

Validált hőforrás modell létrehozása LMD eljárással készített termékek végeelemes szimulációjára

Development of a validated heat source model for the numerical simulation of laser metal deposition process

KISS László¹, BÉZI Zoltán², CSITKÓ Zsolt³

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Mérnöki Divízió H-3519 Miskolc, Iglói út 2.

e-mail: laszlo.kiss@bayzoltan.hu¹, zoltan.bezi@bayzoltan.hu², zsolt.csitko@bayzoltan.hu³

Abstract

Nowadays, additive manufacturing technologies are becoming more and more commonplace, and one of the promising technologies is Laser Metal Deposition (LMD). During the manufacturing process, parts can develop shape deviations and cracking due to rapid heating and solidification. To analyse these deviations, detailed finite element analysis (FEA) was performed to predict the geometry mismatches. In the present study, material testing and simulation results for simple single-row geometries are compared and analysed as part of a series of research studies. The aim is to produce a validated heat source model that can be used to simulate more complex structures in future research.

Keywords: additive manufacturing, 3D metal printing, LMD, laser welding, finite element modelling

Kivonat

Napjainkban egyre inkább előtérbe kerülnek az additív gyártástechnológiák, amelyek egyik ígéretes típusa az LMD (Laser Metal Deposition) eljárás. A gyártási folyamat során az alkatrészekben a gyors felmelegedés és megszilárdulás miatt alakulhatnak ki eltérések és repedések alakulhatnak ki. Ezen eltérések elemzése érdekében részletes végeelem-elemzés (FEA) kerül elvégzésre a geometria változások előrejelzésére. Jelen tanulmány egyszerű egysoros geometriákra vonatkozó anyagvizsgálati és szimulációs eredmények összehasonlítását és elemzését mutatja be egy kutatássorozat részeként. A cél egy validált hőforrásmodell létrehozása, amely a jövőbeni kutatások során összetettebb szerkezetek szimulálásához is felhasználható.

Kulcsszavak: additív gyártás, 3D fémnyomtatás, LMD, lézerhegesztés, végeelemes modellezés

1. Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb ütemben terjednek az additív gyártástechnológiák, melyek az ASTM International hivatalos megfogalmazása szerint "olyan folyamatok, amelyek során az anyagok összekapcsolása 3D modell adatokból történik, általában rétegről rétegre, szemben a szubtraktív gyártási eljárásokkal." [1]. Ez a definíció érvényes polimerek, kompozitok és fémek esetén is. Az jelenti a legnagyobb potenciált ezekben a technológiákban, hogy az alkalmazásukkal megvalósíthatók olyan geometriák, amelyekre más módon nincs lehetőség, ezért korábbi kötöttségek tűnhetnek el a gépészeti tervezés folyamatából.

A Bay Zoltán Kutatóközpont kutatási tevékenysége ezen a területen az LMD eljárásra terjed ki legátfogóbban. A technológia alkalmazásának legnagyobb korlátja jelenleg a gyártás során bevitt változó hőciklusokból adódó maradó feszültség és deformáció. Éppen ezért hatalmas igény van a fejlesztési folyamatokat támogató megbízható szimulációs eszközökre, hogy az esetleges gyártási hibák már a tervezés fázisában kiküszöbölhetőek legyenek.

A publikáció a szimulációs módszertan kidolgozásának kezdő elemét mutatja be, a validált hőforrás modell létrehozását.

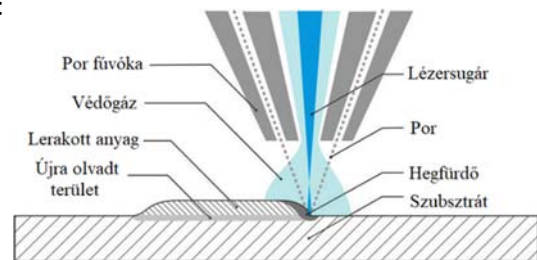
2. Az LMD technológia

Az angol Laser Metal Deposition kifejezésből származik az LMD rövidítés. Magyar szakirodalmi megfelelője nincs, lézerrel történő fém lerakásnak fordítható. Jól prezentálja a technológia fiatalságát, hogy nincsenek egységes elnevezések, ugyanannak a technikának a megnevezésére több eltérő név is létezik. Ilyenek a teljesség igénye nélkül például a Laser Cladding, Laser Engineered Net Shaping (LENS), Directed Light Fabrication (DLF), Laser Direct Metal Deposition (LDMD) [2].

