

# Nagysebességű termikus szórással és kevert lézersugaras újraolvasztással készült NiCrBSi bevonatok acél alaptesthez való kötésének és mikroszerkezetének javítása

## Improvement of the bonding and microstructure of NiCrBSi coatings applied to steel substrates using high-speed thermal spraying and mixed laser remelting

PÁLINKÁS Sándor PhD<sup>1</sup>, MOLNÁR András PhD<sup>2</sup>, NÉMETH Kristóf<sup>3</sup>, DOMOKOS István<sup>1</sup>

1 Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4,  
e-mail: [palinkassandor@eng.unideb.hu](mailto:palinkassandor@eng.unideb.hu),  
honlap: <https://mecheng.unideb.hu/>

2 Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,  
3515 Miskolc-Egyetemváros,  
e-mail: [metspray@uni-miskolc.hu](mailto:metspray@uni-miskolc.hu), honlap:  
<https://geik.uni-miskolc.hu/intezetek/ATI/index.php>

3 Hegesztéstechnológiai projektvezető, Budai Benefit Kft. Lézer Technológiai Üzem,  
2314 Halásztelek, Páger Antal u. 4,  
e-mail: [nemethkristof@bubenlaser.com](mailto:nemethkristof@bubenlaser.com),  
honlap: <https://www.bubenlaser-hu.com/>

### Abstract

*High-velocity thermal spraying (HVOF) is increasingly used in industrial practice for surface protection and reconstruction of agricultural machine parts. The results are not always satisfactory due to the porosity and microstructure of the coating. This study presents an experiment to modify the structural characteristics of NiCrBSi alloy layers remelted by high-velocity (HVOF) spraying and combined diode laser (LMD) processes, and to examine and improve the quality of the bond with the substrate material. Laser remelting of the layer induced the formation of a homogeneous structure, significantly reducing the porosity of the sprayed coating and creating a cohesive bond with the substrate steel. Laser remelting did not significantly affect the heat treatment condition of the substrate steel. During the examination of the remelted layer, it was found that the porosity of the coating produced by high-speed spraying can be significantly reduced by using a diode laser (LMD) heat source. The bond between the remelted layer and the base steel substrate is metallurgical in nature, and warping can be significantly avoided.*

**Keywords:** thermal spraying, laser remelting, metallurgical bond, NiCrBSi alloys, steel substrate, substrate material

### Kivonat

*A nagysebességű termikus szórás (HVOF és HVAF) és a plazmaszórás (APS) egyre több helyen alkalmazzák az ipari gyakorlatban a gépalkatrészek felületvédelmére és újraépítésére. Az eredmények nem mindig kielégítőek a bevonat porozitása és a mikroszerkezete miatt. Ebben a tanulmányban a nagysebességű (HVOF) szórással és a kombinált diódalézeres (LMD) eljárással újraolvasztott NiCrBSi ötvözetrétegek szerkezeti jellemzőinek módosítására és a hordozó anyaggal való kötés minőségének javítására tett kísérlet került bemutatásra. A réteg lézersugaras újraolvasztása dendrites szerkezet kialakulását indukálta, ami jelentősen csökkentette a szórt bevonat porozitását, és növelte a hordozó anyagon való tapadást. A szórt bevonat lézeres kezelése után fázisátalakulás nem volt megfigyelhető. Végül a mikrokeménység vizsgálat kimutatta, hogy a nagysebességű szórással készült bevonat porozitása jelentős mértékben csökkenthető diódalézeres (LMD) eljárással. Az újraolvasztott réteg kötése metallurgiai jellegű lesz a hordozó acél alaptest anyagával, továbbá annak vetemedése jelentős mértékben elkerülhető.*

**Kulcsszavak:** termikus szórás, lézersugaras újraolvasztás, metallurgiai jellegű kötés, NiCrBSi ötvözet, acél alaptest, hordozó anyag

## BEVEZETÉS

A termikus szórással készült bevonat folytonossági hiányosságait a porozitás, a nem megolvadt részecskék jelenléte és azon belüli rétegek közötti határok okozzák; vagyis nem lehet teljesen hibamentes bevonatot előállítani, amely gyenge kopás- és korrózióállóságot eredményez. A lézersugaras újraolvasztás előnye, hogy tömörebb bevonatokat lehet létrehozni, finomabb mikroszerkezettel [1]. Ezenkívül, a szórt mintákon lézeres utókezelés végezhető a mechanikai tulajdonságaik javítása érdekében [2].

