



Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Felületkezelések hatásának vizsgálata műanyagfröccsöntő szerszámok karcállóságára

*Investigation of the effect of surface treatments
for scratch resistance of plastic injection molding tools*

Készítette:

Kiss Roberta Barbara

III. éves BSc Ipari termék és formatervező mérnök hallgató
és

Fülöp Fruzsina

II. éves MSc Logisztikai mérnök hallgató

Tervezésvezető:

Dr. Marosné Prof. Dr. Berkes Mária

egyetemi tanár,

Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

Konzulens:

Nagy Nóra

egyetemi tanársegéd

Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet

Miskolc, 2021

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	3
2. Irodalmi áttekintés	4
2.1. A műanyagalakító szerszámok jelentősége és tönkremeneteli okai	4
2.2. A fröccsöntés	5
2.3. Felületkezelések.....	5
2.3.1. Volfrám-karbid bevonati réteg létrehozása (WC).....	7
2.3.2. Nitridálás	8
2.3.3. Oxinitridálás (NO)	9
2.3.4. Sófürdős nitridálás (SN).....	9
2.4. A műszerezett karcvizsgálat	10
2.4.1. A karcvizsgálat célja, információtartalma.....	10
2.4.2. A karcvizsgáló berendezés	13
3. Kísérleti munka	15
3.1. A vizsgált minták alapanyaga, térfogati hőkezelése és felületkezelése.....	15
3.2. Vizsgálati mátrix.....	18
3.3. A mintadarabok felületi rétegének jellemzői.....	20
3.4. Saját kísérleti munka: műszerezett karcvizsgálatok	20
3.4.1. Növekvő terhelőerővel végzett karcvizsgálatok	20
3.4.1.1. Előkísérletek.....	20
3.4.1.2. Célkísérletek növekvő terhelőerejű karcvizsgálatokkal.....	21
3.4.2. Állandó terhelőerővel végzett karcvizsgálatok	25
3.4.2.1. Megfigyelések az $F = 50$ N erővel végzett vizsgálatok karcdiagramjai alapján	25
3.4.2.2. Megfigyelések az $F=100$ N erővel végzett vizsgálatok karcdiagramjai alapján	27
3.4.3. Az eredmények átfogó értékelése	30
3.4.3.1. Az alapanyag hatása:.....	31
3.4.3.2. A felületkezelés hatása.....	31
4. Összefoglalás.....	33
Köszönetnyilvánítás	34
Felhasznált irodalom.....	35

1. Bevezetés

A műanyagfröccsöntő szerszámok használatuk során a nagymértékű koptató és más felületi sérüléseket okozó igénybevételek mellett jelentős mechanikai, termikus és korróziós hatásoknak vannak kitéve.

Teljesítőképességük és élettartamuk növelése céljából különféle felületkezeléseket alkalmaztunk oly módon, hogy a felhasznált alapanyag tömbi tulajdonságai változatlanok maradjanak. Erre elsősorban gazdasági okok miatt van szükség, mivel a szerszámok sérülése és kopása évente több milliónyi kárt okoz a műszaki életben.

Napjainkban a mérnökök rendkívül széles spektrumban válogathatnak az elérhető felületkezelési technológiák, eljárások közt. Ahhoz, hogy mindezek közül a számunkra legmegfelelőbb módot meghatározzuk számos műszaki paramétert szükséges figyelembe venni. Többek között ide tartozik a kezelési idő, és hőmérséklet, valamint az utóbbiból adódó mérettorzulások, a folyamat során felmerülő költségek, továbbá a kialakítandó réteg vastagsága és annak keménysége.

Kutatómunkánk célja annak vizsgálata volt, hogy a szerszámacélok esetében az iparban elterjedten alkalmazott olyan felületkezelések, mint például a sófürdős nitridálás, az oxinitridálás vagy a WC kerámia bevonatok használata, hogyan hatnak az adott szerszámacél karcolásos károsodással szembeni ellenállására.

A szerszámacélok karcállóságát már néhány egyszerűbb eljárással, mint például nikkel galvanizációval is lényegesen növelni lehet, ezzel hozzájárulva az élettartam növeléséhez, viszont az imént említett, iparban is gyakran használt eljárásokkal már drasztikus javulásokat érhetünk el.

Ezeket az eredményeket dolgozatunkban részletesen szemléltetjük összesítő táblázatokkal, diagramokkal, valamint a korábbi szakmai együttműködési kopásállósági kísérletekkel is összevetjük, melyről a későbbiekben szintén bővebb információt közlünk.

Ennek céljából kétféle módon előállított, azaz hagyományos rúdacélból készült és lézerszinterelt maraging acél alapanyagon létrehozott, a fentiekben felsorolt felületkezeléssel módosított felületi rétegek viselkedését növekvő és állandó terhelőerejű műszerezett karcvizsgálatokkal jellemezzük. Ezen túlmenően, a károsodás mértékét optikai mikroszkópos vizsgálatok segítségével számszerűen is jellemezzük.

Célkitűzésünk szerint a kísérleti vizsgálatok során bebizonyíthatjuk, hogy nagymértékű, állandó terhelőerejű karcolás hatására a bevonatok és a felületkezelt rétegek ugyan sérülést szenvednek, de a bevonat nélküli, azaz a kezeletlen alapanyaghoz képest ez utóbbiak jóval kedvezőbben viselkednek, a sérülés üteme lassabb, és a vizsgált szubsztrát anyagoktól függetlenül közel hasonló.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A műanyagalakító szerszámok jelentősége és tönkremeneteli okai

Az alakító szerszámok tervezése kulcsfontosságú feladat az ipari műanyagok feldolgozásának folyamata során, mivel egyértelműen befolyásolja a végtermék minőségét, többek közt annak felületminőségét és külső megjelenését. Mindezek mellett a gyártandó termék, valamint a szerszámanyag kompatibilitására is kihat a késztermék jó minősége.

Valamennyi műanyag készterméknek olyan egyedi követelményeknek kell megfelelnie, mint például a funkcionalitás, az ebből fakadó minőségi, továbbá bizonyos esztétikai követelmények, ide sorolva a felületi sajátosságokat, illetve optikai jellemzőket [1].

Alapvető követelménynek tekintjük a műanyag alakító szerszámacélok esetében a megfelelő szilárdságot, hővezető képességet és a kopásállóságot. Természetesen a lista további speciális elvárásokkal is bővíthet a megmunkálandó anyagoktól, valamint a késztermékektől függően. Ide tartozik például a polírozhatóság, ami például a gépjármű lámpatestek gyártása során fontos feltétel a kívánt felületi minőség eléréséhez, vagy a korrózióállóság, ami olyan műanyagok megmunkálásához nélkülözhetetlen, amelyek nagy mennyiségű korrozív bomlásterméket eredményeznek hő hatására [2].

A szerszám élettartamát alapvetően két fő tényező befolyásolja, a szívósság és a képlékenység. Az előbbi arra van hatással, hogy a szerszámanyag mennyire képes tolerálni a bemetszések és az állandó húzófeszültség jelenlétét stabil repedésterjedés létrejötte nélkül. Ebből következően összefüggésbe hozhatjuk a szívósságot az anyag repedésterjedéssel szembeni ellenállásával. Az utóbbi pedig azt mutatja meg, hogy az anyag meddig képes törés nélkül elviselni a maradó alakváltozást. Gyakorlatilag ez befolyásolja azt is, hogy milyen könnyen keletkezik repedés az anyagban, ezért a képlékeny deformációval és a kisciklusú fáradással szembeni ellenállás egyik fokmérőjének is tekinthetjük, ami összefüggésbe hozható a szerszám termikus fáradásra vagy kipattogzásra való hajlamával [3].

A műanyagokat a fémekhez képest jóval kisebb hőmérsékleten munkálják meg, jellemzően a 150 és 280 °C közötti hőmérséklet tartományban. Ennek következtében nagymértékben csökken a szerszámokra termikus igénybevétele, ugyanakkor, mivel a megmunkálandó anyag nagy viszkozitású, a szerszámok számottevő koptató igénybevételnek is ki vannak téve. Az esetlegesen az alapanyaghoz kevert erősítőfázisok, mint például a műanyagoknál igen elterjedten használt üvegszál, potenciális karcolóként viselkedhetnek a fröccsöntés, extrudálás és más alakadó technológiák során. A megmunkáló szerszámok felületén gyakran találhatók keskeny bordák, lépcsők, vagy alámetszések, valamint a szerszámtestben futó üregek, nyitások mivel ezek általában a késztermékek gyártási folyamatához készülnek. Ezek a geometriai elemek feszültséggyűjtő hatásúak, azaz a terhelések lokális növekedését okozó sajátosságok. A szerszámokat az ökonomikus termelés céljából nagysorozatú gyártásban alkalmazzák, mert előállításuk kifejezetten költséges a finom felületi minőségük és a bonyolult geometriájuk következtében. Ebből adódóan fontos követelmény a szerszámmal szemben, hogy az hosszú

élettartamú legyen, azaz lényeges tulajdonságaikat, mint például a méret- és alakhűség, vagy a finom felület, meg kell őrizniük [4].

2.2. A fröccsöntés

A fröccsöntés első lépéseként a hőre lágyuló polimert a folyási hőmérséklet, illetve az olvadáspont fölé melegítjük, hogy kis viszkozitású folyadékállapotba kerüljön, majd ezt az ömledéket fecskendezzük nagy sebességgel egy szűk beömlő nyíláson át a viszonylag hideg, zárt tartályba. Következő lépésben a befecskendezett, félkész termék a nagy nyomású térben kihűl, így viszonylag hulladékmentesen gyártható tetszőlegesen bonyolult geometriájú alkatrészt. Bár a fröccsöntés igen termelékeny eljárás, rendkívül költséges is a szerszám bonyolult kialakításának következtében, ezért törekednünk kell olyan szerszámanyag megválasztására, amellyel jelentősen növelhetjük az élettartamot [5].

Az élettartamot leginkább befolyásoló tényezők [6]:

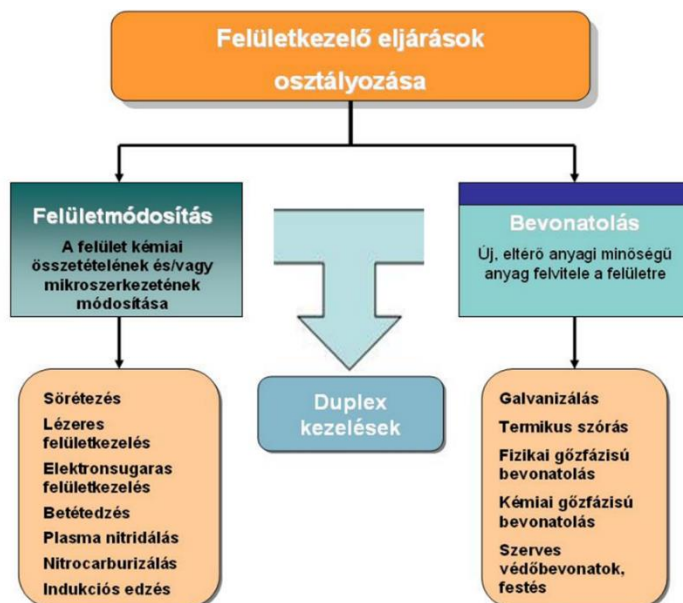
- **kopás**, ami kialakulhat az alapanyaghoz adott, a termék különféle tulajdonságainak javítását célzó második fázisok hatására, de a hosszú használati idő következtében is jelentkezhet;
- a gyártás során – polírozáskor, szikraforgácsoláskor – képződő **felületi hibák**;
- a megengedettnél nagyobb mértékű szerszám **deformáció**, például túl nagy zárónyomás esetén;
- **korrozó**, ami erőteljesen lerövidítheti az élettartamot, amikor a gyártást erősen korrozív melléktermékek kísérik, vagy nagy a páratartalom, de a hűtőközegek kedvezőtlen hatásának velejárója is lehet.

2.3. Felületkezelések

A felületkezelés célja egy adott anyag különféle igénybevételekkel szembeni ellenállóképességének, valamint ezáltal élettartamának növelése a felületi (lokális) igénybevételekhez igazodva, amelyek gyakran eltérőek a felülettől távoli anyagrészekkel (magrészsel) szemben támasztott követelményektől. A leggyakoribb elvárás, hogy míg a belső részeknek nagy szívósággal kell rendelkezniük, addig a felületi rétegek kemények, kopásállóak, kifáradással, korrozóval szemben növelt ellenállásúak legyenek. A felületkezelések segítségével ezt a kettős követelményt tudjuk egyidejűleg megvalósítani

A felületkezelő, vagy ún. felülettechnológiai eljárások számos elv alapján oszthatók. A kezelés során kialakuló hőmérséklet szerint beszélhetünk felületolvadási, vagy anélküli kezelésekéről, a felület kémiai összetételének változtatásával vagy anélkül végrehajtott kezelésekéről, az alkalmazott energiaforrás szerint elektromos-, vagy termokémiai reakcióhő, mechanikai energiát hasznosító, vagy elektromágneses, illetve részecskesugárzási energiát hasznosító kezelésekéről [7]. A felülettechnológiák osztályozásának egyik leggyakoribb módja, amikor az alkalmazott folyamatokat aszerint különböztetjük meg, hogy a felületi réteg

összetételét, és/vagy szerkezetét módosítjuk, vagy új, eltérő minőségű anyagi réteget viszünk fel a felületre a kívánt tulajdonságjavítás céljából (1. ábra).



