

A SZIMULÁCIÓ SZEREPE ÉS TAPASZTALATAI A HEGESZTÉSI TECHNOLÓGIA KIALAKÍTÁSA SORÁN

THE ROLE OF SIMULATION AND ASSOCIATED EXPERIENCES IN DEVELOPMENT OF WELDING TECHNOLOGY

Dömötör Dávid*, Nagy Dávid*, Tóth Dániel**, Horváth Dániel**, Dr. Hány András***

ABSTRACT

This study presents a comprehensive analysis of the laser welding process for high-purity copper, focusing on a simulation environment based on the finite element method (FEM). The combined application of physical validation and simulated welding enables the reduction of manufacturing defects, optimization of parameters, and significant reduction of development time and costs. The paper shows the experiences and learnings of welding technology simulation of an industrial component.

1. BEVEZETÉS

A rohamosan tért nyerő elektromos autóipar és az energetikai szektor által használt eszközök gyártásának elengedhetetlen alapanyaga a nagy tisztaságú réz és annak különböző ötvözetei. Kiváló elektromos és hővezető képességei miatt széles körben alkalmazzák, azonban éppen ezen tulajdonságok teszik nehezen hegeszthetővé a hagyományos ömlesztőhegesztési (TIG, MIG, MAG) eljárásokkal.

A modern ipari gyártástechnológiák gyökeres változásokon mennek keresztül, ahol a felgyorsuló digitalizáció, illetve az Ipar 4.0 irányelvei új követelményeket állítanak a hatékonyság, minőség és költségoptimalizálás terén. Ebben a keretrendszerben kiemelt hangsúly kerül a digitális ikrek (digital twin) használatára, amely segítségével egy fizikai eszköz vagy gyártási folyamat teljes mértékben leképezhető és vizsgálható a virtuális térben. A hagyományos, fizikai próbálkozásokon alapuló termékfejlesztést napjainkban egyre inkább a szimuláció-vezérelt gyártástervezés váltja fel, egészíti ki [1].

Mivel a nagy tisztaságú réz (Cu) hegesztése jelentős termofizikai kihívásokat jelent, a hegesztési szimulációk alkalmazása révén már a tervezőasztalon feltárhatók az olyan gyártástervezési hibák, mint a túlzott hőbevitelből származó vetemedés vagy a maradó feszültségek okozta alkatrészfáradás. A virtuális kísérletek és szimulációs módszerek drasztikusan képesek csökkenteni a prototípusgyártás anyagköltségeit és a termékfejlesztés átfutási idejét.

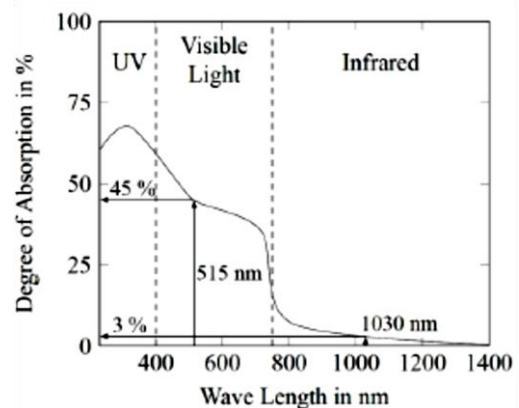
2. A VIZSGÁLT HEGESZTÉSI TECHNOLÓGIA

2.1. A réz lézeres hegesztése, kihívások

A réz kiváló elektromos és hővezető képességgel rendelkezik szobahőmérsékleten, a hővezetési tényezője eléri a $401 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ értéket. Ez a drasztikus hődisszipációs képesség azt eredményezi, hogy a hegesztés során az anyagba táplált hőenergia rendkívül gyorsan elvezetődik a fókuszált zónából.

