

FÉMPORFÚVÁSOS LÉZERSUGARAS FELRAKÓHEGESZTÉSSEL KIALAKÍTOTT RÉTEGEK VIZSGÁLATA

EXAMINATION OF LAYERS FORMED BY METAL POWDER BLOWING LASER BEAM WELDING

Gégény Ádám^{0009-0004-5775-7327 1*}, Hareancz Ferenc^{0009-0000-3996-5887 2}, Juhász Gergely^{0000-0002-3412-0137 2}

¹ Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar

² Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék
<https://doi.org/10.47833/2025.2.ENG.005>

Kulcsszavak:

Additív technológia
Laser Metal Deposition
Felrakott rétegek
Szövetszerkezet vizsgálat
Keménységvizsgálat

Keywords:

Additive technology
Laser Metal Deposition (LMD)
Cladding layers
Microstructure analysis
Hardness analysis

Cikk történet:

Beérkezett 2025. január 25.
Átdolgozva 2025. április 22.
Elfogadva 2025. augusztus 25.

Összefoglalás

A kutatás során porfúvásos lézeres felrakóhegesztéssel készült keménységű ötvözetek tulajdonságait vizsgáltuk, melyeket előkísérletként végeztünk el. A felrakóhegesztések egy 45SiCrV6 alapanyagra történtek, Metco 5163, Metco 45C-NS és m4p V15-Fe keménységű ötvözetekkel. Ezek az ötvözetek nem a porfúvásos lézeres felrakóhegesztés technológiájához készültek, ezért a kutatásunk célja, hogy vizsgáljuk a felrakás megvalósíthatóságát. A vizsgálatok során optikai mikroszkópot és Vickers keménységmérést alkalmaztunk. Az eredményekből látható, hogy a felrakások nem minden esetben megfelelőek, ezt okozhatja anyagsajátosság is, valamint a gyártási paraméterek további optimalizálására is szükség lehet.

Abstract

The properties of carbide alloys prepared by powder-blasted laser cladding were investigated as a preliminary experiment. Deposited layers were created on a 45SiCrV6 substrate utilizing Metco 5163, Metco 45C-NS and m4p V15-Fe carbide alloys. These alloys were not designed for powder blown laser deposition welding technology; thus, the objective of our research is to ascertain the viability of this technique. Optical microscopy and Vickers hardness measurement were employed in the investigations. The results were not always great. This may be caused by material properties, and further optimization of the manufacturing parameters may also be necessary.

1. Bevezetés

Napjainkban a lézeres technológiák sokféle területen nyújt új lehetőségeket, például a mérés-technika vagy a távvezérlés területén. Ipari felhasználás szempontjából jellemzően különböző felületmódosító eljárásoknál találkozunk nagyteljesítményű lézerekkel [1].

A keménységű anyagok kiemelkedő tulajdonságai miatt széles körben használatosak az ipari alkalmazásokban, mint például a repülőgépipar, gépgyártás és építőipar. A hagyományos bevonatolási és szinterezési technológiák nagy kihívásokkal szembesültek ezen rétegek

* Kapcsolattartó szerző: Hareancz Ferenc
E-mail cím: hareancz.ferenc@nje.hu

létrehozásában, leginkább, amikor vastag felrakást szerettek volna létrehozni. Ezen technikákkal szemben a fémporfúvós lézeres felrakóhegesztés (LMD – Laser Metal Deposition) technikája egy ígéretes alternatívát kínál, amellyel a megfelelő paraméterekkel tömör rétegeket lehet létrehozni, továbbá akár az additív gyártás lehetőségét is biztosítja [2, 3].

Jellemzően többféle anyagot lehet gyártani ezen eljárással, például alumíniumot és ötvözeit, rozsdamentes acélt, de akár titániumot is. Minden ezen eljárással készített anyagról elmondható, hogy jó a kopásállóságuk, valamint a korrózióállóságuk [4, 5].

