

LÉZERSUGARAS EDZÉS ÉS BEVONATOLÁS TECHNOLÓGIÁJÁNAK KIDOLGOZÁSA SZERKEZETI ACÉLOKHOZ

TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF LASER HARDENING AND CLADDING FOR STRUCTURAL STEELS

*Dr. Markovits Tamás, egyetemi docens, BME, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar,
Gépjárműtechnológia Tanszék,
Dr. Borbás Lajos, professor emeritus, Edutus Egyetem, Műszaki Intézet*

Abstract:

In the case of laser surface treatments, it is necessary to determine the main technological parameters, taking into account the possibilities and limitations of the applied system elements.

In the present research, our aim was to determine the technological parameters of the laser material processing system at the Technical Institute of the Edutus University on unalloyed structural steel plates, which are often used in laser beam hardening and coating technologies. We also aimed to define the methodology for how to create more wear-resistant surfaces for a given case.

The laser hardening was carried out on C45 steel, and S235 steel plates were used in the case of the coating. The coating was applied using a nickel-based tungsten carbide-containing powder, which improves wear resistance. A disk laser beam source with a maximum power of 4 kW was used in the tests, in a TRUMPF 7020 laser cell. By changing the various main influencing parameters, the technological parameters that produced the most abrasion resistance among the surface properties were selected. Wearing test samples were prepared with these parameters for further investigations.

Absztrakt

A lézersugaras felületkezeléseknél a konkrét felhasználás során, az alkalmazott rendszerelemek lehetőségeit és korlátait figyelembe véve szükséges meghatározni a főbb technológiai paramétereket. Jelen kutatásban az Edutus Egyetem Műszaki Intézetében megtalálható lézersugaras anyagmegmunkáló rendszer technológiai paramétereinek meghatározása volt a célunk lézersugaras edzés és lézersugaras bevonatolás esetében. Azzal a céllal is, hogy a gyakran használt ötvözetlen szerkezeti acél lemezeken az ilyen jellegű

technológiai paraméterek kidolgozásának módszertana, más peremfeltételek esetére is ismert és meghatározható legyen. A konkrét esetben vizsgáltuk azt is, hogy hogyan hozhatók létre kopással szembeni ellenállóbb felületek.

A lézeres edzés C45 a bevonatolás S235-ös acél lemezeken történt. A rétegfelvitel nikkel bázisú wolframkarbid tartalmú por felhasználásával történt, amely a kopásállóságot javítja. A vizsgálatok során egy 4 kW maximális teljesítménnyel rendelkező disk lézer sugárforrást használtunk egy TRUMPF 7020-as lézer cellában. A különböző főbb befolyásoló paraméterek változtatásával előálltak azok a kiválasztott technológiai paraméterek, amely a felületi tulajdonságok közül a kopással szembeni ellenállást leginkább növelték. Ezekkel a kidolgozott paraméterekkel koptató teszthez szükséges minták készültek a későbbi koptató vizsgálatokhoz.

1. BEVEZETÉS

A lézersugaras felületkezelések a különböző alkatrészek felületi tulajdonságainak célirányos módosítására szolgálnak és már hosszú évtizedek óta használják az iparban. A technológiai paraméterek meghatározása ezeknél az eljárásoknál is az alkalmazott konkrét rendszerelemekhez kell, hogy legyenek illetve. A lézersugaras edzés az edzhető acélok esetében a felület lokális felkeményítését célozza meg, a lézerfolt mozgásától függően létrejövő felületeken, ahol jellemzően 1 mm alatti rétegvastagságban beedződött felületi réteg jön létre. A lézersugárral felhevített anyagrészek külön hűtőközeget nem igényelnek, mivel a környezeti anyagterefogat hőelvonó képessége elegendően nagy ahhoz, hogy a nem egyensúlyi körülmények közötti lehűlés során, nagy keménységű fázisok, szövetelemek jöjjenek létre. A lézeres edzés előnye hűtőközeg

alkalmazásának szükségtelenségén kívül, hogy a lokális hőbevitel precíz szabályozhatósága miatt az alapanyagban maradó belső feszültségek minimális vetemedését okoznak a hasonló lokális edzési módszerekhez képest (lángedzés, plazmasugaras edzés). A lézersugaras technológia jellemzően nagy költség igényű, ezért nagyobb értékű, egyedi alkatrészek edzésénél használják leginkább. Az edzett felület kialakításakor a sugármozgatás szempontjából robotos vagy CNC mozgó rendszer biztosítja a megbízhatóságot és a jó reprodukálhatóságot [1, 2, 3].