A lézeres hegesztésnél az abszorpció erősen hullámhosszfüggő, a tiszta réz a közeli infravörös hullámhosszon (1030-1070 nm) rendkívül alacsony, megközelítőleg 3-5%-os abszorpciós képességgel rendelkezik szobahőmérsékleten (1. ábra) [2]. Bár ez az érték folyékony fázisban drasztikusan megnő (gyakran 50% fölé), a kezdeti olvadékmedence stabil kialakítása komoly akadályokba ütközik. Kék (450 nm) és zöld (515 nm) hullámhosszú lézerforrások alkalmazásával az abszorpciós tényező szobahőmérsékleten a 40-45%-ot közelíti, olvadáspont közelében viszont ezeknél az eljárásoknál nem növekedik tovább.

A lézersugaras kulcslyuk (keyhole) hegesztés, kiegészítve a modern sugárorszcillációs (wobble) technológiával, ígéretes megoldást kínál ezekre a problémákra. Azonban az optimális paraméterek megtalálása fizikai próbálkozásokkal költséges és időigényes.



1. ábra Hullámhossz, abszorpciós tényező összefüggése, szobahőmérsékleten [2]

* ZalaZONE Ipari Park Zrt. duális mérnök hallgató

** TC-Zone Mérnöki Kft., vezető mérnök

*** ZalaZONE Ipari Park Zrt. vezérigazgató

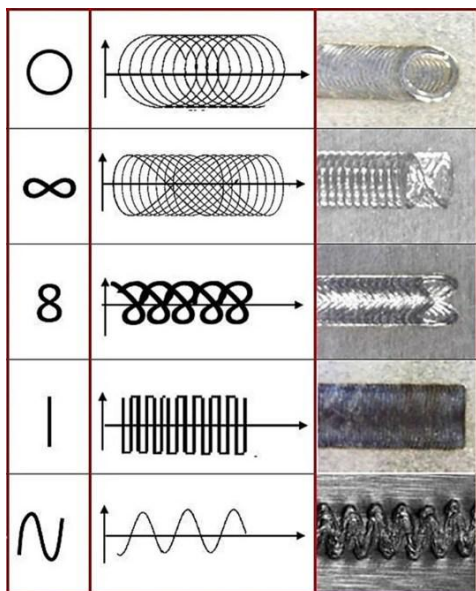
2.2. A lézeres hegesztés technológiája

A lézersugaras hegesztésnél a hőt koncentrált lézernyaláb szolgáltatja; a fókuszban a teljesítménysűrűség a több millió W/cm^2 -t is elérheti, így keskeny, mély varrat hozható létre, kis hőhatásövezettel és csekély hőtorzulással.

Hővezetési üzemmódban az energiasűrűség a felület megolvasztásához elég, a párolgási küszöböt azonban nem éri el. Kis teljesítményű vagy defókuszált nyalábbal történő hegesztésnél a varratmélység tized-milliméterektől kb. 1 mm-ig terjed, ezért ezt az eljárást vékony falú munkadarabokhoz (elektronika, akkumulátorgyártás) használják [3].

Kulcslyukas (keyhole) üzemmódban az intenzitás meghaladja a párolgási küszöböt: a fém lokálisan elpárolog, a gőznyomás kinyomja az olvadékot, és vékony, mély kulcslyuk jön létre. A sugár ennek falán többszörösen visszaverődve nyelődik el, amely tovább fokozza az abszorpciót, így már több milliméter vastag elemek is hegeszthetők [3].

A fémek hegesztése során fellépő reflexió, hővezetési problémák leküzdésére számos innováció, sugárkezelési technika született. Ilyen technológia az iparban alkalmazott, dinamikus sugároszcilláció (Wobble) [4]. A hagyományos lézerhegesztésnél a fénysugár egy fix pontra irányul, vagy egy egyenes mentén mozog. Ezzel szemben a Wobble technológia során a lézersugarat optikai módon, nagy sebességgel előre meghatározott mintában (kör, nyolcas, végtelen) mozgatják, miközben az a varrat hosszát lepszátja.