A fémporfúvós lézeres felrakóhegesztés során a lézer energiája megolvasztja az alaplemezt, amire réteget kívánunk felvinni. Az olvasztás során egy adott térfogatú olvadátkócsa jön létre, amelybe egy poradagoló segítségével fémport juttatunk el inert gázzal. A fémpor az olvadátkócsába történő becsapódása után megolvad, keveredik az alaplemezzel és egy az alaplemez síkjához képest magasabb réteg jön létre. Ezt a folyamatot ismételve több réteget tudunk létrehozni és így akár testeket is építhetünk. A rétegről rétegre való felrakás során a test összetétele konvergálni fog a hozaganyagéhoz, így elérhetjük az ötvözet anyagtulajdonságait. A paraméterek megfelelő megválasztásával minimalizálni lehet az alapanyag felkavarodását, precízen szabályozható rétegvastagságot tudunk létrehozni és csökkenteni tudjuk a bevitt hő mennyiségét a hagyományos technológiákhoz képest [6].

Érdemes megemlíteni, hogy a gyártás során a keletkezett bevonatot vagy munkadarabot utómegmunkálni szükséges, egyik bevált módszer a lézeres felületi polírozás, ahol a felrakás felületére merőleges lézernyaláb képez olvadékmedencét, majd ez nagy sebességgel végighalad a megfelelő felületen [7]. Kiemelendő még, hogy hagyományos forgácsolási eljárások is alkalmazhatók, mint az esztergálás és a marás [8], viszont itt a rezgéseket és vibrációkat is figyelembe kell venni [9].

2. Felhasznált anyagok és berendezések

2.1. Felhasznált anyagok

A kísérlet során felhasznált alapanyag kémiai összetételét egy Foundry-Master Pro spektroszkóppal határoztuk meg. A vizsgálat eredménye alapján az anyag egy 45SiCrV6 ötvözet, melynek kémiai összetételét az első táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A 45SiCrV6 kémiai összetétele

Megnevezés	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	V
45SiCrV6	Bázis	0,359	1,3	0,613	1,39	0,06	0,1	0,1	0,008	0,119	0,01	0,08

Hozaganyagként egy WC, egy VC és egy kobalt bázisú fémötvözeteket választottunk. A technológiához választott fémporok gázzal atomizáltak, szemcseméretük 50-150 µm. A hozaganyagként választott ötvözetek kémiai összetételét a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A kísérlet során használt hozaganyagok kémiai összetétele [10, 11]

Metco 5163	W	Co	Cr	C	Fe		
min.	Bázis	9	3,5	4,8			
max.		11	4,8	5,8	1		
Metco 45C-NS	Co	Cr	W	Ni	C		
min.	Bázis	25,5	7,5	10,5	0,5		
V15-Fe	Fe	C	Mo	Mn	Cr	Si	V
min.	Bázis	3,5	0,5		12,5		14
max.		4,5	1,5	2	14,5	2	16

2.2. Alkalmazott berendezések és lézeres paraméterek

A lézeres felrakóhegesztéseket egy Trumpf TruLaser Cell 7020-as berendezéssel végeztük, melynek sugárforrása egy TruDisk 4001 [12]. A hozaganyag eljuttatása a munkaterületre egy GTV PF2/2 CF poradagolóval történt. A megmunkálójeg egy MSO70-es lézeres felrakóhegesztésre alkalmas optikával történt. A megmunkálóoptikán egy SO12 típusú háromsugaras fúvóka található, mely a porszórást 12 mm-re fókuszálja, melynek 2,5 mm-es az átmérője. A lézeres felrakóhegesztés állandó paramétereit előkísérletek alapján határoztuk meg, melyek 3 mm-es lézer foltátmérő, 7 l/perc térfogatáramú porvívő- és védőgáz és 60%-os sávok közötti átfedés volt. Az ötvözetekként változtatott paramétereket a 3. táblázat tartalmazza [12].

3. táblázat: A változtatott paraméterek összefoglalója

Megnevezés	Teljesítmény [W]	Megmunkálás sebessége [mm/perc]	Poradagoló fordulatszám [1/perc]
Metco 5163	1000	700	3,5
Metco 45C-NS	1275	300	3
m4p V15-Fe	600	750	2,5

Előkísérletként először egy réteget vittünk fel az alapanyagra, melyet megmértünk. A rétegvastagság a Metco 5163 esetén 0,8 mm, a Metco 45C-NS esetén 1,8 mm, V15-Fe esetén 0,86 mm. A mért rétegmagasság segítségével három vagy öt réteges felrakást készítettünk és ezeket vizsgáltuk.