A technológiát legegyszerűbben úgy lehet elképzelni, hogy egy lézersugár felmelegíti a munkadarabot és ezzel létre hoz egy hegfürdőt. A létre jött olvadék medencébe történik az alapanyag bevezetése egy a lézerrel koaxiális fűvókán keresztül. A por már olvadt állapotban kerül a hegfürdőbe, amelyet szilárd anyag vesz körül. A felületi feszültség révén ez lehetővé teszi az anyag felülről történő lerakását, így lényegében sok varrat egymásra hegesztéseként értelmezhető a folyamat. A gyártás során védő gáz alkalmazására van szükség. Az LMD eljárás sematikus ábrázolását az 1. ábra mutatja be. Az LMD technológia porokkal és huzalokkal valósítható meg, de összességében elmondható, hogy a porok alkalmazása lényegesen gyakoribb [3].

A kész termékek mechanikai tulajdonságait, illetve a létrehozni kívánt geometriától való eltérések mértékét számos paraméter befolyásolja, melyek az alábbiak:

- Sugárforrás teljesítménye (W)
- Előtolás sebessége (m/min)
- Por tömegárama (g/min)
- Porvivő gáz sebessége (l/min)
- Munkagáz sebessége (l/min)
- Lézersugár üzeme (pulzáló/folyamatos)
- Lézersugár folt mozgató stratégiája
- Lézersugár foltátmérője (mm)



1. ábra. Az LMD eljárás sematikus ábrázolása [4]

A publikációban elemzett minták a Kecskeméten található Diódalézer Központban lévő Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú gépen készültek. A 2. ábra ismerteti a berendezést a poradagolóval és az LMD technológia megvalósítására alkalmas fejet.



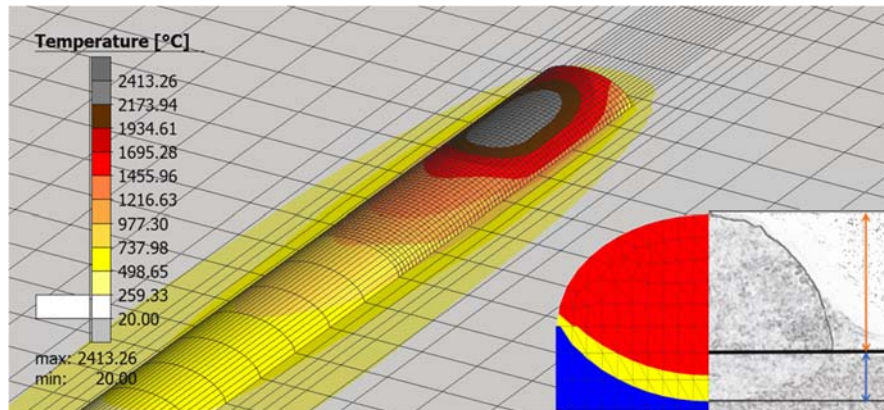
2. ábra. Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú berendezés a poradagoló egységgel és az LMD fej

3. Az elvégzett kísérletek

A validált hőforrás modell meghatározása 65 mm hosszú egy rétegből álló változó paraméterekkel készített minták elemzésén keresztül történt. Az alaplemez anyaga és a felhasznált por 316L jelű ausztenites acél. A vizsgálatok során fontos az anyagvizsgálati és a szimulációs eredmények összevetése, hogy láthatóvá váljanak az alkalmazott matematikai modell határai.

