

LMD technológia modellezési lehetőségei

Modelling options for LMD technology

Kiss László^a, Juhász Gergely^b, Csitkó Zsolt^c

^{a,b,c} Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

^a junior kutató, laszlo.kiss@bayzoltan.hu

^b laborvezető, gergely.juhasz@bayzoltan.hu

^c tudományos munkatárs, zsolt.csitko@bayzoltan.hu

Kulcsszavak

additív gyártás,
3D fémnyomtatás,
LMD,
lézerhegesztés,
végelemes modellezés

Keywords

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

Absztrakt

Napjainkba egyre inkább előtérbe kerülnek az additív gyártástechnológiák, amelyek egyik jelentős technológiája az LMD eljárás. A gyártási folyamat során az alkatrészekben a gyors felmelegedés és megszilárdulás miatt alakí eltérések és anyagfolytonossági hiányok jöhetnek létre. Ez a cikk a geometria változását előre meghatározni képes modellezési lehetőségeket vizsgálja. A vizsgálatok hitelességét mérési eredmények igazolják. A falon ciklikus tágulások és zsugorodások láthatóak, a szélek befelé hajlanak. A kísérleti és a numerikus eredmények összehasonlításai jó egyezést mutatnak a minta hosszirányában, de a magasság irányában eltérés figyelhető meg, amely a bemeneti paraméterek változásával magyarázható. Ez a felfedezés megfelelő kiindulási alapot jelent további kutatások elvégzésére.

Abstract

Nowadays, additive manufacturing technologies are becoming more and more prominent, and one of the promising technologies is the LMD process. During the manufacturing process, parts can develop dimensional deviations and material discontinuities due to rapid heating and solidification. This article explores modelling options that can predict geometry variation. The validity of the investigations is confirmed by measurement results. Cyclic expansions and contractions are observed in the wall, with the edges inclined inwards. Comparison of experimental and numerical results shows good agreement in the longitudinal direction of the specimen, but a deviation in the height direction, which can be explained by variations in the input parameters. This finding provides a good starting point for further research.

1. Bevezetés

Az anyag terméké formálásának lehetséges eljárásai mindig is kulcsszerepet játszottak az emberi civilizáció fejlődésében. Napjainkban egyre nagyobb teret hódítanak és dinamikus ütemben terjednek az additív eljárások [1]. A legnagyobb előnyük, hogy olyan geometriákat hozhatunk létre az alkalmazásukkal, amelyekre korábban nem volt lehetőségünk. Kötöttségek tűnhetnek el a gépészeti világból, amelyek teljesen új irányba terelhetik a fejlesztéseket. Persze itt nem maga a gép vagy az eljárás a lényeg, hanem az elvégzett szellemi munka hozzáadott értéke. Éppen ezért a tervezés területén is teljes szemlélet váltásra van szükség.

A fémek additív megmunkálására is számos versenyképes megoldás terjedt már el a gyakorlatban. Ennek egyik ígéretes megvalósítása az LMD (Laser Metal Deposition) eljárás [2]. Jelenleg a technológia legnagyobb problémáját a gyártás során bevitt változó hőciklusokból adódó deformációk és maradó feszültségek jelentik. A kész alkatrész mechanikai és geometriai tulajdonságaira nézve sajnos nehezen tisztázható a paraméterek hatása. Azonban a technológiában rejlő lehetőségek miatt hatalmas potenciál látható a terület kutatásában.

