



KORSZERŰ, TÖBBRÉTEGŰ, SZUPERKEMÉNY BEVONATOK TRIBOLÓGIAI VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA ÉS FEJLESZTÉSE

Fülöp Fruzsina ARUVT1

Tervezésvezető: Dr. Marosné Prof. Dr. Berkes Mária, egyetemi tanár

Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Óbudai Egyetem

Teljesített kreditpontok

Teljesített tantárgyak a képzés kezdetétől		
Tantárgy	Teljesítés féléve	Kredit
<i>Anyagtudomány alapjai</i>	<i>I.</i>	<i>5</i>
<i>Kontinuummechanika</i>	<i>I.</i>	<i>5</i>
<i>Modern analízis</i>	<i>I.</i>	<i>5</i>
<i>Műszaki kerámiák</i>	<i>I.</i>	<i>5</i>
<i>Anyagszerkezettan és anyagismeret</i>	<i>II.</i>	<i>5</i>
<i>Korszerű felületvizsgálatok</i>	<i>II.</i>	<i>5</i>
<i>Numerikus módszerek</i>	<i>II.</i>	<i>5</i>
<i>Tribológia</i>	<i>II.</i>	<i>5</i>
<i>Műszaki polimerek</i>	<i>IV.</i>	<i>0</i>
<i>Tanszéki oktatási tevékenység I-II. félév</i>	<i>I-II.</i>	<i>10</i>
<i>Komplex vizsga</i>	<i>IV.</i>	<i>0</i>
<i>Komplex tervezés</i>	<i>IV.</i>	<i>0</i>
<i>Kutatászeminárium I-IV. félév</i>	<i>I-IV.</i>	<i>20</i>
<i>Kutatás és beszámoló I-IV. félév</i>	<i>I-IV.</i>	<i>15</i>
<i>Kutatási project V.</i>	<i>V.</i>	<i>10</i>
<i>Kutatási beszámoló V.</i>	<i>V.</i>	<i>10</i>
<i>Kutatási project VI.</i>	<i>VI.</i>	<i>10</i>
<i>Kutatási beszámoló VI.</i>	<i>VI.</i>	<i>10</i>
	Összesen	125

1. Jalalova, P., Fülöp, F., Maros, M. B. (2023). Investigation of the Tribological Behaviour of Advanced TiAlN and CrAlN Hard Coatings Deposited on X153CrMoV12 Cold Work Tool Steel. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_51
2. Fülöp, F., Maros, M. B. (2023). A Comparative Study on the Tribological Performance of a Monolayer TiBN and Multilayered TiBN/DLC Coating on X210Cr12 Tool Steel. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_52.
3. P. Jalalova, F. Fülöp, M. Berkes Maros, Some Experiences with Polycrystalline Diamond Coatings on a Steel Substrate during Dry Sliding Ball-on-Disk Wear Test Conditions, in Zs. Koncsik, J. Lukács (Ed.): Research results at the Institute of Material Structure and Materials Technology of the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics of the University of Miskolc, University of Miskolc, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Institute of Material Structure and Materials Technology, pp 97-114, 2022.
4. F. Fülöp, M. Berkes Maros, Növelt hőkapacitású, energiatakarékos beltéri bevonatok kvázi gradiens építőelemek fejlesztéséhez – bazaltszálalás ásványi hidrátok és low-E anyagok, in Zs. Koncsik, J. Lukács (Ed.): Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézetében, Miskolc, Magyarország, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézet, pp 69-86, 2022.
5. Fruzsina Fülöp, Prof. Dr. Maria Berkes Maros: Effect of loading conditions on a TiBN and different DLC top-layered coatings applied on X210Cr12 cold work tool steel, Engineering Symposium at Bánki 2023, Budapest, 16th November 2023. (Megjelenés alatt)

KÍSÉRLETI MUNKA

1. A vizsgált bevonatok jellemzése

1. Keménységmérés a szubsztrátumon és a bevonatokon
2. Rockwell C tapadásvizsgálat
3. Rétegvastagságmérés

2. Tribológiai vizsgálatok

1. Műszerezett karcvizsgálatok

1. Előkísérletek, vizsgálati paraméterek meghatározása
2. Karcdiagramok és kritikus terhelőerők meghatározása
3. Karcnyomok morfológiai vizsgálata
4. Károsodási mechanizmusok OM elemzése
 1. Egyrétegű bevonatok szubkritikus károsodási módjai
 2. DLC fedőréteges bevonatrendszer károsodási módjai

2. Karckárosodás mechanizmus térkép

3. Műszerezett karcvizsgálatok eredményeinek összefoglalása

KÍSÉRLETI MUNKA

1. Ball-on-disc típusú kopásvizsgálatok

1. Előkísérletek, vizsgálati paraméterek meghatározása
2. A súrlódási együttható – csúszási úthossz diagramok meghatározása
 1. Bevonat nélküli minták
 2. Egyrétegű bevonatok (TiBN, TiAlN, CrN, CrAlN)
 3. Többrétegű bevonatok (TiBN+DLC, TiAlN+DLC, CrN+DLC, CrAlN+DLC)
 4. A kopási károsodás mennyiségi jellemzése (kopásnyomok szélessége, kikopott térfogat, kopási tényező)
 5. A kopási károsodási minőségi jellemzése (kopásnyomok morfológiájának, és kopási törmelékek SEM vizsgálata)
 6. A kopásvizsgálati eredmények értékelése
3. A tribológiai vizsgálatok eredményeinek összefoglalása

Megmunkáló szerszámok terhelése és tönkremenetele

Hidegalakító szerszám



Jellemző
terhelés:

Jellemző
tönkremenetel:

Elvárások:

Mechanikai → Súrlódás, kopás

Termikus → Hőterhelés

Kémiai → Korrózió

• Törés

• **Kopás**

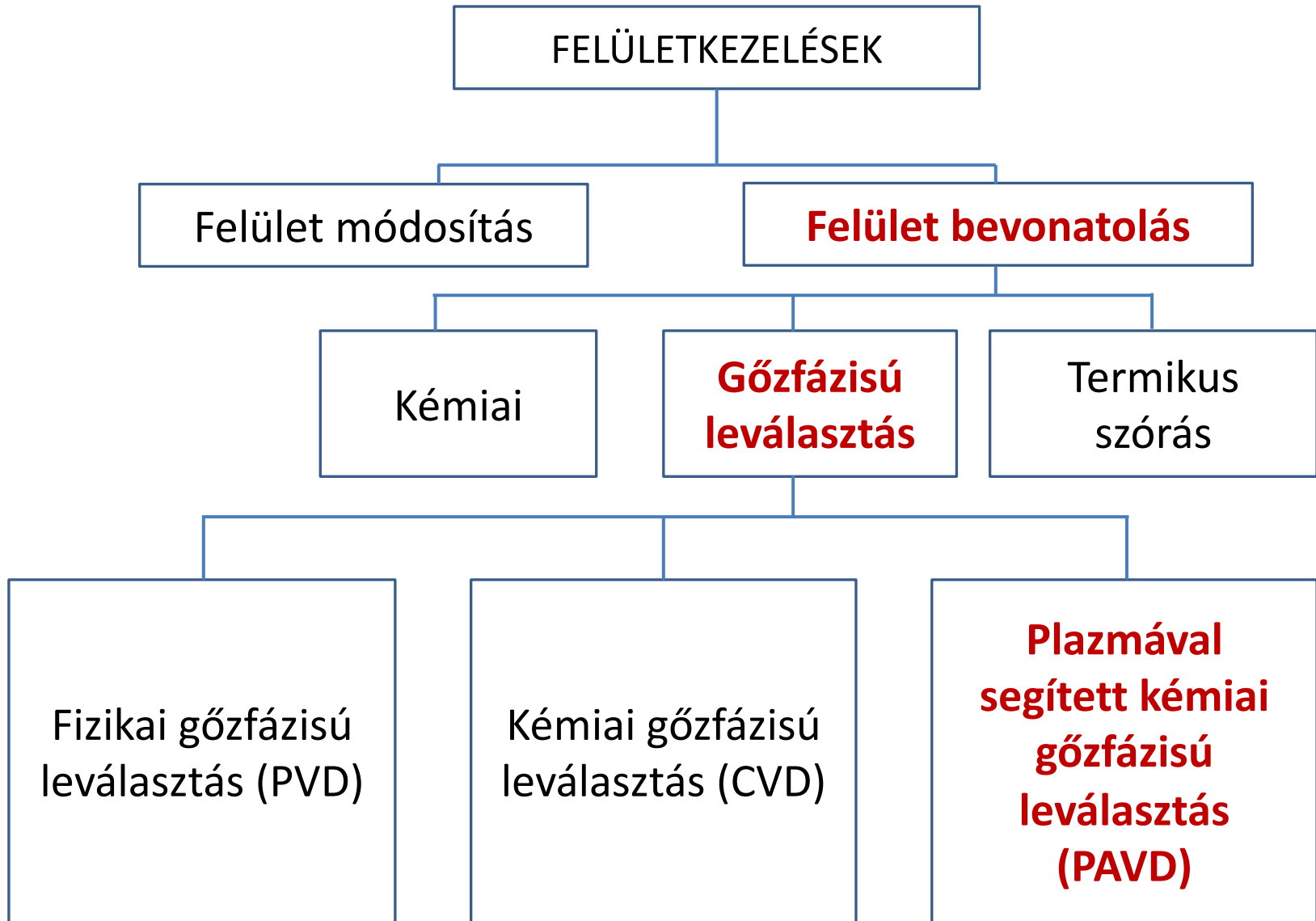
• Fáradás

• Korrózió

• Leromlás

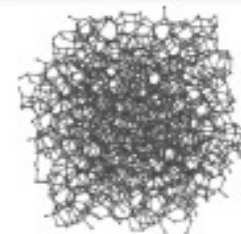
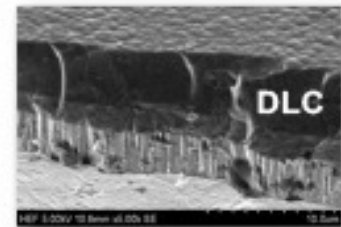
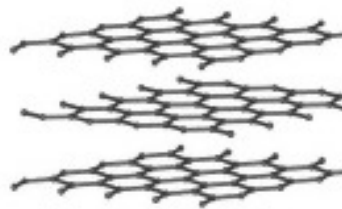
- **Jó kopásállóság**
- Nagy szilárdság
- Megfelelő hővez.
képesség
- Keménység
- Mérettartás
- Korrózióállóság
- Melegszilárdság

Megmunkáló szerszámokkal szembeni elvárások



Diamond-like Carbon I.

A szénalapú, másnéven Diamond-like-Carbon (DLC) bevonatok, ötvözik a gyémánt és a grafit két jellemző tulajdonságát - azaz nagy a keménységük (1000-4000HV) és a hagyományos PVD bevonatokhoz ($\mu_{\text{PVD}} = 0,1-0,5$) képest 200-500%-kal kisebb ($\mu_{\text{DLC}} = 0,01-0,25$) a súrlódási együtthatójuk.