A lézersugaras bevonatolásra többféle módszer létezik. Az egyik elterjedt megoldás az egylépéses porszórási eljárás, amelynek során a porszóró fejbe segédgázzal bevezetett porszemcséket a felületen létrehozott olvadék tócsába közvetlenül eljuttatva, és az alapanyag olvadékával közös ömledék fürdőt alkotva a megszilárdulása után jön létre a bevonati réteg, amely megfelelően kapcsolódik az alapanyaghoz. A bevonati réteg diszkrét sávonként lokálisan hozható létre. A lézerfolt mozgatási stratégiától függően, adott átlapolással megfelelően átfedő bevonati sávokkal, egybefüggő réteg hozható létre, amely utómunkálással a kívánt funkcionális felületté alakítható [4, 5, 6, 7, 8].

Jelen kutatásban az Edutus Egyetem Műszaki Intézetében megtalálható lézersugaras anyagmegmunkáló rendszer elemeivel végeztünk vizsgálatokat arra vonatkozólag, hogy a lézersugaras felületkezelési eljárások közül a lézersugaras edzés és az egylépéses porszórási bevonatolás területén ténylegesen hogyan alkalmazhatóak ezek a technológiák. Célunk volt annak tisztázása is, hogy az adott követelményeknek leginkább megfelelő technológiai paraméterek milyen módszertannal határozhatók meg.

2. AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK

A lézersugaras vizsgálatok során egy 4 kW maximális teljesítménnyel rendelkező TRUMPF gyártmányú TruDisk 4001-es Yb disk lézer sugárforrást használtunk egy TRUMPF TruLaser 7020-as lézer cellában, 5 tengelyes CNC mozgó rendszerrel. Az alkalmazott lézer teljesítmény 1 és 4 kW között került változtatásra. Sebességek bevonatolásnál 0,1 és 1 m/perc tartományban, edzésnél 1 és 7 m/perc tartományban mozogtak.



1. ábra. Az alkalmazott lézercella fotója

A létrehozott rétegeket eljárástól függetlenül felületi keménységmérésnek vetettük alá és keresztmetszeti csiszolatokat készítettünk, ahol adott esetben mikrokeménység eloszlást mértünk.

Az edzés, valamint a bevonatolás során két különböző acél alapanyagot használtunk.

2.1. Lézeres edzési kísérletek bemutatása

Az edzési eljárás során C45-ös acéllemez alkalmaztunk. Az alkalmazott alapanyag összetételét a 1. táblázat mutatja.

1. táblázat. A C45 acél vegyi összetétele

C45 VEGYI ÖSSZETÉTEL (AZ ÖTVÖZET GYÁRTÁSI SZABVÁNYA SZERINT) [%]								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cr+Ni+Mo
0,42-0,5	≤ 0,4	0,5-0,8	≤ 0,045	≤ 0,045	≤ 0,4	≤ 0,1	≤ 0,4	≤ 0,63

Az acéllemezeket homokszórással készítettük elő az edzést megelőzően. A megmunkáláshoz a berendezéshez rendelkezésre álló lézeres hegesztéshez is használható lézer fejet alkalmaztunk, amelynek fotója a 2. ábrán látható.

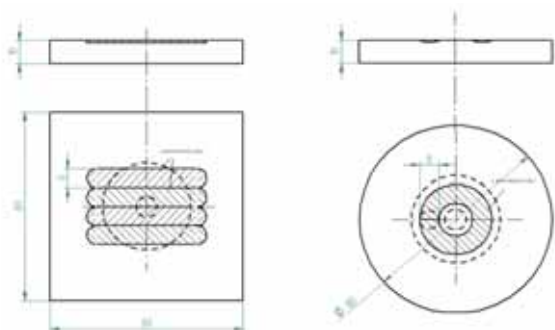


2. ábra. A lézeres edzéshez használ lézer fej

A lézeres edzett sávokat 80 mm-es hosszban hoztuk létre, egymástól 15 mm távolságra. Az alkalmazott defókusz távolságok 50, 75 és

100 mm voltak. A sávok felületének vizsgálatával adott defókusztávolságnál a lézer teljesítmény vagy a sebesség változtatásával kerestük a megolvadás alatti eseteket. Ezeket a sávokat vizsgálva választottuk ki a leginkább megfelelőt a nagyobb felület edzéséhez.

