

LÉZERSUGARAS FELRAKÓHEGESZTÉSSEL KÉSZÜLT INCONEL 625 RÉTEG VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF INCONEL 625 LAYER PRODUCED BY LASER CLADDING

Juhász Gergely ^{1*}, Hareancz Ferenc ¹

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
Magyarország ORCID: 0000-0002-3412-0137, ORCID: 0009-0000-3996-5887

<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.009>

Kulcsszavak:

Lézersugaras felrakóhegesztés
Laser Metal Deposition
Inconel 625
Bevonat

Keywords:

Laser cladding
Laser Metal Deposition
Inconel 625
Coating

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. november 27.
Átdolgozva 2026. február 1.
Elfogadva 2026. február 3.

Összefoglalás

A cikk célja Inconel 625 fémpor hozaganyaggal történő réteg létrehozása ausztenites acélon Laser Metal Deposition (LMD) technológiával. A kísérletekhez egy LMD-re felszerelt Trumpf 7020 lézerberendezés került alkalmazásra. Az elkészült mintákat fény- és pásztázó elektron mikroszkópiával, majd keménységméréssel vizsgáltuk. A pásztázó elektron mikroszkópia mérések során energiadiszperzív röntgenspektroszkópiát is alkalmaztunk a létrejött réteg összetételének vizsgálatának céljából. Az eredmények alapján a technológia alkalmas porozitás- és repedésmentes Inconel 625 felrakására, viszont jelentős alapanyagfelkavarodással kell számolni egy réteg létrehozása esetén.

Abstract

The aim of this article is to create a layer of Inconel 625 on austenitic steel using metal powder filler material and Laser Metal Deposition (LMD) technology. A Trumpf 7020 laser device equipped with LMD was used for the experiments. The finished samples were examined using light and scanning electron microscopy, followed by hardness testing. During the scanning electron microscopy measurements, energy dispersive X-ray spectroscopy was also used to examine the composition of the created layer. Based on the results, the technology is suitable for the deposition of porosity- and crack free Inconel 625, but significant base material mixing must be expected when creating a layer.

1. Bevezetés

A lézersugaras felrakóhegesztés egyre nagyobb érdeklődést vált ki a kutatói közösségben. Gyártási rugalmasságot, jó mechanikai tulajdonságokat eredményező, akár több anyagból álló alkatrészek gyártásának lehetőségét kínálja [1]. Az eljárásnak több elnevezése is van, mint például: a „Laser Metal Deposition” (LMD), „Direct Metal Deposition” (DMD), „Direct Energy Deposition” (DED) stb. Kiváló tulajdonságait figyelembe véve, az elmúlt években kutatások folytak a nagy szilárdságú Inconel szuperötvözetekről, azzal a céllal, hogy azok alkalmazási lehetőségeit feltárják a korábban hagyományos gyártási folyamatok által dominált különböző iparágakban [2] [3]. A nikkel

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: juhasz.gergely@nje.hu

szuperötvözetek családjában az Inconel 625 különleges, mivel kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik széles hőmérsékleti tartományban és jó korrózióállósággal bír extrém környezeti feltételek mellett is [4]. Továbbá az Inconel 625 jobban hegeszthető a többi nikkel szuperötvözethez képest, ami előnyös tulajdonság lézeres felrakóhegesztés alkalmazása során. Azonban a szakirodalom alapján a lézeres felrakóhegesztéssel készült Inconel 625 bevonatok anizotrópiát mutatnak és a mátrixot alkotó elemek jelentős szegregációja tapasztalható a szemcsehatárokon. Mivel az Inconel 625 ötvözetet alkotó elemek szilárd állapotban oldják egymást, tehát szilárd oldatot képeznek, ezért a szegregáció csökkenti a mechanikai tulajdonságait [5].

2. Felhasznált anyagok és berendezések

2.1. Felhasznált anyagok

A lézersugaras felrakóhegesztések 1.4301 jelölésű ausztenites korrózióálló acél alaplemezzre, m4p – metals for printing cégtől vásárolt Ni-625 megnevezésű fémporral készültek. A gyártó által megadott kémiai összetételt az 1. táblázat tartalmazza.