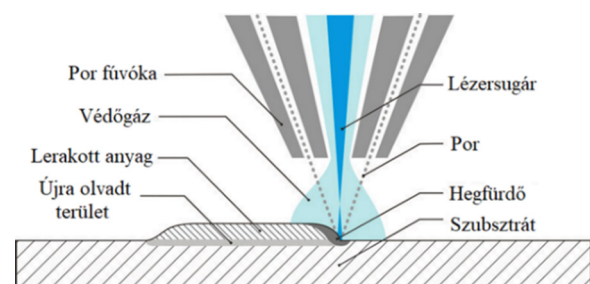
A kutatás a GINOP-2. 3.4-15-2016-00001 kódszámú projekt keretében valósult meg, amelynek címe: Globális jelentőségű járműipari kutatás fejlesztési központ létrehozása Magyarországon a Bay Zoltán Közhasznú Nonprofit Kft. a Neumann János Egyetem és az AVL Hungary Kft. együttműködésében. A korszerű gyártástechnológiák alprojekt célja a korszerű ipari lézertechnológiák autóiipari alkalmazási lehetőségeinek kutatása, különösen a 3D fémnyomtatás (additív gyártás) legújabb kutatás-fejlesztési eredményeinek autóiipari alkalmazásokhoz való implementálása és validálása. Új, eddig nem használt technológiák, eljárások bevezetési lehetőségeinek vizsgálata és elsőként való alkalmazása.

2. Az LMD eljárás ismertetése

Az LMD rövidítés az angol Laser Metal Deposition elnevezésből származik. A kifejezésnek magyar megfelelője nincs, lézerrel történő fém lerakásnak fordítható. A technológia fiatalságát jól szemlélteti, hogy nincsenek még egységes elnevezések. Több különböző kifejezést is használnak lényegében ugyanannak a technikának a megnevezésére. Ilyenek például a Laser Cladding, Laser Engineered Net Shaping (LENS), Directed Light Fabrication (DLF), Laser Direct Metal Deposition (LDMD) [2].

Az LMD technológia során a lézersugár felmelegíti helyileg a munkadarabot, hegfüldöt hozva létre. Ebbe az olvadék tócsába történik a por alapanyag bevezetése, egy - a lézerrel koaxiális fúvókán - keresztül inert gáz segítségével. A por már olvadt formában kerül bele a hegfüldőbe, amelyet szilárd anyag vesz körül. Ez teszi lehetővé a felületi feszültség révén az anyag felülről történő lerakását. A hegfüldő megszilárdulásával jönnek létre a lerakott rétegek. Tehát a folyamat felfogható sok-sok varrat egymásra hegesztéseként. A folyamat sematikus ábrázolását az 1. ábra szemlélteti.

Additív gyártással létrehozott alkatrészek minősége nagyban függ az alkalmazott hozaganyag tulajdonságaitól. LMD eljárás estén porok és huzalok állnak rendelkezésre, de összességében elmondható, hogy a porok alkalmazása lényegesen gyakoribb [3].



1. ábra: Az LMD folyamat sematikus ábrázolása [4]

2.1 A kísérleti berendezés bemutatása

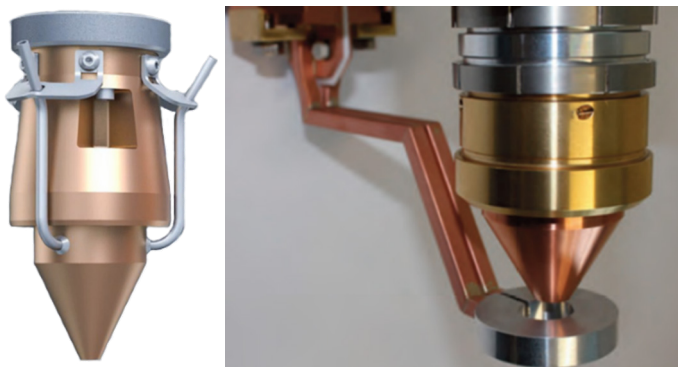
A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. ipari lézertechnológia kutatás-fejlesztési tevékenysége már 25 éves múltra tekint vissza. A budapesti telephelyen egy Trumpf TLF 5000 turbo gyártmányú széndioxid gázlaser található. A pályázat keretein belül a cég kecskeméti telephelyén beszerzésre került egy lényegesen modernebbnek mondható Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú berendezés, amelyen a mintadarabok legyártásra kerültek. A 2. ábrán látható a berendezés és a hozzá tartozó GTV 2/2 CF típusú poradagoló egység.



