

- [18] **Krannich, G. et al.** (1997): Formation of cubic boron nitride thin films by reactive cathodic arc evaporation, *Diamond and Related Materials* 6 : 1005-1009
- [19] **Mitterer, C.** (1997): Borides in Thin Film Technology, *Journal of Solid State Chemistry*, Volume 133, Issue 1 : 279-291
- [20] **Jankowski, A.F.** (1995): Metallic multilayers at the nanoscale, *Nanostructured Materials*, Vol. 6 : 179-190
- [21] **He, J.L. et al.** (2001): Improved anti-wear performance of nanostructured titanium boron nitride coatings, *Wear* 249 : 498-502
- [22] **Cole, D. et al.** (1997): Pulsed laser deposition of Fe thin film sin UHV, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 165 : 246-249
- [23] **Senthil Selvan, J. et al.** (1999): Laser boronising of Ti-6Al-4V as a result of laser alloying with pre-placed BN, *Materials Science and Engineering A260* : 178-187
- [24] **Wang, P. Z. et al.** (1996): Cemented carbide reinforced nickel-based alloy coating by laser cladding and the wear characteristics, *Materials & Design*, Volume 17, Issues 5-6 : 289-296
- [25] **Zum Gahr, K.-H. et al.** (1995): Friction and wear reduction of Al₂O₃ ceramics by laser-induced surface alloying, *Wear* 181-183 : 118-128
- [26] **Song, W. et al.** (1996): Effect of Ni content on cracking susceptibility and microstructure of laser-clad Fe-Cr-Ni-B-Si, *Surface and Coatings Technology* 80 : 279-282
- [27] **Wang, K.L. et al.** (1997): Effect of laser surface cladding of seria on the wear and corrosion of nickel-based alloys, *Surface and Coatings Technology* 96 : 267-271
- [28] **Mridha, S. et al.** (1997): Metal matrix composite layer formation with 3 μ m SiCp powder on IMI318 titanium alloy surfaces through laser treatment, *Journal of Materials Processing Technology* 63 : 432-437
- [29] **Chong, P.H. et al.** (2001): Microstructure and wear properties of laser surface-clad Mo-WC MMC on AA6061 aluminium alloy, *Surface and Coatings Technology* 145 : 51-59
- [30] **Pinkerton, A.J.- Li, L.** (2003): The effect of laser pulse width on multiple-layer 316L steel clad microstructure and surface finish, *Applied Surface Science*, Volumes 208-209 : 411-416
- [31] **Conde, A. et al.** (2002): Cladding of Ni-Cr-B-Si coatings with a high power diode laser, *Materials Science and Engineering A*, v 334, n 1-2 : 233-238
- [32] **Wu, X. - Hong, Y.** (2001): Fe-based thick amorphous-alloy coating by laser cladding, *Surface and Coatings Technology* 141 : 141-144
- [33] **So, H. et al.** (1996): Wear behaviours of laser-clad stellite alloy 6, *Wear* 192 : 78-84
- [34] **Petrides, M. et al.** (2001): Influence of Model Tests on the Selections of Lubricants for Gears in Dental Instruments, *Plenary and Session Key Papers from the 2nd World Tribology Congress Vienna, Austria 3-7 September, Österreichische Tribologische Gesellschaft – ÖTG*, ISBN 3-901657-07-X : 211–214
- [35] **Lubbinge, H.** (1999): On The Lubrication of Mechanical Face Seals, *FEBO druk B.V., Enschede*, ISBN 90-3651240-9: 113
- [36] Prüfung von Schmierstoffen, Prüfung im Mischreibungsgebiet mit dem Schmierstoffprüfgerät nach Brugger, Teil 2. Verfahren für Schmieröle, DIN 51347-2
- [37] 1997 Reade Advanced Materials, http://www.reade.com/Prodducts/Ferro_Alloys/ferro_boron.html (2004. május 27.)
- [38] *Ferroalloys & Alloying Additives Online Handbook – Boron*, 2002, Shieldalloy Metallurgical Corporation, <http://www.shieldalloy.com/boronpage.html> (2004. szeptember 6.)
- [39] **Sebestyén T. et al.** (2002): Formation of Highly Boron-Alloyed Surface Layer by Laser Beam, *Gépészet* 2002, Budapest, Hungary, May 30-31
- [40] **Sebestyén T. et al.** (2001): Wear Resistance Improvement of Selected-Laser-Sintered Tools by Laser Surface Treatment, *Laser Assisted Net Shape Engineering 3 – Proceedings of the 3rd LANE 2001 Erlangen, Germany, August 28–31*, ISBN 3-87525-154-7 : 439-446



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI KAR
Kandó Kálmán Multidiszciplináris Műszaki Tudományok Doktori Iskola

EGYES LÉZERSUGARAS FELÜLETI BEVONATOK HATÁSA A GYORSPROTOTÍPUS SZERSZÁMELEMEK TRIBOLÓGIAI TULAJDONSÁGAIRA

című doktori értekezés összefoglaló kivonata

Készítette:
Sebestyén Tamás
okleveles gépészmérnök

Témavezető:
Dr. Buza Gábor
egyetemi docens

Budapest
2007

- [S22] **Herczeg Sz. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A. - Sebestyén T.** (2004): Tribological analysis of Fe-Ni-Cu alloy produced by selective laser sintering, Laser Assisted Net Shape Engineering 4, Erlangen., September 21-24., pp.:535-544 in Volume 1, ISBN 3-87525-202-0
- [S23] **Sebestyén T.** (2004): Laser Surface Heat Treatment – An Overview, ÖTG Symposium 2004, Reibung und Verschleiss im Spannungsfeld von Fahrzeugherstellern und deren Kunden, Nov. 4. pp 247-256, ISBN 3-901657-15-0

9 A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALMAK

- [1] **Hague, R.** (2000): Conference Report, The 8th International Conference on Rapid Prototyping, June 12 & 13, Japan, Japanese Society of Die and Mold Technology (Japan) & University of Dayton Research Institute (USA), <http://www.lboro.ac.uk/departments/mm/research/rapid-manufacturing/consortium/confsyn/Japan2000.pdf> (2004. június 12.)
- [2] **Takács J. - Pap G.- Kálazi Z. - Bán T.** (1995): Rapid Prototyping of Laminated Structure with the Use of CO₂ Laser. Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, 12. International Colloquium, BME, Balatonfüred : 92-95
- [3] **den Ouden, A.** (2004): Homepage, Eindhoven – Nederland, <http://www.denouden.demon.nl/capsel/raprod4.htm> (2004. június 12.)
- [4] Helsinki University of Technology http://www.cs.hut.fi/~ado/rp/subsection3_6_3.html (2004. március 4.)
- [5] **Wiesner, P. - Eckstein, M. - Son, T.** (1997): Rapid Metal Prototyping Using Laser Radiation, Proceedings of the LANE '97, Meisenbach Bamberg : 555-559
- [6] **Seitz, S. - van de Crommert, S. - Esser, K. J.** (1997): New Materials for New Applications in SLS® Selective Laser Sintering, Proceedings of the LANE '97, Meisenbach Bamberg : 623-628
- [7] **Coremans, A. - Groot, D.** (1997): Residual Stresses and Thermal Stability of Laser Beam Sintered Metal Parts, Proceedings of the LANE '97, Meisenbach Bamberg : 577-588
- [8] **Khaing, M.W. et al.** (2001): Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts, Journal of Materials Processing Technology, Volume 113, Issues 1-3 : 269-272
- [9] **Bertóti I.** (1997): Felületvizsgálat röntgen-fotoelektron spektroszkópiával (XPS – ESCA) Doktori tanfolyami jegyzet, MTA Szervetlenkémiai Kutatólaboratórium Bp. : 4-7
- [10] **Beyer, E - Wissenbach, K.** (1998): Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-63224-7.
- [11] **Holzschuh, H.** (2004): Deposition of Ti-B-N (single and multilayer) and Zr-B-N coatings by chemical vapor deposition techniques on cutting tools, Thin Solid Films, 469-470 : 92-98
- [12] **Kalss, W. et al.** (1998): Deposition of B---C---N coatings from trisdimethylaminoboran by hot-filament and microwave plasma activation, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 16, Issue 3 : 233-241
- [13] **Choy, K.L.** (2003): Chemical vapour deposition of coatings, Progress in Materials Science, Volume 48, Issue 2 : 57-170
- [14] **Harris, K.D. et al.** (2001): Porous thin films for thermal barrier coatings, Surface and Coatings Technology, Volume 138, Issues 2-3 : 185-191
- [15] **Wolfe, D.E. et al.** (2003): Synthesis and characterization of multilayered TiC/TiB₂ coatings deposited by ion beam assisted, electron beam-physical vapor deposition (EB-PVD), Surface and Coatings Technology 165 : 8-25
- [16] **Wang, J. et al.** (2001): Structure and tribological properties of MoS_x coatings prepared by bipolar DC magnetron sputtering, Surface and Coatings Technology 139 : 143-152
- [17] **Guruz, M.U. et al.** (2002): Synthesis and characterization of single and multilayer boron nitride and boron carbide thin films grown by magnetron sputtering of boron carbide, Thin Solid Films 414 : 129-135