2. ábra Sugár-oszcillációs hegesztés [5]

A sugároszcillációval kiküszöbölhető az illesztési pontatlanság is, mivel a lézersugár nem egy vékony pontban éri a munkadarabokat. Továbbá, a hőbevitel eloszlása is sokkal egyenletesebb, csökkenthető a

vetemedés, repedések kockázata. A sugár folyamatos mozgása által keveri az olvadékfürdőt is, ez segít abban, hogy a bezáródott gázbuborékok a felszínre törjenek a varrat megdermedése előtt [4].

3. IPARI PÉLDA ÉS SZIMULÁCIÓS MODELLEK

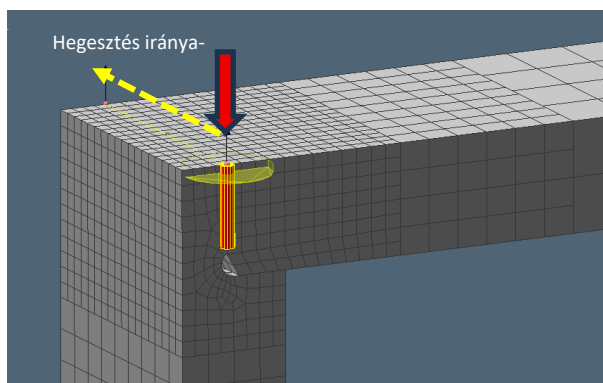
3.1. Kötésvizsgálat

A szimulációs modell felépítését megelőzően elengedhetetlen a valós fizikai paraméterek meghatározása és a fizikai tesztek elvégzése. Bármilyen szimulációs modell csak annyira pontos, amennyire a bemeneti adatai és a validációs mérései.

A kapcsolódó kutatás során a vizsgált kötések nagytisztaságú réz lemezek között jöttek létre, szállézer-hegesztőgép alkalmazásával.

A hegesztés alapvető paraméterei az alábbiak voltak:

- Hegesztés alapanyaga: 3 mm vastag, 7 mm széles, 150 mm hosszú, nagytisztaságú réz lemez.
- Hegesztési varrat hossza: 7 mm.
- Lézersugaras kulcslyukhegesztés teljesítménye: 1,5-2 kW.
- Lézersugaras felület melegítési teljesítménye: 1,5-2,5 kW.
- Hegesztési sebesség: 2 m/min.
- Sugároszcilláció: kör alakú, 0,45 mm átmérő, frekvenciája 200-300 1/s.

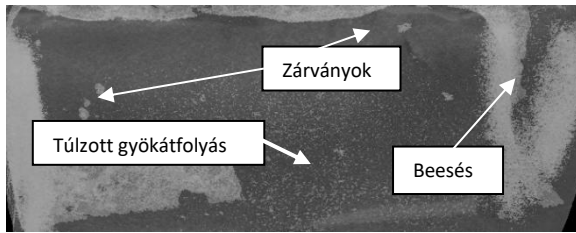


3. ábra A létrehozandó hegesztési kötés modellje

A hegesztés elvégzése után a létrejött kötést vizsgálni kell. A varratmélység, beolvadási zónák, hőhatási övezetek meghatározására a következő eljárásokat alkalmaztuk:

- Roncsolásmentes CT (számítógépes tomográfia) vizsgálat: a teljes hegesztési hossz alatt a beolvadás jellegének és a hegesztési hibák meghatározására (4.ábra).
- Roncsolásos metallográfiai csiszolatvizsgálat: a szimulációhoz szükséges hőhatási zónák méreteinek ellenőrzésére (5.ábra).