2. ábra: Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú berendezés és a hozzá tartozó GTV 2/2 CF elnevezésű poradagoló egység

A berendezés sugárforrása egy 4 kW-os teljesítményű szilárdtest sugárforrás. A berendezéshez két darab vágófej, egy hegesztő fej és egy lézersugaras felrakóhegesztésre alkalmas fej tartozik. Ezen kutatásban a lézersugaras felrakóhegesztésre alkalmas fej került alkalmazásra, mivel ez alkalmas az LMD technológia megvalósítására. Az alkalmazott fej a 3. ábrán látható.

A fény vezetése a sugárforrásból optikai szálon keresztül történik tükrök segítségével. A szál dual-core kialakítású, amely azt jelenti, hogy két mag található a szálaban. A külső mag (köpeny) átmérője 400 μm , a belső mag átmérője 100 μm .

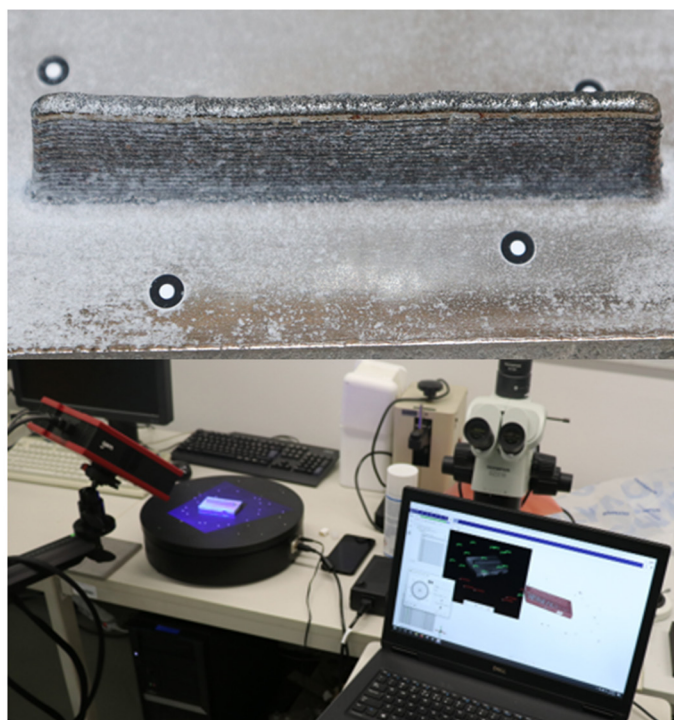


3. ábra: A lézersugaras felrakóhegesztésre alkalmas fej és 3D modellje

3. A kísérleti minta tulajdonságai

Ez a kutatás egy LMD eljárással készült 65 mm hosszú több réteg felhegesztésével létrehozott fal vizsgálatára irányul. A gyártási folyamat során 316L jelű rozsdamentes ausztenites acélpor került alkalmazásra, argon védőgáz használatával. Az alaplap, amelyre a minta került egy előmelegítés nélküli 8 mm vastagságú S235 típusú tábla.

A vizsgált fal 20 rétegből épül fel, melyek lerakása között 30 másodperc hűtési idő telt el, a rétegek közötti kiemelés pedig 0,5 mm. LMD technológia esetén létrejött minták geometria hűségét és különböző paramétereit számos tényező együttes hatása határozza meg [5]. Ezek a tényezők 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 mozgatás stratégiája, lézersugár foltátmérője (mm). A szerkezetépítés sikerességét leginkább a sugárforrás teljesítménye és az alkalmazott előtolási sebesség határozza meg. Ezek értéke 800 W és 0,9 m/min. A többi paraméter értéke rögzítve lett egy meghatározott értéken. A korábbi gyártási tapasztalatok felhasználásával a poradagoló fordulata 3 rpm, amely így 6,5 g/min portömegáramot biztosít. A porvivő gáz sebessége 7,5 l/min, a munkagáz sebessége 8 l/min. A fókuszfolt átmérője végig 2 mm.