A hagyományos lézeresugaras utókezelés (CO<sub>2</sub> vagy Nd-YAG) repedéseket okozhat a szórt bevonatban, ami az egyik legfőbb hiba, amely a NiCrBSi ötvözet megszilárdulása során előfordulhat, mivel a kis besugárzott területen nagy hőmérsékleti gradiens alakul ki [3]. Ebben a tanulmányban a légköri plazmaszórás (APS) és a diódalézeres besugárzás folyamatokat kombinálták in situ, hogy módosítsák a NiCrBSi bevonatok szerkezeti jellemzőit. A technika nem új, mivel a múltban már alkalmazták plazmaszórás és folyamatos hullámú (CW) CO<sub>2</sub> lézeres besugárzás kombinációjaként [4].

Általában azonban ezt az eljárást kerámia bevonatok utókezelésére alkalmazták és megállapították, hogy jelentősen csökkent a porozitás és egyenletes mikroszerkezet alakult ki, nagy keménységgel és a hordozóhoz való kiváló tapadást értek el [5].

A nikkalapú bevonatokat általában olyan alkalmazásokban használják, ahol mérsékelt és magas hőmérsékleten korrózió- és kopásállóságra van szükség, és ezek közül a NiCrBSi különösen jó teljesítményt nyújt [6]. Ez az anyag önfolyós ötvözet; a bór jelenléte növeli az ötvözet folyékonysági tulajdonságait azáltal, hogy a 3,6 tömegszázalék B-tartalom mellett eutektikus fázisokat képez [7]. Számos bevált eljárás létezik a NiCrBSi ötvözetek újraolvasztására, például lánggal, ellenállás hevítéssel, lézeresugaras utókezeléssel stb.

A NiCrBSi ötvözeteket általában ipari alkalmazásoknál olvasztják újra, amely jelentősen növelheti a korrózió- és kopásállóságot, mivel számottevően csökken a porozitása és a hordozóhoz való tapadás metallurgiai kötése alakul. Egy korábbi munkában bemutatták a diódalézeres felrakóhegesztéssel bevont NiCrBSi bevonat jó kopásállósági tulajdonságait [8].

A [9] közlemény szerint több műszaki paramétert vizsgálnak, különösen a lézer teljesítmény sűrűségét, hogy meghatározzák a legjobb paraméter konfigurációt a megszilárdulási repedések nélküli bevonatok előállításához. Az eljárás egyik előnye, hogy a nagy sebesség csökkenti a kezelési időt és a hőgradienst is, mivel a lézersugár előmelegíti a hordozó alaptestet.

Az LMD eljárás (Laser Mixed Diode), amelynek magyar megfelelője a „kevert lézerdióda” megnevezés, arra utal, hogy maga a lézeresugaras hőforrás több lézerdióda egység különböző hullámhosszúságú diódaegység energiáját használja. A rövidített LMD megjelölést a drezdai Fraunhofer Intézet és a Laserline cég munkatársai használták először, utalva az általuk kifejlesztett berendezésre [10, 11].

Az eljárás hőforrása több különböző hullámhosszúságú sugárzási tartományban koherens fényt kibocsátó dióda köteg fényenergiájának összegyűjtésével nyert sugárnyaláb, amelyet különböző szűrőkön és prizmákon átvezetve egy optikai kábelen keresztül juttatunk el a hevítendő közeghez. Jelen esetben ez maga a por hozaganyag, vagy a felületre termikus szórással felvitt NiCrBSi réteg. A hatékonyság fokozása érdekében dielektromos élszűrőket alkalmaznak [12, 13].