2.3. Vizsgálati eljárások

A felrakott rétegeket optikai mikroszkóppal és Vickers keménységméréssel vizsgáltuk. Az optikai vizsgálatokat egy Zeiss Axiolmager 2 típusú mikroszkóppal készítettük. A minták előkészítése során ügyeltünk arra, hogy mind az optikai mérésekhez, mind a keménységmérésekhez megfelelő legyen. A melegbeágyazással készített darabokat csiszoltuk és políroztuk, majd 2%-os nitallal marattuk.

A Vickers keménységméréseket egy Struers Duramin 100 típusú keménységmérőn végeztük, amely során a terhelőerő 9,81 N (1 kgf) volt. A méréseket a réteg tetejétől az alaplemez felé 0,2 mm távolsággal készítettük.

A wolfram-karbidos anyagnál a hibák várhatóak, porozitást okozhatnak a kisméretű karbid részecskék, valamint az, hogy ezen karbid részecskék megkötik a közegben az oxigént és feloldódnak [13].

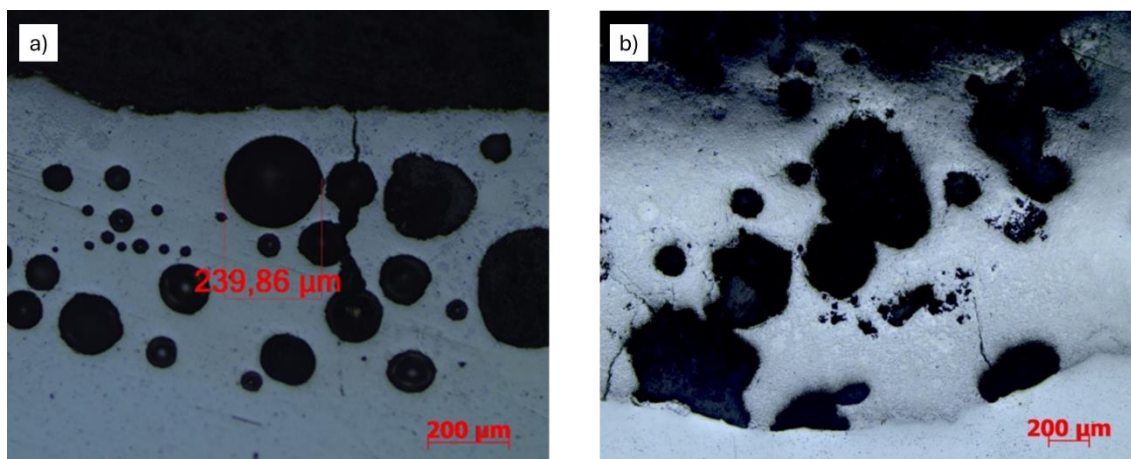
Kobalt alapú felrakások előnye, hogy alacsony energiabevitel mellett lehet a vékony rétegeket felrakni [14].

A vas-alapú ötvözetekre pedig egyes kutatások jó forgácsolhatóságot igazolnak [15].

3. Eredmények

3.1. Metco 5163 felrakás eredménye

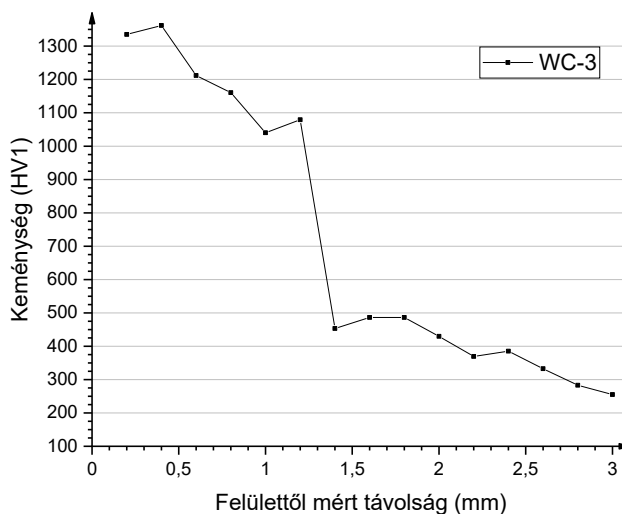
A Metco 5163 ötvözet felrakása során porozitások láthatóak a rétegben. A porozitások valószínűsíthetően a WC felforrásának köszönhetőek. A porozitások a teljes rétegben megtalálhatóak, melyek körülbelül maximálisan 250 µm. Az 1. ábrán 3 réteg felrakása látható, mely során Metco 5163 ötvözetet használtunk.