1. ábra. A felülettechnológiák osztályozásának egy szokásos elve [8]

Az 1. ábrán bemutatott osztályozás szerinti fő csoportokon belül a felületet érő hatás, az eljárás fizikai elve, módszere és az anyagszerkezetre gyakorolt hatása szerint a gyakorlatban alkalmazott igen változatos kezelési eljárásokat tovább csoportosíthatjuk, amint az 1. táblázatban látható.

1. táblázat. A felületmódosító eljárások további csoportosítása

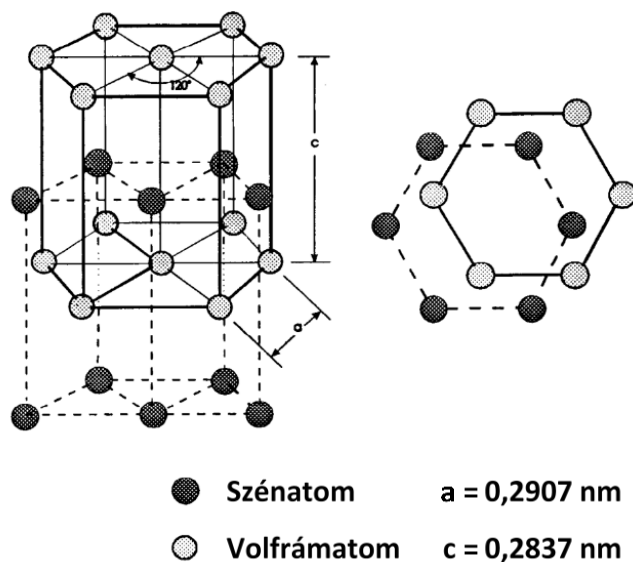
Csoport szempont	KÉMIAI ÖSSZETÉTEL VÁLTOZÁSA NÉLKÜL			KÉMIAI ÖSSZETÉTEL VÁLTOZÁSÁVAL			
	HATÁS	mechanikai	hőhatás	hőhatás	hőhatás	fizikai	
ELV		Alakítási keményedés	Fázis-átalakulás	Átolvasztás és kristályosodás	Ötvözés olvadék állapotban	Ötvözés szilárd állapotban	Ötvözés + módosított rácshiba-szerkezet
ELJÁRÁS					+ fázis-átalakulás	+ fémes vegyület	lon-implantáció
					Cementálás -szilárd közegben - sófürdős - gáz - vákuum - plazma (ion)	Nitridálás, Boridálás sófürdős - gáz - sófürdős - vákuum - plazma (ion)	
ANYAG-SZERKEZET		Alakított állapot, növelt diszlokáció sűrűség, maradófeszültség	Kisebb C-tartalmú martensit	Finom kristályszerkezet vagy amorf réteg	Egyedi, megtervezett mikroszerkezet – szilárd oldat vagy kompozit réteg	Nagyobb C-tartalmú martensit	Vegyület réteg + diffúziós zóna (szilárd oldat+ kiválások)
							Egyedi összetétel és rácshiba-szerkezet

Dolgozatunkban a szerszámanyag kopásállóságának, élettartamának növelése érdekében volfrám-karbid bevonatos (WC), valamint oxo-nitridálással (NO) és sófürdős nitridálással (SN) kezelt felületeket vizsgáltunk, ezért a továbbiakban ezeket a felületkezelési eljárásokat mutatjuk be röviden.

2.3.1. Volfrám-karbid bevonati réteg létrehozása (WC)

A volfrám-karbid kerámia tömbi formájában egy porkohászati úton előállított nagy keménységű, nagy kopásállóságú keramikus vegyület, amelynek jellemző keménysége 2000 és 2500 HV közt változik. Bevonat formájában az alkalmazott bevonatolási technológia paramétereitől függően szerkezete és tulajdonságai (sűrűség, porozitás, szemcseméret, keménység, szívósság stb.) igen változóak lehetnek.

A WC interstíciós fémes vegyület (2. ábra), ezáltal nagy elektronegativitás különbség lép fel a W és C atomok közt. Az interstíciós szerkezetet a szénatom kis mérete teszi lehetővé [9].



2. ábra A volfrám-karbid kristályszerkezeti modellje [9]

A volfrám-karbidban a wolfram és a karbon atom között ionos és kovalens kötések egyaránt találhatóak, míg a volfrám atomok fémes kapcsolatban vannak. Ez utóbbi miatt nagyon hasonló tulajdonságot mutat a fémekkel, míg a kovalens és ionos kötések miatt magas olvadáspont, nagy keménység, továbbá nagy elektromos- és hővezetőképesség jellemzi [10].

Bevonat formájában alkalmazva nem tiszta WC réteget készítünk, hanem a szerszámanyagként is használatos ún. keményfémnek megfelelő, azaz WC-Co összetevőkből álló réteget hozunk létre. A szerszámok kopásálló bevonatait leggyakrabban PVD (Physical Vapour Deposition = fizikai gőzfázisú leválasztás), vagy CVD (Chemical Vapour Deposition = kémiai gőzfázisú leválasztás) során visszük fel az alapanyag felületére.

A bevonatolási eljárások a vékonyrétek technológiák közé tartoznak, amelyek révén a szubsztrátum (munkadarab) alaposan megtisztított felületén, rendkívül vékony, néhány mikrométer vastagságú bevonatot alakítanak ki.

A PVD- és CVD-eljárások lényege, hogy a felületi bevonat kialakításakor a megfelelő reakciók a hordozó (szubsztrátum) felületén jönnek létre, biztosítva ezzel a bevonatolás egyenletes minőségét. A PVD-eljárások kisebb, $T < 500$ °C-os hőmérsékleten történnek és a gőzfázis átalakítandó vegyületet vagy nem tartalmaz, vagy a meglévő vegyület bomlása még gőzfázisban megtörténik fizikai úton. A CVD-eljárások ezt a célt valamilyen vegyületnek (vagy vegyületeknek) felületen történő termokémiai bontásával és újabb reakcióval érik el, amelyhez nagyobb hőmérséklet szükséges.

A bevonatok alapanyagának és a bevonandó felületnek nagy tisztaságúnak, oxigén-, vízgőz- stb. mentesnek, kell lennie, ennek érdekében, illetve a gőzölögtető források működése céljából nagyvákuumban, kb. 10^{-4} Pa nyomáson kell a bevonatolást végezni. Ennek eredményeképpen nagytisztaságú, homogén, jól tapadó réteg állítható elő.

A bevonatok anyaga, a bevonatolás céljától függően sokféle lehet. Kopásálló alkalmazásokban nagy keménységű keramikus vegyületeket – pl. TiN, TiB₂, CrN, c-BN, TiAlN, SiC, Si₃N₄, WC, DLC – hozunk létre, amelyek PVD eljárás során adhéziós, CVD eljárás során kohéziós kötással tapadnak a szubsztrátum felületi rétegéhez.

A keletkező rétegek tömörek, nagy keménységűek, kopással és egyéb felületi sérülésekkel szemben ellenállóak. Jellemző vastagságuk 0,1...15 µm.

Az általunk vizsgált kísérleti minták felületén PVD eljárással készült WC-Co keménységű bevonatok voltak. A PVD bevonatolásnak számos technológiai változat ismert. Történhet olvadáskállapotból történő elgőzölögtetéssel (vákuumgőzölés vagy ionsugaras bevonatolás), vagy hideg ionforrás használatával (katódporlasztás, ionsugaras leválasztás, vákuumgőzölés, katódporlasztás). A technológiai részleteket a gyártók általában nem teszik közzé, mivel versenyképességük nagyban függ a minél jobb és hatékonyabb technológiai megoldásoktól, amelyek fejlesztésén folyamatosan dolgoznak.

2.3.2. Nitridálás

A nitridálás jellemzően az acélok felületkezelő eljárása, amelynek során nitrogén atomok diffundálnak a fémes (ferrites) alapanyag felületébe, így képezve nitrideket tartalmazó fémes vegyületi réteget a felületen, valamint alatta egy nitrogénben gazdag diffúziós zónát, amelyet α -szilárd oldat és az alapfém, valamint az ötvözők nitridjei alkotnak. Ennek következtében tulajdonságait a beágyazó alapanyag (mátrix) tulajdonságai és a nitridek típusa, mennyisége, mérete, alakja, eloszlása határozza meg. A nitridált kérget tehát a vegyületi zóna és a diffúziós zóna együttesen alkotja, ami egy vékony, de igen nagy keménységű felületi kéreg.

A nitridálást a cementáláshoz képest jellemzően kisebb hőmérsékleten, $475 \div 700$ °C közötti hőmérséklet tartományban végzik, ezért ennek a felületkezelésnek az egyik nagy előnye, hogy az előzetesen már hőkezelt alapanyag mikroszerkezete megmartható, az a felületkezelés után sem változik. Ha a tervezett tulajdonságjavulást döntően a diffúziós réteg biztosítja, akkor nitridálást rendszerint kisebb hőmérsékleten (max. 520 °C) végzik, amivel elkerülhető a durva nitridek képződése [8].

A nitridálásnak számos változata ismeretes. A legrégebbi és legelterjedtebb a gáznitridálás, de széleskörben alkalmazzák a folyékony közegű sófürdős nitridálást is. A legegyszerűbb változata a pornitridálás, míg a legkorszerűbbnek és leghatékonyabbnak a napjainkban egyre szélesebb körben alkalmazott plazmanitridálást tekintik [11].

Ezek közül a kísérleti munka során tanulmányozott sófürdős nitridálást és az utóoxidációval kombinált karbonitridálást mutatom be röviden.

2.3.3. Oxinitridálás (NO)

A nitridálásnak számos kombinált változata van. Ilyen például az egyszerű oxinitridálás vagy a kísérleti darabokon is alkalmazott karbonitridálás, majd az azt követő oxidációs kezelés, amely a kemény felületi réteg létrehozása mellett a korrózióval szembeni ellenállóképességet is fokozza. Ebben az esetben a karbonitridált darabokat egy túlhevített gőz atmoszférában végzett oxidáló folyamat követi, miáltal a rétegbe szerkezetmódosító oxidok kerülnek [12]. Emellett, az eljárás fő célja a karbonitridálással létrehozott vegyületi kéreg vastagságának a növelése egy felületi oxidréteggel, mivel a korrózióállóságot nagymértékben befolyásolja az ϵ -fázisból álló réteg vastagsága.

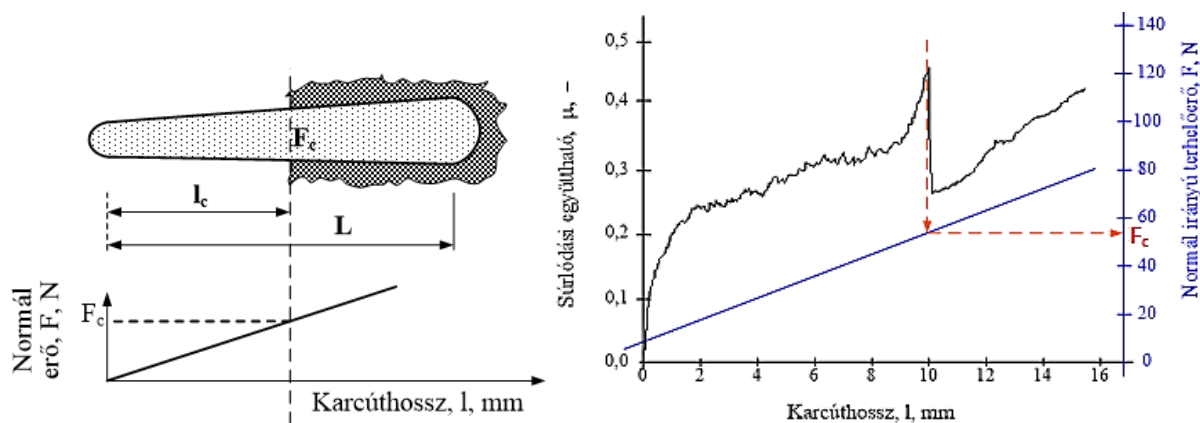
A megfelelő rétegvastagság mellett ügyelni kell arra, hogy a vegyületi réteg porózusságát el tudjuk kerülni, ami a felületi lyukkorrózió veszélyét hordozza magában. Az egyszerű oxinitridálás során olvadt oxid és nitrid keverékébe merítik a mintákat, viszont a folyamat rendkívüli hátránya, hogy mérgező sók használatát igényli. Megoldást nyújthat a problémára egy korszerűbb eljárási mód, a gázközegű nitridálás, ami emberi szervezetre ártalmatlan kémiai anyagokat használ [10, 8].

2.3.4. Sófürdős nitridálás (SN)

A sófürdős nitridálás a különféle nitridálási technológiák egyik olyan változata, ahol különböző, folyékony nitrogénleadó közegeket, sófürdőket használnak, amelynek során kémiai diffúzió zajlik. A technológia előnyei közé tartozik a nagyságrenddel rövidebb hőkezelési idő a gáznitridáláshoz viszonyítva, a gyors hevítési sebesség, valamint a szelektív hőkezelés és hűtés lehetősége. Számos további előnye – jó hatásfokú energiahasznosítás, homogénebb anyagszerkezet, nagyobb elérhető keménység stb. – mellett, egyik jelentős hátránya, hogy az emberi szervezet, illetve a környezet számára ez az eljárás sem biztonságos, mivel a sófürdők cianidokat és cianátokat tartalmaznak. Mindazonáltal cianátmentes eljárásokat is fejlesztenek napjainkban, amelyeknek jóval kíméletesebb a hatása a környezetre.