## 1. NiCrBSi ANYAGÚ BEVONATOK LÉTREHOZÁSA

### 1.1. Próbatetek készítése

A kevertlézeres újraolvasztási technológia első kísérleteihez olyan alaptestet alkalmaztunk, amely lehetővé tette a széles olvasztási sávban való műveletet. Az olvasztási körülményeknek jól megfelelt a 300 mm hosszú 40 × 10 mm téglalap szelvényű lapos próbatetest alkalmazása. Az alaptest C45E minőségű EN 10083-2:2006 [14] acélból készült, amelynek termikus szórásra kerülő felületét 0,8 mm szemcseméretű korunddal érdesítettük. A felhasznált acél próbatetest összetételét és keménységét az 1. táblázat tartalmazza.

A próbatesthez használt acél vegyi összetétele és keménysége

1. táblázat

Az acél minősége	Összetétel [tömeg%]			Keménység, [HV]	
	C	Mn	Si	Normalizált	Nemesített
C 45E	0,45	0,60	0,30	200...2	480

Az ISO 21920-2:2021 [15] szabvány figyelembevételével két darab  $300 \times 40 \times 10$  mm méretű próbatestet választottunk ki, amelyeknek egyik,  $300 \times 40$  mm méretű felületén a szemcseszórást végeztünk.

## 1.2. Termikus szórás nagysebességű eljárással

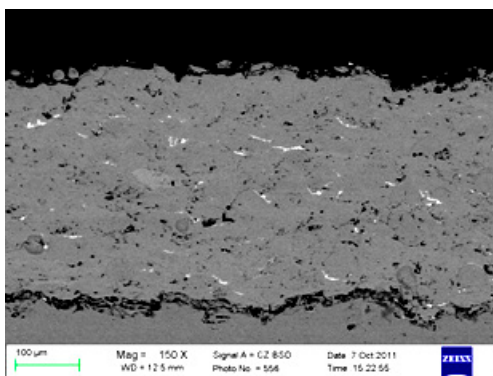
A termikus szórás Metco 5P jelű nagysebességű szórópisztollyal történt, a 2. táblázat szerinti beállítási értékek mellett. Az előkészítést követő érdességvizsgálat után a próbatestek termikus szórása nagysebességű (HVOF - High Velocity Oxy-Fuel) szórással 1 órán belül elkezdődött és 10 perc alatt befejezésre került. A próbatestek szórása az erre rendszeresített szórókabinban történt, amelyben a nemkívánatos égéstermékek (füstgázok) elszívása a szórás művelete alatt folyamatos volt.

A nagysebességű szórás (HVOF) jellemzői

2. táblázat

Technológiai adatok	Beállított értékek
A nagysebességű szórópisztoly típusa	Metco 5 P
Propán ( $C_3H_8$ ) nyomása, [bar]	3
Propán mennyiség, [l/min]	62
Oxigén nyomása, bar	5,5
Oxigén mennyiség [ l/min]	240
A szállított pormennyiség, [g/ min]	60
Szórási távolság, [mm]	180
Szórási sebesség, [m/s]	450
A szórópisztoly haladási sebessége, [mm/s]	10

Az 1. ábrán egy HVOF lángszórt Niborit 6-P porral készült NiCrBSi bevonat mikroszerkezete látható. A szórt réteg vastagsága  $453 \mu\text{m}$ . A nagysebességű (HVOF) lángszórással készült rétegek egyenletesebb és finomabb szerkezetűek, mint a hagyományos kisebb sebességű eljárással szórt bevonatok. Ugyanakkor itt is megfigyelhető a szórt rétegekre jellemző egyenetlen porózus szerkezet.



1. ábra. HVOF lánggal szórt NiCrBSi bevonat ( $N = 150x$ , Marószert 4 %-os  $HNO_3$ ).