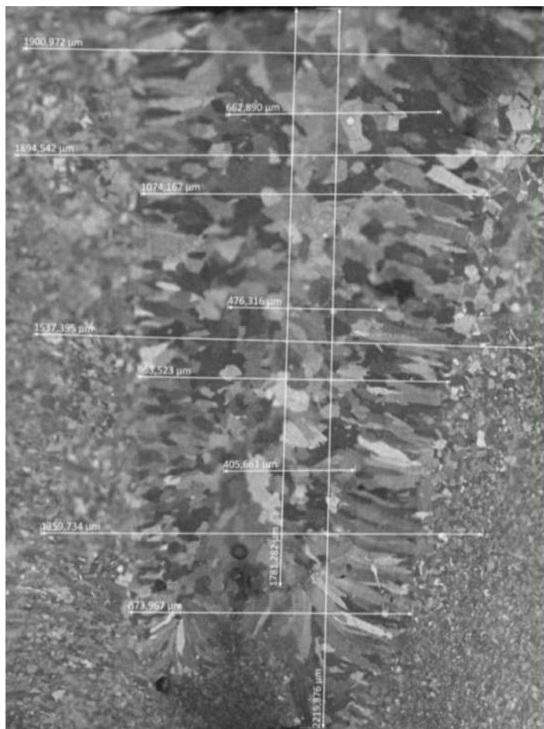
Mért adatok: beolvadás mélysége: 2,2 mm, a hegfürdő felső átmérője: 1,27 mm.



4. ábra Hegesztési hibák CT felvétele

A réz lézeres hegesztési minőségére vonatkozó előírások, szabványok (pl. ISO 13919-2) három minőségi szintet határoznak meg:

- B (Szigorú): Legmagasabb követelmény, nagy igénybevételnek kitett alkatrészeknél kritikus.
- C (Közepes): Közepes minőségi osztály.
- D (Enyhe): A kötések csak kisebb igénybevételnek felelnek meg.

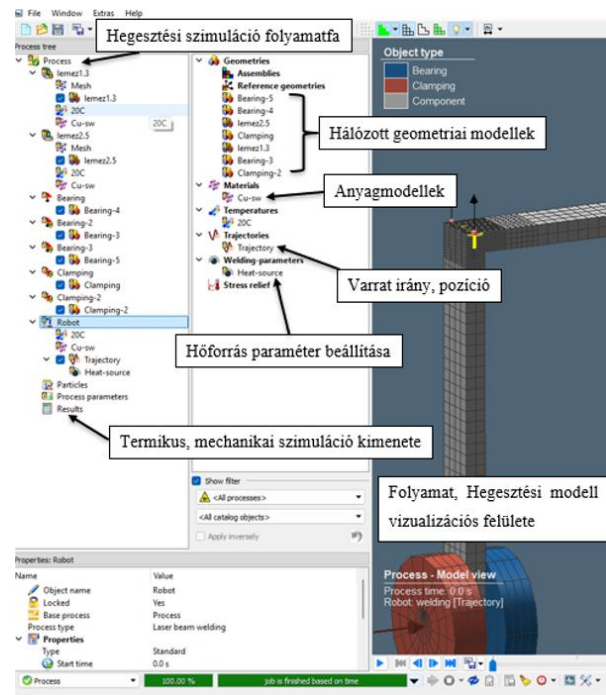


5. ábra A hegesztés keresztmetszeti csiszolatának mikroszkópos vizsgálata

A kötések vizsgálata során megfigyelhető hiba a varrat végéhez érve a beesés. Az idevonatkozó szabvány alapján a beesés megengedett mélysége B kategóriában a lemez vastagságához képest 0,1-szeres eltérés, amely a jelen esetben 0,3 mm. C kategóriában ez már 0,6 mm, D kategóriában pedig 0,9 mm. A D kategórián túlmenő besüppedés szakaszosan megengedhető, de csak az üzleti felek megegyezése alapján [6].

3.2. Szimulációs lehetőségek, hőforrásmodell

A szimulációs elemzés célja a valós fizikai folyamat minél pontosabb megismétlése virtuális környezetben. A szimulációk elkészítéséhez Simufact Welding szoftvert használtunk. A hegesztési szimulációs metodika alapján a következő bemeneti paraméterek pontos definiálása szükséges: Hálózott geometria, Anyagtulajdonságok, Határfeltételek, Ekvivalens hőforrás [7].



