.), Arc Welding, IntechOpen, DOI: 10.5772/1088.

Köszönöm szépen a megtisztelő figyelmet!