1. Ábra Metco 5163 három rétegű felrakás optikai mikroszkópos felvételei

Az 1. ábra a) és b) felvételein látható, hogy az alaplemeztől és a réteg tetejétől is több repedés található a létrehozott rétegben.

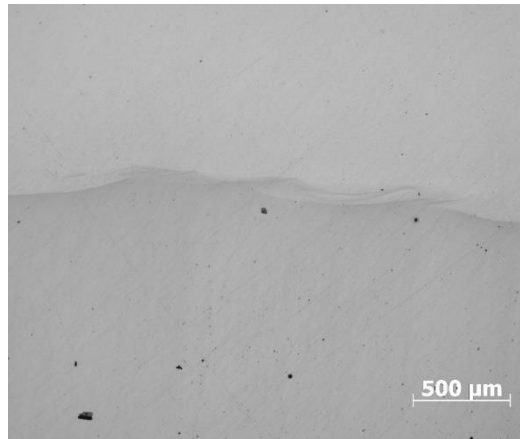
A 2. ábrán a felrakott réteg keménységmérésének eredménye látható. A keménységmérési eredményeket minden esetben a 3 egymásra rakott réteg esetében értékeljük. A diagram értékeiből jól látszik, hogy 3 eltérő tartományról tudunk beszélni. A felrakott rétegben a magas WC tartalomnak köszönhetően a keménység jelentős, a maximálisan mért keménység 1641 HV volt. Látható egy átmeneti zóna is ahol a keménység hirtelen de folyamatosan lecsökken, ez a keveredési zóna. Illetve a WC tartalom megszűnésével a keménység az alapanyag keménységére csökken. A magas WC-tartalomnak köszönhetően, az eredmények alapján, minden bizonnyal a felrakott réteg magas keménységgel és jó kopásállósággal rendelkezik



2. Ábra A Metco 5163 típusú ötvözet felrakásának keménységmérési eredménye

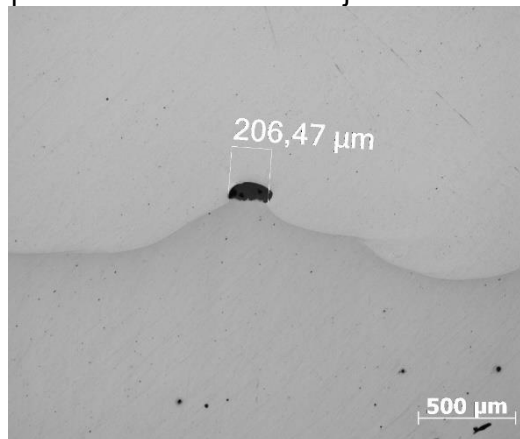
3.2. Metco 45C-NS felrakás eredménye

A Metco 45C-NS felrakásakor a keveredési zóna és szubsztrát határán jelentősen kevesebb hiba lépett fel és a készült rétegek ezen ötvözet esetében voltak a leghomogénebbek. A keresztmetszeti vizsgálat alapján megfigyelhető a réteg keveredése, amelyet az 3. ábra szemléltet.



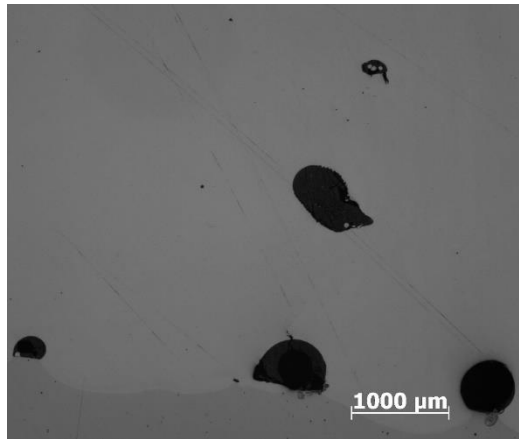
3. Ábra A szubsztrát és 45C-NS keveredése

A 4. ábra szemlélteti, hogy a réteghatáron tapasztalhatóak porozitás, azonban a réteghatár többnyire homogén. Ez a megfigyelés arra enged következtetni, hogy az alkalmazott anyag felvitele során megfelelő feltételek valósultak meg, melyek elősegítették a zárványok képződésének visszaszorulását és a réteghatárok kialakulásának javítását.



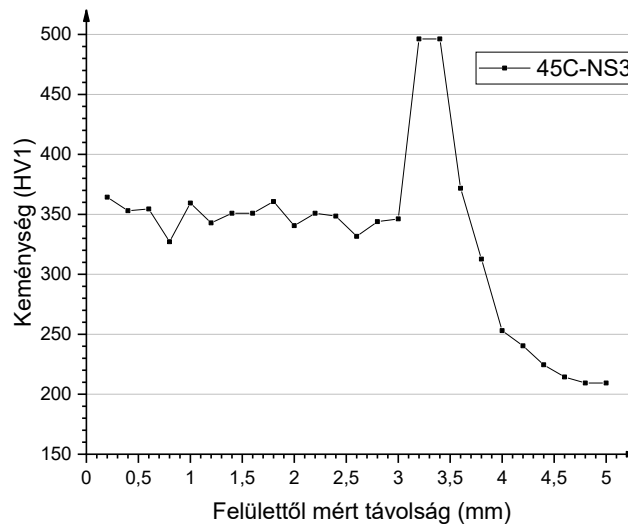
4. Ábra Porozitás a határfelületen

A 5. ábrán a többréteges felrakás esetében a felrakott réteg keresztmetszete látható, amelyben több, eltérő méretű és alakú porozitás (fekete foltok) figyelhető meg. A pórusok eloszlása nem teljesen egyenletes: egyesek csoportosulnak, míg mások elszórtan jelennek meg. Alakjuk többnyire közel gömb vagy cseppformát mutat, ami arra utal, hogy a keletkezésükkor folyadék- vagy gázfázisból való „buborékként” szilárdultak meg, illetve záródtak be a felrakott rétegbe. A pórusok mennyisége és mérete fontos tényező a réteg mechanikai tulajdonságai szempontjából. A nagyobb, összefüggő üregek gyengíthetik a bevonatot, illetve a fáradással szembeni ellenállást is csökkenthetik. Előfordulásuk hátterében állhatnak többek között nem optimális felrakási paraméterek.



5. Ábra Az ötréteges felrakás keresztmetszeti hibái

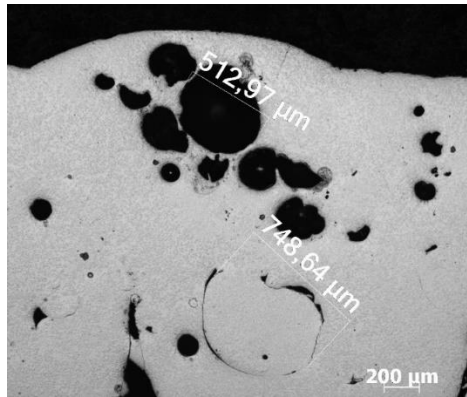
A Metco 45C-NS keménységértékeit a 6. ábra mutatja. A mérés határfelületről az anyag belseje felé történt. A felrakott réteg esetében a mérési adatok többnyire egységes értéket mutatnak, ami arra utal, hogy a bevonat tulajdonságai viszonylag állandóak. A 3 és 3,75 mm közötti átmeneti zónában felkeményedés tapasztalható, majd hirtelen visszaesik a keménység az alapanyag keménységére.