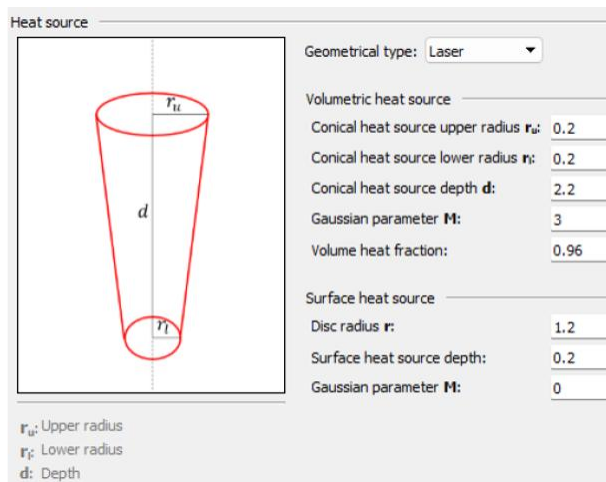
6. ábra: Simufact Welding grafikus felülete, szimulációs folyamat bemenetei

A szimuláció során használt lézer hőforrásmodell (volumetrikus kúpos) fő méretei:

- r_u (felső kör sugara) = 0,2 mm - a lézer optikai mozgatásának megfelelő körátmérő fele,
- r_l (alsó kör sugara) = 0,2 mm,
- d (hőforrás mélysége) = 2,2 mm - a csiszolati mintán mért beolvadási mélység,
- M (Gauss paraméter) = 3 - egyenletes, a hőforráson belüli hőeloszlást jellemzi,
- a további paraméterek a felszíni hőforrás alakját írják le, megválasztásuk a szoftver segédletében foglaltak alapján történt.

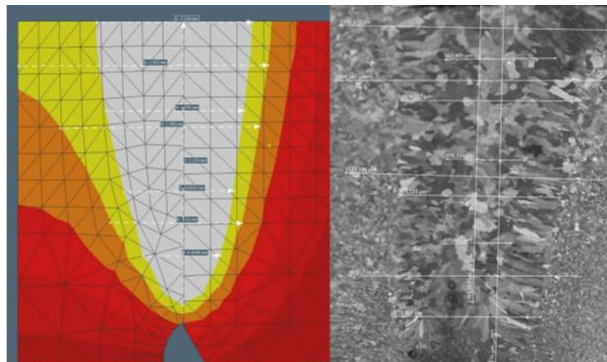
A szimuláció során alkalmazott hegesztési paraméterek a valós hegesztés felvett paramétereire alapján:

- hegesztési sebesség = 1,9 m/min,
- kombinált hegesztési teljesítmény = 3750 W,
- a hegesztés hatékonysága = 55%.

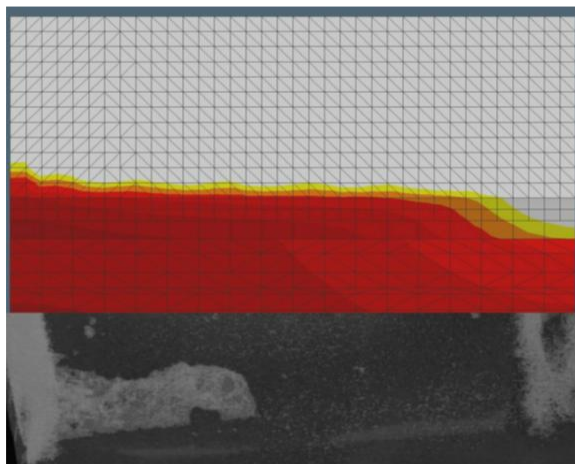


7. ábra Lézeres hőforrás méretei

Első lépésként a bizonytalan, 40 - 60 %-os tartományban szimulációs tesztek futtattunk a kötés felénél, minden hatékonysági tényező mellett megmérve a hegfürdő méreteit. A csiszolati képen mért méretekhez a legjobban megegyező eredményeket 55%-os hatékonyság mellett értük el.