## 1.3. A HVOF eljárással készült próbatestek szórt rétegének újraolvasztása

Mivel LMD lézersugaras módszerrel NiCrBSi réteg újraolvasztására nem volt gyakorlati tapasztalat, ezért az újraolvasztás tervezésénél és a technológiai jellemzők beállításánál főleg a korábbi hőkezeléseknél (például felületi edzésnél) alkalmazott értékek kerültek alkalmazásra, figyelembe véve az adott NiCrBSi réteg olvadási hőközének felső hőmérsékletét. Az újraolvasztási művelet alatt a próbatest  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra történő előmelegítése jól szabályozható villamos fűtésű kemencében történt,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -ról  $254 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra, 1 óra alatt, kb.  $4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  sebességgel. Az újraolvasztási művelet a termikus szórás követően 24 h-n belül megkezdődött és kb. 4 óra alatt befejezésre került. A nagysebességű (HVOF) szórással felvitt  $453 \mu\text{m}$  átlagos vastagságú réteg újraolvasztása - a lézer hőforrás megfelelő beállításával - a próbatest teljes szélességében ( $40 \text{ mm}$ ) történt. A réteg újraolvasztása egy erre a célra rendszeresített kabinban történt. A technológiai folyamat egy külső helyről szemlélhető monitoron követhető. Az újraolvasztott próbatest felületének hőmérséklete az újraolvasztás után 30 s-mal  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  volt. Az adott felületre fókuszált ( $20 \times 2 \text{ mm}$  és  $40 \times 6 \text{ mm}$ ) kevert

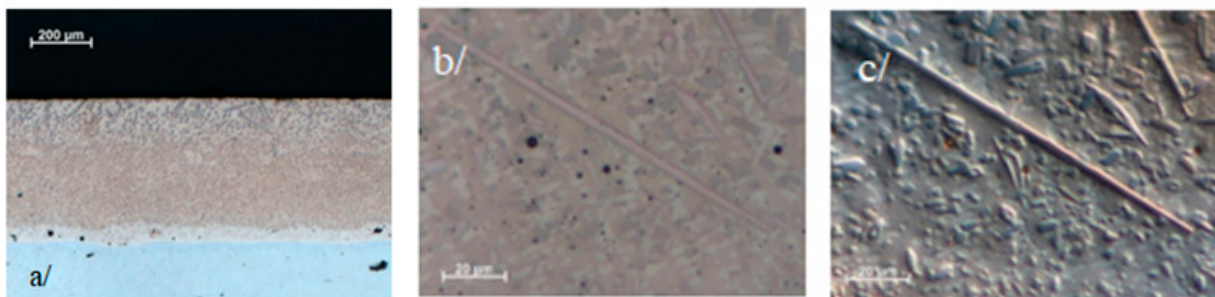
lézersugár által keltett hőenergia döntő része csak a réteg megolvastására fordítódott, az acél alaptest nem hevült fel olyan mértékben, hogy az eredeti hőkezelési állapot megváltozott volna.

Az újraolvasztás során a próbatetek tervezésénél figyelembe vettük, hogy legyen összehasonlítási alap a termikusan szórt, a lánggal és a kevert lézersugaras hőforrással újraolvasztott darabok között. A kiválasztott 14 újraolvasztási kísérlet tapasztalatait a következőkben összegezzük:

- az újraolvasztáshoz alkalmazott lézersugaras hőforrás messzemenőig alkalmas a felszórt NiCrBSi réteg újraolvasztására;
- a bevonat újraolvasztásához a szükséges szélesség méretben (0...10 mm × 10...70 mm) beállítható az a fókuszfelület, amelyben az újraolvadás megtörténik;
- a próbatest előmelegítése nagymértékben segíti a réteg újraolvasztását, de a szükségesnél jóval nagyobb újraolvasztási hőbevitel beállítása nincs jó hatással a felület minőségére;
- a korábbi tapasztalatokkal ellentétben a réteg jelentős keménysége ellenére sem keletkeztek repedések;
- az adott próbatest jellemzőit (C45E minőségű acél, 300 mm × 40 mm × 10 mm próbatest méret) és a 450 µm rétegvastagságot figyelembe véve az előmelegítésnek a réteg felületének minőségére nincs különösebben értékelhető szerepe.