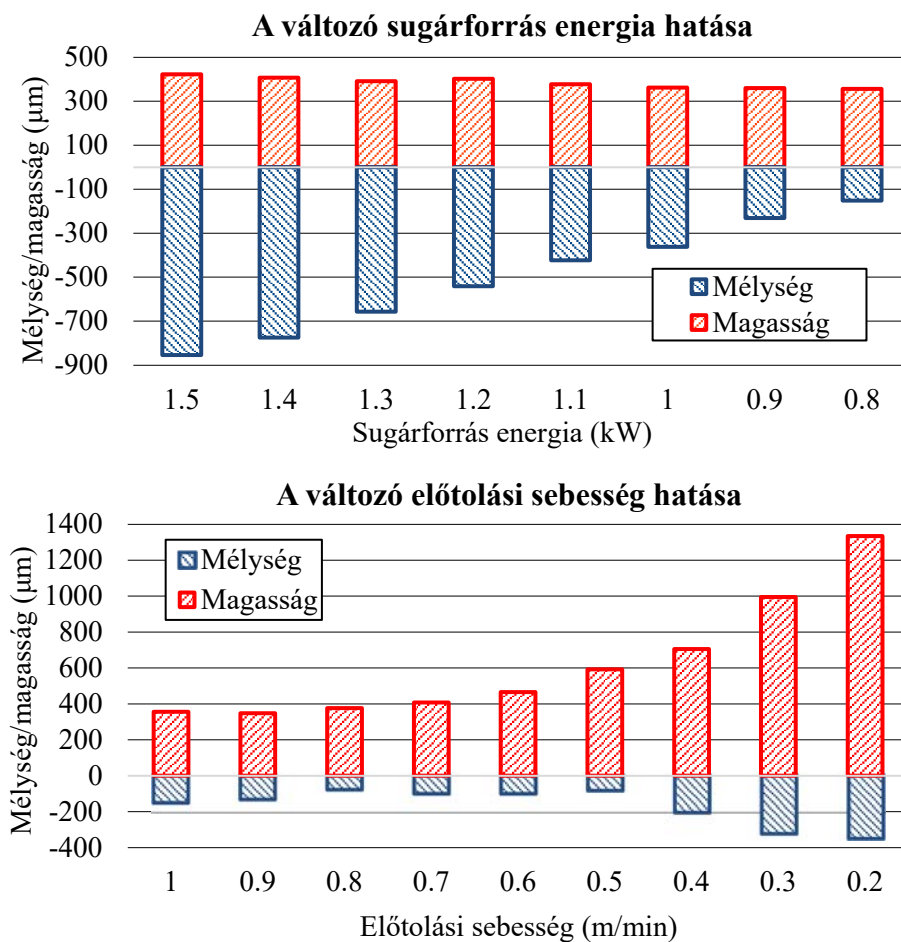
A gyártás végeredményét a legdominánsabban az előtolási sebesség és az alkalmazott sugárforrás teljesítménye határozza meg, ezért a vizsgálatok ennek a két fő paraméternek a változására fókuszálnak. A kísérleti minták létrehozása során a sugárforrás teljesítménye 1,5 kW értékről 0,1 kW lépésközzel 0,8kW értékig csökken állandó 1 m/min előtolási sebesség mellett. Az előtolási sebesség pedig 1 m/min sebességről 0,1 m/min lépésközzel 0,2 m/min értékig csökken állandó 800 W teljesítmény mellett. Összesen 16 kísérlet lett elvégezve a validált hőforrás modell felállításához. A többi paraméter tapasztalati adatok alapján lett meghatározva és minden esetben változatlanok voltak. A poradagoló fordulata 3 1/min, ami 6,5 g/min portömegáramot biztosít. A porvivő gáz sebessége 7,5 l/min, a munkagáz sebessége 8 l/min. A fókuszfolt

átmérője 2 mm. A vizsgálatok a legnagyobb mért beolvadási mélységre és a legnagyobb mért rétegmagasságra irányultak, melyek meghatározását a 3. ábra szemlélteti.