Ez az eljárás többnyire tömeggyártáshoz ajánlott, mivel a 12 órás, 580 °C körüli hőmérsékletű fürdőt elég körülményes előkészíteni. A rétegmélység többek között függ a kezelési hőmérséklettől, időtől és a kémiai összetételtől.

Fontos megjegyezni, hogy az SN folyamatok hatására a felület mindig porózus lesz, ami kedvezőtlenül befolyásolhatja a későbbi felhasználási lehetőségeket [13, 14].



4. ábra. A növekvő terhelőerejű vizsgálat során felvett karcdiagram, és a bevonat leválásához tartozó F_c kritikus terhelés meghatározása

A károsodás mértékét különféle külső és belső tényezők befolyásolhatják, amelyeket két nagy csoportra oszthatunk: [18, 19].

- A vizsgálat körülményeitől függő; beállítható paraméterek (belső tényezők):
 - a karcolás és a terhelésnövelés sebessége
 - szűrőszerszám geometriája és kopása (alak- és mérethiba)
- A bevonat és a szubsztrát alkotta rendszer tulajdonsága és állapota (külső tényezők):
 - az anyagok típusa és mechanikai tulajdonsága;
 - a bevonat rétegvastagsága, kristályszerkezeti jellemzői;
 - a súrlódási viszonyok;
 - a bevonat és a szubsztrát határfelületének kohéziós viszonyai;
 - a felületi érdesség;
 - a felületkezelés módjától függő, a bevonatban kialakult maradó feszültségek.

Az imént felsorolt paraméterekre nagyfokú figyelmet kell fordítanunk a vizsgálatok reprodukálhatósága, valamint azok eredményeinek releváns összehasonlíthatósága érdekében.

A tipikus károsodási mechanizmusok fajtáinak, illetve megjelenési formáinak mikroszkópi vizsgálata nagymértékben növeli a bevonatrendszerrel a karcvizsgálattal nyerhető információ mennyiségét, és megfelelő kiértékelést, különböző bevonatrendszerek összehasonlításakor pedig az eltérő viselkedés okainak feltárását.

Alapjában véve öt különböző károsodást különböztetünk meg, amelyek jellegzetes megjelenési formáját a 2. táblázat mutatja be [8, 15].

2. táblázat. A karcvizsgálat során előforduló jellegzetes károsodási módok [8, 20]

Károsodási modell – keresztmetszet	Károsodási modell – felülnézet

Az egyes károsodások jellemzői a következők:

- nagy kiterjedésű leválás (spalling):** gyenge adhéziós kötés esetén lép fel. A szerszám előtt, a felületen kialakult nyomófeszültség hatására jön létre a károsodás. Rétegleválás a karc mindkét oldalán, nagy területen jelentkezik, melynek következtében a karc láthatósága kiváló;
- szabályosan ismétlődő felgyűrődések (buckling):** szintén a szerszám előtti, felületen kialakult nyírófeszültség hatására jön létre, viszont jelen esetben az adhéziós kötés erős, így a bevonat nem válik le, hanem köríves irányban továbbterjedő, a felületre

merőleges repedések alakulnak ki. A repedések tövében bomlanak csak fel a kötések; a szerszám mögött belesimul az anyag a karcba;

- c) **szakaszosan ismétlődő, részleges leválás (chipping):** esetén a repedés vagy a felgyűrődés a szerszám előtt képződik és a felületről letöredező darabkák a karcba nyomódnak, a bevonat részleges lepattogzását szabályos távolságokban pedig a repedések idézik elő, ezeket a karc két oldalán észlelhetjük;
- d) **egyenletes, konformális repedések (conformal cracking):** során az erős adhéziós kötés nem szakad fel. A karc nyomvonalán oldalirányban a repedések nem nyúlnak túl, továbbá alakilag megegyeznek a szerszám elülső kontúrjával. A jelenséget a következőképpen definiálhatjuk: a bevonat igyekszik követni a szerszám által okozott felületi bemélyedést, mely hajlító igénybevételt jelent. A bevonat szakítószilárdságát azonban meghaladja a bevonat alsó tartományában ébredő húzófeszültség, ezáltal egyenletes eloszlásban félköríves repedések jelennek meg;
- e) **húzófeszültség okozta egyenletes repedések (tensile cracking):** az előzőhöz hasonlóan alakulnak ki annyi különbséggel, hogy a felület és szerszám között jelentkező súrlódási húzófeszültség által keletkeznek a szerszám mögött, a karc nyomvonalában [18].

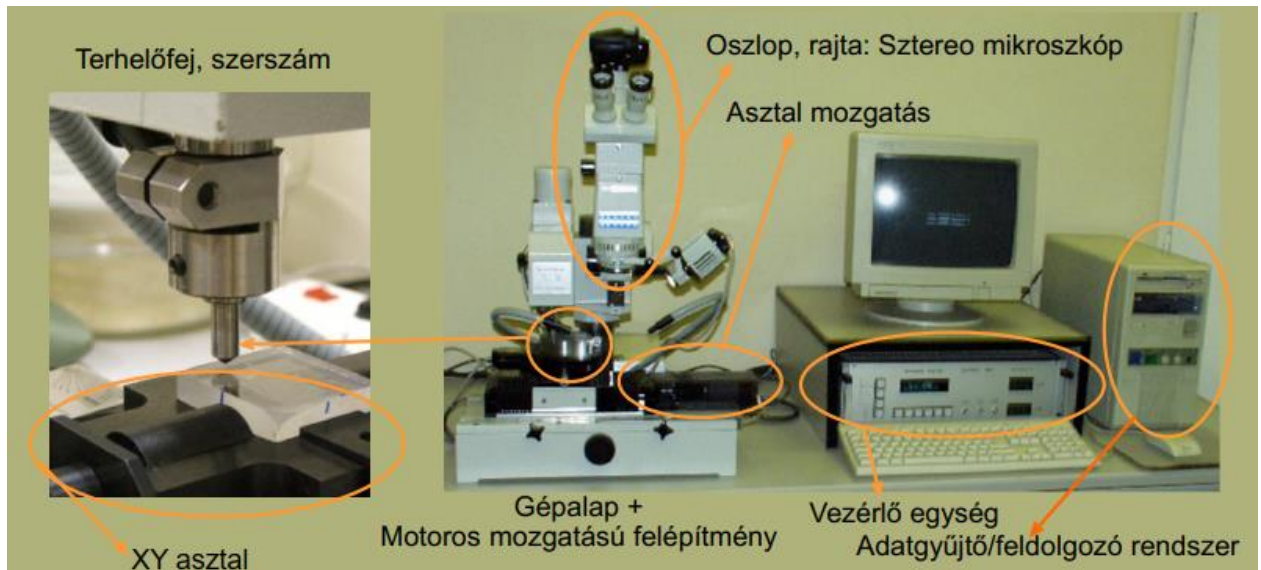
2.4.2. A karcvizsgáló berendezés

A Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetében található, a kísérletsorozat során is használt egyedi fejlesztésű műszerezett karcvizsgáló berendezés fő egységeit a 5. ábra szemlélteti.

A vizsgálat során beállítandó mérési paraméterek a következők:

- Terhelőerő:
 - növekvő terhelés esetén: az F terhelőerő 2 és 150 N közötti értéket vehet fel
 - állandó terhelés esetén: az F terhelőerő 2 és 100 N közötti értéket vehet fel
- Asztalmazás sebessége: állandó, illetve növekvő terhelés esetén is megadhatjuk, hogy milyen sebességgel mozogjon a vizsgálat során az XY asztal;
- Nyomóerő gradiens: növekvő terhelőerejű vizsgálat esetén meghatározza a karcnyom hosszát;
- Karchossz: növekvő terhelőerejű vizsgálat esetén a beállított végnyomóerő, illetve a nyomóerő gradiens határozza meg, állandó terhelőerejű vizsgálat esetén pedig végállaskapcsoló segítségével szabályozható a karcnyom hossza;
- Szerszám: 120°-os kúpszögű, 0,2 mm lekerekítési sugarú HRC gyémánt kúp.

A vizsgálat első lépéseként a próbatestet megfelelően rögzítjük, pozícionáljuk az asztalt, majd a szúrószerszámot annyira közelíthetjük a vizsgálandó felülethez, hogy az éppen ne érjen hozzá. A vezérlő egységen beállítjuk az előzőekben megadott vizsgálati paramétereket a választott vizsgálati módtól függően a növekvő, vagy az állandó terheléses vizsgálatához.



5. ábra. A karcvizsgáló berendezés [17]

A számítógép segítségével grafikus úton követhetjük nyomon a karc húzását a BKTVK szoftver segítségével, amely a karcolási úthossz függvényében ábrázolja a súrlódási együtthatót és a terhelőerőt egy közös diagramban megjelenítve.

A mérési adatokat tárolhatjuk ezen a számítógépen, illetve meg is oszthatjuk, annak érdekében, hogy Excel program segítségével könnyen kiértékelhessük a károsodás számszerű jellemzőit az említett háromféle mért mennyiség adatsorának segítségével.

A berendezés tartozéka egy beépített sztereo-mikroszkóp, amelynek segítségével azonnal elvégezhetők a morfológiai vizsgálatok. Az azonnali vizsgálat mellett, amely maximum (25×) nagyítást tesz lehetővé, a karcokat jellemzően optikai mikroszkóppal vagy pásztázó elektronmikroszkóppal is szokás vizsgálni, így még több képi információhoz juthatunk.

3. Kísérleti munka

3.1. A vizsgált minták alapanyaga, térfogati hőkezelése és felületkezelése

A kísérleteink során használt minták szakmai együttműködés keretében több intézmény (Széchenyi István Egyetem, Miskolci Egyetem) által közösen végrehajtott, többlépcsős kísérletsorozatban készült és felhasznált próbatestek voltak. Ennek következtében a minták alapanyagát és felületkezelésének paramétereit az említett szakmai előzmények során született korábbi munkákra [21, 1, 2, 8] hivatkozva mutatjuk be.

A vizsgált próbatestek alapanyaga kétféle technológiával előállított maraging acélból készült. Az egyik esetben egy lézerszinterelt (MS1) por alapanyag, a másik esetben egy hagyományos módon előállított rúdanyag volt (W722) a vizsgált szerszámacél anyaga.

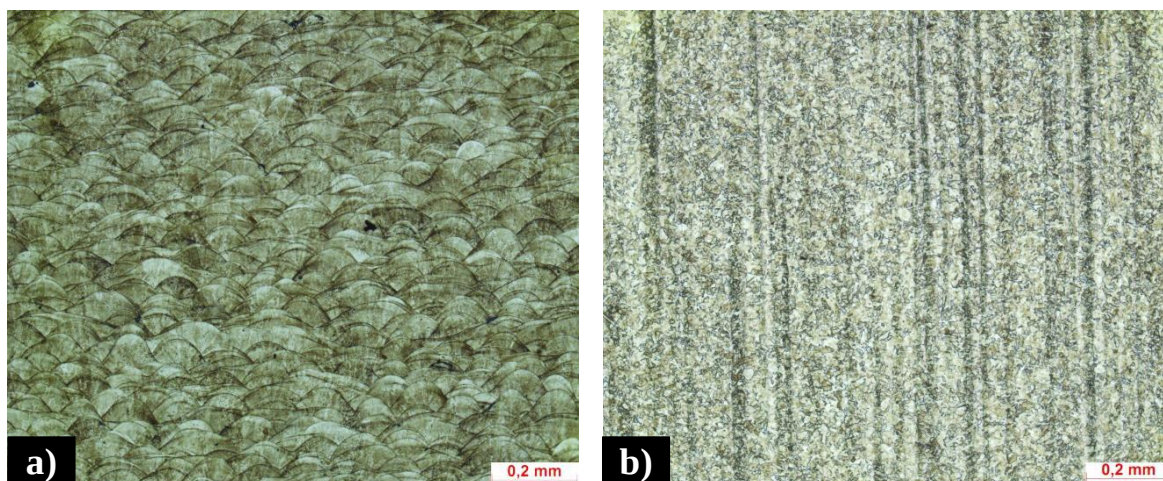
A próbatestek alapanyagának vegyi összetételét a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat. A vizsgált szerszámanyagok névleges vegyi összetétele [2]

Acélpor (maraging acél)								
MS1 (1.2709) X3NiCoMoTi18-9-5								
Ni %	Co %	Mo %	Ti %	Al %	Cr	C	Mn, Si	P, S
17-19	8,5-9,5	4,5-5,2	0,6-0,8	0,05-0,15	<0,15	<0,03	<0,1	<0,01
Maraging acél / Bohler-Uddeholm								
W722 VMR (~1.2709) X3NiCoMoTi18-9-5								
Ni %	Co %	Mo %	Ti %	Al %	Mn	C	Si	P, S
18,5	9	5	0,7	0,1	<0,1	<0,005	<0,05	<0,01

Az 6. ábra a metallográfiai vizsgálat során kapott képekkel szemlélteti a lézerszinterelés során létrejövő mikroszerkezetet, ahol a lézerolvasztás határain jellegzetes félkör alakú tartományok alakulnak ki.

Ezzel szemben a hagyományos acélgyártási eljárással készült minták mikroszerkezetében egyértelműen felismerhető a gyártás során alkalmazott hengerlés iránya.