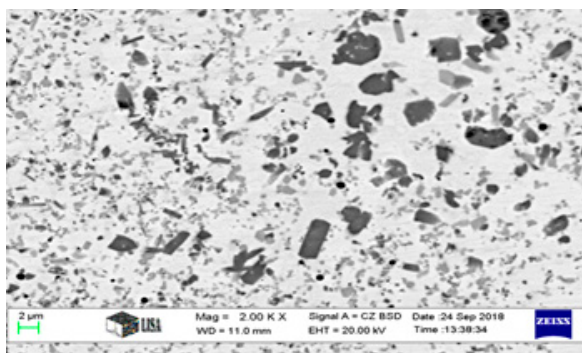
#### 1.4. Az újraolvasztott bevonat mikroszerkezetének vizsgálata

A vizsgált próbadarabokból mintát vettünk, amelyet kétkomponensű hidegen kötő gyantába ágyaztuk. A minták felületét mechanikusan csiszoltuk SiC csiszolópapírral, majd a mintákat políroztuk, 3 µm-es majd 1 µm-es gyémánt pasztával. A felületet először kovasavval marattuk, amely a réteg mikroszerkezetét tette láthatóvá (2. ábra). A kovasavat szilikagél vízben történő oldásával készítettük, 50-50 rész szilikagél és víz felhasználásával. A kovasavas maratás előnye, hogy differencia interferencia kontraszt alkalmazásával is tanulmányozhattuk a fázisokat, amely a morfológia megismerésében jelentős segítséget ad. A felvételeket Zeiss AxioImager M1m mikroszkóppal készítették. A mikroszkóp számítógép vezérelt tárgyasztallal működik, amely lehetőséget ad mozaikképek elkészítésére. Ezzel nagyobb terület dokumentálható azonos nagyításban, mind klasszikus felvételekkel.



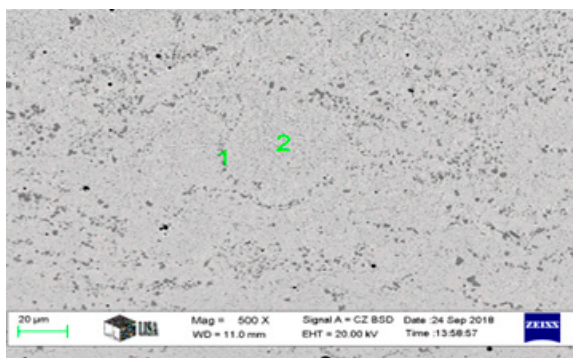
2. ábra. Az újraolvasztott rétegről készült felvételek. A baloldali kép (a/ ábra) a teljes réteget mutatja. A (b/ és c/ ábra) a felszín közeli intermetallikus vegyületeket tartalmazó rétegről készült. A bal oldali kép (a/ ábra) világos látótérben látható, a jobb oldali képek (a/ és b/ ábra) differencia interferencia kontrasztal készültek.

A 3. ábra 2000 x-es nagyításban mutatja a kemény fázisok jelenlétét, sötétebb szigetek formájában. Az újraolvasztott próbatetek felülete alapján a legjobb minőséget az No7 jelű próbatestnél érték el.



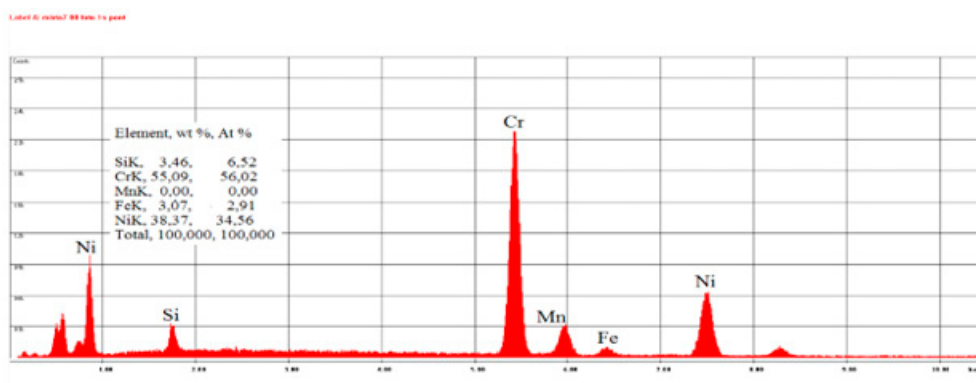
3. ábra. A No7. jelű próbatest újraolvasztott rétege (N =2000x, marószert 4 % HNO<sub>3</sub>)

A vizsgált próbatest mikroszerkezete a 4. ábrán látható. Az 500x nagyítású képen megfigyelhető a tömör, porozitásmentes réteg. A megfelelő vizsgálódás érdekében a rétegről minden esetben nyolc-nyolc képet készítettünk különböző nagyítások mellett.