1. Táblázat. Az Inconel 625 ötvözet gyártó által megadott kémiai összetétele [6]

	Kémiai összetétel [wt%]									
Elem	C	Si	Mn	Cr	Fe	Mo	Al	Ti	Nb	Ni
Min.	0,1	<0,5	<0,5	20	<5	8	<0,4	<0,4	3,15	Bázis
Max.				23		10			4,15	

2.1. Felhasznált berendezések és technológiai paraméterek

A kísérletek egy LMD technológiára felszerelt Trumpf 7020 TruLaser cellával történtek, mely egy 4 kW-os szilárdtest sugárforrással rendelkezik. A megmunkáló optika egy Trumpf MSO70 LMD fej, melyen egy SO12 háromsugaras fúvóka található. A por hozaganyag adagolása egy GTV PF2/2 CF típusú poradagolóval történt. A kísérletek során egy réteg készült, az alkalmazott technológiai paramétereket a 2. táblázat foglalja össze.

2. Táblázat. A lézersugaras felrakóhegesztés során alkalmazott technológiai paraméterek

Lézer teljesítmény (W)	Előtolás (mm/perc)	Lézer foltátmérő (mm)	Porvivőgáz (l/perc)	Védőgáz (l/perc)	Por tömegáram (g/perc)	Sávok közötti átfedés (%)
2500	850	4	8	8	18,4	60

A poráram fókuszhelyzete az alaplemez felületével esett egy síkba, melynek foltátmérője 2,5 mm. Az elkészített réteg 30x30 mm² alapterületű volt.

2.2. Vizsgálati eljárások

A fémpor egy Tescan Vega típusú pásztázó elektron mikroszkóppal volt vizsgálva. A szemcseméret meghatározásához ragasztószalagra lett szórva a fémporból, az elemanalízishez pedig csiszolat készült. Az elemanalízis energiadisperzív röntgenspektroszkópia segítségével történt, amely a pásztázó elektronmikroszkóp kiegészítő eszköze. A csiszolat P800, P1200 és P2500 SiC csiszolópapír került felhasználásra, majd 1 µm és 0,05 µm Al₂O₃ polírozó szuszpenzióval lett a vizsgálathoz szükséges megfelelő minőségben előkészítve.

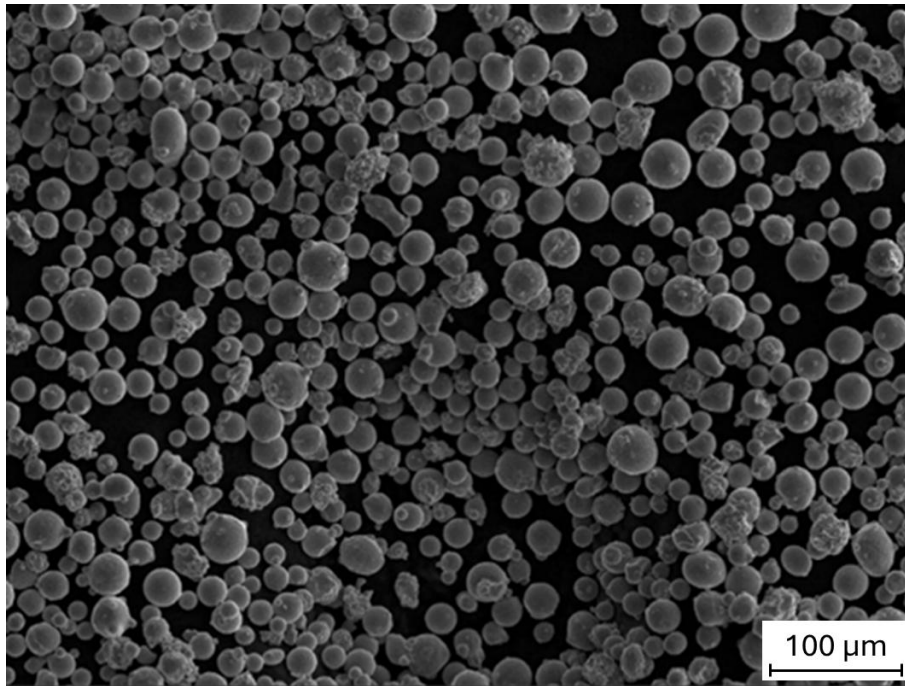
Az elkészült minta rétegmagassága, szövetszerkezete, összetétele, elemeloszlása és keménysége volt vizsgálva. Az elkészült réteg magassága egy Kinex 300x0,01 talpas mérőléc segítségével volt meghatározva. A szövetszerkezet, összetétel és elemeloszlás vizsgálatok fénymikroszkóp (Zeiss Axio Imager 2) és elektronmikroszkóp (Zeiss Sigma 300 VP) segítségével történtek. A metallográfiai csiszolat készítése során P300, P600 és P1200 finomságú SiC csiszolópapír és 3 µm szemcseméretű gyémántsuszpenzió került alkalmazásra. A polírozott minta maratása hígított királyvízzel történt.