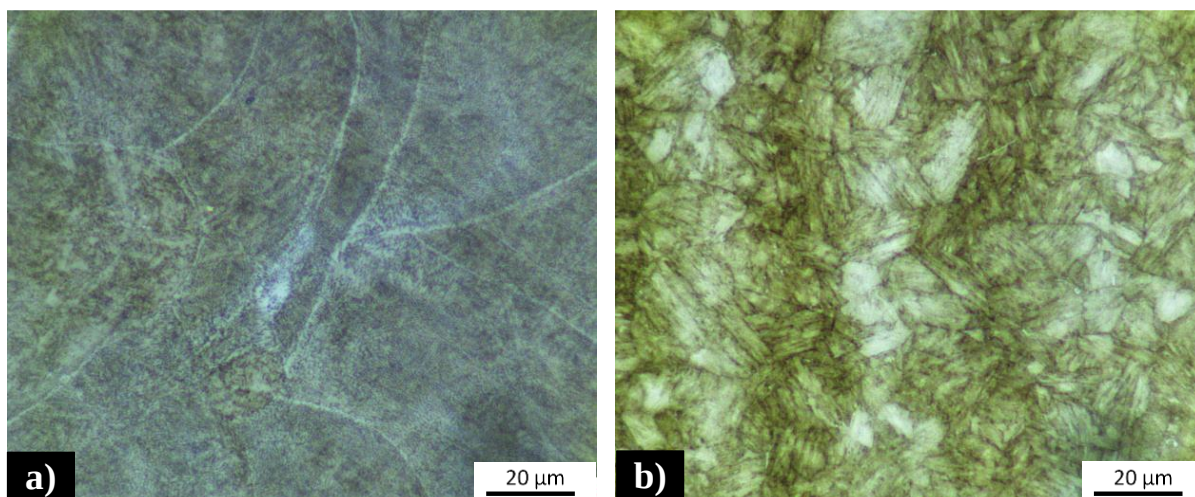
6. ábra. Optikai mikroszkópos felvétel hőkezelés előtt (a) az MS1 lézerszinterelt anyag és (b) a hagyományosan előállított W722 rúdanyag mikroszerkezetéről [2]

Az egyes mintákon alkalmazott hőkezelési műveleteket és azok technológiai paramétereit a 4. táblázat foglalja össze.

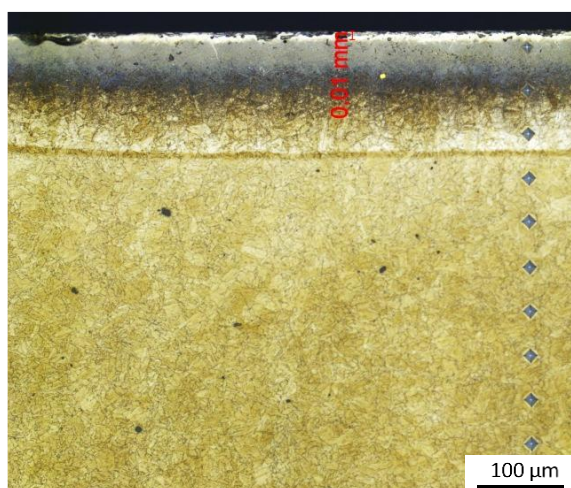
4. táblázat. A vizsgált anyagok hő- és felületkezelésének technológiai paramétereit [2, 21]

Hő- vagy felületkezelés	Az állapot jelölése	Alap-anyag	Hőmérséklet [°C]	Kezelési idő, [h]	Alkalmazott közeg
Kiválásos keményítés	KK	MS1, W722	500	4	levegő
Oxinitridálás – gáznitridálás – oxidálás	NO	W722	550 450	6,5 1 ($\Sigma 13$ h= hevítés + tartás + hűtés)	Gázkeverék nitridáláshoz: – 50% N ₂ , 4 m ³ /h, – 45% NH ₃ , 3,7 m ³ /h, – 5% CO ₂ , (80 l/h) Oxidálás gőzkamrában: 6 l/h -7 l/h víz
Sófürdős nitridálás	SN	MS1, W722	A kezelési adatokat a gyártó nem bocsátotta rendelkezésre.		
WC-Co bevonatolás	WC	MS1, W722	400	–	–

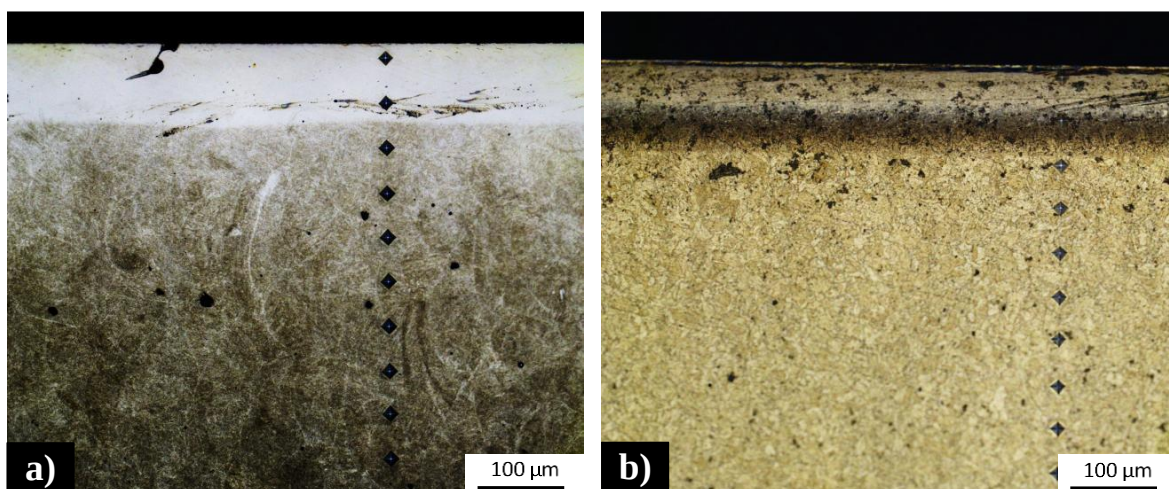
A kiválásosan keményített próbatestek mikroszerkezete a 7. ábrán, a sófürdőben nitridált, illetve oxinitridált minták mikroszerkezete a 8. és a 9. ábrán, míg a WC-Co keménységbevonatos minták szerkezete a 10. ábrán látható. Fontos megjegyezni, hogy a mikroszerkezeti felvételek a fejezet elején említett kutatási együttműködés keretében egy korábbi munka kapcsán készültek. Mivel a jelen TDK dolgozatban végrehajtott karcvizsgálatokat ugyanazokon a mintákon hajtottuk végre, mint amelyeken azok a kopásvizsgálati eredmények születtek, amelyekkel a most kapott karcvizsgálati eredményeket is összevetjük, ezért indokoltnak láttuk az eredeti szövetszerkezeti felvételeket bemutatni.



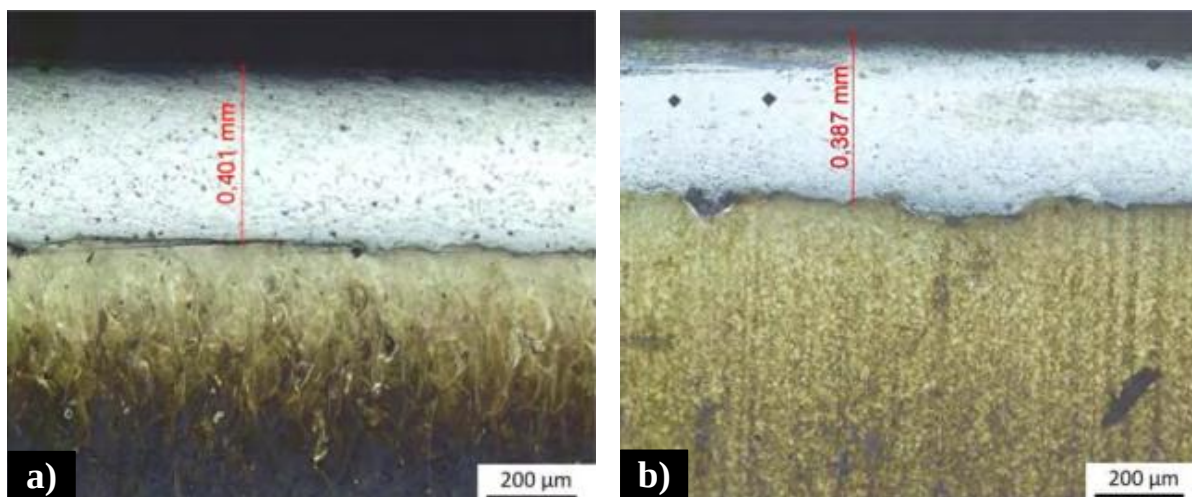
7. ábra. A kiválósan keményített próbatestek optikai mikroszkópos mikroszerkezeti felvételei (Marószers: Nitál: 2%) a) MS1 lézerszinterelt; b) W722 rúdanyag [2]



8. ábra. A W722 rúdanyagból készült oxinitridált próbatest mikroszerkezetének optikai mikroszkópos felvétele (Marószers: Nitál 2%) [2]

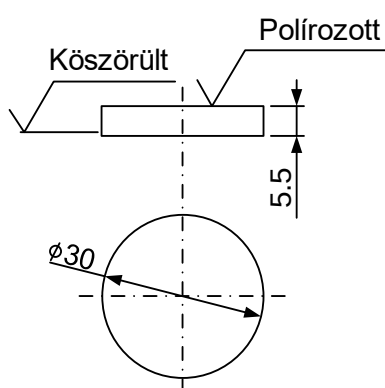


9. ábra. A sófürdőben nitridált próbatestek mikroszerkezeti felvételei (Marószers: Nitál 2%); a) MS1 lézerszinterelt; b) W722 rúdanyag [2]



10. ábra. A WC-Co bevonattal ellátott minták mikroszerkezeti felvétele
a) MS1 lézerszinterelt; b) W722 rúdanyag [2] (Marószér: Nitál 4%);

Az együttműködő partnerek által a korábbiakban elvégzett tribológiai vizsgálatokhoz, valamint a jelen TDK munka keretében általunk tervezett karcvizsgálatok megbízható elvégzéséhez polírozott felületű minták szükségesek, ezért a hőkezelést követően a mintákat köszörülték és polírozták. A minták 5,5 mm vastagságú és $\phi 30$ mm átmérőjű korong alakú próbatestek voltak, amelyeket a 11. ábra szemléltet.



11. ábra. A polírozott vizsgálati minták geometriája és felületi minősége [22]

3.2. Vizsgálati mátrix

Annak érdekében, hogy a jelen TDK munka keretében felhasznált próbatesteken a kooperációs kutatás során végzett kezelések és különféle időben, és helyszínen, különböző szerzők által végrehajtott vizsgálatok áttekinthetőek legyenek, ezeket az információkat egy összefoglaló táblázatban tüntetjük fel.

Ebben egyértelműen elkülöníthetők az általunk elvégzett vizsgálati feladatok a korábban végzett kezelésektől és előzetes mérések eredményeitől.

5. táblázat. Vizsgálati mátrix

Minta sorszáma		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
A szubsztrát anyaga		MS1	W722	MS1	W722	MS1	W722	W722
A szubsztrát és a felület állapota		Kiválásos keményítés		Kiv. kem. + WC-Co PVD bevonatolás		Kiv. kem. + sófürdős nitridálás		Oxi-nitridálás
A minta azonosítójele		MS1RE F	W722RE F	WC		SN		NO
Saját vizsgálatok	Karc-vizsgálat I.	Karcvizsgálat, súrlódási együttható/terhelőerő-karcúthossz diagramok felvétele növekvő terhelővel (F=2-150 N) (2karc/minta)						
		Karcok optikai mikroszkópos panoráma felvétele (9 részlet /panoráma-kép)						
	Karc-vizsgálat II.	Karcvizsgálat, súrlódási együttható/terhelőerő-karcúthosszdiagramok felvétele állandó terhelőerővel F= 50 N; 2-2 db karc/minta						
		Karcvizsgálat, súrlódási együttható/terhelőerő-karcúthosszdiagramok felvétele állandó terhelőerővel F= 100 N; 2-2 db karc/minta						
		Karcnyom szélesség értékek meghatározása és karcmorfológia elemzés optikai mikroszkópos vizsgálatokkal F= 50 N terhelésre						
		Karcnyom szélesség értékek meghatározása és karcmorfológia elemzés optikai mikroszkópos vizsgálatokkal F= 100 N terhelésre						
Megelőző kezelések és vizsgálatok az együttműködő partnereknél, amelyek eredményeit a TDK dolgozatban felhasználtuk	Mintaelőkészítés	Lézerszinterelés, hőkezelés, mintakészítés						
	Minták jellemzése	Felületelőkészítés						
		Szövetszerkezet meghatározása, különböző nagyítású optikai mikroszkópos felvételek készítése						
		Felületkezelések után kialakult felületi rétegek vastagságának meghatározása						
		Felületi érdesség meghatározása profilometriai vizsgálatokkal						
		Különböző terhelőerővel végzett Vickers keménységmérés						
		Ball-on-disc kopásvizsgálatokkal kapott kopásnyomok szélessége						

3.3. A mintadarabok felületi rétegének jellemzői

A mintadarabok felületi rétegének jellemzői fontos információt képviselnek, amelyeket a tervezett karcvizsgálati eredmények értékelésekor figyelembe kell venni.

A felületi rétegek jellemzése a kutatás korábbi stádiumában már minden vizsgálati mintán megtörtént, amelyet a partnerek végeztek el. Ezeket az eredményeket (keménység, rétegvastagság, felületi érdesség) kiegészítve az ugyancsak korábbi kutatások során végzett tribológiai vizsgálatok eredményeivel (kikopott térfogat) összefoglalóan a 6. táblázat tünteti fel.

6. táblázat. A mintadarabok felületi rétegének jellemzői (saját kísérleti munka: műszerezett karcvizsgálatok)

Alapanyag	W722				MS1		
Bevonat	REF	WC	SN	NO	REF	WC	SN
Felületi keménység, HV1	535	1154	668	749	374	1067	667
Réteg / bevonat vastagság, μm	-	387	138,5	161	-	401	78,4
Vegyületi kéreg vastagsága, μm	-	-	13	11,8	-	-	5,6
Kopásnyom szélesség, μm	654	nem mérhető	499	465	738	422	571
Felületi érdesség, μm	0,02	0,17	0,58	0,28	0,04	0,19	0,49
Kikopott térfogat, mm^3	0,131	nem mérhető	0,037	0,038	0,142	nem mérhető	0,046

A TDK dolgozat keretében végzett karcvizsgálatokat kétféle terhelési módban hajtottuk végre: növekvő és állandó terhelőerővel.

A növekvő terheléses vizsgálatok során felvett súrlódási együttható/terhelőerő vs. karcúthossz diagramok alapján az egyes felületi rétegek karcolással szembeni viselkedését elsősorban kvalitatív módon tudjuk összehasonlítani. Az ilyen terheléssel felvett karcnyomok optikai mikroszkópos panoráma felvételeinek morfológiai vizsgálatával pedig a különféle károsodási mechanizmusokra tudunk következtetni.

A különböző terhelési szinteken végrehajtott állandó terhelőerejű vizsgálatok során felvett súrlódási együttható diagramok alapján a választott terhelés mellett kialakuló jellemző súrlódási együtthatók értékét határozhatjuk meg, továbbá a karcnyomok szélességéből az adott terhelési szinten bekövetkező károsodások mértékére tudunk következtetni, és meg tudjuk ítélni, hogy az adott terhelési szint a bevonat épségét milyen mértékben veszélyezteti, ami alapján a vizsgált bevonatok karcolással szembeni ellenállása számszerűen is rangsorolható.

3.4. Saját kísérleti munka: műszerezett karcvizsgálatok

3.4.1. Növekvő terhelőerővel végzett karcvizsgálatok

3.4.1.1. Előkísérletek

A méréseket a növekvő terhelőerejű karcvizsgálattal kezdtük, amelyben a vizsgálandó próbatesteken 2-2 darab karcot húztunk, annak céljából, hogy meg tudjuk állapítani a vizsgálat során alkalmazandó terhelőerő tartományt, azaz a legmegfelelőbb minimális és maximális terhelőerőt. Minimális terhelőerőnek olyan értéket választottunk, amely még éppen nem okoz

károsodást a felületen, maximálisnak pedig olyat, amely egyértelműen roncsolja a bevonatot minden bevonattípus esetében.

Ehhez többféle maximális terheléssel növekvő terhelőerejű előkísérletet végeztünk, és megállapítottuk, hogy az összes mintatípus – WC bevonatos, sófürdőben nitridált, és oxinitridált minta – esetén a berendezésen elérhető maximális terhelési tartományt ki kell használni, annak érdekében, hogy minden esetben elérjük a felületkezelt réteg teljes károsodását, azaz a karctű az alapanyagig hatoljon.

Ennek megfelelően a növekvő terhelőerejű vizsgálatok terhelési tartományát: $F = 2 \div 150$ N-ra választottuk.

3.4.1.2. *Célkísérletek növekvő terhelőerejű karcvizsgálatokkal*

A növekvő terhelőerővel végzett karcvizsgálatok során kapott súrlódási együttható/normálerő vs. karcúthossz diagramokat a keletkezett karcnyomok optikai mikroszkópos panoráma felvételeit teljeskörűen az 1. számú_melléklet tartalmazza.

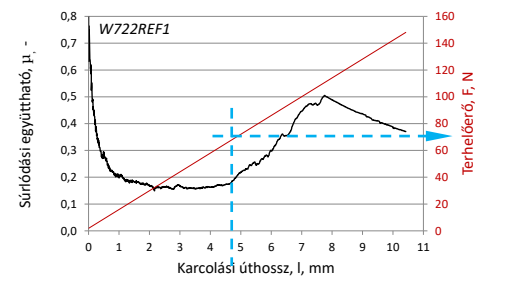
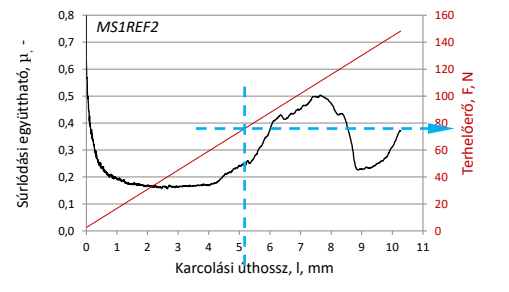
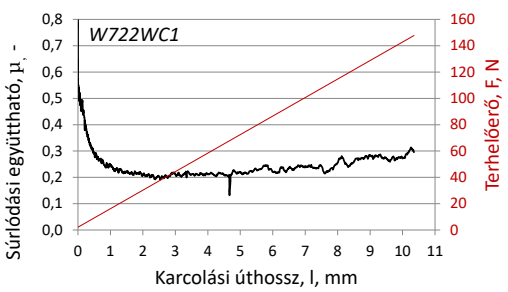
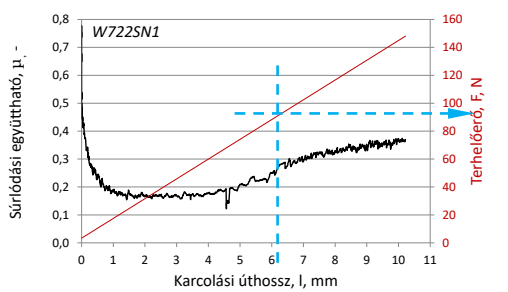
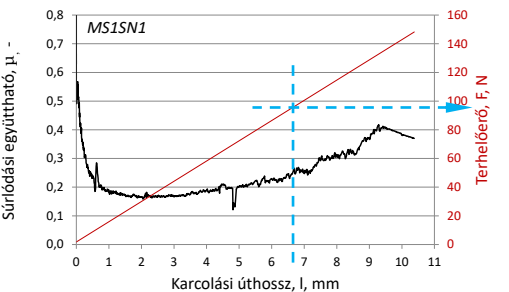
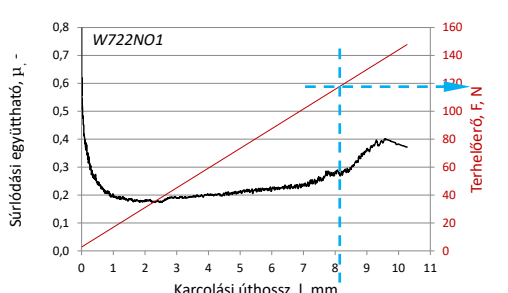
Ezek közül a különböző állapotokra vonatkozóan – alapanyag, bevonatolt minta, sófürdőben nitridált és/vagy oxinitridált minta – egy-egy jellemző diagramot kiválasztottunk és azokat egyedileg elemeztük, majd egy közös diagramban megjelenítve is összehasonlítottuk.

Az egyedi diagramok a 7. táblázatban láthatók.

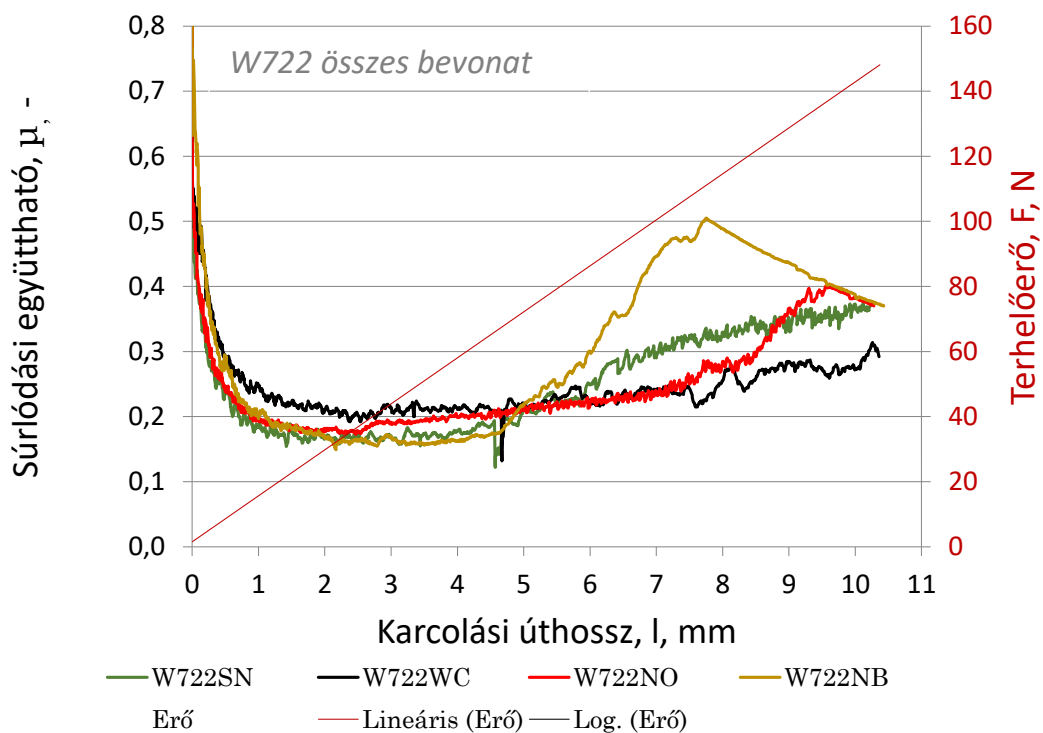
A diagramok tanulmányozásával a következő megfigyelések tehetők:

- A referencia anyagra (W722REF) vonatkozó súrlódási együttható diagram a karcúthossz közel felénél, $l=4,8$ mm-nél meredek emelkedést mutat, itt a gyémánt karctű már jelentősen behatolt a kiválasztott keményített alapanyagba, körülbelül $F=70$ N terhelőerő hatására.
- A WC-Co bevonatos minta esetén a bevonat leválása a teljes terhelési tartományban csak részlegesen történik meg, és nem lép fel a 4. ábrán értelmezett olyan F_c kritikus terhelés, amelyik a bevonat teljes leválást okozná. Ugyanakkor, már viszonylag kisebb terheléseknél, kb. $l=4,5$ mm karcúthossznál, ami $F=75$ N terhelésnek felel meg, a súrlódási együttható jelentős ingadozást mutat, ami a bevonat részleges sérülésére, és a kemény bevonatból levált kopási törmelék jelenlétére utal. Ez abrazív kopást okoz és a súrlódási együtthatót megnöveli.
- Az oxinitridált minta felületének karcolásakor felvett diagram a súrlódási együttható lassú, fokozatos növekedését mutatja, ami a felületi karcolásos sérüléssel szembeni kedvezőbb ellenállásra utal.
- A sófürdőben nitridált darabok esetén pedig az oxinitridált darabokhoz képest kisebb terhelésnél következik be a felületi réteg sérülése. A kemény felületi réteg (nitridált kéreg vegyületi rétege) ebben az esetben károsodik a legkönnyebben, erre utal, hogy a súrlódási együttható ingadozás ennél a mintánál kezdődik meg a leghamarabb.
- A leírt sajátosságok mindkét alapanyag esetében jellemzőek.

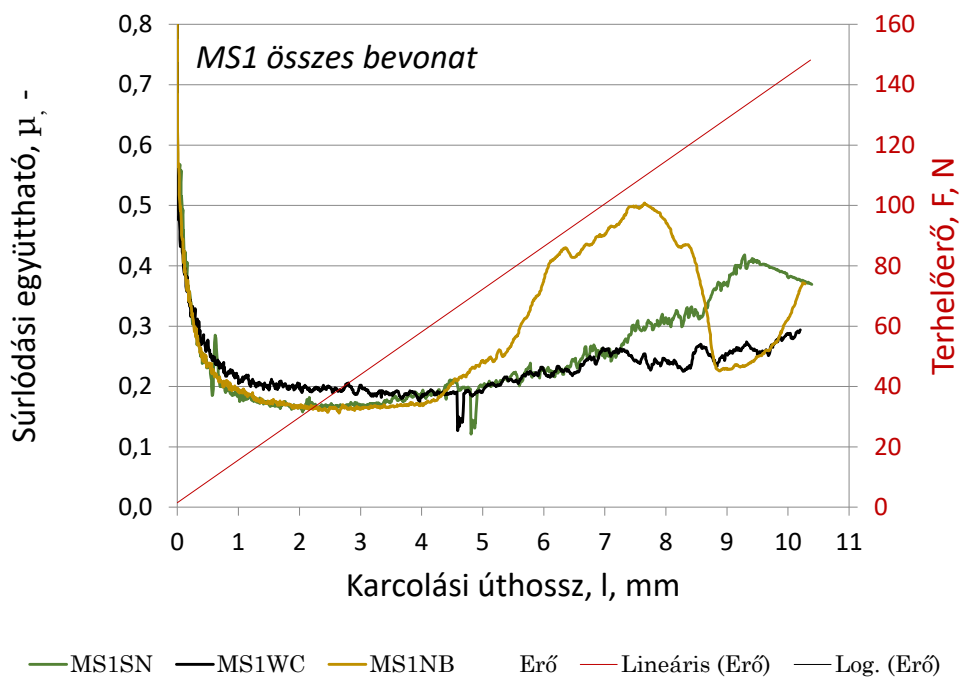
7. táblázat. A kétféle alapanyag különböző módon kezelt felületi rétegének egy-egy jellegzetes karcdiagramja

Álla- pot	Jellemző diagram W722	Jellemző diagram MS1
REF		
	$F_c = 65$ és 70 N	$F_c = 72$ és 75 N
WC- Co		
	$F_c > 150$ N	$F_c > 150$ N
SN		
	$F_c = 90$ N	$F_c = 95$ N
NO		nincs vizsgálati minta
	$F_c = 115$ N	

Az adott alapanyagon – W722 és MS1 – különböző felületkezeléssel létrehozott rétegek karcdiagramjait közös diagramban mutatja be a 12. és a 13. ábra.