6. Ábra Metco 45C-NS keménységértékei

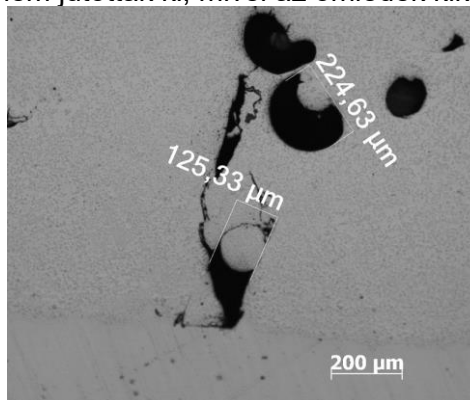
3.3. m4p V15-Fe felrakás eredménye

A V15-Fe ötvözzel végzett kísérleteink esetében is jelentős mértékű porozitásokat figyeltünk meg a felrakott rétegben, melyet a 7. ábra szemléltet. A felrakások során több paraméter tesztelésre került, mivel a létrejövő ömledék az előzőkéhez képest sűrűbb volt. A magas króm-, molibdén- és vanádium tartalmú ötvözetek általában nagyobb sűrűséggel rendelkeznek, melynek indoklása ezen elemek magas olvadáspontja. Emiatt a programozás során számított átfedések nem valósultak meg megfelelően, illetve a keresztmetszetben több porozitás is létrejött, amely közül néhány össze is szakadt.



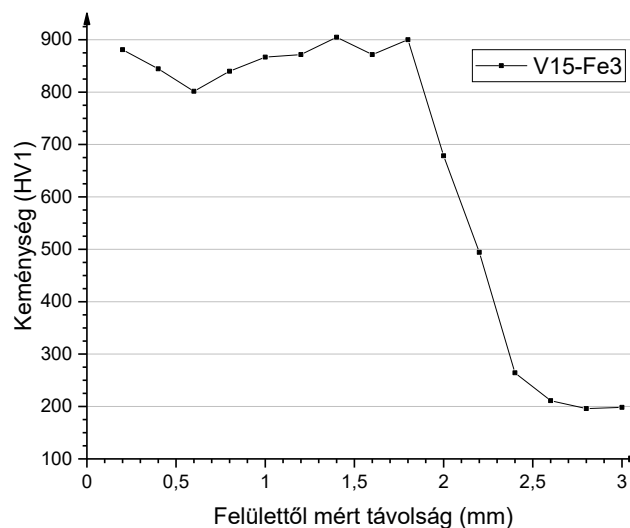
7. Ábra A felrakott réteg felső részén keletkezett hibák

A keveredési zóna és a szubsztrát határfelületén szintén létrejöttek porozitások (8. ábra). A porozitások alakjából arra lehet következtetni, hogy a porozitások az ömledék zónában elindultak felfelé, de az ömledékből már nem jutottak ki, mivel az ömledék kikristályosodott.



8. Ábra Több hiba egy helyen a szubsztrát közelében

A 9. ábrán látható a 3 rétegben történt felrakás keménységmérési eredménye. Szintén 3 jól elkülönülő részt figyelhetünk meg. A felrakott rétegben a keménység kis mértékben ingadozik, ez köszönhető annak is, hogy a több porozitás is előfordul a rétegben, amelyek torzíthatják az eredményeket. A 1,75 és 2,25 mm közötti keveredési zónában már észrevehető a felrakott réteg és a szubsztrát keménységének fokozatos közeledése. 2,5 mm fölött már egyértelműen a szubsztrát keménységét mérjük.