A keménységmérések egy Struers Duramin 100 típusú keménységmérőn valósultak meg. A terhelőerő 1 kp-ra lett megválasztva, 5 mérés készült a felrakott rétegben, a hőhatásövezetben és az alapanyagban.

3. Eredmények

3.1. Fémpor vizsgálata

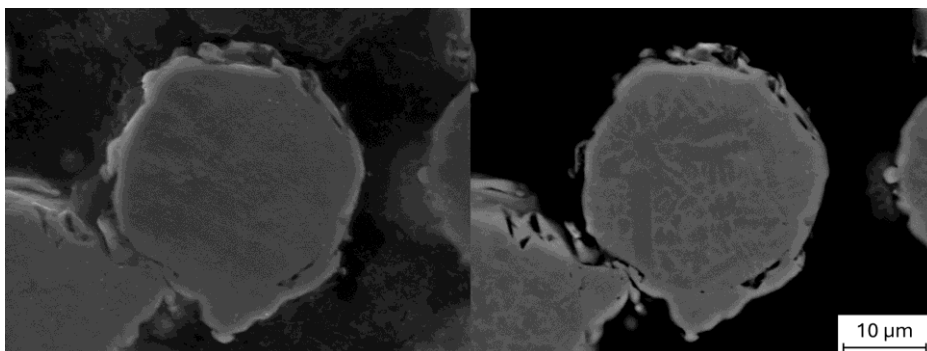
A fémpor pásztázó elektron mikroszkóp felvétele az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az Inconel 625 fémpor pásztázó elektron mikroszkóp felvétele

A pásztázó elektron mikroszkóp felvétel alapján a fémpor szemcséi többnyire gömb alakúak, körülbelül 20 és 40 μm közötti átmérőjűek. A gömb formából következtethető, hogy gázzal atomizált a fémpor. A gömbök felületén kevés kisebb méretű szemcse található, ez nem befolyásolja a por adagolhatóságát.

A por összetételének vizsgálatához a csiszolatról készült szekunder és visszaszórt elektron felhasználásával készült SEM felvétel a 2. ábrán látható.



2. ábra. Az Inconel 625 fémpor csiszolatról szekunder (bal) és visszaszórt elektron (jobb) felhasználásával készült pásztázó elektron mikroszkóp felvételei

A 2. ábrán látható, hogy a porszemcsék belül nem üregesek vagy nem találhatók benne zárványok, továbbá a jobb oldali felvételen látható a por szemcseszerkezete. A fémporról készült energiadiszipatív röntgenspektroszkóp mérésének eredményeit a 3. táblázat foglalja össze.