12. ábra. Növekvő terhelőerejű karcvizsgálatok diagramjai a W722 alapanyag minden vizsgált felületváltozatán



13. ábra. Növekvő terhelőerejű karcvizsgálatok diagramjai az MS1 alapanyag minden vizsgált felületváltozatán

Összességében megállapítható, hogy a növekvő terhelőerejű karcvizsgálatok során a felületkezelt darabok minden esetben jobban ellenállnak a sérülésnek, mint a felületkezelés nélküli, azaz kiválasosan keményített darabok.

Az alapanyagok tekintetében nincs kimutatható különbség a hagyományos rúdanyagon és a lézerszinterelt mintákon azonos módon kialakított felületi rétegek viselkedésében, tehát mind a W722, mind az MS1 szubsztrát anyag esetén hasonló volt a karcolással szembeni ellenállás, ha azonos típusú (azonos felületkezeléssel készült) felületi réteget vizsgáltunk.

A növekvő terhelőerejű karcolással szemben a legnagyobb ellenállást, ahogy arra számítottunk, a nagy keménységű keményfém bevonattal ellátott próbatestek mutatták mindkét alapanyag tekintetében. A karcolásnak másodikként legjobban ellenálló minta a W722 rúdanyag volt oxinitridált állapotban, amelynél a kritikus terhelőerő 115 N volt. Az oxinitridált állapotot minta hiányában csak a hagyományos rúdanyagon tudtuk megvizsgálni.

A karcolásnak legkevesébé ellenálló felületkezelés – a vizsgáltak közül – a sófürdős nitridálás volt. Az alapanyagot tekintve az MS1 lézerszinterelt darab F_c kritikus terhelése kicsit nagyobbak bizonyult 95 N volt, a rúdanyagon mért 90 N-nal szemben, de ez a különbség nem nevezhető szignifikánsnak, különös tekintettel a rendelkezésre álló korlátozott mérési felületre és ennek következményeként a viszonylag kis számú mérési eredményre.

Összeségében elmondható, hogy minden felületkezelt darab jelentősen jobb karcállóságot mutatott a kezeletlen alapanyaghoz képest.

A nem saját mérésből származó HV1 értékeket és a saját kísérletekből meghatározott F_c értékeket – amelyeket számszerűen a 8. táblázat mutat be – közös diagramban ábrázolva (14. ábra) még szembeűnőbb az az összefűggés, amely a két jellemző között kimutatható.

8. táblázat. A HVI felületi keménység, és a bevonat leválását okozó F_c kritikus terhelés számszerű értékei

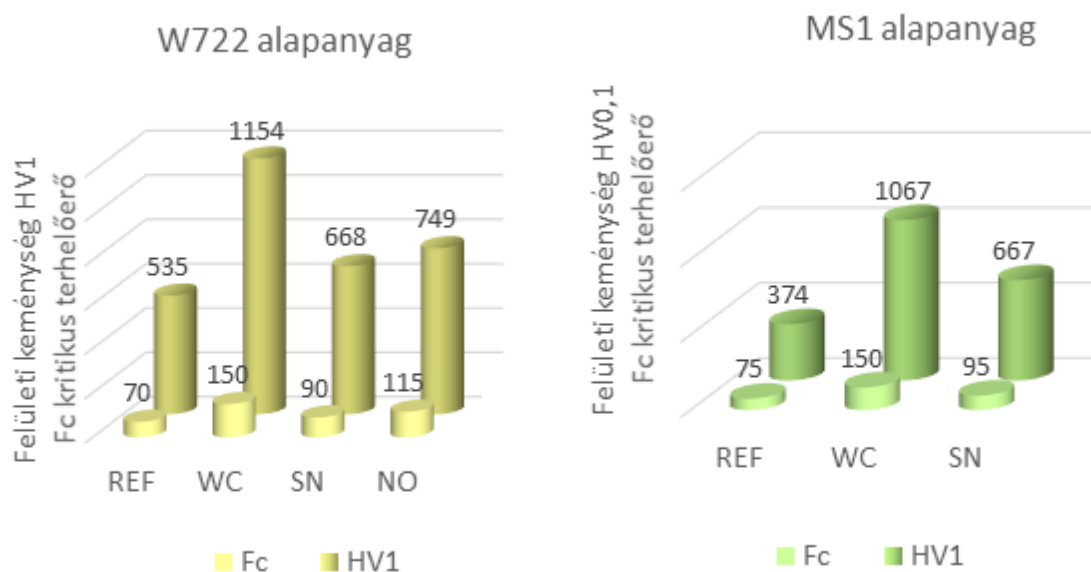
A vizsgált jellemző	Alapanyag, és kezelési állapot						
	W722				MS1		
	REF	WC	SN	NO	REF	WC	SN
Felületi keménység, HV1	535	1154	668	749	374	1067	667
A bevonat leválását okozó terhelés, F _c	70	150	90	115	75	150	95

A 14. ábrából könnyen belátható, hogy a karcolással szembeni ellenállás és a felületen mért keménység szoros kapcsolatban áll egymással. Megállapítjuk tehát, hogy a vizsgóalat minták esetében a nagyobb keménységű felületek karcállósága egyértelműen jobb volt.

Ugyanakkor, a két alapanyag érzékenysége az egyes igénybevételekkel szemben eltérő.

Míg ugyanolyan felületkezelési állapotban a keménységi értékek a W722 rúdanyag esetében voltak magasabbak, addig az F_c kritikus erő az MS1 lézerszinterelt anyagnál mutatkozott

nagyobbak. Ebből arra következtethetünk, hogy a lézerszinterelt anyag szerkezeti sajátosságai a karcolással szembeni ellenállás tekintetében valamivel kedvezőbbek lehetnek.



14. ábra. Az F_c kritikus terhelőerő és a felületi keménység közötti összefüggés grafikus vizsgálata

3.4.2. Állandó terhelőerővel végzett karcvizsgálatok

Az állandó terhelőerejű vizsgálatok terhelését a növekvő terhelőerejű vizsgálatok alapján úgy választottuk meg hogy a kisebb terhelőerő érték, amelyet $F=50$ N-ra választottunk, lehetőleg ne okozzon egyértelmű károsodást a bevonatokban. A nagyobb terhelésnél pedig, amelyet $F=100$ N-ra választottunk, a terhelés szintje olyan mértékű legyen, amely döntően már károsodáshoz vezet. Így a kisebb és nagyobb terheléssel elvégzett vizsgálatokból számos hasznos megfigyelés tehető a különféle módon kezelt felületek karcállósága tekintetében.

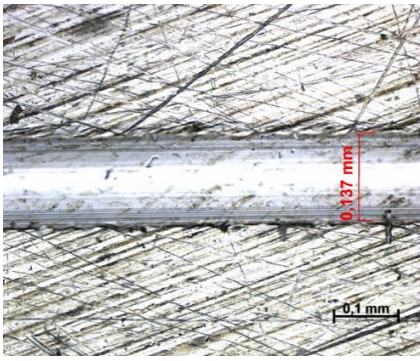
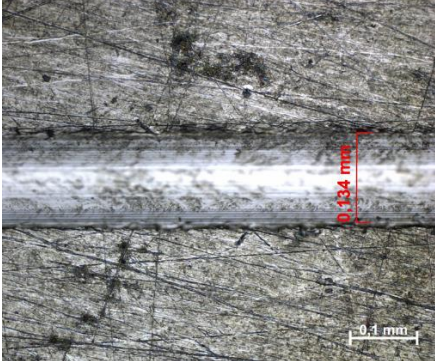
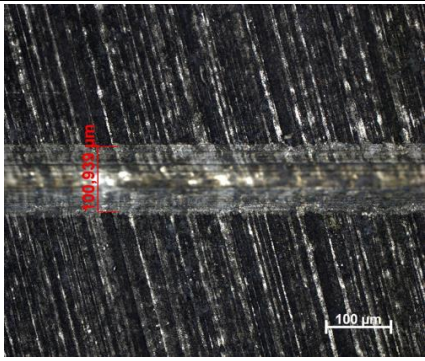
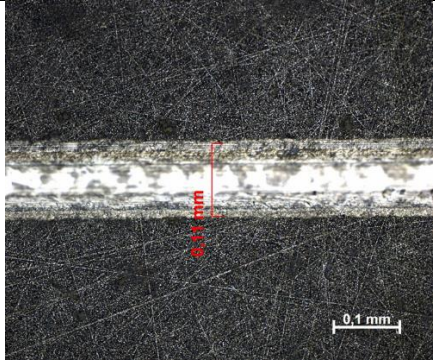
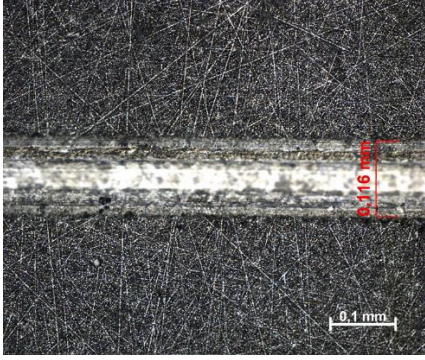
A kétféle terhelőerővel végzett vizsgálatok diagramjai teljeskörűen az 2.számú_melléklet és 3.számú_melléklet nevű csatolmányokban található. Ezeket itt a dolgozatban részletesen nem mutatjuk be, csak a diagramokból levonható következtetéseinket összegezzük.

3.4.2.1. Megfigyelések az $F = 50$ N erővel végzett vizsgálatok karcdiagramjai alapján

A különféle módon felületkezelt mintákon $F=50$ N terheléssel létrehozott karcnyomok egy-egy jellemző felvétele látható a 9. táblázatban. A minták viselkedését ennél a terhelésnél a következők jellemzik:

A bevonat nélküli, kiválasosan keményített állapotú mintákon az $F = 50$ N állandó terhelés kis igénybevételt képvisel, nem bontja meg a felületi réteg integritását. A kiválasosan keményített acél próbatest és a gyémánt karcú párosítás egy kicsiny és gyakorlatilag állandó, $\mu \sim 0,2$ súrlódási együtthatóval jellemezhető érintkezési állapotot eredményez mindkét alapanyag, azaz mind a lézerszinterelt (MS1), mind a hagyományos rúdanyag (W722) esetében.

9. táblázat. Az $F=50\text{ N}$ terheléssel létrehozott karcnyomok jellegzetes mikroszkópi felvételei

Állapot	W722	MS1
REF		
	Karcnyom szélesség: 137 μm	Karcnyom szélesség: 134 μm
WC-Co		
	Karcnyom szélesség: 81 μm	Karcnyom szélesség: 120 μm
SN		
	Karcnyom szélesség: 100 μm	Karcnyom szélesség: 110 μm
NO		nincs vizsgálati minta
	Karcnyom szélesség: 116 μm	

Ugyanez a kicsiny állandó terhelés a nagy keménységű, jóval ridegebb WC kerámia bevonaton a felület kismértékű sérülését okozza. A súrlódási együttható enyhén ingadozik a $\mu \approx 0,21-0,23$ érték körül, ami keletkező finom karcolási törmelék abrazív hatásának tulajdonítható. A viselkedés mindkét alapanyag esetében hasonló.

A sófürdős nitridálás szemmel láthatóan ellenállóbbá tette a felületet a karcolásos igénybevétellel szemben, a súrlódási együttható átlagos értéke a hagyományos rúdanyag esetén $\mu \approx 0,18$, míg a lézerszinterelt minta esetén $\mu \approx 0,17$, és ez utóbbi esetben az ingadozás mértéke is kisebb, ami azt jelzi, hogy ezen az alapanyagon a bevonat kevésbé sérülékeny, kevesebb, vagy finomabb törmelék keletkezik.

A W722 rúdanyag esetében lehetőségünk volt az oxinitridálás hatását is megvizsgálni. Az azonos alapanyagon sófürdős nitridálással létrehozott felületi réteghez képest az oxinitridált mintákon a súrlódási együttható kismértékben nagyobb volt, mint a sófürdőben nitridált mintáké. Ez alapján valószínűsíthető, hogy oxinitridálás után az adott alapanyag nagyobb mértékben károsodik, és kevésbé áll ellen a karcolásnak.

Összességében az $F = 50 \text{ N}$ állandó terhelésű karcoláskor – ahogyan azt vártuk, a célszerűen megválasztott terhelési szint alapján – a WC bevonatok és a felületkezeléssel létrehozott rétegek nem sérültek számottevően. A bevonat nélküli, azaz a felületkezelés nélküli alapanyaghoz képest ez utóbbiak jóval kedvezőbben viselkednek, a sérülés mértéke kisebb, és a szubsztrát anyagától függetlenül közel hasonló.

