



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

Nitridálás és többrétegű bevonatok hatása eltérő ötvözettségű acélok tribológiai tulajdonságaira

GÁBRIEL BÁLINT

PRÉMUS KARINA



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

GÁBRIEL BÁLINT

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK BSc, 7. FÉLÉV)

PRÉMUS KARINA

(IPARI TERMÉK-ÉS FORMATERVEZŐ MÉRNÖKI SZAK BSc, 5. FÉLÉV)

Nitridálás és többrétegű bevonatok hatása eltérő ötvözettségű acélok tribológiai tulajdonságaira

Konzulens:

Korsós Krisztián

doktorandusz, ATT

Budapest, 2024

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ezen dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a célkitűzésekben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2024. 11. 10.



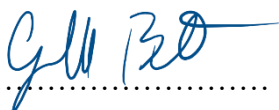
.....

konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Gábrriel Bálint* (QD8NEU) és *Prémus Karina* (DDOQX6), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2024. 11. 10.



.....

hallgató



.....

hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

1	Előszó.....	4
2	Összefoglalás	5
2.1	Summary	6
3	Bevezetés	7
3.1	Célkitűzések	7
3.2	Áttekintés	7
4	Szakirodalmi áttekintés	8
4.1	Hibrid felületkezelés, duplex felületkezelés	8
4.2	Szakirodalmi összefoglalás	15
5	Anyagok és Módszerek.....	16
5.1	A kutatásban használt anyagok	16
5.1.1	Acélok	16
5.1.2	Kerámia bevonatok	17
5.2	A kutatás során használt próbatestekről.....	18
5.2.1	Gyártás	18
5.2.2	Jelölésrendszer	19
5.3	A kutatás során alkalmazott módszerek.....	19
5.3.1	Szemrevételezés (gyártás sikerességének vizsgálata).....	19
5.3.2	Nano-keménységmérés	19
5.3.3	Adhéziós vizsgálat	20
5.3.4	Tribológia.....	22
5.3.5	Metallográfia.....	23
5.3.6	Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM).....	24
5.3.7	Energiadiszperzív spektrométer (EDS).....	24
5.3.8	Profilmérés	24
6	Eredmények	25
6.1.1	Szemrevételezés (gyártás sikerességének vizsgálata).....	25
6.1.2	Nano-keménységmérés	26
6.1.3	Adhéziós vizsgálat	29
6.1.4	Tribológia.....	32
6.1.5	Metallográfia.....	35
6.1.6	Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM).....	36

6.1.7	Energiadiszperzív spektrométer (EDS).....	38
6.1.8	Profilmérés	41
7	Eredmények értékelése/Következtetések.....	43
7.1	Jövőbeli tervek	44
8	Felhasznált források	45
8.1	Ábrajegyzék	47
8.2	Táblázatjegyzék	49

1 ELŐSZÓ

A 21. századi ipari alkalmazások egyre magasabb követelményeket támasztanak az anyagtudomány felé, különösen a kopásállóság, keménység és hőállóság terén. Az acélok tribológiai tulajdonságai, amivel kutatásunk is foglalkozik, kiemelkedően fontos szerepet játszanak a különböző termékek hosszú élettartamának és a megbízható működésének biztosításában. Az acélok felületkezelésénél az utóbbi időszakban a nitridálás és a többrétegű bevonatok alkalmazása jelentőssé vált. Ezek a technológiák javítani tudják az anyagok tulajdonságait, ám a hatásuk sok mindentől függhet, kezdve az anyagok ötvözettségétől a különböző bevonatok rétegezési permutációjáig.

Munkánk során célunkká, hogy kerámiával bevonatolt acélok tribológiai tulajdonságait vizsgáljuk és feltérképezzük azt, hogy milyen befolyásoló tényezők vannak a felületkezelésben, az eljárás hatékonyságát igazoljuk eredményekkel.

Reménykedünk benne, hogy a kutatás eredményei értékes információkkal szolgálnak majd az anyagtudomány iránt elhivatott szakemberek számára, akik elhivatottak az új megoldások keresésére és hozzájárulhatnak az acélok felületkezelési módszereinek fejlesztéséhez, ami elősegítheti az ipari felhasználás szempontjából is fontos anyagtulajdonságok javításához!

A tanulmány reményeink szerint hozzájárul az acélok felületkezelési módszereinek fejlesztéséhez, és elősegíti az ipari felhasználás szempontjából alapvető anyagtulajdonságok tökéletesítését.

* * *

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetünket kifejezni konzulensünknek, Korsós Krisztiánnak, hogy dolgozatunk létrejöttében segítséget nyújtott, a mérésekben aktívan részt vett.

Ezen kívül köszönjük az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a rendelkezésemre bocsátott eszközöket és a kollégáknak a segítséget.

Budapest, 2024. 11. 10.

Gábrriel Bálint

Prémus Karina

2 ÖSSZEFOGLALÁS

A jelenkor műszaki megoldásai rendkívül sok követelménynek kellene, hogy megfeleljenek, az egyik legfontosabb mégis egy gazdasági mutatószám, az ár. Ebből fakadóan nem érdemes, bizonyos esetekben még előnytelen is lehet egyes gépelemeket minőségi, ugyanakkor költséges anyagminőségből elkészíteni. Bizonyos esetekben a műszaki termék keresztmetszete nincs kitéve jelentős mechanikus terheléseknek, ugyanakkor felülete rendkívül nagy koptató igénybevételt szenvedhet el üzem közben. Ilyen esetekben megfelelő megoldás lehet, a termékek felületének kémiai, fizikai vagy mechanikai tulajdonságainak célzott módosítása, felületkezelések alkalmazásával.

Az ily módon módosított alkatrészek inhomogén anyagjellemzőkkel bírnak, ideális esetben a magnak szívósnak, míg a felszín és a felszín közeli rétegeknek nagy keménységűnek, kopásállóknak, korrózióállóknak kell lennie, illetve nem elhanyagolható, hogy az így kialakított rétegnek esztétikai értéke is lehet. Bizonyos műszaki alkalmazások során olyan felületi tulajdonságokra vonatkozó követelmények teljesítése szükséges, amelyeket egy felületkezelés alkalmazásával nem vagyunk képesek a termék számára biztosítani. Ezekben az esetekben több felületkezelés kombinálásával olyan tulajdonságú felületek alakíthatók ki, melyek optimális esetben mind fizikai, mind kémiai, mind mechanikai szempontból előnyösebb tulajdonságokkal rendelkeznek, mint bármely őket alkotó részkezelés önmagában való elvégzésével elérhető lenne.

Kutatásunk során plazmanitridálás és PVD technológia alkalmazásával kialakított, hibrid felületkezelésen átesett kis és nagy ötvöztartalmú acélokat vizsgáltunk. A kutatáshoz használt anyagaink C45, kis ötvöztartalmú szénacél, illetve 316, nagy ötvöztartalmú ausztenites, rozsdamentes acél. Felületkezelések esetében a próbatestek hagyományos plazmanitridáláson estek át, majd a próbatestek felületére két eltérő kémiai összetételű keramikus PVD bevonat típus került felvitelre, oly módon, hogy a bevonat párosítás minden lehetséges permutációja teljesüljön.

A próbatesteket pin-on-disc tribométer alkalmazásával tribológiai vizsgálatoknak vetettük alá eltérő terhelések mellett, melyeket kopásállóság és a súrlódási együttható időbeli változásának tekintetében értékeltük ki. A próbatestek továbbá adhéziós és keménységi vizsgálatokon estek át.

Kulcsszavak: *pvd, plazmanitridálás, C45, 316, hibrid felületkezelés*

2.1 Summary

Modern technical solutions must meet numerous requirements, but one of the most important is an economic indicator: cost. Consequently, it is not always worthwhile, and in some cases, it may even be disadvantageous to manufacture certain machine components from high-quality but expensive materials. In some cases, the cross-section of a technical product is not subjected to significant mechanical loads, yet its surface may experience extensive abrasive wear during operation. In such cases, a suitable solution can be the targeted modification of the chemical, physical, or mechanical properties of the surface by applying surface treatments.

Components modified in this way exhibit inhomogeneous material characteristics; ideally, the core should be tough, while the surface and subsurface layers should be hard, wear-resistant, and corrosion-resistant. Additionally, the surface layer created in this manner can also have aesthetic value. For certain technical applications, it is necessary to meet surface property requirements that cannot be achieved through a single surface treatment. In these cases, combining multiple surface treatments can result in surfaces with properties that are, ideally, superior in terms of physical, chemical, and mechanical characteristics compared to what could be achieved by applying each treatment individually.

In our research, we examined low- and high-alloy steels that underwent hybrid surface treatments using plasma nitriding and PVD technology. The materials we used for the research were C45, a low-alloy carbon steel, and 316, a high-alloy austenitic stainless steel. For the surface treatments, the test specimens underwent traditional plasma nitriding, followed by the application of two different ceramic PVD coatings with distinct chemical compositions, ensuring that every possible permutation of the coating combinations was applied.

The test specimens were subjected to tribological tests using a pin-on-disc tribometer under varying loads, and we evaluated the results in terms of wear resistance and changes in the coefficient of friction over time. The test specimens also underwent adhesion and hardness tests.

Keywords: pvd, C45, 316, plasma nitriding, hybrid surface treatment

3 BEVEZETÉS

3.1 Célkitűzések

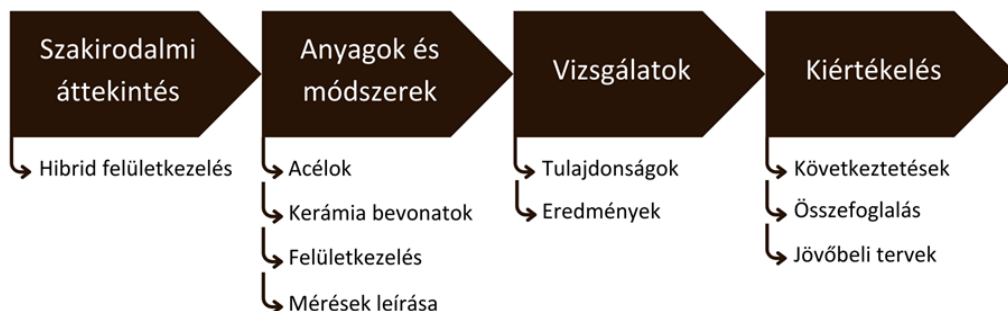
Kutatásunk során a legmeghatározóbb kérdés, hogy az elkészített többretegű felületkezelt próbatestjeinken melyik permutáció fogja a legkedvezőbb tribológiai tulajdonságokat hozni. A PVD bevonatolási eljárás kiemelt kutatási terület, mert ezzel az eljárással sokkal pontosabban beállítható a felvitt réteg vastagsága (kismértékű a szórása) más felületkezelési eljárásokhoz képest, amely szigorú tűrésekkel rendelkező alkatrészek során fontos. Továbbá, a keramikus bevonatoknak, mint amilyen a PVD is, temérdek figyelemfelkeltő tulajdonsággal rendelkezik más felületkezelésekhez képest.

Dolgozatunk technológiai eljárása az utóbbi években egyre nagyobb teret hódít, sok újító információt lehet még kideríteni róla. Lényegesnek tartjuk, hogy a műszaki életben lépést tudjunk tartani és olyan információkat publikáljunk, amik hasznosak lehetnek az anyagtudomány számára. A hibrid felületkezelések a mai napig az aktívan kutatott témák közé tartozik, hiszen folyamatosan jelennek meg új tanulmányok ebben a témakörben.

Jelen munkánkban arra törekszünk, hogy az eltérő ötvözettségű acéljainkon létrehozott duplex felületkezelést tribológiai tulajdonságait vizsgáljuk.

3.2 Áttekintés

Az áttekintést szakirodalom kutatásával kezdjük, ahol a mi általunk alkalmazott vizsgálati eljárásokat mutatjuk be, illetve a témával kapcsolatos és releváns kutatások eredményeit értékeljük ki. Ezután ismertetjük a próbatestjeink főbb adatait, az általunk használt és vizsgálat anyagokat, valamint vizsgálati módszerekről számolunk be. Ezt követően leírjuk az eredményeinket és kiértékeljük azokat, majd az összegzés és következtetések szakaszában bemutatjuk a kutatásunk során levont tanulságokat, és javaslatot teszünk a jövőbeli kutatási irányokra. Ebben a fejezetben összefoglaljuk a kutatás célkitűzéseéhez kapcsolódó további terveinket, és kitérünk arra is, hogy a jövőbeli vizsgálatok során milyen új megközelítések, módszerek vagy technológiák alkalmazását tartjuk indokoltnak a téma további, mélyebb feltárása érdekében. A megfelelő szemléltetés érdekében az áttekintésről folyamatábrát készítettünk (1. ábra).



1. ábra: Áttekintés folyamatábrája

4 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalmi áttekintésben figyelmet fordítunk a hibrid felületkezelés történetére és az előzőleg alkalmazott hibrid felületkezelési eljárásokra. Célzottan kerestük azokat a tanulmányokat, ahol újító jellegű kutatásokat, alkalmazási eljárásokat készítettek.

4.1 Hibrid felületkezelés, duplex felületkezelés

A hibrid vagy más néven duplex felületkezelést elsőként finn kutatók (Sirvio, Sulonen és Sundquist 1982 [1]; Korhonen és Sirvio 1982 [2]) próbálták TiN kerámia bevonat felvitelével plazma-előnitridált szerszámacélokra. A kutatásuk viszont sikertelen volt, hiszen a bevonattal ellátott minták nagyobb abrazív kopási arányt mutattak, mint az egyszerű bevonattal ellátott minták. A szerzők szerint az alacsony kopásállóság a nitridált szerszámacél és a TiN bevonat mikroszerkezeti különbségeivel volt magyarázható.

Matthews 1985-ben [3] egy olyan hibrid technikát dolgozott ki, amely az alapanyag előnitridálását és bevonatolását egy műveletben végezte el. Megfigyelte, hogy abban az esetben, ha az előkezelést alacsony nitrogén-potenciállal hajtják végre a gázkeverékben, akkor alacsonyabb kopási arány érhető el. Következtetése alapján az előnitridálás nagymértékű javulást eredményezhet a bevonat tapadásában, amennyiben elkerüljük a fehér réteg kialakulását.

Ezután Sun és Bell 1911-ben [4] szintén TiN kerámia film tapadásának hiányát a hideg munkás szerszámacél nitridálás során keletkező fehér réteg képződésével magyarázta. Azt is megfigyelték, hogy ez a bizonyos réteg képződése bomlással járt, ami fekete réteg kialakulásához vezetett a katódos íves kezelés során. Ezt viszonylag magas hőmérsékleten, 550 °C-on végezték a PDV-TiN bevonatolási folyamat alatt.

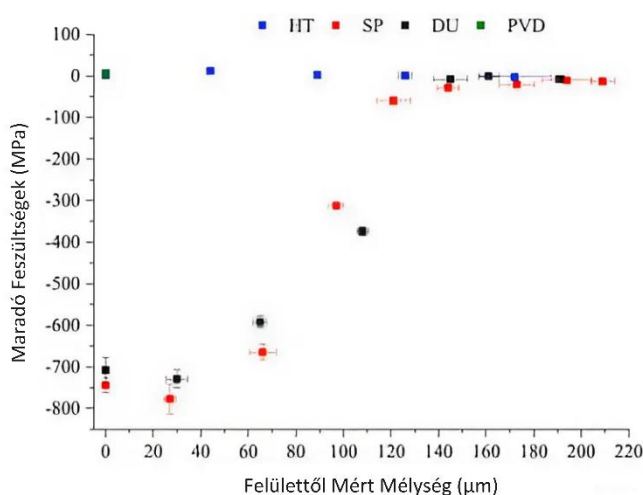
Dingremont és munkatársai 1995-ben [5] alacsonyabb nitrogén-potenciálú előnitridálási kezeléseket javasoltak a fehér réteg képződés meggátolása érdekében.

Zlatanović és Münz [6] voltak azok, akik először számoltak be 1990-ben a kettős bevonat sikeres alkalmazásáról edzett és megeresztett, 65 HRC keménységű M35 szerszámacél esetén, amelyet marófejek gyártásához használtak. A bevonatolás eredménye egy 1100 HV keménységű, 18 µm vastag plazmanitridált zónából és egy 3000 HV keménységű, 5-6 µm vastag PVD-TiAlN bevonatból állt. A szerszámok teljesítményét a bevonatolt és nem bevonatolt vágószerszámok kopási mértékének mérésével értékelték autóiipari tömeggyártás során, a szénacélból készült főtengely-keréktárcsák gyártásához. A Ti, Al keménybevonat alkalmazásával az eszköz élettartama az ötszörösére nőtt. A plazmanitridálás négyszeresével növelte az élettartamot normál vágási körülmények között a bevonat nélküli termékekhez képest. A kettős bevonatú termékek teljesítménynövekedését is megfigyelték az egyszerűen bevonatoltakhoz képest.

2000-ben pedig Hogmark és társai [7] azt állították, hogy más felületkezelési eljárások is használhatóak a szubsztrátum teherbíró képességénke növelésére. Elektrolitikus nikkel, kemény króm, lézeres bevonatolás és termikus szórás, nitridált és cementált rétegek mellett. A támogató réteg elsődleges tervezési paraméterei a vastagság és a Young-modulus, és a cél a szubsztrátum plasztikus deformációjának elkerülése és az elasztikus deformáció minimalizálása. A kopásálló PVD bevonat fölé egy puhább, alacsony súrlódású bevonat is felvihető, hogy javítsa a kenőképességet és csökkentse a mechanikai támogatóréteg és a bevonatrétegek közötti nyírófeszültségeket. [8]

Eddigi áttekintésben bemutattuk, hogy hogyan jutottunk el az utóbbi időszak kutatásaihoz, ahol már fejletten, korszerűen és újítón alkalmaznak a hibrid felületkezelési eljárásokat, különféle módszerek segítségével.

Kelsey Ann Vella és kutatótársai tanulmányukban [9] egy additív módon gyártott Ti-6Al-4V anyagra gyakorolt duplex felületkezelés hatását vizsgálták. Először az úgynevezett sörétszórás technológiáját alkalmazták az anyagon, ezután kerámiával többrétegű bevonatolást alkalmaztak (Ti, TiN, TiAlN és TiAlCuN rétegek hozzáadásával) fizikai gőzfázisú leválasztás (PVD) segítségével. Röntgendiffrakciós feszültségméréseket, profilkeménység vizsgálatot és elektronvisszaszóródásos diffrakciós vizsgálatot is alkalmaztak, amely azt az eredményt mutatta, hogy a sörétszórás technikája egy körülbelül 150 μm vastagságú megkeményedett felületi réteget hozott létre. A réteggel párhuzamosan nyomófeszültségek keletkeztek, ezek a felülettel számítva akár 150 μm mélységig kimutathatóak voltak. A legnagyobb nyomófeszültség mértéke 770 MPa volt, ami 27 μm -rel a felület alatt helyezkedett el. A következő diagram (2. ábra) a kutatásban használt különböző felületkezelési eljárásokat hasonlítja össze a maradó feszültségek (MPa) és a felülettől vett mélység (μm) függvényében:

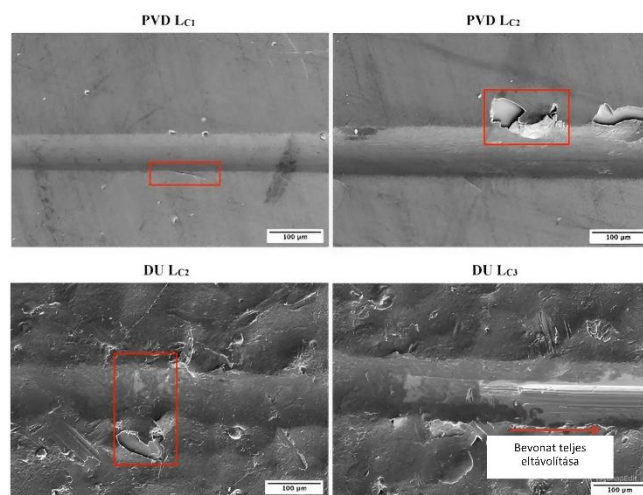


2. ábra: Maradó feszültségek (MPa) a felülettől mért mélység függvényében (μm) [9]

A diagram különböző rövidítésekkel és színekkel jelöli az eljárásokat:

- HT: hőkezelés (kék négyzetek)
- SP: sörétszórás (piros négyzetek)
- DU: duplex kezelés (fekete négyzetek)
- PVD: fizikai gőzfázisú leválasztás (zöld négyzetek)

A feszültségmérések létezését keresztmetszetek átlagos elfordulásmérésével is igazolták, valamint kimutatták, hogy a duplex kezelés jelentős előrelépést eredményezett az anyag mikrokeménységében, mivel a kezeletlen mintához képest 210%-os növekedést mértek. A kerámia bevonat is kiváló mechanikai tulajdonságokkal bír, 26 GPa nanokeménységével és 0,08 H/E rugalmassági indexszel. Ezenfelül karcteszteket is végeztek, amelyek során a duplex kezelt minták fokozott tartósságot mutattak, amit ugyancsak a sörétszórás eljárás által elért felületi érdességnövekedés segített elő.



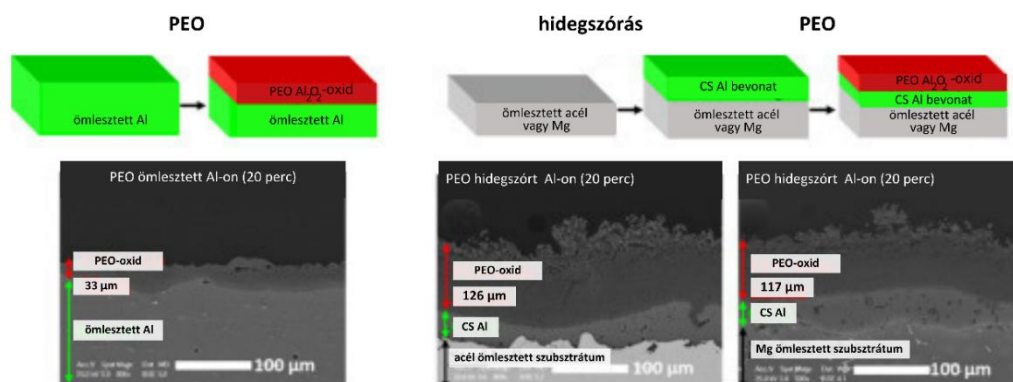
3. ábra: A karcnyomokban megfigyelt különböző jellemzők nagy nagyítású mikroszkópos képe [9]

Kutatásuk megerősíti, hogy a duplex kezelés rendkívül előnyös az additív módon gyártott alapanyagok tulajdonságainak javítására, nyomófeszültegek bevezetésével ez a kezelés csökkenti az építési hibák és húzófeszültség anyag kifáradási élettartamára gyakorolt negatív hatását. A megnövekedett alapanyag keménysége javítja a bevonat teherbíró képességét, ami még tovább javítható a sörétszórás technológiája által okozott érdességcsökkenéssel.

A. Márquez-Herrera és társai [10] ASTM A-36 acélrúdon duplex felületkezelést végeztek, mely során csiszolás és boridálás kombinálását alkalmazták. Először 200 N-os erővel 127 mm/perc haladási sebességgel végezték el a csiszolást, majd porágyas boridálási folyamatot végeztek el rajta, 950 °C-on, 5 órán át. A próbatesten röntgendiffrakciós elemzés kimutatta a Fe_2B fázis kialakulását. A mikroszerkezeti vizsgálatok pedig azt, hogy a csiszolt-boridált réteg fűrészfogszerű morfológiával rendelkezik, vastagsága $85,6 \pm 7,9 \mu\text{m}$ lett. Az anyag keménysége 216 HV_{0,05}-ről 2290,3 HV_{0,05}-

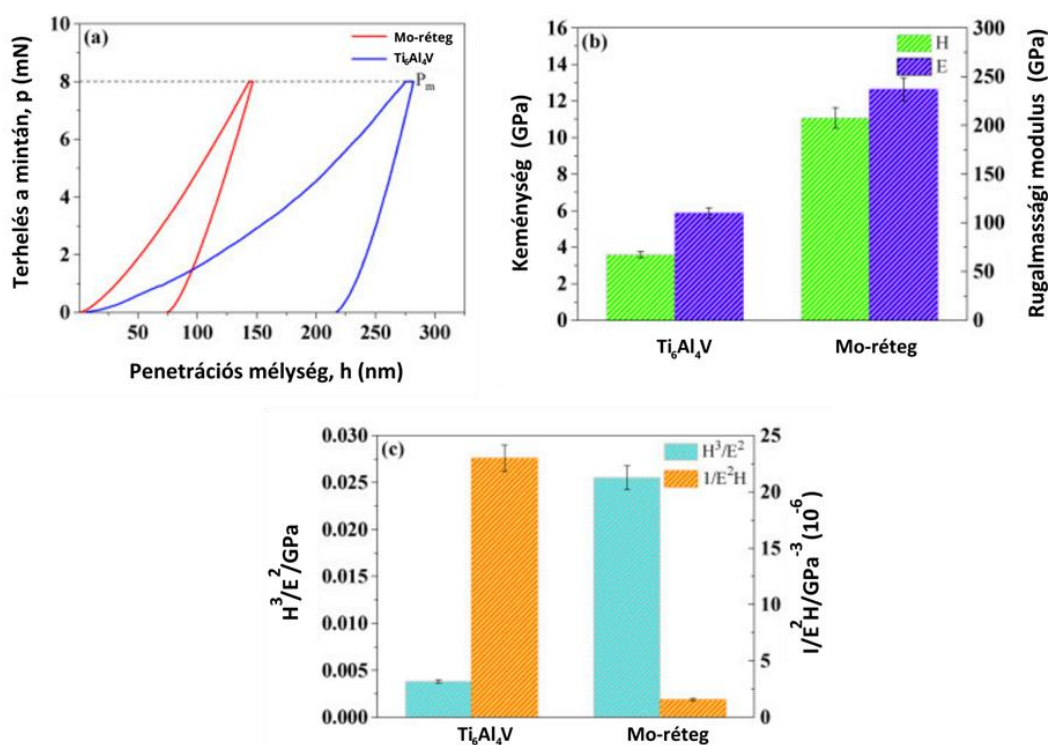
re nőtt a felületkezelt mintánál. Az elektrokémiai impedancia spektroszkópia (EIS) és a Tafel (potenciodynamikus polarizációs) vizsgálatok által kimutatták, hogy a csiszolt-boridált acél nagyobb mértékű korrózióállóságot mutatott, mint a csak boridált acél.

J. Martin és kutatótársai [11] a plazmaelektrolitikus-oxidációt (PEO) vizsgálták, hiszen széleskörben használják ezt az eljárást könnyűfémek, például alumíniumötvözetek korrózió- és kopásállóságának javítására, kerámia-oxid bevonat képzésével. Viszont ez az eljárás nem hatékony nehézfémek esetén, és ha magnéziumötvözetekben alkalmazzák, az oxidbevonatok általában vékonyak és porózusak lesznek. Kutatásukban hidegszórással és PEO-val kombinált kezelést alkalmazhatóságát vizsgálták úgy, hogy a PEO-kezelés előtt hidegszórta alumíniumbevonatokat visznek fel magnézium (EV31) és acél (S235) szubsztrátokkal. Bizonyították a kettős eljárás hatékonyságát vastag, tömör és kristályos alumínium-oxid bevonatok kialakításában mind a magnézium, mind az acél szubsztrátokon. A hidegszórta-PEO oxidréteg növekedési kinetikája háromszorosára gyorsult a tömör alumínium szubsztrátok egylépcsős PEO kezeléséhez képest.



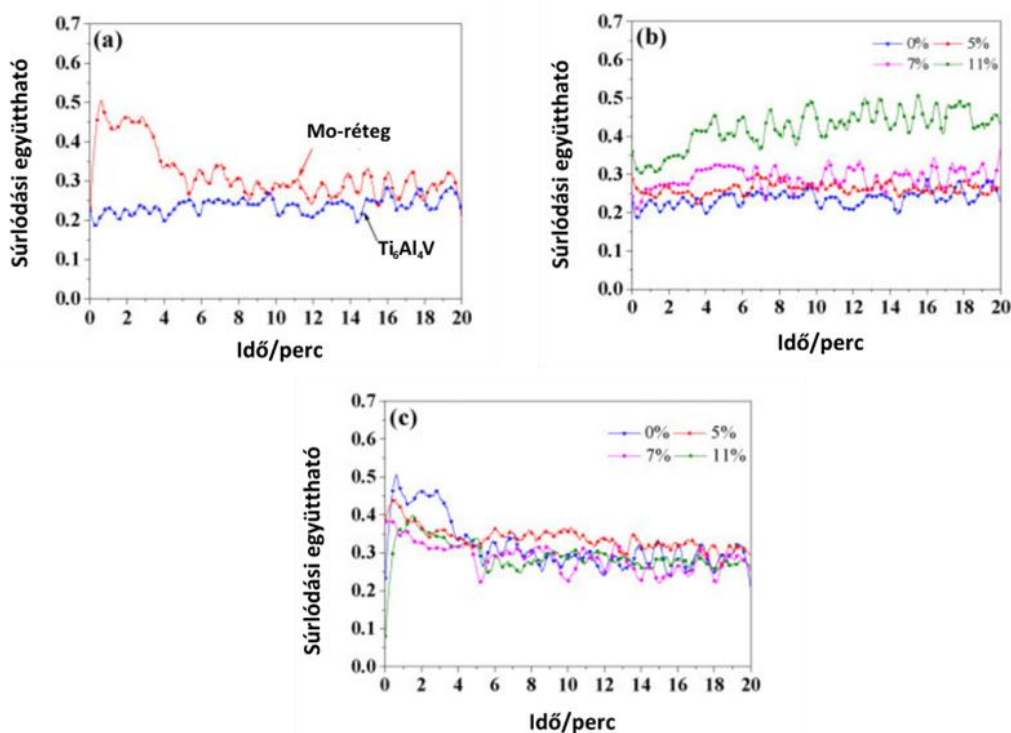
4. ábra: PEO és hidegszórta-PEO oxidréteg sematizált ábrája és mikroszkópi képei [11]

Shuo Yuan és társai munkájukban [12] a Ti_6Al_4V ötvözet kettős felületkezelésnek vetették alá, azzal a céllal, hogy javítsák a felületi szilárdságot és vizsgálják tribológiai tulajdonságait. A Ti_6Al_4V ötvözetten először kettős fényjelenségű plazmafelületi ötvöztet (DGPSA) végeztek molibdén (Mo), majd plazmafelület-molibdénbevonás-lézeres felületi texturálásnak (LST) vetették alá a próbatestet, kerek mélyedés alakú textúrát létrehozva 5%, 7% és 11%-os sűrűséggel. Eredményeik szerint a molibdén-rétegben Mo és Mo/Ti szilárd oldatfázisok voltak kimutathatók röntgendiffrakciós (XRD) elemzéssel. A kapott, körülbelül 13 μm vastag Mo-réteg egyenletes és tömör volt. Az LST bevonás jelentősen javította az ötvözet felületi keménységét és rugalmassági modulusát nanoindentációs tesztelés során.



5. ábra: A Mo-réteg és a Ti6Al4V ötvözet mátrix terhelés-eltolódás görbéi (a), a Mo-réteg és a Ti6Al4V ötvözet mátrix keménysége és rugalmassági modulusa (b), a H^3/E^2 és az $1/E^2 H$ arányok, amelyek az E és H mért értékeiből származnak a Mo-réteg és a Ti6Al4V ötvözet mátrix esetében (c) [12]

A 6. ábra (a) része bemutatja a súrlódási együtthatók változását a csúszási idő függvényében a Ti6Al4V ötvözet mátrix és a Mo-réteg esetében. Látható, hogy a Mo-réteg súrlódási együtthatója először növekedett, majd fokozatosan csökkent egy viszonylag stabil szakaszra, ahol a súrlódási együttható enyhe ingadozást mutatott egy szűk tartományon belül (0,2–0,35) az átlagos szinthez közel. A súrlódási körülmények fokozatosan stabilizálódtak, majd a súrlódási együttható elérte a viszonylag stabil értéket. A Ti6Al4V és a Mo-réteg súrlódási együtthatói stabilan 0,23 és 0,28 értéken álltak be. A folyamat során a Mo-réteg fokozatosan lekopott az állandó súrlódás hatására, és végül a súrlódási együttható hasonló ingadozásokat mutatott. Megjegyzendő, hogy a Mo-réteg nagyobb súrlódási együtthatót mutatott, mint a Ti6Al4V. Ez az eredmény főként annak tulajdonítható, hogy a kettős fényjelenségű felületi molibdénbevonási eljárás során az ionok porlasztása és lerakódása növelte az anyag felületi érdességét.



6. ábra: A polírozott $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ és a Mo-réteg súrlódási együtthatói (a); a különböző textúrasűrűséggel rendelkező $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet (b) és Mo-réteg (c) súrlódási együtthatói [12]

A (b) és (c) ábrán látható a súrlódási együttható változása a vizsgálati idő függvényében a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözetben és a Mo-rétegen. A (b) ábráról leolvasható, hogy a súrlódási együttható a kezdeti szakaszban növekedett, majd egy stabil értéken ingadozott. A 0, 5, 7, és 11%-os textúrasűrűséghez tartozó súrlódási együtthatók rendre 0,23; 0,26; 0,29; és 0,43 voltak. A textúrázott minták súrlódási együtthatói és ingadozásai kissé magasabbak voltak, mint a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet mátrixé. A textúrasűrűség növekedésével a súrlódási együtthatók növekedtek, ami azt jelezte, hogy a felületi textúra nem volt hatékony a súrlódás csökkentésében. Ez a jelenség főként a textúrázás utáni megnövekedett felületi érdességnek tulajdonítható.

A kettős kezelt, 5%-os textúrasűrűségű $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ jobb kopásállóságot mutatott a kezeletlen ötvözethez képest, amit az is igazolt, hogy a fajlagos kopási ráta 48,5%-kal alacsonyabb volt, mint a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözeté.

A $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözetet kettős fényjelenségű plazmafelület-molibdénbevonással és lézeres felületi texturálási technikával kezelték. A kapott, 300 μm átmérőjű mélyedés textúrák 5%, 7% és 11%-os sűrűséggel helyezkedtek el a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ korong felületén. A Mo-réteg tulajdonságait felületi morfológia, fázisösszetétel, kötési szilárdság és felületi keménység alapján értékelték. Összehasonlították a kettős kezelt $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet és a kezeletlen $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet tribológiai viselkedését száraz csúszási kopás alatt. Az Mo-réteg Mo és Mo/Ti szilárd oldatfázisból állt. A molibdén ötvöztetés után a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet mátrix mikrokeménysége háromszorosára nőtt, amit a Mo és Ti elemek közötti szilárd oldatos erősítésnek tulajdoníthatunk. A Mo-réteg által bevezetett maradó

nyomófeszültség szintén hozzájárult a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet felületi keménységének javulásához. A kenés nélküli koptatási mérés során, 10 N normál terhelés mellett, Si_3N_4 anyaggal szemben a Mo-réteg, a texturált $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet és a kettős kezelt $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet alacsonyabb fajlagos kopási rátát mutatott, mint a polírozott $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$. Ezek kopási rátájuk csökkenő sorrendjében így rangsorolhatók: kettős kezelt $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ (48,7%) > Mo-réteg (34,2%) > texturált $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ (20%). A $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ minták kopási mechanizmusa kifáradási és abrazív kopás volt, amelyet oxidációs kopás kísért. Kettős kezelés után azonban a fő kopási mechanizmus enyhén abrazív kopás volt. Megállapítható, hogy a kettős fényjelenségű plazmafelület-molibdénbevonás-lézeres felületi texturálás kombinált felületkezelés révén javítható a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet mátrix felületi szilárdsága és kopásállósága.

Fei Sun és társai [13] a fogászati implantátumok hosszútávú működését kutatták azáltal, hogy ívkisüléssel plazmanitridálással és titán-nitrid (TiN) bevonat létrehozásával. A fogászati implantátumok $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ csavarjait fizikai gőzfázisú (PVD), ívkisüléssel plazmanitridálással és ívkisüléssel plazmanitridálás-fizikai gőzfázisú leválasztással kezelték. A különböző módon kezelt csavarok felületi jellemzőit, lazulási tulajdonságait és fáradási teljesítményét elemezték. Eredményei rámutattak arra, hogy a kettős kezelés rétegzett felületi szerkezetet hozott létre, csökkentette a felületi érdességet, és javította a titán-nitrid (TiN) bevonat tapadását. A kizárólag PVD-kezelt csavarokhoz képest a kettős kezelt csavarok javították a lazulás elleni teljesítményt, csökkentették a felületi kopást, és megnövelték a fáradási élettartamot.

A PVD eljárással Qianxi He és társai [14] vágószerszámok mechanikai tulajdonságait, kopásállóságát és élettartamát növelték, illetve az alkalmazott vizsgálatok segítettek jobban megérteni a menetfúrás során kialakuló mechanikai felületi átalakulásokat.

Doğuş Özkan és társai [15] tanulmányukban az $\text{AlTiSiN}+\text{TiSiN}$ bevonatok kopás- és súrlódási viselkedését vizsgálták H13 szerszámacélokon különböző közbenső rétegekkel (CrN, TiN, AlCrN) tribométeres tesztelés segítségével. Az eredmények azt mutatták, hogy az $\text{AlTiSiN}+\text{TiSiN}$ bevonat TiN közbenső réteggel jelentősen javította a szerszámacélok tribológiai teljesítményét, mind kenés nélküli, mind határos kenési körülmények között.

H. Holleck és V. Schier [16] megállapították a PVD technológia jól alkalmazható új és fejlett bevonati koncepciók, mint például a gradiens bevonatok, a metastabil bevonatok, a többkomponensű bevonatok, a többrétegű vagy szuperrácsos bevonatok megvalósítására. Ezen bevonati koncepciók közül a többrétegű bevonatok tűnnek a legígéretesebbnek, mivel számos követelménynek megfelelnek (pl. multifunkcionális jelleg, mérsékelt maradó feszültségek, jó tapadás a fémhez, megfelelő keménység-szilárdság arány és alacsony súrlódási együttható), amelyek egy összetett kopási körülményeknek kitett kompozit anyag esetében fontosak.

4.2 Szakirodalmi összefoglalás

Az általunk választott hibrid felületkezelési eljárást kicsivel több mint 40 éve kutatják, de csak 1990-ben sikerült igazolni azt, hogy ennek a technológiának számos méltatandó anyagjavítási tulajdonsága van. Ahogy haladtunk előre napjainkig egyre több tulajdonságot tudtak a kutatásokkal javítani, ezáltal szeretnénk most összefoglalni, hogy az általunk vizsgált szakirodalmakban, milyen eredményekre jutottak előtünk.

A hibrid megközelítés jelentősen hozzájárul a bevonat tapadásának fokozásához, ezáltal hosszabb kifáradási élettartamot és nagyobb megbízhatóságot biztosít például az anyagból készült termékek számára. Továbbá, előrelépés érték el a kutatásokban a felületi kopásállóság és szilárdság javításában is, ami kiemelten fontos a nagy igénybevételnek kitett alkatrészek esetében. A rugalmassági modulus és az anyag keménységének növelése is az anyagok alkalmazkodóképességét és teherbírását javítja, különösen dinamikus igénybevétel mellett. A hibrid felületkezelési eljárások tehát elősegítik az anyagtulajdonságok javítását több esetben is.

5 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

5.1 A kutatásban használt anyagok

5.1.1 Acélok

A kutatásban két acélt használtunk, egy alacsony (1,5% ötvöző) és egy magas ötvözt (30% ötvöző), amelyek összetételét a következő két táblázatban (1-2. táblázatok) ismertetjük:

- 316 (X5CrNiMol17-12-2)

Összetétel, tömegarány%-ban:

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	N
≥ 0,07	≥ 1	≥ 2	10 – 13	≥ 0,045	≥ 0,015	16,5 – 18,5	2 – 2,5	≥ 0,11

1. táblázat: 316 összetétele, tömegarány%-ban [17]

- C45 QT

Összetétel, tömegarány%-ban:

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo
0,43 – 0,5	≥ 0,4	0,5 – 0,8	≥ 0,4	≥ 0,045	≥ 0,045	≥ 0,4	≥ 0,1

2. táblázat: C45 összetétele, tömegarány%-ban [18]

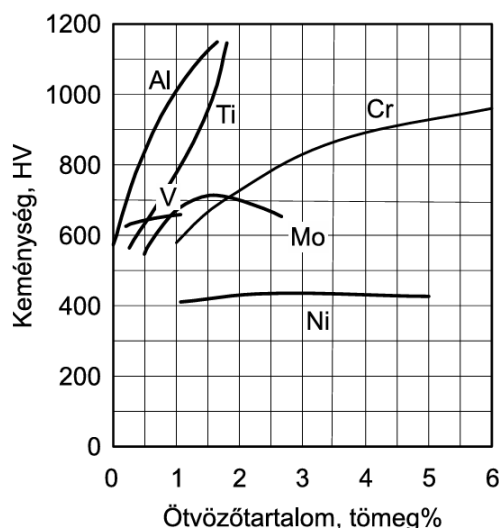
A próbatestjeinket számos felületkezelésnek vetettük alá; políroztuk, plazmanitridáltuk, vegyületi réteget távolítottunk el, erre jött rá az első PVD réteg, majd szemcseszórászt alkalmaztunk és a szemcseszórt rétegre jött a második PVD réteg. Ezzel a két acéllal 4 rétegű kompozitgyártás volt a célunk. Az acél ötvöztartama a vegyületi réteg szerkezetét fogja erőteljesen befolyásolni, hiszen különböző (20%, 25%, 33%, 50%) százalékos nitrogéntartam eltéréseket alkalmazunk, amelyeknek eltérő affinitása lesz az anyagra.

A mi esetünkben az alapfém mintáink nitridálva lettek, amely az alapanyag felületi teherbírását és szilárdságát növeli. A plazmanitridálást követően keramikus bevonatolás történik, ami a kopásállóságot és korróziós tulajdonságokat tudja javítani. [19] A következő ábrán a nitridálással kombinált duplex kezelések hatásmechanizmusainak bemutatása látható:



7. ábra: Nitridálással kombinált duplex kezelések hatásmechanizmusainak bemutatása [20]

Választásunknál figyelembe kellett vennünk azt, hogy az adott ötvöző milyen hatással van a maximálisan elérhető keménységre vonatkoztatva, mivel nem mindegyik ismert nitridképző elem képes nagy keménységet kiváltani. Legtöbbször az Al, Cr, Si, Mn, Mo ötvözők vannak jelen a nitridált acélokban, és ezek képesek az akár 1000 HV-t meghaladó felületi keménységet eredményezni (8. ábra). [21]



8. ábra: Ötvözők hatása a nitridálás utáni keménységre (alapfém: 0,35%C; 0,30% Si; 0,70% Mn) [22]

5.1.2 Kerámia bevonatok

A munkánk során kétféle eljárással kezeltük a próbatesteket: plazmanitridálással és PVD-vel. Utóbbi a fizikai gőzfázisú leválasztás angol megfelelőjének rövidítése, amely során gőz állapotban juttatjuk a bevonatolásra használni kívánt anyagot, amely az felületen lecsapódik, kondenzálódik. Egy-egy PVD réteg 5-5 μm vastagságú esetünkben.

Ezen folyamat során 2 anyagot használtunk:

- **TiAlCN:** Vagyis titán alumínium karbonitrid egy nitrid alapú kerámia bevonat, amely titán (Ti), alumínium (Al), szén (C) és nitrogén (N) elemeket tartalmaz. Gyakran alkalmazzák ipari bevonatoláshoz, mivel tartós, hő- és kopásálló. Kiválóan alkalmazható vágás, alakítás, sajtolás és precíziós vágás területén. A hőmérsékletálló TiAlN alsó réteg, a kemény és alacsony súrlódású TiCN felső réteggel olyan kombinációt alkot, ami számos alkalmazásban egyértelmű előnyöket mutat. Ez a duplex bevonat alkalmazásával különösen a hidegalakítás területén érhetők el kiváló eredmények. [23]
- **AlCrN:** szintén nitrid alapú kerámia bevonat, amely alumínium (Al), króm (Cr) és nitrogén (N) elemeket tartalmaz. Gyakran alkalmazzák fémmegmunkálási környezetben, mivel magas hőmérsékleten és nagymértékű terhelés alatt is kiváló teljesítményt tud nyújtani. Az

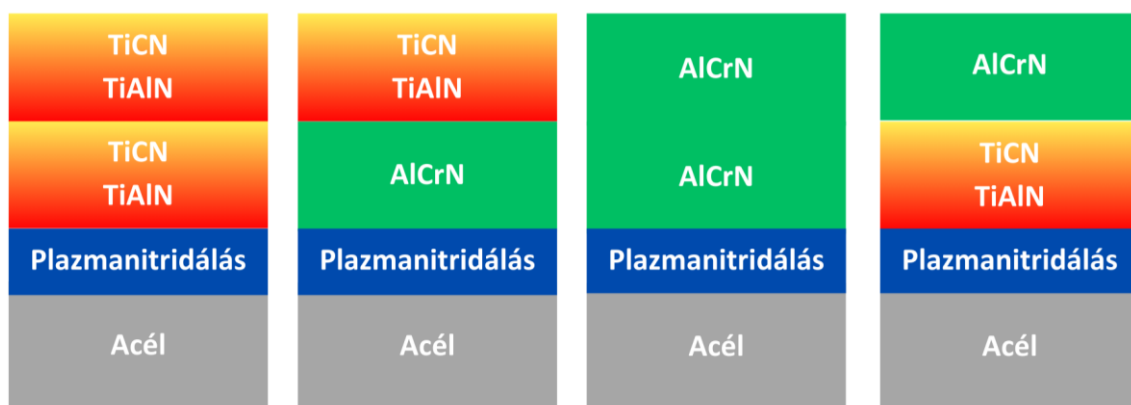
optimalizált folyamatparaméterek és a felhasználáshoz alakító bevonat nagy oxidációállóságot, kiváló melegkeménységet és kimagasló tapadószilárdságot biztosít. [24]

5.2 A kutatás során használt próbatestekről

5.2.1 Gyártás

Az előző pontban ismertetett acélokból hengeres próbatestek készültek, amelyek több lépcsős felületkezelési rendszeren estek át amíg elérték a vizsgálni kívánt állapotot.

A darabok először egy polírozáson estek át, amelyet követett a plazmanitridálás, majd a vegyületi réteg eltávolítása ionos polírozással. A következő lépésben a darabok 2 csoportra lettek bontva, hogy a darabok egyik fele a TiAlCN, a másik fele az AlCrN PVD bevonatot kapta meg. Ezt az első réteget egy szemcseszórás követte az összes próbatest esetében. Végezetül egy második PVD rétegekkel is elláttuk a próbatestet úgy, hogy a létező összes kombinációt elkészíthessük, így 8 próbatestünk lett összesen. A felületkezelésről a következő sematikus ábra ad vizuális magyarázatot:



9. ábra: Felületkezeléseink sematikus ábrája

A 10. ábrán a kutatásunk során vizsgált próbatestjeink láthatóak, a felső sorban a C45, míg az alsó sorban a 316-os minták:



10. ábra: Kutatásunk próbatestjei

5.2.2 Jelölésrendszer

A későbbiekben a darabok egyszerűbb megkülönböztetésének érdekében szeretnénk bevezetni egy jelölés rendszert, amely egy 3 tagból álló jelölés lenne.

Az acélminőségeket a konkrét (3 karakterű) jellel fogjuk megnevezni, míg a TiAlCN réteget “A”-val fogjuk jelölni és a AlCrN réteget “B”-vel.

Próbatest rétegei/Anyagösszetétel	C45	316
Nitridálás + TiAlCN + TiAlCN	C45-AA	316-AA
Nitridálás + TiAlCN + AlCrN	C45-AB	316-AB
Nitridálás + AlCrN + TiAlCN	C45-BA	316-BA
Nitridálás + AlCrN + AlCrN	C45-BB	316-BB

3. táblázat: Próbatestek rétegei és anyagösszetétele

5.3 A kutatás során alkalmazott módszerek

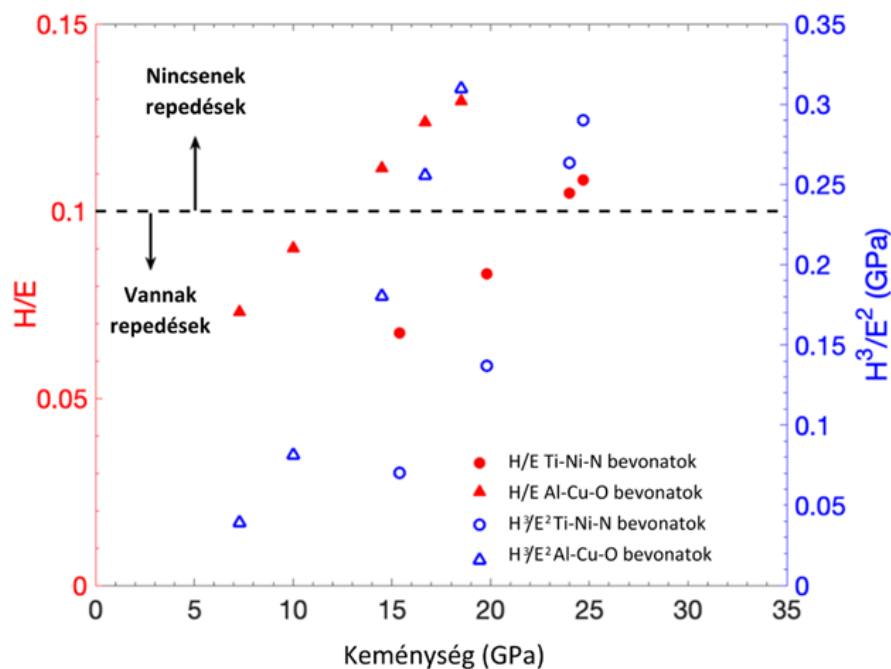
5.3.1 Szemrevételezés (gyártás sikerességének vizsgálata)

Az elkészült darabokat szemrevételeztük, mivel tudni szerettük volna, hogy a bevonatok teljesen befedik-e a darabokat, azokon hibák nincsenek, például elszíneződések, hólyagok, repedések, levegő zárványok vagy leválások.

5.3.2 Nano-keménységmérés

A nano-keménységmérést az Anton Paar Hit 300 asztali nano-keménységmérő műszer segítségével hajtjuk végre. A nano-keménységmérő műszerrel az adott réteg keménységét, rugalmassági modulusát és egyéb felületi mechanikai tulajdonságokat tudunk meghatározni.

Ezen mérés során a fő célunk a H/E és a H^3/E^2 arányok meghatározása lesz. A H/E arány az elasztikus törési nyúlást, míg a H^3/E^2 arány a plasztikus deformációval szembeni ellenállást jelzi. Azonban egyik arány sem veszi figyelembe a plaszticitás hozzájárulását a törési szívóssághoz. A H^3/E^2 arányt érintkező felületek alapján határozták meg, míg a törési szívósság nem kapcsolódik szorosan az érintkezéshez. Kerámia anyagok esetében, ahol a törési események dominálnak, a plasztikus deformáció elhanyagolható. Ezért azokban a bevonatrendszerekben, ahol az elaszticitás dominálja a törési szívósságot, a H/E és H^3/E^2 arányok jó közelítést adhatnak a bevonatok törési szívósságának rangsorolásához. [25]



11. ábra: H/E és H^3/E^2 a keménység (GPa) függvényében [25]

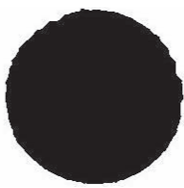
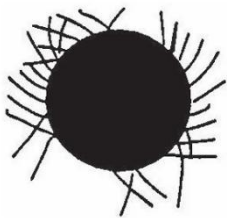
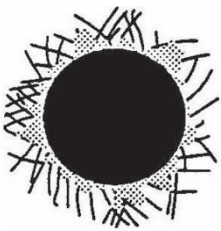
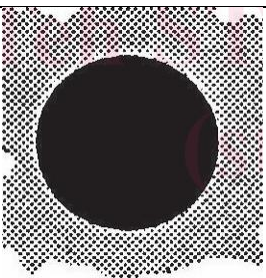
5.3.3 Adhéziós vizsgálat

Az adhéziós vizsgálatokat Lynx Moto motorikus Rockwell keménységmérővel mérjük. Próbatessztjeinket szabványos ISO 26443:2023-as [26] adhéziós vizsgálatnak vetettük alá. A szabvány meghatározza, hogy legfeljebb 20 μm vastag kerámia bevonatok tapadásának minőségi értékelésére lett kiállítva, Rockwell keménységmérés során használt gyémánt nyomófejjel történő benyomás segítségével. A benyomás utáni repedések megjelenése jelezheti számunkra az adhéziós hibákat. A mintákat síkra párhuzamosan kell előkészíteni és/vagy szintezni a benyomás előtt. A bevonat/hordozó kombinációjától függően megfelelő terhelési tartományt kell kiválasztani és az alábbi szabályokat be kell tartani:

- 54 HRC-nél keményebb fém hordozók esetén 1471,5 N terhelést kell alkalmazni (Rockwell C skála);

- 54 HRC-nél lágyabb fém hordozók és közepesen keményített acél hordozók esetén 981 N terhelést kell alkalmazni (Rockwell D skála);
- minden egyéb hordozó esetén, például sekélyen edzett acél, vékony hordozók, cementált karbidok, szilárd kerámiák és cermetek esetében 588,6 N terhelést kell alkalmazni (Rockwell A skála).

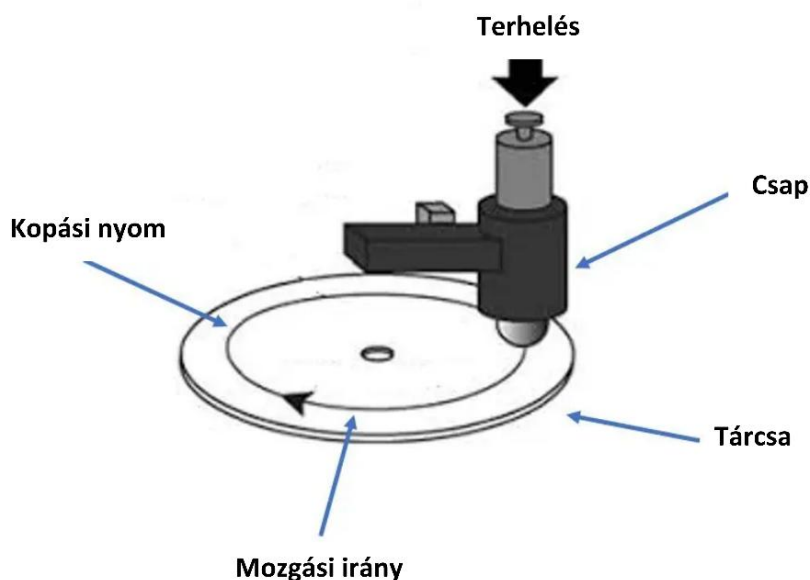
A szabvány a 4 osztályba sorolja be a lenyomatokat, melyek jelentését a következő táblázat szemlélteti:

Osztályozás	Jellemző kép	Megfigyelés
Class 0		Nincs repedés és nincs adhéziós leválás.
Class 1		Van repedés, de nincs adhéziós leválás a bevonaton.
Class 2		Részleges adhéziós leválás, repedéssel vagy anélkül. Adhéziós leválás az, amikor a bevonat eltávolításával az alatta lévő hordozó tisztán láthatóvá válik, vagy amikor egy többrétegű bevonat egy vagy több rétege eltávolításra kerül, ezáltal a hordozó vagy egy alréteg jól elkülöníthető.
Class 3		Teljes adhéziós leválás.

4. táblázat: ISO 26443:2023-as szabvány értékelési rendszere [26]

5.3.4 Tribológia

A tribológiai méréseket Anton Paar TRB³ készülékkel végezzük el. A tribológiai vizsgálat során az úgynevezett Pin-on-Disk tribométert (12. ábra) használtuk, amely egy álló csapból és egy forgó tárcsából áll. A vizsgálat során egy állandó súly terhelte a gömbölyű csapot. A módszert különböző anyagok összehasonlítására vagy felületkezelések kopásállóságának tesztelésére használjuk. [28] A berendezést a következő kép szemlélteti:



12. ábra: Pin-on-Disk tribométer sematikus ábrája [28]

Jelen kutatás során a tribológiai vizsgálatnál kétféle mérést végeztünk, egyet az ASTM G99-es szabványnak [29] megfelelően és egy nem szabványosat. Előbbi mérési elrendezésnek a paramétereit az alábbi táblázat tartalmazza:

Megnevezés	Érték	Mértékegység
Terhelő erő	10	N
Koptatási sebesség	0,1	m/s
Koptatási távolság	1000	m
Csapvég átmérő (gömb)	10	mm
Környezeti hőmérséklet	23	°C
Páratartalom	12-78	%RH
A koptatási kör átmérője	25-35	mm

5. táblázat: Mérési paraméterek [ASTMG99] [29]

Ezen értékektől csupán egy helyen, de el kellett térnünk, ugyanis a koptatást végző fel egy 6 milliméter átmérőjű SiC csapágygolyó volt.

Mindezzel szemben a nem szabványos mérési elrendezésnél az összes mérési paramétert megváltoztattuk az alábbiak szerint:

Megnevezés	Érték	Mértékegység
Terhelő erő	15	N
Koptatási sebesség	0,2	m/s
Koptatási távolság	250	m
Csapvég átmérő (gömb)	6	mm
Környezeti hőmérséklet	23	°C
Páratartalom	12-78	%RH
A koptatási kör átmérője	12	mm

6. táblázat: Nem szabványos mérési paraméterek

Továbbá megnöveltük a mintavételezés gyakoriságát is, hogy a kezdeti állandósult állapotról részletesebb adatokkal rendelkezünk.

A tribológiai vizsgálat előtt mintáink szabványosan tisztítva lettek az esetleges szennyező anyagokat eltüntetve a felületről.

5.3.5 Metallográfia

A metallográfiai vizsgálatokat Olympus Pmg3 készülékkel hajtjuk végre. A metallográfiai vizsgálat során dópolt, vagyis az anyaggal való szándékosan szilíciummal szennyezett, és nem dópolt bevonatokat hasonlítottunk össze. Célunk az, hogy megvizsgáljuk a kétféle bevonat kopásállósági és mechanikai tulajdonságait. Ez az elemzés azért is fontos lehet, mert az ipari alkalmazásokban a bevonatok élettartama és kopásállósága központi szerepet játszik.

Mikroszkópi vizsgálatok során tanulmányozni lehet a felületi kitörések, repedések és egyéb sérülések megjelenését, milyenségét. A bevonatok felszínét karcos tesztelésnek is alá tudjuk vetni, amely során a bevonat mechanikai ellenállását is vizsgálni tudjuk. Kopási mintázatok elemzésével pedig az esetleges felületi deformációkat és bevonatelválást tudjuk megfigyelni.

A dópolt és nem dópolt bevonatok összehasonlítása segít meghatározni azt, hogy a szilíciummal való szennyezés milyen mértékben képes hozzájárulni a bevonatok élettartamának és mechanikai tulajdonságainak javításához.

5.3.6 Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)

A pásztázó elektronmikroszkópi méréseket Ziess EVO MA 10-zel készítjük el. A pásztázó elektronmikroszkóp alapelve szerint egy elektronágyúval vékony elektronnyalábot állítunk elő és ezáltal pásztázni tudjuk a minta felszínét, az anyag szerkezetét. A próbatesteken azon részeket vizsgáljuk meg, amely a metallográfiai képeken nem voltak láthatóak vagy beazonosíthatóak a kisebb nagyítás miatt.

5.3.7 Energiadisziperzív spektrométer (EDS)

Az EDS vizsgálatokat EDAX típusú EDS detektoron mérjük. Az energiadisziperzív spektrométer egy anyag elemeinek elemzésére szolgáló eszköz, amely rögzíteni tudja az összes röntgenspektrumot és méri a röntgensugár intenzitását. Az EDS vizsgálat során az ASTGM99 szabvány alapján koptatott, illetve nem szabványos koptatási területeket használtunk.

A vizsgálat során a próbatesteken a koptatott területeken és a sértetlen felületeken területeket és pontokat jelöltünk ki, amelyek mentén részletes elemzést végeztünk. Célunk, hogy adott helyeken jelen lévő kémiai összetétel meghatározzuk és összehasonlítsuk egymással. A mérések során figyelembe vettük az egyes elemek mennyiségi eloszlását, amely lehetőséget adott a próbatest felületi homogenitásának, valamint az egyes komponensek térbeli eloszlásának vizsgálatára is. Így a kapott eredmények szerint következtetéseket tudunk levonni az anyag szerkezetére és tulajdonságaira vonatkozóan.

5.3.8 Profilmérés

A profilméréseket Mitutoyo SurfTest SJ-401 műszeren végezzük el. A profilmérés során a tribológiai mérés során képződött kopási árkok profilját és a darabok felületérdességet szeretnénk kimérni. Az eredmények segítségével pontosabb képet kaphatunk, hogy miként viselkedtek és hogyan változtak meg a tribológiai mérések hatására.

Az így kapott adatokból grafikusan ábrázolhatjuk a felszín magasságának változását, amit profilgörbének nevezünk. Ez a profilgörbe megmutatja, hogy milyen a felület érdessége, illetve megfigyelhetőek lesznek majd a tribológiai mérés során készült koptatási árkok.

6 EREDMÉNYEK

6.1.1 Szemrevételezés (gyártás sikerességének vizsgálata)



13. ábra: Kutatás során vizsgált próbatestek

A fenti képen a vizsgált próbatestek láthatóak, rendre (balról-jobbra): „AA”, „BB”, „BA”, „AB”. A felső sorban a C45-ös, az alsó sorban a 316-os minták találhatók. Az „AB” mintákon a „B” réteg nem megfelelően borította be a próbatesteket, amely a kép jobb oldalán látható hólyagosodás és foltosság jelez. Ennek oka, hogy az A rétegre a „B” réteg nem megfelelően tapad, annak ellenére, hogy fordított felállásban nem tapasztaltunk semmilyen hibát.

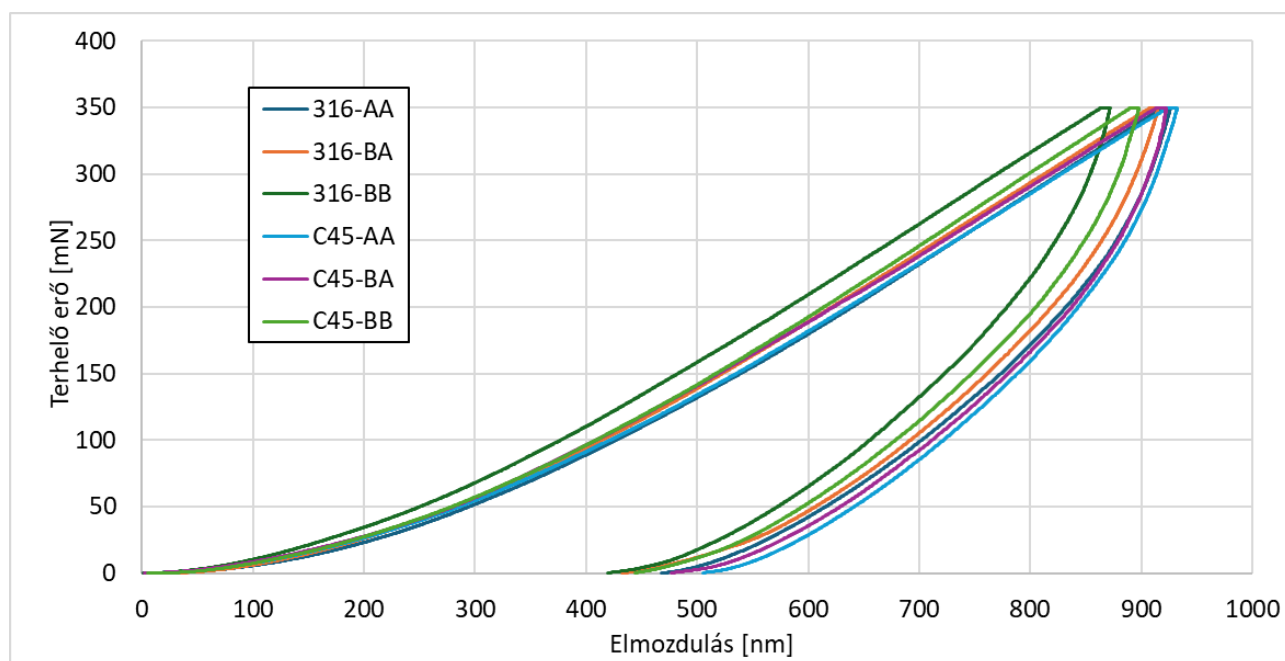
A nem megfelelő tapadást azzal magyarázzuk, hogy szennyeződés kerülhetett a C45-AB mintára, illetve a 316-AB mintán annyira vékony lett a bevonat, hogy nem alakult ki az a kékszürkés szín, mint a „BB” mintákon, továbbá, ezen a mintán is láthatóak leválások, ahol egyáltalán nem tapadt meg a „B” réteg. Végezetül fontos megemlíteni, hogy az „A” réteg nem homogén a keresztmetszet mentén, ugyanis a réteg alja és a réteg felső részénél, így az is közrejátszhatott, hogy a „B” réteg csak az „A” réteg felső rétegével kompatibilis, az alsó rétegével viszont kémiaiilag összeférhetetlen.

A kutatás későbbi szakaszán ezeket a sikertelenül gyártott mintákat csak adhéziós vizsgálatnak vetettük alá.

6.1.2 Nano-keménységmérés

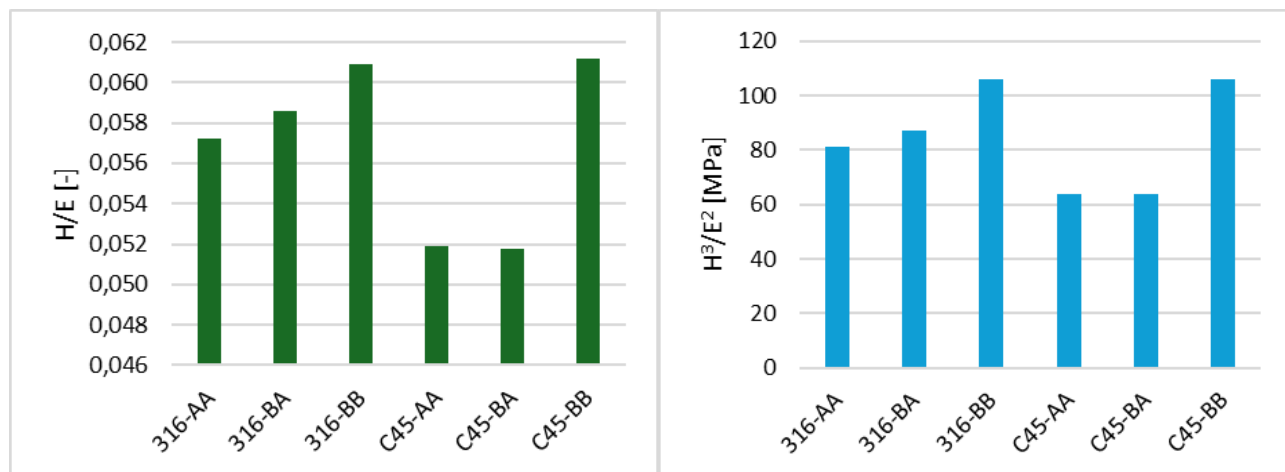
A nano-keménységmérés során precíziós, Berkovics-fej nyomtunk bele az anyag felületébe, miközben a mélységét és az alkalmazott erőt folyamatosan mértük.

A következő diagram tartalmazza a mintákra vonatkozó keménységet, rugalmassági modulusokat, kúszásokat, rugalmas munkát, képlékeny munkát, teljes munkát. Ez az úgynevezett tülökdiagram egy erő-út diagram, az adott terelő erőhöz tartozó maximális elmozdulás alapján számol keménységet. A rugalmassági modulus a leterhelési görbének a meredeksége adja meg. A görbe által bekerített terület az a rugalmas munkát, a görbe alatti terület a képlékeny munkát mutatja meg számunkra. Ezen két munka összessége adja ki a teljes munkát, amely a görbe alatti összes területtel egyezik meg. Megfigyelhető még 350 mN-on mélyebbre csúszik az elmozdulás, ez a kúszása az anyagnak.



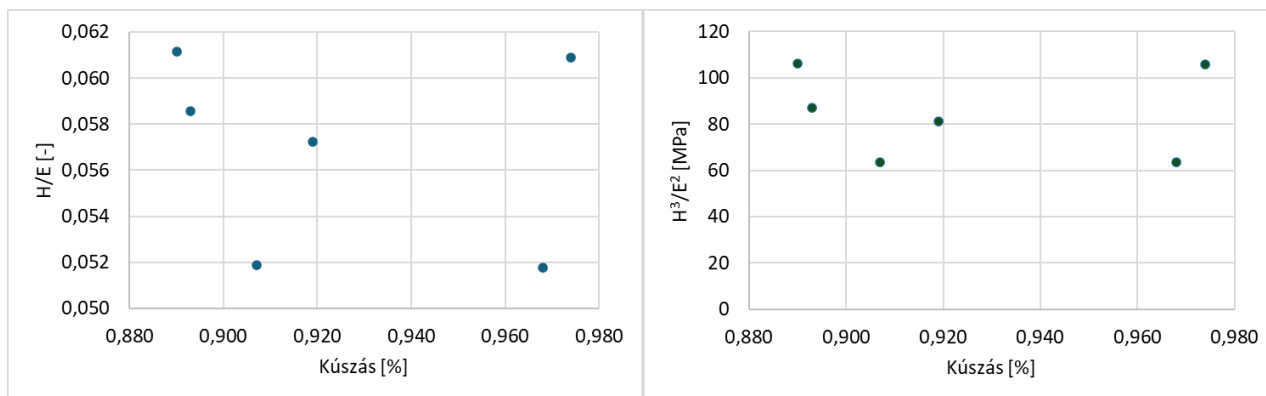
14. ábra: Terhelő erő [mN] az elmozdulás [nm] függvényében

A tülökdiagram különböző elemeit egyesével is szemléltetjük:

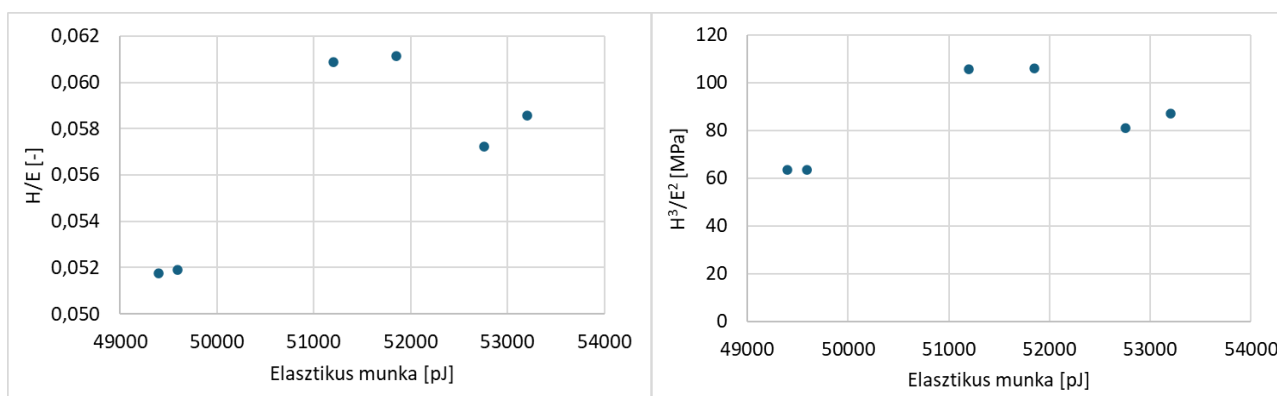


15. ábra: A H/E (balra) és H^3/E^2 (jobbra) arányok az egyes minták esetében

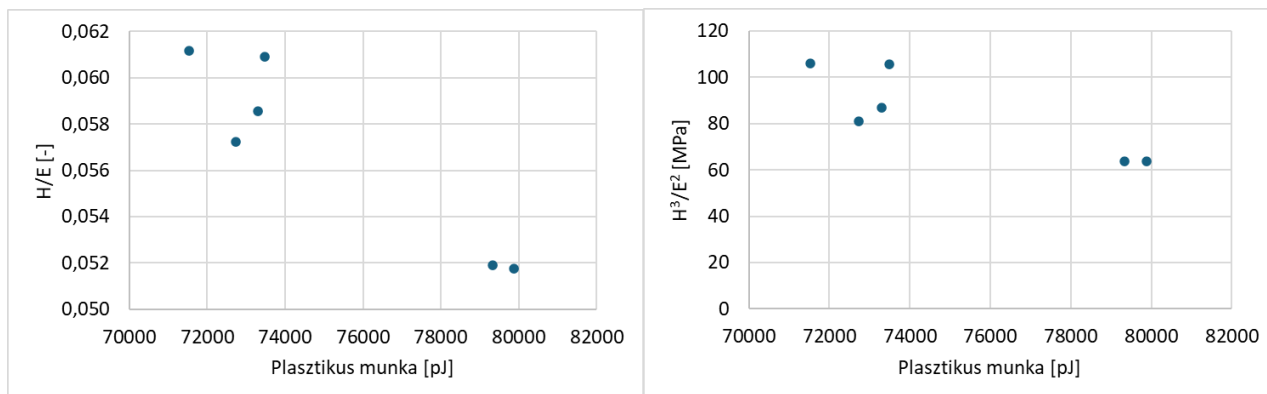
A kúszás egységes terhelő erővel lett végezve (350 mN) a nano-keménységmérés részeként:



16. ábra: A H/E (balra) és H^3/E^2 (jobbra) arányok a kúszás [%] függvényében

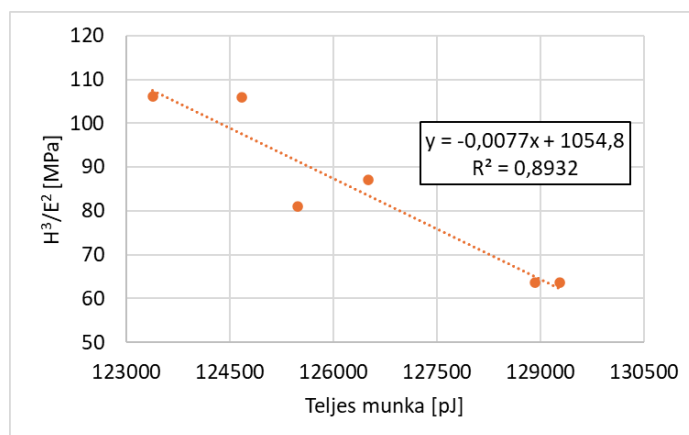


17. ábra: A H/E (balra) és H^3/E^2 (jobbra) arányok az elasztikus munka [pJ] függvényében

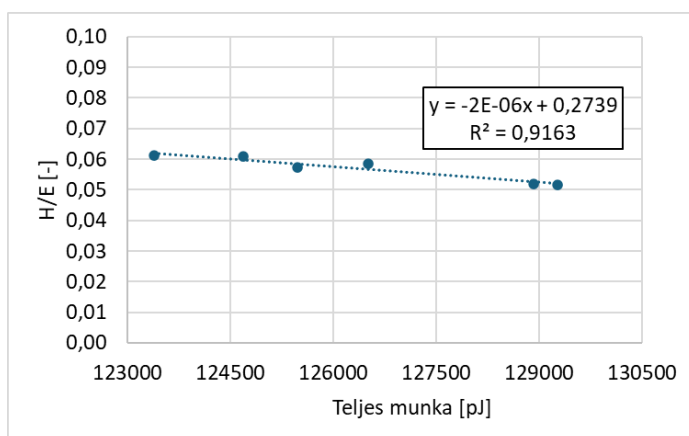


18. ábra: A H/E (balra) és H^3/E^2 (jobbra) arányok a plasztikus munka [pJ] függvényében

A képlékeny és az elasztikus munka összegeként megkapjuk a teljes munkát. A teljes munkát szintén H/E és H^3/E^2 függvényében ábrázolva kirajzolódik a mennyiségek közötti összefüggés:



19. ábra: A teljes munka [pJ] és a plasztikus deformációval [MPa] szembeni ellenállás diagramja



20. ábra: A teljes munka [pJ] és az elasztikus törési nyúlás [-] diagramja

Az elasztikus törési nyúlás (H/E) és a plasztikus deformációval szembeni ellenállás (H^3/E^2) alapján 3 csoportba sorolhatjuk a mintáinkat az alábbi párosítással:

Csoportszám	Minta		H/E [-]	H^3/E^2 [MPa]
1.	316-BB	C45-BB	~ 0,061	~ 106
2.	316-AA	316-BA	~ 0,057-0,058	~ 81-87
3.	C45-AA	C45-BA	~ 0,052	~ 63,6

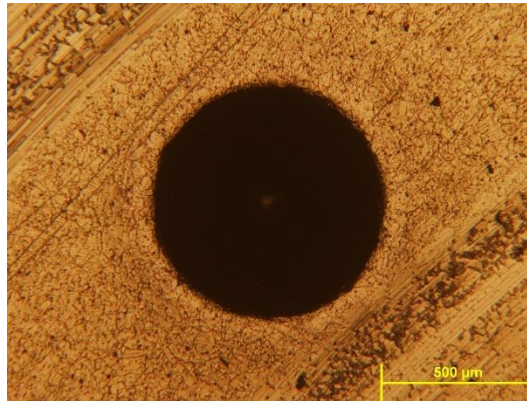
7. táblázat: H/E és H^3/E^2 alapján való csoportosítása a mintáinknak

Továbbá fontos kiemelni, hogy a darabokon keménységi értékek elmaradnak a gyártói adatlapokon foglaltaknak, miszerint az „A” réteg esetében 3500 ± 500 HV [23], míg a „B” réteg esetében 3200 ± 300 HV [24] lenne az ideális keménység, azonban saját méréseink szerint a legnagyobb mért keménységünk 2643 HV (és a legalacsonyabb 2188 HV) volt. Ez nem egy gyártási hiba, hanem a gyártó az úgynevezett szubsztrát keménységet adta meg, amely során az adott rétegbe a mérőfej maximum a 10%-áig hatol be. Azonban a mi esetünkben a behatolási mélység ennél nagyobb volt ($\sim 0,9 \mu\text{m}$), így a mi mérésünk a kompozit keménységet adja meg. Vagyis nem csak a első PVD réteget keménységét mértük meg, hanem az alatta lévőét, a nitridált réteget és még az alapfémbe is belemértünk.

6.1.3 Adhéziós vizsgálat

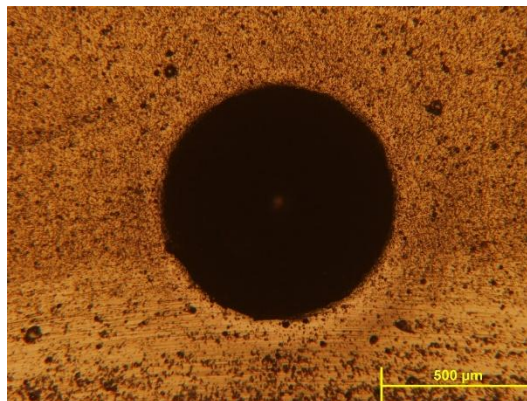
Az ISO 26443:2023-as [26] szabvány által meghatározott ábrákkal való összevetés után a próbatestjeinket a következők szerint osztályoztuk:

- A 316-AA próbatestünk mikroszkópi képén nem látszódik leválás, csakis kismértékű repedések, így a Class 0-ba soroltuk.



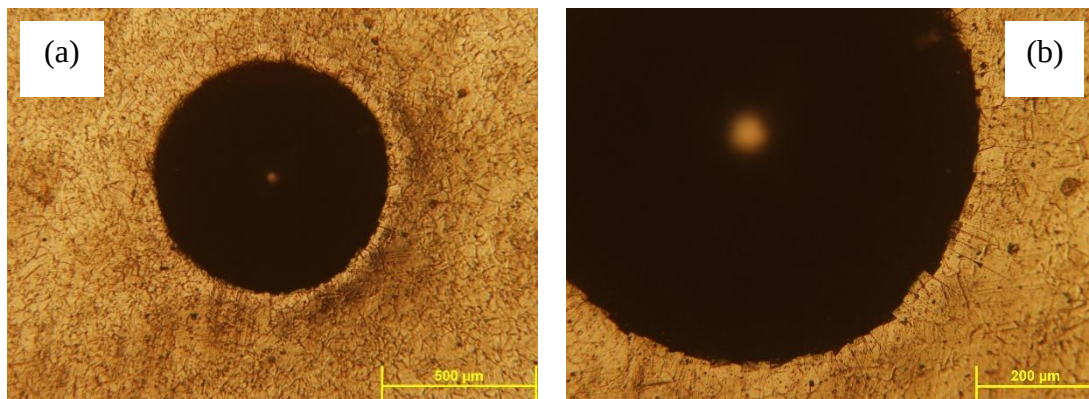
21. ábra: 316-AA próbatest mikroszkópi képe

- A 316-BA próbatest szebb képet mutat, mint az előző, itt kismértékű repedések és leválások se láthatóak, ezért Class 0-ba soroltuk.



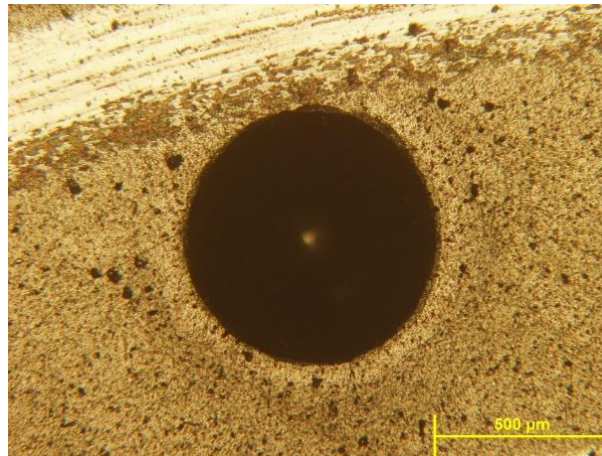
22. ábra: 316-BA próbatest mikroszkópi képe

- A 316-AB mintánk már érdekesebb képet mutat, mivel erőteljesen látszódnak repedések és részleges adhéziós leválások is, ezért a Class 2-be soroltuk.



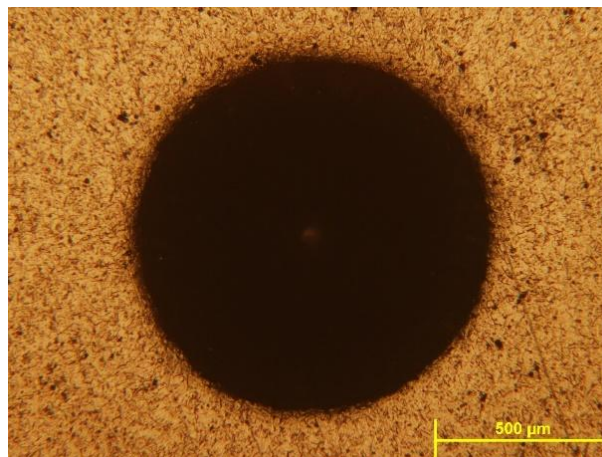
23. ábra: 316-AB próbatest mikroszkópi képei

- A 316-BB próbatestünkönél is elmondható, hogy nem látható rajta repedés, illetve leválasztódás, ezért ezt is a Class 0-ba soroljuk.



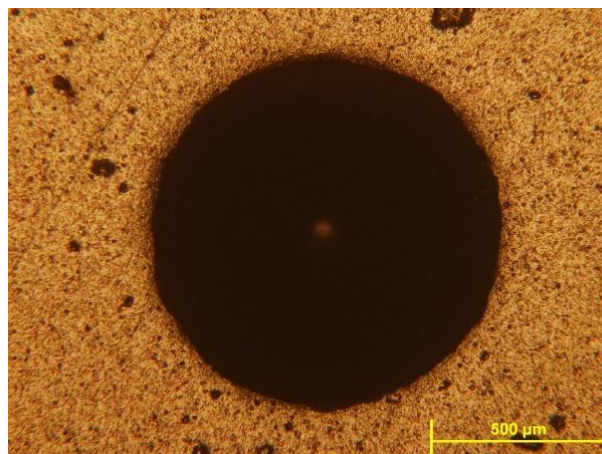
24. ábra: 316-BB próbatest mikroszkópi képe

- C45-AA próbatestünket a Class 0-ba soroltuk, mivel kismértékű repedések látszódnak a képen.



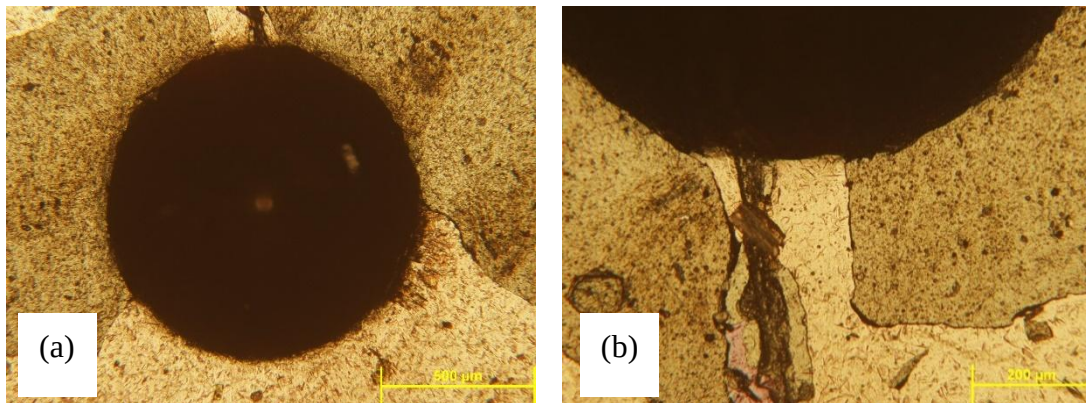
25. ábra: C45-AA próbatest mikroszkópi képe

- A C45-BA próbatesten nem látszódik repedés vagy leválás, ezért Class 0-ba soroljuk.



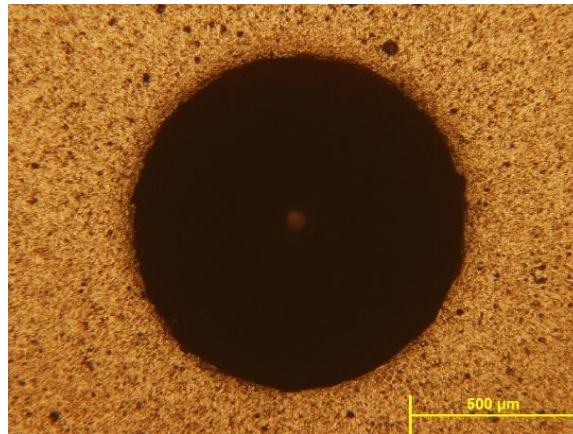
26. ábra: C45-BA próbatest mikroszkópi képe

- A C45-AB próbatestnél is megfigyelhetünk erőteljes repedéseket és leválásokat, így a Class 3-ba soroltuk.



27. ábra: C45-AB próbatest mikroszkópi képei, 500 µm (a), 200 µm (b)

- A C45-BB próbatestnél sem tapasztalunk leválást vagy repedést, így Class 0-ba soroljuk.



28. ábra: C45-BB próbatest mikroszkópi képe

Összességében a próbatestjeinken tett adhéziós vizsgálatok alapján azt mondható el, hogy nagymértékű repedéseket, leválásokat nem tapasztaltunk az C45 és 316 próbatestek AA, BB, BA esetekben, a felület ellenállt a Rockwell keménységmérővel tett “roncsolásnak”, viszont az AB bevonatolásnál adhéziós leválásokat, repedéseket is tapasztaltunk, vagyis ezen méréssel is megerősítésre került, hogy nem megfelelő a bevonat ezeken a darabokon.

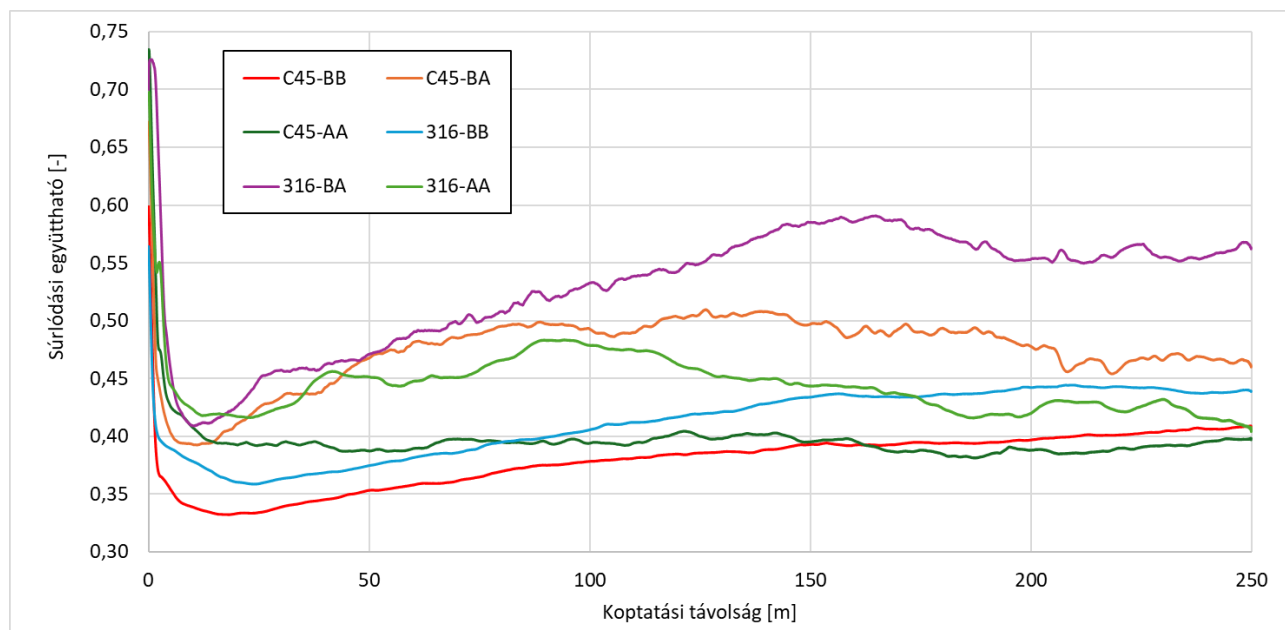
A bevonatok H/E és H^3/E^2 arányai nem gyakorolnak szignifikáns hatást a bevonatok adhéziós osztályaira e szabvány keretein belül.

6.1.4 Tribológia

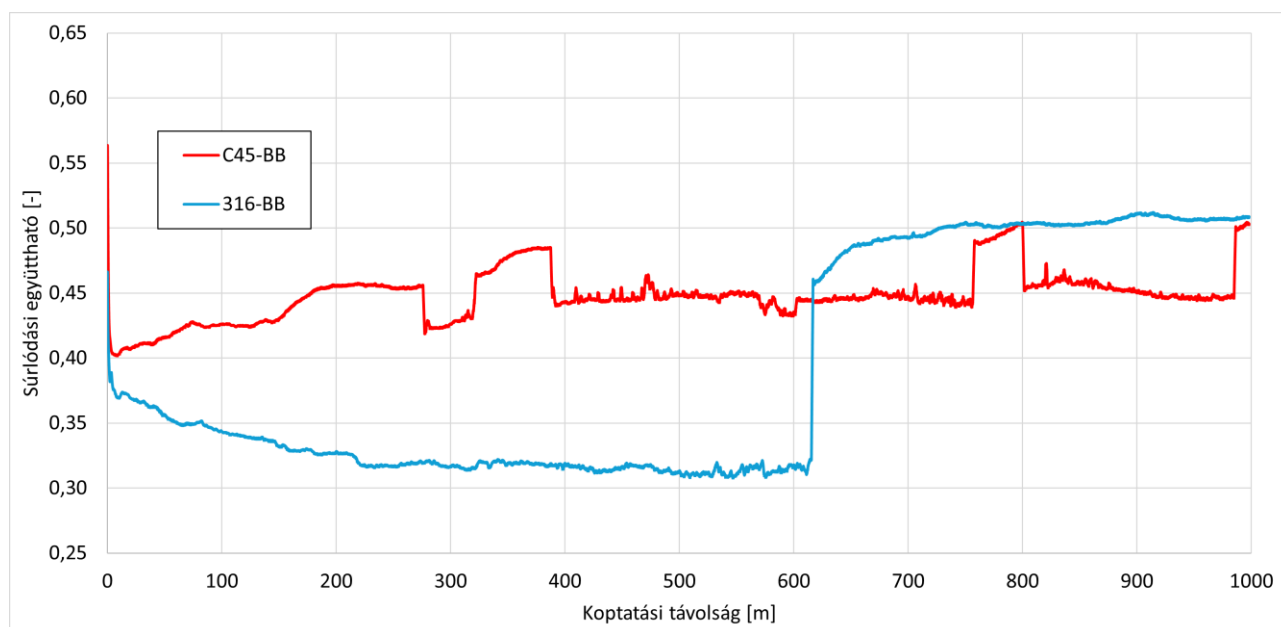
A szabványos mérés 2 óra 47 perc alatt zajlott le, és ezen idő alatt megközelítőleg 70 400 mérési pontot vettünk fel minden minta esetében, míg a meggyorsított szabványos minták esetében 16 perc 45 másodperc alatt hozzávetőlegesen 125 000 mérési pontot vettünk fel minden próbatest esetében.

A méréseket két jól elkülönülő szakaszra tudjuk bontani, a bekopási szakaszra és az állandósult szakaszra.

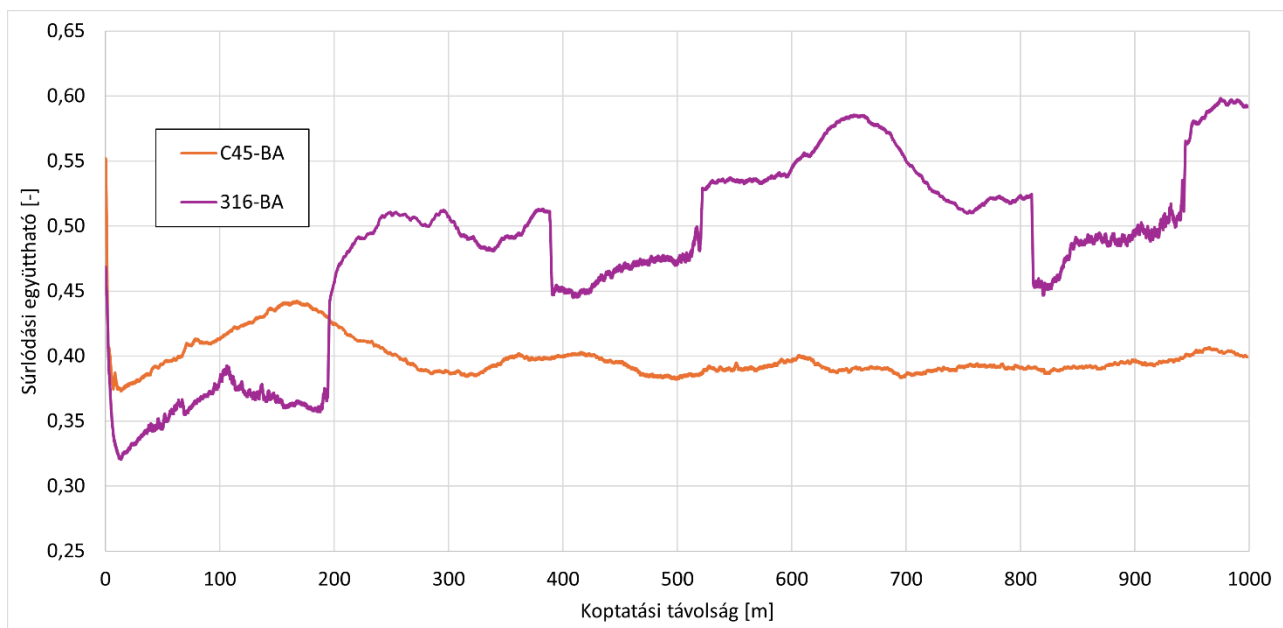
A mért értékeket az alábbi súrlódási együttható-koptatási távolság diagramokon foglaltuk össze:



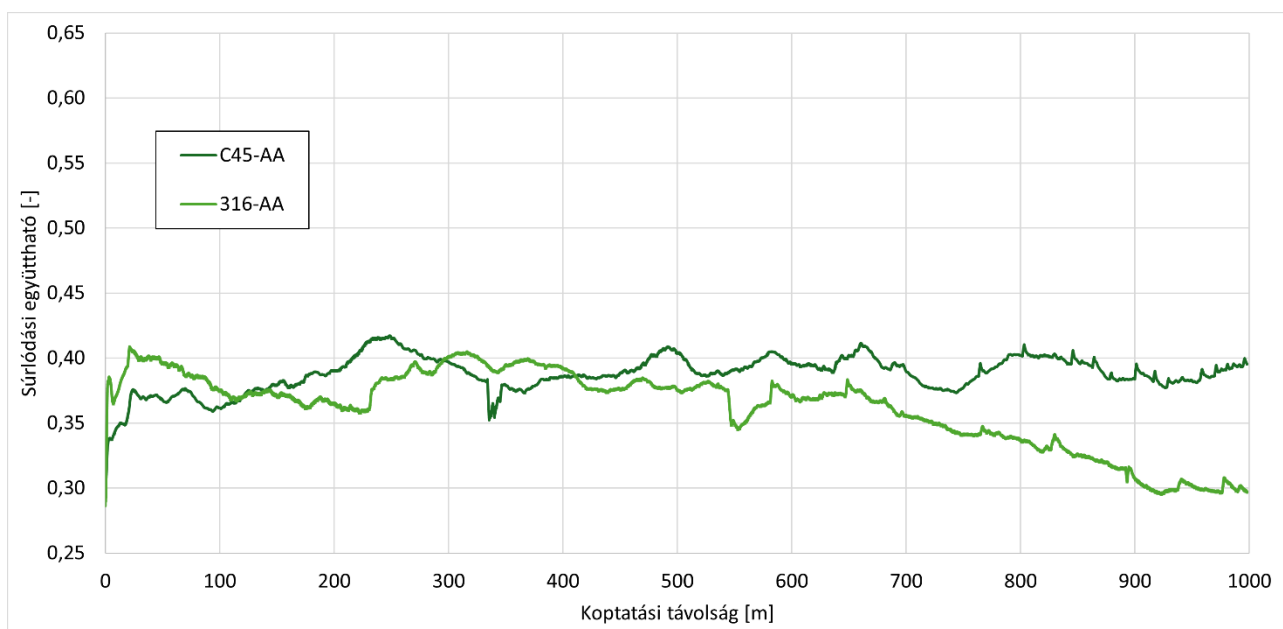
29. ábra: Súrlódási együttható [-] a koptatási távolság [m] függvényében, 6 próbatestet összehasonlítva



30. ábra: Súrlódási együttható [-] a koptatási távolság [m] függvényében a C45-BB és 316-BB próbatesteket összehasonlítva



31. ábra: Súrlódási együttható [-] a koptatási távolság [m] függvényében C45-BA és 316-BA próbatestekre nézve



32. ábra: Súrlódási együttható [-] a koptatási távolság [m] függvényében C45-AA és 316-AA próbatesteket összehasonlítva

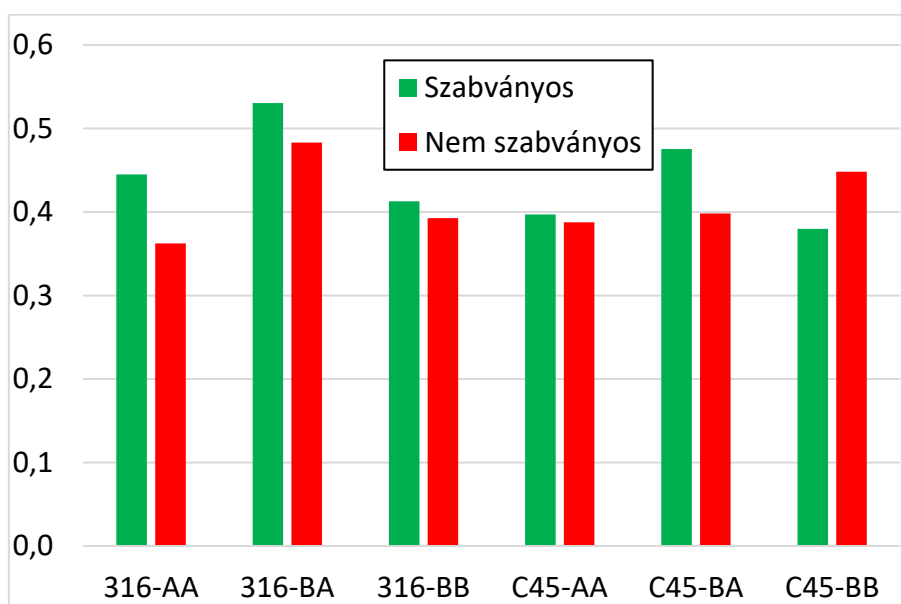
A nem szabványos vizsgálatokon stabilnak mutatkoznak a tribológiai görbék, vagyis a súrlódási együtthatót alacsony hibával tudtuk megállapítani.

A szabványos méréseken megfigyelhetünk megszakadásokat, letöréseket, hullámlásokat. Ezeket a felületeken számos különböző tönkremenetel magyarázza. A SEM méréseink során számos tönkremenetellel találkoztunk, mint mikrorepedések, letörések, fáradás, delamináció és felületi oxidképződés.

Az ábrák egy részén megfigyelhető, hogy a súrlódási együttható a teszt elején magas értéket mutat, majd a teszt előrehaladtával fokozatosan csökken, egyes esetekben újra növekedésnek indul a bevonat típusától függően. Ez a viselkedés tipikus a koptatási mérések során és a bejáratási jelenségnek tulajdonítható. A bejáratás alatt a felszín topográfiája átalakul, kémiai reakciók zajlanak le, amíg a rendszer el nem éri az állandósult állapotot. A további görbéken is ezért a bevonattípus szerinti csoportosítás mellett döntöttünk az ábrázolás tekintetében, mert habár nem mindig azonos jelleget mutatnak az eltérő acélminőségeken, mégis párhuzamot lehet vonni közöttük.

A görbéken látható felugrások az adott réteg átszakítását, míg a leesését a bejáratott felszín okozza.

A méréseink végeredménye, hogy az állandósult szakaszok kiátlagolásával megállapítottuk az átlagos súrlódási együtthatókat, amelyeket az alábbi diagramban foglaltunk össze az átláthatóság kedvéért:

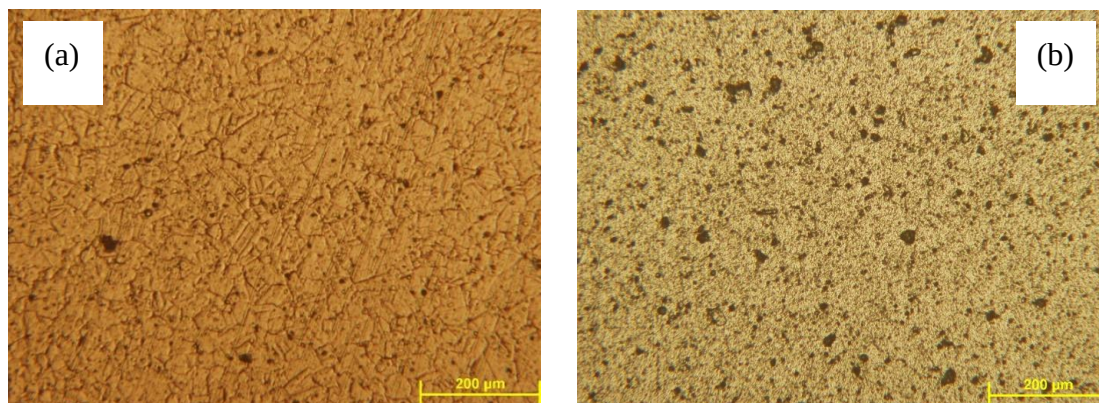


33. ábra: Átlagos súrlódási tényezők [-] szabványos és nem szabványos vizsgálattal mérve

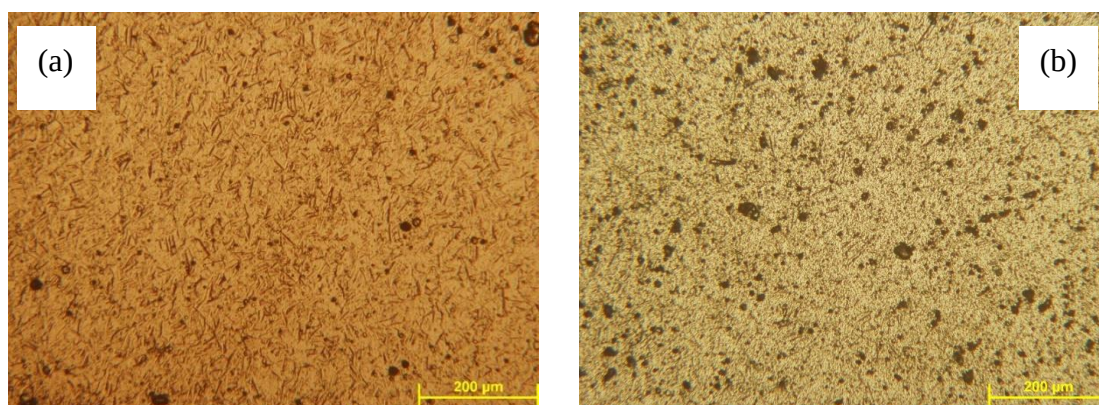
6.1.5 Metallográfia

A tribológiai méréseket követően a mikroszkóp alatt vizsgáltuk a mintadarabok felszínét, a koptatási zónákban és azok környezetében is.

Habár keramikus bevonatokat használtunk mégis az figyelhető meg, hogy fémes szövetszerkezetekre hasonlító mintázatok jelentek meg - például ikersíkok -, az AA és a BB mintákon (34-35. ábrák).



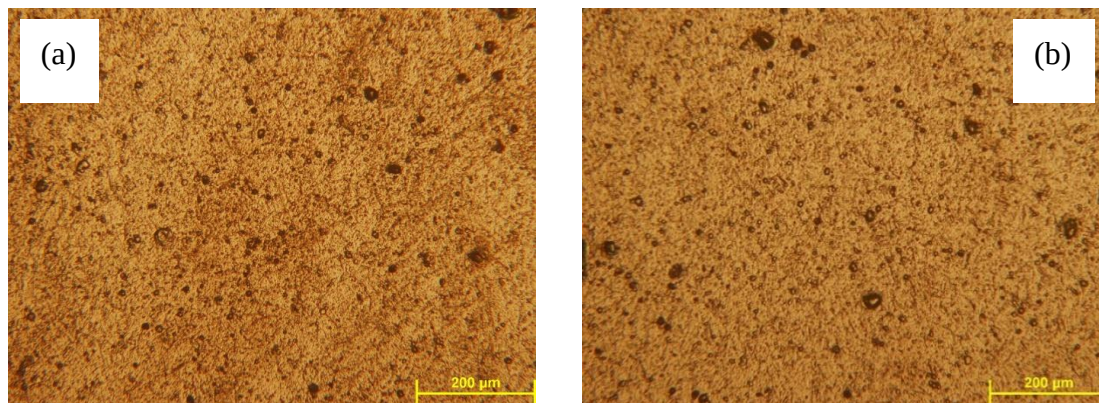
34. ábra: 316-AA (a) és 316-BB (b) próbatestek mikroszkópi képei



35. ábra: C45-AA (a) és C45-BB próbatestek mikroszkópi képei

A jelenség oka viszont nagyon egyszerűen magyarázható. A gőz állapotban a felszínre juttatott kerámia részecskék, könnyebben csapódnak le (kondenzálódnak) a szemcséken, minthogy a szemcsehatárokon, így ahogy létrejön a felszínen a szilárd keramikus réteg az felveszi az alatta lévő fémnek a mintázatát. Ezt a felvett mintát az oszloposan növekedő kerámia szemcsék határai azonosak lesznek az alatta lévő réteggel, így a bevonat tetején is ki fog rajzolódni ez a mintázat. A második réteg esetében meg az azonos anyagú bevonat is a nagyobb szemcséken fognak először lecsapódni, ezzel tovább örökítve a mintázatot.

Mindazonáltal a BA minták esetén már nem figyelhető meg ez (36. ábra), mert a második PVD réteg már egy kémiaiailag homogénebb felülettel találkozott, így ott a keramikus réteg sokkal egységesebben alakult ki.

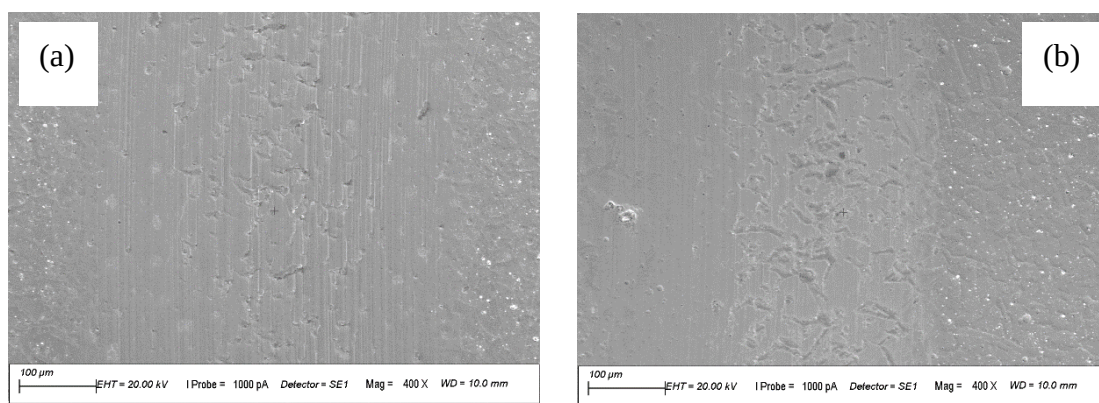


36. ábra: 316-BA (a) és C45-BA (b) próbatestek mikroszkópi képei

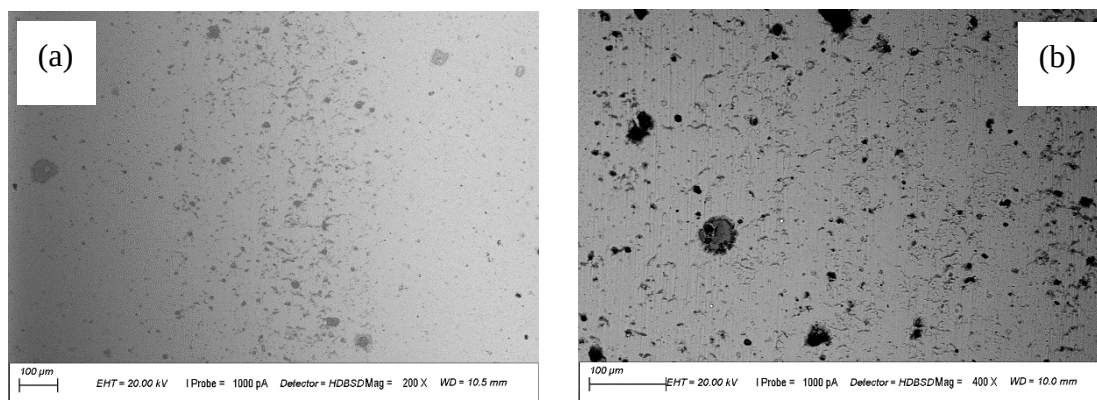
A koptatott területeken láthatóak a koptatási iránnyal megegyező karcolások, melyek a felszínből kitört részecskének a nyomai. Ezek a kitört darabok a bizonyítékok a tribológiai mérés során látható ingadozásra, mert ezeken a kitört darabokon a koptató golyó megcsúszott, ezzel a pillanatnyi súrlódási együtthatót csökkentve.

6.1.6 Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)

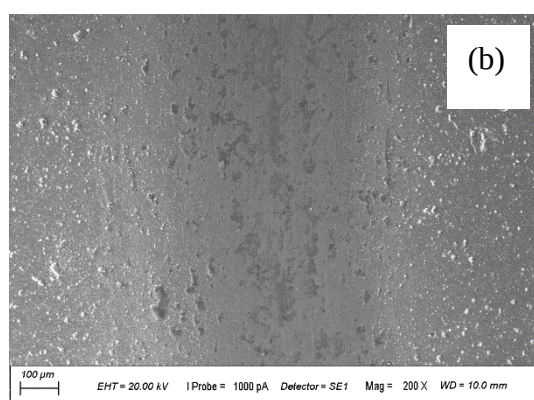
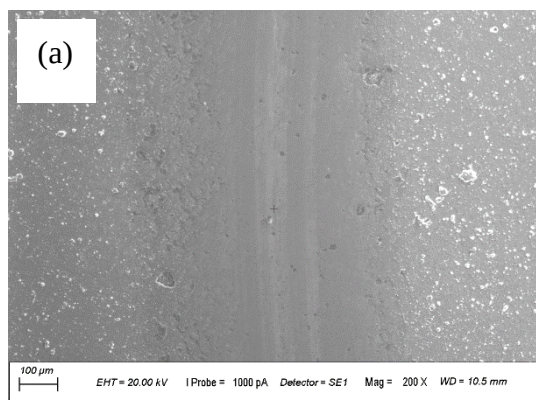
A pásztázó elektronmikroszkópi (SEM) képeknél összehasonlítást alkalmazunk a szabványos (ASTMG99), illetve nem szabványos eljárások között.



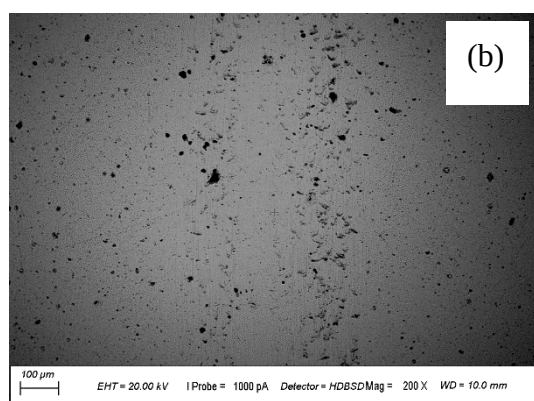
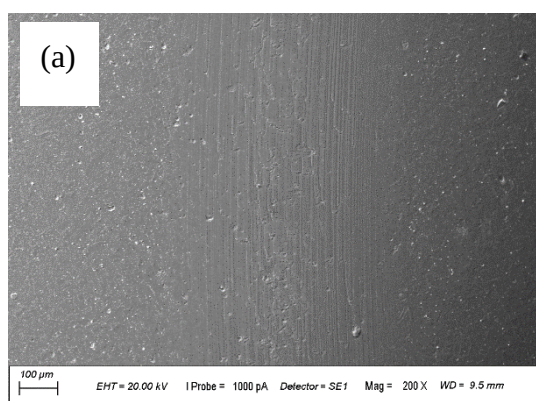
37. ábra: 316-AA próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata



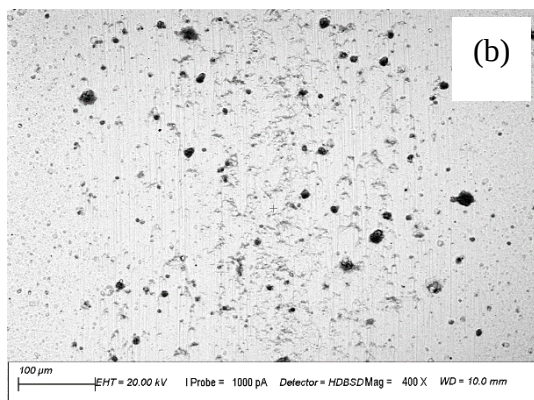
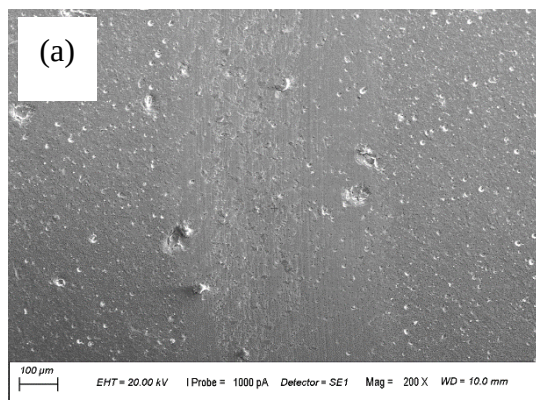
38. ábra: 316-BA próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata



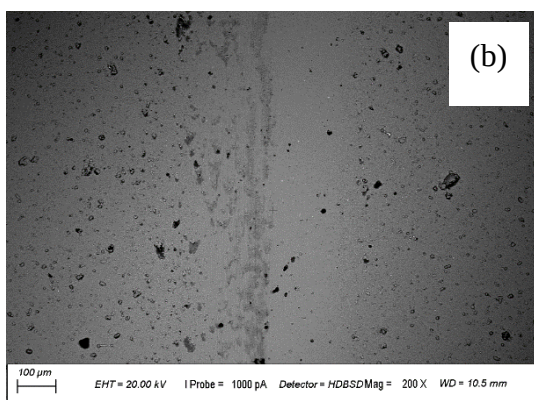
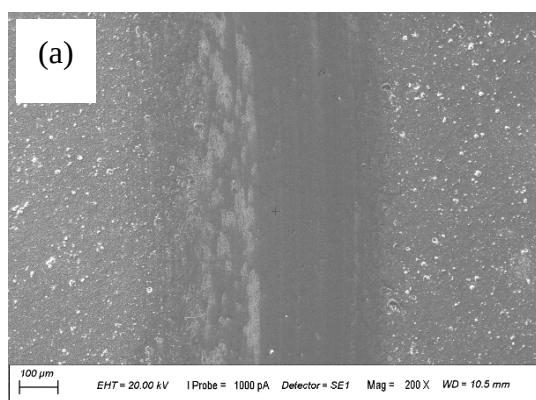
39. ábra: 316-BB próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata



40. ábra: C45-AA próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata



41. ábra: C45-BA próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata



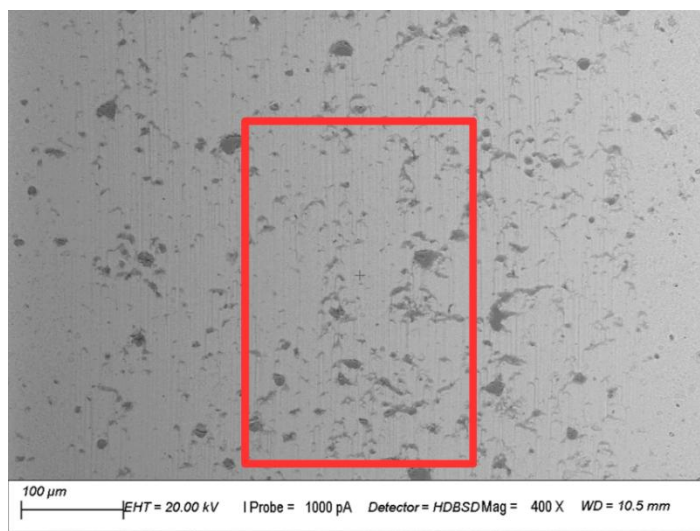
42. ábra: C45-BB próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata

6.1.7 Energiadisziperzív spektrométer (EDS)

A gyártó által megadott bevonat összetételét kimértük, ezáltal igazolni tudtuk a megfelelő elemek jelenlétét. Illetve a pontos arányokat is fel tudtuk tártani, amely az azonos PVD rétegeken állandó volt.

Az energiadisziperzív spektrométeres vizsgálatot elvégezve a legérdekesebb és legjellegzetesebb mérési eredményeket mutatjuk be. A mérések során több jelenség is megfigyelhető volt, mint például az oxidáció és felületi kitörések kialakulása.

316-AA EDS vizsgálata során felületi kifáradásokat vizsgáltuk meg.

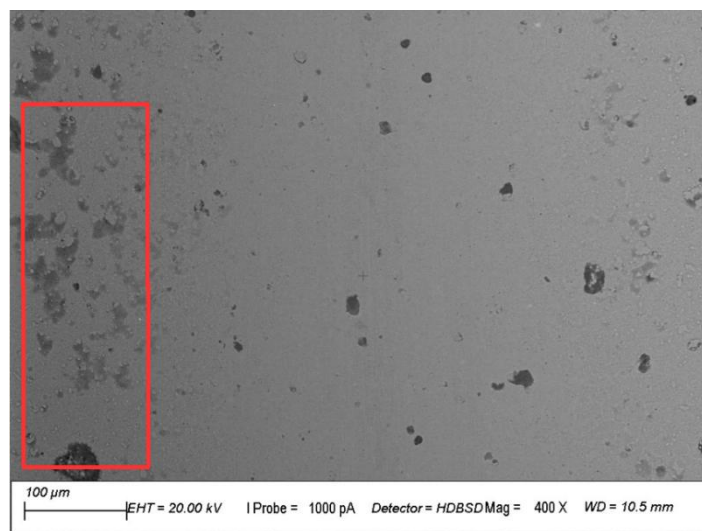


43. ábra: 316-AA mikroszkópi ábrája a vizsgált terület jelölésével

Elem	Tömeg%	Atom%	Net Int.	Hiba%	K-arány	Z	A	F
C	6,6	16,6	104,1	9,8	0,0337	1,2265	0,4149	1,0000
N	16,2	34,8	351,8	8,5	0,0758	1,2012	0,3908	1,0000
Ti	77,2	48,6	3615,8	1,6	0,7247	0,9296	1,0084	1,0010

8. táblázat: 316-AA felszíni anyagi összetétel

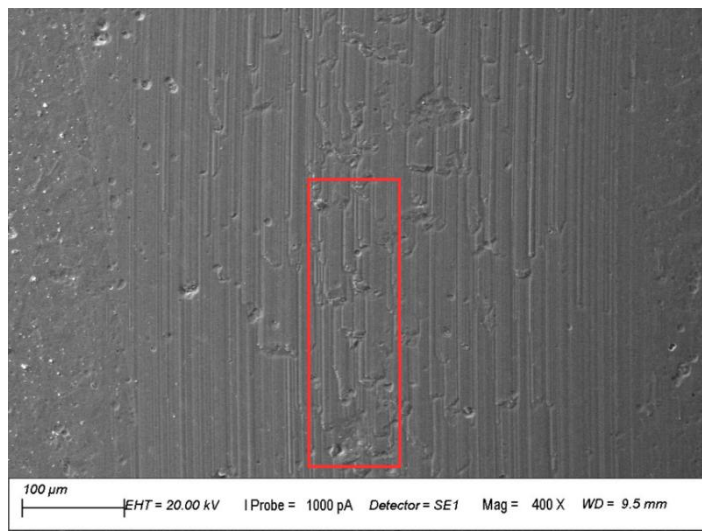
A 316-BB és C45-BA próbatestek vizsgálatánál felületi kitöréseket találtunk.



44. ábra: 316-BB mikroszkópi ábrája a vizsgált terület jelölésével

Elem	Tömeg%	Atom%	Net Int.	Hiba%	K-arány	Z	A	F
N	29,1	49,4	412,0	9,3	0,0916	1,1316	0,2785	1,0000
O	3,1	4,6	45,8	16,6	0,0062	1,1097	0,1808	1,0000
Al	35,1	31,0	2274,7	5,2	0,2184	0,9912	0,6261	1,0014
Cr	32,7	15,0	1065,3	2,1	0,2843	0,8618	0,9990	1,0098

9. táblázat: 316-BB felszíni anyagi összetétel

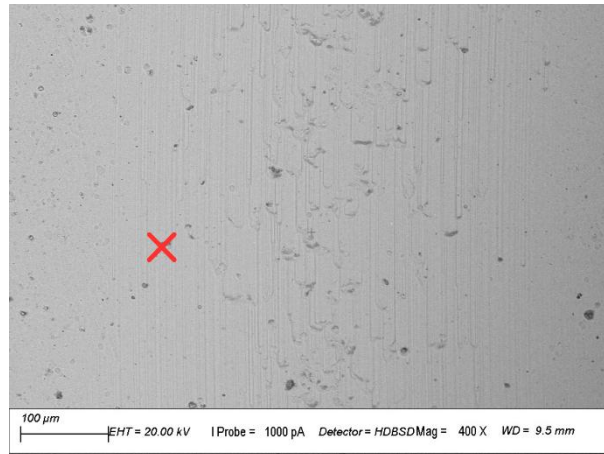


45. ábra: C45-BA mikroszkópi ábrája a vizsgált terület jelölésével

Elem	Tömeg%	Atom%	Net Int.	Hiba%	K-arány	Z	A	F
C	5,1	10,9	73,9	11,2	0,0226	1,1844	0,3757	1,0000
N	16,6	30,5	386,8	8,2	0,0790	1,1595	0,4093	1,0000
O	14,3	23,0	101,4	12,7	0,0126	1,1374	0,0770	1,0000
Al	2,9	2,7	180,8	8,2	0,0158	1,0173	0,5405	1,0033
Si	0,3	0,2	19,4	35,5	0,0017	1,0404	0,6514	1,0055
Ti	60,8	32,6	2895,6	1,7	0,5504	0,8945	1,0090	1,0023

10. táblázat: C45-BA felszíni anyagi összetétel

A C45-AA próbatestnél az ábrán piros X-szel jelölt pontban titán és oxigén alkotta vegyületet mértünk és ebből azt állapítottuk meg, hogy titán-oxid képződött a bevonatból. A titán-oxid egy nagyon jó minőségű kenőanyag, ami miatt a súrlódási együtthatót csökkenti. A titán-oxid nem az egész felületet borítja be, amit egyszerűen lehet magyarázni. Amikor oxidatív kopás történik a tribofilm az érdességsúcsokon alakul ki, vagyis ezeken a területeken kontaktpár képződött a koptatófelülettel, ezen részek kapták meg a legnagyobb hőt és ezért ezen részek oxidálódtak.



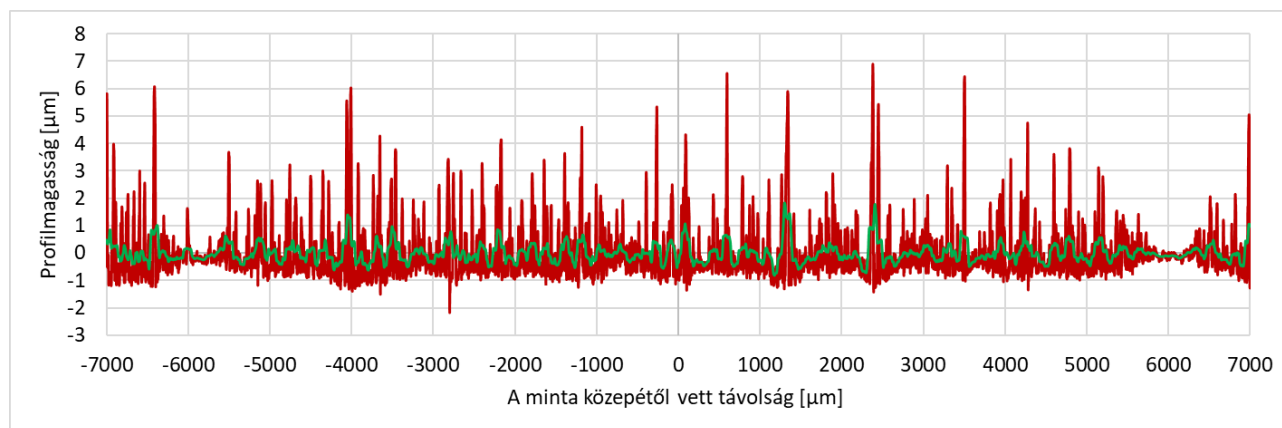
46. ábra: C45-AA mikroszkópi ábrája a vizsgált pont jelölésével

Elem	Tömeg%	Atom%	Net Int.	Hiba%	K-arány	Z	A	F
C	3,4	7,3	54,7	12,7	0,0151	1,1770	0,3721	1,0000
N	4,0	7,3	113,0	10,0	0,0207	1,1521	0,4498	1,0000
O	33,7	53,5	327,6	11,2	0,0364	1,1301	0,0958	1,0000
Si	1,6	1,5	139,9	8,6	0,0111	1,0334	0,6596	1,0055
Ti	57,3	30,4	3030,1	1,7	0,5147	0,8881	1,0092	1,0027

11. táblázat: C45-AA felszíni anyagi összetétel

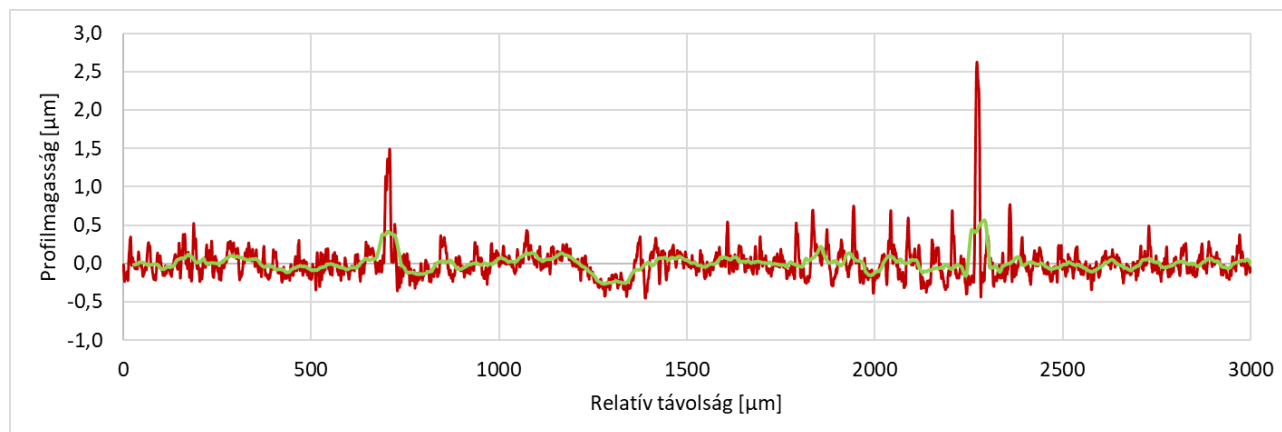
6.1.8 Profilmérés

A profilmérés eredményei alapján meghatározható, hogy a nem szabványos tribológiai mérés során a darab nem kopott jelentősen, de a profil diagramon kivehető azon 2 rész, ahol az árok van. Az egyik legszemléletesebb a 316-BB minta, piros a mérés, a zöld a 100-as mozgó átlagú simítás. A profilmérés eredményei alapján meghatározható, hogy a nem szabványos tribológiai mérés során a darab nem kopott jelentősen, de a profil diagramon kivehető azon 2 rész, ahol az árok van, az egyik legszemléletesebb a 316-BB minta, ahol a piros a mérés, a zöld a 200-as mozgó átlagú simítás:



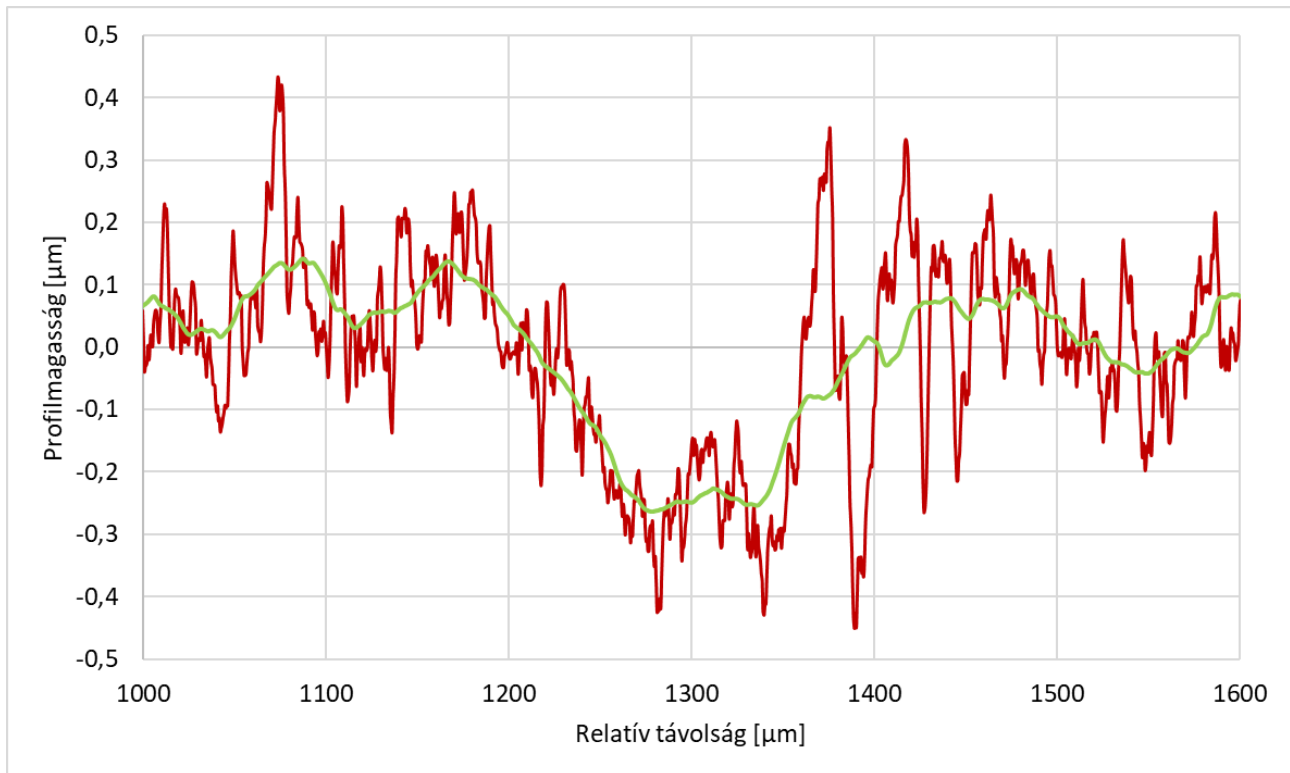
47. ábra: Profilmagasság [μm] a minta közepétől vett távolság [μm] függvényében

A középponttól vett -6000 s $+6000$ μm távolságokban látszódik, hogy hol van a felület lesimítva, hogy hol vannak a koptatási árkok. A mérés rövidebb időtartama miatt nem alakultak ki annyira látványos hullámvölgyek, mint a szabványos mérések esetében:

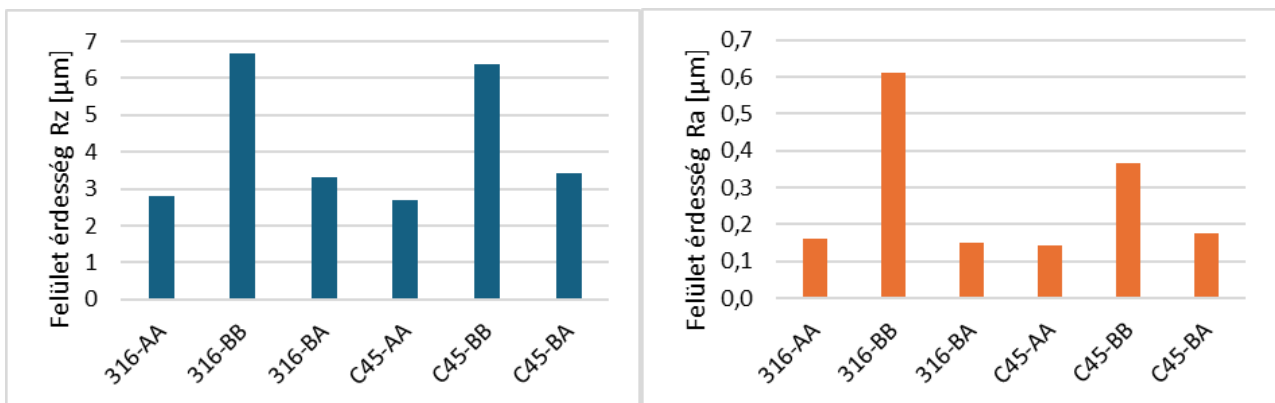


48. ábra: Profilmagasság [μm] a relatív távolság [μm] függvényében

A piros a mérés, a zöld a 100-as mozgó átlagú simítás, ez kinagyítva a kikoptatott gödör és annak környezete:



49. ábra: Profilmagasság [μm] a relatív távolság [μm] függvényében



50. ábra: A mért felületérdesség (Rz [μm] balra, Ra [μm] jobbra) az adott darabokon

7 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE/KÖVETKEZTETÉSEK

A jelen kutatás keretében nyolc próbatestet vizsgáltunk: négy alacsony ötvözetű (C45) és négy magas ötvözetű (316) anyagot. Bevezettünk egy kódot a PVD bevonatokra, amely szerint TiAlCN réteget „A”-val, míg a AlCrN réteget „B”-vel jelöltük. A kutatás során tribológiai elemzéseket végeztünk, ideértve az adhéziós, metallográfiai, SEM, EDS vizsgálatokat, valamint profilmérést és nano-keménységmérést is.

A kutatás során jelentős eredményeket értünk el. A nano-keménységméréssel a bevonatok keménységi és rugalmassági modulus értékeit határoztuk meg, valamint további jellemző változókat is vizsgáltunk. Megállapítottuk, hogy a H/E és H^3/E^2 arányok lineárisan csökkennek a teljes munka függvényében. Fontos eredményünk volt még az is, hogy a mért keménységi értékek elmaradtak a gyártói adatoktól, de ez nem gyártási hiba volt, hanem az eltérés oka, hogy a gyártó a szubsztrát keménységet adta meg, amelynél a mérőfej csak az adott réteg 10%-ába hatol be. Nálunk a behatolási mélység ennél nagyobb ($\sim 0,9 \mu\text{m}$) volt, így a méréseink a kompozit keménységet mutatták.

Adhéziós szempontból valamennyi bevonat megfelelőnek bizonyult. Kiderült az is, hogy magas ötvözetű acélok esetében magas a kúszás értéke, alacsony ötvözetű acélok esetében alacsony a kúszás értéke.

A tribológiai mérések során mindegyik bevonat esetében adhéziós hibákra utaló jeleket figyeltünk meg, melyek a tribológiai görbék megcsúszásából következtethetőek. A nem szabványos, nagyobb sebességgel és nagyobb terheléssel végzett mérésnél stabil tribológiai görbét találtunk a mérési tartomány teljes szakaszán. A tribológiai görbék zajai a titán-oxid alapú tribofilmelek keletkezésére és roncsolódására utalnak.

Az EDS vizsgálatok több jelenséget is feltártak, például az oxidáció és a felületi kitörések megjelenését. A pásztázóelektron-mikroszkópos vizsgálatok során összehasonlítottuk a szabványos és nem szabványos eljárásokat. A profilmérés segítségével meghatároztuk a kopási árkok mélységét.

Eredményeink szerint a „BB” típusú bevonatok rendelkeznek a legjobb H/E és H^3/E^2 arányértékekkel

Az „AB” bevonatú próbatestek gyártása nem volt sikeres. Több kiváltó okot is felsoroltunk a munkánkban, hogy mi válthatta ki a gyártás sikertelenségét. Feltételezhetően az AlCrN kémiaiilag összeférhetetlen a TiCN réteggel, míg fordított esetben a „BA” mintáknál ez nem mondható el, mert abban az esetben az „A” réteg TiAlN része érintkezett az AlCrN réteggel. Javaslatokat tettünk a dolgozatban a „AB” bevonat gyárthatóságának optimalizálására.

Összegzésképp, kutatásunk igazolta, hogy a PVD eljárás jelentősen javíthatja a koptatási tulajdonságokat. A tartósság, kopásállóság és egyéb tulajdonságok javítása érdekében a vizsgált

bevonatok közül mind alacsony, mind magas ötvözettség esetében a „BB” bevonattípust ajánljuk, feltéve, hogy a felületi érdesség nem jelent problémát a felhasználás során.

7.1 Jövőbeli tervek

A tanulmány elkészítése során számos nevesítendő tanulság született, például a nyolc próbatestünk közül hat mintán kialakult a megfelelő réteg, munkánkban számos tribológiai tulajdonságot tudtunk vizsgálni. Két próbatestünkénél viszont nem alakult ki a megfelelő réteg, így jövőbeli kutatási témának gondolnánk egy olyan réteg keresését, amely az A-B rétegek közé közvetítő réteg lehetne és javítani tudja a tapadást.

Kutatásunkat szeretnénk folytatni és az eddig használt próbatesteken további vizsgálatokat végezni, például keresztmetszeti metallográfiai és SEM képeket, EDS méréseket nézve. Illetve röntgendiffrakciós vizsgálatokat is végezni.

Jövőbeli terveinkhez kapcsolódik még, hogy további különféle hibrid felületkezelések tanulmányozása, a bevonatokat különféle vastagságban használva a próbatesteken, illetve különböző anyagok alkalmazása is terveink között szerepel. Ezenkívül szeretnénk feltérképezni a különféle anyagkombinációk hatását a kopásállóságra és egyéb mechanikai tulajdonságokra is. Kutatásunk célja volt és jövőbeli célunkká is vált, hogy részletes ismereteket szerezzünk a hibrid felületkezelési módszerek hatásairól, amelyek akár hozzájárulhatnak hosszabb élettartamot biztosító és jobb teljesítményű anyagok fejlesztéséhez.

8 FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] E. H. Sirvio, M. Sulonen, and H. Sundquist, “Abrasive wear of ion-plated titanium nitride coatings on plasma-nitrided steel surfaces,” *Thin Solid Films*, vol. 96, no. 1, pp. 93–101, Oct. 1982, doi: 10.1016/0040-6090(82)90217-6.
- [2] A. S. Korhonen and E. H. Sirvio, “A new low pressure plasma nitriding method,” *Thin Solid Films*, vol. 96, no. 1, pp. 103–108, Oct. 1982, doi: 10.1016/0040-6090(82)90218-8.
- [3] A. Matthews, “Developments in ionization assisted processes,” *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 3, no. 6, pp. 2354–2363, Nov. 1985, doi: 10.1116/1.572881.
- [4] Y. Sun and T. Bell, “Plasma surface engineering of low alloy steel,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 140, no. C, pp. 419–434, Jul. 1991, doi: 10.1016/0921-5093(91)90458-Y.
- [5] N. Dingremont, E. Bergmann, P. Collignon, and H. Michel, “Optimization of duplex coatings built from nitriding and ion plating with continuous and discontinuous operation for construction and hot working steels,” *Surf Coat Technol*, vol. 72, no. 3, pp. 163–168, Jun. 1995, doi: 10.1016/0257-8972(94)02350-6.
- [6] M. Zlatanović and W. D. Münz, “Wear resistance of plasma-nitrided and sputter-ion-plated hobs,” *Surf Coat Technol*, vol. 41, no. 1, pp. 17–30, Feb. 1990, doi: 10.1016/0257-8972(90)90127-X.
- [7] S. Hogmark, S. Jacobson, and M. Larsson, “Design and evaluation of tribological coatings,” *Wear*, vol. 246, no. 1–2, pp. 20–33, Nov. 2000, doi: 10.1016/S0043-1648(00)00505-6.
- [8] A. P. Tschiptschin, “Duplex Coatings,” in *Encyclopedia of Tribology*, Y.-W. Wang Q. Jane and Chung, Ed., Boston, MA: Springer US, 2013, pp. 794–800. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_694.
- [9] K. A. Vella, J. Buhagiar, G. Cassar, B. Attard, J. Chen, and A. Zammit, “Microstructural analysis of additively manufactured Ti–6Al–4V subjected to duplex surface treatment,” *Mater Chem Phys*, vol. 319, p. 129303, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2024.129303.
- [10] A. Márquez-Herrera, A. Saldaña-Robles, M. Zapata-Torres, J. F. Reveles-Arredondo, and J. A. D. De la Peña, “Duplex surface treatment on ASTM A-36 steel by slide burnishing and powder pack boriding,” *Mater Today Commun*, vol. 31, p. 103703, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.MTCOMM.2022.103703.
- [11] J. Martin *et al.*, “Duplex surface treatment of metallic alloys combining cold-spray and plasma electrolytic oxidation technologies,” *Surf Coat Technol*, vol. 392, p. 125756, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2020.125756.
- [12] S. Yuan *et al.*, “Manipulation tribological behavior of Ti6Al4V alloy via a duplex treatment of double glow plasma surface molybdenizing-laser surface texturing (LST),” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 6360–6375, May 2020, doi: 10.1016/J.JMRT.2020.03.061.
- [13] F. Sun *et al.*, “Duplex treatment of arc plasma nitriding and PVD TiN coating applied to dental implant screws,” *Surf Coat Technol*, vol. 439, p. 128449, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2022.128449.
- [14] Q. He *et al.*, “PVD coating strategies: Developing a combination of AlCrN and AlTiSiN for enhanced surface performance during threading of super duplex stainless steel,” *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 121, p. 106670, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.IJRMHM.2024.106670.

- [15] D. Özkan *et al.*, “Effects of ceramic-based CrN, TiN, and AlCrN interlayers on wear and friction behaviors of AlTiSiN+TiSiN PVD coatings,” *Ceram Int*, vol. 47, no. 14, pp. 20077–20089, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2021.04.015.
- [16] H. Holleck and V. Schier, “Multilayer PVD coatings for wear protection,” *Surf Coat Technol*, vol. 76–77, pp. 328–336, Nov. 1995, doi: 10.1016/0257-8972(95)02555-3.
- [17] European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database ©, “Anyagi jellemzők (316).” Accessed: Nov. 09, 2024. [Online]. Available: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=106
- [18] European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database ©, “Anyagi jellemzők (C45).” Accessed: Nov. 09, 2024. [Online]. Available: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=152
- [19] Cserjésné Sutyák Ágnes *et al.*, *Nitridálás – korszerű eljárások és vizsgálati módszerek*. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2015.
- [20] T. Bell, H. Dong, and Y. Sun, “Realising the potential of duplex surface engineering,” *Tribol Int*, vol. 31, no. 1–3, 1998.
- [21] Cserjésné Sutyák Ágnes, Dr. Frigyk Gábor, Kocsisné dr. Baán Mária, Dr. Kuzsella László, Dr. Marosné dr. Berkes Mária, and Szabó ESzilágyiné Biró Andreandre, *Nitridálás – korszerű eljárások és vizsgálati módszerek*. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2015.
- [22] K. Thelning, *Steel And Its Heat Treatment*, Második kiadás. Butterworths, 1984.
- [23] voestalpine High Performance Metals Hungary Kft., “Gyártói adatlap (VARIANTIC®).” Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/hungary/app/uploads/sites/297/2024/07/VARIANTIC®-bevonat.pdf>
- [24] voestalpine High Performance Metals Hungary Kft., “Gyártói adatlap (CROSAL®-PLUS),” 2024, Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/hungary/app/uploads/sites/297/2024/07/CROSAL®-plus-bevonat.pdf>
- [25] X. Chen, Y. Du, and Y. W. Chung, “Commentary on using H/E and H3/E2 as proxies for fracture toughness of hard coatings,” *Thin Solid Films*, vol. 688, p. 137265, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.TSF.2019.04.040.
- [26] International Organization for Standardization, “Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Rockwell indentation test for evaluation of adhesion of ceramic coatings (ISO 26443:2023),” 2023. Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/86445.html>
- [27] TRIBONET, “TriboNet.” Accessed: Nov. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.tribonet.org/tribometer/>
- [28] ASTM INTERNATIONAL, “Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus (ASTM G99-23),” 2023. Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.astm.org/standards/g99>
- [29] ASTM INTERNATIONAL, “Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus (ASTM G99-23),” 2023. Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.astm.org/standards/g99>

8.1 Ábrajegyzék

1. ábra:	Áttekintés folyamatábrája.....	7
2. ábra:	Maradó feszültségek (MPa) a felülettől mért mélység függvényében (μm) [9]	9
3. ábra:	A karcnyomokban megfigyelt különböző jellemzők nagy nagyítású mikroszkópos képe [9].....	10
4. ábra:	PEO és hidegszórt-PEO oxidréteg sematizált ábrája és mikroszkópi képei [11].....	11
5. ábra:	A Mo-réteg és a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet mátrix terhelés-eltolódás görbéi (a), a Mo-réteg és a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet mátrix keménysége és rugalmassági modulusa (b), a H^3/E^2 és az $1/\text{E}^2\text{H}$ arányok, amelyek az E és H mért értékeiből származnak a Mo-réteg és a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet mátrix esetében (c) [12].....	12
6. ábra:	A polírozott $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ és a Mo-réteg súrlódási együtthatói (a); a különböző textúrasűrűséggel rendelkező $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ötvözet (b) és Mo-réteg (c) súrlódási együtthatói [12]	13
7. ábra:	Nitridálással kombinált duplex kezelések hatásmechanizmusainak bemutatása [20]	16
8. ábra:	Ötvözők hatása a nitridálás utáni keménységre (alapfém: 0,35%C; 0,30% Si; 0,70% Mn) [22]	17
9. ábra:	Felületkezeléseink sematikus ábrája	18
10. ábra:	Kutatásunk próbatestjei	19
11. ábra:	H/E és H^3/E^2 a keménység (GPa) függvényében [25]	20
12. ábra:	Pin-on-Disk tribométer sematikus ábrája [28]	22
13. ábra:	Kutatás során vizsgált próbatestek	25
14. ábra:	Terhelő erő [mN] az elmozdulás [nm] függvényében.....	26
15. ábra:	A H/E (balra) és H^3/E^2 (jobbra) arányok az egyes minták esetében.....	26
16. ábra:	A H/E (balra) és H^3/E^2 (jobbra) arányok a kúszás [%] függvényében	27
17. ábra:	A H/E (balra) és H^3/E^2 (jobbra) arányok az elasztikus munka [pJ] függvényében	27
18. ábra:	A H/E (balra) és H^3/E^2 (jobbra) arányok a plasztikus munka [pJ] függvényében.....	27
19. ábra:	A teljes munka [pJ] és a plasztikus deformációval [MPa] szembeni ellenállás diagramja	28
20. ábra:	A teljes munka [pJ] és az elasztikus törési nyúlás [-] diagramja.....	28
21. ábra:	316-AA próbatest mikroszkópi képe.....	29
22. ábra:	316-BA próbatest mikroszkópi képe	29
23. ábra:	316-AB próbatest mikroszkópi képei.....	29
24. ábra:	316-BB próbatest mikroszkópi képe	30
25. ábra:	C45-AA próbatest mikroszkópi képe	30

26. ábra:	C45-BA próbatest mikroszkópi képe	30
27. ábra:	C45-AB próbatest mikroszkópi képei, 500 μm (a), 200 μm (b)	31
28. ábra:	C45-BB próbatest mikroszkópi képe	31
29. ábra:	Súrlódási együttható [-] a koptatási távolság [m] függvényében, 6 próbatestet összehasonlítva.....	32
30. ábra:	Súrlódási együttható [-] a koptatási távolság [m] függvényében a C45-BB és 316-BB próbatesteket összehasonlítva.....	32
31. ábra:	Súrlódási együttható [-] a koptatási távolság [m] függvényében C45-BA és 316-BA próbatestekre nézve	33
32. ábra:	Súrlódási együttható [-] a koptatási távolság [m] függvényében C45-AA és 316-AA próbatesteket összehasonlítva.....	33
33. ábra:	Átlagos súrlódási tényezők [-] szabványos és nem szabványos vizsgálattal mérve ..	34
34. ábra:	316-AA (a) és 316-BB (b) próbatestek mikroszkópi képei.....	35
35. ábra:	C45-AA (a) és C45-BB próbatestek mikroszkópi képei	35
36. ábra:	316-BA (a) és C45-BA (b) próbatestek mikroszkópi képei	36
37. ábra:	316-AA próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata ...	36
38. ábra:	316-BA próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata ...	36
39. ábra:	316-BB próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata ...	37
40. ábra:	C45-AA próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata ..	37
41. ábra:	C45-BA próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata...	37
42. ábra:	C45-BB próbatest szabványos (a) és nem szabványos (b) mikroszkópi vizsgálata...	37
43. ábra:	316-AA mikroszkópi ábrája a vizsgált terület jelölésével.....	38
44. ábra:	316-BB mikroszkópi ábrája a vizsgált terület jelölésével	38
45. ábra:	C45-BA mikroszkópi ábrája a vizsgált terület jelölésével	39
46. ábra:	C45-AA mikroszkópi ábrája a vizsgált pont jelölésével	40
47. ábra:	Profilmagasság [μm] a minta közepétől vett távolság [μm] függvényében	41
48. ábra:	Profilmagasság [μm] a relatív távolság [μm] függvényében.....	41
49. ábra:	Profilmagasság [μm] a relatív távolság [μm] függvényében.....	42
50. ábra:	A mért felületérdesség (R_z [μm] balra, R_a [μm] jobbra) az adott darabokon.....	42

8.2 Táblázatjegyzék

1. táblázat:	316 összetétele, tömegarány%-ban [17]	16
2. táblázat:	C45 összetétele, tömegarány%-ban [18].....	16
3. táblázat:	Próbatestek rétegei és anyagösszetétele	19
4. táblázat:	ISO 26443:2023-as szabvány értékelési rendszere [26]	21
5. táblázat:	Mérési paraméterek [ASTMG99] [29]	22
6. táblázat:	Nem szabványos mérési paraméterek	23
7. táblázat:	H/E és H^3/E^2 alapján való csoportosítása a mintáinknak	28
8. táblázat:	316-AA felszíni anyagi összetétel.....	38
9. táblázat:	316-BB felszíni anyagi összetétel	39
10. táblázat:	C45-BA felszíni anyagi összetétel	39
11. táblázat:	C45-AA felszíni anyagi összetétel.....	40