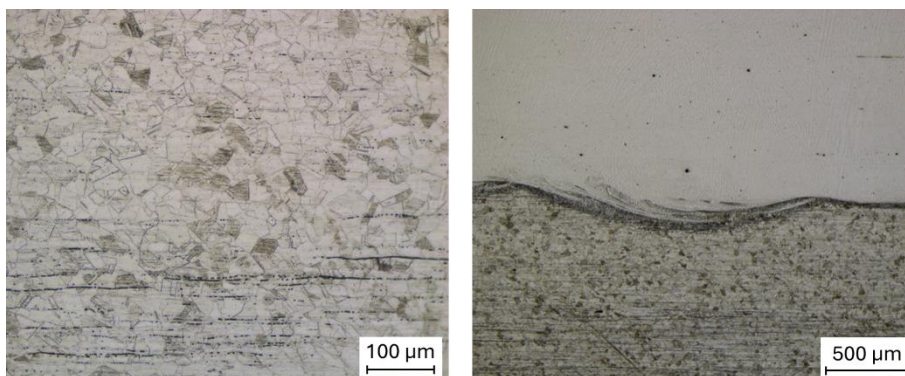
3. Táblázat. Az Inconel 625 energiadisperzív röntgenspektroszkóp mérésének eredménye

Elem	Atomszázalék (%)	Tömegszázalék (%)
Ni	66,99	67,19
Cr	26,78	23,88
Mo	3,79	6,22
Nb	0,76	1,21
Fe	1	0,96
Mn	0,59	0,55

Az EDX mérés során figyelembe kell venni, hogy csak nagyságrendileg kapjuk meg a minta kémiai összetételét, nem teljesen pontos a mérés. A gyári specifikációval összehasonlítva a vásárolt Inconel 625 fémpor megfelelő.

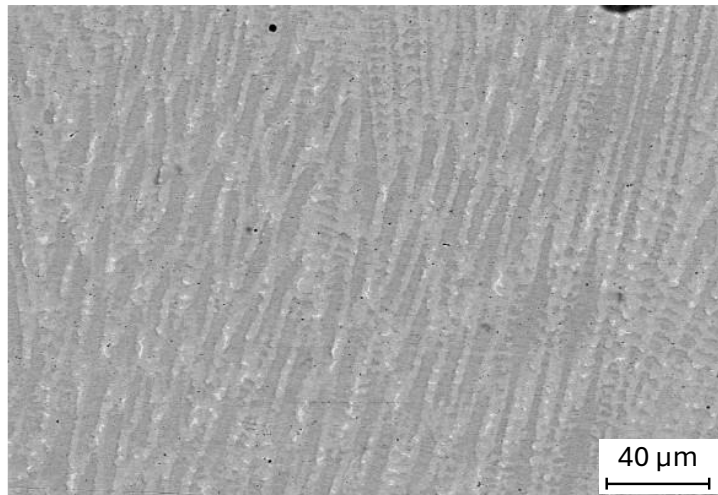
3.2. A készített rétegek vizsgálata

A 2. táblázat technológiai paraméterével a kialakult rétegvastagság 1,7 mm. A készített csiszolat fénymikroszkóppal készített felvételeit a 3. ábra mutatja be.



3. ábra. Az 1.4301 alaplemez szövetszerkezete (bal) és a felrakott réteg-alaplemez határfelületének (jobb) optikai mikroszkópos felvétele

A 3. ábra jobb oldalán lévő mikroszkópi felvételen látható a készített Inconel 625 réteg és az alaplemez határfelülete. A réteg és az alaplemez kapcsolata megfelelő kohéziós kapcsolat. A réteg tömör, nem található benne nagy méretű üreg, zárvány. A határfelület jobban megmaródott, amely az előkészítés hibájából fakadhat. Az Inconel 625 még nem maródott meg megfelelően, de a határfelület közelében több sáv is látható, ahol elszíneződött területek vannak. Feltételezhető, hogy ez az alapanyag felkeveredéséből, vagy az előkészítés hibájából adódhat. A réteg visszaszórt elektron felhasználásával készült pásztázó elektron mikroszkóp felvételét a 4. ábra mutatja be.