Különböző kristályszerkezetbe
rendeződött szén atomok

Amorf szerkezetű
szén atomok

Gyémánt
Kiemelkedően
nagy keménység



Grafit
Nagyon
kicsiny súrlódás



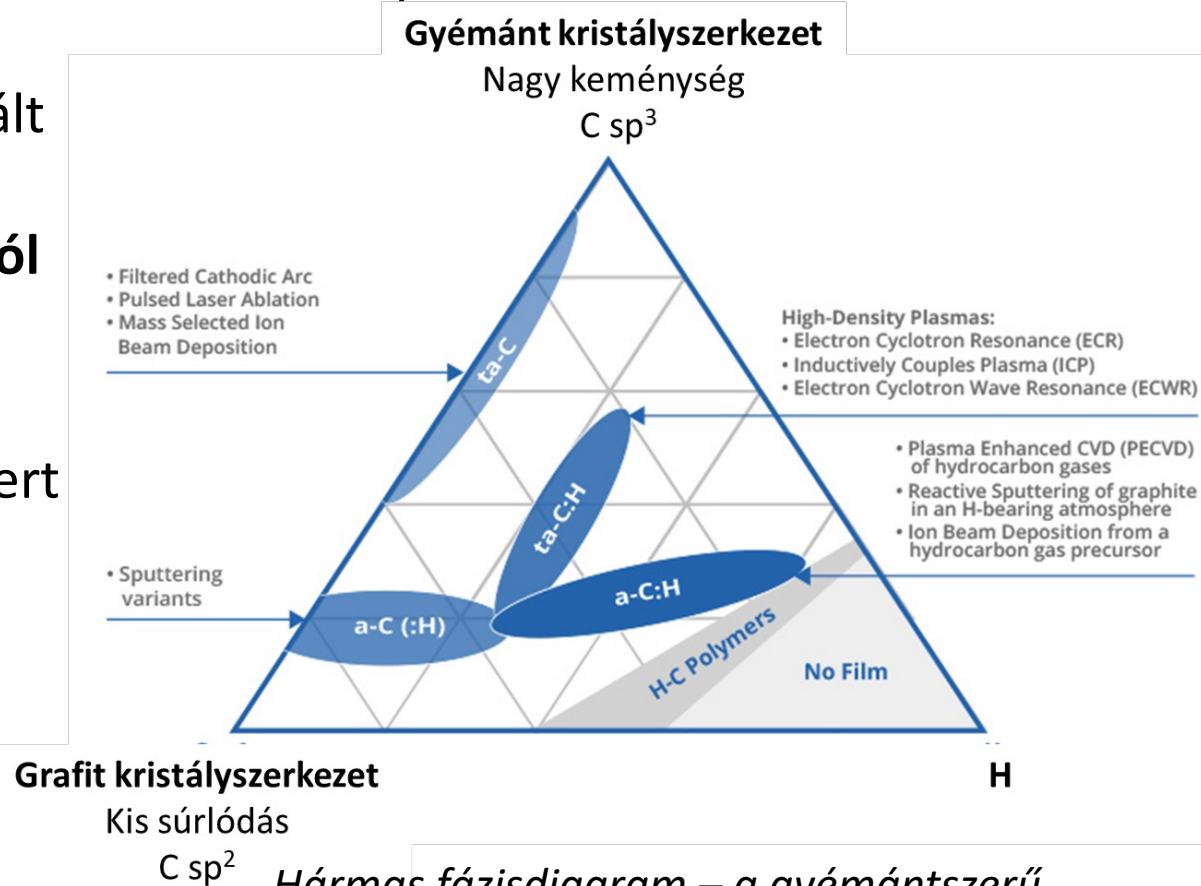
DLC
Nagy keménység
és kis súrlódás

https://www.hefusa.net/pvd_coating/DLC-coatings.html

Diamond-like Carbon II.

- A DLC-k tulajdonságai az sp^2 (háromszoros síkbeli szén-szén kötés) és az sp^3 (négyzetes tetraéderes szén-szén kötés) hibridizált **kötések arányától** és a réteg **hidrogéntartalmától** függően változnak.
- Nagy keménységgel rendelkezik, kémiaailag inert és **alacsony súrlódási együttható** jellemzi, így ideálisan alkalmazható kopásálló bevonatként.

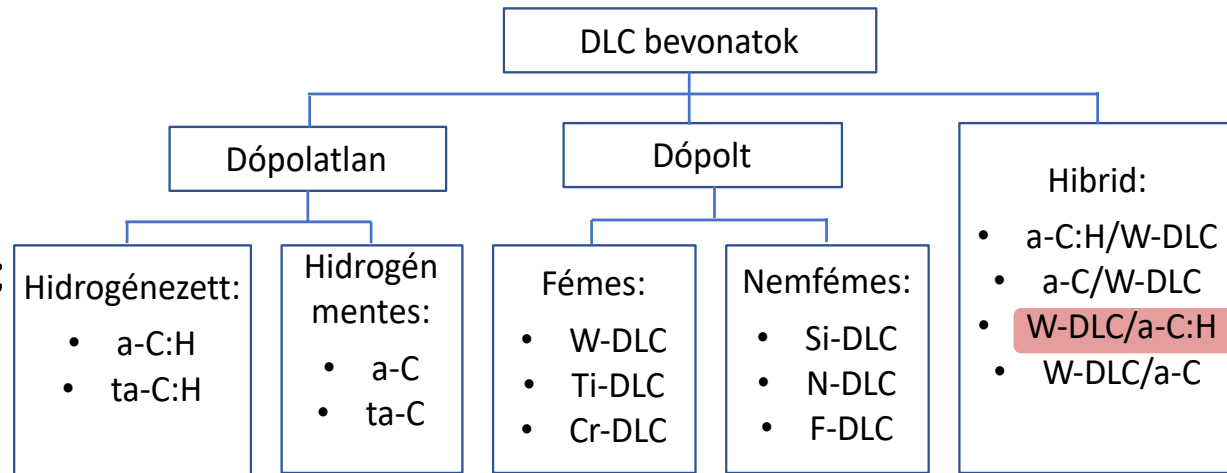
- DLC: a mechanikailag kemény, amorf, metastabil szénalapú anyagok egy osztálya



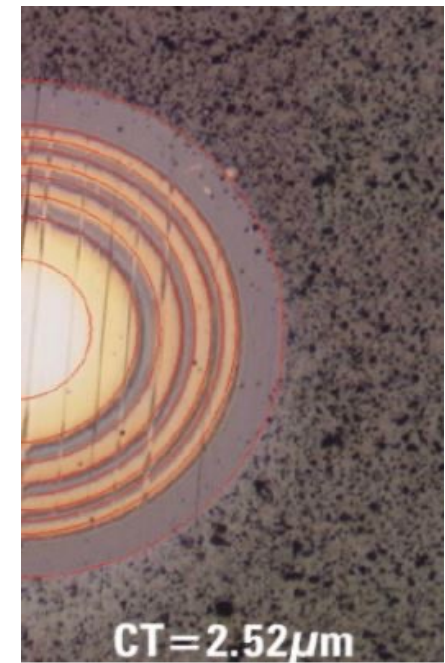
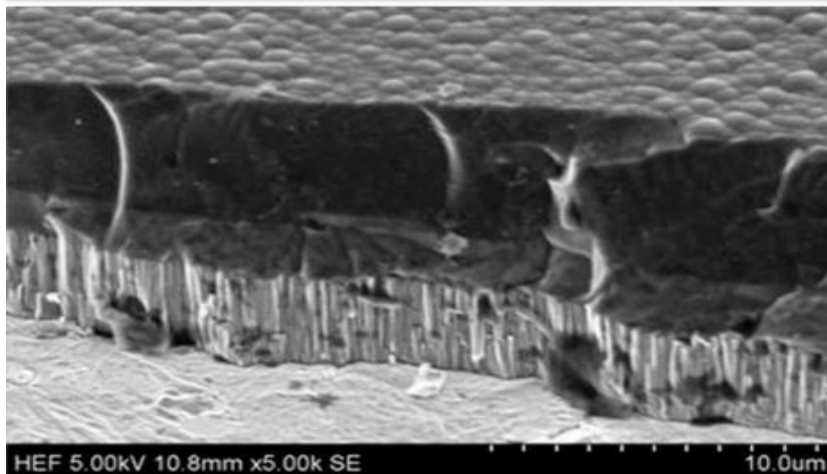
Hármas fázisdiagram – a gyémántszerű szénmódosulatok kötéstípusai

DLC bevonatszerek

- *Diamond-Like Carbon*;
- Önkenő bevonatok;
- Nagy keménység;
- Nagyon jó kopásállóság;
- Nagy méretpontosság;
- Biokompatibilitás;



DLC = Aláréteg (Cr, CrN, Si, W) + felső funkcionális (karbonnal dúsított, amorf) réteg



A DLC bevonatok tribológiai teljesítőképességét befolyásoló tényezők

Belső tényezők

- Bevonat keménysége
- Hidrogén tartalom
- Dópoló anyag
- Karbon atomok elrendeződése (sp^2 , sp^3)
- Rétegvastagság
- Alátétrétegek

Külső tényezők

- Hőmérséklet
- Kenési állapot
- Kenőanyag összetétele
- Alkalmazott terhelés
- Sebesség
- Geometria
- Súrlódó ellenpár anyaga
- Mozgás típusa

Kísérleti munka – a vizsgálati minták jellemzői

- Alapanyag: K110
- Kiválóan keményített szubsztrát
- Méretek: $d=30$ mm,
 $v=5$ mm
- Felületi minőség:
polírozott
- Vizsgált bevonat
típusok: TiBN,
TiBN+DLC, TiAlN,
TiAlN+DLC, CrN,
CrN+DLC, CrAlN,
CrAlN+DLC
- Bevonatolási
technológia: PACVD



Alapanyag – K110

Összetétel forrása	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
EN ISO 4597 szabvány	1,45 - 1,60	1,45 - 1,60	0,2 - 0,6	11,0 - 13,0	0,7 - 1,0	0,7 - 1,0
Böhler anyagadatlap	1,55	1,55	0,30	11,30	0,75	0,75
Alapanyagon mért értékek	1,68	1,68	0,37	10,9	0,68	0,57

EN X153CrMoV12 (Böhler K110):

- Erősen ötvözött hidegalakító szerszámacél;
- 12% Cr tartalom;
- Kiváló abrazív kopásállóság;
- Jó nyomószilárdság és szívósság;
- Ledeburitos szövetszerkezet;
- Levegőn történő megeresztés;
- Kiválóan alkalmas bevonatolásra;