4. ábra: Az elkészített fal digitalizálása

A 4. ábra az elkészített fal és annak GOM Aramis rendszerrel történő vizsgálatát mutatja be. Megállapítható, hogy a fal szélei befelé hajlanak. A fal oldalán ciklikus tágulások és zsugorodások láthatóak. A fal teteje enyhe U alakot mutat a torzulások következtében.

A digitalizáció eredményeképpen sikerült létrehozni a fal 3D modelljét, amely az 5. ábrán látható. Ez a modell már megfelelő lehetőséget biztosít arra, hogy a



5. ábra: Az elkészített fal 3D modellje

szimulációs eredményeket a valós darabbal össze lehet hasonlítani.

4. Az LMD folyamat modellezése

Az LMD folyamat során fellépő változó hőciklusok és a nagy hőbevitel következtében jelentős torzulások és maradó feszültségek keletkeznek. A szimulációs eszközök segítségével azonban ezek előre meghatározhatóak. A folyamat nagyon bonyolult és sok-sok paramétertől függ. Nyilvánvalóan a szoftver és az alkalmazott matematikai modellek is rendelkeznek kötöttségekkel, amelyeket helyén kell kezelni, különben hibás eredmények jönnek létre. A kutatások a Simufact Welding 2021.1 szoftver segítségével lettek elvégezve. A program a számítások során MSC Marc alapú megoldót használ és a fejlesztő csapat ezt egészítette ki hegesztés-specifikus bővítményekkel és módosításokkal. A szakirodalomban fellelhető pár példa arról, hogy számos esetben megfelelően tudták alkalmazni ezt a szoftvert [6-8] hasonló problémák esetén.

4.1 A lézersugár-anyag kölcsönhatásának az értelmezése

Háromféle lehetséges kimenetele van a lézersugár és az anyagok találkozásának. Melyek az alábbiak: az elnyelődés, az átérésztés és a visszaverődés. Ezek sok tényezőtől függnnek [9].

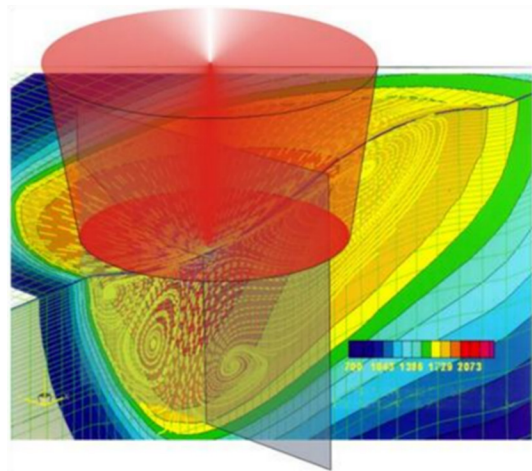
Fémek esetén a behatolási mélység közelítőleg 10^{-8} - 10^{-10} méter nagyságrendű. Ez azt jelent, hogy a rácsparaméterhez közeli nagyságrendről beszélünk. Ezért a lézer a fémekbe tulajdonképpen alig hatol be. A lézersugárral történő kölcsönhatás a vezetési elektronokon keresztül valósul meg. A fény elektromos tere kényszerrezgést idéz elő a vezetési elektronok gyorsításával. A gyorsított elektronok egy része a kényszerítő fényvel ellentétes fázisú, de azonos irányú teret keltenek, másrészt a felvett energiájuk egy részét az atomokkal való rugalmatlan ütközés útján adják át. Ez a mechanizmus okozza a fémek felhevülését a lézersugár hatására [10].

A lézersugár abszorpcióját számos tényező befolyásolja, melyek az alábbiak [10]: lézersugár beesési szöge, lézersugár teljesítménysűrűsége, lézersugár hullámhossza, elnyelő anyag felületi minősége, elnyelő anyag minősége, elnyelő anyag hőmérséklete. A vizsgálatok során 60 %-os abszorpciós érték került meghatározásra.