- [S6] **Sebestyén T. - Kálazi Z. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A.** (2001): Improvement of Selected-Laser-Sintered Rapid Prototype Tools by Laser Surface Treatment, MATRIB '01, Vela Luka, Croatia 20-22. 06. 2001 ISBN 953-96038-7-0
- [S7] **Buza G. - Kálazi Z. - Sebestyén T.** (2001): A szilárdtestlézerek új generációja, Bányászati és Kohászati Lapok. 134.. 3. : 103 – 108
- [S8] **Sebestyén T. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A.** (2001): Laser Surface Coating for Improvement of Wear Resistance of Rapid Prototype Tools, 18th International Colloquium – Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Dresden 20-22. 05. 2001 ISSN 1433 – 4135
- [S9] **Sebestyén T. - Kálazi Z. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz A.** (2001): Wear Resistance Improvement of Selected-Laser-Sintered Tools by Laser Surface Treatment, 3rd LANE 2001, Erlangen, Germany, August 28-31, 439 p. ISBN 3-87525-154-7
- [S10] **Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A. - Sebestyén T.** (2001): Investigation of Tribological Properties of Laser-Sintered and Coated Parts, 2nd World Tribology Congress, Vienna, Austria, Sept. 3-7 ISBN 3-901657-08-8 (CD: ISBN 3-901657-09-6)
- [S11] **Buza G. - Fábíán R. - Kálazi Z. - Sebestyén T. - Somogyi R.** (2001): Lézeres mélyvarratos hegesztés hőhatásövezete. Bányászati és Kohászati Lapok. 134. 6 – 7. : 247 – 251
- [S12] **Sebestyén T. - Franek, F. - Pauschitz, A. - Takács J. - Tóth L.** (2002): Increase of Wear Resistance of Laser-Sintered Parts by Laser Coatings, Tribology and Lubricants Engineering, Esslingen, Germany, Jan. 15-17 ISBN 3-924813-48-5
- [S13] **Buza G. - Molnár M. - Kálazi Z. - Sebestyén T.** (2002): Laser Beam Welding of Austenitic Stainless Steel, 19th International Colloquium – Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Pardubice, Czech Republic, May 26-28 ISBN 80-7194-449-1
- [S14] **Tóth L. - Sebestyén T.** (2002): Plazmaszórt és lézeresen kezelt felületek, bevonatok alkalmazása és tribológiai vizsgálata, Géptervezők és Termékfejlesztők XVIII. Országos Szemináriuma, Miskolc (Gép. LIII. . 8-9. 51.)
- [S15] **Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A. - Sebestyén T.** (2003): Friction and Wear Measurement of Laser Sintered and Coated Parts, Washington D.C., USA, March 31 – April 3 2003 (Wear 256 :. 1228-1231)
- [S16] **Sebestyén T. - Buza G. - Kálazi Z. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A.** (2003.): Tribological Investigations of Parts Sintered and Coated by Laser Beam (Lézersugárral szinterelt és bevonatolt darabok tribológiai vizsgálatai) IV. Országos Anyagtudományi, Anyagvizsgálói és Anyaginformatikai Konferencia és Kiállítás, Balatonfüred, október 12 - 14. Materials Science Forum Vol. 473-474, ISSN=0255-5476, ISBN=0-87849-957-1
- [S17] **Polt, G. - Sebestyén T. - Franek, F. - Pauschitz, A.** (2003): Investigation of Stick-slip Effects in Wet Friction Drive Elements (poster), IV. Országos Anyagtudományi, Anyagvizsgálói és Anyaginformatikai Konferencia és Kiállítás, Balatonfüred., október 12 - 14. Materials Science Forum Vol. 473-474, ISSN=0255-5476, ISBN=0-87849-957-1
- [S18] **Sebestyén T. - Buza G. - Kálazi Z.** (2004): Formation of Highly Boron-Alloyed Surface Layer by Laser Beam, Gépészet 2002, Budapest, Hungary, May 30-31 2002
- [S19] **Herczeg Sz. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A. - Sebestyén T.** (2004): Tribological investigation of Fe-Ni-Cu based selective-laser-sintered rapid prototype tool models against fibre-reinforced polymer, Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Balatonfüred., May 17-19., pp.:174-178, ISBN 963 420 796 0
- [S20] **Herczeg Sz. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A. - Sebestyén T.** (2004): The Effect of Sinter Parameters on Tribological Properties of Selective-Laser-Sintered Rapid Prototype Tool Elements, Proceedings 8th International Conference on Tribology, Veszprém, Hungary, jun. 3-4.: 144-149
- [S21] **Herczeg Sz. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A. - Sebestyén T.** (2004): Investigation of Properties of Rapid Prototype Tool Elements Produced by Selective Laser Sintering, Proceedings of the 11th International Conference on Tools ICT-2004, Miskolc, Hungary, September 9-11., pp. 271-276, ISSN 1215-0851

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	4
1 A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI	6
2 KUTATÁSI MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK, BERENDEZÉSEK	6
2.1 Az alkalmazott mérési módszerek és kísérleti berendezések	6
2.1.1 A bot-tárcsa elven működő tribométer és mérés	6
2.1.2 A módosított Brugger-teszt elvén működő tribométer és mérés	7
2.2 A vizsgálati anyag	9
2.2.1 A szelektív lézerszinterezéssel kialakított gyűrűk tulajdonságai	9
2.2.2 A lézersugaras felrakó hegesztéssel bevont próbatestek jellemzői ...	10
2.2.3 A szálerősítéses műanyag ellendarab szerkezete, tulajdonságai	15
3 TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI	15
3.1 Tribológiai vizsgálatok eredményei bot-tárcsa módszerrel	15
3.1.1 A bot-tárcsa kísérleteknél mért kopási jellemzők	15
3.1.2 A bot-tárcsa kísérleteknél mért súrlódási jellemzők	16
3.1.3 A felületi érdesség jellemzőinek alakulása a bot-tárcsa kísérleteknél	16
3.2 A módosított Brugger-teszt szerint végzett mérések eredményei	17
3.2.1 A módosított Brugger-teszteknél mért kopási jellemzők	17
3.2.2 A módosított Brugger-teszteknél mért súrlódási jellemzők	20
4 A TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEINEK ÉRTÉKELÉSE, ÁLTALÁNOSÍTHATÓ MEGÁLLAPÍTÁSOK	22
5 KÖVETKEZTETÉSEK	23
6 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	24
7 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	25
8 A DISSZERTÁCIÓVAL KAPCSOLATOS PUBLIKÁCIÓK	25
9 A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALMAK	27

BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben folyamatosan bővült a kompozitok, így a nagyteljesítményű szálerősítéses műanyagok járműipari alkalmazása. Várható, hogy a fröccsöntött műanyag alkatrészek felhasználásának aránya a jövőben a járművek tömegére és az alkatrészek számára vetítve egyaránt tovább növekszik. Ma már megszokott, hogy a tervezők és a gyártók a gyorsprototípus-gyártás eszközeihez nyúlnak a gyártás- és a gyártmánytervezés hatékonyságának növelése, költségeinek csökkentése érdekében. Ez a technológia lehetővé teszi, hogy a termék (alkatrész) már jóval a piacra kerülése (tömeggyártása) előtt kézzelfoghatóvá váljék, illetve mechanikai, szilárdsági, ergonómiai stb. tesztek elvégzését tegye lehetővé, így biztosítva az esetleg szükséges módosítások lehető legkorábbi elvégzését [1, 2]. A teszteléshez jellemzően egy kisebb, 2-300 darabos széria legyártása szükséges.

A tervezettel belső szerkezetében is (pl. száltartalom, száleloszlás, orientáció) megegyező modell előállítására üveg- vagy grafitzállal erősített műanyagok esetében – jelenlegi műszaki ismereteink szerint – a gyorsprototípus-gyártás eszközeivel nem, vagy csak igen nagy költséggel lehetséges. Indirekt módszer segítségével [3], vagyis ha a fröccsöntőszerszámot hozzuk létre például szelektív lézerszinterezéssel [4], akkor az előállított szerszámban már tetszőleges belső szerkezetű (pl. szálerősítéses) műanyag alkatrészek állíthatók elő fröccsöntéssel.

A bonyolult geometriájú műanyag fröccsöntőszerszámok gyors előállítására a szelektív lézersugaras szinterezés a leginkább elterjedt technológia. A modell-szerszámnak természetesen megfelelő szilárdsági és kopásállósági tulajdonságokkal kell rendelkeznie ahhoz, hogy a fröccsöntési követelményeket kielégítse. A hozzáférhető szakirodalomban a szelektív lézersugaras szinterezéssel előállított darabok mechanikai tulajdonságairól fellelhető ugyan kevés adat [5-8], a kopási-súrlódási – összefoglaló néven tribológiai – tulajdonságaikról azonban a Friedrich Franek és Takács János professzor urak által kezdeményezett, a BME (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) és a TU-Wien (Bécsi Műszaki Egyetem) együttműködésével elindított kutatási irányvonal eredményeként megszületett publikációkon kívül nem találtam adatokat.

A fröccsöntött, szálerősítéses műanyag alkatrészek előállítása kapcsán az ipar részéről egy új igény körvonalazódik, ami a gyorsprototípus-gyártást a létrehozott szérianagyság növelésével (mely könnyen akár több ezer darabos sorozatot is jelenthet) a gyorsgyártás paradigmához közelítené. Ehhez természetesen szükséges, hogy a modellszerszám - elsősorban kopásállóság tekintetében - egy nagyságrenddel nagyobb élettartammal rendelkezzen. Erre különösen ott van szükség, ahol az anyagáram folytán a fröccsöntési sebesség és a nyomás nagy kopást eredményez. Ez a jelenség elsősorban a szerszám szűk keresztmetszeteinél, például a fűvókánál, a beömlőnyílások környékén figyelhető meg.

7 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kutatómunkámat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Járműgyártás és –javítás Tanszék (BME-JJT), a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet (BAYATI), valamint a Technische Universität Wien Institut für Mikro- und Feinwerktechnik (TU-Wien IMFT) segítségével folytattam. A BAYATI CO₂ lézerberendezésével végzett felületi bevonási tapasztalatai, valamint a BME lézerszinterezési kutatásai alapján született osztrák-magyar államközi kutatási egyezmény által támogatott kutatási projekthez (TÉT) kapcsolódhattam, mely dolgozatom egyik alapjául szolgált. Köszönetemet szeretném kifejezni mindazoknak, akik a dolgozat elő- és elkészítésében segítségemre voltak.

Elsősorban köszönöm Dr. Buza Gábor docens úrnak a BAYATI igazgatóhelyettesének és Dr. Takács János professzor úrnak a BME Járműgyártás és –javítás Tanszék vezetőjének, hogy lehetőséget adtak a kutatómunka végzéséhez, valamint, hogy tudományos iránymutatásaikkal, tanácsaikkal segítették munkámat. Köszönöm a BAYATI és a BME-JJT munkatársainak, kollégáimnak a készséget a mindenkori konzultációra, a kísérletek előkészítésében és kiértékelésében nyújtott segítséget. Munkám nem születhetett volna meg Dr. Kálazi Zoltán, Dr. Tóth Lajos, Dr. Markovits Tamás és Fábian Enikő Réka közreműködése nélkül.