A nagyobb felület esetében ismerve a sáv szélei felé tapasztalható keménység csökkenés jelenségét és figyelembe véve az ilyen jellegű mozgatási stratégiára jellemző átlapolásból eredő kilágyulást, meghatároztuk a legkisebb kilágyulást eredményező eltolási távolságot, ami végül 8 mm-re adódott. A koptatási mintákhoz szükséges lézer folt mozgatási megvalósítását a 3. ábrán láthatjuk párhuzamsávok és körpálya mentén.



3. ábra. Edzési sávok megvalósítása

2.2. Lézeres bevonatolási kísérletek

A bevonatolás során S235-ös acéllemezt alkalmaztunk. Az alkalmazott alapanyag összetételét a 2. táblázat mutatja. Az alkalmazott por M-1001WC-PL2 típusú nikkel bázisú WC tartalmú por volt. A por jellemzői a 3. táblázatban láthatóak.

2. táblázat. A S235 acél vegyi összetétele

S235 VEGYI ÖSSZETÉTEL (AZ ÖTVÖZET GYÁRTÁSI SZABVÁNYA SZERINT) [%]						
C	Si	Mn	P	S	Cu	N
≤ 0,17	≤ 0,3	≤ 1,4	0,035	0,035	≤ 0,55	≤ 0,012

3. táblázat. Az alkalmazott por jellemzői

Por megnevezése: M-1001WC-PL2

Összetevők	
Anyag	Érték [%]
B	2,32
C	0,52
Cr	13,23
Fe	3,23
Ni	Bal
P	0,01
Si	3,6
W	14,54
Egyéb	0,7

Szemcseméret-eloszlás		
Szemcseméret	Eloszlás [%]	Módszer
>150	0,7	Szitált
150-125	15,6	Szitált
125-106	22,5	Szitált
106-90	17,5	Szitált
90-75	20,1	Szitált
75-63	20,2	Szitált
63-53	3,2	Szitált
<53	0,1	Szitált

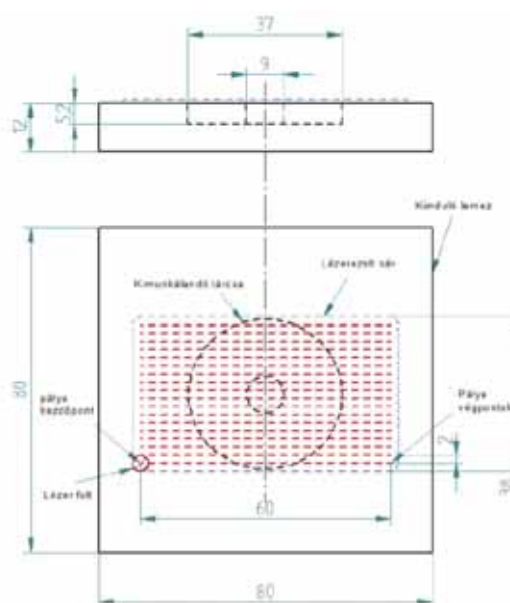
Fizikai mérések		
Mérés	Leírás	Eredmény
Por sűrűség	[g/cm ³]	4,4
Csésze áramlás	[min/50g]	16,7
Rockwell keménység	[HRc]	55,1

A bevonatoláshoz GTV PF 2/2 típusú poradagoló berendezést használtunk különböző tárcsa fordulatszámokkal 5 és 10 fordulat/perc között. A porszóráshoz a hegesztő fejre építhető porelosztó egységet és gyűrű geometriájú porszóró fúvókát szereltünk. A bevonatolásnál használt fej a 4. ábrán látható.