8. ábra: Hőhatási övezet összehasonlítása 55%-os hatékonyság mellett, varrat felénél elmeszve



9. ábra Beolvadás az alkatrészek csatlakozásánál: szimuláció és CT felvétel összehasonlítása

A beolvadási zóna méretei a valóságban / szimulációban:

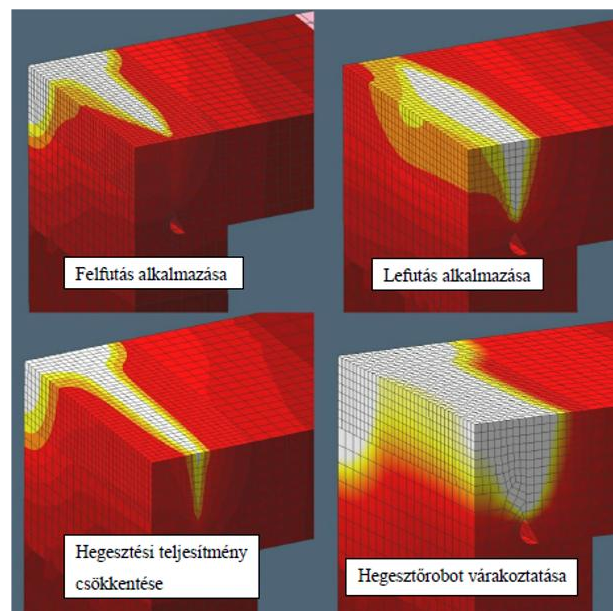
- beolvadás mélysége: 2,2 / 2,22 mm (1% eltérés),
- a hegfürdő felső átmérője: 1,27/1,22 mm (4% eltérés).

A hőhatási zóna minimális méret eltérései és a CT felvételekkel megegyező beolvadási karakterisztika alapján a hőforrásmodell kalibrálása sikeres volt.

3.3. A folyamat továbbfejlesztése, tesztek

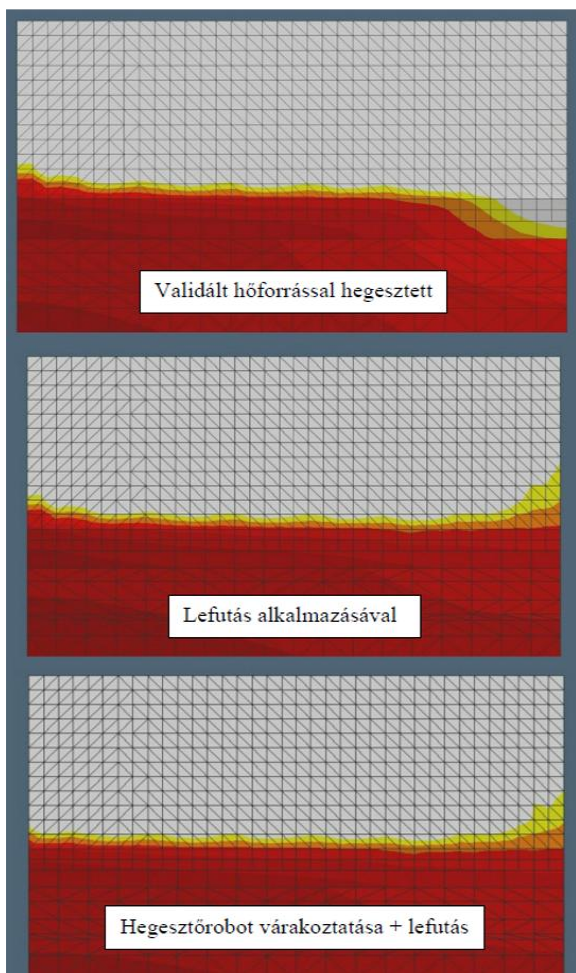
A hőforrásmodell validálása után a hűtölés okozta nagy varratbeesés kiküszöbölése volt a célunk. A hegesztési paraméterek (teljesítmény, hegesztő robot beállítások, hegesztés sebessége, hegesztőgép fel, lefutása) változtatásával, majd tesztszimulációk során megfigyelhető volt, hogyan befolyásolják a különböző beállítások a beolvadás mértékét.