Külön köszönöm Dr. Friedrich Franek professzor úrnak és Dr. Andreas Pauschitz úrnak, valamint az Institut für Mikro- und Feinwerktechnik munkatársainak pótolhatatlan segítségét, amellyel lehetővé tették ismereteim elmélyítését a tribológia tudományában, illetve szükséges vizsgálataim elvégzését.

Ugyanitt fejezném ki köszönetemet a Mechroll Gépipari Betéti Társaságnak próbatesteim előkészítéséért.

Végül, de nem utolsósorban köszönöm családomnak és barátaimnak a végtelen türelmet és biztatást, ami óriási segítséget és biztos háttérrel jelentett a kutatómunka végzésében és a dolgozat megírásában.

8 A DISSZERTÁCIÓVAL KAPCSOLATOS PUBLIKÁCIÓK

- [S1] **Sebestyén T. - Kálazi Z. - Buza G. - Takács J.** (1999): Acélok felületi edzése rezgetett lézersugárral. Bányászati és kohászati lapok. 132. 8.
- [S2] **Kálazi Z. – Sebestyén T.** (2000): Lézersugár diagnosztika a BAYATI-ban, ILAS – Ipari Lézer Alkalmazási Szeminárium, Balatonfüred, október 26-27.: 22-23. ISBN 963421554-8
- [S3] **Sebestyén T. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A.** (2000):. The Investigation of Tribological Properties of Laser-Sintered Parts, 17th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Zielona Góra - Lagów, Poland, June 7-9, ISBN 83-85911-51-0
- [S4] **Sebestyén T. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A.** (2000): Tribological Aspects of Wear of Laser-Sintered Rapid Prototype Tools, NATO-Advanced Study Institute Course on Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between Macro- and Micro/Nanoscale Tribology, Keszthely, Aug. 13-25 571 p. ISBN 0-7923-6837-1
- [S5] **Sebestyén T. - Takács J. - Tóth L. - Franek, F. - Pauschitz, A.** (2000): Determination of Tribological Properties of Laser-Sintered Prototype Tools, VII. Tribológiai Konferencia, Budapest, szeptember 4–5: 314-317

eredményező felületkezelés nemcsak a nagyobb helyi igénybevételeknek áll ellen, de adott szerszámmal nagyobb darabszámú sorozat legyártását is lehetővé teszi. Ezzel lehetővé válhat egy szinte utópisztikus – a gyorsprototípus-gyártás felől a gyorsgyártás irányába mutató - tendencia közelítése, ahol a gyorsgyártással létrehozott szerszám teljes értékű alkatrészek előállítására - fröccsöntésére – is képes lehet.

6 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. **TÉZIS:** Szelektív lézerszinterezett **porózus foszforbronz** (EOSINT M Cu 3201) **felületén elsőként hoztam létre** több rétegű, homogén, kemény, erős koptató igénybevételnek ellenálló, **kopásálló ferrobór réteget a lézersugaras felrakó hegesztés technológiájával** [40].
2. **TÉZIS:** **Meghatároztam a kopásálló ferrobór rétegek egy lépéses lézersugaras felszórási technológiája legfontosabb befolyásoló jellemzőinek értékét** (fajlagos porbevitel, pásztázási sebesség, fajlagos lézerteljesítmény, védőgáz minőség és mennyiség). Kísérleti úton **igazoltam** a tömör réteg kialakításához szükséges **technológiai adatok helyességét**. Azonos geometriai körülmények esetén tömör, gyengén ötvözött acél egy rétegben (750 W lézerteljesítmény, 500 mm/min sebesség, 9,75 g/min adagolt pormennyiség), szelektív lézerszinterezett porózus foszforbronz (EOSINT M Cu 3201) két rétegben vonható be (500 mm/min sebesség, 9,75 g/min adagolt pormennyiség, 1. réteg: 750 W, 2. réteg: 1000 W lézerteljesítmény) [40].
3. **TÉZIS:** **Az** azonos geometriai körülmények között **előállított** felületi ferrobór **rétegek** - helyes (optimális) lézersugaras rétegfelviteli technológia esetén – gyengén ötvözött tömör szerszámacél anyagon már az első, szelektív lézerszinterezett porózus foszforbronz anyagon a második létrehozott réteg – **az alapanyagétól független metallográfiai és tribológiai tulajdonságokat mutatnak** a vizsgálati tartományban ($pv = 4...17 \text{ (N/mm}^2\text{)} \cdot \text{(m/s)}$) [39].
4. **TÉZIS:** A módosított Brugger-teszt mérési adatai szerint **a lézersugaras kezeléssel létrehozott ferrobór réteg** szálerősítéses PPS és PEEK műanyagokkal szembeni **kopásának mértéke** a vizsgálati tartományban ($pv = 4...17 \text{ (N/mm}^2\text{)} \cdot \text{(m/s)}$) **egyötöde a szelektív lézerszinterezett foszforbronz alapanyagénak** [39].
5. **TÉZIS:** **A Co-bázisú felületbevonó anyag** (C 0,76 / Mn 0,31 / Fe 3,13 / Si 2,48 / Ni 13,13 / Cr 19,23 / W 7,75 / B 1,79 / Co Bal.) **kopásállósága** – azonos geometriai viszonyok és optimális lézersugaras rétegfelviteli technológia esetén, azonos vizsgálati tartományon ($pv = 4...17 \text{ (N/mm}^2\text{)} \cdot \text{(m/s)}$) belül - **legfeljebb 50%-kal nagyobb, mint a ferrobóré** (B 19 / Si 2,11 / C 0,44 / Fe Bal.), **de ára legalább egy nagyságrenddel nagyobb**. FeB bevonat alkalmazásával lehetővé válik drágább (pl. kobaltbázisú) rétegek képző anyagok kiváltása [39].

A probléma kezelésére elvileg több megoldás is szóba jöhet [9-22]. A korábbi munkáim során szerzett tapasztalatok és ismeretek, valamint a környezetemben elérhető lehetőségek alapján a megoldást a lézersugaras felületmódosítási technológiák irányában kerestem [23-33]. Az ún. egy lépéses lézersugaras bevonási technológiával akár porózus szinterezett felület bevonása is megoldhatóan tűnik, ami a kopásállóság helyi növelésére is alkalmas lehet. A kopásállóság növelésére a fröccsöntés hőmérsékletén is alkalmazható, hagyományos bevonóanyagok közül a Co-bázisú, W- és Cr-karbidokkal erősített ötvözetet választottam. Vizsgálataim során az ebből az ötvözetből létrehozott bevonatot tekintettem az összehasonlítás alapjának. Újabb lehetőség kereséseként, anyagtudományi, ill. metallurgiai alapismeretekre támaszkodva, nagy bór tartalmú ötvözet (ferrobór) alkalmazhatóságát vizsgáltam. Az új bevonóanyag vizsgálatával célt volt a drága bevonóanyagok kiváltása olcsó, az alkalmazásnak megfelelő ötvözetel.

A szakirodalomban fellelt elméleti gondolatokat igyekeztem méréseimmel igazolni. A kopásvizsgálatokat kétféle módszerrel (bot-tárcsa és módosított Brugger-teszt) végeztem lézerszinterezett foszforbronzon és gyengén ötvözött acélon, illetve ezek lézersugár segítségével bevont darabjain. Az említett ferrobór ötvözetet összehasonlítottam kopás és súrlódás, valamint alkalmazhatóság szempontjából egy közismert, kopásálló bevonatként széles körben alkalmazott kobaltbázisú ötvözetel. Vizsgálataim a metallográfiai jellemzők megismerésére is kiterjedtek. A lézersugaras bevonási technológia ugyan nem új keletű, azonban sem a szinteranyagok végzett lézersugaras bevonásról, sem az alkalmazott ferrobór anyagról korábban nem született publikáció, ezért indokolt volt az alkalmazott anyag párosításra vonatkozó lézersugaras bevonás megfelelő megmunkálási paramétereinek keresése.

A szelektív lézersugaras szinterezés ilyen módon történő alkalmazása új lehetőséget nyithat a gyorsprototípus-gyártás felől a gyorsgyártás irányába, ahol nemcsak néhány száz darabos széria előállítására alkalmas szerszám készíthető, hanem egy már akár pár ezer darabos sorozat elkészítésére képes szerszám is kialakítható egy korszerű, mindemellett kellőképpen rugalmas, „építő” technológiával.

Munkámhoz három kutatási intézmény biztosította a tudományos háttérrel. A szinterezett próbatesteket a BME-JJT (Járműgyártás és –Javítás Tanszék) biztosította, a lézersugaras bevonatok kialakítása a BAYATI-nál (Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézet) állt módomban, a tribológiai vizsgálatokhoz szükséges háttérrel pedig a TU-Wien IMFT (Institut für Mikro- und Feinwerktechnik) adta. A BAYATI akkreditált Materialográfiai Laboratóriumában metallográfiai vizsgálatokat végeztem az alapanyag és a felvitt réteg szerkezetének, a két réteg kapcsolódásának megismerésére, valamint a keresztmetszet keménységeloszlásának meghatározására. A próbatestek forgácsolásához a Mechroll Gépipari Betéti Társaság nyújtott segítséget.

1 A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

Disszertációmban bemutatott kutatásom két pilléren nyugszik: egyrészt egy szelektív lézersugaras szinterezéssel előállított prototípus szerszámként alkalmazni kívánt anyag (szerszámelem) tribológiai vizsgálatán, másrészt ugyanennek az anyagnak a kopásállóságát növelő bevonatok létrehozásán, és a bevonatok – elsősorban kopási-súrlódási - tulajdonságait felfedni hivatott tribológiai vizsgálatán. Alapvető célom tehát gyorsprototípus-gyártással létrehozott szerszámelemek élettartamának növelése, használhatóságának kiterjesztése lézersugaras felrakó hegesztés segítségével.