4. ábra. A porszóráshoz használt lézeres megmunkálófej fotója

A bevonatolási paraméterek tesztelése során 60 mm hosszú sávokat hoztunk létre különböző defókusztávolságoknál, változtatva a lézer teljesítményt, a sebességet és a por tömegáramát. Az alkalmazott defókusztávolságok 0, 11, 37 mm voltak. A szélesség és magassági méretek elemzése után a kiválasztott sáv paramétereivel egybefüggő felületet hoztunk létre az 5. ábrán látható módon. Az egyenes réteghez a sávok közötti eltolás 2 mm volt.



5. ábra. A bevonatolás megvalósítása

A kiválasztott paraméterekkel létrehoztuk a koptatásra szánt minták felületének megfelelő

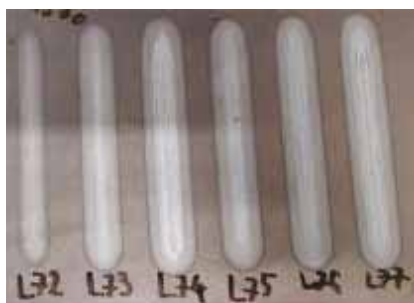
méretben az edzett és bevonatolt felületeket, amelyből vízszintes vágással és forgácsolással munkáltuk ki a koptatásnál használt próbatest mintákat.

3. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

Az eredményeket a következőkben külön mutatjuk be a lézersugaras edzésre és bevonatolásra jellemző példák közreadásával.

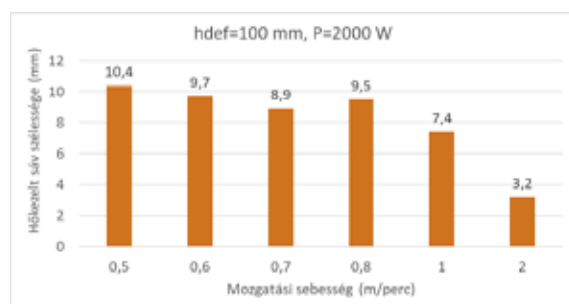
3.1. Lézersugaras edzési eredmények bemutatása

A lézersugarasan edzett sávok tesztelésére láthatunk egy példát a 6. ábrán, ahol a 2 kW teljesítménnyel különböző folt mozgatási sebességgel készült hőkezelt sávok láthatóak.



6. ábra. A 100 mm-es defókusszal és 2 kW teljesítménnyel készült hőkezelt sávok

Ehhez a beállításhoz tartozóan példaként egy hőkezelt sáv szélességeket bemutató diagramot a mozgatási sebesség függvényében a 7. ábrán mutatunk be.



7. ábra. A hőkezelt sáv szélesség értékek 100 mm-es defókusz és 2 kW teljesítmény esetén

A folt mozgatási sebesség csökkentésével a vonalenergia növekszik. A lézersugár több ideig hevíti ugyanazokat a felületeket, így a bevitt hő mennyisége növekszik és ennek eredményeképpen az átalakulás határát jelentő

izotermák mélyebbre jutva nagyobb hőkezelt sáv keresztmetszetet eredményeznek.

Egy jellemző keresztmetszetre láthatunk példát a 8. ábrán, ahol a 3 kW teljesítménnyel a sebességet 2,5 m/perc értékre állítottuk be. Itt a sáv szélessége 6,6 mm felett volt már és a maximális mélység 0,36 mm-re nőtt.



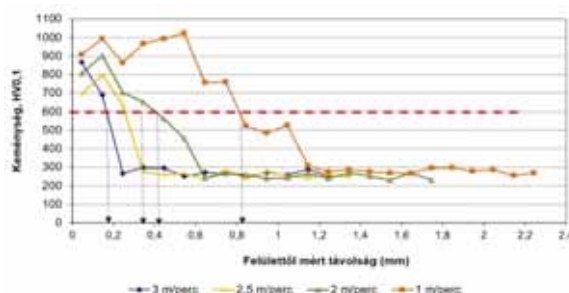
8. ábra. Lézerrel edzett sáv keresztmetszeti csiszolata ($P=3000\text{ W}$, $v=2,5\text{ m/perc}$)

A 9. ábrán 3 kW teljesítménnyel a további sebesség csökkentés eredményeképpen kapott hőkezelt sáv látható 2 m/perces sebesség esetén. Megfigyelhető, hogy a sáv szélessége és a mélysége is nagyobb lett. A sáv szélessége 7,8 mm-re nőtt, a mélysége 0,57 mm-re mélyült.



9. ábra. Lézersugárral edzett sáv keresztmetszeti csiszolata ($P=3000\text{ W}$, $v=2\text{ m/perc}$)

A csiszolati mintákon mélység irányban mért keménységi értékeket a 10. ábrán láthatjuk. A mikrokeménységi értékeket az alapanyag felső 1-2 mm-es sávjában ábrázoltuk. A lézersugaras felületi edzésnél a sáv mélysége jellemzően - jelen esetben sem - nem haladja meg az 1 mm-t.



10. ábra. Lézersugárral edzett sávok mélységi keménység eloszlás adatai különböző esetekben

A diagramon megfigyelhető, hogy a felület közelében nagyobb a keménység és az alapanyag mélyebb rétegeiben gyors átmenettel elérte az alapanyag keménységét. A lassabb sebességeknél a felület közelében mért keménység nagyobb, míg a nagyobb sebességeknél alacsonyabb. Amennyiben követelményként az elvárt keménységet 600 HV-re választjuk, akkor meghatározhatóak azok a mélységek, amelyeknél ennek a kritériumnak való megfelelés még fennáll. Ez alapján a 0,2 mm és a 0,8 mm közötti mélységekben valósulnak meg a 600 HV feletti keménység értékek.

Megfigyelhető az is a diagramokon, hogy a kezdeti nagy keménységi tartományból az alapanyag keménységére való csökkenés az egyes esetekben különbözik. A lassabb sebességeknél szélesebb a nagyobb sebességeknél keskenyebb a zóna.

A koptatáshoz előkészített edzett felületeknél a korábban meghatározott 8 mm-es folt eltolással 5-5 sávot készítettünk, amely kiadta a koptató próbatestként használt tárcsa átmérőjét, a szükséges kimunkálási ráhagyásokkal. Az elkészült edzett felületek – sávos edzéssel kialakítva - a 11. ábrán láthatók.



11. ábra. A sávosan edzett felületek a koptató próbatestek kimunkálásához

A kilágyulási zónák hatásának elkerüléséhez készítettünk olyan kör mentén beadett próbatesteket is, amelyeknél a ball-on-disk elrendezésben az edzett sáv közepén haladhat a koptató golyó. Az elkészült kör mentén edzett felületek a 12. ábrán láthatóak.



12. ábra. A kör mentén edzett felületek a koptató próbatestek kimunkálásához

A koptatáshoz kimunkált mintadarabokat a körpályán edzett és a sávosan edzett mintáknál a 13 ábrán mutatja. (Jelezve a sávok geometriáját az edzett felületeken.)



13. ábra. Lézerrel edzett, a koptatáshoz kimunkált minták

3.2. Lézeres bevonatolási eredmények bemutatása

A bevonati réteg magasságával kapcsolatban követelmény, hogy az átlapolás egyenetlen felületi geometriájának utólagos lemunkása után is maradjon megfelelő vastagságú réteg, így a kutatások során az 1 mm körüli rétegvastagság elérése volt alapvetően a cél. Emellett fontos szempont volt, hogy egyenletes réteg tudjon kialakulni, mindenhol azonos magassággal a megvalósított sáv hossza mentén.

11 mm-es defókusz távolsággal létrehozott rétegek láthatók példaként a 14. ábrán, ahol a teljesítmény és a por tömegáramának változtatása is megtörtént, így kialakultak olyan varratok, amelyeknél egy egyenletes bevonati sáv képződött.