A lézersugár-fém kölcsönhatását úgy a legcélszerűbb

elképzelni, mint egy korongot a felület közelében. Erről a korongról fog az energia a távolabb fekvő részek felé terjedni hővezetés útján. Azonban a lézersugár energia utánpótlása folyamatos, így nem hűl le. Ezt a gondolatmenetet felhasználva a lézer modellezésére a legjobb módszer egy megfelelően megválasztott paraméterekkel rendelkező csonka kúp alkalmazása hőforrásként.

A 6. ábra prezentálja, hogyan értelmezhető a lézersugár modellezése csonka kúpként definiált hőforrás esetén. Az ábrán láthatóak a különböző nagyságú és irányú olvadáramlások is. Jól látható a hegfürdő alakjából, hogy a lézer haladási iránya jobbról balra történik.



6. ábra: A hőforrás csonkakúppal történő modellezése [10]

4.2 A modellezési lehetőségek

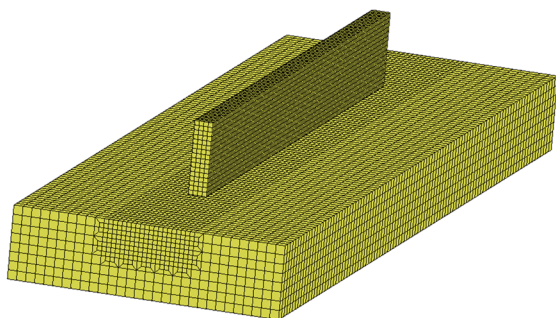
A probléma megoldására két különböző modellezési stratégia adott. Mindkettőnek megvan a maga létjogosultsága a feladat függvényében.

A hagyományos megközelítés szerint egymásra halmozódó lézerhegesztések sorozataként modellezhető a folyamat. A filozófiából adódóan minden egyes sort önálló testként vagy varratként kell kezelni. Ebben az esetben a soroknak az egymással való érintkezésének leírása egy bonyolult matematikai formula szerint történik, amely rendkívül megnöveli a számítási időt. Ezért ez a megoldás leginkább kisebb modellek esetén ajánlott. A felépített fal 20 sorból áll, ezért ebben az esetben nem célravezető ezt a módszert alkalmazni.

A másik, újabb szemlélet szerinti alkalmazás lényege, hogy a létrehozni kívánt geometria egyetlen testből áll, ellentétben az előzőleg bemutatott modellel. Tehát egyetlen deformálható test képviseli a hegesztési vonalak összességét. A lerakódás biztosításának érdekében elemkészleteket kell létrehozni, amelyeket a hőforrás egy adott időpillanatban érint. A szoftvernek nem kell a rétegek közötti kontaktokkal számolnia és az elkészített háló is lényegesen kevesebb csomópontból áll, ezért a számítási idő is sokkal kedvezőbb. Ezért ezzel a módszerrel került létrehozásra a végeselemes modell.

4.3 A végeelemes modell

Az alaplemez és a fal geometriája, illetve azok végeelemes hálója az MSC Marc 2019 program segítségével lettek létrehozva. A felhasznált végeelemes hálókat a 7. ábra prezentálja.



7. ábra: Az elkészített végeelemes háló

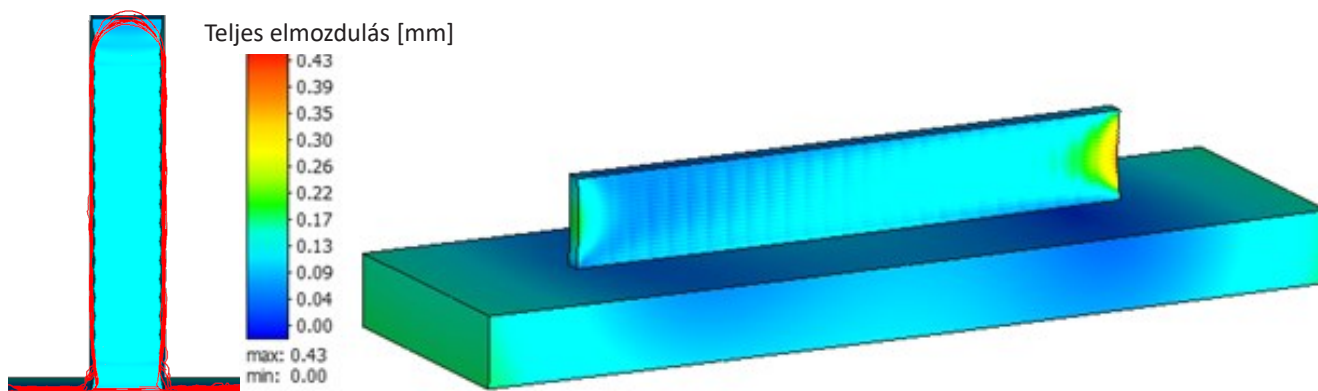
Az alaplemez hálózása sűrűbbre készült az épített fal közelében a pontosabb eredmények érdekében. A lemez 30x100x8 mm-es befoglaló méretekkkel rendelkezik. Összesen 44 440 csomópontból és 39600 darab 8 csomópontú lineáris téglá elemből áll. A lerakott fal geometriája a validált hőforrás modellnek megfelelően 2 mm széles, 10 mm magas és 65 mm hosszú. Összesen 11 143 csomópontból és 8320 darab 8 csomópontú lineáris téglá elemből áll. A háló kiosztása úgy készült, hogy 2 elemsor vastagsága egyezzen meg a feltételezett rétegvastagsággal.

A szimuláció 5 óra 14 percen keresztül futott. A szimulációs eredmények jó egyezést mutattak a mérési eredményekkel a hossz-és keresztirányú torzulások előre jelzése során.

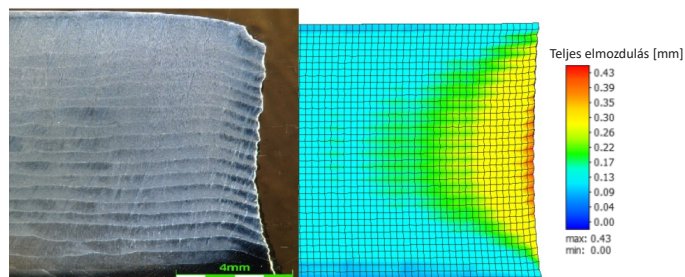
Az 8. ábra bizonyítja, hogy a szimulációnak sikerült előre megjósolni a geometria változását. Megfigyelhető a szélek befelé esése és az enyhe u alakú torzulás. A keresztirányú metszeten pedig láthatóak a ciklikus tágulások és zsugorodások.

Az egyetlen jelentős eltérés az elkészült fal magasságában van, hozzávetőlegesen 5-6%. Erre megfelelő magyarázatot nyújthat a 9. ábra.

A hosszirányú csiszolaton nem a rétegek láthatóak, hanem a beolvadási határvonalak. Nagyjából egységesnek tekinthető, de azért akadnak benne ingadozások.



8. ábra: A deformáció szimulációs eredmények alapján (a keresztmetszeti képen a pirossal jelzett körvonalak a 3D szkennelt ábrából készült körvonalak)



9. ábra: A hosszirányú csiszolat és a szimulációs eredmény (deformáció)

Egyértelműen látszódik, hogy a felső réteg vastagsága lényegesen nagyobb, mint a többi rétegé. A sorok egymásra rakásával mindig nő a fal kiinduló hőmérséklete. Ez azt eredményezi, hogy több por tud beletapadni. A hőmérséklet növekedésével nő az abszorpciós képesség is. Tehát változnak a bemeneti paraméterek. Ezen hatások ismeretében nagyobb értékű fókuszfolt emelés javasolt.