3.ábra. A rétegmagasság és a beolvadási mélység meghatározása

Az anyagvizsgálati eredményeket a 4. ábra foglalja össze. A 4. ábra (felső grafikon) alapján egyértelműen látható, hogy a bevitt teljesítmény csökkentésével elhanyagolható mértékben esik a létrehozott réteg magassága, azonban az átolvadási mélység jelentősen csökken. Tehát nagyobb teljesítmény esetén az energia inkább a beolvadási mélység növelésére fordítódik. A 4. ábra (alsó grafikon) alapján szembejövő, hogy a sebesség esésével nő a lerakott réteg maximális magassága is, azonban ez az emelkedés nem tekinthető lineárisnak. A beolvadási mélység tekintetében már nem fedezhető fel ilyen egyértelmű tendencia. Egészen 0,5 m/min sebességig kis mértékben csökken a beolvadás, innentől azonban jelentős mértékben kezd növekedni.



4.ábra. Az anyagvizsgálati eredmények [5]

4. A szimulációs eredmények ismertetése

A végeelemes analízisek a Simufact Welding 2021.1 szoftver segítségével lettek elvégezve. A program MSC Marc alapú megoldót használ, azonban tartalmaz hegesztés specifikus bővítményeket is. A tranziens numerikus modell a kísérlet elrendezésnek megfelelően lett felépítve. A kész modell 109 655 lineáris 8 csomópontú hasáb elemet és 119 607 csomópontot tartalmaz. A felhasznált alap lemez 100x30x8 mm befoglaló méretekkkel rendelkezik. A szimulációban szereplő 316L jelű ausztenites acél hőmérséklet függő anyagtulajdonságai a Simufact Welding adatbázisából származnak. Számos paraméter (ilyen például a lézer típusa) nem kritikus az eredmény szempontjából, ezeket a tényezőket be lehet építeni a hőforrás modellbe. A megfelelő bemeneti paraméterek alkalmazására kiemelt figyelmet kell fordítani, ezért a hőforrás modellt mindig szükséges validálni. A lézer hőforrás modellezésére a bevett módszer egy megfelelően definiált csonka kúp alkalmazása, melyet az 5. ábra szemléltet.



5. ábra. A lézer hőforrás modellezése csonka kúppal [6]

A csonkakúp egyes paramétereit a fókuszfolt átmérő alapján lettek meghatározva. A modell kalibrálása során különböző hőforrás mélységek kerültek vizsgálatra. Összesen három változat lett figyelembe véve. Az első esetben a hőforrás mélysége 0,52 mm. A második esetben a hőforrás mélységek megegyeznek a mért rétegvastagságokkal. A harmadik esetben a hőforrás mélysége végig 1,44 mm, amely megegyezik a legnagyobb mért rétegvastagsággal. A vizsgált 16 sor esetén ez 48 szimuláció lefutását jelentené, azonban külön lettek megvizsgálva az eredmények csatolt mechanikai-hőtani megoldó és hőtani megoldó esetén is. Mindent egybevetve tehát 96 szimuláció lett elkészítve és kiértékelve. Összesítve az tapasztalható, hogy az anyagvizsgálati eredményekkel akkor egyeznek legjobban a numerikus modellezés eredményei, amikor csatolt mechanikai-hőtani megoldó esetén a hőforrás mélysége 0,52 mm, ezeket az eredményeket és a mérésekből származó eredményeket ismerteti az 1. táblázat.

Kísérlet sorszama	Sugárforrás energia [kW]	Sebesség [m/min]	Beolvadási mélység [μm]			Magasság [μm]		
			Mérés	Szimuláció	Eltérés	Mérés	Szimuláció	Eltérés
1.	0.8	1	152	110	-27.6%	356	376	5.6%
2.	0.8	0.9	133	233	75.2%	348	368	5.7%
3.	0.8	0.8	80	295	268.8%	376	385	2.4%
4.	0.8	0.7	102	513	402.9%	408	414	1.5%
5.	0.8	0.6	102	472	362.7%	466	739	58.6%
6.	0.8	0.5	85	472	455.3%	592	610	3.0%
7.	0.8	0.4	202	439	117.3%	705	729	3.4%
8.	0.8	0.3	318	578	81.8%	995	1003	0.8%
9.	0.8	0.2	345	490	42.0%	1335	1373	2.8%
10.	1.5	1	854	645	-24.5%	422	373	-11.6%
11.	1.4	1	775	589	-24.0%	407	368	-9.6%
12.	1.3	1	657	536	-18.4%	391	367	-6.1%
13.	1.2	1	541	472	-12.8%	402	371	-7.7%
14.	1.1	1	423	399	-5.7%	377	370	-1.9%
15.	1	1	362	316	-12.7%	362	373	3.0%
16.	0.9	1	231	217	-6.1%	360	376	4.4%