A réz magas hővezetéséből adódó nehézségek miatt a kezdeti hőbevitel csökkentés nem lehetséges, mivel ez a varrat elején tovább rontaná a részleges beolvadást, csökkentve a hegesztés keresztmetszetét, minőségi besorolását. A lefutás alkalmazásával azonban csökkent a varrat végére feltorló hőenergia, ezzel a hegesztési hiba lehetősége. A beolvadás mértéke továbbra is megfelelő szinten maradt, továbbá a hegesztőrobot minimális várakoztatásával javulást értünk el a kezdeti beolvadás növelésében.

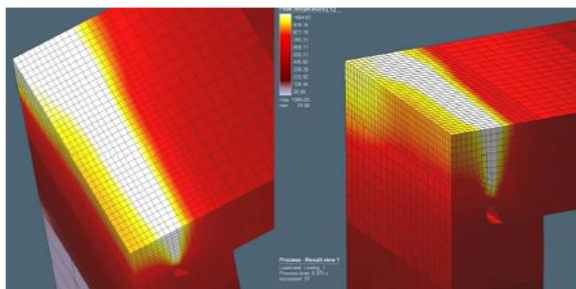


10. ábra Paraméterváltoztatások hatása a hegesztésre

Az eredmények alapján megfigyelhető a szimulációs futások kimeneteinek és a valóságban hegesztett darabok vizsgálati mintáinak hasonlósága. Ez megerősíti a szimulációs modell helyességét, amely előfeltétele a további, érdemi technológiafejlesztési szimulációknak.



11. ábra: Javított paraméterek hatása a beolvadás mélységére



12. ábra Hegesztett kötés képe: kalibrált hőforrással, paraméter javítások előtt, utána

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A végelem alapú hegesztési szimulációk robusztus és nélkülözhetetlen eszközökké váltak a modern gyártástervezésben. A bemutatott eredmények igazolják, hogy a termofizikai kihívásokkal küzdő anyagok, mint a nagy tisztaságú réz esetében is, a megfelelően validált szimulációs modellek nagy pontossággal képesek leképezni a valós ipari üzemi hegesztési technológiát.

5. SUMMARY

Finite element-based welding simulations have become robust and indispensable tools in modern manufacturing planning. The presented results demonstrate that, even for materials posing thermophysical challenges such as high-purity copper properly validated simulation models are capable of representing reality of the applied industrial welding technology with good accuracy.

7. IRODALOM

- [1] N. Judit, *Az ipar 4.0 fogalma, összetevői és hatása az*, Budapesti Corvinus Egyetem: Vállalatgazdaságtan Intézet, 2017.
- [2] H. v. Lintel, P. Böhlke, H.-G. Wobker, W. Michels, U. Krupp és K. Jahns, „Laser beam welding of deoxidized copper microstructure investigation and thermodynamic,” *Materialwiss. Werkstofftech*, 2021.
- [3] M. Dal és R. Fabbro, „An overview of the state of art in laser welding simulation,” *Optics & Laser Technology*, 2016.
- [4] D. Franco, J. Oliveira, T. G. Santos és R. Miranda, „Analysis of copper sheets welded by fiber laser with beam oscillation,” *Optics and Laser Technology*, 2021.
- [5] Shahin Sanati, Seyedeh Fatemeh Nabavi, A. Reihaneh Esmaili és Hamid Dalir, „A Comprehensive Review of Laser Wobble Welding Processes in Metal Materials: Processing Parameters and Practical Applications,” *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2024.
- [6] „Elektron- és lézersugaras eljárással hegesztett kötések. Követelmények és ajánlások az eltérések minőségszintjeire”. Magyar Szabadalom száma: ISO 13919-2:2021, június 2021.
- [7] E. S. V. Marques, F. J. G. Silva és A. B. Pereira, „Comparison of Finite Element Methods in Fusion Welding Processes—A Review,” *MPDI, metals*, 2020.