Alapanyag hőkezelése

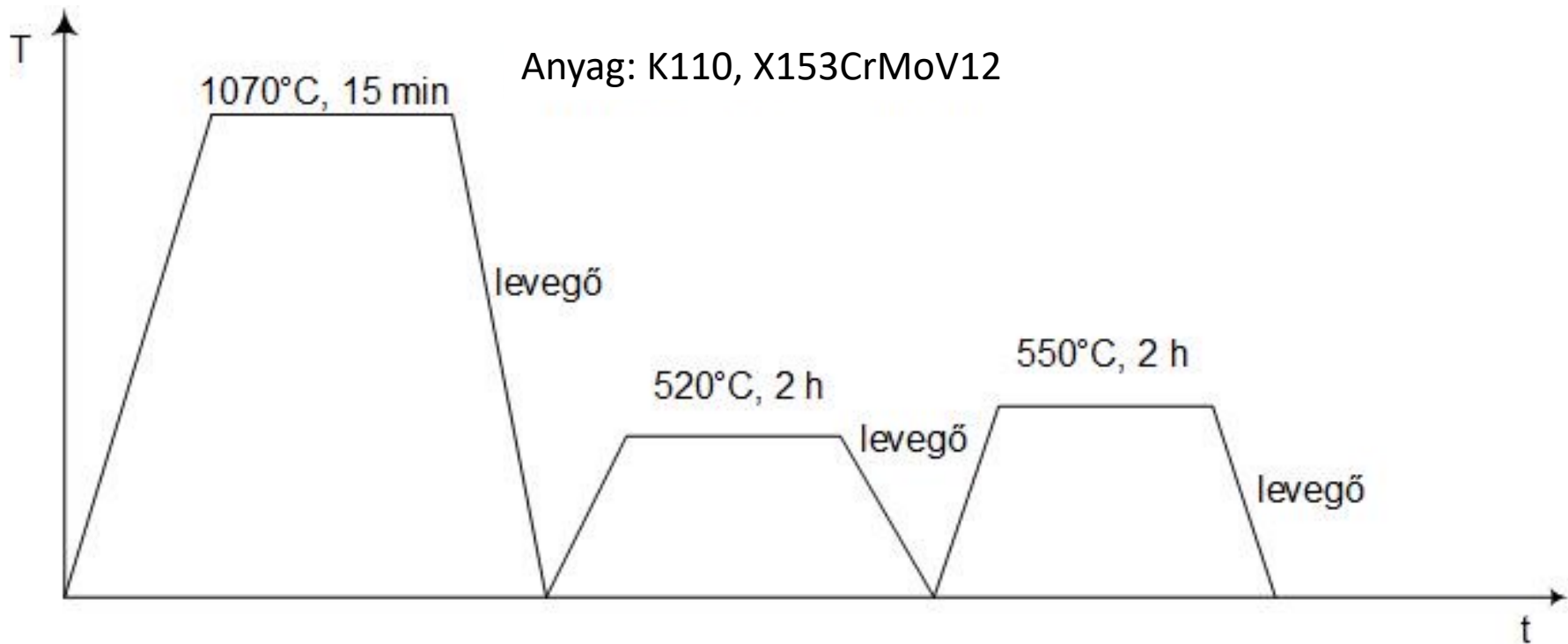
Edzés



Megeresztés
két lépésben



Kiválósos
keményítés

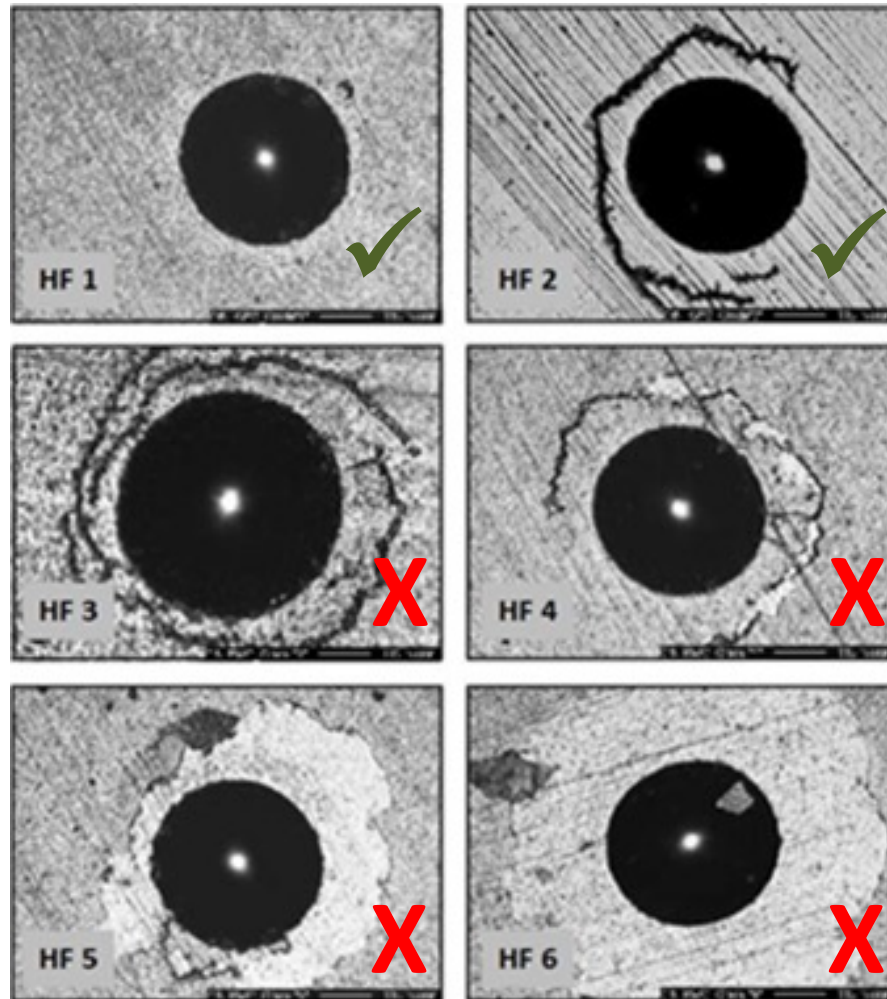


Rockwell C tapadásvizsgálat

Vizsgálati
paraméterek:

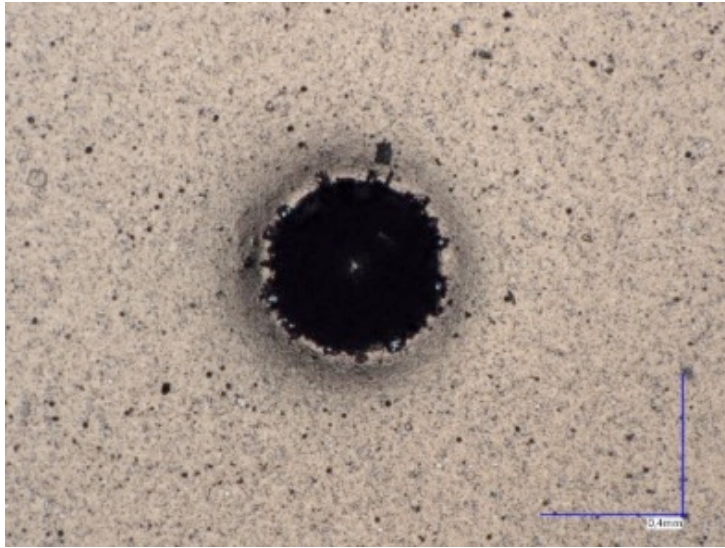
F=1500 N,
nyomófej: HRC

Szabványosított (VDI 3198) mintaképek

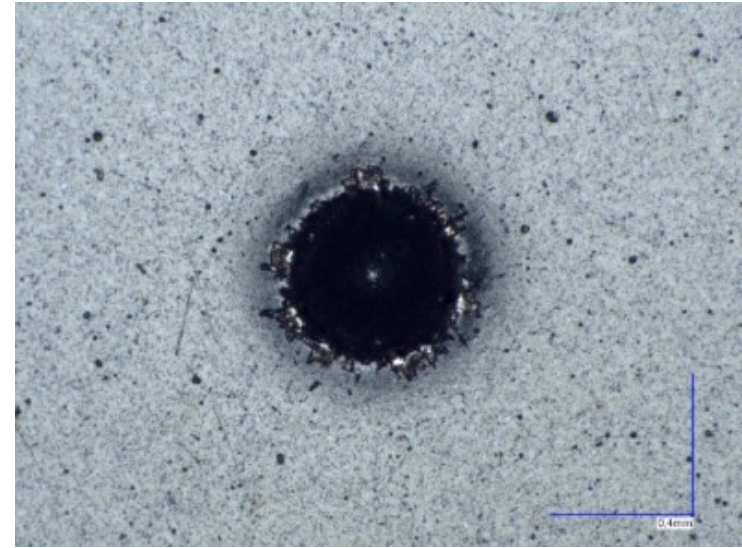


Rockwell C tapadásvizsgálat

TiBN



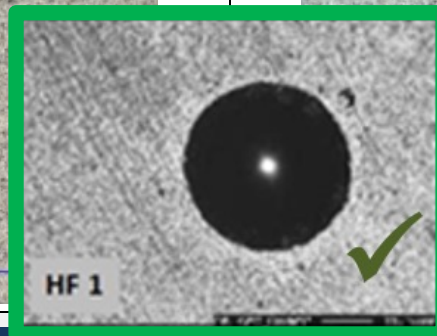
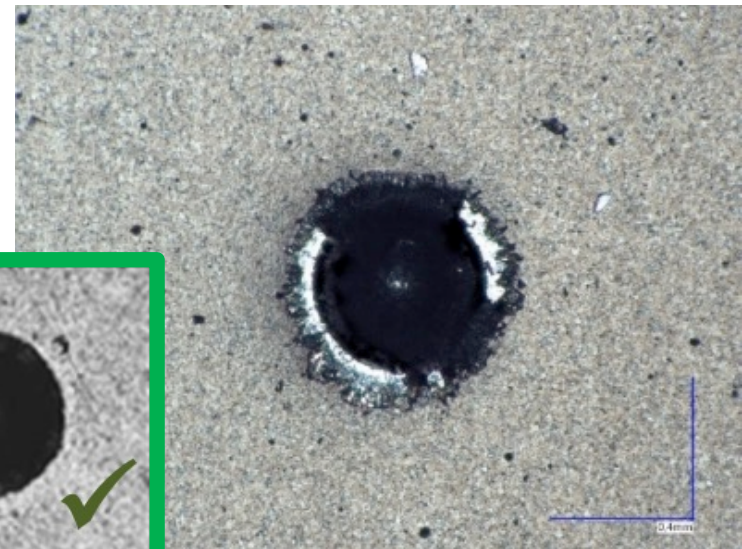
TiBN+DLC



TiAlN

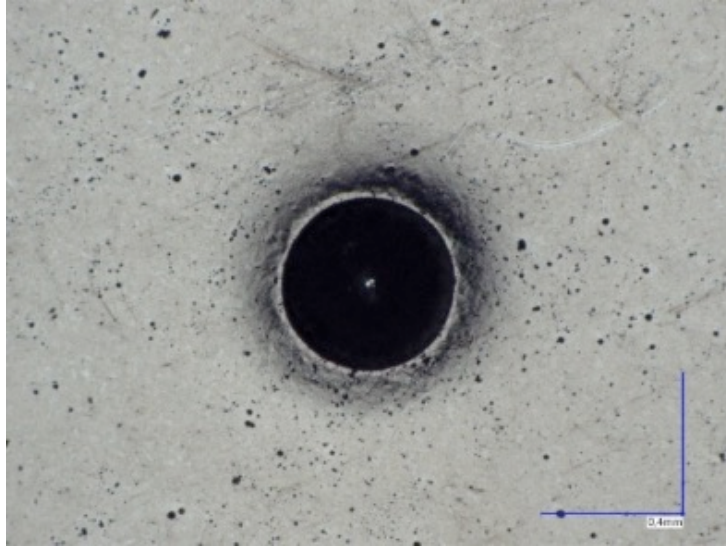


TiAlN+DLC

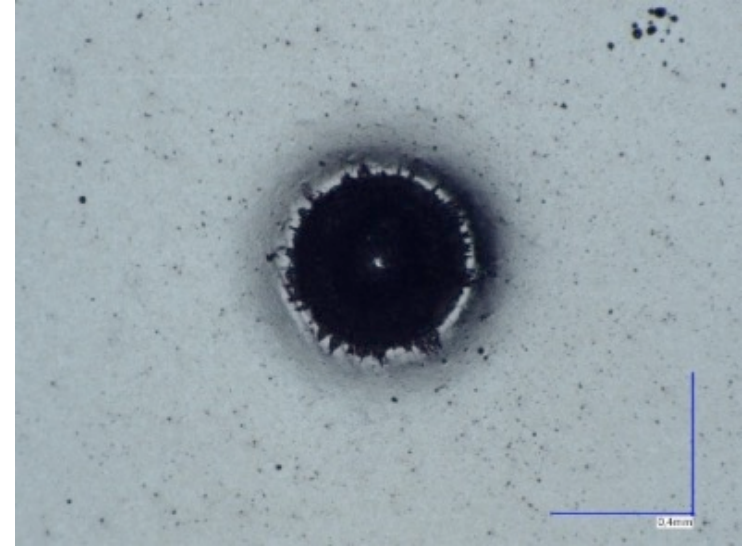


Rockwell C tapadásvizsgálat

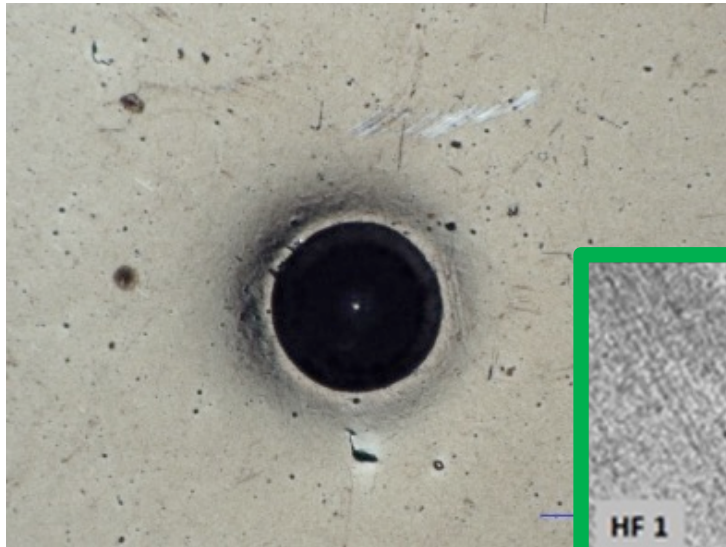
CrN



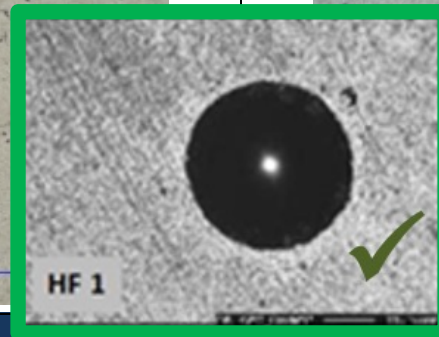
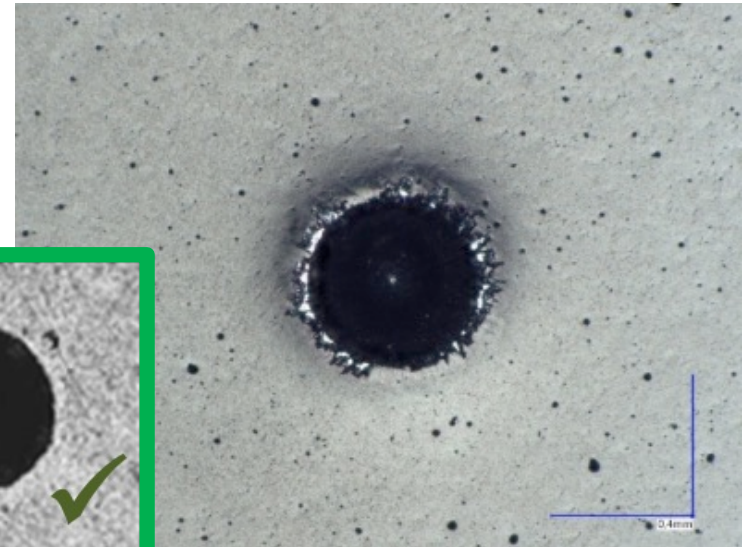
CrN+DLC



CrAlN

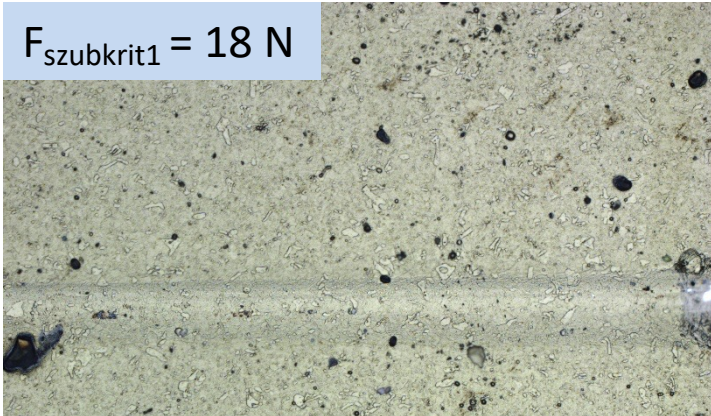


CrAlN+DLC



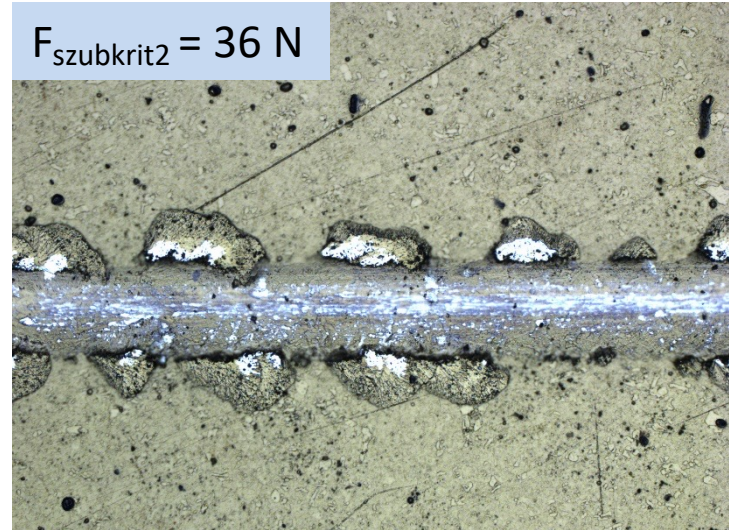
- A legtöbb bevonat esetében minimális sérülés figyelhető meg: HF1-es kategória.
- Legjelentősebb sérülés: TiAlN+DLC esetében: anyagfelgyűrődés következtében létrejövő kis kiterjedésű rétegleválás.
- A bevonatok alkalmasak autóiipari felhasználásra.

$F_{\text{szubkrit1}} = 18 \text{ N}$



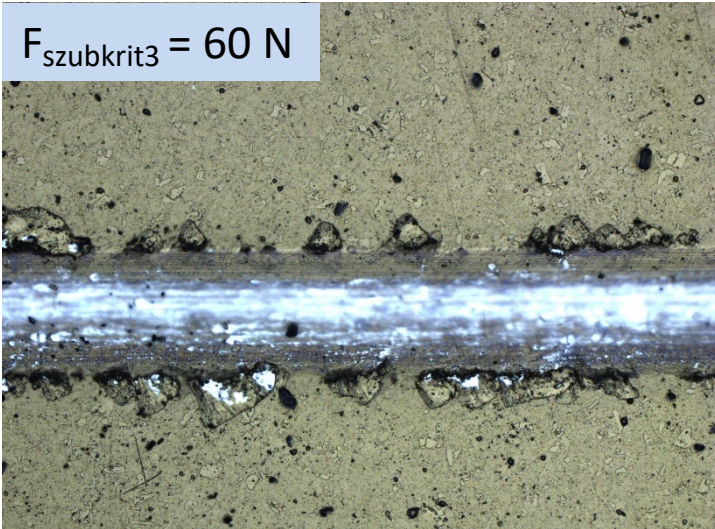
Oldalirányú berepedés +
Nyomófeszültség okozta Chevron
típusú repedés

$F_{\text{szubkrit2}} = 36 \text{ N}$



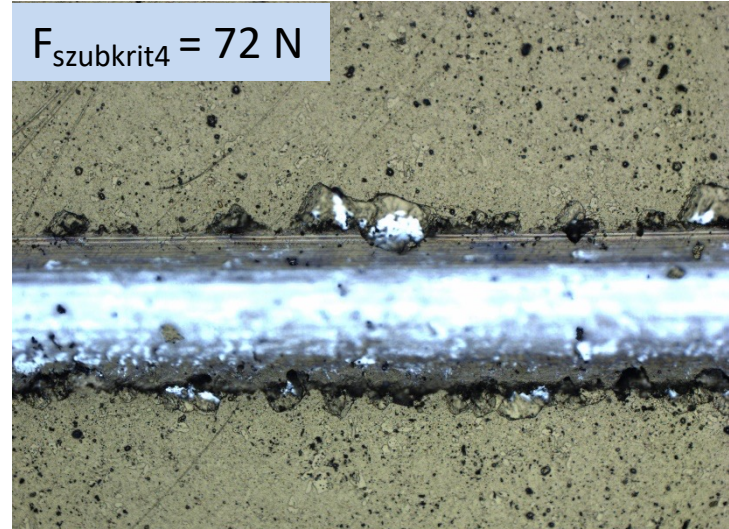
Ék alakú leválás

$F_{\text{szubkrit3}} = 60 \text{ N}$



Ék alakú leválás + részleges leválás

$F_{\text{szubkrit4}} = 72 \text{ N}$



Ék alakú leválás + teljes leválás

$F_{\text{szubkrit1}} = 15 \text{ N}$



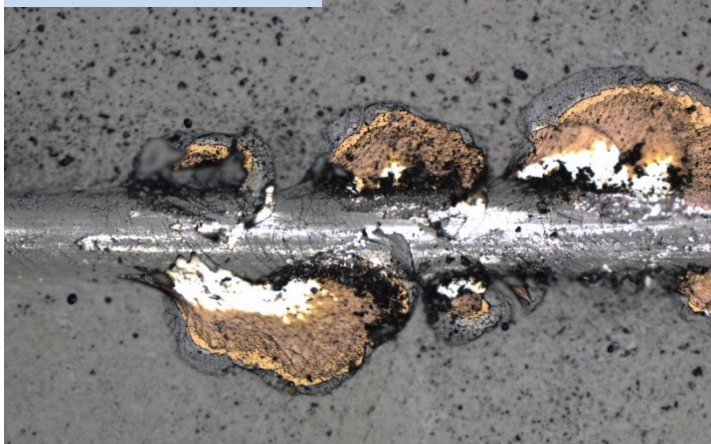
Oldalirányú berepedés

$F_{\text{szubkrit2}} = 30 \text{ N}$



Oldalirányú berepedés +
kagylós lepattogzás

$F_{\text{szubkrit3}} = 36 \text{ N}$



Kagylós lepattogzás

$F_{\text{szubkrit1}} = 86 \text{ N}$



Kagylós lepattogzás +
Teljes leválás

$F_{\text{szubkrit1}} = 42 \text{ N}$



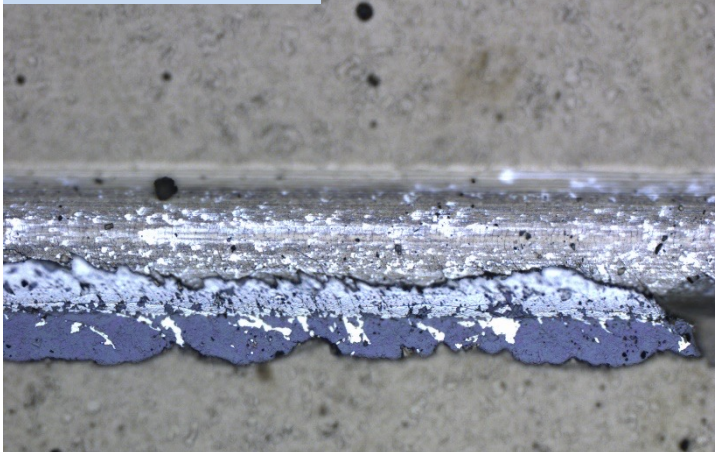
Oldalirányú berepedés +
Részleges leválás

$F_{\text{szubkrit2}} = 60 \text{ N}$



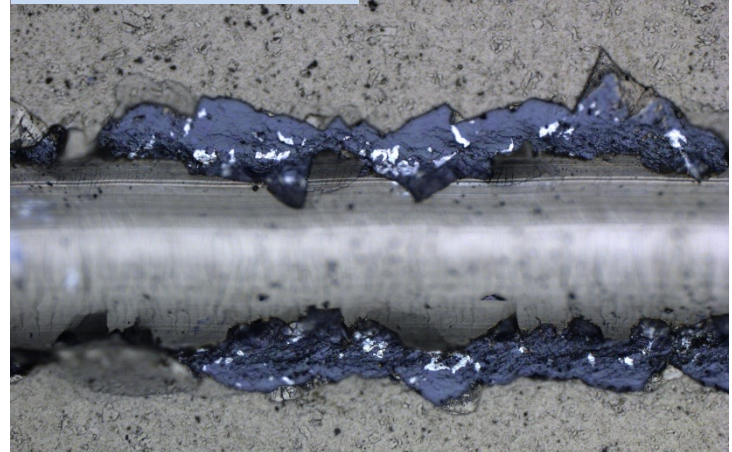
Részleges leválás + Ék alakú leválás

$F_{\text{szubkrit3}} = 84 \text{ N}$



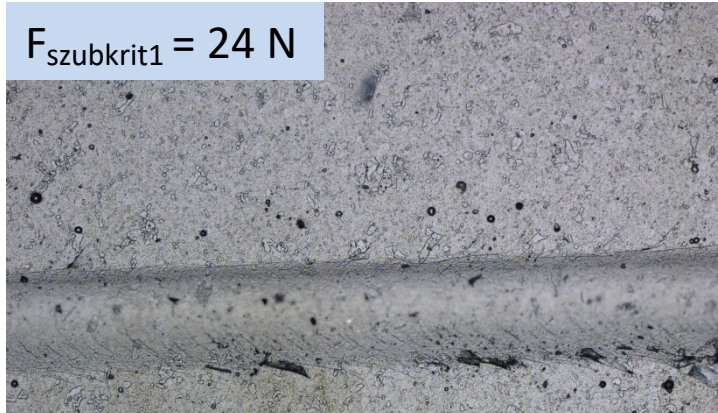
Egyoldali nagy kiterjedésű leválás

$F_{\text{szubkrit4}} = 126 \text{ N}$



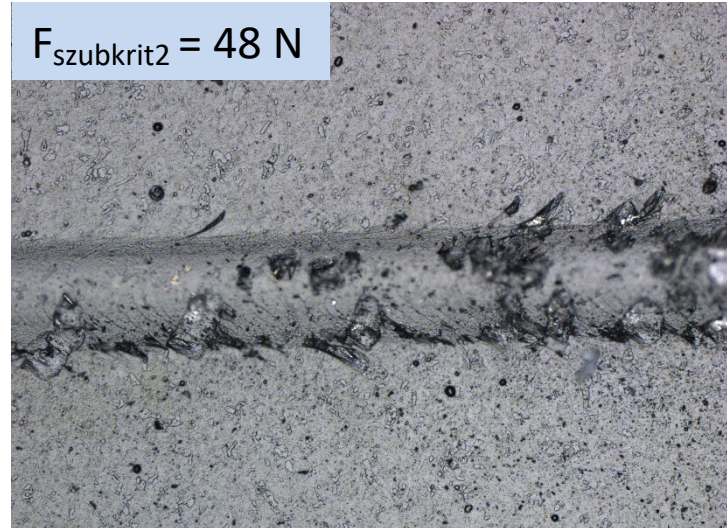
Két oldali nagy kiterjedésű leválás

$F_{\text{szubkrit1}} = 24 \text{ N}$



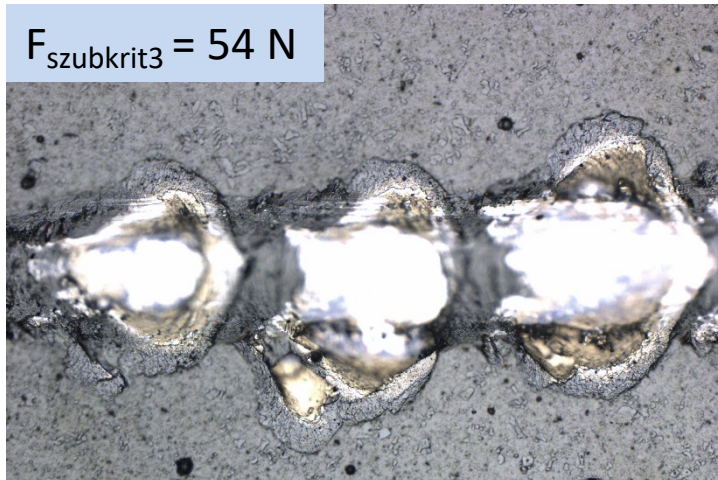
Oldalirányú berepedés+
Nyomófeszültség okozta Chevron
típusú repedés

$F_{\text{szubkrit2}} = 48 \text{ N}$



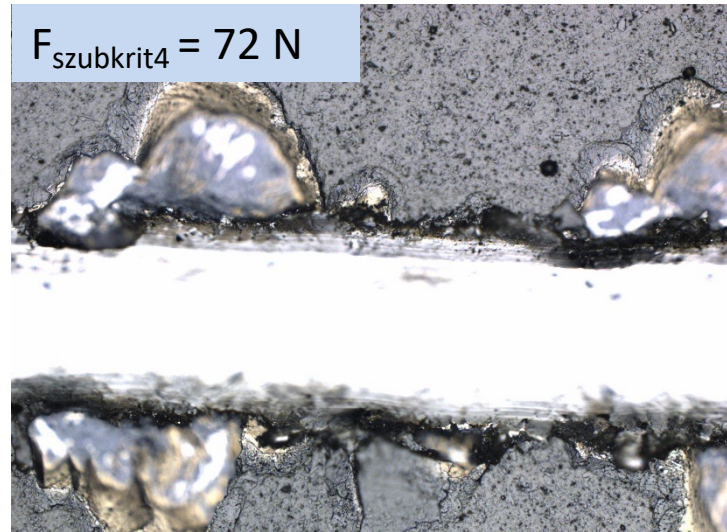
Oldalirányú berepedés

$F_{\text{szubkrit3}} = 54 \text{ N}$



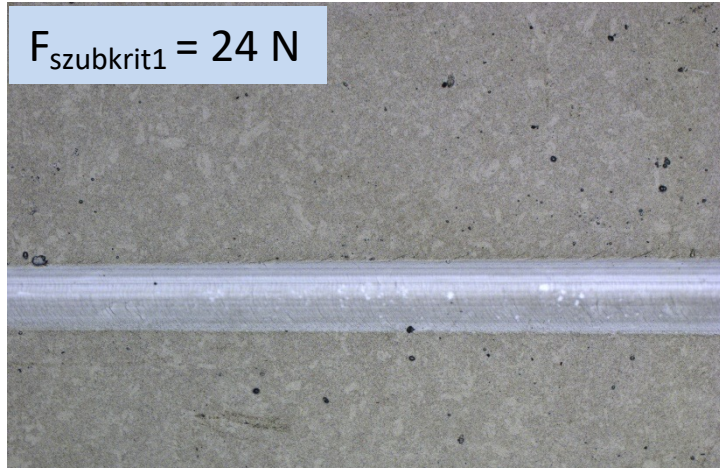
Kagylós lepattogzás +
részleges leválás

$F_{\text{szubkrit4}} = 72 \text{ N}$



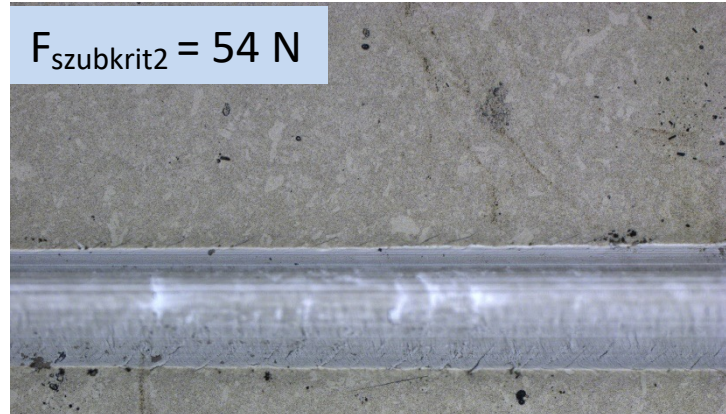
Kagylós lepattogzás+teljes leválás

$F_{\text{szubkrit1}} = 24 \text{ N}$



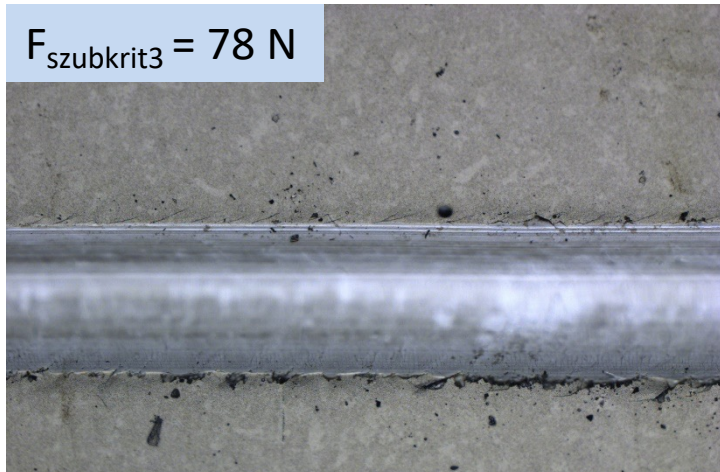
Húzófeszültség okozta íves repedés

$F_{\text{szubkrit2}} = 54 \text{ N}$



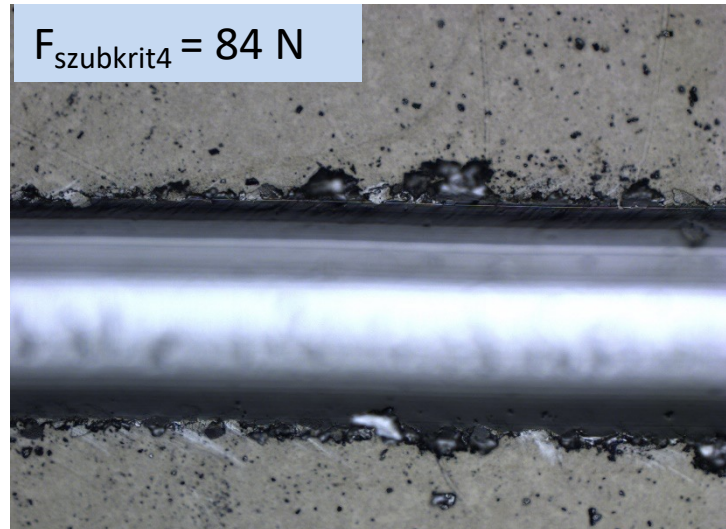
Húzófeszültség okozta íves repedés + Felgyűrődés okozta repedés

$F_{\text{szubkrit3}} = 78 \text{ N}$



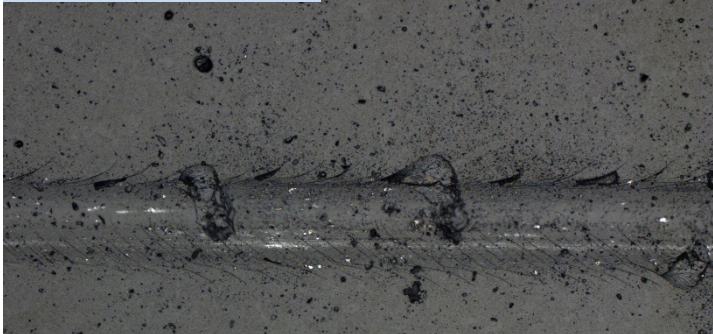
Részleges leválás + Rugalmas lepattogzás

$F_{\text{szubkrit4}} = 84 \text{ N}$



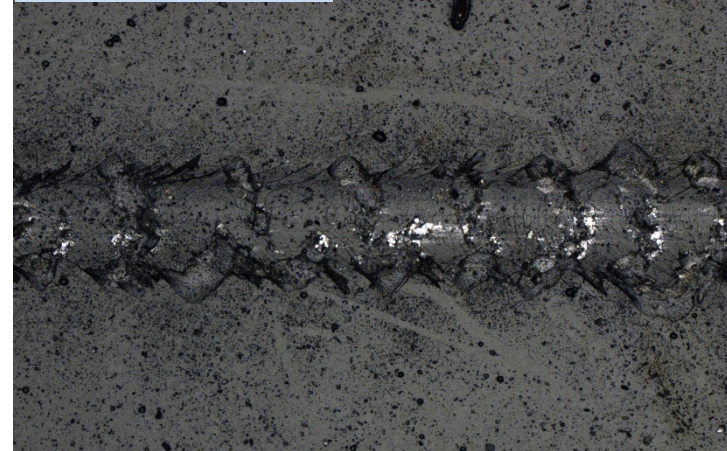
Teljes leválás

$F_{\text{szubkrit1}} = 30 \text{ N}$



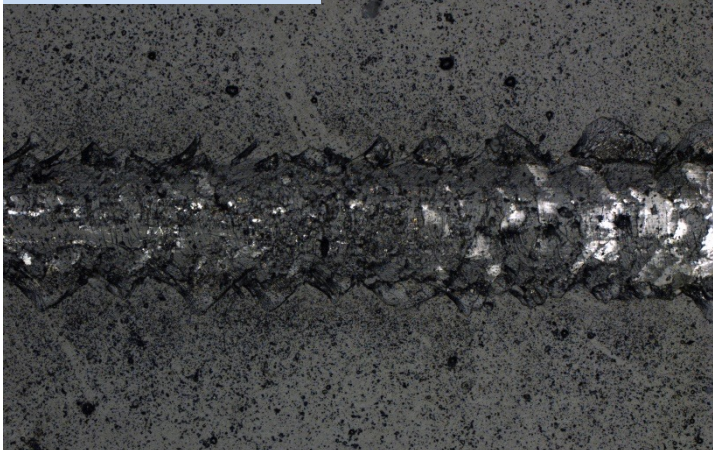
Oldalirányú berepedés +
Nyomófeszültség okozta Chevron
típusú repedés

$F_{\text{szubkrit2}} = 48 \text{ N}$



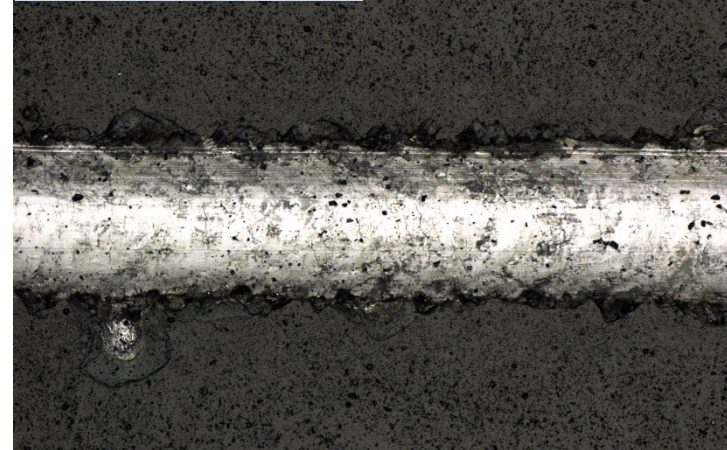
Felgyűrődés

$F_{\text{szubkrit3}} = 60 \text{ N}$



Felgyűrődés + Részleges leválás

$F_{\text{szubkrit4}} = 65 \text{ N}$



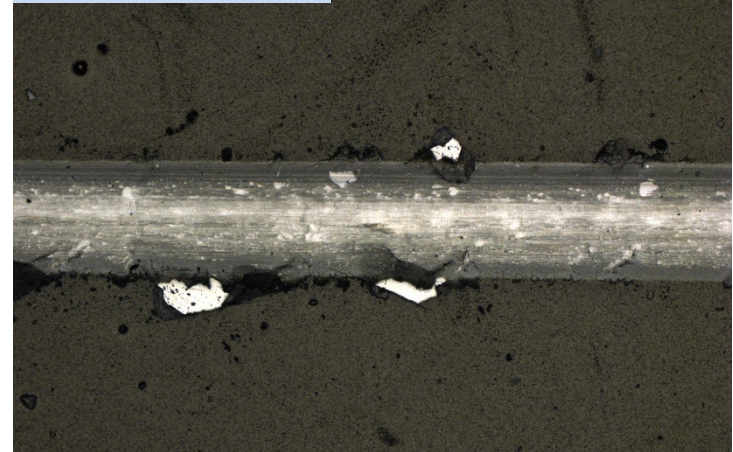
Teljes leválás

$F_{\text{szubkrit1}} = 15 \text{ N}$



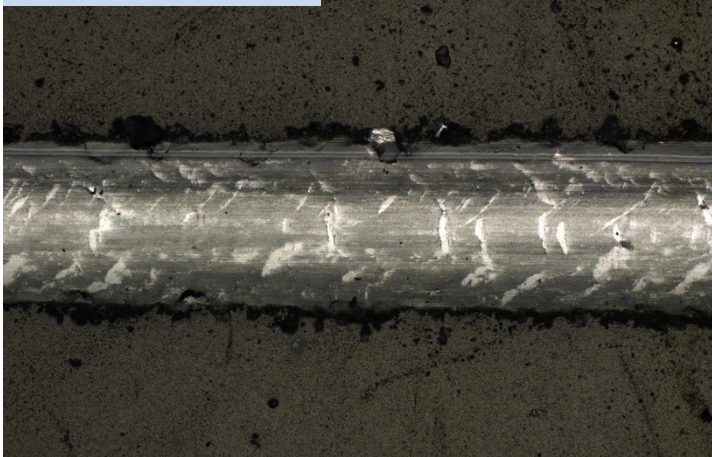
Részleges leválás

$F_{\text{szubkrit2}} = 30 \text{ N}$



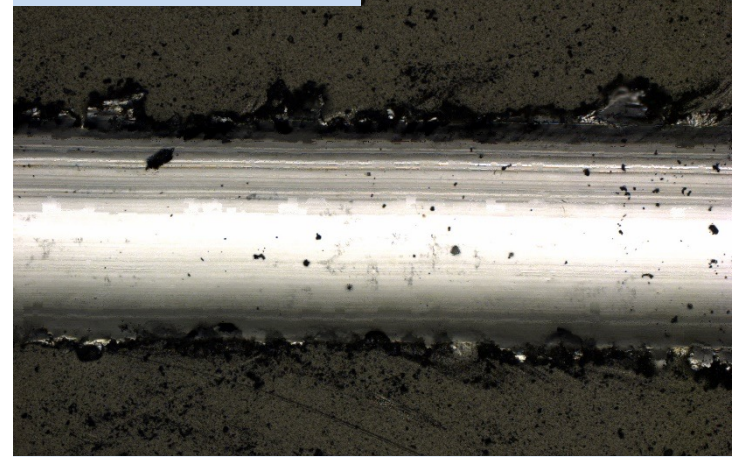
Részleges leválás + Felgyűrődés

$F_{\text{szubkrit3}} = 90 \text{ N}$



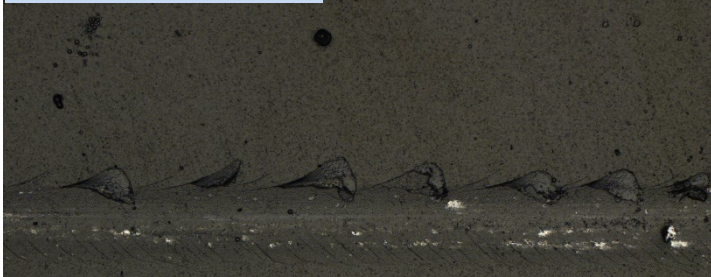
Rugalmas lepattogzás

$F_{\text{szubkrit4}} = 114 \text{ N}$



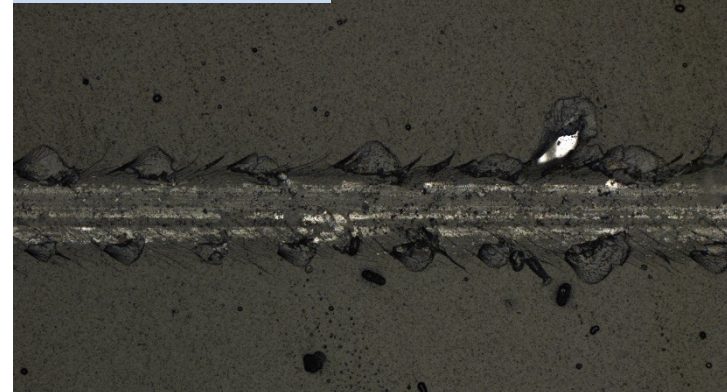
Teljes leválás

$F_{\text{szubkrit1}} = 30 \text{ N}$



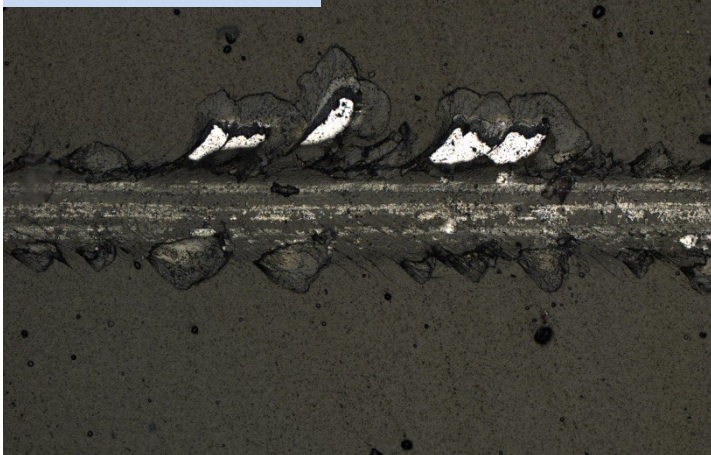
Oldalirányú berepedés + Egyoldali
ék alakú leválás +
Nyomófeszültség okozta Chevron
típusú repedés

$F_{\text{szubkrit2}} = 42 \text{ N}$



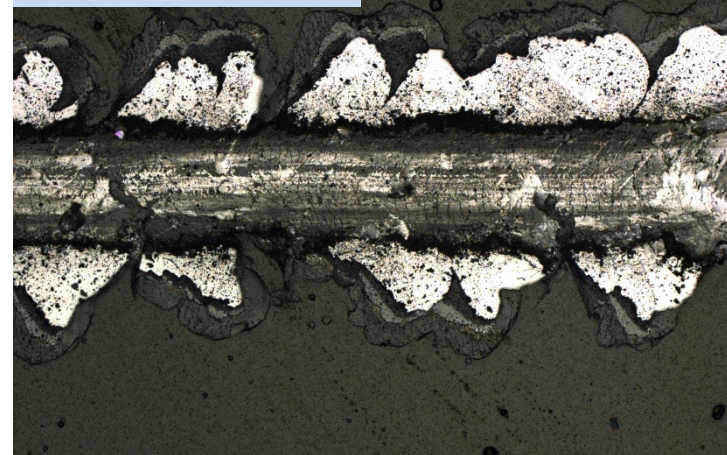
Oldalirányú berepedés + ék alakú
leválás

$F_{\text{szubkrit3}} = 48 \text{ N}$



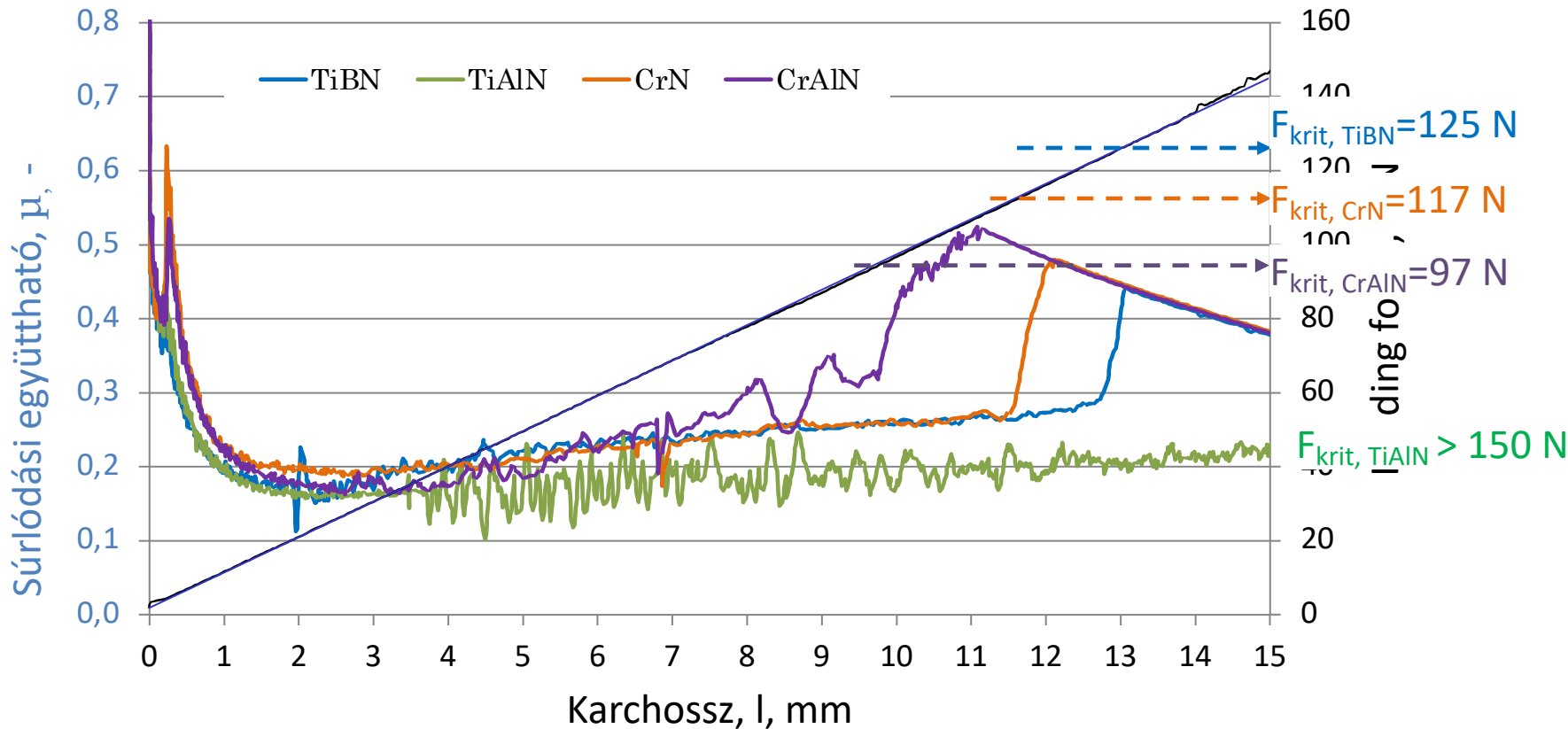
Részleges kagylós lepattogzás

$F_{\text{szubkrit4}} = 60 \text{ N}$



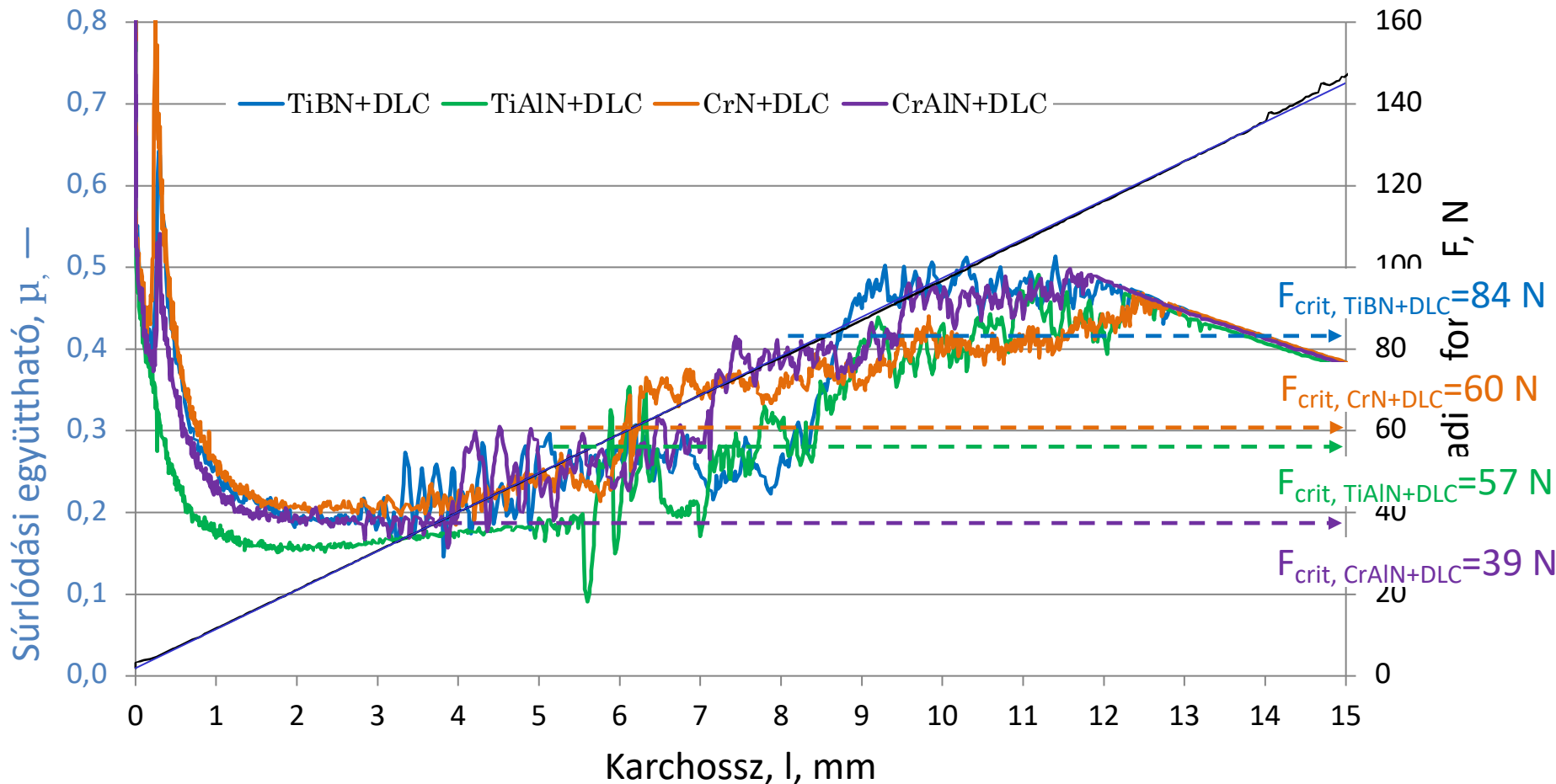
Teljes kagylós lepattogzás

Karcvizsgálati eredmények I.



- TiAlN: F_{krit} nagyobb, mint 150N.
- CrAlN: jelentősen kisebb kritikus terhelőerő.

Karcvizsgálati eredmények II.



- Minden vizsgált DLC fedőréteges bevonatrendszer hasonló viselkedést mutat karcvizsgálat során.
- TiBN+DLC már kis terhelésnél korai károsodást mutat (32N), de a bevonatrendszer teljes tönkremeneteléhez tartozó kritikus terhelőerő a legnagyobb a vizsgált bevonatok közül.

Karcvizsgálati eredmények III.

Növekvő terhelőerő: 1-150N

	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
TiBN				Fs1									Fs3	Fs4											FK					
TiBN+ DLC			Fs1			Fs2	Fs3										FK													
TiAlN								S1				S2				S3									S4					FK
TiAlN +DLC					Es1																									
CrN					Es1																									
CrN+ DLC																														
CrAlN		Fs1				Fs2												Fs3	FK				Fs4							
CrAlN +DLC						Fs1	FK			Fs3	Fs4																			

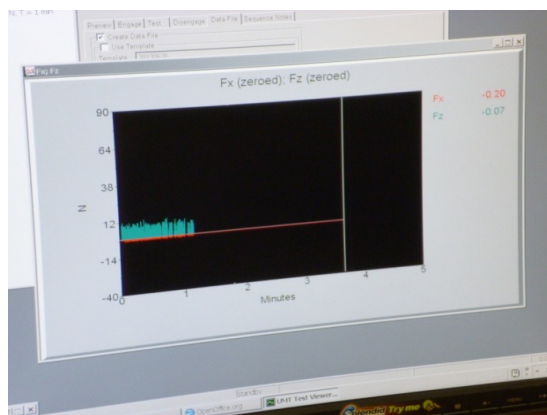
A DLC fedőréteges bevonatokra jellemző kritikus terhelőerő minden esetben kisebb volt, mint az egyrétegű változatoké.

Ball-on-disc kopásvizsgálat

Vizsgálati paraméterek

Normál terhelés, F	10 N
Csúszási úthossz, L	144 m
Csúszási sebesség, v	10 mm/s
Kopásnyom sugara, r	3 mm
Súrlódó ellentest	SiC golyó, $\phi 5,93$ mm
Hőmérséklet	26 ± 3 °C
Kenőanyag	Nincs

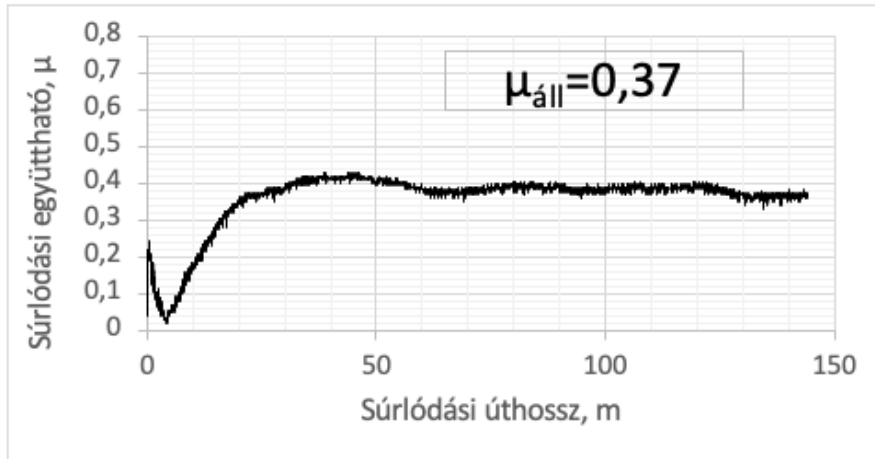
UNMT-1 (CETR) tribotest modul



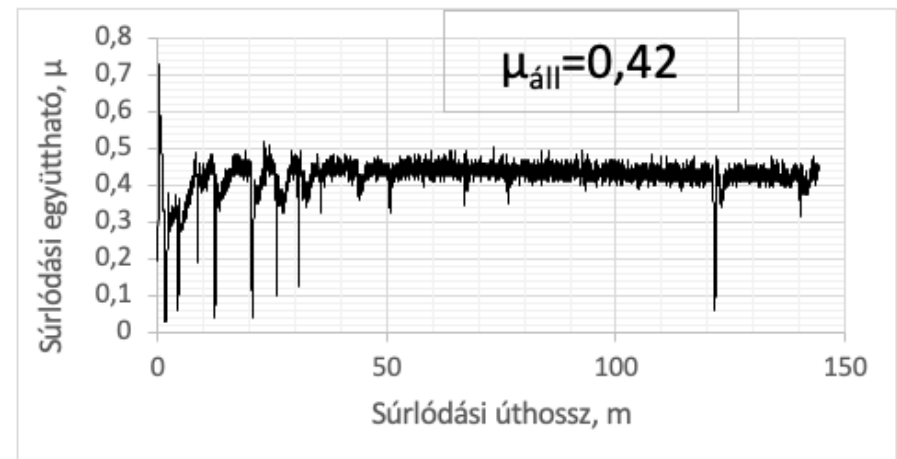
Berendezés: UNMT-1 felületvizsgáló; Mérőhely: ME, ATI

Kopásvizsgálat ($v=10$ mm/s, $F=10$ N)

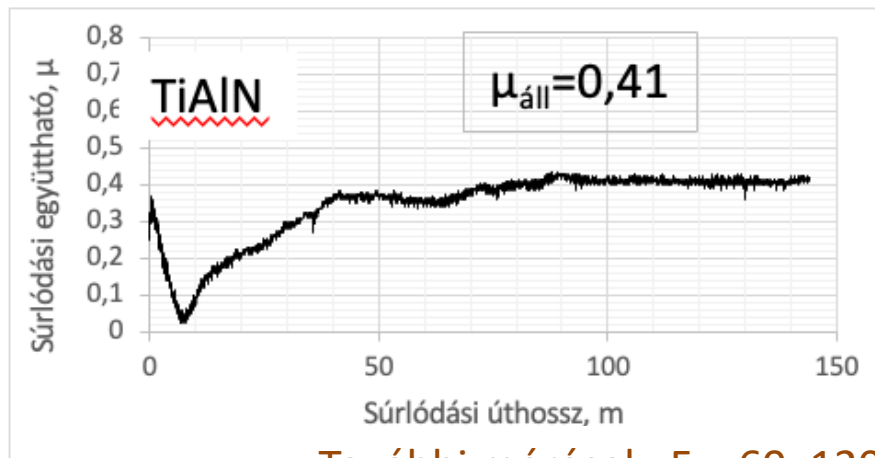
TiBN



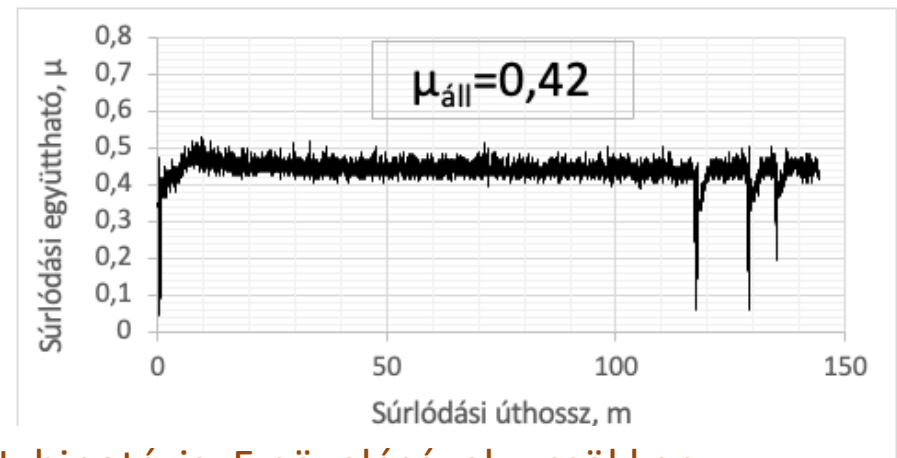
TiBN+DLC



TiAlN



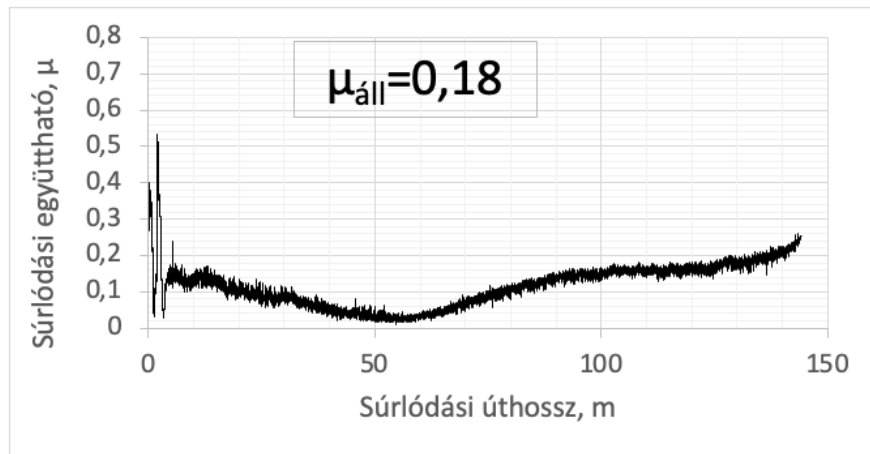
TiAlN+DLC



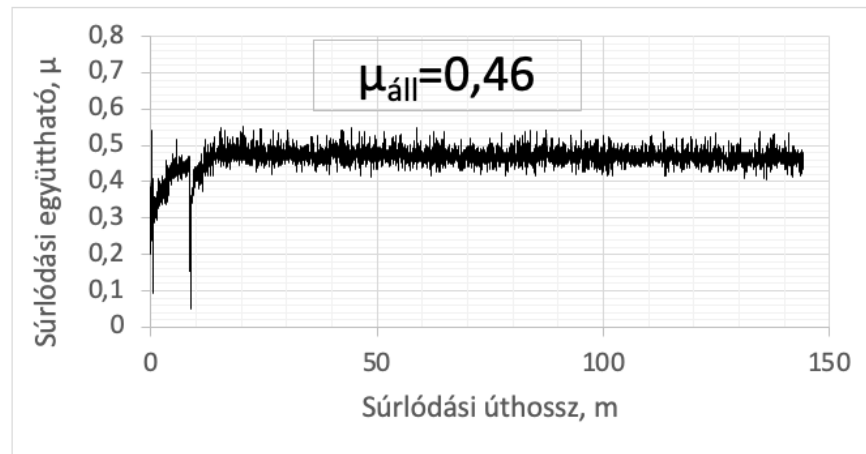
További mérések: $F = 60, 120$ N; hipotézis: F növelésével μ csökken

Kopásvizsgálat ($v=10$ mm/s, $F=10$ N)

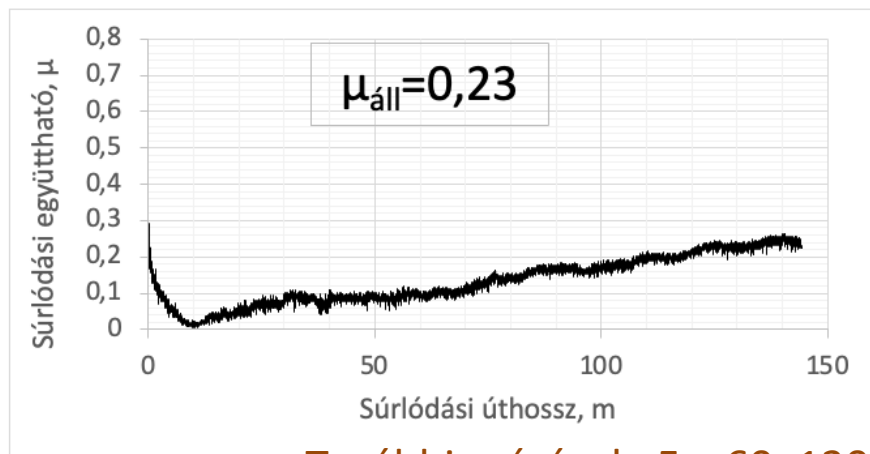
CrN



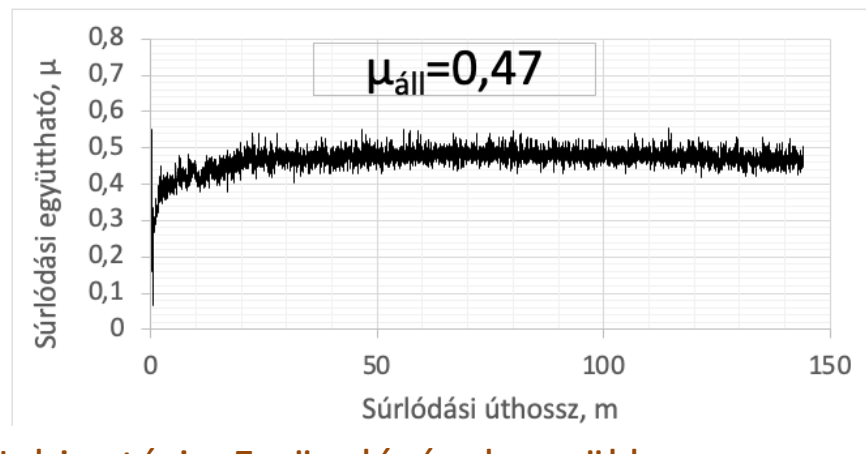
CrN+DLC



CrAlN



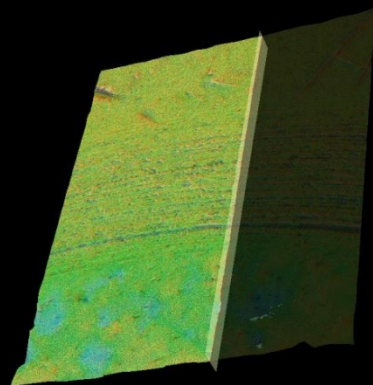
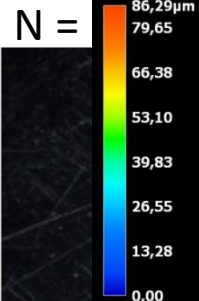
CrAlN+DLC



További mérések: $F = 60, 120$ N; hipotézis: F növelésével μ csökken

Kopási károsodás elemzése – folyamatban

Axis 700M V16



Axis Observer N = 100x



Összefoglalás

- A **DLC** fedőréteg alkalmazása befolyásolja, jellemzően **rontja** a **karcolással szembeni ellenállóképességet**, és mind a kritikus terhelőerő, mind a szubkritikus és kritikus károsodási módok tekintetében csökkenő értékeket eredményez.
- Az **egyrétegű TiBN** bevonat **gyengébb karcállóságú**, mint a **TiAlN változat**, ugyanakkor ezek DLC fedőréteges változatai esetében a TiBN+DLC mutat nagyobb ellenállást a karcolásos jellegű terhelésekkel szemben.
- Az egyrétegű **CrN bevonatokhoz képest** a módosított **CrAlN** bevonatok **kevésbé karcállóan**, továbbá ezen bevonatok többrétegű, DLC fedőréteges változatai is gyengébb karcállóságot mutatnak.
- Kis terheléssel végzett kopásvizsgálatoknál ($v = 10 \text{ mm/s}$, $F = 10 \text{ N}$) nem alakul ki tribofilm képződés, ezért a kedvező, kis súrlódási együttható eléréséhez nagyobb terhelések szükségesek.

A kutatás további iránya

Kutatási tevékenység, feladat		2024/25 I.	2024/25 II.
Karcvizsgálat	Szubkritikus terhelőerők azonosítása	X	
	Szubkritikus károsodási módok azonosítása	X	
	Karckárosodási térkép készítése		X
Publikáció készítése a karcvizsgálat eredményeiből (Q1, Q2)		X	
Ball-on-disc kopásvizsgálatok	$v = 10 \text{ mm/s}$, $F = 10 \text{ N}$	X	
	$v = 10 \text{ mm/s}$, $F = 60 \text{ N}$	X	
	$v = 30 \text{ mm/s}$, $F = 60 \text{ N}$	X	
	$v = 30 \text{ mm/s}$, $F = 120 \text{ N}$	X	
	Kopási tényező számítása	X	
Publikáció készítése a kopásvizsgálatok eredményeiből (Q1, Q2)			X
Maradó feszültség vizsgálatok végrehajtása, kiértékelése		X	
Profilometriai vizsgálatok végrehajtása, kiértékelése		X	
SEM vizsgálatok végrehajtása, kiértékelése		X	X
Tézisek megfogalmazása		X	X
Disszertáció kidolgozása		X	X
Disszertáció védeése			X

KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!