1. táblázat. A szimulációs eredmények és a mérési eredmények összehasonlítása

Az 1. táblázatban láthatóak a beolvadási mélységek a végeselemes analízis és a mérési eredmények alapján, illetve a szimulációs eredmények százalékos eltérése a mért adatokhoz képest. Jól látható a numerikus modellek alapján is, hogy nem érdemes egy bizonyos teljesítménynél nagyobb alkalmas alkalmazni, mert az energia egyre inkább az alap újra olvasztására irányul. Az előtolási sebesség csökkentésével igen domináns eltérések jelennek meg a mért adatok és a meghatározott beolvadási mélységek között. Ugyanis nem csak a hegesztési vonalenergia nő, hanem megváltoznak a hegfürdő áramlási viszonyai is. Ebből kifolyólag a bemeneti paraméterek annyira megváltoznak, hogy a modell elveszti érvényességi tartományát. Az anyagvizsgálati és szimulációs eredményeket összevetve a hőforrás modell 900 W és 1 m/min, illetve 1100 W és 1 m/min esetén tekinthető validáltnak, hiszen ezekben az esetekben a legkisebb az eltérés. Ebből kifolyólag a kutatás későbbi fázisában a szimulációk és szerkezet építési kísérletek során ezeknek a paramétereknek az alkalmazására van szükség.

5. Összefoglalás

A kutatási tevékenység célja egy validált hőforrásmodell létrehozása volt LMD eljárás végeselemes szimulációjához, amely a jövőbeni kutatások során összetettebb szerkezetek végeselemes analízisére is felhasználható. A publikációban elemzett minták a Kecskeméti Diódalézer Központ Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú berendezésén készültek. Összesen 16 kísérlet lett elvégezve, ahol a sugárforrás energiája és az előtolási sebesség változott, a többi paraméter végig állandó volt. A felhasznált alapanyag 316L jelű ausztenites acél volt. Az elvégzett anyagvizsgálatok a legnagyobb mért beolvadási mélység és a legnagyobb mért rétegmagasság mérésére irányultak. A szimulációk a kísérleti elrendezésnek megfelelően lettek felépítve, több beállítási lehetőséget is megvizsgálva a hőforrás modell megfelelő kalibrálása érdekében. Összességében 96 darab szimuláció lett elvégezve és kiértékelve. Az eredményeket figyelembe véve sikerült meghatározni olyan paraméter halmazt, melyek esetén a hőforrás modell validáltnak tekinthető és alkalmas további összetettebb szerkezet építési kísérletek vizsgálatára.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a GINOP-2. 3.4-15-2016-00001 kódszámú projekt keretében valósult meg, melynek címe: Globális jelentőségű járműipari kutatás fejlesztési központ létrehozása Magyarországon a Bay Zoltán Közhasznú Nonprofit Kft. a Neumann János Egyetem és az AVL Hungary Kft. együttműködésében.

Irodalmi hivatkozások

- [1] ISO/ASTM 52900:2015.
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en:term:2.1.2> (Utolsó letöltés: 2023. 02.20)
- [2] J. Milewski: *Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*. Springer Series in Materials Science, 2017.
- [3] T. Török, T. Ferenczi, G. Szirmai: *Pormetallurgia*. Miskolc-Budapest, 2011.
- [4] Graf, S. Ammer, A. Gumenyuk, M. Rethmeier: *Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications*. Procedia CIRP, Volume 11, 2013.
- [5] Zs. Csitkó: *Változó gyártási paraméterek hatásainak vizsgálata 3D fémnyomtatással készített mintákon*. XXX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, 2022.
- [6] G. Buza: *Lézersugaras technológiák I*. Edutus Főiskola, 2012.0