3.4.2.2. Megfigyelések az $F=100 \text{ N}$ erővel végzett vizsgálatok karcdiagramjai alapján

Az $F = 100 \text{ N}$ állandó normál irányú karcterhelés hatására a különböző állapotú felületek viselkedését a következők jellemzik:

A bevonat nélküli, kiválasztott keményített állapotú mintákon a finoman ráadott, állandó terhelés ellenére, a súrlódás megkezdésekor azonnal megsérül a felület, és jelentős mennyiségű törmelék képződik, ami abrazív módon munkálja meg, koptatja a felületet. Ez a súrlódási együttható gyors ütemű és nagymértékű növekedésében jelenik meg, amely mindkét alapanyag esetén eléri a $\mu=0,5$ értéket.

A WC kerámia bevonat mindkét alapanyagon, mind a lézerszinterelt (MS1) mind a hagyományos rúdanyag (W722) esetén, állandó, $\mu \approx 0,24$ értékű súrlódási együttható alakul ki, amely a bevonat jellemzője. A diagram ingadozó jellegéből látható, hogy a bevonat ennél a terhelésnél már sérül, de a súrlódási együttható nem növekszik, azaz a bevonat nem válik le.

A sófürdős nitridálás szintén kedvezően hat az alapanyag karcolással szembeni ellenállására, mivel annak sérülése a kezeletlen állapothoz képest (lásd referencia minta) lassabban következik be. A kedvezőbb viselkedés különösen a lézerszinterelt minta esetében figyelhető meg, ahol a karckárosodás és ezzel súrlódási együttható növekedési üteme láthatóan lelassult. A maximális súrlódási együttható értéke $F = 100 \text{ N}$ terhelésnél, az alapanyaghoz képest ($\mu \approx 0,38-0,40$) jelentősen kisebb volt, értéke az SN felületkezelés után mindkét alapanyag esetében hasonló, $\mu \approx 0,27-0,28$ volt.

A rúdanyag esetében lehetőségünk volt az oxinitridálás hatását is megvizsgálni. Az azonos alapanyagon sófürdős nitridálással létrehozott felületi réteghez képest a károsodás üteme lassabb, de a kialakuló maximális sűrűlódási együttható, hasonló, azaz $\mu \approx 0,3$.

Összességében az $F = 100 \text{ N}$ állandó terhelésű karcolás hatására a bevonatok és a felületkezeléssel létrehozott rétegek már sérülést szenvednek, de a bevonat nélküli, illetve kezeletlen alapanyaghoz képest ez utóbbiak jóval kedvezőbben viselkednek, a sérülés üteme lassabb, és a szubsztrát anyagától függetlenül közel hasonló.

Az állandó terhelőerővel végzett vizsgálatok során bekövetkező károsodás mértékét az optikai mikroszkópos felvételek segítségével meghatározott karcnyom szélességek alapján számszerűen is becsülhetjük, amelyeket a 10. táblázat szemléltet.

10. táblázat. Optikai mikroszkópos úton mért karcnyom szélesség értékek ($F=50$; $F=100 \text{ N}$)

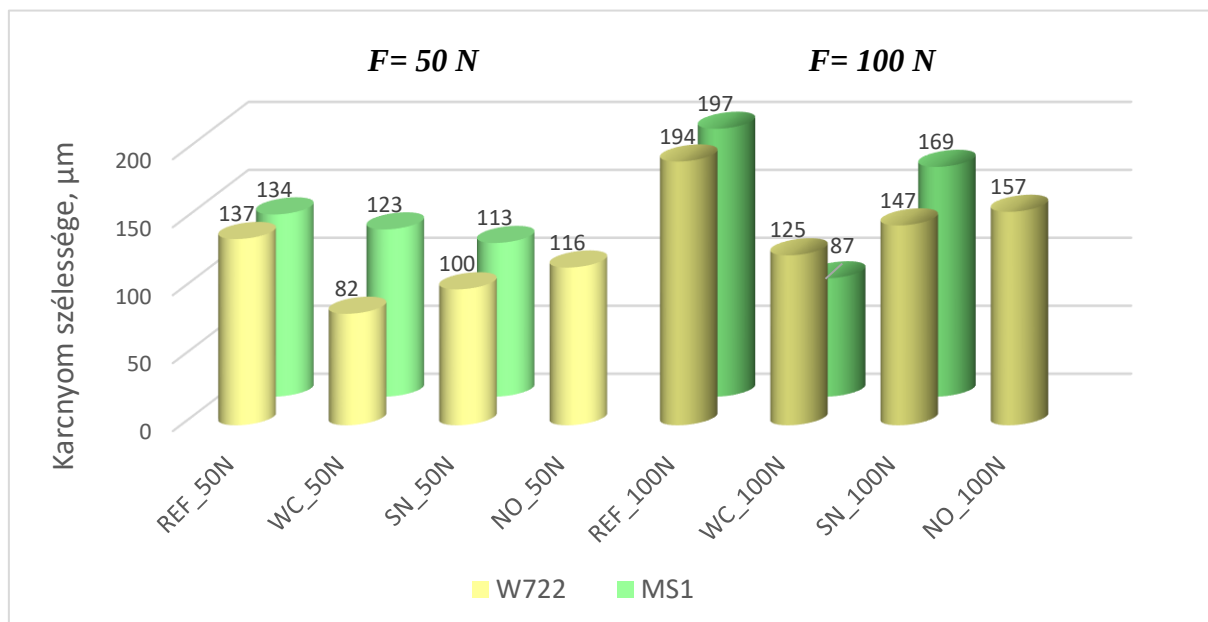
Alap- anyag	Bev. típusa	Karcnyom jele	Karcnyom szélessége, $F= 50 \text{ N}$				Karcnyom jele	Karcnyom szélessége, $F= 100 \text{ N}$			
			mért érték, t , μm	Átlag, μm	Szórás, μm	Varianci a eh., %		mért érték, t , μm	Átlag, μm	Szórás, μm	Variancia eh., %
W722	Bevonat nélküli	W722WCB5	137	137	0	0,0	W722WCB3	198	194	6	2,9
		W722WCB6	137				W722WCB4	190			
	WC	W722WC5	81	82	1	0,9	W722WC3	125	125	1	0,6
		W722WC6	82				W722WC4	124			
	SN	W722SN5	100	100	0	0,0	W722SN3	147	147	0	0,0
		W722SN6	100				W722SN4	147			
	NO	W722NO5	116	116	0	0,0	W722NO3	158	157	2	1,4
		W722NO6	116				W722NO4	155			
MS1	Bevonat nélküli	MS1WCB6	134	134	0	0,0	MS1WCB4	195	197	3	1,4
		MS1WCB7	134				MS1WCB5	199			
	WC	MS1WC8	120	123	4	2,9	MS1WC7	89	87	3	3,3
		MS1WC9	125				MS1WC7_2	85			
	SN	MS1SN5	110	113	4	3,8	MS1SN3	169	169	0	0,0
		MS1SN6	116				MS1SN4	169			

A 10. táblázatban közölt számszerű értékeket jobban összehasonlíthatjuk a 15. ábrán bemutatott diagram segítségével, amelyből egyértelműen látszik, hogy a W722 rúdanyagon létrejött

karcnyomok szélessége, kisebb volt, mint az MS1 lézerszinterelt anyagé, gyakorlatilag minden felületkezelési állapotban.

A 100 N terhelőerővel létrehozott karcnyom szélességei esetén a wolfram karbid bevonaton mért kiugróan magas értéket mérési hibának minősítjük, mivel nem valószínűsíthető, hogy a karcnyom szélessége a nagyobb terheléskor kisebbre adódjon, mint a feleakkora terhelés esetén.

Mindezek figyelembevételével (ezt az egy mérési hibát elhanyagolva) azt a következtetést vonjuk le, hogy W722 rúdanyag mind az 50 N mind a 100 N terhelésnél jobban viseli a karcolásos terhelést, mint a lézerszinterelt alapanyag bármely felületkezelési állapotban.



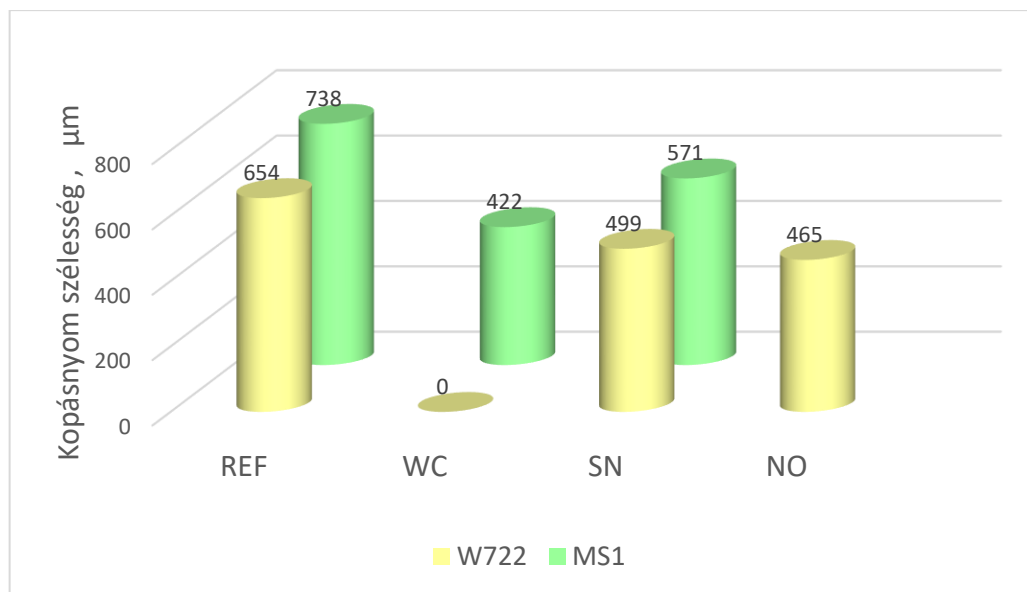
15. ábra. A karcnyom szélesség grafikus vizsgálata 50 és 100 N állandó terhelés esetén

További hasznos elemzést végezhetünk, ha a korábbi kutatások során született vizsgálatok eredményeivel összehasonlítjuk a jelen kísérletek során kapott eredményeket. Így például rendelkezésünkre állnak azok a kopásvizsgálati eredmények, amelyeket ugyanezen mintákon határoztak meg az együttműködő partnerek ball-on disc vizsgálatokat végezve [2, 21].

A 16. ábrán látható oszlopdiagramok a vizsgált anyagokra és felületkezelési állapotokra vonatkozóan ball-on-disc koptatáskor létrejött kopásnyomok szélességét mutatják be.

Az ábrából jól látható, hogy a kétféle alapanyag a kopással szembeni ellenállás tekintetében a karcolásos terheléssel analóg módon viselkedett. vagyis megállapíthatjuk, hogy a hagyományos rúdanyagból készült minták nemcsak a karcolással, hanem a kopással szemben is kedvezőbben viselkednek, jobban ellenállnak.

Meg kell azonban jegyezni, hogy a mért számszerű különbségek mértéke elég kicsi, ezért az eltérés a rendelkezésre álló adatok alapján nem nevezhető szignifikánsnak.



16. ábra. A kopásnyom szélesség grafikus vizsgálata

3.4.3. Az eredmények átfogó értékelése

Az eredmények átfogó és komplexebb értékelése céljából összeállítottuk egy olyan táblázatot (11. táblázat), amelyben a saját karcvizsgálataink eredményeit és a partnerek által ugyanazokon a mintákon miért egyéb mechanikai és tribológiai jellemzők eredményeit összegeztük.

A táblázatban kék színnel jelöltük mindkét alapanyag esetében egy adott tulajdonság tekintetében (adott sorban) a legjobb teljesítményt nyújtó felületkezelés eredményét, míg piros színnel a leggyengébben teljesítő felületkezelés eredményeit.

11. táblázat. A vizsgált referencia anyagokon és felületkezelt mintákon a jelen munka szerzői által, illetve mások által meghatározott mechanikai és tribológiai jellemzők áttekintése

A vizsgálat típusa	A vizsgált jellemző			Alapanyag, és kezelési állapot						
				W722				MS1		
				REF	WC	SN	NO	REF	WC	SN
Műszerezett karcvizsgálat*	Növekvő terhelés	A bevonat leválását okozó kritikus terhelés, F _c		70	150	90	115	75	150	95
	Állandó terhelés	Súrlódási együttható, μ	F = 50 N	0,2	0,22	0,165	0,18	0,2	0,22	0,15
			F = 100 N	0,4	0,24	0,29	0,27	0,38	0,24	0,28
		Karc szélesség μm	F = 50 N	137	82	100	116	134	(123)	113
			F = 100 N	194	125	147	157	197	87	169
HV mérés*	Felületi keménység, HV1			535	1154	668	749	374	1067	667
Ball-on-disc koptatás**	Kopásnyom szélesség, μm			654	n. m	499	465	738	422	571
	Kikopott térfogat, mm ³			0,131	n.m.	0,037	0,038	0,142	n.m.	0,046

* Saját vizsgálatok mérési eredményei

** Nem saját vizsgálatok mérési eredményei [2]

n. m.: nem mérhető (rendkívül kicsiny értékű) mennyiség.

A színezés segítségével könnyen beláthatóak az alábbiak:

3.4.3.1. *Az alapanyag hatása:*

- A kétféle alapanyag (W722 és MS1) tekintetében nincs lényeges különbség egy adott tulajdonság vonatkozásában. Ugyanazon felületkezelés hasonló eredményre vezetett mind a W722 rúdanyag, mind az MS1 lézerszinterelt alapanyag esetén.

