

Eltérő felületelőkészítés hatása a hibrid felületkezelt, fémfröccsöntött rozsdamentes acélra

Effect of different surface preparations on hybrid surface-treated metal injection molded stainless steel

KRÁR András¹, KORSÓS Krisztián¹, KOVÁCS Dorina¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest Műegyetem rakpart 3., andraskrar@gmail.com

Abstract

Metal injection molding (MIM) was born by combining injection molding and powder metallurgy. From the side of injection molding, it enables the serial production of parts with complex geometries, overcoming the geometric limitations of parts that can be produced by subtractive machining. From the side of powder metallurgy, it opens up new dimensions in overcoming engineering challenges by creating superalloys. By supplementing metal injection molding with surface treatment technologies, it further expands the possibilities of construction solutions and the variation of stresses and loads between the surface and bulk. In my research, I investigated the effect of different surface roughnesses, previously set with blasting, on the adhesion and tribological properties of the subsequently applied hybrid, low-temperature plasmanitriding, and surface layer by Physical Vapor Deposition (PVD) on metal injection-molded American Iron and Steel Industry (AISI) 304 austenitic stainless steel. Ball-on-disc wear tests were performed on the test specimens to determine the time-dependent friction coefficient and wear resistance. To further explore the material structure mechanisms and for more reliably results, adhesion test and SEM were also performed.

Keywords: metal injection molding, MIM, 304, plazma nitriding, PVD

Kivonat

A fémfröccsöntés (Metal Injection Molding - MIM) a hagyományos fröccsöntés és a porkohászat kombinálásával jött létre. A fröccsöntés szempontjából komplex geometriájú alkatrészek sorozatgyártását teszi lehetővé, mindezt a forgácsolással előállítható alkatrészek, geometriai korlátjait is leküzdve. Míg a porkohászat oldaláról átvételt létrehozásával nyit újabb dimenziókat a mérnöki kihívások leküzdésében. A fémfröccsöntést felületkezelt technológiákkal kiegészítve, tovább bővíti a konstrukciós megoldások lehetőségét, a szerkezetben ébredő igénybevételek és terhelések felület és térfogat szerinti eltérését. Kutatásom során fémfröccsöntött AISI 304 ausztenites rozsdamentes acélon vizsgáltam a különböző, előzetesen szemcseszórással beállított felületi érdességek hatását az utólagosan felvitt, hibrid, kishőmérsékletű plazmanitridálásból és fizikai gőzfázisú rétegleválasztásból (Physical Vapor Deposition - PVD) álló felületi réteg adhéziós és tribológiai tulajdonságain. A próbatesteken ball-on-disc kopásvizsgálatot végeztünk, a minták időfüggő súrlódási együtthatójának és kopásállóságának meghatározása érdekében. A lejátszódó anyagszerkezeti mechanizmusok mélyebb feltárására és az eredmények megbízhatóbb alátámasztására adhéziós, valamint elektronmikroszkópos vizsgálatok is elvégzésre kerültek.

Kulcsszavak: fémfröccsöntés, MIM, 304, plazmanitridálás, PVD

1. BEVEZETÉS

A fémfröccsöntés (Metal Injection Molding - MIM) egy olyan jelentősebb utómunka igény nélküli, azaz near-net shape gyártási technológia melynek során a fémport, polimer kötőanyaggal keverik, majd az így kialakult alapanyag-kötőanyag rendszert a polimer fröccsöntéshez hasonlóan a szerszám üregbe fecskendezik és hűtik, ezzel megformálva a félkész munkadarabot. Ezt a kötőanyag kioldása és a szinterezés folyamat követi, a megfelelő mechanikai tulajdonságok és akár a nagyobb mint 95%-os relatív sűrűség biztosítása érdekében [1]. Az eljárás kis és közepes méretű (általában 0,5 – 150 g), komplex geometriájú alkatrészek gyártásánál gazdaságos [2], de a létrehozható formák összetettségének csak a fröccsöntés korlátjai szabnak határt. A hagyományosnak tekinthető eljárásokhoz képest a fémfröccsöntés lehetőséget biztosít több alkatrész egybe integrálására, amivel jelentős tömeg és költségmegtakarítás biztosítható, valamint a kis tűrések gyártása

sem akadály a technológia számára. Jelenleg általánosan a $\pm 30 \mu\text{m}$ -os tűréstartomány biztosítható az akár 20%-os szinterelési zsugorodás ellenére is. Az elérhető végtermék minőségének köszönhetően a legtöbb iparágban előszeretettel alkalmazzák, mint például az orvostechikában, repülőiparban, autóiparban, hadiparban [3].