14. ábra. A lézeres bevonati sávok fotója 11 mm-es defókusznál különböző lézer teljesítmények és portömegáramok esetén

Láthatóak olyan bevonati rétegek is, amelyeknél egy adott helyen anyagihiány lépett fel, azonban ez nem a technológia alapbeállításából adódik, hanem valamilyen lokálisan fellépő hibaokra vezethető vissza. A látható sávok közül megemlítjük az 50-es jelű beállítást, amelynél a pikkelyesedés jelensége jól látható a fotón is. Ebben az esetben a por tömegáram értéke volt alacsonyra beállítva és ennek köszönhető, hogy nem tudott felépülni a folyamatos varrat

A pormennyiség növelésével a bevonati réteg felület feletti magasság megnövelhető. Erre mutat egy példát a 15. ábra, amelyen a 1,5 mm-es olvadék mélység mellett 1,3 mm-es réteg magasság alakult ki. Az alapanyagból való felolvadás itt még mindig magas.

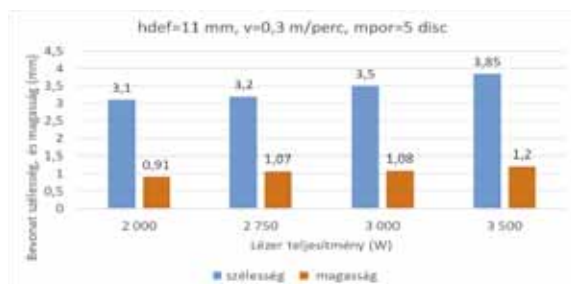


15. ábra. A 11 mm-es defókusszal készült bevonat jellemző keresztmetszeti képe magasabb portömegáramnál

A 11 mm-es defókussztávolsággal készült bevonati rétegek szélességi és magassági értékei láthatók a 16. ábrán, különböző lézer teljesítmény értékeknél. A lézer teljesítményt itt 2000 és 3500 W között változtattuk. A diagramon megfigyelhető, hogy a korábbi esethez képest a lézer teljesítmény növekedésével a bevonati réteg szélessége növekszik néhány tized milliméterrel, ami az ömledékfürdő átmérő növekedésének lehet az eredménye.

A korábbi 3 mm körüli szélesség érték 3,8 mm fölé növekszik. A bevonati réteg magassága a lézer teljesítménnyel kisebb mértékben változik csak, annak ellenére, hogy 1500 W teljesítmény különbség van a két vizsgált beállítás között.

Ha összehasonlítjuk a szélesség és a magasság növekményeket megállapítható, hogy a réteg szélessége nagyobb mértékben nőtt, mint a réteg magasság értéke tehát a teljesítménnyel a réteg szélesség ebben az esetben jobban befolyásolható.



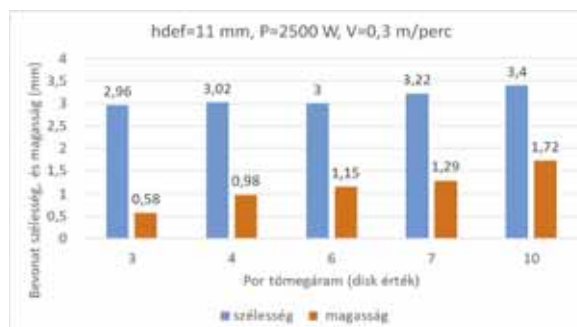
16. ábra. A lézeres bevonati sávok méretei 11 mm-es defókussznál különböző lézerteljesítmények esetén

A 17. ábrán a 11 mm-es defókussztávolsággal készült bevonati rétegek szélességi és magassági értékei láthatók különböző portömegáramok esetén.

A diagramon megjelenített beállításoknál a teljesítmény rögzítve volt a sebességgel együtt és a por tömegáram értékét változtattuk a berendezésen megadható adagoló disc fordulatszámának függvényében.

A bevonati réteg szélessége 3 mm körülire adódott, azonban a bevonati réteg magassága a 0,6 mm-től egészen 1,7 mm-ig nőtt, ahogyan a por tömegáram mennyiségét 3-ról 10 fordulat/percre növeltük. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a portömegáram mértéke leginkább a réteg magasságát befolyásolja.

Tehát amennyiben a lemunkáláshoz szükséges egy nagyobb mértékű ráhagyás, akkor ez a por tömegáram növelésével kialakítható magasabb réteg létrehozásával megvalósítható.



17. ábra. A lézeres bevonati sávok méretei 11 mm-es defókussznál különböző por tömegáram esetén

A számos bemeneti paraméter kombináció tesztelése után megtaláltuk a megfelelő beállítási paramétereket egy sávra vonatkozóan.