A szakirodalom áttekintése után jogosnak látszott felvetni a kérdést, milyen lehetőségekkel és korlátokkal jellemezhető a szelektív lézersugaras szinterezéssel előállított gyorsprototípus szerszámok alkalmazása, valamint, hogy az így előállított próbatesteken milyen módon hozható létre kopásálló bevonat és a létrehozott bevonatnak milyen mértékű élettartam növelő hatása van. Ennek megállapítására kopásálló bevonatot hoztam létre lézersugarasan szinterezett próbatesteken és acél referencia alanyon. A bevonatos darabokat szélsőséges koptató igénybevételnek tettem ki.

Munkámban a következő kérdésekre kerestem a választ:

- Milyen vizsgáló módszerrel lehet a gyakorlat szempontjából hasznos összehasonlító adatokat nyerni a szálerősítéses műanyag koptató igénybevételét jellemző tribológiai viszonyok modellezéséhez?
- Hogyan növelhető a lézersinterezéssel előállított szerszám kopásállósága, ezáltal élettartama, valamint a vele legyártható alkatrészek számára?
- Létre lehet-e hozni porózus fémtest felületén, tömör, kopásálló réteget lézersugaras felrakóhegesztéssel?
- Hogyan csökkenthetők a kopásálló réteg előállítási költségei?
- Milyen mértékben növeli egy porózus, lézersugarasan szinterezett szerszám felületének kopásállóságát a kialakított réteg?

2 KUTATÁSI MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK, BERENDEZÉSEK

2.1 Az alkalmazott mérési módszerek és kísérleti berendezések

2.1.1 A bot-tárcsa elven működő tribométer és mérés

A lézersinterezett szerszámelemek súrlódási és kopási jellemzőinek meghatározásához a TU-Wien IMFT nagy hőmérsékletű bot-tárcsa elven működő laboratóriumi tribométerét használtam (1. ábra). Laboratóriumi vizsgálataim során a valós terhelési körülményeket próbáltam modellezni a fröccsöntéskor fellépő nyomás, hőmérséklet és súrlódási sebesség közelítő értékeinek beállításával [34].

fröccsönthető darabszám 283464 darab. Ez a becsült érték a munkadarab méretének és a fúvóka átmérőjének növelésével tovább emelhető.

- A súrlódási együttható jellemzően 0,2 és 0,3 értékek között változott. Megfigyelhető, hogy - kifejezetten nagyobb nyomóerőnél, 50N fölött - az együttható értéke nagyobb szórást mutat mindkét bevonat esetében 0,6 m/s-os sebesség fölött. A mérési adatok nagy szórása valószínűleg annak tudható be, hogy - nagyobb nyomás és nagyobb sebesség együttes hatása esetén - a futás bizonytalanná válik. Ez azt jelenti, hogy körülbelül 2500 J súrlódási munka fölött a hőmérsékletváltozás következtében megváltoznak a súrlódási viszonyok. A kezdetben szárazsúrlódás részlegesen vagy egészben folyadéksúrlódássá alakul, ami a két anyag közötti bizonytalan futáshoz is vezet. Csak a normál erőt tekintve azonban kijelenthető, hogy a vizsgált bevonatok súrlódási tényezője a vizsgált terhelési tartományban ($p_v = 4...17 \text{ (N/mm}^2\text{)} \cdot \text{(m/s)}$) független az alkalmazott normál erő nagyságától.

5 KÖVETKEZTETÉSEK

A szálerősítéses műanyag fröccsöntésre alkalmas, szelektív lézersugaras szinterezéssel létrehozott szerszámanyag erős koptató hatásnak kitett felületét lézersugaras felrakóhegesztéssel módosítottam. Célom az volt, hogy a gyorsprototípus-gyártással készült szerszámokban a kopásállóság növelésével a jelenleginél lényegesen több fröccsöntött műanyag alkatrészt lehessen készíteni. A velük gyártott alkatrészek szerkezetileg is azonosak lesznek a tervezett elemmel és már nullszériás tesztelésekre is alkalmasak. Az eljárás gyorsabbá és hatékonyabbá teszi a tervezés folyamatát, megkönnyítve a gyártmány- és szerszámtervezők munkáját.

1., Lézersugaras felrakó hegesztéssel, egylépéses technológiával összefüggő, homogén réteget hoztam létre mind tömbi acél, mind szelektív lézersinterezett – éppen ezért porózus - foszforbronz alanyon. Lézersugaras bevonatként ferrobór metallurgiai előötvetet és kobaltbázisú ötvözetet alkalmaztam, melyek tribológiai tulajdonságaiban nagy hasonlóságot mutattak. Gazdasági alapon megfontolandó a drága kobaltbázisú ötvözet olcsóbb, könnyen hozzáférhető ferrobórral való kiváltása. Az optimális technológiai adatokkal létrehozott bevonatok kopásállósági jellemzői az alanyagtól függetlenek bizonyultak.

2., A módosított Brugger-teszt szerint végzett kopásvizsgálatok megfelelőnek mutatkoztak a szelektív lézersinterezett, illetve bevonatos próbatestek kopásállóságának összehasonlítására. A henger-henger elrendezésű triboteszterrel alkalmazható terhelőerő és az ellendarabként választott nagyteljesítményű szálerősítéses – járműiparban széleskörűen alkalmazott – polimer kellően nagy kopást eredményezett ahhoz, hogy a bevonatok kopási tulajdonságai a vizsgálati eredmények alapján jól elkülönüljenek egymástól.

3., A szerszám anyagának élettartama növelhető volt lézersugárral szinterezett foszforbronz lokális felületi lézersugaras bevonásával. A hosszabb élettartamot

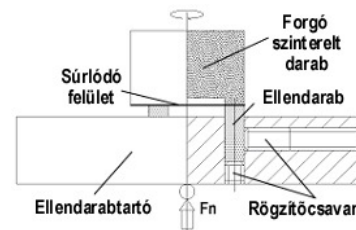
4 A TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEINEK ÉRTÉKELÉSE, ÁLTALÁNOSÍTHATÓ MEGÁLLAPÍTÁSOK

A bot-tárcsa elven végzett tribológiai vizsgálatokra vonatkozóan, a vizsgált terhelési tartományban a következő megállapítások tehetők:

- A jellemző koptató mechanizmus a várakozásoknak megfelelően abrazív, leginkább az üvegszálak „szántó” hatásának következményeként. A kopott felszínen kitöredezetség, pittingesedés nem tapasztalható. Megfigyeléseim szerint a lézerszinterezett próbatestek kopásának mértéke – az összes bot-tárcsa kísérletet tekintve - kicsi, a vizsgálati körülmények esetén maximálisan 0,26 mm.
- A fröccsöntött műanyag munkadarabokra vonatkozó mérettűrés szerint a munkadarab mérete alapján számított legkisebb elméleti fröccsönthető darabszám 664 darab (250 mm fölötti névleges méret esetén) és 984 darab (6-18 mm névleges méret esetén) közé esik.
- A súrlódási együttható értéke méréseim szerint 0,1 és 0,2 között változott. Szobahőmérséklet és 80°C között az együttható értéke enyhén növekszik a növekvő normál erővel, 80°C felett azonban a μ értéke kisebb ütemben emelkedik ill. állandósul. Nagyobb hőmérsékleten - 150–180°C körül - a súrlódási együttható értéke - feltehetőleg a mátrix részleges megolvadásának következtében - növekvő normál erő mellett csökken. Méréseim szerint a sebesség nem volt hatással a súrlódási együttható alakulására.
- A lézerszinterezett darabok felületi érdessége – amennyiben felületük elő lett készítve - nem változott jelentősen. Ez annyit jelent, hogy az Ra értéke 1 és 2 μm között változott. Előkészítés nélkül a felületi jellemzők változása jelentős volt: az Ra értéke 10–14 μm -ról 10 μm alá csökkent. Előkészítés nélküli próbatestek esetén tapasztalható, hogy a koptatás során a műanyag mátrix anyaga hajlamos volt a szinterezett felületre tapadni.

A módosított Brugger-teszt szerint végzett vizsgálatok eredményei alapján az alábbi összefüggések állapíthatók meg:

- A diagrammok alapján egyértelműen kijelenthető, hogy mind a kobaltbázisú, mind a vasbázisú bevonatok jelentősen javítják a próbatestek kopásállóságát. Kísérleti körülményeim között a bevonat alkalmazásával az alapanyagtól függetlenül (szinterezett foszforbronz, illetve acél) nőtt a felületek kopásállósága, jó közelítéssel 4-5-szöröse.
- A kopás mértéke a növekvő súrlódási munkával nőtt. Azonos terhelés mellett a kobaltbázisú bevonat kopásállósága megközelítőleg 25%-kal volt jobb a vasbázisú bevonat kopásállóságánál. Különbség a növekedés mértékében 2500 J feletti súrlódási munkánál tapasztalható: a vasbázisú bevonat kopásának növekedési sebessége a súrlódási munka függvényében több mint másfélszerese a kobaltbázisú bevonat növekedési sebességének.
- A fröccsöntött műanyag munkadarabokra vonatkozó mérettűrés szerint a munkadarab mérete és adott fűvókaméret alapján számított legkisebb elméleti



1. ábra. A próbatest és ellendarab elrendezése a mérésnél

Kísérleteim során a súrlódási erőt és a vizsgált darabok (szinterezett gyűrű és szálerősítéses bot) együttes kopását mértem. A súrlódási erő változását egy a tribométerhez erősített, kalibrált nyúlásmérő bélyeg mérte. A szinterezett darab és az ellendarab együttes kopását egy Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) márkájú, indukciós elven működő útszenzorral követtem.

A kísérletek után szintén mikrométer segítségével (0,005 mm pontossággal) mértem meg a kopott gyűrű magasságát, valamint a kopott botok hosszát. A gyűrű kopását annak köríve mentén, egymástól 90°-ra négy ponton mért érték átlagaként határoztam meg. A bot kopásaként feltüntetett adat az egyidejűleg befogott három bot egyenként mért értékeinek átlaga. Egy-egy beállítás mellett lehetőség szerint három kísérletet végeztem el. Az indukciós útszenzorral a kísérletek során és mikrométerrel a kísérletek után mért adatok a polimer mátrix plasztikus deformációjának következtében nem összevethetők, ezért az eredmények értékelésekor csak a mikrométeres méréseket vettem figyelembe.