A kis hőmérsékletű plazmanitridálás egy önmagában is széleskörben alkalmazott, jó kopás- és kifaradásálló felületet képző termokémiai eljárás. A kis technológiai hőmérséklet alkalmazása meggátolja az ausztenites acélokra jellemző CrN kiválást, ezzel elkerülve a rozsdamentes acél korrózióállóságának csökkenését. A fizikai gőzfázisú rétegleválásztás (Physical Vapor Deposition - PVD) a modern tribológiai felületkezeléseknél leggyakrabban alkalmazott bevonatoló eljárás. A PVD keramikus felületi réteg szinte minden anyagon létrehozható, vetemedés és anyagszerkezeti változás nélkül, az eljárás kis, $50 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ kezelési hőmérséklete miatt. Azonban a kémiai kötés hiányában az adhéziós kötési hibáival és korlátaival számolni kell, illetve a megfelelő felület előkészítéssel is, a felület topográfia másoló hatása miatt [4, 5].

Duplex kezeléseknek a célja olyan összetett tulajdonságokkal rendelkező felületi kompozit réteg kialakítása, amit önmagában egyik eljárás sem tudna biztosítani. Fontos, hogy a rétegek együttes hatásai nem összeadódnak, hanem különböző hatásmechanizmusok szerint, „Complementary” (együttesen) vagy „Supplementary” (kiegészítően) biztosítják az elvárt tulajdonságokat [5].

Kutatásunkban AISI 304 fémfröccsöntött rozsdamentes acélon vizsgáltuk, a kis hőmérsékletű plazmanitridálás és TiN+TiC többrétegű PVD réteg kombinációja alkotta hibrid felületkezelt réteg tribológiai tulajdonságait, az előzetes felületelőkészítés függvényében. Kutatásunk célja a szemcseszórással kialakított eltérő felületi minőségek hatásának vizsgálata, a fémfröccsöntött acélok súrlódási, kopási és adhéziós tulajdonságaira, felületkezelést megelőző és azt követő állapotban.

2. ALKALMAZOTT ANYAG ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

2.1. A kutatásban alkalmazott anyag

A kutatásban fémfröccsöntött AISI 304 (X5CrNi18-10), (1.4301) erősen ötvözött ausztenites rozsdamentes acélt alkalmaztunk. A minták kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza [6], az összetétel külön nem került ellenőrzésre, mert a minták, megbízható a szabványt [7] betartó gyártótól került beszerzésre.

AISI 304 (X5CrNi18-10) kémiai összetétele, m/m%-ban

1. táblázat

C%	Si%	Mn%	Ni%	P%	S%	Cr%	N%
max. 0,07	max. 1,00	max. 2,00	8,00-10,5	max. 0,045	max. 0,015	17,5-19,5	max. 0,11

2.2. Mintaelőkészítés

A minták homogén kiindulási referenciaként, a szemcseszóráshoz, egységesen kézi eljárással állandó fordulatszám, fokozatosan csökkenő (rendre P80, P120, P320, P600, P1200, P2500, P4000) szemcsenagyságú SiC csiszolópapírral végzett csiszolással, majd $3 \mu\text{m}$ -os polikristályos és $1 \mu\text{m}$ -os monokristályos gyémánt szuszpenzió alkalmazásával kivitelezett polírozással lettek kialakítva. A különböző felületi érdességek beállítása szemcseszórással került kivitelezésre, 70 és $200-300 \mu\text{m}$ átlagos méretű alumínium-oxid szemcsékkel. A szemcseszórás 2 bar-os munkanyomással, a kezelt felületre 90° szöget bezáró pisztolytartással, 15 mm távolságból mintánként 40 másodpercen, keresztül zajlott. A minták egyedi jelölésrendszerét a 2. táblázat tartalmazza.

A minták jelölésrendszere

2. táblázat

	Polírozott	$70 \mu\text{m}$ szemcseszórt	$200 - 300 \mu\text{m}$ szemcseszórt
Referencia minták	R000	R070	R300
Felületkezelt minták	P000	P070	P300

Hibrid felületkezelésként minden mintához egységesen egy nagy keménységű, kiváló tapadású és kis súrlódási együtthatóval rendelkező, kis hőmérsékletű plazmanitridálásból és TiN alsó és TiC felső rétegből álló PVD Duplex bevonat lett alkalmazva. A plazmanitridálás technológiája 450°C kezelési hőmérsékleten, $1:3 \text{ N}_2\text{-H}_2$ gázaránnyal, $10^{-2} - 10^{-3}$ mbar kamranyomáson, 2 óra időtartammal került kivitelezésre. PVD bevonatok 450°C -on, 2 óra időtartam alatt, N_2 és CH_4 gáz, valamint Ti target használatával, $10^{-2} - 10^{-3}$ mbar nyomás és $80-120$ V BIAS feszültség alkalmazásával lettek kialakítva.

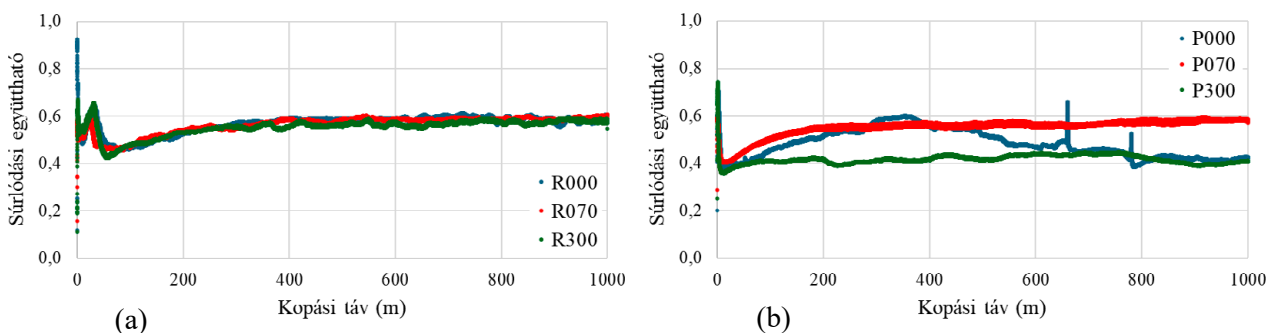
2.3. Vizsgálati módszerek

A tribológiai vizsgálatként az ASTM G99-es szabvány szerinti ball-on-disc kopásvizsgálat került elvégzésre, Anton Paar TRB³ berendezésen, 20 N terhelés, 1000 m kopási táv, Ø 6 mm-es SiC koptatógolyó és 0,1 m/s alkalmazásával. A tribológiai vizsgálatok során mérhető súrlódási együtthatót, a berendezés által regisztrált súrlódási együttható – kopási táv diagram állandósult állapotánál vettük. A keletkezett kopási árok mérésére Mitutoyo SurfTest SJ-401 berendezést alkalmaztunk az ISO 21920-2:2021 [8] szerinti beállítások alkalmazásával, a kopási árok profiljára merőlegesen, mérésenként négy ponton. A bevonatok adhéziója az ISO 26443:2023 [9], [10] szabvány szerint került kiértékelésre. A keresztmetszeti csiszolatok és adhéziós lenyomatok elemzése Zeiss EVO MA10 pásztázó elektronmikroszkóppal került kivitelezésre a minták felületén és keresztmetszetén.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Tribológia

A súrlódási együttható a kopási táv függvényében az 1. ábra szerinti.

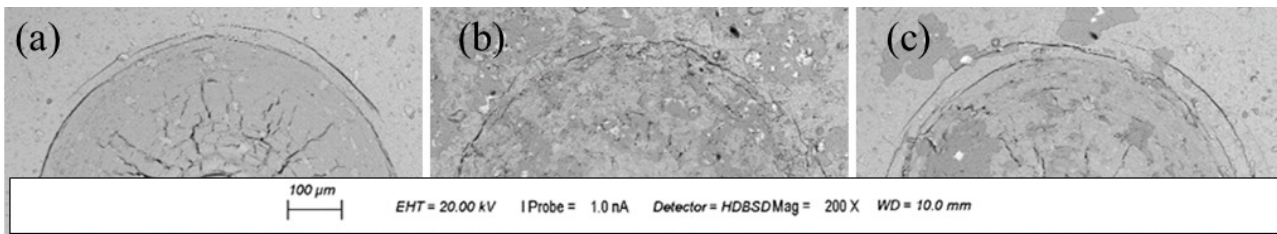


1. ábra. Referencia (a) és bevonatolt (b) minták kopási görbéi

A referencia minták kopási görbéi között jelentős differencia nem látható. Szembetűnő eltérés csak az R000-ás és az R070-es mintánál jelentkezik a kezdeti szakaszban, előbbi a polírozott felületről eredő hidegtapadással, utóbbi a nagyobb felületi érdességgel magyarázható. Továbbá minimális csökkenés figyelhető meg az alkalmazott szemcsék növekedésével megegyezően az egyes minták görbéi között. Ez feltehetően a kontaktfelület és az előzetes plasztikus deformációból ered, de biztos igazolásához további mérések szükségesek, a csekély változás miatt. A kopási együttható mind a három minta esetén 400 m után állandósult. A felületkezelt mintákhoz tartozó bekopási táv jelentősen csökkent, körülbelül a felére. Az állandósult állapotban a szemcsezórt mintáknál a súrlódási együttható a teljes mérési tartományban közel állandónak tekinthető. Ez a felületi érdesség, kontakt felületek mérete és szemcsezórásból előzetesen bevitt képlékeny deformációból eredő keménység növelés együttesének tulajdonítható. A P000-ás minta görbéjén jelentős időbeli változások és kiugrások láthatók, amik a bevonat delaminációjára és az ebből adódó kopási törmelék megjelenésére utal.[KA1]

3.2. Adhéziós vizsgálatok

Az adhéziós lenyomatok képeit a 2. ábra szerinti.



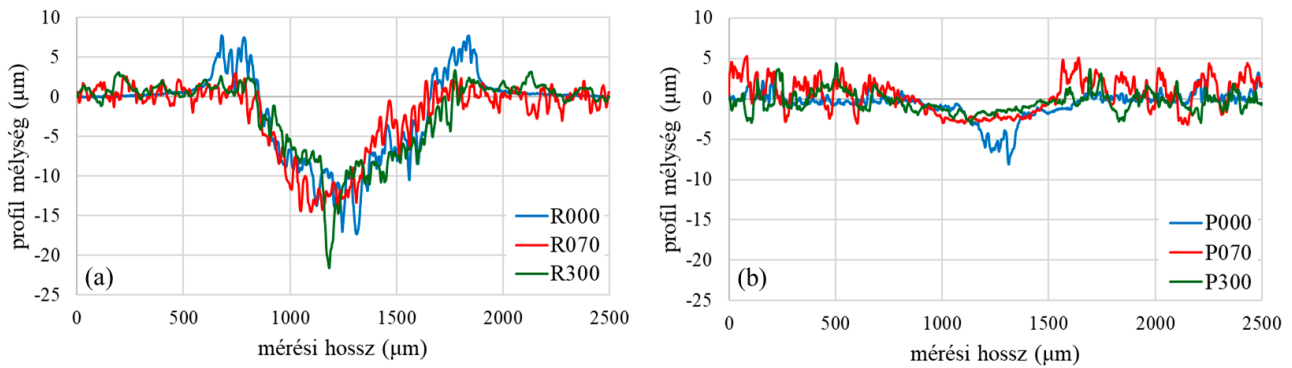
2. ábra. A minták adhéziós lenyomatainak SEM felvételei, P000 (a), P070 (b), P300 (c)

A P000-ás minta 1. adhéziós osztályba sorolható, mivel a mintán koncentrikus repedések láthatók, de delaminációnak nincs nyoma. A mindkét előzetesen szemcsezórt minta a 2. adhéziós osztályba sorolható, mivel a mintán körkörös és radiális (alapos szemrevételezés esetén) repedések láthatók, valamint részleges delamináció is megjelenik. Az adhéziós vizsgálatok alapján egyértelműen megállapítható, hogy a szemcse-

szórás okozta felületi érdesség változás a bevonat adhéziós minőségének romlásához vezetett. Ami már a felületek szemrevételezésekor látható volt, az egyenetlen bevonat alapján.

3.3. Profil mérések

A profilmérésből meghatározásra került a kikopott térfogat, ami a felületek kopással szembeni ellenállásának gyakran alkalmazott kvantitatív és kvalitatív minőségi jellemzője. A profil jellegéből a kopás jellegére is lehet következtetni. A 3. ábra a minták kikopott profiljait ábrázolja.

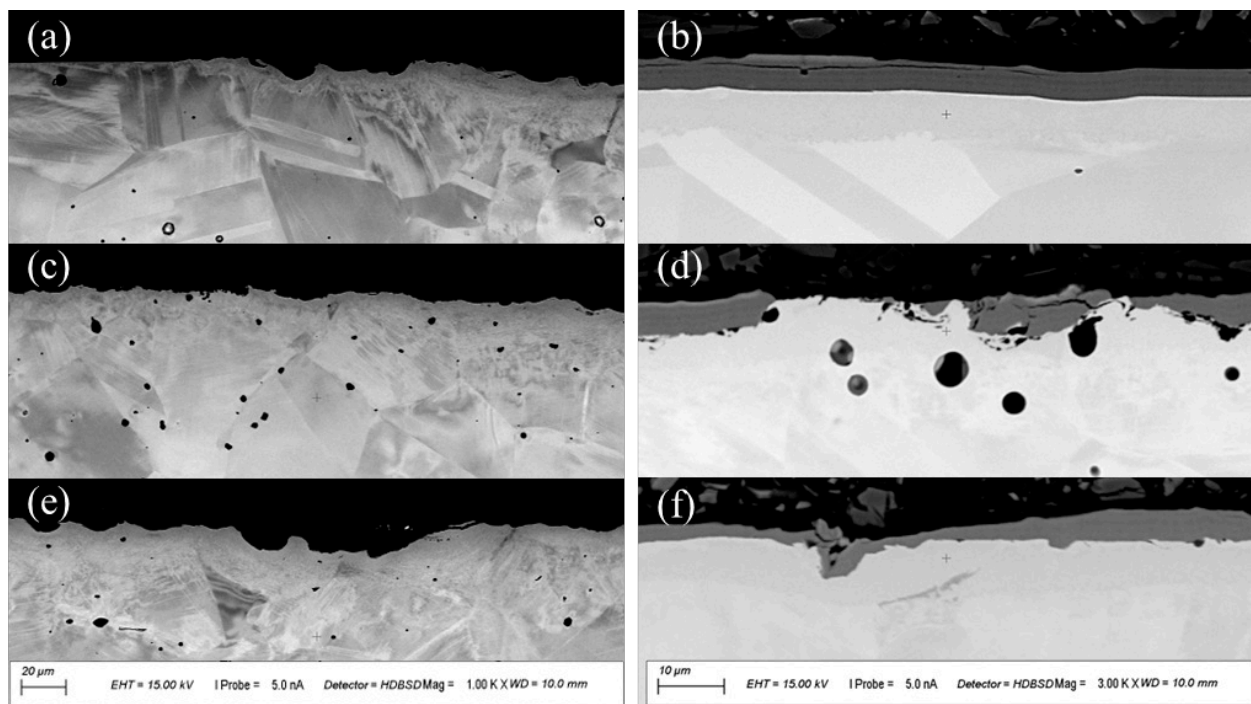


3. ábra Referencia (a) és bevonatolt (b) minták kopási profiljai

Az R000-as minta esetén a kopási profil szélein látható anyagi kitüremkedés jelentős plasztikus deformációra utal, mely jelenség nem figyelhető meg a szemcseszórta referencia mintákon. A kopási profilok jellegéből a felületkezeletlen minták jellemző károsodási formája abrazív kopás. A kikopott térfogat mennyisége a referencia minták esetén, a megállapított súrlódási együtthatóhoz hasonlóan minimális, de csökkenő trendet mutat a kopási együtthatóra az alkalmazott szemcseméret függvényében. A bevonatolt minták esetén a mért kopási profilok megerősítették a P000-as mintán feltételezett bevonat delaminációt. A bevonatolt minták jellemző kopási károsodása abrazív, ugyanakkor jelentősen kisebb mértékű, mint a felületkezeletlen mintáknál megfigyelhető értékek. Megállapítható továbbá, hogy az előzetes szemcseszórás negatívan hatott a bevonatolt minták kopásállóságára, növelve a mintákon mérhető, kopott térfogatot.

3.4. Keresztmetszeti csiszolatok SEM felvételeinek elemzése

A minták szemcseszórását és koptatást követő keresztmetszeteinek SEM felvétele a 4. ábrán láthatók.



4. ábra. A minták keresztmetszeti SEM felvételei, R000 (a), P000 (b), R070 (c), P070 (d), R300 (e), P300 (f)

Mindegyik mintán a kezelési zónától távolabb jól látszik az ausztenites szövetszerkezet és a fémfröccsöntésre jellemző pórusok. Mindkét szemcseszórt referencia próbatesten jól látszik az előzetes kezelés hatása, a képlékeny deformáció mind a pórusok torzulásán, mind a plasztikusan deformált felületen. A koptatott részeken az egyes rétegek delaminációja és a koptatással bevitt plasztikus deformáció és a pórusok további torzulása is megfigyelhető. Az előzetes felületi érdesség kritikus volt mind a plazmanitridált diffúziós réteg egyenletességére, folytonosságára és mind a PVD bevonatra, mely a technológia jellegéből fakadóan a bevonatképzés során jól leköveti a kialakított felület topográfiáját. A P000-on kiváló, a P300-as mintán elfogadhatóan jó, egységes és összefüggő nitridált réteg és bevonat képződött. A P070-es mintán nagy lokális változásokkal jelenik meg a nitridált kéreg és a PVD bevonat, mely utóbbi számos helyen pórusokat is okozott bevonat és szubsztrát között. A P000 mintánál megfigyelhető a delaminációs hibák, amelyek a kiugrásokat okozták a kopási görbén.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálatok alapján összességében megállapítható, hogy a szemcseszórás, mint előzetes felületelőkészítés, megkerülhetetlen hatásokkal bír a tribológiai bevonatok kialakításában, funkciójában és teljesítményének optimalizálásában, ha a felületi érdességtől függő kontaktfelület és bevonat adhézió, valamint a szemcseszórás okozta plasztikus deformáció hatásmechanizmusának hármasa megfelelően komplex szemlélettel kerül kialakításra.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet illeti a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia, Polimer Technika és Gépgyártástudomány és Technológia Tanszékeit a megfelelő vizsgálati berendezések biztosításáért. A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közös támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] S. P. Tadi, D. Koppiseti, V. K. T. Palisetti, B. C. Palivela, and R. S. Mamilla, "Polymer based binder materials for various metal injection molding processes: Salient aspects and recent trends," *J. Manuf. Process.*, vol. 133, pp. 322–353, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.11.032>.
- [2] J. R. Merhar, "Overview of metal injection moulding," *Metal Powder Report*, vol. 45, no. 5, pp. 339–342, 1990, doi: [https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(10\)80242-5](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(10)80242-5).
- [3] J. Meng, N. H. Loh, B. Y. Tay, G. Fu, and S. B. Tor, "Tribological behavior of 316L stainless steel fabricated by micro powder injection molding," *Wear*, vol. 268, no. 7, pp. 1013–1019, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.12.033>.
- [4] Dr. F. G. K. dr. B. M. Dr. K. L. Dr. M. dr. B. M. S. E. S. B. A. Cserjésné Sutyák Ágnes, *Nitridálás – korszerű eljárások és vizsgálati módszerek*. 2015.
- [5] S. B. A. Dr. T. M. Kocsisné dr. Baán Mária, "Duplex felületmódosító eljárások – kiemelten plazma-nitridálás és PVD eljárás kombinációja - autópári alkatrészek kopásállóságának növelése érdekében," 2013.
- [6] "AISI 304 Austenitic stainless steel." Accessed: Feb. 20, 2026. [Online]. Available: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=100
- [7] "ISO 16143-1:2014 Stainless steels for general purposes." Accessed: Oct. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/59410.html>
- [8] "ISO 21920-2:2021." Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/72226.html>
- [9] D. Hatic *et al.*, "Use of machine learning for automatic Rockwell adhesion test classification based on descriptive and quantitative features," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 427, p. 127762, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127762>.
- [10] "ISO 26443:2023." Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/86445.html>