Az átlapolódással kialakított bevonati felület megvalósítását először 1 mm, 2 mm, 3 mm majd 2,5 mm lépésközzel is megvizsgáltuk. Megfigyeltük, hogy az 1 mm-es átlapolási távolság alkalmazása esetén a bevonatok túlságosan közel helyezkedtek el egymáshoz, a 2 mm-es távolság azonban megfelelőnek tűnik. A 2,5 és 3 mm-es sávok közötti távolságnál látszott, hogy a rétegek között olyan árkok alakultak ki, amelyek a későbbi utómunkálatok alkalmazásával sem szüntethetők meg.

A 18. ábrán látható, amint a bevonati sávokat 2 mm távolságra egymás mellé hoztuk létre.



18. ábra. A lézerrel bevonatolt felület 2 mm-es sáv eltolással

A 19. ábra a lézerrel bevonatolt darabokat mutatja a kimunkálás után. A mintákat acél lemezből vízsugaras vágással készítettük, a végső geometriát a forgácsolás adta.



19. ábra. Lézerrel bevonatolt, a koptatáshoz kimunkált minták

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Összefoglalásként tehát az Edutus Egyetem Műszaki Intézetében rendelkezésre álló lézer berendezéssel és anyagokkal olyan edzési és bevonatolási technológiákat dolgoztunk ki, amellyel az acél alapanyagok felületének kopással szembeni ellenállása módosítható.

Ezen túlmenően kidolgoztunk egy olyan módszertant is, amelynek segítségével más műszaki követelményeknek megfelelő felület módosításhoz szükséges konkrét technológiai adatok meghatározhatók.

A kutatás eredményeként láthatóvá váltak a jelenleg rendelkezésre álló eszközök által biztosított lehetőségek és korlátok is. Ennek megfelelően a laboreszközök fejlesztésének következő fázisai is jobban körvonalazhatók, ilyenek például a lézeres edzéshez alkalmazható szkener optika, vagy más sugárformáló eszközök alkalmazása.

A lefolytatott kutatás eredményei alapján a lézersugaras bevonatolás esetében a használt nikkeltartalmú és wolfram tartalmú porok mellett szükségesnek tartjuk különböző kobalt tartalmú

porok (Stellite) tesztelését és a használatukra vonatkozó technológia meghatározását.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] S. Martínez: Laser Hardening Process with 2D Scanning Optics, Physics Procedia 39:309–317 · December 2012
- [2] Fritz Klocke: Optimization of the Laser Hardening Process by Adapting the Intensity Distribution to Generate a Top-hat Temperature Distribution Using Freeform Optics, Coatings 2017, 7(6), 77
- [3] Jan Bouquet: Development of a Flexible Laser Hardening & Machining Center and Proof of Concept on C-45 Steel, Physics Procedia, Volume 56, 2014, Pages 1083-1093
- [4] Ficzere, P., Lukács, N.: The possibilities of intelligent manufacturing methods, Design of machines and structures 10 : 1 pp. 13-19., (2020)
- [5] C.Leyens: Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition, Laser Surface Engineering, 2015, Pages 181-192
- [6] Lukács, N. L., Ficzere, P., Temesi, T.: Gyártási paramétereiktől függő rétegek közötti hibák vizsgálata CAD szoftverekkel, GÉP LXX. évfolyam : 3 pp. 54-57. (2019)
- [7] W. M. Steen: Laser Surface Cladding, Surface and Coating Technology, 1990, p. 369-387
- [8] U. de Oliveira: Analysis of coaxial laser cladding processing conditions, Surface & Coatings Technology 197 (2005) 127–136

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A dokumentumban bemutatott kutatás eredményeinek elérésében köszönetet mondunk az Edutus lézer labor, dolgozóinak Molnár Istvánnak és Suta Máténak, illetve Fodor Péter BME-s hallgatónak a vizsgálatok végrehajtásában történt részvételéért.

A projekt a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával, az NKIH Alapból valósul az EFOP-3.6.1-16-2016-00009 azonosítószámú pályázathoz kapcsolódóan valósult meg. A szerzők köszönik a támogatást.