5. Összefoglalás

A projekt célja az LMD technológia modellezési lehetőségeinek a vizsgálata volt. A cikk egy 20 rétegből álló fal vizsgálatára fókuszált, ahol a rétegek között 30 másodperc hűtési idő került alkalmazásra. A próbatést a Kecskeméti Diódalézer Központ Trumpf Trulaser Cell 7020 típusú berendezésén készült. A minta digitalizálása GOM Aramis rendszerrel történt, hogy az eredmények megfelelően összehasonlíthatóak legyenek.

A mérési tapasztalatok alapján elmondható, hogy a szimulációk megfelelően jósolták előre a geometria torzulását. Megfigyelhető a szélek befelé esése és a vastagság menti ciklikus tágulások és zsugorodások. Az egyetlen jelentős eltérés az elkészült fal magasságában van. Ez magyarázható a szimuláció bemeneti paramétereinek a változásával. Ennek a vizsgálatára további kutatásokra van szükség.

Összességében elmondható, hogy a bemutatott modell már használható az LMD-geometriák hossz-és keresztirányú torzulásainak előrejelzésére. A mérési eredményekhez képest a magassági méretek 5-6%-os eltérést mutattak a szimulációk, melyek pontosabb leírása további szimulációkat igényel.

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.

Irodalomjegyzék

- [1] J. Milewski: Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry. Springer Series in Materials Science, 2017
- [2] F. Q. Ramalho: Study of the Laser Metal Deposition (LMD) technology in the automotive industry. School of Technology and Management of the Polytechnic Institute of Leiria, 2019
- [3] T. Török, T. Ferenczi, G. Szirmai: Pormetallurgia Poranyagok gyártása és feldolgozása, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2011
- [4] L. Kiss: Szimulációs módszertan kidolgozása LMD eljárással készített termék fejlesztési folyamatának támogatásához. Miskolci Egyetem, 2022
- [5] Zs. Csitkó: Változó gyártási paraméterek hatásainak vizsgálata 3D fémnyomtatással készített mintákon. XXX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, 2022
- [6] M. Biegler, B. Graf, M. Rethmeier: In-situ distortions in LMD additive manufacturing walls can be measured with digital image correlation and predicted using numerical simulations. Additive Manufacturing 20, 2018
- [7] M. Biegler, A. Marko, B. Graf, M. Rethmeier: Finite element analysis of in-situ distortion and bulging for an arbitrarily curved additive manufacturing directed energy deposition geometry. Additive Manufacturing 24, 2018
- [8] M. Biegler, Beatrix A. M. Elsner, B. Graf, M. Rethmeier: Geometric distortion-compensation via transient numerical simulation for directed energy deposition additive manufacturing. Science and Technology of Welding and Joining, 2020
- [9] S. Takács: Bórral mikroötvözött acélok lézersugaras hegesztése. Óbudai Egyetem, 2022
- [10] G. Buza: Lézersugaras technológiák I. Edutus Főiskola, 2012



Új járműipari hajtáslánc vizsgáló gép

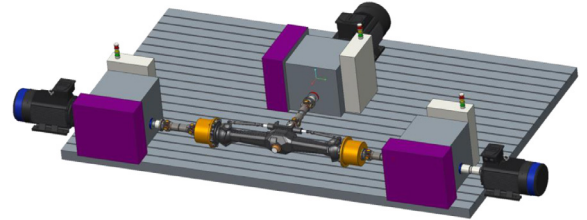
Hagyományos-, elektromos- és hibridhajtású, személy-, teher- és mezőgazdasági járművek

hajtásláncainak szerkezeti, tribológia és energetikai viszonyainak vizsgálatára alkalmas berendezést

szerezett be a

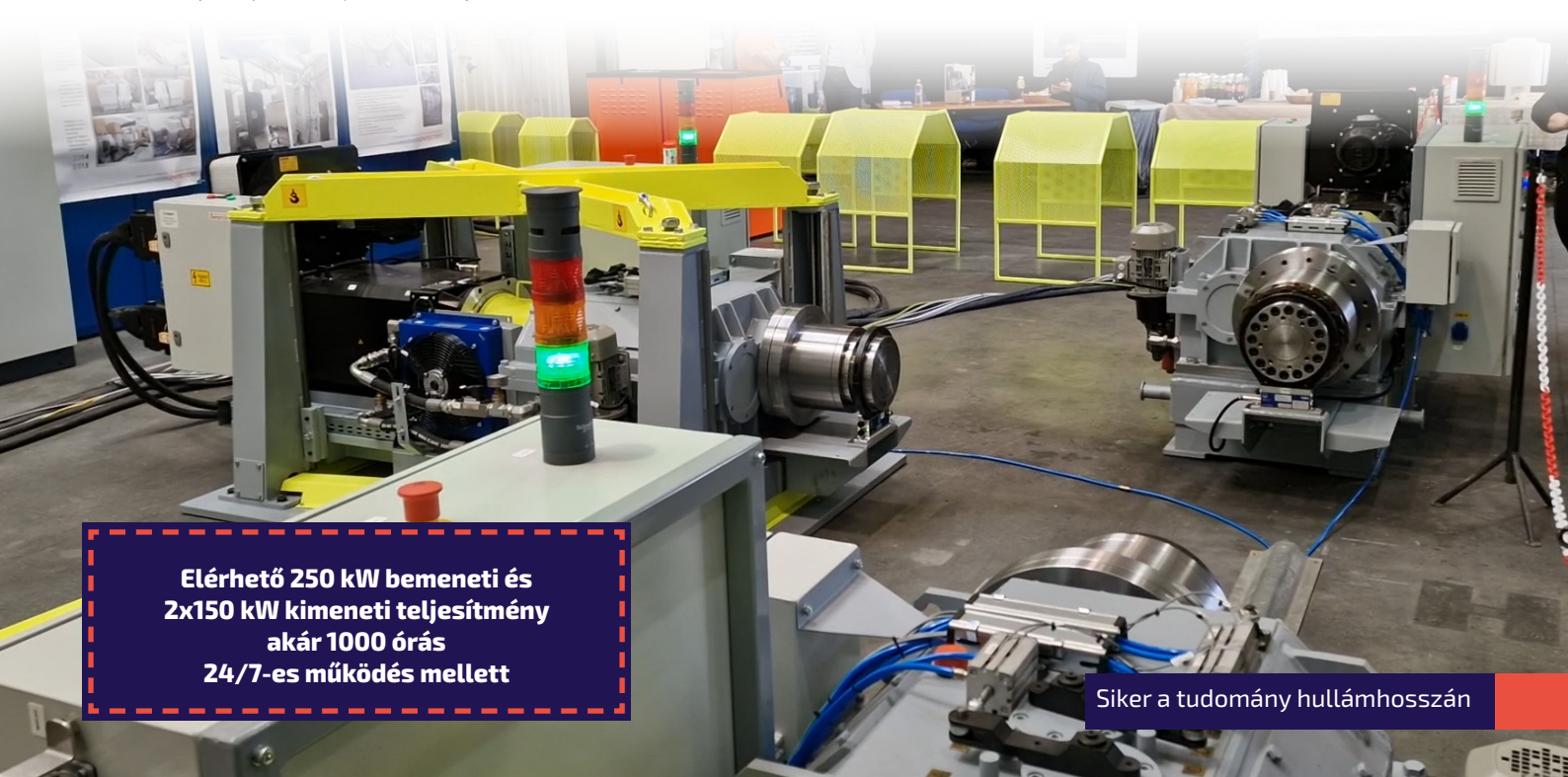
Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.,

mely képes teljesítmény- és funkcionális tesztre.



Kapcsolat

Rózsahegyi Péter
Anyagvizsgáló Osztály
3519 Miskolc, Iglói út 2.
peter.rozsahegyi@bayzoltan.hu



**Elérhető 250 kW bemeneti és
2x150 kW kimeneti teljesítmény
akár 1000 órás
24/7-es működés mellett**

Siker a tudomány hullámhosszán