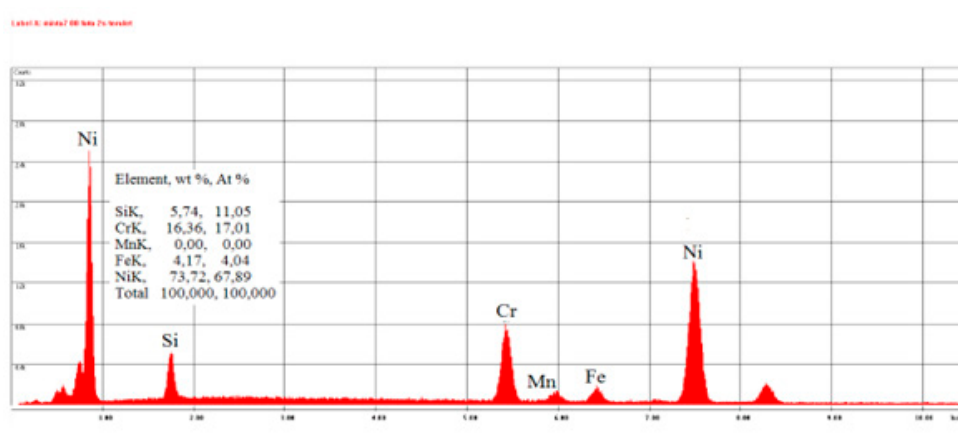


4. ábra. A No7. jelű próbatestről készült felvétel az 1-es és a 2-es pontok kijelölésével (marószerszer 4 %  $HNO_3$ ).

A réteg 1-es és 2-es pontokkal megjelölt felületi részén kémiai összetétel vizsgálatokat végeztünk, amelyek eredményei az 5. és a 6. ábrákon láthatók.

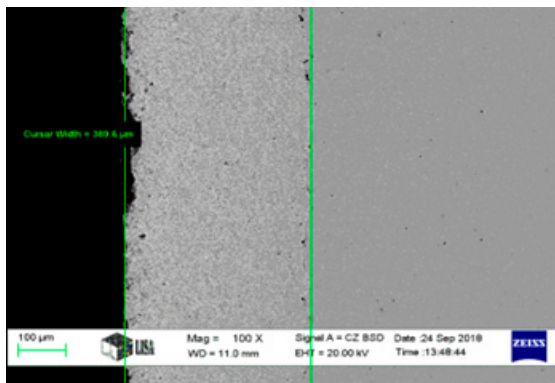


5. ábra. A No7. jelű próbatest 1-es pontjának vegyi összetétele



6. ábra. A No7. jelű próbatest 2-es pontjának vegyi összetétele

Az 5. ábrán szemléltetett összetétel szerint a Cr tartalom 16,36%, amely megfelel a kiinduló por összetételének, míg a 2-es pont mérés eredménye (6 ábra) a Ni mátrix fém jelenlétére utal. A 7. ábrán a vizsgált próbatest újraolvasztott rétegének vastagság mérési eredménye látható, amelynek az eredménye 398  $\mu m$ . A nagysebességű szórással felvitt réteg átlagos vastagsága 453  $\mu m$ , míg az újraolvasztott rétegé 398  $\mu m$  volt, tehát a művelet közben a rétegvastagság változott, amely a porozitás csökkenésével magyarázható. A 7. ábrán a réteg és az alapanyag közötti átmenet, valamint a termikus szórással készített, majd teljesen újraolvasztott réteg egyaránt látható.