9. Ábra m4p V15-Fe keménységértékei

4. Összegzés

Elmondható a vizsgálatokról, hogy keménység szempontjából a Metco 5163 szerepelt a legjobban, valamint a V15-Fe értékei is biztató értéket mutatott. A keresztmetszeti kép azonban ezzel ellentétben, a 45C-NS a leghomogénebb anyag a három közül, felrakás szempontjából ezt a legelőnyösebb alkalmazni a kiválasztott anyagok közül. Keresztmetszeti hibák szempontjából hatalmas porozitások, zárványok és repedések észlelhetők, ezek nagyon nagy intervallumon is mozognak, akár 700 mikron fölé is mehet, sőt szabad szemmel is látható bizonyos esetekben. Ezen porozitások kiküszöbölése további kutatást igényel, melyben vizsgáljuk a lézer teljesítményének, a gyártás sebességének, a por áramlásának a hatásait a felrakott keresztmetszetre, törekedve arra, hogy minél homogénebb keresztmetszetet kapjunk. Tapasztalatok azt mutatták, hogy a gyártás során is akadtak problémák, a Metco 5163 esetén nagyon világítóan égett a felrakott réteg, m4p V15-Fe esetén szikrázás volt tapasztalható, valamint füstképződés, valószínűsíthetően valamelyik komponens égett el gyártás közben. Metco 45C-NS esetében apróbb keresztmetszeti hibák tapasztalhatók, azonban repedések nincsenek, a hibák leginkább a hordozóanyag és a felrakott réteg határán található. Megfigyelhető többrétegű felrakásoknál keveredés, ami a keménységet is befolyásolja, növeli azt. További kutatási lehetőség e témában, a Metco 45C-NS-el való további felrakások elvégzése más, bonyolult geometriával, valamint az m4p V15-Fe és a Metco 5163 esetében a gyártási paraméterek finomhangolása, illetve további bonyolultabb geometriák felrakása.

Köszönetnyilvánítás

A 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1- EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] E. Bitay, Lézeres felületkezelés és modellezés, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Cluj-Napoca/Kolozsvár, 2007
- [2] L.Zhu et al.: Recent research and development status of laser cladding: A review, Optics & Laser Technology, 2021, Vol. 138, DOI: [10.1016/j.optlastec.2021.106915](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915)
- [3] Dong-Gyu Ahn: Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2022, Vol. 9, pp.1215 DOI: [10.1007/s40684-020-00302-7](https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7)
- [4] A.A.Siddiqui, A.K. Dubey: Recent trends in laser cladding and surface alloying, Optics & Laser Technology 2021, Vol. 134, DOI: [10.1016/j.optlastec.2020.106619](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106619)
- [5] K.Wang et al.: Research and Progress of Laser Cladding: Process, Materials and Applications, MDPI Coatings, 2022, Vol. 12, Issue 10, DOI: [10.3390/coatings12101382](https://doi.org/10.3390/coatings12101382)
- [6] Y.Liu et al.: Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review, Journal of Manufacturing Processes, 2021, Vol. 66, No.1, pp. 341-363, DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.03.061](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.061)
- [7] F.Edson et al.: Effect of Laser Polishing Post-Processing Technique on the Roughness and Wear Resistance of Inconel 625 Deposited by Laser Cladding on AISI 304L Stainless Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, DOI: [10.1007/s11665-021-05962-3](https://doi.org/10.1007/s11665-021-05962-3)
- [8] P.Zhang, L. Zhanqiang: Machinability investigations on turning of Cr-Ni-based stainless steel cladding formed by laser cladding process The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, Vol. 82, pp. 1707-1704 DOI: [10.1007/s00170-015-7474-7](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7474-7)
- [9] Y.Zhao et al.: Study on chip morphology and milling characteristics of laser cladding layer, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, Vol. 77, pp. 783-796, DOI: [10.1007/s00170-014-6483-2](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6483-2)
- [10] Material Product Data Sheet Tungsten Carbide–10% Cobalt 4% Chromium Powders 20 letöltve: 2024.11.10.
- [11] <https://mymetco-europe.oerlikon.com/en-us/product/metco45cns> letöltve: 2024.11.10.
- [12] https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_US/Corporate/Corporate_Brochures_and_publications/TRUMPF_laser_systems-brochure-EN.pdf letöltve: 2024. 11.10.
- [13] J.Leunda et al.: Laser cladding strategies for producing WC reinforced NiCr coatings inside twin barrel, Surface and Coatings Technology, 2016, Vol.307, pp. 720-727, DOI: [10.1016/j.surfcoat.2016.10.002](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.002)
- [14] Q.Bai et al.: Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladding offe-Based Alloy Coatings in Different Areas of Cladding Layer, Materials, 2021, Vol. 14, DOI: [10.3390/ma14112839](https://doi.org/10.3390/ma14112839)
- [15] C.Cui et al.: Characteristics of cobalt-based alloy coating on tool steel prepared by powder feeding laser cladding, Optics and Laser Technology, 2007, Vol. 39, pp. 1544-1550, DOI: [10.1016/j.optlastec.2006.12.005](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2006.12.005)