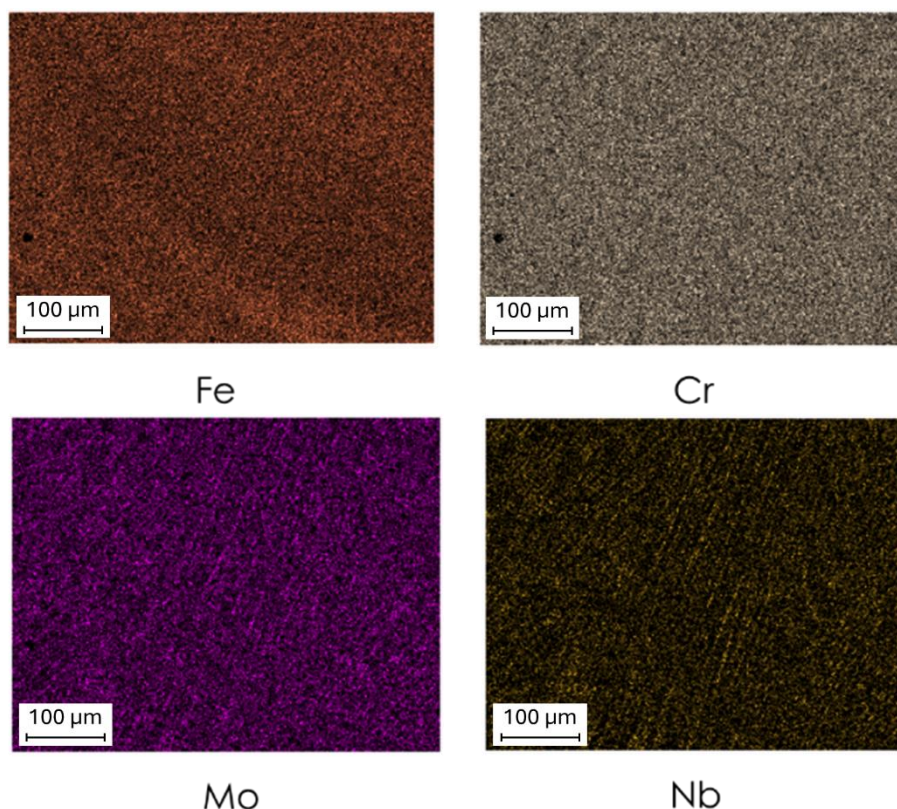
4. ábra. Az Inconel 625 réteg visszaszórt elektron felhasználásával készült pásztázó elektron mikroszkóp felvétele

A 4. ábrán jól látható, hogy dendrites szövetszerkezet alakult ki, megfigyelhetők a kristályosodási orientációk és továbbra is tömörek mondható a réteg. Az alapanyag felkavarodásának meghatározásához energiadiszperzív röntgenspektroszkóp mérés készült a réteg és az alapanyag határának közelében, a rétegvastagság felénél és a réteg felszínének közelében melynek eredményeit a 4. táblázat mutat be.

4. Táblázat. Az elkészült réteg energiadiszperzív röntgenspektroszkóp mérésének eredménye

Elem	Tömegszázalék (%)
Ni	50,6
Cr	20,8
Mo	6,8
Nb	3,4
Fe	17,5
Mn	0,4
Co	0,4

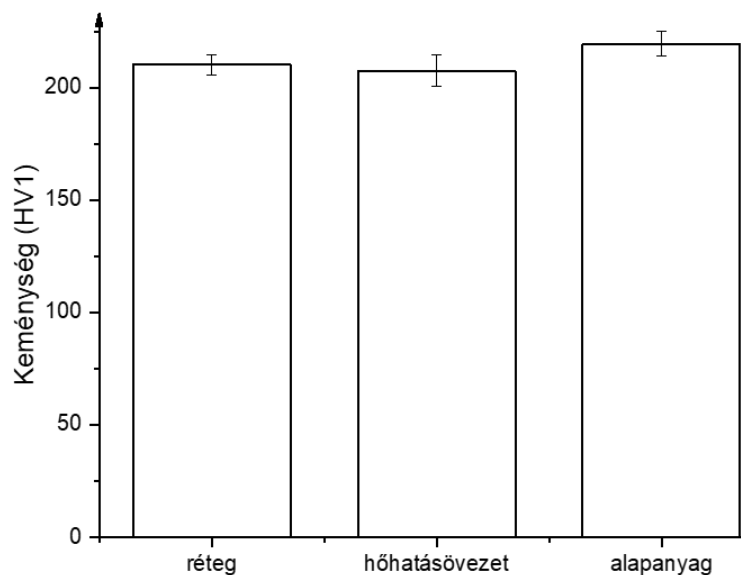
A mérés során nem volt szignifikáns változás a különböző mérési helyek között. Megállapítható, hogy lényeges mennyiségű vas került az alaplemezből a létrehozott rétegbe, amely a technológia sajátosságával magyarázható. Az elemek eloszlásáról készült vizsgálat eredményét az 5. ábra mutatja be.



5. ábra. Az elemek eloszlásának felvételei

Az 5. ábrán látható, hogy a rétegben lévő elemek homogénen oszlanak el. A vas esetében megfigyelhető némi dúsulás és elszegényedés, illetve látható az elemek összekeveredése. A Mo és a Nb esetében a szemcseszerkezettel azonos irányban láthatóak dúsulások.

A mintáról készült keménységmérés eredményeit a 6. ábra mutatja be.



6. ábra. A készített minta keménységméréseinek eredménye

Az elkészült réteg keménysége 235 HV1, a hőhatásövezeté 234 HV1 és az alapanyagé 245 HV1. A keménységmérés eredményei megfelelőek az irodalomban található adatoknak. A felrakott réteg és az alapanyag közel azonos keménységű, nagyobb mértékű lágyulás nem történt a hőhatásövezetben sem.

4. Következtetések

Az alkalmazott technológiai paraméterekkel porozitásmentes Inconel 625 réteget lehet létrehozni ausztenites acélon. Az elemanalízisen látható, hogy néhány elem elszegényedik vagy dúsul a szemcsehatárokon. A létrehozott réteg keménysége a szakirodalomban található értékekhez hasonló. Az ipari alkalmazások esetében a lézersugaras felrakóhegesztés során számolni kell az alapanyag és a hozaganyag keveredésével. Ez a jelenség az alaplemez anyagának megváltoztatásával javítható, vagy egy, illetve több párnaréteg (köztes réteg) alkalmazásával.

Irodalomjegyzék

- [1] S. Misra, S. Nandi, P. Patra, I. Mohanty, P. Saha, and C. S. Kumar, "Influence of ultrasonic vibration on microstructure, texture and mechanical characteristics of Inconel 625 additively manufactured through continuous and pulsed laser directed energy deposition," *Materials Characterization*, vol. 229, p. 115504, Aug. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.115504>.
- [2] G. M. Volpato, U. Tetzlaff, and M. C. Fredel, "A comprehensive literature review on laser powder bed fusion of Inconel superalloys," *Additive Manufacturing*, vol. 55, p. 102871, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102871>.
- [3] M. Nankali, J. Akbari, M. Moradi, and Z. Malekshahi Beiranvand, "Effect of laser additive manufacturing parameters on hardness and geometry of Inconel 625 parts manufactured by direct laser metal deposition," *Optik*, vol. 249, p. 168193, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168193>.
- [4] S. Misra *et al.*, "Investigation of IR pyrometer-captured thermal signatures and their role on microstructural evolution and properties of Inconel 625 tracks in DED-based additive manufacturing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 447, p. 128818, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128818>.
- [5] Y. Hu *et al.*, "Microstructural evolution and anisotropic mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by directed energy deposition," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 870, p. 159426, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159426>.
- [6] „m4p Ni-625 Technical Data Sheet” Link: https://www.metals4printing.com/?qs_servlet=downloadIxservlet&rq_ReclId=39423841324139413734344639384435303030313144354144323245384334304433463337334632&qs_fileId=37646E2B21C3CEB23E536DCE1449AFE91ADD9590&qs_lastModified=1664460514635&qs_fileControl=C90D3C4167C882B6970C8EEC4D2F3AF98521856D Megtekintve: 2025.12.18.