2.1.2 A módosított Brugger-teszt elvén működő tribométer és mérés

Az első kísérletsorozatomban alkalmazott bot-tárcsa tribométerrel végzett vizsgálatok nem váltották be teljesen a hozzájuk fűzött reményt. A felmerült problémákat a következőképpen lehet összefoglalni:

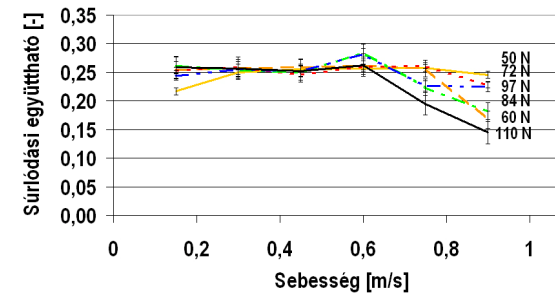
- Az alkalmazott bot-tárcsa elrendezés az általam vizsgálni kívánt anyagpárosításnál az adott vizsgálati körülmények mellett nem volt alkalmas jól definiált és mérhető kopási nyomok kialakítására.
- A kemencetér kísérleti hőmérsékletre történő felfűtése hosszú időt vett igénybe, és a nagy hőmérsékleten végzett kísérletekben a bizonytalansági tényezők száma megnőtt, elsősorban az ellendarab polimer mátrixanyaga kilágyulásának és plasztikus deformációjának következtében.
- Nem volt szerencsés a három bot alkalmazása sem, mivel bizonytalan volt a botok felfekvése a koptatandó felületen. Ez elsősorban akkor vált kritikussá, amikor nagyobb terhelési tartományokban a műanyag ellendarabok kilágyultak. A bot-tárcsa elrendezésű modellnél elvileg az érintkező felület nagysága a kísérlet során nem változik, a gyakorlatban azonban a rudak nem teljes felületükkel feküdtek fel a koptatandó felületen, így előbb-utóbb egy olyan járulékos kopási

vállfelület alakult ki, ahol a kopás során kialakult – a próbatest palástjával érintkező - fal folyamatosan nőtt.

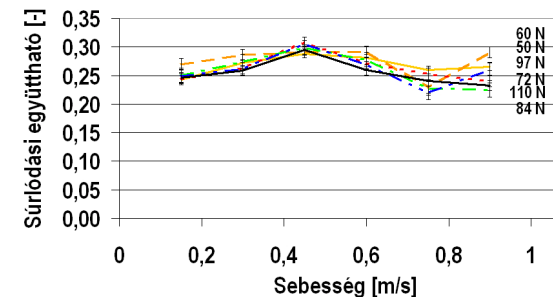
A bot-tárcsa tribométer alkalmazása során szerzett tapasztalatok alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az alkalmazott vizsgálati módszer tekintetében célszerű lenne áttérni egy olyan tribométer használatára, ahol a próbatest és az ellendarab másféle elrendezésben van. A feladatra alkalmasnak mutatkozott egy siklócsapágyak vizsgálatára szolgáló tribométer, amelyet átalakítva, próbatesteimet a Brugger-tesztekhez hasonló módon vizsgálhattam [34]. Ez a rendszer kiválóan megfelelt igényeimnek, melyek a következők voltak:

- A kopás mértékének egzaktabb mérése lehetséges. A méréseket zavaró rezonancia hatása kisebb (alacsonyabb zajszint), tehát a méréssel pontosabb súrlódási együttható értékek nyerhetők.
- Nagyobb kopatási sebesség állítható be, mint a bot-tárcsa berendezésnél, ezáltal gyorsított tesztként jelentősen csökkent a kísérletekhez szükséges idő, ugyanakkor a szobahőmérsékleten végzett kísérletek során kialakult kopás mértéke is nagyobb volt.
- A berendezés kialakításából következően (pontoszerű érintkezési felület, nyomásra érzékeny fólia lenyomatának nagysága alapján mérve) a kopás során az érintkezési felület folyamatosan változik (növekszik), ezért a fajlagos nyomás is pillanatról pillanatra másodfokú függvényként. A kísérleti eredmények természetesen ennek ellenére összehasonlíthatók egymással, különös tekintettel arra, hogy a súrlódási munka jól definiálható. A tribológiában a – jellemzően siklócsapágyakban alkalmazott - poliamidok terhelhetőségét az ún. pv értékkel jellemzik. A pv érték a nyomás (p) és a sebesség (v) szorzataként adódik [35]. A Brugger-teszt elvén működő módosított tribométer használatával elkerülhetetlen, hogy a pv érték a kopási folyamat során ne változzon, hiszen az érintkezési felület is folyamatosan változik (növekszik). Így a pv érték a kísérlet kezdeti állapotában – terheléstől függően – körülbelül 10-17 N/mm²*(m/s) értékről indul, és a kopási folyamat során folyamatosan csökkenve végül a 4 és 6 N/mm²*m/s közötti értéket éri el (2. ábra).
- A fixen befogott próbatesttel szemben forgó szálerősítéses polimer felületének lehetősége van pillanatnyi relaxációra (regenerálódásra), mivel a forgás miatt nincs állandó kontaktusban a próbatesttel, így a fém felületét egy relatíve megújult, hűlt műanyag felület koptatja.

érzékenyen, egy sávban mozognak a súrlódási együttható értékei. A vasbázisú ötvözet súrlódási együttható görbéiben is megfigyelhető egy határozott törés 0,45 m/s-nál, a görbék azonban nem távolodnak el egymástól olyan mértékben, mint azt a Co-bázisú bevonat esetében. Ezt az erőtől – és jórészt a sebességtől is - független súrlódási viselkedést a 20. és 21. ábrák mutatják be.



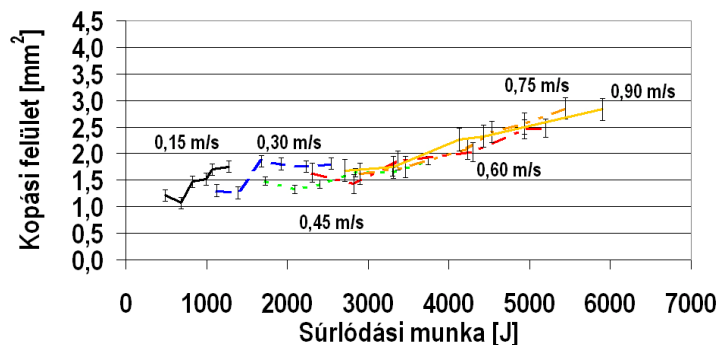
20. ábra. Kobaltbázisú bevonatos acél próbatestek súrlódási együttható értékei különböző normál erők és változtatott sebességek esetén, az ellendarab szálerősítéses PPS



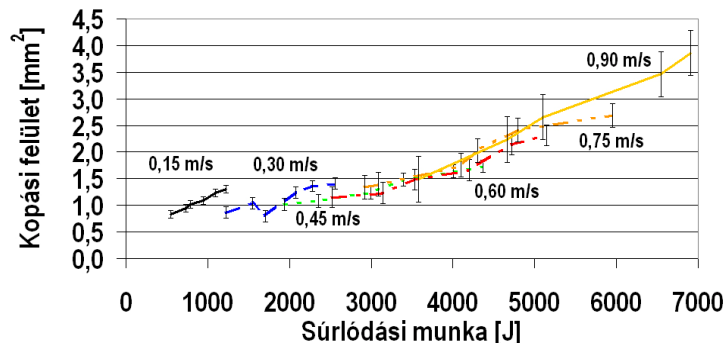
21. ábra. Vasbázisú bevonatos acél próbatestek súrlódási együttható értékei különböző normál erők és változtatott sebességek esetén, az ellendarab szálerősítéses PPS

A diagrammok értékelésénél figyelemre méltó, hogy a súrlódási együttható tengelyének minden ábrán azonos skálabeosztása miatt nem tükröződik a görbék trend jellege, mert az értékek viszonylag szűk határok közötti változnak. Jól látható azonban a súrlódási viszonyok különbsége, ami abban nyilvánul meg, hogy a mért értékek mely adattartományban (sávban) változnak. Itt is feltüntettem a diagrammokban a mérési pontok értékének standard hibáját.

0,4 illetve 0,6 m/s fölött megfigyelhető a súrlódási együttható tendenciózus csökkenése. Ez lehet annak a következménye, hogy a megnövekedett sebesség miatt az érintkezési felület hőmérséklete megnőtt, a nagyobb hőmérséklet pedig a műanyag felszínének kilágyulását okozza. A kilágyult anyag kenőanyagként szolgálhat a két test között, ami a súrlódási együttható csökkenését eredményezi.



18. ábra. Kobaltbázisú bevonatos acél próbatetek kopásértékei a súrlódási munka függvényében, az ellendarab szálerősítéses PPS



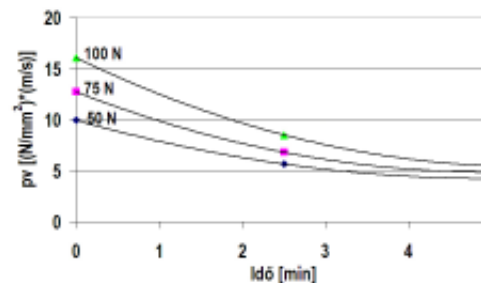
19. ábra. Vasbázisú bevonatos acél próbatetek kopásértékei a súrlódási munka függvényében, az ellendarab szálerősítéses PPS

3.2.2 A módosított Brugger-teszteknel mért súrlódási jellemzők

Az 20. ábra tanúsága szerint kobaltbázisú bevonatú acél próbatesten 0,6 m/s-ig a súrlódási együttható 0,25 körüli, közel állandó értéken mozog. Ezt a sebességértéket átlépvén látszólag a normál erőtől függetlenül csökkenni kezd. Megjegyzendő az is, hogy kis normál erő (50 N) mellett az együttható értéke csaknem állandó (kevésbé ingadozik).

A FeB bevonat koptatásakor kapott súrlódási együttható értéke is 0,25 körül alakult (21. ábra). Az érték maximuma 0,30, minimuma valamivel 0,20 alatt volt.

A nagyobb sebességtartományban itt is jól megfigyelhető a már korábban észlelt normál erőtől függő szórás. Világosan látható az is, hogy a normál erőre



2. ábra. A pv érték jellemző alakulása az idő függvényében

A bevonatos próbatetek kopási és súrlódási tulajdonságait a TU-Wien IMFT Brugger-teszt elvén működő – eredetileg siklócsapágyak vizsgálatára szolgáló – módosított tribométerén vizsgáltam. Ahhoz, hogy próbatesteimet adaptálni tudjam a siklócsapágyak vizsgálatára épített tribométerre, egy speciális befogó elemre volt szükség. Ez az elem úgy lett kialakítva, hogy a hengeres próbatestet fixen fogja, lehetővé téve annak palástfelületéhez való hozzáférést az ellendarabbal. Ezzel szemben, a próbatestre merőleges forgástengellyel forog a koptató ellendarab (szintén hengeres geometriájú), esetemben a szálerősítéses polimer. A befogás módja a 3. ábrán látható.



3. ábra. A próbatest befogásának módja

A kísérletekhez a változókat (normál erő, sebesség, környezeti hőmérséklet) is az előző kísérletek, a vizsgáló berendezés lehetőségeinek valamint a modellezés követelményeinek megfelelően választottam. A kopást optikai úton, mikroszkóp segítségével mértem meg, a kopási ellipszoid területét pedig közelítő számítással határoztam meg a Brugger-tesztekre előírt szabványnak megfelelően [36].

2.2 A vizsgálati anyag

2.2.1 A szelektív lézerszinterézéssel kialakított gyűrűk tulajdonságai

Vizsgálataim első felében próbatestként Ni-ötvözesű foszforbronz-porból (EOSINT M Cu 3201) CO₂ lézersugárral szinterezett gyűrűket alkalmaztam. A gyorsprototípus-gyártók körében ennek a - próbatetek alapanyagául szolgáló - ötvözetnek az alkalmazása széles körben elterjedt, ezért esett az én választásom is

erre az anyagra. A szelektív lézerszinterezéssel létrehozott darabokat a BME-JJT bocsátotta rendelkezésemre.

2.2.2 A lézersugaras felrakó hegesztéssel bevont próbatetek jellemzői

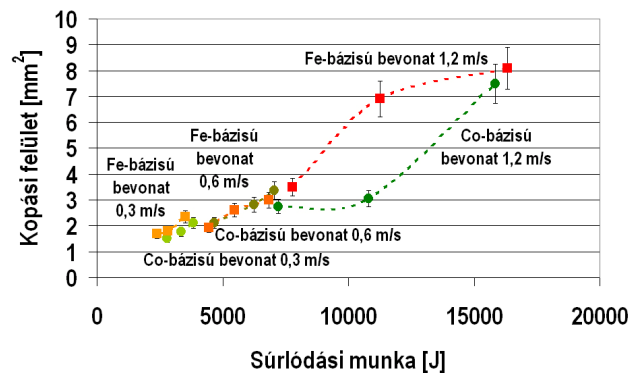
Az irodalomkutatás és az első kísérletsorozat alapján megalapozottnak látszott a szinterezett anyag helyi megerősítésének igénye. Ehhez kézenfekvőnek mutatkozott egy lézersugárral létrehozott bevonat kialakítása, lévén rugalmas, jól kézben tartható, könnyen alkalmazható technológiáról van szó. A szakirodalom [10] és korábbi munkáink alapján szerezhettem már némi tapasztalatot a gyakorlatban bevált kobaltbázisú ötvözet tömbi acélon történő alkalmazásában, nem szerepelt azonban az irodalomban olyan alkalmazás, ahol szinterezett felületen hoztak volna létre kopásálló bevonatot. Jogosnak látszott egy viszonylag olcsó, relatív könnyen hozzáférhető anyaggal felvetetni a versenyt a már jól bevált – kereskedelmi forgalomban beszerezhető – kobaltbázisú ötvözetrel szemben. Így esett a választásom a vaskohászattól ismert, nagy börtartalmú FeB metallurgiai előötvözetre. Lehetőségem adódott a kétféle bevonat összevetésére két különböző szubsztrátumon, valamint a bevonatos próbateteknek a bevonat nélküli szinterezett darabokkal szembeni minősítésére is. A ferrobór a vas és a bór kétalkotós ötvözeteként is vizsgálható, melynek börtartalma 17,5 és 20% között változik. Ez az előötvözet az acél és más vasalapú ötvözetek olcsó adalékanyaga, általában gyengén ötvözött acélok edzhetőségének javítására használják [37, 38].

A kísérletek következő fázisát megalapozó előkísérletek során összesen öt különféle próbatestet vizsgáltam, ezek egyrészt a már vizsgált szinterezett, bevonat nélküli, másrészt lézersugárral bevont próbatetek voltak. A következő bevonatos próbateteket vizsgáltam:

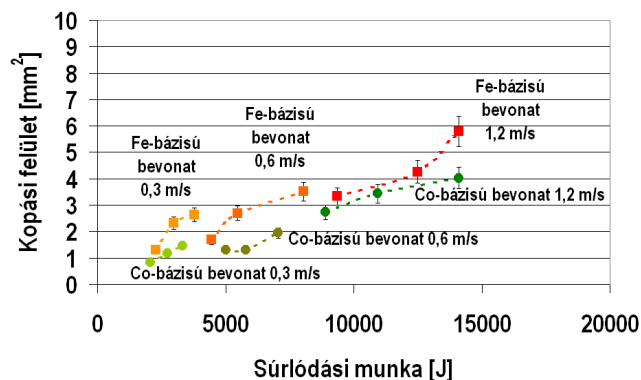
- szinterezett alapú próbatest kobaltbázisú lézersugaras bevonattal,
- szinterezett alapú próbatest vasbázisú (FeB) lézersugaras bevonattal,
- acél alapú próbatest kobaltbázisú lézersugaras bevonattal,
- acél alapú próbatest vasbázisú (FeB) lézersugaras bevonattal.

A bevonatos próbatetek alapjául tehát a már korábban is használt szinterezett foszforbronz valamint gyengén ötvözött acél 9SMn28 (DIN 1651-88) szolgált.

Kísérleteimhez az egylépéses technikát választottam. Ennek alkalmazására jellemző, hogy a port a lézersugár által megolvasztott tócsába fűjják, a port vivő gázáram egyben a védőgáz funkcióját is ellátja. A lézerteljesítmény és a pormennyiség megfelelő beállításával egyenletes, az alpanyaghoz erős kohézióval kötődő felületet kaptam. A bevonatos próbatetek előkészítéséhez, a bevonatok felviteléhez a BAYATI 5 kW-os TRUMPF TLC 105 márkájú, öttengelyes, repülőoptikával ellátott, modulrendszerű CO₂ lézert használtam.

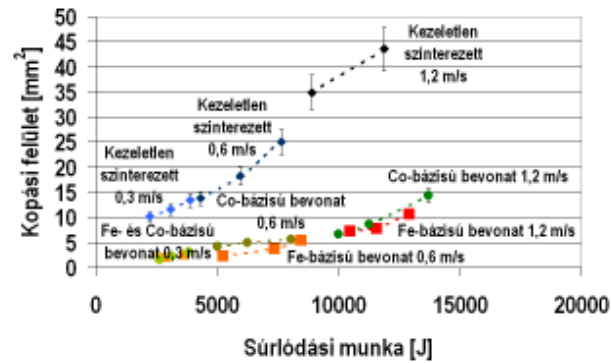


16. ábra. Különféle bevonatú acél próbatetek kopásértékei a súrlódási munka függvényében, az ellendarab szálerősítéses PPS

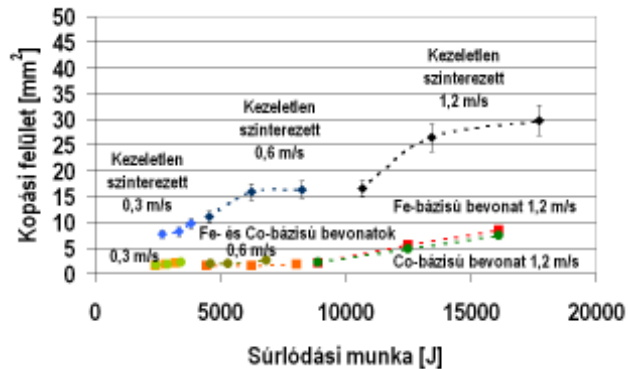


17. ábra. Különféle bevonatú acél próbatetek kopásértékei a súrlódási munka függvényében, az ellendarab szálerősítéses PEEK

A 18. ábrán a Co-bázisú bevonat kopását a súrlódási munka függvényében ábrázoltam. Növekvő súrlódási munka esetén a kopás mértéke is növekszik. Ugyanez a tendencia figyelhető meg a Fe-bázisú bevonat esetében is (19. ábra). Szembetűnő azonban, hogy kísérleteimben a Co-bázisú ötvözet jobban ellenállt a koptatásnak. Kisebb terhelési tartományban az eltérés nem jelentős. A diagrammokon feltüntettem a mérési pontok értékének standard hibáját is.



14. ábra. Különbéféle bevonatú és bevonat nélküli szinterezett próbatetek kopásértékei a sűrűdési munka függvényében, az ellendarab szálerősítéses PPS



15. ábra. Különbéféle bevonatú és bevonat nélküli szinterezett próbatetek kopásértékei a sűrűdési munka függvényében, az ellendarab szálerősítéses PEEK

Az 14. ábra alapján – azonos sűrűdési munka esetén – a kezeletlen próbatesten jelentkező kopás körülbelül négyszerese a bevonatos próbatestekének. A bevonatos próbatetek görbéi a tengely skálázási arányai miatt nem különíthetők el, a görbesereg azonban egyértelműen mutatja az anyagpárok viselkedését. Megfigyelhető, hogy azonos sűrűdési munka mellett a PPS koptató hatása megközelítőleg 25%-kal nagyobb, mint a PEEK által okozott kopás.

A 16. és 17. ábrákon acél alapanyag esetében is az előző diagrammokon – a szinterezett darabok esetében – érvényesülő tendencia tükröződik. A bevonatos acél próbatetek kopási jellemzői nagyságrendileg megegyeznek a bevonatos lézeresen szinterezett próbatetek kopási jellemzőivel.

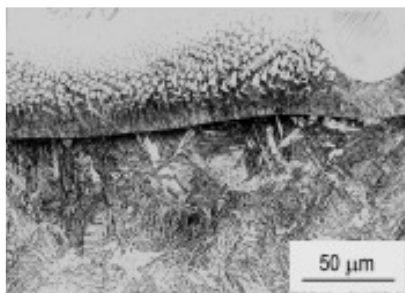
A bevonatos próbatetek előállításához alkalmazott kísérleti beállításokat – melyeket egyrészt korábbi tapasztalataimra, másrészt a szemrevételezéses és a metallográfiai vizsgálati eredményekre alapoztam – az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. A lézersugaras felrakó hegesztés paraméterei

	Kísérleti beállítás	Észrevétel
1.	Vasbázisú bevonat acél alapon Lézerjeljesítmény: P = 30 % (1500 W) Pormennyiség: m = 14,13 g/min Axiális sebesség: v = 6 mm/min	Nem megfelelő, réteghiányos felület
2.	Vasbázisú bevonat acél alapon Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 4,88 g/min Axiális sebesség: v = 12 mm/min	Nem megfelelő, réteghiányos felület
3.	Vasbázisú bevonat acél alapon Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 7,8 g/min Axiális sebesség: v = 10 mm/min	Nem megfelelő, réteghiányos felület
4.	Kobaltbázisú bevonat acél alapon Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 7,8 g/min Axiális sebesség: v = 10 mm/min	Nem megfelelő, réteghiányos felület
5.	Vasbázisú bevonat acél alapon Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 9,75 g/min Axiális sebesség: v = 8 mm/min	Megfelelő bevonat
6.	Kobaltbázisú bevonat acél alapon Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 9,75 g/min Axiális sebesség: v = 8 mm/min	Megfelelő bevonat
7.	Kobaltbázisú bevonat szinterezett alapon Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 9,75 g/min Axiális sebesség: v = 8 mm/min	Nem megfelelő, réteghiányos felület
8.	Vasbázisú bevonat szinterezett alapon Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 9,75 g/min Axiális sebesség: v = 8 mm/min	Nem megfelelő, réteghiányos felület
9.	Kobaltbázisú bevonat szinterezett alapon 1. réteg: Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 9,75 g/min Axiális sebesség: v = 8 mm/min 2. réteg: Lézerjeljesítmény: P = 20 % (1000 W)	Megfelelő bevonat
10.	Vasbázisú bevonat szinterezett alapon 1. réteg: Lézerjeljesítmény: P = 15 % (750 W) Pormennyiség: m = 9,75 g/min Axiális sebesség: v = 8 mm/min 2. réteg: Lézerjeljesítmény: P = 20 % (1000 W)	Megfelelő bevonat

A cél egy összefüggő, egyenletes, homogén felület kialakítása volt. A próbatesteket egy forgatótengelyre fogva 8 mm hosszra vontam be. A forgatótengely sebessége 5,55 fordulat/min volt, ami 500 mm/min kerületi sebességet biztosított. A lézeres megmunkálófej a bevonandó próbatest fölött, a forgástengellyel párhuzamosan állandó 8 mm/min-es relatív sebességgel haladt a felülettől olyan távolságban, hogy a megmunkálási síkban 2 mm átmérőjű fókuszfoltot biztosítson. A port 2 l/min mennyiségű gáz szállította, a védőgáz felületre jutó mennyiségét 8 l/min-re állítottam be. Az így előkészített próbatestek köszörülés után kerültek tribológiai vizsgálatra, így biztosítva az azonos vizsgálati körülményeket.

A következő ábrák a vasbázisú bevonattal ellátott tömbi acél próbatest keresztmetszeti képeit mutatják.



4. ábra. Vasbázisú ötvözettel bevont tömbi acél próbatest keresztmetszeti képe

A 4. ábrán az acél alapanyag és a vasbázisú bevonat határa látható. A lézersugaras kezelés hatására az olvadék alatt az acél α - γ - α fázisátalakuláson esett át. Kis karbon tartalma következtében a hagyományos értelemben vett martenzit szövetelem nem várható, de a gyorshűtésre jellemző tűs szerkezet egyértelműen felismerhető.

A lézersugaras megmunkálás során részlegesen megolvadt alapanyag Fe-tartalma a réteg és az alapanyag határán a rétegben dúsult. A rétegben tehát az alapanyag-réteg határtól kiindulva az Fe-tartalom csökken, a börtartalom pedig értelemszerűen nő. Ezért a határhoz közel α -Fe és Fe_2B eutektikuma, illetve Fe_2B fázis található. A határtól távolabb eső részen már megjelenik az FeB fázis is.

Az előzőekhez hasonló szövetszerkezeti jelenségeket láthatunk az 5. ábrán azzal a különbséggel, hogy a különböző Fe- ill. B-tartalmú anyagrészek a kialakult szövetszerkezeti viszonyok miatt jobban elkülönülnek egymástól. Az átmeneti zóna, ami kb. 40-50 μ m vastagságú, α -Fe és Fe_2B fázisokkal jellemezhető. A keménységi viszonyok alakulását a keresztmetszetben kiválóan szemlélteti a 6. ábra, amin a Vickers-keménységmérési lenyomatok is láthatók.

A mérési eredmények szerint az eredeti szinterezett felszín felületi érdessége $Ra=10...15 \mu$ m volt, P 40 W minőségű csiszolópapírral finomítva ez az érték $1...2 \mu$ m-re csökkent, ami a koptatás hatására már jelentősen nem csökkent ($0,5...1 \mu$ m).

A felületi érdességmérések eredményei világosan tükrözik, hogy a szálerősítéssel polimer és szinterezett foszforbronz relációban jellemzően az abrázációs kopás mechanizmusa érvényesül. A szinterezett foszforbronz felületének csiszolása jelentősen csökkentette a felület érdességét, növelte a mérés pontosságát, hiszen garantáltan azonosan előkészített kiinduló állapotot eredményezett, amit a mérések szórása is igazolt. A szálerősített polimer koptató hatására a próbatestek felületi érdessége tovább csökkent. Megfigyelhető volt a felszín tömörsége, valamint az, hogy anyaglerakódás a szinterezett foszforbronz felszínén, vagyis anyagvándorlás az ellendarab felől nem történt.

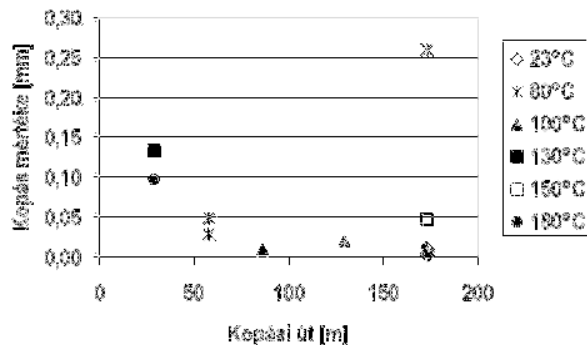
3.2 A módosított Brugger-teszt szerint végzett mérések eredményei

3.2.1 A módosított Brugger-tesztnél mért kopási jellemzők

A kísérletek következő szakaszában a kopás mértékét - a Brugger-teszt kiértékelésének módszerét követve - a próbatesten keletkezett kopási nyom felületének méretével jellemeztem. Az 14-17. ábrák a kopás mértékét mutatják különböző alapanyagok, bevonatok és alkalmazott ellendarabok esetében. Ezek a diagramokon látható a szinterezett és az acél próbatestek tendenciózus hasonlósága. Ezért és gazdaságossági okok miatt is megalapozottnak láttam az acél alapú próbatestek vizsgálatát a szerszámanyagok és bevonatok tulajdonságának összehasonlító vizsgálatában. Ugyanakkor a diagramok alapján látható az is, hogy a KRECA CHOP M-107T márkanevű karbonszállal erősített polifenilén-szulfid ellendarabbal végzett kísérletekben mért kopás mértéke azonos körülmények között nagyobb volt. Ez alapján indokoltnak láttam a kísérleteket ezzel az ellendarabbal végezni, nem utolsósorban azzal a céllal, hogy a hatékonyságot növeljem és a mérési bizonytalanságot csökkentsem.

A kísérletekben szereplő anyagpárosítások és vizsgálati körülmények mellett kialakuló kopást a súrlódási munka függvényében jellemeztem. A súrlódási munkát a súrlódási erő és a megtett út szorzatával jellemeztem, így összevethető egymással az eltérő sebességgel és eltérő időtartammal végzett kísérletek eredményei.

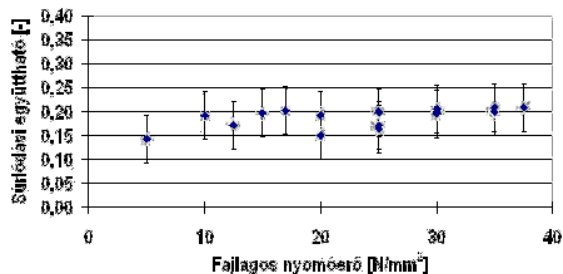
A 14. és 15. ábrák a szálerősítéssel PPS és a szálerősítéssel PEEK koptató tulajdonságait mutatják. A görbék alapján megállapítható, hogy mindkét bevonat jelentősen javította a szinterezett próbatestek kopásállóságát.



12. ábra. A kezeletlen szinterezett foszforbronz próbatestek kopásának alakulása

3.1.2 A bot-tárcsa kísérleteknél mért súrlódási jellemzők

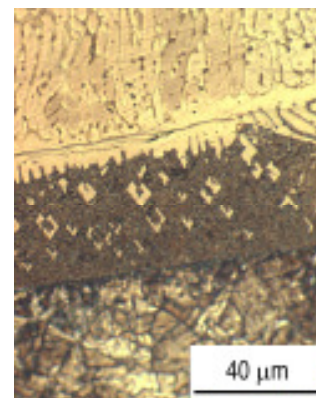
A fajlagos nyomóerő, a hőmérséklet és a két anyag relatív sebességének függvényében határoztam meg a súrlódási együttható nagyságát, illetve változását (13. ábra).



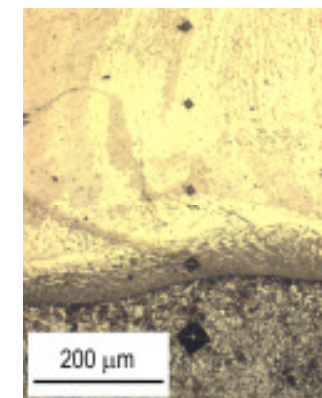
13. ábra. A súrlódási együttható értékei a fajlagos nyomóerő változása esetén 0,016 m/s-os sebesség mellett 23 °C-on, kezeletlen szinterezett foszforbronz próbatest üvegszállal erősített poliamid-imiddel szembeni koptatása esetén

3.1.3 A felületi érdesség jellemzőinek alakulása a bot-tárcsa kísérleteknél

A vizsgálati eredmények alapján arra kívántam számszerűsíthető információhoz jutni, hogy milyen módon változik majd a szinterezett foszforbronzból készült fröccsszerszám formaadó felülete üzemi körülmények között. A felületi jellemzők változását először szemrevételezéssel értékeltem, majd egy Hommelwerke LV 50 (TKL 300/155 Tastn.-R.-5 μm) típusú tús tapintó érdességmérővel Ra értékeket mértem. Az érdességet a vizsgálati anyag felületének 2,5 mm hosszúságú szakaszán mértem.

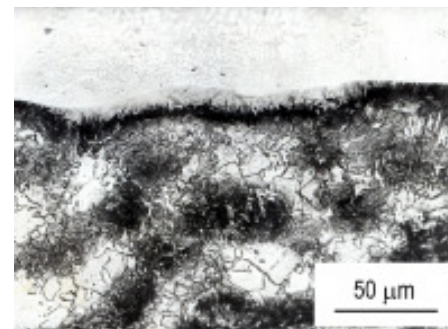


5. ábra. Vasbázisú ötvözettel bevont tömbi acél próbatest keresztmetszeti képe (átmeneti zóna) [39]



6. ábra. Vasbázisú ötvözettel bevont tömbi acél próbatest keresztmetszeti képe (átmeneti zóna)

A 7. ábra acél alapanyagra felvitt kobaltbázisú réteg keresztmetszeti képét mutatja. A lézersugár segítségével létrehozott réteg szilárdoldat típusú.

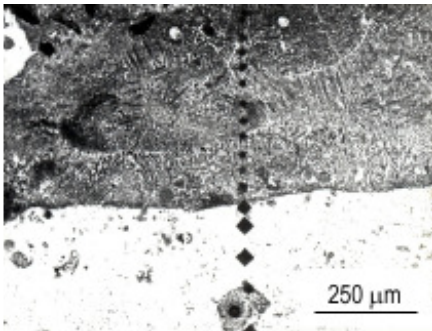


7. ábra. Kobaltbázisú ötvözettel bevont tömbi acél próbatest keresztmetszeti képe (átmeneti zóna)

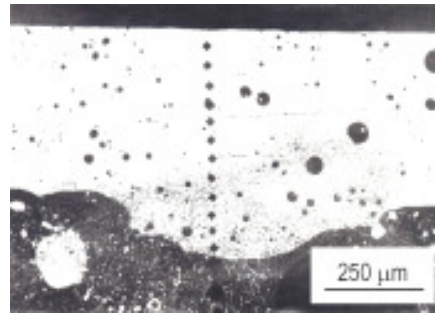
Itt is megfigyelhető az alapanyag részleges megolvadása és az ennek következtében kialakult vékony átmeneti réteg. A szilárdoldat típusú mátrixban a felrakott réteg összetételéből következően intermetallikus fázisok (karbid, borid és szilicid) finom eloszlása található, melyek szemcsemérete kicsiny.

A következő néhány ábra (8-11. ábra) a vasbázisú és kobaltbázisú bevonattal ellátott szinterezett foszforbronz próbatest keresztmetszeti felvételeit mutatja.

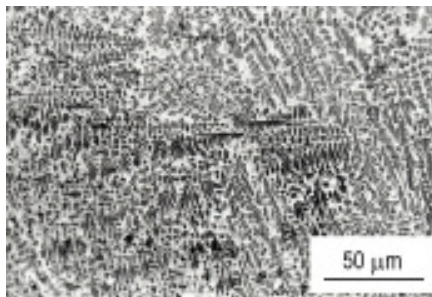
A szilárdoldat típusú bevonat a foszforbronz buborékaival terhelt. A mikrokeménységi lenyomatok alapján jól látható az alapanyagétől lényegesen eltérő keménység (9. ábra). A beolvadási szituáció az előzőekkel megegyező.



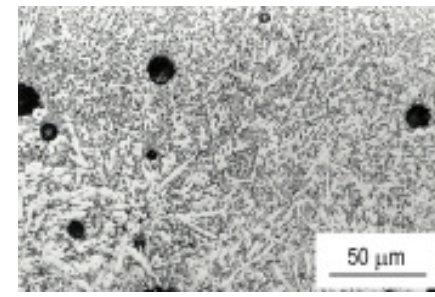
8. ábra. Vasbázisú ötvözzel bevont szinterezett foszforbronz próbatest keresztmetszeti képe (réteg)



9. ábra. Kobaltbázisú ötvözzel bevont szinterezett foszforbronz próbatest keresztmetszeti képe (réteg)



10. ábra. Vasbázisú ötvözzel bevont szinterezett foszforbronz próbatest keresztmetszeti képe (réteg)



11. ábra. Kobaltbázisú ötvözzel bevont szinterezett foszforbronz próbatest keresztmetszeti képe (réteg)

A keménység keresztmetszet szerinti eloszlása az egyes anyagpárok esetében jól mutatja a réteghatárokat és az átmeneti zónákat. Megfigyelhető az is, hogy míg a kobaltbázisú bevonat keménysége 700–800 HV_{0,2}, addig szinterezett alapanyag esetében a FeB bevonat keménysége 1200 HV_{0,2} fölötti értékeket is mutatott. Míg a kobalt alapú bevonat keménysége acél alapanyag bevonása esetén nem változott jelentősen, addig a FeB bevonat keménysége megközelítette az 1500 HV_{0,2}-s értéket. Az átmeneti zónában valószínűleg a bór nagy olvadáspontjának köszönhetően kialakult bór-karbid szemcsék jelenléte miatt lehet az átlagos keménység 850 HV_{0,2} körül acél alapanyag esetében.

Az alapanyag szívósságát nem befolyásolja nagymértékben a közvetlenül az átmeneti zóna alatt létrejött beedződött, majd megeresztődött alapanyag, mely a réteg alatt durva tűs szerkezetű. Az anyag belseje felé finomabb tűs bainites szerkezet látható, ami alatt már az alapanyag eredeti ferrit-perlites szemcséi vehetők ki (4. ábra). Szinterezett próbatestek esetében nagyobb felkeveredés figyelhető meg az átmeneti zónában, ami a keménység fokozatosabb átmenetében

tükröződik. A szinterezett próbatestek felületkezelése során tapasztalt nagyobb mértékű felkeveredés valószínűleg a foszforbronz alapanyag kisebb olvadáspontjának következménye.

2.2.3 A szálerősítéses műanyag ellendarab szerkezete, tulajdonságai

Kísérleteimhez üveg-, illetve karbonszállal erősített műanyagot választottam, ahol a kemény szálak szántó, abrazív koptató hatása erőteljes. Kezdetben üvegszállal erősített poliamid-imiddel, majd poliéter-éterketon (PEEK), illetve polifenilén-szulfid (PPS) típusú ún. nagyteljesítményű műszaki műanyagokkal végeztem a vizsgálatokat, különféle típusú erősítő szálakkal.

A bot-tárcsa elrendezésű kísérletekben az ellendarab üvegszállal erősített poliamidimid volt, a módosított Brugger-elvet követő kísérletek ellendarabjaként háromféle nagyteljesítményű szálerősítéses műanyagot használtam, melyek közül – az előkísérletek alapján – végül a KRECA CHOP M-107T márkanévvel viselő PPS mátrixú ellendarabokkal végeztem a vizsgálatok legnagyobb részét. A PPS-mátrixot Kreka Chop szállal erősítik, amelynek jellemzője a nagy szilárdság és a jó kopás-, hő- és korrózióállóság [16].

3 TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

3.1 Tribológiai vizsgálatok eredményei bot-tárcsa módszerrel

3.1.1 A bot-tárcsa kísérleteknél mért kopási jellemzők

A bot-tárcsa vizsgálatok során a kezeletlen szinterezett foszforbronz próbatestek üvegszállal erősített poliamid-imiddel szembeni kopását vizsgáltam. A kopás mértékét kétféle módon mértem. Egy indukciós útszenzorral a próbatest és az ellendarab együttes kopását mértem a koptatás ideje alatt, megismerve ezáltal a kopási folyamat időbeni változását. Az egyes darabok koptatás előtti és utáni geometriáját – így a szinterezett próbatesten valamint a szálerősítéses műanyag ellendarabon bekövetkező kopást – mikrométerrel tudtam mérni. Mivel a műanyag ellendarabok kopása jóval nagyobb volt, mint a szinterezett foszforbronz daraboké, ráadásul a műanyag ellendarabok plasztikus deformációja is erősen befolyásolta a méretváltozást, az együttes kopás mérése valójában csak csekély mértékben járult hozzá a foszforbronz kopási folyamatának megértéséhez. Természetesen több hasznosítható információt nyújtott a próbatestek és az ellendarabok külön-külön mikrométerrel történő mérése, azonban még így is igen nehézkesnek bizonyult a próbatest kopásának meghatározása, annak meglehetősen kis mértéke miatt. Az alkalmazott bot-tárcsa tribométerrel a mérési eredmények és a vizsgálati anyagok illetve vizsgálati körülmények közötti összefüggés nem fedezhető fel, a mérési módszer a kitűzött feladatra nem alkalmas (12. ábra).