3.4.3.2. *A felületkezelés hatása*

- Mindkét alapanyag típusnál – ahogyan az várható volt –, a felületkezelés nélküli (REF) állapot szignifikánsan rosszabb eredményt hozott minden vizsgált jellemző tekintetében. A legkedvezőbb eredményt a PVD technológiával készült volfrám-karbid kerámia bevonatos (WC) minták képviselték, mindkét alapanyag típus esetén.
- A táblázatban mindössze két tulajdonság tekintetében látunk csak kedvezőtlenebb eredményt ennél a felületkezelésnél, azonban ezek egyike sem nevezhető jellemzőnek.
 - Egyrészt az $F = 50\text{ N}$ állandó terhelésű karcolás során mért súrlódási együttható nagyobb, mint a többi felületminőség esetén, amelynek oka lehet, hogy ez a kis terhelés már sérülést okoz a rendkívül kemény bevonaton, ami kemény, abrazív szemcsék képződésével jár így megnöveli a súrlódási együtthatót.
 - Másrészt egy kiugróan magas karcszélesség értéket ($123\text{ }\mu\text{m}$) láthatunk az MS1 alapanyagra felvitt volfrám-karbid bevonat esetén, ami azonban nem nevezhető jellemzőnek, különös tekintettel arra, hogy az ugyanezen mintán, kétszer akkora terhelőerő esetén mért karcszélesség érték jóval kisebbre adódott. Ezeket az eredményeket ezért zárójelbe tettük.
 - A hibás mérési eredmények legfőbb oka az lehet, hogy nagyon kevés minta állt rendelkezésre a vizsgálatokhoz, minden típusból mindössze egy-egy darab, amelyeken ráadásul rendkívül korlátozott volt a mérésre rendelkezésre álló szabad terület, mivel azokon a partnerek már előzetesen egyéb vizsgálatokat végeztek. Mindez nem tette lehetővé, hogy kellően nagyszámú mérést végzünk egy-egy tulajdonság megbízhatóbb vizsgálatára érdekében.
- Itt kell azt is megjegyezni, hogy a karcoláskor keletkező karcnyom kicsiny, $100\text{--}150\text{ }\mu\text{m}$ szélességének optikai mikroszkópos mérése a laboratóriumban végzett egyéb vizsgálatok során sem bizonyult kellően megbízhatónak és pontosnak [23]. Ennek elsődleges oka, hogy a keskeny karcnyom kontúrja, a sekély karcnyom miatt nem kellően határozott (kisszögű átmenetet jelent a minta felületéhez viszonyítva), emiatt a kontúr és a karcnyom szélességi mérete mikroszkóppal sem látható élesen. Ilyen esetekben feltétlenül célravezetőbb például a karcárosodás mértékét profilometriai úton meghatározni.
- Az említett hibás mérés okozta kivételtől eltekintve, a volfrám-karbid keramikus bevonat mindkét alapanyagon gyakorlatilag minden tulajdonság tekintetében a legjobbnak bizonyult.

- A legkedvezőtlenebb felületkezelés a vizsgáltak közül a sófürdős nitridálás (SN) volt. Ennél a kezelésnél látjuk a legtöbb piros színű bejegyzést.
- Az oxinitridálás (NO) hatását csak a W722 rúdanyag esetében tudtuk megvizsgálni. Ez a kezelés többnyire kedvezőbb eredményekre vezetett, mint a sófürdős nitridálással kezelt felület. Jobb eredményt hozott például a HV1 keménység, a növekvő terhelőerővel végzett karcoláskor mért F_c kritikus terhelőerő vagy a kopásnyom szélesség tekintetében is.

4. Összefoglalás

Jelen kutatómunka alapvető célkitűzése az volt, hogy pontosabb képet kapjunk arról, hogy a vizsgált szerszámacéloknak a különböző felületkezelések hatására mennyiben változik meg a karcolással szembeni ellenálló képessége, és a vizsgált felületkezelések közül a karcolással szembeni ellenállást melyik kezelés javítja a legnagyobb mértékben. Ennek legfőbb motivációja az volt, hogy képesek legyünk egyértelműen meghatározni a legkedvezőbb alapanyag/bevonat kombinációt.

Kísérleti munkánk során első lépésként növekvő terhelőerejű, műszerezett karcvizsgálatot folytattunk a bevonatolt, vagy a hőkezeléssel létrehozott felületi kéreg katasztrofális sérülését okozó kritikus terhelőerő meghatározása céljából, majd ezt követték az állandó terhelőerejű vizsgálatok, amelyek a károsodás mértékének megítélésére szolgáltak. A kapott eredményeket táblázatok, illetve grafikonok segítségével szemléletesen bemutattuk, majd összevetettük a korábbi szakmai együttműködés során mások által elvégzett kopásállósági vizsgálatok konzekvenciáival.

A növekvő terhelőerejű vizsgálatokból már megállapíthattuk, mind a rúdanyag, mind a lézerszinterelt anyag esetén, hogy bármelyik felületkezelési eljárással jelentős karcállósági javulást érhetünk el a bevonat nélküli kiválásosan keményített próbatestekhez képest. A legellenállóbb bevonatnak a volfrám-karbid réteg bizonyult, ahol a teljes terhelési szakaszt tekintve is csak részleges bevonatleválást tapasztaltunk.

Állandó terhelőerejű vizsgálatok során a várt eredmények mellett, miszerint a felületkezelt próbatestek sokkal kevésbé roncsolódnak a kezeletlen mintákhoz képest, egy fontos megállapítást is tettünk. W722 rúdanyag mind az 50 N mind a 100 N terhelésnél jobban viseli a karcolásos terhelést, mint a lézerszinterelt alapanyag bármely felületkezelési állapotban.

A korábbi kopásállósági vizsgálatokat is figyelembe véve megállapítható továbbá az is, hogy a rúdanyag nem csupán a karcvizsgálatok során bizonyult ellenállóbbnak, de a kopással szemben is kedvezőbb viselkedést mutatott.

Összességében tehát a legkedvezőbb alapanyag-felületkezelés kombinációnak a W722 rúdanyag PVD eljárással létrehozott WC-Co bevonata bizonyult.

Az elvégzett munka legfontosabb eredménye, hogy a kapott eredmények alapján igazoltuk, hogy a bemutatott vizsgálati eljárások alkalmasak a kísérleti munka során tanulmányozott felületkezelt rétegek komplex tribológiai vizsgálatára és összehasonlítására. Az eredmények elfogadható megbízhatósága érdekében azonban a vizsgálati mintasorozat darabszámát, és az elvégzett mérések számát, egyaránt növelni kell.

A munka folytatásként egy ilyen nagyobb mintaelemszámú vizsgálat sorozat keretében szeretnénk az eddigiekben felmerült és tisztázatlan szakmai kérdéseket feltárni és megválaszolni.

Köszönetnyilvánítás

- *A kutatómunka irányításáért, a szakmai tanácsokért, támogatásért és a vizsgálatok elvégzésében és kiértékelésében nyújtott segítségért:*
Dr. Marosné Prof. Dr. Berkes Máriának (Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet, Miskolci Egyetem)
- *A növekvő terhelőerőjű vizsgálatok kiértékeléséhez a szükséges panoráma fotók elvégzésében nyújtott segítségért:*
Nagy Nórának (Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet, Miskolci Egyetem)
- *A kutatómunkához szükséges vizsgálatokban, valamint a próbatestek célszerű előkészítésében nyújtott segítségért:*
Csurilláné Balogh Ágnesnek (Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet, Miskolci Egyetem)
- *A próbatestekért:*
Dr. habil. Hargitai Hajnalkának és Hatos Istvánnak (Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, Széchenyi István Egyetem)

Mellékletek

1. számú melléklet: *Növekvő terhelőerővel végzett karcvizsgálatok súrlódási együttható/terhelőerő vs. karcúthossz diagramjai*
2. számú melléklet: *Állandó terhelőerővel végzett karcvizsgálatok súrlódási együttható/terhelőerő vs. karcúthossz diagramjai ($F=50N$)*
3. számú melléklet: *Állandó terhelőerővel végzett karcvizsgálatok súrlódási együttható/terhelőerő vs. karcúthossz diagramjai ($F=100N$)*

Felhasznált irodalom

- [1] Marosné, B. M., Szilágyiné, B. A., Felhő, Cs., Maros, Zs., Vass, Z., Németh, A.: Kutatási Jelentés – Műanyag megmunkáló szerszámacélok hő- és felületkezelése és komplex tribológiai vizsgálata, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet, Miskolc, 2013. pp. 1-45.
- [2] Vass Zoltán: Felületkezelések hatásának vizsgálata műanyagfröccsöntő szerszámok kopásállóságára, Diplomaterv Miskolci Egyetem, 2015. pp1-192.
- [3] Licskó, L.: Szerszámacélok és Hőkezelésük, Oktatási segédlet Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2012, pp. 1-750.
- [4] Csizmazia, F.-né: Szerszámanyagok és kezelésük, kézirat, Széchenyi István Egyetem, Műszaki Tudományi Kar, Közlekedési és Gépészmérnöki Intézet, Anyagismereti és Járműgyártási Tanszék, Győr, 2004. pp. 1-49.
- [5] https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0012_muanyagok_feldolgozasa/ch03s02.html
- [6] Halász, M: Polimerek/Polimerfeldolgozás, Oktatási segédlet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2013, pp. 1-45.
- [7] Czinege, I. Belina, K.: Felületi kezelések. (2011) TAMOP 4.2.5 Pályázat könyvei, https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0007_01-Feluleti_kezelesek/1_lecke_a_feluleti_kezelsek_ttekintse_i.html (letöltés: 2021.04.02.)
- [8] Cserjésné, S. Á., Frigyk, G.r ; Kocsisné, Baán, M. ; Kuzsella, L., Marosné, Berkes M., Szabó, E. , Szilágyiné, Biró, A., Kocsisné, Baán, M. (szerk.) ; Marosné, Berkes, M. (szerk.); Szilágyiné, Biró, A. (szerk.) Nitridálás – korszerű eljárások és vizsgálati módszerek, Miskolci Egyetem, ISBN: 9789633580806 (2015), 296 p.
- [9] Hugh O. Pierson Handbook of Refractory Carbides and Nitrides (Properties, characteristics, processing and applications) Noyes Publications, Westwood, New Jersey, USA, 1996
- [10] Laczkó, L., Eniszné, Bódogh, M.: Volfram-karbid/kobalt bázisú keményfémek I. A volfram-karbid por fizikai tulajdonságai és előállítása karbidizációval (szakirodalmi áttekintés), Építőanyag, 59. évf. 1. sz. (2007) pp1-4. http://epa.niif.hu/02200/02231/00009/pdf/EPA02231_Epitoanyag_200701_02-05.pdf
- [11] Kuzsella. L. és tsai.: Különböző acélminőségek plazmanitridálása. Plazmanitridálás hőmérsékletének hatása különböző acélminőségek esetében, Kutatási jelentés, készült a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029, Járműipari anyagfejlesztések projekt keretében, 2014. pp1-55. http://www.met.uni-miskolc.hu/refbase/publication_files/2013/249_KuzsellaL._etal2013_Kueloenboezoa_celminosegekplazmanitridalasa.pdf
- [12] Lakhtin, Y. M., Chemoterical Treatment, Metal Science and Heat Treatment, Vol. 36. Nos, 9-10, 1991
- [13] Kocsisné Baán, M.: Hő - felületkezelési eljárások, Miskolci Egyetem, Elektronikus tananyag,
- [14] Bulla, P.: Hagyományos és korszerű nitridálási technológiák összehasonlító vizsgálata, Szakdolgozat, Miskolci Egyetem, 2012. pp1-71. <http://midra.uni-miskolc.hu/document/14605/6955.pdf>

-
- [15] ASTM C1624-05, Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, www.astm.org
- [16] Kocsisné Baán Mária: Bevonatok adhéziós kötés-erősségének vizsgálata – Karcvizsgálat, Egyetemi jegyzet, Miskolc – Egyetemváros, 2000
- [17] Marosné Berkes, M.: Nemfémek anyagok és technológiák, GEMTT009-B című tantárgy elektronikus jegyzetei, Miskolci Egyetem, 2020. szeptember.
<https://elearning.uni-miskolc.hu/zart/course/view.php?id=187>
- [18] Kocsisné Baán, M., Marosné Berkes, M.: Kerámiák anyagok vizsgálatának speciális kérdései, GÉPGYÁRTÁS 40 : 8 pp. 47-52. , 6 p. (2000)
- [19] Lőrincz Angéla: Nitridált kéreg vizsgálata műszerezett karcvizsgálat segítségével
- [20] Marosné Berkes, M. et al.: Nitridált kéreg vizsgálata műszerezett karcvizsgálat segítségével, Kutatási jelentés, Készült: a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 Járműipari anyagfejlesztések projekt keretében, pp1-40 (2014) http://www.met.uni-miskolc.hu/refbase/_publication_files/2014/253_MarosneB.M._etal2014_Nitridaltkeregvizsgalatamuszerezett.pdf
- [21] Hatos, I.: Additív szerszámgyártás technológiájának fejlesztése járműipari alkatrészek gyártásához, Doktori értekezés, Széchenyi István Egyetem, 2020, pp1-105.
<https://mmtti.sze.hu/images/Dokumentumok/HatosIstv%C3%A1n-dissz.pdf>
- [22] Hargitai, H.: Kutatási jelentés, Lézer szinterelt minták tribológiai vizsgálata és elemzése, Széchenyi István Egyetem, Műszaki Tudományi Kar, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, Győr, 2013, pp. 1-80.
- [23] Jalalova, P., Fülöp, F.: Tribological investigation of tool steel with advanced superhard coatings, TDK dolgozat, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet, 2021, pp1-54.