7. ábra. A No7. jelű próbatesten végzett rétegvastagság mérés az újraolvasztott rétegben  
( $N = 100x$ , marószerszer 4 %-os  $HNO_3$ )

## ÖSSZEFOGLALÁS

Ez a tanulmány a NiCrBSi ötvözet rétegek tulajdonságaival foglalkozik, amelyeket egy nagysebességű (HVOF) szórással előállított szórt réteg és egy LMD kevertlézersugaras hőforrással történt újraolvasztás kombinációján alapuló technológiával állítottunk elő. Az eredmények azt mutatják, hogy a helyszíni lézeres újrafeldolgozás dendrites mikroszerkezet kialakulását indukálja, amely jelentősen csökkenti a szórt bevonat porozitását. Lézeres kezelés után fázisátalakulás nem figyelhető meg. A NiCrBSi nagysebességű termikus szórással felvitt bevonat kevert lézersugaras módszerrel való újraolvasztása lehetővé tette a homogén, porozitásmentes metallurgiai kötésű réteg kialakítását. A 300 mm hosszú próbatestek teljes hosszában a bevonat újraolvasztása nem okozott deformációt és az alaptest hőmérséklete sem emelkedett 300 °C fölé.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Pawlowski J. L. Thick Laser Coatings: *A Review*, *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 8, no. 2., pp. 279-295, <https://doi.org/10.1361/105996399770350502> 1999.
- [2] Mateos J., Cuetos J.M., Vijande R., and Fernandez E. *Tribological Properties of Plasma Sprayed and Laser Remelted 75/25 Cr3C2/NiCr Coatings*, *Tribol. Int.*, vol. 34, no. 5., pp. 345-351, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(01\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00023-8) 2001.
- [3] Lanin A., Fedik I. *Thermal Stress Resistance of Materials*, Springer Berlin, Heidelberg, 20 March 2008. ISBN 978-3-540-71399-9 DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71400-2>.
- [4] Sasaki S. *Tribological Properties of Coating Films Synthesised by Laser Assisted Plasma Spraying*, *Surf. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 238-242, <https://doi.org/10.1179/sur.1997.13.3.238> 1997.
- [5] Antou G., Montavon G., Hlawka F., Cornet A., and Coddet C. *Microstructures of Partially Stabilized Zirconia Manufactured Hybrid Plasma Spray Process*, *Ceram. Int.*, vol. 31, no. 4, pp. 611-619, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2004.08.001> 2005.
- [6] Miguel J.M., Guilemany J.M., and Vizcaino S. *Tribological Study of NiCrBSi Coating Obtained by Different Processes*, *Tribol. Int.*, vol. 36, no. 3., pp. 181-187, DOI:10.1016/S0301-679X(02)00144-5 2003.
- [7] *Alloy Phase Diagrams*, Vol 3, ASM Handbook, ASM International, 1992
- [8] Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F., and Cornet A. *Dry Coatings and Ecodesign. Part 2. Tribological Performances*, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 204, no. 1-2, pp. 197 – 204 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.07.011> 2009.
- [9] Kurz W., Bezençon C and Gäumann M. *Columnar to equiaxed transition in solidification processing*, *Science and Technology of Advanced Materials* March 2001. 2(1):185-191 DOI:10.1016/S1468-6996(01)00047-X.
- [10] Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. *Microstructure of Metallic NiCrBSi Coatings manufactured via Hybrid Plasma Spray and In Situ Laser Remelting Process*, *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 20., no. 1-2., pp. 336-343, DOI:10.1007/s11666-010-9565-1 2011.
- [11] Knitsch A., Luft A., Gross T., Ristau D. *Diode laser modules of highest brilliance for materials processing*, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, May 2002. DOI:10.1117/12.467954
- [12] Timms N., Bryden B., and Pashby I. *High power diode laser cladding*, *Journal of Materials Processing Technology* 138(1):411-416 DOI:10.1016/S0924-0136(03)00109-2 July 2003.
- [13] Fritsche H., Ferrario F., Koch R., Kruschke B. *Direct diode lasers and their advantages for materials processing and other applications*, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 9356 DOI:10.1117/12.2080208 March 2015.
- [14] EN 10083-2:2006, C45 Közepes széntartalmú, univerzális szerkezeti acél.
- [15] ISO 21920-2:2021, Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters.