dc_589_12

POLIMER GÉPELEM-ANYAGOK TRIBOLÓGIAI JELLEMZÉSE

Értekezés

Az „MTA doktora” tudományos fokozat megszerzéséért

Kalácska Gábor

2012.

dc_589_12

Családomnak

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék i
Jelölések és rövidítések iii
4. fejezet iii
5. fejezet iv

1. Bevezetés és kutatási célok 1
1.1. Előzmények 1
1.2. Célkitűzés 4

2. Szakirodalmi alapok 6
2.1. Polimerek súrlódása 6
2.1.1. Súrlódás adhéziós komponense 7
2.1.2. Súrlódás deformációs komponense 9
2.1.3. A terhelés hatása a súrlódásra 10
2.1.4. A csúszási sebesség hatása a súrlódásra 12
2.1.5. A hőmérséklet hatása a súrlódásra 13
2.2. Polimerek kopásának elméleti alapjai 14
2.3. Műszaki felületek módosításának irodalmi háttere 17
2.3.1. Rétegleválasztás 17
2.3.2. Felületmódosítás 18
2.3.2.1. Lézeres felületmódosítás 18
2.3.2.2. Ionsugaras felületmódosítás 18
2.3.2.3. Plazmás technológiák, plazma immerziós ion implantáció 19
2.4. Tribológiai modellezés polimer próbatestekkel 21

3. Tribológiai modellrendszerek fejlesztése 25
3.1. TLA módszerrel kutatott, fretting folyamathoz fejlesztett laboratóriumi berendezés 25
3.2. Nagyméretű, egyszerű geometriájú polimer próbatestekhez (Large-Scale) fejlesztett befogó készülék 27
3.3. Moduláris rendszerű, dinamikus modellezésre alkalmas triboteszter fejlesztése 29
3.4. Következtetések 31

4. Műszaki polimerek súrlódása 33
4.1. A kutatási program előzményei 33
4.2. A kutatáshoz használt műszaki műanyagok és tulajdonságaik 35
4.3. Mérési rendszer 37
4.3.1. Az alkalmazott pin-on-disc és dinamikus pin-on-plate vizsgálati rendszerek 37
4.3.2. Vizsgálati feltételek 39
4.4. Eredmények és értékelésük 41
4.4.1. Súrlódási eredmények 41
4.4.2. Súrlódási tényező alakulása a folyáshatár függvényében 44
4.4.3. A szakadási nyúlás és súrlódási tényező kapcsolata 46
4.4.4. Súrlódási tényező alakulása a rugalmassági modulus függvényében 46
4.4.5. A keménység hatása a súrlódásra 49
4.5. A kutatás összefoglalása és következtetések 51
4.6. Tézisek 51

5. Ionimplantációval módosított polimer felületek adhéziós tribológiai viszonyai 54
5.1. A kutatás célja 55
5.2. Kezeletlen és plazmaimmerziós ioninplantációval (PIII) kezelt PETP tribológiai jellemzői 55
5.2.1. Vizsgálati rendszer és anyagok (PETP) 55
5.2.2. Eredmények 57
5.2.2.1. Felület és rétegstruktúra jellemzése 57
5.2.2.2. Pin-on-disc tribológiai vizsgálatok száraz körülmények között 58
5.2.2.3. Pin-on-disc tribológiai vizsgálatok vízkenésű körülmények között 69
5.2.3. PETP eredmények összefoglalása 72
5.2.4. Következtetések 73
5.3. Kezeletlen és plazmaimmerziós ioninplantációval (PIII) kezelt PA6 tribológiai jellemzői 74
5.3.1. Kutatási rendszer és anyagok (PA6) 74
5.3.2. PA6 eredmények 76
5.3.2.1. XPS mérések 76
5.3.2.2. Nedvesítő képesség és a felületi energia 77
5.3.2.3. PA6 pin-on-disc tribológiai vizsgálatok száraz csúszási rendszerben 78
5.3.2.4. PA6 pin-on-disc tribológiai vizsgálatok vízkenéssel 85
5.3.2.5. Pin-on-disc tribológiai vizsgálatok olajkenéssel 88
5.3.3. PA6 eredmények összefoglalása 92
5.3.4. Következtetések 92
5.4. Tézisek 93

6. A kutatás eredményeinek hasznosítása 96

7. Az értekezés témakörében megjelent fontosabb publikációk 97

8. A kutatási tevékenységet támogató programok 99

Felhasznált irodalom i

Köszönetnyilvánítás x

1. sz. melléklet. Tribológiai vizsgálatok folyamata xi
2. sz. melléklet. Dinamikus triboteszter konstrukciója xii
3. sz. melléklet. Pin-on-disc modul xiii
4. sz. melléklet. Dinamikus „pin-on-plate” modul xiv
5. sz. melléklet. Alternáló „reciprocating” modul xv
6. sz. melléklet. Fogaskerék fogsúrlódási modul xvi
7. sz. melléklet. Lineáris mozgású abráziós modul xvii
8. sz. melléklet. Módosított „sand-slurry” abráziós modul xviii
9. sz. melléklet. Forgó gépelemvizsgáló modul xix
10. sz. melléklet. Anyagok és *pv* határértékek xx
11. sz. melléklet. Anyagok és mechanikai tulajdonságok xxi
12. sz. melléklet. Súrlódási tényezők xxii

Jelölések és rövidítések

Adott jelölés a műszaki gyakorlatban több mérendő és mérhető egységet, jelenséget, mértéket szimbolizálhat. A többszörös felhasználású jelek aktuális értelmezését a szövegkörnyezet pontosan meghatározza.

4. fejezet

Jelölés	Tartalom	Mértékegység
P	Normál terhelés	N
F_x	Súrlódó erő komponens	N
F_y	Súrlódó erő komponens	N
R_a	Átlagos felületi érdesség	μm
μ	Súrlódási tényező	-
F_s	Súrlódási erő	N
E	Rugalmassági modulus	MPa
σ_y	Folyáshatár	MPa
pv	Nyomás és sebesség szorzata	$MPa \cdot ms^{-1}$
H	Shore D keménység	-
ε_b	Szakadási nyúlás	%

Fontosabb rövidítések

PTFE	Politetrafluor-etilén
PTFE/graphite	Politetrafluor-etilén / grafit kompozit
UHMW-PE HD500	Ultra nagy molekulatömegű polietilén, HD 500
UHMW-PE HD1000	Ultra nagy molekulatömegű polietilén, HD 1000
PA 4.6	Poliamid 4.6
PA6E	Extrudált poliamid 6
PA6G(Mg)	Öntött poliamid 6 magnéziumos katalizálású
PA6G(Mg)/oil	Öntött poliamid 6 magnéziumos katalizálású / kenőolaj kompozit
PA6G(Na)/MoS_2	Öntött poliamid 6 nátrium katalizálású / molibdén-diszulfid kompozit
PA6G/PE	Öntött poliamid 6 nátrium katalizálású / polietilén kompozit
PA 66 GF30	Poliamid 66 / üvegszál kompozit
PETP	Polietilén-tereftalát
PETP TF	Polietilén-tereftalát / politetrafluor-etilén kompozit
POM C	Polioximetilén kopolimer
PPS HPV	Polifenilén-szulfid / kenőanyag és üvegszál kompozit
PSU	Poliszulfon
PES	Poliéter-szulfon
PVDF	Polivinildén-fluorid

PEEK	Poliéter-éterketon
PEEK GF	Poliéter-éterketon / üvegszál kompozit
PEEK Mod	Poliéter-éterketon / szénszál, politetrafluor-etilén és molibdéndiszulfid kompozit

5. fejezet

Jelölés	Tartalom	Mértékegység
P	Normál terhelés	N
F_x	Súrlódó erő komponens	N
F_y	Súrlódó erő komponens	N
Δd	Befogófej elmozdulás	mm
d	Kopás + deformáció	mm
R_a	Átlagos felületi érdesség	μm
μ	Súrlódási tényező	-
F_s	Súrlódási erő	N
l	Súrlódási úthossz	m
E	Rugalmassági modulus	GPa
pv	Nyomás és sebesség szorzata	$MPa \cdot ms^{-1}$
L_i	Hőlégsugár beállítási magassága	mm
T_s	Próbatest felületi hőmérséklet	ºC
a*	Felület jelölése a modellben	-
b*	Felület jelölése a modellben	-
c*	Felület jelölése a modellben	-
d*	Felület jelölése a modellben	-
e*	Felület jelölése a modellben	-
V’	Levegő térfogatáram	mm^3/sec
F_f	Súrlódási erő	N
F_a	Súrlódási erő adhéziós komponense	N
F_d	Súrlódási erő deformációs komponense	N
a	Próbatest elrendezés jelölése	-
b	Próbatest elrendezés jelölése	-
c	Próbatest elrendezés jelölése	-
A	Együttható	ºC
τ	Időállandó	sec
c	Hőmérsékleti konstans	ºC
E	Energia	J
Q	Hőmennyiség	J
c	fajhő	$J/kg \cdot K$
m	tömeg	kg
T	hőmérséklet	ºC vagy K

κ	Hőátszármaztatási tényező	$W/m^2 \cdot K$
λ	Lineáris hővezetési tényező	$W/m \cdot K$
α	Konvekciós tényező	$W/m^2 \cdot K$
δ	Felületi rétegvastagság	mm
T_0	Környezeti hőmérséklet	^oC
A_i	Felület	mm^2
σ_s	Szilárd felület felületi energiája	$mJ\ m^{-2}$
σ_L	Folyadék felületi energiája	$mJ\ m^{-2}$
γ_{polar}	Felületi energia poláris komponense	$mJ\ m^{-2}$
γ_{disp}	Felületi energia diszperzív komponense	$mJ\ m^{-2}$
γ_{tot}	Teljes felületi energia	$mJ\ m^{-2}$
Θ	Folyadék csepp peremszög	^{o} [fok]
d’	Fajlagos kopás	$mm/MPa \cdot m$

Fontosabb rövidítések

PETP	Polietilén-tereftalát
PA6	Poliamid 6 (extrudált rúdból esztergált próbatest)
PA66 GF-30	Poliamid 66, 30% üvegszál erősítéssel
POM C	Polioximetilén kopolimer
XPS	Röntgen-fotoelektron spektroszkópia
PIII vagy PI^3	plazmaimmerziós ionimplantáció
NPIII	Nitrogén plazmaimmerziós ionimplantáció
SRIM	Programcsomag: „Stopping and Range of Ions in Matter”
PoD	Pin-on-disc („tű-tárcsa” mérési elrendezés)

Polimer gépelem-anyagok tribológiai jellemzése

1. Bevezetés és kutatási célok

1.1. Előzmények

A gépszerkezetek működését – teljesítő képességét, élettartamát és megbízhatóságát – alapvetően meghatározzák a terhelés alatt elmozduló súrlódó kapcsolataik. A jól tervezett súrlódó kapcsolatok lehetővé teszik a munkavégzéshez szükséges teljesítmény gazdaságos átadását, továbbá megvezetik a munka minőségét meghatározó mozgó elemeiket. A súrlódó kapcsolatokat (eltérő szintű tribológiai rendszereket) rendszerint két, egymáson elmozduló szilárd test, azok között elhelyezkedő közbenső anyag, és a környezet alkotja (elemi tribológiai rendszer). A súrlódó kapcsolatok viselkedése, a bennük lejátszódó tribológiai – súrlódási, kopási és kenési – folyamatoktól függ, amelyeket a rendszerelemek tulajdonságai és az elemek között kialakuló kölcsönhatások döntő mértékben befolyásolnak. Továbbá a tribológiai folyamatokra rendkívül nagy hatást gyakorolnak a környezet jellemzői is, vagyis a környezet és a súrlódó szilárd testek, a környezet és a közbenső anyag közötti kölcsönhatások. Könnyen belátható, hogy a környezet összetétele, hőmérséklete, fizikai és kémiai tulajdonságai mind befolyásolják a súrlódási és kopási folyamatokat és hatást gyakorolnak a kenés hatékonyságára is. Azonos súrlódó kapcsolatok egészen másképp viselkednek levegőtől körülvéve, vákuumban, tengervízben, nedves poros stb. környezetben.

Jelenleg a gépészet szilárdságra kiválóan, élettartamra és kifáradásra megfelelően tud méretezni, de tribológiai szempontból – néhány kivételtől eltekintve – a tervezéshez szükséges ismeretek még hiányosak. Nem állnak rendelkezésre az ehhez szükséges anyagjellemzők, többek között azért sem, mert a tribológiai folyamatokat meghatározó tulajdonságok rendszerfüggők, mindig az adott súrlódó kapcsolatra érvényesek, és azok megbízhatóan nem használhatók fel más tribológiai rendszer jellemzésére, kivéve, ha a rendszer elemei, szerkezete és működési jellemzői jelentős mértékben nem térnek el egymástól. Ezért a mai napig kiemelten fontos a tribológiai rendszerek modellezése, a modelleken alapuló probléma felismerése és megoldása.

A tribológia tudomány alapvető törvényszerűségei minden súrlódó kapcsolatra érvényesek, mivel azok az egymással érintkező, és egymáshoz képest terhelés alatt elmozduló felületeken lejátszódó folyamatokkal és jelenségekkel foglalkoznak. Ez a fenti meghatározás elég tág érvényű ahhoz, hogy a súrlódás és a vele kapcsolatos kopás, majd az ezeket befolyásoló

intézkedések (pl. kenés) teljes vertikumát tartalmazza. A szakirodalomban többféle részletes definíciót is megfogalmaztak **[Bowden F.P. et.al. 1950, Dowson D. 1970, Vámos E. 1983, Jost H.P. 1993, Bushan B. 2001]** a tribológiáról, melyekből megállapítható, hogy az egy olyan interdiszciplináris szakterület, amelyben – többek között – az anyagtudomány, felület fizika és kémia, biológia, gépszerkezettan, gépüzemeltetés és gépfenntartás egyaránt megjelenik.

A tribológiai rendszerek fontos elemei a súrlódó szerkezeti anyagok és azok anyagjellemzői. A gépészeti megoldásokban hagyományosan acél és más fémes konstrukciók domináltak évszázadokon keresztül, ha csak a fontosabb hajtástechnikai elemeket tekintjük (fogazott kerekek, sikló támasztások…stb.). A mérnöki gyakorlat tribológiai eredetű problémáinak – mint pl. súrlódási melegedés, kopás, – felismerése és rendszerszemlélet alapján történő kezelése csak az utóbbi ötven év eredménye, mindemellett az anyagminőség meghatározó szerepét a súrlódás és kopás terén már Leonardo Da Vinci is felismerte. Az alkalmazott szerkezeti anyagok megválasztása, a súrlódó párok anyagainak váltogatása, a felületek tudatos módosítása (pl. a bevonatok, a kenés) elvezetett ahhoz a tudáshoz, mely a súrlódó- és kopó rendszerek élettartam optimálását, de legalábbis élettartam növelését tette lehetővé.

E folyamatnak fontos része volt a polimerek megjelenése a szerkezeti anyagok között. Eleinte másodlagos szerepkörben, igénytelen alkalmazási helyeken kerültek felhasználásra, majd a polimertechnológia rohamos fejlődése a 2. világháború után a polimer-alkalmazástechnika gyors előretörését eredményezte. Az újabb és újabb polimer mátrixok, a kompozitok megjelenése kiszélesítette az alkalmazási lehetőségeket egyrészt annak köszönhetően, hogy a hőre lágyuló, korszerű műszaki műanyagok hőállósága már 400-500ºC környékéig terjed, másrészt a mechanikai terhelhetőség 100 MPa felett jár. A polimerek, mint gépelem anyagok, mégis leginkább annak köszönhetik elterjedésüket, hogy a száraz súrlódási-, kopási viselkedésük fémekkel párosítva igen kedvező. Általános felismeréssé vált, hogy nagyszámú polimer/acél kombinációban a súrlódó kapcsolat kenőanyagmentesen is üzemképes, a kopási élettartam javítható, a szerkezet olcsóbb, könnyebb, korrózióállóbb és költséghatékonyabb.

Természetszerű, hogy az ipari alkalmazások terjedése tovább gyorsította az anyagfejlesztést, és igényként merült fel a polimerek tribológiai sajátosságainak tisztázása, kutatása, a törvényszerűségek feltárása.

A súrlódó rendszerek kutatása nem merül ki abban, hogy megfelelő anyagpárok tribológiai folyamatait kell megismerni és optimálni, hanem az intelligens, önjavító képességű, szenzorikán alapuló rendszerek fejlesztése is napirenden van. E területen a polimerek

alkalmazása szintén kiemelt. Világviszonylatban jelentős alap- és alkalmazott kutatási programok (csak Európában pl. EU kutatási keretprogramok, COST projektek…) kapcsolódnak az anyagtudomány, felületfizika, kémia, biológia és gépszerkezettan területéhez, az „öngyógyító" tribológiai rendszerek fejlesztéséhez.

A tribológiai kutatások egyik legfontosabb eszköze a modellezés. Az empirikus közelítésből felállított egyszerű kopás-számítási módszerek **[Archard J.F. 1953, Greenwood J.A. et.al. 1971, Kragelszkij I.W. 1971, Kragelszkij et.al. 1987, Johnson K.L. 1985, Kozma M. 2001]** nem általánosíthatók, és általában egy-egy kopási mechanizmusra vonatkoztatottak, melyek tisztázása szintén megfigyeléseken alapszik. A modellezés a jelenlegi technikai és informatikai háttér birtokában a lehető legjobb és legmegbízhatóbb módszer. Mivel minden súrlódó rendszer egyedi, és a folyamatok igen nagyszámú változót is tartalmazhatnak sztochasztikus hatásmechanizmussal, így általánosítható és egyszerű egyenletek nem állnak rendelkezésre.

Egyelőre eltekintve a polimer-tribológia sajátosságaitól **[Yamaguchi Y. 1990]**, a tribológia fejlődéstörténetéből kitűnik, hogy a súrlódáshoz és kopáshoz kötődő energetikai és műszaki megbízhatósági problémák kutatása jelentős szemléletbeli változáson ment át (*1.1. táblázat*) **[Kalácska G. 2009]**.

1.1. táblázat. A tribológia fejlődésének fontosabb elemei

Gépszerkezetek és üzemeltetésük		**Kapcsolódó alapkutatások**
jellegzetes gépelempárok súrlódási problémáinak tanulmányozása	Fejlődés iránya	súrlódást és koptatást viselő szerkezeti anyagok
anyagpárosítások vizsgálata		kenőanyagok, kenés elmélet
kenéstechnikai módszerek fejlesztése		anyagpárosítások
folyamatok tanulmányozása az igénybevétel jellege alapján		felület fizikai- és kémiai folyamatok, reakciók
kopási mechanizmusok definiálása		hőtani és egyéb transzport folyamatok
kopásszámítás empirikus egyenletekkel		energetikai elméletek, entrópia, entalpia
tribológiai rendszer analízis		új szerkezeti anyagok, ötvözetek, kompozitok
rendszer modellezés		intelligens kenéstechnika, felületi bevonatok
numerikus modellezés alapjelenségekre		jelző és öngyógyító anyagok és felületek
komplex tribológiai intézkedések		kenéstechnika kvantumfizikai alapokon, nanotribológia
……..		……..

A dolgozat a polimer-tribológia területén alkalmazástechnika szemléletű, mérnöki megközelítéssel tervezett kutatási rendszerek fontosabb eredményeit ismerteti a továbbiakban.

1.2. Célkitűzés

A polimer-tribológia alapfolyamatai – mint pl. súrlódási és kopási trendek, a terhelés hatása, hővezetés, felületi adhéziós folyamatok, transzfer-film jelenség stb. – a szakirodalomból ismertek, jórészt tisztázottak, de mérnöki tervezésre közvetlenül nem alkalmazhatók. Felhívják a figyelmet, hogy adott anyagokkal egy jellegzetes üzemi környezetben mire lehet számítani, de a gépszerkesztést közvetlenül nemigen segítik, mivel minden polimermátrix más- és más eredményt szolgáltat egy adott súrlódó rendszerben. A szakirodalom egyik fő problémája, hiányossága az, hogy a jelenségek feltárása jellemző módon egy-egy polimer- vagy kompozitcsaládra, illetve felületre érvényes. Nagyon kevés a mérnöki gyakorlat számára közvetlenül alkalmazható, átfogó tribológiai kutatási eredmény, ezért célul tűztem ki az alábbiakat.

I. A hőre lágyuló polimer mátrix és kompozitjaik vs. acél felület vonatkozásában:

- Nagyszámú, a mérnöki gyakorlatban használt műszaki műanyag és kompozitjaik súrlódási folyamatának tanulmányozása egyszerű mechanikai tulajdonságok: folyáshatár (σ_y), rugalmassági modulus (E), szakadási nyúlás (ε_b), keménység (H) függvényében. A kutatási eredmények értékelése a mérnöki gyakorlatra alapozott polimer termékcsoportok vonatkozásában.
- A gyakorlati feltételrendszerek modellezésével, a súrlódási folyamatok kutatása a súrlódás bejáratási (running-in) és állandósult (steady-state) szakaszán, eltérő *pv* terhelés szinteken.
- Laboratóriumi modellezés fejlesztése, a dinamikus hatások modellezésének megvalósítása a súrlódás bejáratási szakaszán, a rendszer érzékenységének kutatása a környezeti hatásokkal szemben.

A nagyszámú műszaki műanyag átfogó tribológiai jellemzése után, célom volt a súrlódó gépelem-anyagként leggyakrabban használt PA6 és PETP egy korszerű felületkezeléssel, ionimplantációval módosított felületének tribológiai kutatása is.

II. Nitrogén PIII-val (plazmaimmerziós ionimplantáció) kezelt polietilén-tereftalát (PETP) és poliamid 6 (PA6) vs. acél felület vonatkozásában:

- Tribológiai jelenségek feltárása a csúszási úthossz függvényében, különböző terhelés és csúszási sebesség mellett száraz és víz- valamint olajkenésű körülmények között, pin-on-disc tribométer felhasználásával. Ezen belül:
  - a PIII kezelés felületmódosító hatása, úgymint a felületi réteg összetétele, vastagsága, a gradiens zóna vastagsága, a felületi energia viszonyok változása;
  - a PIII kezelt és referenciaként használt kezeletlen próbatestek pin-on-disc mérése alapján a súrlódási, kopási és hőmérsékleti viszonyok alakulása;
  - a mért tribológiai jellemzők és a felületet jellemző energia közötti kapcsolatok, összefüggések.

2. Szakirodalmi alapok

A polimerek és kompozitjaik tribológiai vonatkozású irodalma rendkívüli mértékben nő, összhangban az ipari alkalmazások terjedésével és az újabb anyagok megjelenésével. A Web of Science adatbázis alapján készült áttekintés **[Quintelier J. 2007]** szerint, a 2000-es évek második felében a polimer-tribológia szakterületén megjelent publikációk száma már több ezerre tehető (*2.1. táblázat*), ami a polimerekkel és kompozitokkal foglalkozó szakirodalom mintegy 25%-át teszi ki.

2.1. táblázat. Publikációk száma a kompozitok és polimer mátrixú kompozitok (PMK), valamint a velük kapcsolatos súrlódás és kopás szakterületéről **[Quintelier J. 2007]**.

	évek				
Szakterület	Összes	< ’80	< ’90	< ’00	> ’00
Kompozitok (fémek, polimerek, kerámiák…)	> 100000	-	-	-	-
Polimer mátrix kompozit (PMK)	14145	35	229	4616	9265
Kompozitok + kopás	3780	29	95	1378	2278
Kompozitok + súrlódás	2354	9	32	975	1338
Kompozitok + kopási mechanizmusok	453	1	3	166	283
PMK + kopás	246	0	4	85	157
PMK + kopási mechanizmusok	35	0	2	12	22
PMK + súrlódás	233	0	2	84	147
PMK + csúszó súrlódás	109	0	1	42	146
PMK + kopás csúszó súrlódással	93	0	1	34	58

A továbbiakban nem térek ki a tribológiai alapjelenségek részletes magyarázatára, pl. a kopási mechanizmusokra, mert számos szakkönyv, tankönyv és kézikönyv tartalmazza ezeket az alapismereteket. A polimer-tribológia irodalmának azon részeit ismertetem röviden, melyek a kutatómunkám jobb megértését segítik, bemutatják azokat a fontosabb előzetes eredményeket, melyeken keresztül újabb ismeretek feltárására nyílt lehetőségem.

2.1. Polimerek súrlódása

A súrlódásról szóló tanulmányokban általánosan elfogadott, miszerint a súrlódás két alapvető és egymástól független felületi jelenségre, az adhézióra és a felületi topográfia deformációjára

vezethető vissza. Ezt a két tagból álló alapmodellt, mely minden anyag vonatkozásában érvényesíthető, Briscoe tovább pontosította a polimerekre vonatkozóan **[Briscoe B.J. 1986, 1992].** A felületek érintkezésének Bowden- és Kragelszkij-féle értelmezéséből **[Bowden F.P. et.al. 1950 és 1964, Kragelszkij I.V. 1982]** kiindulva Briscoe a polimer felületek érintkezése során lejátszódó folyamatot három szakaszra bontotta: (1) határfelületi kötések kialakulása (tekintettel azok típusára és kötési energiájára), (2) a kontaktzónában és annak környezetében kialakult kapcsolatok elnyíródása és szakadása, valamint (3) a stabilizálódó, valós érintkezési felület kialakulása. A súrlódás hatására kialakuló kontaktzónák jellemzői (mint pl. lokális anyag-, hő-, deformációs-, és mozgásviszonyok) messze nem hasonlíthatók össze a hagyományos anyagvizsgálatokkal jellemezhető viselkedésekkel és meghatározható eredményekkel [**Zum Gahr K.H. 1987, Hutchings I.M. 1992]**.

2.1.1. Súrlódás adhéziós komponense

Ha két felület érintkezésbe kerül, felszíni vonzó- és taszító erők hatnak a két közeledő felület atomjai és molekulái között. Ezek az erők semlegesítik egymást egy bizonyos z_0 egyensúlyi távolság esetén. Ha a felületek közötti távolság $z<z_0$ taszítják, ha pedig $z>z_0$ vonzzák egymást. Ezen erők eredőjeként, a valós érintkezési helyeket letapadások, „kapcsolódási pontok” jellemzik, melyek tényleges területe nem egyezik meg a névleges érintkezési felület mértékével. A súrlódási ellenállás adhéziós összetevőjének nagysága az A_t tényleges érintkezési felülettel és az azon kialakult adhéziós kapcsolat R_{nyi} nyírószilárdságával arányos, tehát a súrlódási erő által végzett munka részben a határfelületi kötések elnyírásából adódik. Az adhéziósan tapadt kapcsolódási pont képződésének egyszerű modelljére Bowden és Tabor tett javaslatot **[Bowden F.P. et.al. 1950 és 1964]**.

A műanyagok szerkezeti felépítése, molekulaszerkezete rendkívül változatos, ezért nem meglepő, hogy adhéziós hajlamuk is nagymértékben eltér egymástól, ami igen erős hatást gyakorol súrlódásukra. A legtöbb polimer esetében az adhézió Van der Waals- és a hidrogénkötések kialakulásával jellemezhető **[Buckley D.H. 1981, Bely V.A. et.al. 1982]**. A hidrogénkötés igen rövid távolságon alakul ki az OH, COOH, NHCO és egyéb csoportokat tartalmazó polimerekben. Kedvező körülmények között a két közeledő atomot egy közös proton (H^+ ion) kapcsolja össze, amely erős és stabil kötést biztosít. Azonos, vagy nagymértékben hasonló atom-, illetve molekulaszerkezetű anyagok párosításakor az adhéziós kapcsolat erőssége igen nagy lehet, ami a súrlódási tényezőt rendkívül nagymértékben megnöveli. Adott körülmények között a PA6/ PA6 anyagpár súrlódási tényezője elérheti a

μ=1,2 értéket is **[Kalácska G. 1997]**. Ez a magas érték az azonos molekulaszerkezetek között kialakuló intenzív másodlagos kémiai kötéseknek tulajdonítható erős adhézió eredménye, de eltérő anyagpárosításnál is elérhető hasonlóan magas súrlódási tényező, termoplasztok alkalmazása esetén. Extrém nagy terheléseknél a súrlódási hő hatására a kontaktzóna képlékennyé válik, a megfolyt zóna viszkozitása és a kialakuló felületi kapilláris hatásokból eredő további adhézió képes az eredő súrlódást extrém mértékben megemelni. Ez a jelenség közismert a műanyagfeldolgozás során, mikor fröccsöntésnél, extrudálásnál a polimer/fém kapcsolatban egynél nagyobb súrlódási tényezők is számíthatók. Ilyenkor a Bowden-Tabor-féle modellek nem érvényesek, hiszen a rugalmas- vagy viszkoelasztikus anyagmodellek helyett már áramlási jelenségekkel kell számolni a kontaktzónában.

Általános esetben, a határfelületi csomópontokat (képződésüket, növekedésüket és nyírásukat) a felületek jellege (topográfiája), felületi kémiája és a felületi rétegek feszültségállapota (terhelési viszonyok) határozza meg **[Kragelszkij I.V. 1982]**. A határfelületi csomópontok elszakításakor leváló kopási részecskéket, valamint a környezetüket jellemző erősen deformált rétegeket – ahol a nyírási deformáció bekövetkezik – Kragelszkij kontaktzóna jellemzőként kezelte a kopási modellekben (későbbi szakirodalmak erre a TTS–Tribologically Transformed Structure kifejezést használják). A kontaktzóna viselkedését Godet sokkal tágabb értelemben általánosította **[Godet M. 1984**], felismerve azt, hogy a TTS-nek időbeni dinamikája van, ami a felületi zóna folytonos, de változó mértékű sebesség-kiegyenlítési szerepéből fakad. Így bevezette a „sebességi akkomodáció” fogalmát, amely abban a zónában következik be, ahol a relatív csúszási sebesség nullára csökken. Godet a kontaktzóna fogalmát kiterjesztette az ún. „harmadik testre” is, aminek a két felület közötti terhelésátadásnál és a súrlódás jellegének kialakításánál van meghatározó szerepe. A súrlódásban résztvevő polimer kontaktzóna és annak közeli tartománya (az ún. felületközeli réteg) olyan tulajdonságokkal rendelkezik, amelyek drasztikusan különböznek az alapmátrix tulajdonságaitól.

Ha a határfelületi adhéziós kötés erősebb, mint a gyengébb anyag kohéziója, akkor a gyengébb anyag eltörik (elnyíródik) és polimer-átadásra kerül sor, egyébként a határfelületen következik be a szétválás. Műanyagok esetén jellemző, hogy a felületi erők és a polimer láncok közötti erők közel egyenlők, így az anyagtörés gyakran az alapanyag mátrixban fordul elő. Ez a mechanizmus sem általánosítható, mert fém/polimer érintkezés esetén megfigyelték, hogy bizonyos feltételek mellett a fém is átkerülhet a műanyag felületére **[Buckley D.H. 1981, Bely V.A. et.al. 1982]**. Az elektrosztatikus vonzás is hozzájárul a polimerek érintkezésekor a felületek adhéziójához. A polimer lehet elektron befogadó (acceptor) vagy

adó (donor), az érintkező test eredetétől függően. Fémmel érintkezve a fém az elektron donor, és ha a kapcsolat megszakad, a polimer felület negatív töltést kap **[Derjagin B.V. et.al. 1978]**. Az érintkezésnél fellépő adhézió leírására a szakirodalomban többféle modell található. Közülük a Johnson-Kendal-Roberts (JKR) modell **[Johnson K.L. et.al. 1971]** (amit a kontakt-mechanika modelljének is neveznek) és a Derjaguin-Muller-Toporov (DMT) modell **[Derjagin B.V. et.al. 1975]** a leginkább ismert. A modellek összehasonlító elemzése **[Johnson K.L et.al. 1997, Myshkin N.K. et.al. 1998]** azt mutatja, hogy a JKR elmélet polimerekre, főleg elasztomerekre használható jól mikrométer és annál nagyobb kontakt-méretek esetén, míg a DMT elmélet előnyösebb fémeknél, nanométer nagyságrendben. A modellek „kalibrálásában" korszerű módszerek, többek között atomi erő mikroszkópia, **[Gibson C.T. et.al. 1999, Israelachvili J.N. 1992]**, valamint a felületi adhézió mérésére fejlesztett erőmérő áll már rendelkezésre **[Myshkin N.K. et.al. 2004a].**

A súrlódási erő adhéziós komponensének alakulásában – a már említettek szerint – fontos szerep jut a valós érintkezési felület nagyságának. Hőre lágyuló műanyagok súrlódásánál kiemelten fontos a környezeti hőmérséklet, a súrlódási hő- és sebesség hatásának vizsgálata **[Bowden F.P. et.al. 1964, Hutchings I.M. 1992, Yamaguchi Y. 1990, Myshkin N.K. 2004b]**. Barber **[Barber J.R. 1973]** idealizált geometriákkal, analitikus modell felállításával, számításokkal mutatta be a kontaktzóna hő hatására bekövetkező változásait.

2.1.2. Súrlódás deformációs komponense

Míg a súrlódási erő adhéziós összetevője a tényleges érintkezési felülettel, addig a deformációs komponens, az érdességi csúcsok benyomódásának mértékével (a barázda keresztmetszettel) arányos. Kis terhelés tartományban az érdesség csúcsok alakváltozása rugalmas, benyomódásuk az ellenfelületbe jelentéktelen, ezért a súrlódást főleg az adhézió okozza. A terhelés növelésével a tényleges érintkezési felület közel arányosan, a barázda keresztmetszet pedig progresszíven (közel négyzetesen) növekszik, ezért a súrlódási tényezőben az adhéziós összetevő részaránya fokozatosan csökken, miközben az alakváltozási összetevő erősen növekszik. A kettő eredő görbéjének, a teljes súrlódási tényező görbének minimuma van **[Kragelszkij I.V. 1982, Kozma M. 2001]**. A terhelésnövelés hatására az alakváltozás jellege is megváltozik, a rugalmas alakváltozás fokozatosan átmegy maradó alakváltozásba **[Myshkin N.K. et.al. 2005]**. Részletes tanulmányok olvashatók adott terhelés hatására bekövetkező kontaktzóna változásokról, a kapcsolódó felületek keménységének, rugalmassági modulusának és alakváltozási képességének függvényében **[Briscoe B.J. et.al.**

1998, Shulga H. et.al. 2004, Kovalev A. et.al. 2004], elsősorban PMMA, PS, PC, és UHMW-PE esetén, melyek jellemzően már nem igazi „súrlódó anyagok" a korszerű gépészeti konstrukciókban. Az egymással érintkező, de eltérő mechanikai tulajdonságokkal rendelkező mikrogeometriák terhelés hatására bekövetkező deformációjának legismertebb alapmodelljét Bowden és Tabor ismertette **[Bowden F.P. et.al. 1950 és 1964**]. Levezették a súrlódási tényezőre vonatkozó hatásukat, a felületi érdességcsúcsok – asperitok – meredekségének hatását is figyelembe véve. A súrlódás barázdaképző komponense, vagy deformációs komponense, természetesen önmagában is hordoz adhéziós hatást, mely a barázdaképződés felületén hat, és további mikroforgácsolást okozhat, ami az eredő súrlódási ellenállás további növekedését eredményezi.

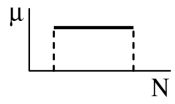
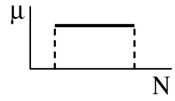
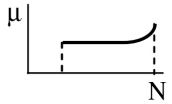
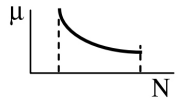
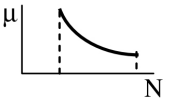
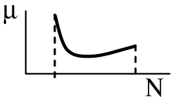
A polimereknél, főleg a hőre lágyuló műanyagoknál, még egy további hatással is számolni kell, ami a tényleges érintkezési felületet és a súrlódás adhéziós és deformációs komponensét is befolyásolja: ez az anyagok viszkoelasztikus viselkedéséből adódó hiszterézis veszteségi energia, mely a súrlódás során hővé alakul, és a kontaktzóna deformációját, ebből adódóan az adhéziós terület nagyságát, valamint a barázdaképződést jelentősen befolyásolja **[Moore D.F. 1972]**.

2.1.3. A terhelés hatása a súrlódásra

Általánosan elfogadott, hogy makroszkópikus modell esetén a súrlódó erő arányos a normál terheléssel (Coulomb törvény). Számos kutató által végzett korai kísérlet kimutatta, hogy ez a törvény érvényes egyes polimerekre is, adott körülmények között (*2.2. táblázat*) **[Myshkin N.K. et.al. 2005]**. Shooter **[Shooter K. et.al. 1952/b]** azt találta vizsgálati rendszerében, hogy a súrlódási együttható gyakorlatilag állandó marad a 10-100 N tartományban, ha egy 6,35 mm-es sugarú acélgolyó csúszik PTFE, PMMA, PVC és PE és PA felületen. Más szerzők hasonló eredményeket kaptak ugyanezekkel az anyagokkal 2-15 N terhelésnél **[Bowers R.C. et.al. 1953]**, vagy PTFE, PMMA, PS és PE alkalmazásával 10-40 N terhelésnél **[Shooter K. et.al. 1952/a]**. A 2.1.2. részben említettekkel összhangban, a legtöbb kutató arra a következtetésre jutott, hogy a terhelés és súrlódási ellenállás közötti arányosságra vonatkozó terhelési intervallumon kívül, akár nőhet, de csökkenhet is a súrlódási tényező. Kimutatták, hogy közepes terhelési tartományban (0,02 – 1 N a vizsgálati rendszerükben) a súrlódási együttható csökken a terhelés növekedésével **[Rees B.L. 1954]**, és hasonló viselkedést találtak a gumikra vonatkozóan is **[Schallamach A. 1952]**. Ez a viselkedés a molekuláris felépítésű

anyagok felületi egyenetlenségének rugalmas alakváltozásával magyarázható **[Kragelszkij I.V. 1982].**

2.2. táblázat. A terhelés hatása a súrlódási tényezőre, alapozó kutatások áttekintése **[Myshkin N.K. et.al. 2005]**

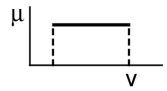
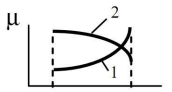
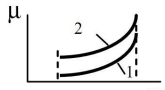
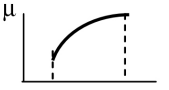
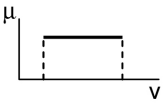
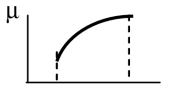
Trend	*Anyag és terhelés (acél golyó és polimer sík felület esetén)*	*Szerzők*
 a)	2-15 N, acél/polimer (PTFE, PFCE, PVC, PVDF, PE	Bowers, Clinton, Zisman **[Bowers R.C., et.al. 1953]**
 b)	10-40 N, acél/polimer (PTFE, PE, PMMA, PC)	Shooter, Thomas **[Shooter K. et.al. 1952/a]**
 c)	10-100 N, acél/polimer (PTFE, PE, PMMA, PVC, PA)	Shooter, Tabor **[Shooter K. et.al. 1952/b]**
 d)	Acél/polimer (PTFE, PE, PA, 0,02 – 1 N)	Rees **[Rees B.L. 1957]**
 e)	Acél/gumi	Bartenev, Schallamach **[Bartenev G.M. etal. 1981, Schallamach A. 1952]**
 f)	Acél/gumi és elasztomer	Kragelszkij [**[Kragelszkij I.V. 1982]**

Az arányossági tartományon kívül az is előfordulhat, hogy a súrlódási együttható növekszik a terhelés növekedésével. Ez általában az érintkező mikrogeometriák képlékeny alakváltozásával magyarázható. Végeredményben a polimerek súrlódása a terhelés függvényében is a Kragelszkij által leírt módon változik **[Kragelszkij I.V. 1982]**. Az azóta végzett kutatások a legújabb anyagokkal is ezt a trendet erősítik meg, azaz a súrlódási együttható minimumon halad át (2.2. táblázat/f), amely megfelel a rugalmas érintkezésből (a 2.2. táblázatban „f” görbe bal leszálló ága) a képlékenybe (a görbe jobb, növekvő ága) való átmenetnek. A terhelés változása kapcsán figyelembe kell venni azt is, hogy a terhelés változtathatja a rugalmas/képlékeny átmenetek hőmérsékletét a polimerekben, és ezáltal befolyásolja a súrlódás mechanizmusát.

2.1.4. A csúszási sebesség hatása a súrlódásra

Általánosan elfogadott, hogy a súrlódási ellenállás független a csúszási sebességtől. Ez akkor tekinthető igaznak, ha a felületi (kontakt) hőmérsékletváltozás elhanyagolhatóan kicsi, így a felület szerkezete és viselkedése sem módosul. Az is tény, hogy a siklási sebesség és a súrlódási hőmérséklet közötti kapcsolat nem egyértelmű, hanem rendszerfüggő. A mérnöki gyakorlat tapasztalata szerint a sebesség növekedése a hőfejlődést, a hőmérsékletnövekedést serkenti. Az egyes kutatók által kapott eredményeket fenntartással kell kezelni, a súrlódó rendszer feltételeit tisztázni kell. A fontosabb, publikált eredmények nagyfokú változatosságát a *2.3. táblázat* szemlélteti.

2.3. táblázat. A siklási sebesség hatása a súrlódási tényezőre, alapozó kutatások áttekintése **[Myshkin N.K. et.al. 2005]**

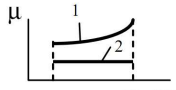
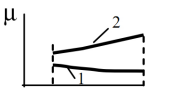
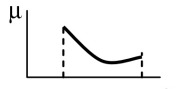
Trend	*Anyag és siklási sebesség*	*Szerzők*
 a)	0,0001 – 0,01 m/s, acél / polimer (PTFE, PE, PMMA, PC)	Shooter, Thomas **[Shooter K. et.al. 1952/a]**
 b)	0,04 -1,83 m/s, polimer / polimer 1— PA; 2— PC	Milz, Sargent **[Milz W.C. et.al. 1955]**
c)	10^{-7} -0,1 m/s, acél /polimer (PETF)	Fort **[Fort T. 1962]**
 d)	0,001 – 0,1 m/s, acél / polimer 1— PTFE; 2— PA	White **[White N.S. 1956]**
 e)	0,011 – 1,8 m/s, acél / polimer (PTFE)	Flom, Porile **[Flom D.G. et.al. 1955/a, 1955/b]**
 f)	0,015 m/s, Polimer / szálerősített polimer	Oloffson, Gralben **[Oloffson B. et.al. 1947]**
 g)	Acél / gumi (elméleti)	Bartenev, Lavrentev, Challamach **[Bartenev G.M. etal. 1981, Schallamach A. 1955]**

Sebességtől független súrlódást csak a sebesség szűk tartományában (0,01-1,0 cm/s) mértek a PTFE, PE, PMMA, és PS esetében **[Shooter K. et.al. 1952/a]**, valamint szálerősítéses anyagok érintkezése során **[Oloffson B. et.al. 1947]**. A súrlódás és a csúszási sebesség között gyakran tapasztalt egyéb összetett kapcsolatok a polimerek viszkoelasztikus viselkedésével magyarázhatók. Kis sebességtartományban, az érintkezési zónában jelentkező viszkózus ellenállás növekszik a sebesség növekedésével **[Flom D.G. et.al. 1955/a, 1955/b, White N.S. 1956]**. Ezt a megfigyelést a molekuláris-kinetikai megfontolásokon alapuló munkák is megerősítették **[Bartenev G.M. et.al. 1981, Schallamach A. 1955]**. Nagyobb sebességtartományban a rugalmas viselkedés meghatározó a kontaktzónában, így a súrlódási erő csupán kismértékben függ a sebességtől, vagy a sebességgel akár csökkenhet is **[Milz W.C. et.al. 1955, Tanaka K. 1984]**. Fontos továbbá, hogy nagy sebességek esetén, ha az érintkezés időtartama rövid, a súrlódási erő tovább csökkenhet. A „súrlódási erő - csúszási sebesség" kapcsolat lényeges függőséget mutat a környezeti- és kontakt-hőmérséklettől **[Vinogradov G.V. et.al. 1970]**. Ha a súrlódási méréseket az üvegesedési hőmérséklet (Tg) – vagyis az a hőmérséklet, amely alatt az amorf szerkezetű makromolekulák mozgékonysága kicsi, az anyag kemény és rideg (üvegszerű), e felett viszont a molekulák mozgékonysága fokozatosan nő, és végül a rendszer folyadékká alakul át – közelében végzik, a csúszási sebesség erősen befolyásolja a súrlódást, míg alacsonyabb hőmérsékleten kisebb a hatás, a korábban ismertetett (2.3. táblázat) trendek fordulnak elő.

2.1.5. A hőmérséklet hatása a súrlódásra

A polimerek – főleg a hőre lágyuló műanyagok, mint viszkoelasztikus anyagok – nagyon érzékenyek a súrlódási hőre. A súrlódás egy disszipatív folyamat, amelynek során a mechanikus energia hővé alakul át. A súrlódáskor fejlődő hő egy része az anyag alakváltozásából származik a tényleges érintkezési zónában (bizonyos folyamatok, mint pl. képlékeny alakváltozás, hiszterézis, diszperzió és viszkózus áramlás molekuláris mechanizmusa a mechanikai energia hővé alakulásával kapcsolatos). A másik hőforrás az adhéziós kötések létrejöttének és bomlásának tulajdonítható. A kontaktzóna alakváltozási képessége, nyírószilárdsága és keménysége szintén hatással van a keletkező súrlódási hőre **[King R.T. et.al. 1953, Fort T. 1962, Vinogradov G.V. et.al. 1970, Ludema K.C. et.al. 1966]**. A *2.4. táblázatban* korábban publikált alap-összefüggések láthatók a súrlódás és az alapanyag-hőmérséklet vonatkozásában.

2.4. táblázat. A hőmérséklet súrlódási tényezőre gyakorolt hatásával foglalkozó kutatások áttekintése **[Myshkin N.K. et.al. 2005]**

Trend	*Anyag és hőmérséklet*	*Szerzők*
 a)	20 - 80ºC, acél – polimer 1 – PS; 2 - PTFE	Shooter, Thomas **[Shooter K. et.al. 1952/a]**
b)	-50-től +150 ºC-ig, acél / polimer 1,2 – PCTFE, 3- PP 1 – v=3,5x10^{-4} mm/s 2,3 – v=0,35 mm/s	Ludema, Tabor **[Ludema K.C. et.al. 1966]**
 c)	-40-től +20 ºC-ig, acél / polimer 1 – PE; 2 – PTFE	King, Tabor **[King R.T. et.al. 1953]**
 d)	-40-től +200 ºC-ig, acél / gumi	Schallamach **[Schallamach A. 1952]**

2.2. Polimerek kopásának elméleti alapjai

A súrlódás során a mechanikai, termikus és vegyi igénybevételek hatására az egymással kölcsönhatásban levő súrlódó felületekről fokozatosan anyagrészecskék válnak le: a felületek alakja, mérete megváltozik. A változás sebességétől függően az érintkező felületek különböző mértékű, a működés szempontjából megengedhető vagy meg nem engedhető károsodásokat szenvednek **[Kalácska G. 2007]**. A felületi réteg változásai mechanikai terhelésből, hőmérsékletből és kémiai reakciókból erednek. Sajátos szerkezetük és mechanikai viselkedésük (anyagmodell) miatt a polimerek érzékenyebbek ezekre a tényezőkre. A felület helyi hőmérséklete lényegesen nagyobb lehet, mint a környezeté, és ezt tovább növeli a kontaktzóna környezetében létrejövő hővillanások keletkezése. A hőmérséklet jelentős befolyást gyakorol a polimerek kopására **[Lancaster J.K. 1969]**. A felsorolt, felületi rétegváltozást okozó folyamatok képezik a polimerek kopásának alapját. Az anyagleválási mechanizmusok nagy változatossága, és azok összefüggése lehetetlenné teszi a kopási folyamatok olyan jellegű, szigorú osztályozását polimereknél, mint a fémeknél **[Kragelszkij I.V. 1982**, **Blau P.J.(1989)]**. Általánosan elfogadott, hogy a polimerek leggyakoribb kopási mechanizmusai az abrázió-, adhézió és a kifáradás, de a fretting folyamatot is sikerült már

modellezni polimer próbatesttel **[Waterhouse R.B. 1972, DeBaets P. 1995]**. Mindegyik kopási mechanizmus alapirodalma jelentős és általánosan elfogadott, de tekintettel a jelen értekezés kutatási területére, a továbbiakban csak az adhéziós kopási mechanizmus polimerekre vonatkozó sajátosságainak alapjait tárgyalom részletesebben.

Az adhéziós kopást a súrlódási folyamatban a tényleges érintkezési felületen kialakuló adhéziós kapcsolatok idézik elő. A súrlódás során az érdességcsúcsokon kialakuló atomos-molekuláris kapcsolatok elszakadnak, anyagrészek juthatnak át az ellenfelületre (anyagátvitel), ahonnan visszakerülhetnek az eredeti felületükre, illetve ilyen többszöri anyagátvitel után végül kopási részecskék formájában leválnak. Bely [**Bely V.A. et.al. 1982**] megállapította, hogy ez a polimerátadás a polimerek adhéziós kopásának legfontosabb jellemzője. Az adhéziós kopásban fontos szerepet játszik a két súrlódó felület anyagának adhéziós hajlama, valamint kémiai reakcióképessége, különösen az oxigénnel szembeni viselkedése. Az oxidáció és más vegyi hatások akadályozzák az ismételt anyagátvitelt, továbbá méretnövekedéssel, feszültség koncentrációval járnak és elősegítik a kopási részecske leválását. A nagymértékben hasonló kristályszerkezetű anyagok (pl. az önmagukkal párosított tiszta anyagfelületek) hajlamosak nagy felületre kiterjedő adhéziós kapcsolatok kialakítására, ami nemcsak erős kopást, hanem gyakran bemaródást, berágódást és a súrlódó felület tönkremenetelét okozza. Ezért az ilyen anyagpárosításokat kerülni kell és helyettük atom-, illetve molekulaszerkezetüket tekintve jelentős mértékben eltérő, vagy heterogén szövetszerkezetű anyagokat célszerű párosítani (pl. acéllal öntöttvasat, bronzot, csapágyfémet, jó siklási tulajdonságú műanyagot (PETP, UHMW-PE) **[Kozma M. 2001, Kalácska G. 2007]**. Polimerek adhéziós kopására is érvényesíthető az Archard által kidolgozott egyszerű számítási modell, miszerint az adhéziósan lekopott anyagtérfogat egyenes arányban áll a normál terheléssel, a súrlódási úthosszal és fordítottan arányos a felület keménységével. Az arányossági tényező egy tribológiai rendszer-specifikus szám, amely mérésekkel meghatározható.

A transzfer-réteg, azaz a polimer-film kialakulása az ellenfelületen, a makroszkopikus kopás megítélését nagyban befolyásolja. A jelenség lehet kedvező megítélésű is egy kontrollált tribológiai rendszerben, de jelezhet intenzív felületi sérülést is. A lényeg az, hogy a transzfer-film létrejötte befolyásolja-e a súrlódó pár tribológiai viselkedését **[Makinson K.R. et.al. 1964, Sviridenok A.I. et.al. 1973, Tanaka K. 1973]**. Ha mikrométer méretű kis részecskék kerülnek át egyik felületről a másikra, a kopás sebessége csak csekély mértékben változik, gyakran ez történik polimer/acél kapcsolat kezdeti vagy bejáratási szakaszán (running-in state friction). A folyamat további részében több jelenség is bekövetkezhet: a) ha az átvitt polimer-

film elsodródik az acél felületről és újonnan kialakul, a polimer kopási sebessége növekszik, b) ha a film a helyén megmarad (harmadik testként viselkedik), a súrlódás hasonló anyagok között történik, amelynek eredményeként a megnövekedett adhézió egy dinamikus egyensúlyt képes kialakítani a polimer-film feltapadás- és visszatapadás között **[Zsidai 2005, Keresztes 2009]**, melyet már Bely is tapasztalt PTFE kopásvizsgálatoknál [**Bely V.A. et.al. 1982**].

A tribológiai rendszerek összetettségét jellemzi, hogy bizonyos körülmények között – még nem teljesen tisztázott folyamat eredményeként – a keményebb anyag is áttapadhat a lágyabb felületre, mint pl. bronz a polimerre. Az átvitt kemény részecskék beágyazódnak a puhább felületbe és abrazív koptatóanyagként szolgálnak, amely megkarcolja az eredeti (forrás) anyag felületét.

A polimer-film létrejöttének fontos következménye az érintkező felületek egyenetlenségének változása. A polimer felületének érdessége nagy változáson megy keresztül a bejáratási (running-in) súrlódási szakaszban, amíg az egyenletes súrlódásra jellemző (steady-state) kopási dinamikus egyensúly (transzfer és visszatapadás) be nem áll. A fémfelület topográfiája a polimer átadása (transzfer) miatt módosul **[Jain V.K. 1979]**.

Megállapítások a polimertribológiai folyamatok alapirodalmáról

- *A fentiekben röviden összefoglalt polimer-tribológiai alapismeretek a tudomány jelenlegi szintjén általánosan elfogadott érvényűnek tekinthetők.*
- *A 2.1. táblázatban látható kisszámú alapmű, valamint a vizsgált műanyagok korlátozott száma a 80-as évekig, jól jelzi a korabeli, limitált műszaki alkalmazási lehetőségeket.*
- *A 90-es évektől megszaporodó – mára már több ezerre tehető – publikált polimertribológiai kutatások jórészt az új polimer-mátrixok kifejlesztésének, és a kompozitok elterjedésének köszönhetők. Ezen publikációk jellemzői, hogy bizonyos alkalmazási körülmények között (pl. abráziós hatás, víz alatti üzemmód, vegyi közeg, emelt hőmérséklet) kutatja a tribológiai folyamatokat egy adott polimer-, vagy kompozit család vonatkozásában. Szintén megfigyelhető, hogy kompozitképző adalékok (pl. üvegszál, szénszál, kenő- és ásványi anyagok) hatásmechanizmusát hasonlítják össze több alapmátrix esetén. Kutatták a súrlódás és kopás valamint mechanikai tulajdonságok (főleg a keménység és rugalmassági modulus) kapcsolatát, általában szűk feltételi rendszerek és kisszámú polimer alkalmazása mellett. Ezek eredményeiből nehezen általánosítható, vagy gyenge korrelációk adódtak, melyek a mérnöki alkalmazásokat csak kis mértékben támogatják.*

- *A 90-es évek utáni friss kutatási eredmények, melyek e dolgozat tárgyához közvetlenül kapcsolódnak, a dolgozat saját kutatási eredményeit bemutató részében kerülnek röviden áttekintésre.*

2.3. Műszaki felületek módosításának irodalmi háttere

A jelen dolgozat tárgya alapvetően tribológiai alap- és alkalmazott kutatás, melyben jelentős szerepet játszanak a plazmaimmerziós ionimplantált polimer felületek, melyek ígéretes gépészeti alkalmazásokat rejtenek magukban, így szükségesnek tartom a felületmódosítási eljárások alapjainak rövid áttekintését.

2.3.1. Rétegleválasztás

A felületi tulajdonságok módosítására jellemző módon három eljárási kategória különíthető el. A felület módosítása elérhető új réteg leválasztásával, vagy a tömbi anyag felületének módosításával, illetve esetenként a kettő együttes alkalmazásával **[Pauleau Y. 1995]**. A rétegnövesztés folyamatai között a modern gázfázisú módszereknek olyan osztályozása terjedt el a nemzetközi szakirodalomban, melynek rövidítései a hazai szakirodalomban is meghonosodtak: fizikai gőzfázisú leválasztás (physical vapour deposition, PVD), és kémiai gőzfázisú leválasztás (chemical vapour deposition, CVD). Ezeket kiegészítik a folyadékfázisú és szilárdfázisú módszerek. A korszerű felületmódosítási eljárások igen gyakran a gázfázisú ionsugaras, plazmás, vagy lézersugaras technikákat alkalmazzák. A vékonyrétegek bővülő alkalmazásai az ipar olyan húzóágazataiban, mint pl. a mikroelektronika, optoelektronika, szenzorika, mechatronika, gyártástechnológia (forgácsoló szerszámok) folyamatosan generálják az egyes módszerek fejlesztését és újak kidolgozását.

A PVD eljárás során a szilárd forrásanyagot párologtatással vagy porlasztással a gőztérbe viszik és leválasztják a bevonni kívánt munkadarabra. A leválasztott rétegek szerkezetét a technológia – pl. leválasztás hőmérséklete – és számos tényező befolyásolja **[Mattox D.M. 1998]**. Fontosabb módszerek: vákuumpárologtatás, lézerablációs párologtatás és molekulasugaras epitaxiás rétegnövesztés, porlasztásos módszerek, ionos gőzölés, ionsugárral aktivált leválasztás.

A kémiai gőzfázisú leválasztásos módszerek (CVD) alkalmazása során illékony, gőzfázisba, ill. gázfázisba vitt anyagokból (ún. prekurzorokból) valamilyen kémiai reakcióval választják le a hordozó felületére a rétegépítő anyagot. Az eljárás elemi folyamatai a következők: a reagáló anyagok transzportja a hordozó felszínéhez, a reagensek adszorpciója a hordozó

felületén, kémiai reakció a felületen, a keletkezett gázhalmazállapotú melléktermékek deszorpciója, a melléktermékek eltávozása a felületről **[Bertóti I. 2003, Choy K. L. 2003]**.
A CVD módszernek egy fontos jellemzője, hogy alkalmas folyamatosan változó összetételű (ún. gradiens-) anyagok és rétegszerkezetek növesztésére. Így a hordozóréteg határfelületen kialakuló mechanikai feszültségek csökkenthetők **[Choy K. L. 2003]**. Ez általában előnyösen hat a felhasználásnál, pl. súrlódó igénybevételnél is. Fontosabb eljárások: termikus CVD, plazmával aktivált CVD, lézerrel aktivált CVD.

2.3.2. Felületmódosítás

2.3.2.1. Lézeres felületmódosítás

Több eljárás is használatos: lézeres felületi olvasztás, lézeres fényezés, lézeres felületi ötvözés és bevonatolás, lézeres felületedzés, lézer-lökéshullámos edzés, polimerek lézeres felületmódosítása. Polimereknél az egyik legfontosabb eljárás a lézerabláció, amelyet pl. a mikrolitográfiában alkalmaznak. Polimerek lézerablációjára nincs általánosan elfogadott mechanizmus, általában termikus, fototermikus, vagy fotokémiai mechanizmust, illetve ezek kombinációit tételezik fel. Infralézeres felülettisztítással adhéziójavulás is elérhető **[Fouassier J.P. et.al. 1990]**.

2.3.2.2. Ionsugaras felületmódosítás

Az ionsugaras felületmódosítás alapja a gyorsított ionok kölcsönhatása szilárd anyagokkal. A folyamat összetett, több elemi lépésből áll. Az ionsugár és a szubsztrátum kölcsönhatása során fellépő főbb primer folyamatok: behatolás, ütközés, atomelmozdulás, hibahelyek és gyökök képződése, részecske-visszaverődés, plazmongerjesztés, rezgési és elektrongerjesztések, ionok és szabad elektronok képződése, stb. [**Bertóti I. 2003].**
Ionimplantáció során általában közepes, 30-300 keV energiájú implanterek alkalmazhatók, jóllehet széleskörűen kutatják, és esetenként alkalmazzák a nagyobb, pl. MeV energiájú ionnyalábokat is. A 80-as évektől kezdve az ionimplantációt egyre szélesebb körben használják fémek, ill. a belőlük készült szerkezeti anyagok, szerszámok keménységének és kopásállóságának növelésére. Szénacélok, gyors- és rozsdamentes acélok, titánötvözetek, alumínium, réz és foszforbronz alkatrészek nitrogénes implantációja terjedt el. A keményedés a kialakuló nitridek és a sugárzás okozta rácskárosodás együttes hatására jön létre **[Hirvonen J. K. 1984].** Ionimplantációval polimerfelületek is módosíthatók **[Tóth A. et.al. 2000]**.

Használt eljárás még a kisenergiájú ionsugaras felületmódosítás is, ahol az alkalmazott primer ionenergiák kb. 0,1-10 keV tartományba esnek. Az ionsugaras felületmódosítás jellegzetességei, hogy nagy a felületi rétegben deponált energiasűrűség, és lehetőség van nagy térbeli felbontású kezelésekre, úgy mélységben, mint oldalirányban [**Bertóti I. 2003].**

Polimerek ionsugaras módosításakor megváltoztatható **[Tóth A. 1994]:**

- a molekulasúly-eloszlás, ebből következően az oldhatóság;
- a kémiai összetétel és szerkezet, így a nedvesedési és adhéziós tulajdonságok, valamint a biokompatibilitás;
- az elektronszerkezet, ebből kifolyólag az optikai és elektromos tulajdonságok;
- a mikroszerkezet, ebből következően a mikrokeménység, kopási jellemzők és az anyagtranszport tulajdonságok is.

Polimerek ionsugaras kezelési módszere létjogosultsággal bír a mikroelektronikában, optikai, optoelektronikai, illetve orvosbiológiai területeken, a membrán-, szenzor- és csomagolástechnikában, de a finommechanikai és mechatronikai súrlódó gépelemek alkalmazásánál is.

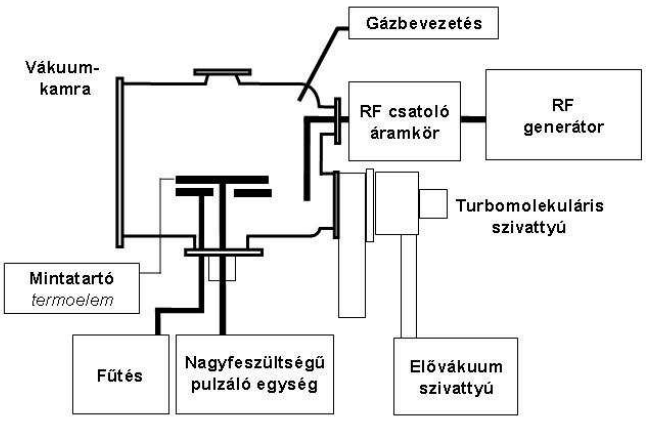
2.3.2.3. Plazmás technológiák, plazmaimmerziós ionimplantáció

A plazmás felületmódosítás széles körben alkalmazott eljárás, amelynek során a plazmában keletkező pozitív és negatív ionok, gyökök, gerjesztett részecskék, elektronok, fotonok lépnek kölcsönhatásba a szilárdtestek felületével. A módszer kiterjedt alkalmazását hatékonysága mellett a kezelési paraméterek nagy szabadsági foka is indokolja. Szintetikus és természetes szerves makromolekuláris anyagok (polimerek) plazmakezelésre általában igen érzékenyen reagálnak [**Tóth A. 1994, Denes F.S. et.al. 2004].** A kezelt rétegnek megváltozik a mólsúly eloszlása, összetétele, kötésszerkezete. A réteg oxidálható, redukálható, különféle heteroatomok (nitrogén, halogének…), illetve funkciós csoportok vihetők be. Lehetőség van arra is, hogy a makromolekulák főláncára attól szerkezetileg eltérő oldalláncot vigyenek fel (ojtás) a plazmakezelés után. E kezelések megváltoztathatják a felületek nedvesedési és adhéziós tulajdonságait, kémiai reaktivitását, fehérje- és sejtmegkötő képességét, biokompatibilitását stb. [**Tóth A. 1994].**

Az értekezés 5. fejezetében részletesen tárgyalt tribológiai kísérleteknél a polimerek felülete plazmaimmerziós ionimplantációval került módosításra, így e módszer lényegét ismertetem.

A plazmaimmerziós ionimplantáció (plasma immersion ion implantation, PIII, vagy PI^3, más néven plasma source ion implantation, PSII) egy viszonylag új módszer, amelyet nagyméretű,

szabálytalan alakú tárgyak felületkezelésére fejlesztettek ki [**Bertóti I. 2003, Anders A. 2004].** Ezen eljárás során a céltárgy-munkadarab körül hagyományos módon (pl. RF vagy DC gerjesztésű) kisnyomású plazmát hoznak létre, melyre kisfrekvenciás nagyfeszültségű (kb. 30-50 kV) DC impulzusokat szuperponálnak. A DC-térben a munkadarab képezi a negatív pólust. Ezáltal a plazmatérben keltett pozitív ionok – a katódtérben felgyorsulva – becsapódnak az alkatrészek felületébe, azaz kisenergiájú implantáció megy végbe. Mivel a plazma viszonylag egyenletesen veszi körül a munkadarabot, a szabálytalan alakú tárgyak is egy műveleti lépésben, egyenletesen felületkezelhetők [**Bertóti I. 2003, Anders A. 2004, Tóth A. et.al. 2006a, 2006b, 2007]** (*2.1. ábra*).



2.1. ábra. Plazmaimmerziós ionimplantációs berendezés vázlata **[Bertóti I. 2003]**

A módszer egy további változata a plazmaimmerziós ionos leválasztás (plasma immersion ion deposition, PIID), melynek előnyei között említhető a felület és a felvitt réteg jobb összeépülése és ionokkal segített tömör rétegek kialakítása.

A plazmaimmerziós ionimplantációt (PIII vagy PI^3) és az ionos leválasztást, alkalmazták már polimereken annak érdekében, hogy javítsák a transzporttulajdonságaikat **[Sakudo N. et.al. 2003, Ueda M. et.al. 2004, Ikeyama M. et.al. 2007]**, továbbá felületi energetikai **[Kim Y. et.al. 2006]**, elektromos **[Lee Y. et.al. 2002]**, baktérium-taszító **[Wang J. et.al. 2004a, 2004b]** és vérlemezke-tapadási **[Wang J. et.al. 2006]** jellemzőit. Az elmúlt 15 év során nagyszámú tudományos tanulmány jelent meg PIII-val kezelt polimerekről **[Sridharan K. et.al. 2004, Fink D. 2004, Kondyurin A. et.al. 2008, Tóth A. et.al. 2010]**. Ezen a területen végzett kutatások főleg a PIII-val kezelt polimerfelületek kémiai, mechanikai és morfológiai jellemzőire koncentrálódtak, de ugyancsak vizsgálták a nedvesíthetőséget és az orvosi alkalmazhatóságot. A leginkább kutatott alapanyag a polietilén-tereftalát (PETP) és a polietilén (PE) volt, míg a stratégiai műszaki polimerek közül a poliamid 6-ot (PA6) kevésbé vizsgálták **[Fu R.K.Y. et.al. 2005, Baba K. et.al. 2006, Kondyurin A. et.al. 2006, Igarashi**

A. et.al. 2006]. Az 5. fejezetben bemutatásra kerülő tribológiai kutatás előzményének tekinthető az a mikroabráziós vizsgálat nitrogén PIII-kezelt PETP felületen (többszörös karcolást alkalmazva ugyanazon a nyomvonalon) **[Kereszturi K. et.al. 2008]**, ahol a mikroabráziós kopásellenállás jelentős javulását tapasztalták.

Megállapítások

- *A plazmaimmerziós ionimplantáció technológia alkalmas a polimerek felületi szerkezetének, tulajdonságainak és jellemzőinek alapvető megváltoztatására.*
- *Az orvosi alkalmazásokra gyártott, NPIII kezelt UHMW-PE sikeres használata csípőprotézis súrlódó anyagaként bizonyította, hogy más, a mérnöki gyakorlatban elterjedten használt műszaki műanyag felületmódosítását is érdemes tribológiai szempontból kutatni.*

2.4. Tribológiai modellezés polimer próbatestekkel

A tribológiai modellvizsgálatok célja a súrlódó szerkezet normális üzemi tartományát határoló kritikus igénybevételek és tribológiai rendszerjellemzők meghatározása. Ahhoz, hogy pontos képet kapjunk egy adott súrlódó rendszerről, a helyes modellezés nem pótolható. Felelős mérnöki döntések (konstrukció, rekonstrukció, karbantartás) nem nélkülözhetik a súrlódó rendszerek korrekt tribológiai modellezését.

A tribológiai modellezés elméleti, legfiatalabb módszere a numerikus modellezés, és neurális háló alkotás **[Zhang Z. et.al. 2003, Stachowiak G.W. 2005]**. A számítástechnikai lehetőségek fejlődésével a súrlódás és kopás vizsgálatára is fokozatosan egyre nagyobb lehetőség nyílik. E téren úttörő szerepet játszik Friedrich K. Flöck J. Váradi K. Néder Z. Goda T. nevével jelzett iskola **[Váradi K. et.al. 1998, Friedrich K. et.al. 1999, 2002, Goda T. et.al. 2002]**. Numerikus modelljeiket elsősorban PEEK (poliéter-éterketon) kompozitok érintkezési feszültségállapotának, deformációinak, majd súrlódó elmozdulásának tanulmányozására fejlesztették ki, melyek valós kontrollméréseit is elvégezték a modell ellenőrzésére. A numerikus modellezés másik területe a felületközeli rétegek viselkedésének kutatása és a TTS-képződés modellezése. A szakirodalom jelentős eredményeket mutat fel az utóbbi években, jólismert egy magyar- francia kutatócsoport munkássága **[Eleőd A. et.al. 2000, 2002, Berthier Y. 2001]**.

A tribológiai jelenségek mechanikus szimulálására – a vizsgált rendszer kiterjedésétől és bonyolultságától függően – sokféle, különböző szintű (bonyolultságú) vizsgálati eljárást

fejlesztettek ki. Széles körben publikált [**Czichos H. 1987, Bushan B. 2001]** csoportosításuk alapja a DIN 50322 szabvány, neve: „Kopásvizsgálati kategóriák” (*2.5. táblázat*).

2.5. táblázat. Tribológiai rendszer lebontása kopásvizsgálati kategóriákra

Kategória	A kísérlet módja és igénybevétel		Rendszer szerkezet	
I.	Üzemi- illetve üzemhasonló vizsgálat	Üzemi vizsgálat (futókísérlet)	Eredeti gépelemek	Komplett gép / komplett berendezés
II.		Próbapadi vizsgálat, komplett géppel vagy berendezéssel		Komplett gép / komplett berendezés
III.		Próbapadi vizsgálat részegységgel, fődarabbal		Komplett részegység vagy fődarab
IV.	Modell vizsgálat	Vizsgálat változatlan gépelemmel vagy kicsinyített részegységgel		Kiemelt gépelemek, kicsinyített részegység
V.		Hasonló igénybevétellel próbatesten végzett vizsgálat	Modell próbatestek	Gépelemeken végzett vizsgálatok összehasonlító igénybevétellel
VI.		Modellvizsgálat egyszerű próbatesttel		Egyszerű próbatesttel végzett vizsgálatok

Ez alapvetően a kopás jelenségére és mérésére koncentrál, míg Czichos és Bushan megközelítése már globális tribológiai szemléletű. A DIN 50322 szabvány alapján Valasek I. részletesen kidolgozta és publikálta, valamint az ipari vizsgálatokhoz bevezette a szabvány magyarországi alkalmazásának ajánlott dokumentumait **[Valasek I. 1996]**. A DIN 50322 szabvány (Kopásvizsgálati kategóriák) pontos értelmezése a DIN 50320 „Kopás” és a DIN 50321 „Kopásmérések” szabványra épül. A DIN 50322 szabvány a kopásvizsgálatok célját 8 pontban foglalja össze, mely azóta számos szakirodalomban megjelent:

- a hosszú élettartam szempontjából optimális szerkezet kialakítása
- a működés szempontjából optimális szerkezet kialakítása
- a karbantartási, felújítási időszakok megállapításához szükséges adatok meghatározása
- a gép működési állapotának figyelemmel kísérése
- az alkatrészek kopásának szimulálása modellvizsgálatokkal
- a tribológiai rendszer viselkedését befolyásoló tényezők megállapítása
- adott súrlódó szerkezet elkészítéséhez és működtetéséhez szükséges anyagpár és kenőanyag kiválasztása
- az anyagok és kenőanyagok minőségének ellenőrzése

A vizsgálati kategóriákkal kapcsolatban igaz, hogy a valós feladat határozza meg, hogy mikor melyik csoportba tartozó modellre van szükség. A modell-vizsgálatok kiválasztásakor arra kell törekedni, hogy a vizsgálati feltételek minél jobban megközelítsék a valóságos üzemi

körülményeket [**Kozma M. 2001]**. Új szerkezet, gép kifejlesztését a legegyszerűbb – a VI. csoportba tartozó – vizsgálatokkal kezdik, és fokozatosan haladnak a többi csoporton keresztül az I. csoport felé, amely már a kész gépet vizsgálja az üzemi körülmények között. Az anyagpárok súrlódásának és kopásának, valamint a kenőanyagok hatékonyságának vizsgálatára számos egyszerű vizsgáló berendezést fejlesztettek ki, amelyek egy részét szabványosították. Ezek a berendezések általában a VI. vizsgálati csoportba tartoznak, és legtöbbször egyszerű alakú (henger, tárcsa, hasáb, gömb, prizma stb.) próbatesteket használnak.

A műanyagok tribológiai jellemzőinek meghatározására legtöbbször a rúd/tárcsa (pin-on-disc) próbatest párt használják, ahol a folyamatosan forgó tárcsa sík felületén csúszik a (rendszerint kör keresztmetszetű) polimer rúd próbatest véglapja. Emellett, a hőre lágyuló műszaki műanyagok tribológiai jellemzőinek meghatározására más eljárásokat is használnak, amelyek főleg a IV, V és VI. vizsgálati kategóriákba taroznak. Ilyen vizsgálati módszerek pl. a következők:

- homlokfelületen érintkező gyűrűpár (műanyag/műanyag, fém/műanyag, kerámia/műanyag gyűrűpár (talpcsapágy módszer)),
- műanyag vagy fém csap, műanyag perselyben, (radiális siklócsapágy módszer),
- forgó műanyag próbatest homokiszapban (abráziós vizsgálatok).

Bár e módszerek széles körben elterjedtek, vizsgálati eredményeikből nagyon nehéz megjósolni a kiválasztott polimer tényleges viselkedését adott üzemi körülmények között. Azonban nagyon hasznosak az egyes műanyagok tribológiai viselkedésének (súrlódási tényezőjének és kopási sebességének) összehasonlítására, azonos feltételek esetén.

1976-ban az „American Society of Lubrication Engineers (ASLE, jelenleg Society of Tribologists and Lubrication Engineers, STLE) albizottsága felmérést készített a súrlódást vizsgáló laboratóriumi berendezésekről. A felmérésből az is kiderült, hogy a súrlódás modellezésére főleg azokat az egyszerűsített vizsgálatokat használják a tribológusok, amelyek a VI. vizsgálati kategóriába sorolhatók. Az V. kategóriába tartozó berendezések száma nagyságrenddel kevesebb. A még magasabb kategóriákban pedig célgépeket, célzott probléma megoldására szolgáló egyedi berendezéseket használnak. Általánosságban megállapítható, hogy tribológiai modellezésre fejlesztett és használt berendezések főleg a VI. kategóriában terjedtek el (pl. Plint Ltd termékei). Az egyes kapcsolódási formák, próbatestek kialakítása alapján nagyszámú vizsgálati elvet szabványosítottak, főleg az USA-ban. A szakirodalomból az is kiderül **[Blau P.J 2009]**, hogy a kereskedelemben beszerezhető tribológiai

mérőberendezések mellett, további egyedi gyártású berendezések fejlesztése folyamatos igény, mivel adott anyagtulajdonság vagy ipari probléma modellezése sok esetben egyedi feltételrendszer beállítását követeli meg.

Megállapítások

A gyakorlatban használt kísérleti tribológiai modellezések alapvetően a VI., kisebb mértékben az V. kategóriába tartoznak, ennek oka, hogy ott viszonylag gyors és olcsó a vizsgálat. E módszerek érvényességi területe – főleg a VI. kategóriában – rendkívül korlátozott, az alap tribológiai jellemzők feltárásán kívül valós üzemi körülmények modellezését nem teszik lehetővé, csak relatív összehasonlításokra alkalmasak. Másik jellemzőjük, hogy a próbatestek kisméretűek, jellemzően 100 mm alatti méretekkel. Mindezen hiányosságok alapján megfogalmazható igényként:

- *Modellvizsgálatok kiterjesztése nagyméretű próbatestekre is: egyszerű igénybevételek, illeszkedő felületek alkalmazásával, nagyméretű próbatestek eredeti terhelési viszonyok mellet is vizsgálhatók legyenek („large-scale testrig” fejlesztési program).*
- *A VI. kategória alapelveire építve olyan modulrendszerű tribológiai anyagvizsgáló berendezés fejlesztése, mely a legfontosabb és legelterjedtebb vizsgálati elveket ki tudja szolgálni, továbbá dinamikus üzemi hatások modellezésére is alkalmas. A dinamika a feltételi rendszer meghatározó elemei esetében (normál terhelés, sebesség, súrlódási út) szabadon programozható és reprodukálható legyen. Ezáltal a VI. kategória és a IV. kategória közötti átjárhatóság tervezhető, programozható.*

A megfogalmazott két igénnyel kapcsolatos területen elért műszaki fejlesztéseim röviden ismertetésre kerülnek a továbbiakban, mivel a kutatási rendszerek részét képezik.

3. Tribológiai modellrendszerek fejlesztése

Ez a fejezet a tribológiai kutatásaimat szolgáló vizsgálati rendszerek, laboratóriumi eszközök terén végrehajtott fontosabb műszaki fejlesztéseimet foglalja össze.

A 2. fejezet végén ismertettem azokat a felismeréseket, melyek a szabványosított kopásvizsgálati rendszerek hiányosságaira és gyengeségeire mutat rá a VI. modell-kategóriában, nevezetesen:

a) a kisméretű próbatestek méretéből fakadó problémákra épülő, „large-scale" modellezés fejlesztése,
b) a valós üzemi körülmények jobb szimulálásának igénye a dinamikus hatások modellezése révén.

Több évtizedes tribológiai kutatásaim során, hazai- és nemzetközi kooperációban több kutatási programot és PhD cselekményeket vezettem, melyek mindegyike kapcsolódott módszertani- és eszközfejlesztéshez is. Az elért eredményeket a működő eszközök, a nagyszámú publikáció (MTMT adatbázis) és PhD fokozatok jelzik.

3.1. TLA módszerrel kutatott, fretting folyamathoz fejlesztett laboratóriumi berendezés

1995-ben a University Gent (Belgium) Laboratory Soete helyszínen végeztem kutató munkát az OTKA és Világbank támogatással. Egy több évig futó, jelentős nemzetközi kutatási program önálló részeként acél próbatestekkel elért eredményeimet publikáltam a belga munkatársakkal.

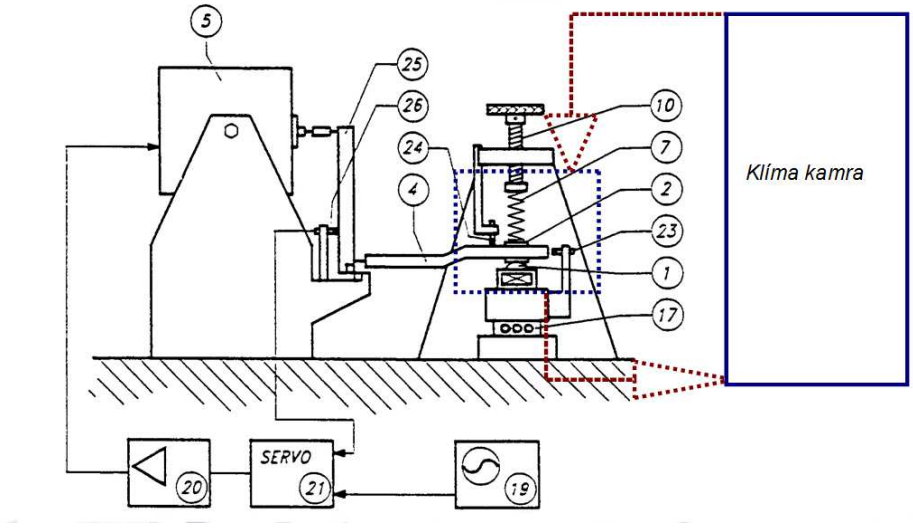
Önálló projektfeladatom volt a környezeti levegő nedvességtartalmának fretting folyamatra gyakorolt hatásának feltérképezése, a használt kutatási módszerek összehasonlítása és alkalmazhatóságuk feltárása.

A kopási folyamatok egyik speciális esete a fretting kopás, mely akkor keletkezik, ha egymással érintkezésben levő felületek egymáshoz képest kis amplitúdójú rezgőmozgást végeznek, így az érintkezési, azaz kontaktzónában alternáló súrlódás jön létre **[Waterhouse R.B. 1972, 1984].** E folyamat az érintkezési felületen helyi kopást és kezdődő fáradt repedést okozhat, ami a szerkezet kifáradási határát drasztikusan csökkenti. A fretting komoly probléma az atomerőművi berendezéseknél, sugárhajtóműveknél, csapágyazásokban, minden olyan helyen, ahol az illesztett felületeket statikusra tervezték, de nem védettek az üzemi rezgőhatásoktól. A tribológiai probléma súlyosságát jelzi, hogy a fretting irodalma igen széles, sok üzemi szempont és környezeti hatás alapján kutatták már **[Hurricks P.L. 1970,**

Waterhouse R.B. et.al. 1974, Attia M.H. et.al. 1985, Sato J. et.al. 1986, 1988, Pendlebury R.E. 1988, Zhang X. et.al. 1989, Odfalk M. et.al. 1989, Iwabuchi A. et.al. 1987] beazonosítva és definiálva pl. a TTS – Tribologically Transformed Structure – létét **[Fayeulle S. et.al. 1993]**.

A projektben meghatározott célkitűzéseimhez a TLA (Thin Layer Activation – vékony felületi réteg radioaktiválása) módszert használtam. E módszer előnye, hogy pontos mennyiségi információt ad kis kopási tömegek esetén (5ng-ig) is, valamint meghatározható vele a felületek közötti anyagátvitel mértéke, nyomon követhetők az adhéziós és re-adhéziós folyamatok. A TLA méréstechnika a súrlódó felületpárok közül az egyik felület radioaktiválásán alapszik [**DeBaets P. et.al. 1996]**. Az aktivált felület kicsi, és az aktivált mélység nem haladja meg az 1mm-t. Az elvégzett fretting koptatás után mindkét felületet és a kopási részecskék aktivitását meg kell mérni, amiből a levált fémtömeg számítható. A TLA módszer vas alapú próbatestek esetén ciklotronban gyorsított proton besugárzással valósítható meg. A besugárzás során Cobalt-56 radionuklid keletkezik, amely 77,3 nap felezési idővel pozitron (pozitív elektron) és gamma sugárzás (foton) kíséretében bomlik le. A kopásmérés alapjául a gammasugárzás mérése az előnyösebb.

A mérőrendszer nem állt rendelkezésre a kutatás elvégzésére alkalmas formában, hanem modulokból, korábbi, más fretting kutatásokhoz használt egységekből kellet megterveznem és összeépítenem a *3.1. ábra* szerint.



3.1. ábra. Fretting kutatási berendezés vázlata

A golyó próbatest (1) és a sík felületű próbatest (2) közti normálterhelés rúgóval (7) állítható be (3.1. ábra). A csavar (10) a rúgó előfeszítésére szolgál. A két próbatest közti relatív elmozdulást egy elektromágneses vibrátor (5) biztosítja egy emelős szerkezeten (4, 25) keresztül. Az emelős szerkezet a vibrátor amplitúdóját lecsökkenti a fretting amplitúdójára. A fretting teszt során a mozgás amplitúdója állandó, amelyet egy ellenőrző egység (21) a

CLCU (Constant Level Control Unit) biztosít. A CLCU az alapjeleit egy jelgenerátorról (19) kapja, míg a mért jeleket egy távolságérzékelő szenzor (26) biztosítja. A CLCU kimeneti jele pedig erősítőn keresztül (20) a vibrátor inputjelét képezi. A fretting ciklusok számát egy számláló ellenőrzi és szabályozza. Az egész mérőegység csatlakozik egy programozható klímakamrához, ahol a hőmérséklet és nedvességtartalom beállítható, és ahonnan egy ventilátor a próbatestekhez juttatja a beállított környezeti levegőt. Az összeszerelt berendezés jellemző paraméterei:

- *a normál terhelés: 0-70 N*
- *a fretting amplitúdó: 0-60 mikrométer*
- *a frekvencia: 0-20 Hz*

A próbatestek relatív elmozdulása folyamatosan mérhető egy távolság érzékelő szenzorral (23). A normál terhelés és a tangenciális erő (súrlódási erő) piezzo-elektromos érzékelővel (7) állapítható meg. E két erő méréséből és hányadosuk képzéséből a klasszikus számított súrlódási tényező „μ" időfüggvénye is meghatározható. A relatív elmozdulásra merőleges méretváltozás (kopás), szintén folyamatosan mérhető a sík próbatestet mozgató kar esetében egy távolságérzékelő szenzorral (24). Ez a vertikális méretváltozás mindkét próbatest kopását összegezve méri. Az összes mért jelet egy számítógép gyűjti össze, amelyben az adatok raktározhatók és feldolgozhatók.

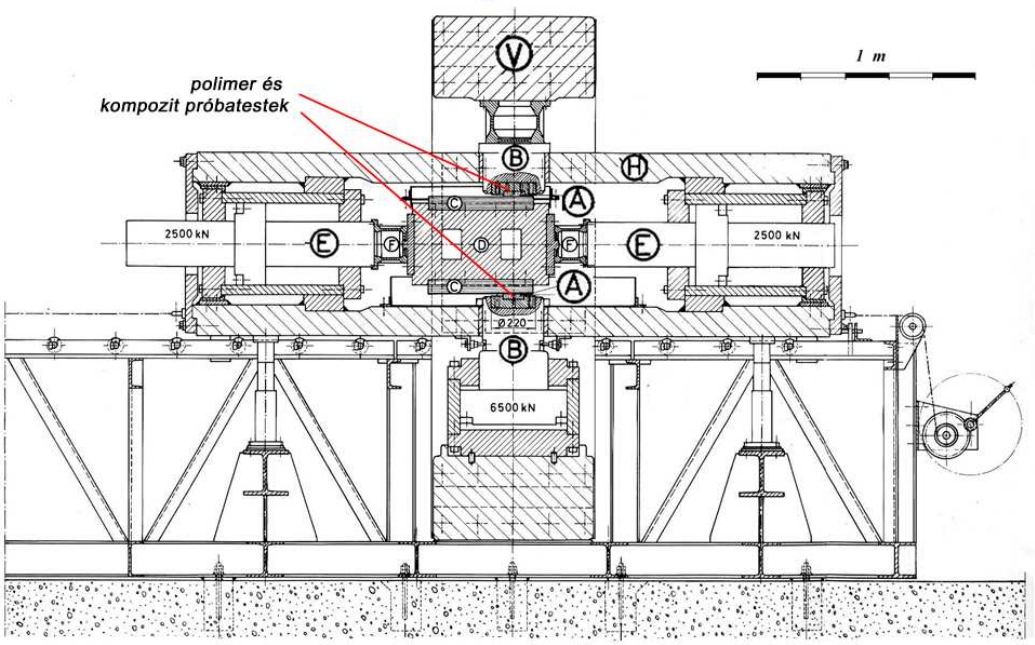
Az ötvözött acélokkal elért új eredmények (lásd WoS, SCOPUS, MTMT) mellett „acélgolyó/műanyag (PA6) síkfelület" próbatest párosítással is végeztem kísérleteket a berendezéssel, változtatott frekvencia és normálterhelés mellett. Az eredmények nagyfokú érzékenysége arra a következtetésre juttatott, hogy az egyszerű próbatestekkel végzett laborvizsgálatok dinamikus hatásoktól való függése kihasználható a pontosabb folyamat-modellezés érdekében, tovább erősítve azt az elképzelést, hogy a VI. vizsgálati kategóriát ki kell terjeszteni a dinamikus modellezési lehetőségekkel.

3.2. Nagyméretű, egyszerű geometriájú polimer próbatestekhez (Large-Scale) fejlesztett befogó készülék

A nagyméretű és nagyterhelésű tribológiai rendszerekben (pl. ipari mozgó kapuk, terménytárolók, zsilipek vezetékei, hidak csapágyazásai...stb), valamint magasabb üzemi hőmérsékleteknek kitett helyeken az a fejlődési tendencia alakult ki, hogy lehetőleg önkenő szerkezeti anyagokkal oldják meg az adott tribológiai problémát **[Samyn P. et.al. 2006, Samyn P. 2006]**. Ez lehetővé teszi a kenőrendszer kiküszöbölését, amely igen lényeges környezetvédelmi szempontból is. Kenőanyag nélküli súrlódó rendszerekben a tiszta fémes kapcsolat használata erősen korlátozott, ezért főleg műszaki műanyag és acél súrlódó párokat használnak **[Samyn P. et.al. 2007]**. Kenőanyag nélkül a polimer súrlódó felületek is fokozottan érzékenyen reagálnak a dinamikus hatásokra (terhelés, sebesség, gyorsulás, irányváltás), melyről korábban semmiféle adatbázis nem állt rendelkezésre. A VI. vizsgálati kategóriában kisméretű próbatestekkel végrehajtott mérések adott anyagpárosítással és terhelési rendszerrel nem szolgáltatnak elegendő súrlódási és kopási információt a pontos konstrukciós kialakításokhoz, amely sok esetben a próbatestek viszonylag kis méretéből ered.

Nagyméretű próbatestek (több száz milliméteres befoglaló méretek) alkalmazásával pontosabb képet kapunk a szélek és élek hatásáról, a belső feszültségek szerepéről, a hővezetési problémákról, deformációkról. Pontosabban tanulmányozható a károsodási, kopási mechanizmus, stick-slip (akadó csúszás) viselkedés, a túlterhelés hatása. Ez a modellezési trend a „Large-Scale" nevet viseli a nemzetközi szakirodalomban. A „large-scale" berendezésekkel az adott anyagpárok névleges terhelhetőségük akár 200%-án is vizsgálhatók, és a kopási, tönkremeneteli folyamatok pontosabban meghatározhatók (kopás, repedés, egyéb felületi és belső anyagszerkezeti folyamatok…stb), mint kisméretű próbatestek alkalmazásával.

Nemzetközi kutatási projekt keretében lehetőségem nyílt a DSM Engineering Plastic Product által fejlesztett műszaki műanyagok és kompozitjaik nagyméretű, azaz „Large-Scale" vizsgálatára. Az unikális berendezés – alapgép – rendelkezésre állt (*3.2. ábra*) a University Gent, Laboratory Soete eszközparkjában, melyhez különböző szélkiképzésű próbatest befogókat kellet tervezni és gyártatni.



3.2. ábra. „Large-Scale" tribológiai anyagvizsgáló, alapgép **[De Baets P. 1994]**

*Az „E" jelű hidraulikus munkahengerek (max. 2500 kN) mozgatják vízszintesen alternáló jelleggel a középen elhelyezkedő blokkot, melynek alsó és felső felületén egy-egy síkfelületű próbatest található. Az alsó „B" jelű munkahenger biztosítja a normálterhelést (max. 6500 kN), amelynek ellentámaszt a felső fejrész „V". A „B" betűvel jelzett betétek tartalmazzák az álló próbatesteket. A maximális csúszási sebesség 6 mm/s, a csúszási úthossz 350 mm. Befogható 220 x 220 mm felülettel rendelkező próbatest [**De Baets P. 1994, 1995b]**.*

A túlterhelési, valamint az irányváltásokból adódó dinamikus hatások tribológiai eredményeinek publikálása (lásd WoS, SCOPUS, MTMT) mellett megerősödött az a felismerés, hogy a polimerek és kompozitjaik fokozottan érzékenyek a súrlódó próbatest

geometriai viszonyaira, a széleken kialakuló élenfutásra, a belső feszültségek és a súrlódási melegedés kopásmódosító hatására, az irányváltásokból adódó mozgás-dinamika súrlódási tényezőt befolyásoló szerepére. E jelenségeknek csak egy része elemezhető kisméretű próbatestekkel, de ahhoz a dinamikus hatások (pl. dinamikus mozgás- és terhelési viszonyok) modellezésére van szükség.

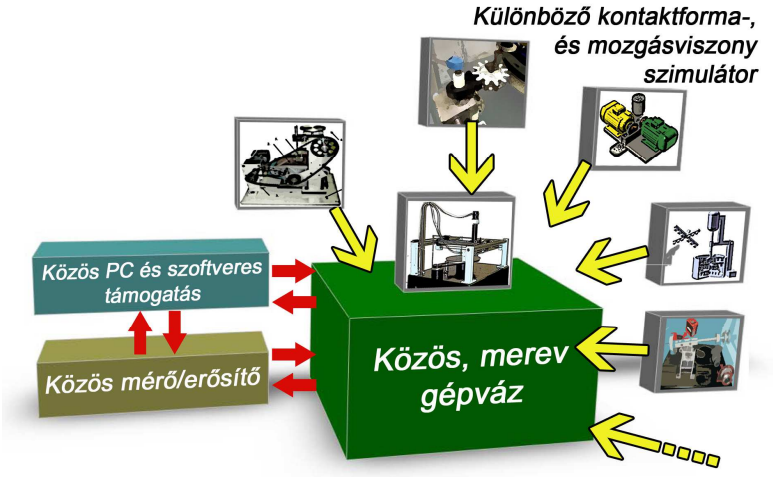
3.3. Moduláris rendszerű, dinamikus modellezésre alkalmas triboteszter fejlesztése

A dinamikus modellezést és modulrendszerű anyagvizsgáló fejlesztést egy feladatként kezelve, több lépésben valósítottam meg. A tervezés és kialakítás több magyar- és nemzetközi pályázat, valamint ipari partner támogatásával valósult meg. A tervezés fő szempontjai:

- a vizsgálati kategóriák közötti gyors lépési lehetőség,
- a valós ható tényezők közül a meghatározó jelenségek szimulációs lehetősége,
- variációs lehetőségek a kontaktzóna kialakításoknál,
- a súrlódás és kopásmérés mellett, kenőanyag vizsgálatokra egyaránt használható legyen a berendezés.

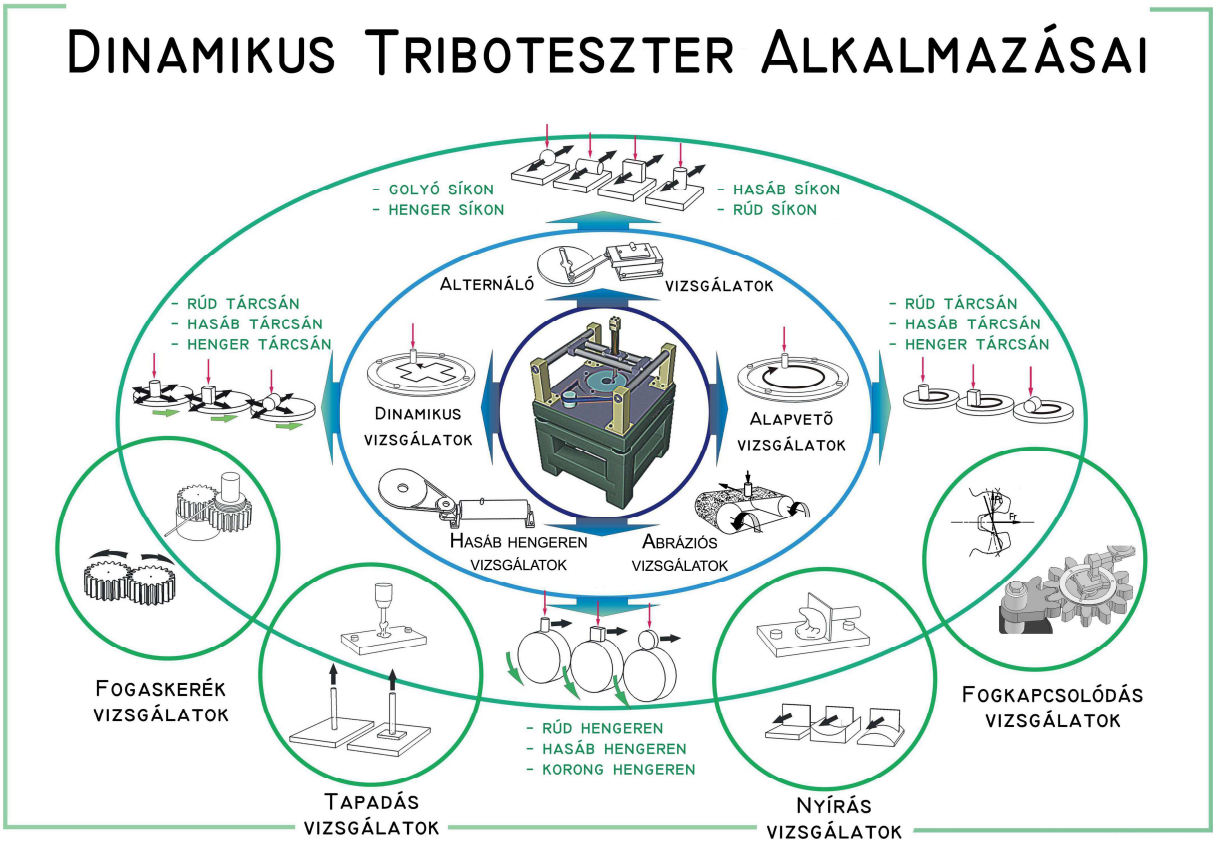
Ez a VI. kategória alapelveire építve olyan modulrendszerű tribológiai anyagvizsgáló berendezés fejlesztését jelentette, mely a legfontosabb és legelterjedtebb vizsgálati elveket ki tudja szolgálni, továbbá dinamikus üzemi hatások szimulálására is alkalmas. A ***1-9.sz. mellékletek*** szemléletesen bemutatják a megvalósított laboratóriumi modellezés rendszerét.

A dinamizmus a feltételi rendszer meghatározó elemei esetében a szabadon programozhatóságot és reprodukálhatóságot jelenti. Ezáltal a VI. és IV. vizsgálati kategória közötti átjárhatóság tervezhető, programozható. A megvalósítás elve a *3.3. ábrán* látható.



3.3. ábra. Moduláris koncepció a dimaikus triboteszter fejlesztéséhez

A merev, rezgéscsillapítókkal ellátott közös gépváz, mely igény esetén bővíthető, képes fogadni az egyes mozgás és érintkezési viszonyoknak megfelelően kidolgozott felépítményeket. A felépítmények egyszerűen rögzíthetők és eltávolíthatók az alapgépről.
Minden egyes felépítmény a központi mérőerősítőt, az adatgyűjtőt és a feldolgozó rendszert használja. A mérőrendszer a HBM (Hottinger Baldvin Messtechnik) által forgalmazott ipari mérőrendszer. A *3.4. ábra* foglalja össze a kialakított modulokat és az alapgépet.



3.4. ábra. A moduláris rendszerű dinamikus triboteszterrel megvalósítható kontakt- és mozgásformák

Alap kialakításban a központi gépváz egy pin-on-disc (tű-tárcsa) felépítményt tartalmaz (***3. sz. melléklet***), ahol a VI. kategória szerinti egyszerű mérés forgó tárcsa és álló próbatest alkalmazásával végezhető. A berendezéssel lehetőség van fűtött és/vagy kenőanyaggal ellátott tárcsafelület alkalmazására is. A rendszer méri a súrlódást, a kopást és deformációt, valamint a próbatest felület közeli hőmérsékletét.
A pin-on-disc felépítmény alkalmas dinamikus modellezésre, mert egy derékszög koordinátás (cartesian) mozgató robot a próbatestbefogó fejet bármilyen programozott mozgáspályán

képes mozgatni, úgy, hogy közben a normál terhelés is program szerint változtatható. Álló síkfelületen így dinamikus pin-on-plate vizsgálat tervezhető.

A dinamikus tribotesztert és moduljainak poszteren történő bemutatását az ***1-9 sz. mellékeltek*** tartalmazzák.

A berendezés folyamatos fejlesztése és az elvégzett mérések eddigi eredményei rendszeresen publikálásra kerültek (WoS, SCOPUS, MTMT) a 90-es évek végétől. Több magyar és nemzetközi kutatási projekt meghatározó eszköze. A moduláris fejlesztés folyamatos, a modellezési igények és a szabvány ajánlásainak figyelembevételével.

A fejlesztés létjogosultságát mi sem jelzi jobban, mint az, hogy az utóbbi években a csípőprotézis UHMW-PE vápaanyag fejlesztésnél a kopásállósági vizsgálatokhoz külön javasolják a dinamikus tribotesztet egyszerűsített pályán (kereszt-nyírásos koptatás) **[Gordon J.M. et.al. 2005]**. Az egyszerű pin-on-disc vizsgálatok és a költséges-, hosszadalmas csípőprotézis szimulátor (IV. vizsgálati kategória) mérések között tartják egyre fontosabbnak a dinamikus modellezést, egyszerű próbatestekkel **[Zsoldos G. 2012]**.

3.4. Következtetések

1. A tribológiai modellezés VI. vizsgálati kategóriája – tribológiai alapinformációk feltárása és relatív anyag összehasonlítások mellett – nem alkalmas arra, hogy egy adott anyagból készült gépelem üzemközbeni tribológiai viselkedése meghatározható legyen. Az üzemi, vagy üzemazonos gépvizsgálatok előtt lehetőség van egyszerűsített próbatestekkel laboratóriumban közelíteni a valós hatásokat, reprodukálható módon:

- a dinamikus hatások modellezésével: siklási sebesség, terhelés, siklási irányváltás, külső és/vagy kontaktfelület hőmérsékletének változtatásával,
- a „nem illeszkedő” próbatest geometriák alkalmazásával (akár 50-60 MPa felületi nyomás elérésével),
- az egyszerű geometriájú, de nagyságrendben eltérő méretű próbatestek alkalmazásával.

2. A dinamikus modellezéssel kiterjesztett VI. vizsgálati kategóriában, modul rendszerrel, egy széles tribológiai vizsgáló spektrumot biztosító, tribológiai anyagvizsgálót fejlesztettem. Az elvégzett modellezésekkel és mérésekkel igazoltam a következőket (publikációk, PhD-k):

2/a A dinamikusan változó siklási sebesség, terhelés és irányváltás:

- tervezhető a valós gépelem igénybevételének közelítésére, ezáltal a valós tribológiai rendszerhez való korreláció javítható,

- képes kimutatni azokat az anyag és rendszer sajátosságokat – pl. eltérő kontaktzóna deformáció, adhézió-változás, stick-slip hajlam –, melyek a hagyományos VI. kategória méréseinél nem észlelhetők,
- a hagyományos vizsgálati rendszerek eredményeihez képest új értékelési lehetőségeket biztosít: hőmérsékletváltozás, súrlódási tényező, kopás és deformáció alakulása erőlökés, siklási gyorsulás, irányváltás hatására.

2/b A VI. kategóriában használatos kisméretű próbatestek két nagyságrenddel való megnövelése (100 mm-es nagyságrend) és dinamikus mozgásviszonyok biztosítása mellett – a „large-scale" koncepció alkalmazásával – szintén feltárható olyan tribológiai viselkedés, mely kisméretű próbatestekkel és a hagyományos VI. kategóriás vizsgálatokkal nem határozhatók meg. A rendszerben végzett mérőrendszer fejlesztés és mérési tapasztalataim alapján megfogalmazható, hogy a „large-scale" modellezéssel:

- Valós gépelemek túlterheléses folyamatai, a stick-slip hajlam, a súrlódó kontaktzóna tönkremeneteli mechanizmusai jól feltárhatók.
- A súrlódási és kopási folyamat eredményeire – kontaktzóna melegedése és hőeloszlása, mikrogeometriai deformációk, adhéziós és re-adhéziós folyamatok – hatással van a méretekből adódó anyagszerkezeti inhomogenitás, anizotrópia és az ebből fakadó inhomogén feszültségeloszlás, a hosszú élek (profilok) mentén létrejövő feszültségtorlódás, melyekkel egy nagyobb méretű valós gépelem üzemi körülményei szintén jobban modellezhetők.
- A „large-scale" modellek eredményeire a rendszer elemeinek helyzete, elrendezése is hat. A gravitáció iránya kimutatható hatással bír, ezért több próbatestet tartalmazó modell esetén a vertikális elmozdulású rendszer javasolt.

A dolgozat 4. fejezetében bemutatásra kerülő polimertribológiai eredményeknek egyik újszerűsége abban rejlik, hogy az állandó feltételek mellett végzett pin-on-disc mérések (*3. sz. melléklet*) adatai összehasonlíthatók a dinamikus mozgás- és terhelés viszonyok (*4. sz. melléklet*) esetén mértekkel, külön elemezve a bejáratási („running-in") és az állandósult csúszás („steady-state") szakaszait is. Ezt a különleges mérési lehetőséget a dinamikus triboteszter biztosította. A 4. fejezetben bemutatásra kerülő kutatás a dinamikus (*4. sz. melléklet*) és a hagyományos „pin-on-disc" modult használta (*3. sz. melléklet*), míg az 5. fejezet is a pin-on-disc mérésekre támaszkodik (4. sz. melléklet).

4. Műszaki polimerek súrlódása

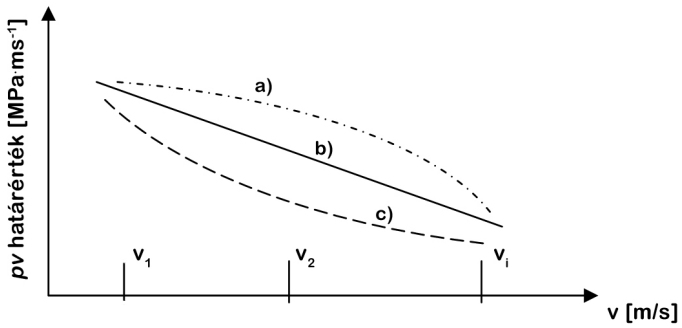
Ez a fejezet átfogó képet ad a gépelemként leggyakrabban használt műszaki műanyagok és kompozitjaik (21 különböző termék) súrlódási viselkedéséről acél ellenfelületen, nemcsak egymáshoz hasonlítva az anyagokat és elemezve a súrlódási jelenségeket, de célszerű anyagcsoportosítás alapján a súrlódás és a mechanikai tulajdonságok kapcsolatát is értékeli, külön kitérve a bejáratási- és az állandósult súrlódási szakasz jelenségeire egyaránt.

4.1. A kutatási program előzményei

Mint a 3. fejezetből is érzékelhető, a súrlódási jelenség alapjai sokkal ismertebbek és általánosan elfogadottabbak, mint a kopás viszonylag hiányos ismeretei. Egy súrlódó gépészeti rendszer sajátosságainak feltárása már komplex értékelést igényel: elterjedt kutatási módszer az ismert alapjelenségek – adhézió és deformáció – elemzése indirekt módszerekkel, mint pl. a kopásnyom, transzfer film, felületi energia **[Biett J. H. et.al 1992, Unal H. et.al 2008]**, kopadék megjelenés, valamint a kontaktzóna morfológiájának elemzése, a hőmérsékleti viszonyok alakulásának vizsgálata. Az eddigi polimer-tribológiai kutatások egy jelentős részére az jellemző, hogy adott anyagcsoportot vizsgált **[Kozma M. et.al. 1999a, Kozma M. et.al. 1999b,]** jellegzetes körülmények között (pl. poliamidok abráziós környezetben **[Rajesh J. et.al 2002, Tewari U.S. et.al 1992, Keresztes R. et.al 2008]**), vagy adott erősítő/töltő anyag hatásmechanizmusát tanulmányozta **[Böhm H. et.al 1990, Czichos H. et.al 1995, Santner E. et.al 1989].** A súrlódás és kopás közvetlen mérése mellett az említett indirekt módszerekkel lehetőség van a polimerek súrlódásának, annak eredetének és domináns tényezőinek feltárására is.

A mérnöki gyakorlat számára ez csak részleges siker, mert a súrlódó gépelemanyagként felhasználható polimerek és azok kompozitjainak széles választéka folyamatosan bővül. Minden egyes új termékkel részletes tribológiai analízist kellene végezni a korábbiakkal megegyező vizsgálati rendszerekben, hogy az egyes műszaki műanyagok összehasonlíthatók legyenek akár súrlódási, akár kopási szempontok alapján. Joggal felmerült már korábban az a gondolat, hogy ha az alapanyagok mechanikai tulajdonságai és a súrlódás-kopás között bármiféle kapcsolat megállapítható egy adott tribológiai rendszerben, akkor az esetleg általánosítva kiterjeszthető az újabb és újabb polimerekre is. Ilyen kiterjeszthető, erős korreláció eddig nem született, a tapasztalt trendek sok esetben szűk anyagcsoporton belül, egy-egy jellegzetes feltételrendszer mellett tekinthetők érvényesnek **[Kato K. 2000, Khan**

M.S. et.al 2009, Myshkin N.K. et.al 2005, Xu D. et.al 2008]. Ennek fő oka nyilvánvalóan a súrlódási kontaktzónában lejátszódó összetett folyamat (tribo-fizikai, tribo-kémiai), ahol a mechanikai jellemzőkön kívül számos felületi tulajdonság is hat. Tehát az a módszer, hogy bármilyen műszaki műanyag és kompozitjaik mechanikai jellemzői és a súrlódási vagy kopási viselkedése között erős összefüggést tárjon fel, zsákutcának látszik. Az új polimer anyagok tribológiai megítélése modellvizsgálatok nélkül továbbra is bizonytalan. A fenti probléma kezelésére egy új, a mérnöki gyakorlatot figyelembe vevő módszert dolgoztam ki, melyet az egyes termoplasztok és kompozitjaik *pv* határértékeire alapoztam. Súrlódó rendszerekben méréssel megállapítható a terhelés (p) és a csúszási sebesség (v) szorzatának határértéke (*pv*), amelyet elérve egy adott polimer fajlagos kopása hirtelen megnő. Ennek elsődleges oka a súrlódási melegedésből következő kontaktzónán belüli jelenségek. A *pv* határértékeket a nagyobb műanyaggyártók általában meghatározzák. A *pv* határérték – mely sebességfüggő és nem állandó egy-egy anyagra nézve – már eredő kontaktzóna viselkedést szimbolizál, beleértve az összes felületi jelenséget (*4.1. ábra*) **[De Bruyne F. 1999]**. A növekvő csúszási sebességgel csökkenő *pv* határérték azt jelenti, hogy a felületek terhelhetősége nagyobb arányban csökken, mint ahogy a sebesség nő. A *pv* határérték csökkenés trendje eltérhet a lineáristól. Elsősorban a polimermátrixnak, az erősítőanyagnak, valamint az érintkezési felületen lejátszódó fizikai és kémiai folyamatoknak van szerepe a trend alakulásában.



4.1. ábra. A csúszási sebességtől függő, csökkenő *pv* határérték termoplasztok esetén a), b) vagy c) trend szerint **[De Bruyne F. 1999]**

A kontaktzóna *pv* határértékeken keresztül megnyilvánuló eredő viselkedése – mint pl. a *pv* határérték változása adott súrlódási sebességhatárok között – olyan anyagcsoportosítási lehetőséget biztosít, amin belül már felfedezhetők trendek pl. a súrlódási viselkedés és az alapanyag mechanikai tulajdonságai között.

Ezen a felismerésen és mérnöki gyakorlaton elindulva alkottam meg azokat az anyagcsoportokat a *pv* határértékekre alapozva, amelyen belül új összefüggéseket fogalmaztam meg a mechanikai jellemzők és a súrlódási jelenségek között.

4.2. A kutatáshoz használt műszaki műanyagok és tulajdonságaik

A vizsgált műszaki műanyag minták a kereskedelemben kapható féltermékekből (extrudált és öntött rudak) forgácsolással készültek adott méretre. Kiválasztásuk az európai felhasználási gyakorlat és a féltermékek (rúd, tábla, cső) eladási statisztikái alapján történtek. A féltermékek gyártását a Sustaplast GmbH (Németország), a Quadrant EPP (Belgium), az Ensinger GmbH (Németország), a Teraglobus Kft. (Magyarország) és a Quattroplast Kft. (Magyarország) végezte, beszerzésük a Teraglobus (Magyarország) és a Quattroplast (Magyarország) cégektől történt. A *4.1. táblázat* mutatja az anyagokat és a gyártók által közzétett összetételüket.

4.1. táblázat. A kutatásokhoz felhasznált polimerek és kompozitok

Egyszerűsített név (jelölés)	Ismert összetétel	Egyszerűsített név (jelölés)	Ismert összetétel
PTFE	Natúr PTFE	PETP	Natúr PETP
PTFE/graphite	PTFE +(grafit)	PETP TF	PETP+(PTFE)
UHMW-PE HD500	Natúr UHMW-PE HD500	POM C	Natúr POM C
UHMW-PE HD1000	Natúr UHMW-PE HD1000	PPS HPV	PPS+(GF+kenőolaj)
PA 4.6	Natúr PA 4.6	PSU	Natúr PSU
PA6E	Natúr, extrudált PA6	PES	Natúr PES
*PA6G(Mg)	Natúr öntött *PA6G(Mg)	PVDF	Natúr PVDF
*PA6G(Mg)/oil	Öntött *PA6G(Mg)+(kenőolaj)	PEEK	Natúr PEEK
**PA6G(Na)/MoS_2	Öntött **PA6G(Na)+(MoS_2)	PEEK GF	PEEK+(GF)
**PA6G/PE	Öntött **PA6G(Na)+(PE)	PEEK Mod	PEEK+(CF+PTFE+grafit)
PA 66 GF30	PA 66+(GF)		
* Mg katalizálású öntési gyártástechnológia ** Na katalizálású öntési gyártástechnológia			

A termékeket három csoportba osztottam a mérnöki felhasználói tapasztalatok, valamint a gyártók által megadott *pv* határértékek alapján. Ehhez száraz súrlódású, köszörült szerkezeti acéltengellyel párosított, szabad befogású, 50%RH és 23C^o környezeti hőmérséklet mellett folyamatosan üzemelő polimer radiális siklócsapágyak esetét vettem alapul. A DSM Engineering Plastic Products által fejlesztett tervezői adatbázis segítségével meghatároztam a

pv [MPa·ms^{-1}] határértékeket 0,1 majd 1,1 és 2,1 m/s csúszási sebességek esetén **[DSM EPP, 2000]**. Az eredmények a *10 sz. mellékletben* láthatók.

1. anyagcsoport. Az első csoportba a súrlódás szempontjából a gyakorlatban igen kedvezőnek tartott, ún. „sikló" anyagok kerültek. Ezekre jellemző az, hogy 0,1 és 2,1 m/s sebességű csúszás esetén ($\Delta v = 2$ m/s) a *pv* határérték csökkenése kisebb 50%-nál. E csoportba soroltam még két HPM (High Performance Material) kompozitot is (PPS HPV és PEEK mod), ahol ugyan a csökkenés mértéke nagyobb 50%-nál, de a *pv* határértékek abszolút értékei többszörösen nagyobbak még 2,1 m/s esetén is a többi anyaghoz képest. Ezeket az anyagokat rendszerint siklócsapágyakban, csúszó támasztásokban és vezetékekben, fogaskerekeknél és menetes orsóknál használják, ahol a *pv* határérték képezi a tervezés és gyártás alapját.

2. anyagcsoport. A második csoportba azok a szerkezeti (mechanikai teherviselő) polimerek kerültek, melyek gyakran súrlódó igénybevételt is szenvednek a meghatározó mechanikai igénybevételek mellett. Ezekről megállapítható, hogy a *pv* határérték csökkenés a fenti $\Delta v = 2$ m/s esetén $\geq 50\%$.

3. *anyagcsoport.* A harmadik anyagcsoportba választottam két olyan amorf szerkezetű műszaki műanyagot (az I. és II. anyagcsoport termékei mind részben-kristályos szerkezetűek), amelyek kopás- és karcállóság (részecske leválás) tekintetében nem vehetik fel a versenyt a részben-kristályos anyagokkal, de 100ºC feletti hőállóságuk korlátozott *pv* alkalmazást megengedhet (pl. élelmiszeripari gépekben, melyet gőzzel sterilizálnak). Megállapítható, hogy itt a *pv* határértékek csökkenése jelentős, 80% feletti.

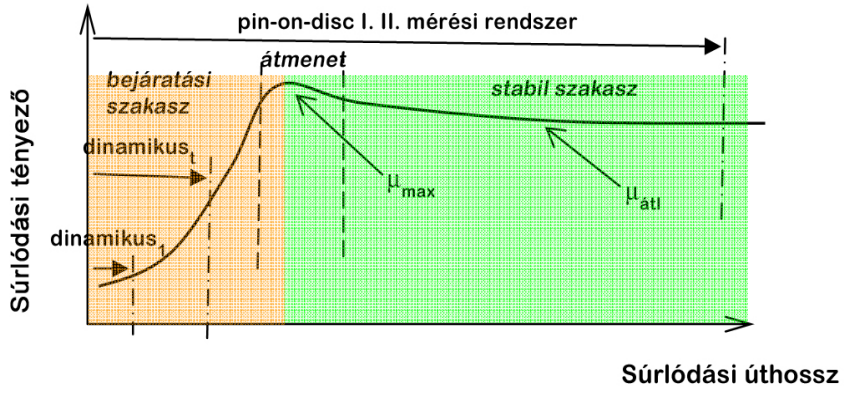
A mechanikai tulajdonságok mérésére a megfelelő szabványok szerint került sor (szakító vizsgálat: MSZ EN ISO 527-1 szerint, utolsó érvényes magyar nyelvű szabvány 1999-ből, angol nyelvű 2012-ből; keménységmérés: MSZ EN ISO 868:2003 szerint), a raktáron lévő termékek fél éves pihentetése után. Ezt követően került sor a mechanikai és tribológiai próbatestek megmunkálására. Laboratóriumban történő egy hetes kondicionálás után (23°C, 60% RH), a mechanikai mérések eredményei ötszöri ismétlés után kerültek átlagolásra. A mért adatok nem egyeztek meg a gyártók által publikált tájékoztató értékekkel (mivel azok általában minimum értékeket tartalmaznak), még a kondicionált amid-tartalmú anyagok esetén sem. A Teraglobus Kft. laboratóriumában (Instron 3366 szakítógép, THS-180 Shore D

keménységvizsgáló) az alábbi tulajdonságok kerültek meghatározásra szabvány szerint: folyáshatár (σ_y), rugalmassági modulus (E), szakadási nyúlás (ε_b) és Shore D keménység.
A *11. sz. mellékletben* az egyes anyagok mért és átlagolt mechanikai tulajdonságai láthatók, már a mérnöki és *pv* szempontok alapján történt csoportosításnak megfelelően.

4.3. Mérési rendszer

4.3.1. Az alkalmazott pin-on-disc és dinamikus pin-on-plate vizsgálati rendszerek

A súrlódási viselkedések összehasonlítására és a jelenségek elemzésére "pin-on-disc" és dinamikus "pin-on-plate" tesztrendszert választottam. Meghatározó szempont volt a vizsgálati rendszerek definiálásánál, hogy megfeleljenek egy klasszikus száraz csúszású, nem túlterhelt polimer/acél súrlódási folyamatnak **[Bushan B. 2001]** a *4.2. ábrán* látható módon **[Keresztes R. 2009**], ahol tanulmányozható a bejáratási (running-in) és a stabil (vagy állandósult) csúszás (steady-state) szakasza egyaránt. A kísérletekhez beállított normál terhelés és csúszási sebesség kiválasztása jól példázza a továbbiakban a nagy biztonsági tényezővel üzemelő, karbantartásmentes, száraz siklócsapágyak üzemviszonyait.

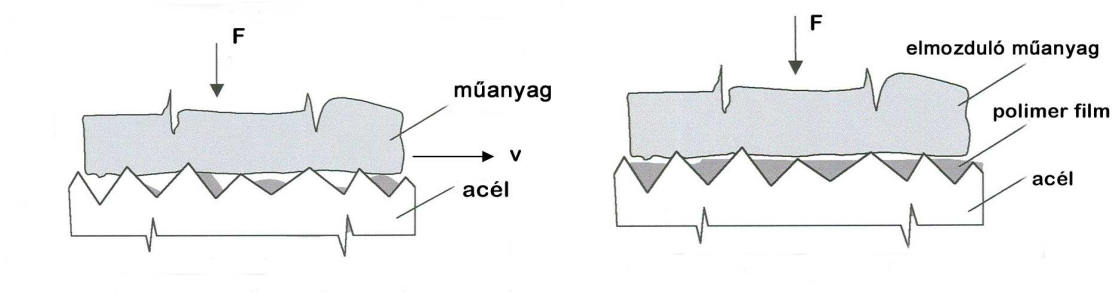


4.2. ábra. Az egyes vizsgálati rendszerek elhelyezése a súrlódás bejáratási és stabil szakaszának értelmezésével, polimer/acél párok esetén

- Dinamikus$_1$: a súrlódás bejáratási szakaszán belül, 1 súrlódási ciklus átlageredményei a dinamikus mozgáspályán,
- Dinamikus$_t$: a súrlódás bejáratási szakaszán belül, teljes (5 ismételt súrlódási ciklus) program átlageredményei a dinamikus mozgáspályán,
- Pin-on-disc I. és II. vizsgálati rendszerek: a bejáratás után a μ_{max} és $\mu_{átl}$ meghatározása

A csúszási folyamat elindulása után a súrlódási tényező növekszik a bejáratási szakaszban. Ezalatt a tényleges kontaktzóna átalakul, folyamatosan változik (felület-topográfia, feszültségállapot, deformációk, anyagátvitel), amely változás a továbbiakban erősen befolyásolja a „steady-state” súrlódási viselkedést és a csúszópár tényleges élettartamát. A

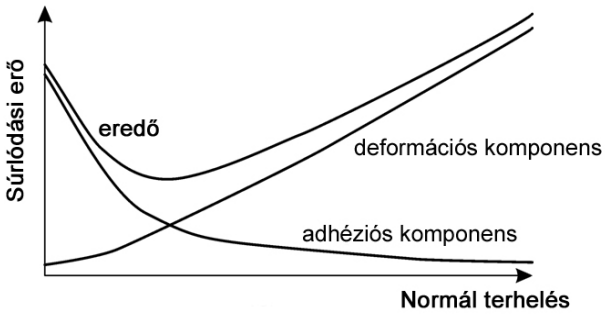
bejáratási szakasz végén definiálható az átmeneti (tranziens) zóna, ahol általában mérhető egy maximális súrlódási tényező. Ennek oka – a szakirodalomi részben (2. fejezet) már leírtakkal összhangban –, hogy a bejáratás során polimer-film képződik az acélfelület mikrotopográfiáján. E folyamat alatt egyre növekvő súrlódási ellenállás tapasztalható a mechanikai nyírás és deformációk mellet erősödő adhézió miatt. A polimer-film fejlődésével együtt nő a súrlódás adhéziós komponense, amely általában erősebb az acél/polimer tapadásnál. Az átmeneti zónában, a súrlódás maximális pontjánál megfigyelhető a polimer-film re-adhéziós folyamatának megindulása, mely a továbbiakban – a stabil szakaszban – dinamikus egyensúlyt biztosít az adhézió és re-adhézió között, stabilizálva a súrlódási ellenállást, súrlódási tényezőt (*4.3. ábra*) **[Keresztes R. 2009**].



4.3. ábra. A bejáratási szakaszon (bal) formálódó polimer-film és a stabilizálódott súrlódást (jobb) jellemző dinamikus egyensúly ($\mu_{átl}$) során kialakuló polimer film

A *4.2. ábra* szerint a „pin-on-disc" mérőrendszer a stabil súrlódás szakaszát értékeli a μ_{max} és a $\mu_{átl}$ meghatározásával, két *pv* szinten. A mérési rendszerek *pv* értékeit a kellő biztonsággal méretezett és üzemeltetett száraz csúszású siklócsapágyak gyakorlatához igazítottam úgy, hogy állandó csúszási sebesség alkalmazása mellet két normálterhelést választottam. A szakirodalomból kiderült, hogy a súrlódás szempontjából a csúszási sebesség változásának hatása nem olyan jelentős, mint a terhelés változása. Az egyes anyagok súrlódási viselkedésének összehasonlításakor viszont fontos tudni, hogy a normál terhelés változása miként befolyásolja a súrlódási erőt és együtthatót **[Bushan B. 2001, Keresztes R. 2009, Bowden F.P. et.al 1950 és 1964]** (*4.4. ábra*). A szakirodalmi részben is bemutatásra került: a száraz súrlódási erő F_f, egyenlő a tapadási és deformációs komponensek összegével, $F_f = F_a+F_d$, melyet a normál terhelés befolyásol.

A mérési eredmények azt mutatják a továbbiakban, hogy a vizsgálati rendszerekben beállított *pv* értékek közel optimális (*4.4. ábra*, eredő görbe minimumérték közeli tartomány) súrlódást eredményeznek a legtöbb kiválasztott anyag esetén.

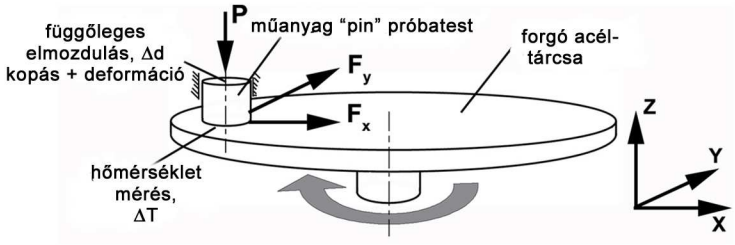


4.4. ábra. A súrlódási ellenállás és a terhelés kapcsolata

A *4.2. ábrán* szemléltetett bejáratási szakasz vizsgálatára a dinamikus „pin-on-plate” tesztrendszer alkalmazását választottam, mivel a súrlódó gépelemek bejáratása mindig érzékenyebb a dinamikus hatásokkal szemben. A *4.2. ábrán* a „dinamikus$_1$” felirat a programozott csúszó pálya egy csúszási ciklusát jelképezi, míg a „dinamikus$_t$” a teljes dinamikus vizsgálati programra utal, azaz a programozott csúszó pálya ötszöri ismételt ciklusára. A módszer részletei a 3. fejezetben és korábbi publikációkban leírásra kerültek **[Kalácska G. et.al. 1999, Samyn P. et.al 2007b]**.

4.3.2. Vizsgálati feltételek

A „pin-on-disc” mérésekre (*4.5. ábra*) a 3. fejezetben említett DIN 50322 szabvány VI. vizsgálati kategória ajánlásai alapján került sor.

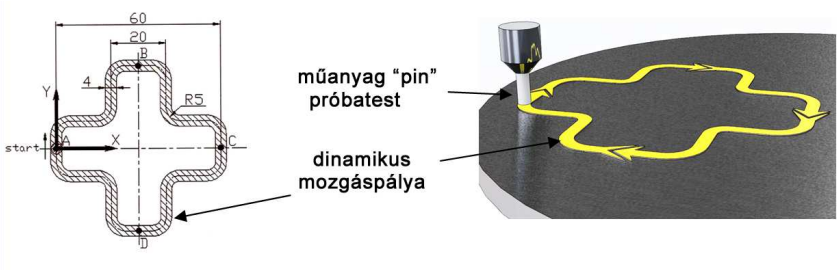


4.5. ábra. Pin-on-disc mérési elrendezés vázlata

A 6 mm átmérőjű és 15 mm magasságú rögzített műanyag tű „pin” próbatestek a köszörült felületű (R_a=0,05-0,1 μm) forgó S235 acéltárcsán a homlokfelületükkel súrlódnak, a tárcsa középpontjától 100 mm távolságú körpályán. A mérések során a következő paraméterek egyidejű mérésére került sor: súrlódási együttható (μ) a mért erőkomponensek alapján (F_x és

F_y, valamint P), és a kopás, melyet a próbatest befogó fej függőleges elmozdulása jellemez (d) valamint az érintkezéshez közeli hőmérséklet (T). E dolgozat keretében a terjedelmi korlátok miatt csak a súrlódás eredményeit ismertetem a továbbiakban.

A dinamikus súrlódási vizsgálatok során (dinamikus "pin-on-plate"), egy 4 mm átmérőjű mozgó műanyag tű „pin” haladt végig a programozott pályán (*4.6. ábra*), a normál terhelés és a sebességértékek dinamikus változásával, a pályaívekben fellépő gyorsulási és inercia hatásokkal kombinálva. A teljes dinamikus mérésprogram során a pályát ötször (öt ciklusban) teszi meg a próbatest öt, ciklusonként növekvő terhelés és sebesség beállítása mellett. Az értékelés során a dinamikus program első ciklusa az öt megtett ciklus átlagértékeitől elkülönítve is bemutatásra kerül, ami a bejáratás kezdeti folyamatát is elemezhetővé teszi. Ez a rövid vizsgálati szakasz az acél felületen elinduló polimer-film kialakulás intenzitásával van összefüggésben. A vizsgálati rendszerek paramétereit a *4.2. táblázat* foglalja össze.



4.6. ábra. A programozott dinamikus csúszási pálya

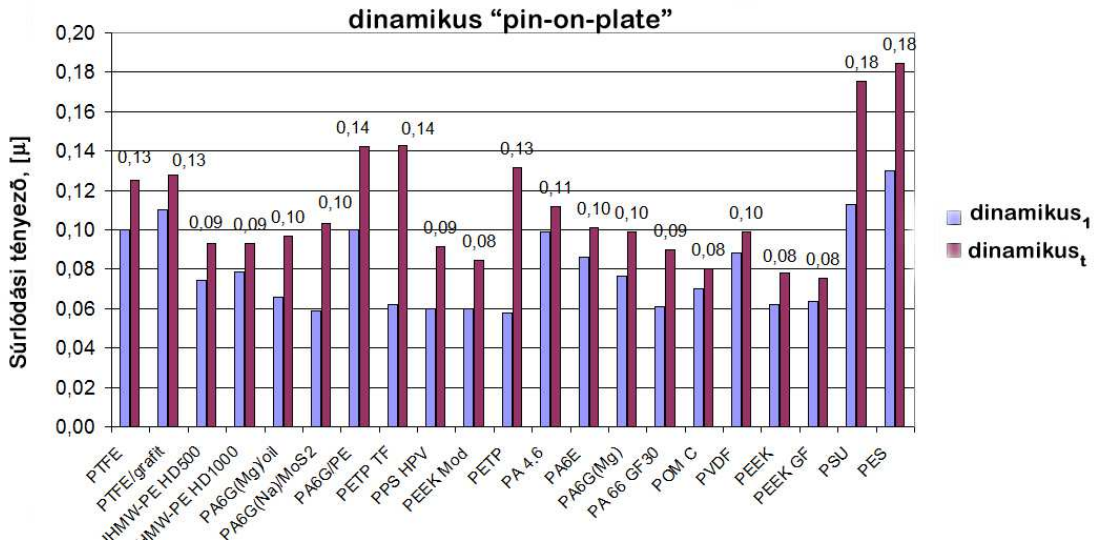
4.2. táblázat. A mérési rendszerek jellemzői paraméterei

	Pin-on-disc I. (pv = 0,8 MPa·ms^{-1})	Pin-on-disc II. (pv = 2 MPa·ms^{-1})	Dinamikus pin-on-plate (pv tartomány 0 – 8 MPa·ms^{-1})
Csúszási sebesség [m/s]	0,4	0,4	0-0,4
Vizsgálati intervallum [h]	0,75	0,75	1-5 ciklus
Normál terhelés [MPa]	2	5	0-20
Súrlódási nyom rádiusz [mm]	100	100	dinamikus programpálya
Acél felületi érdesség [μm]	R_a 0,05-0,1	R_a 0,05-0,1	R_a 0,05-0,1
Környezeti hőmérséklet [°C]	23	23	23

4.4. Eredmények és értékelésük

4.4.1. Súrlódási eredmények

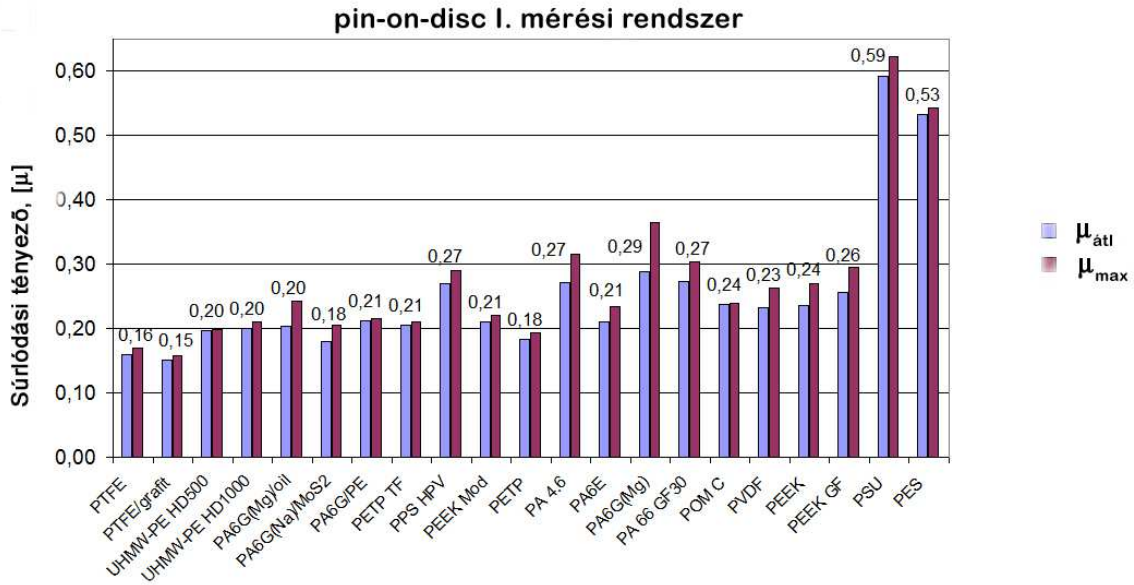
A súrlódási eredményeket táblázatos formában a *12 sz. melléklet* tartalmazza a vizsgálati rendszerek szerint csoportosítva, melyet a *4.7 – 4.9 ábrák* is szemléltetnek. A *4.7. ábra* a dinamikus "pin-on-plate" eredményeket mutatja (súrlódás bejáratási szakasza). Érzékelhető, hogy a rövid csúszási távolságok viszonylag kis súrlódási értékeket eredményeznek, amelyek a súrlódás bejáratási szakaszán jellemzőek (*4.2. ábra*). A gépelem-anyagok között a PA6G/PE, PETP és a PETP/PTFE kompozitok esetében fordult elő hirtelen súrlódásváltozás, amely az érintkezési zóna mechanikai deformációjának, a feszültségi állapot és adhéziós viszonyok gyors átalakulásának, az acél felületen létrejövő polimer-film kialakulás gyors megindulásának az eredménye.



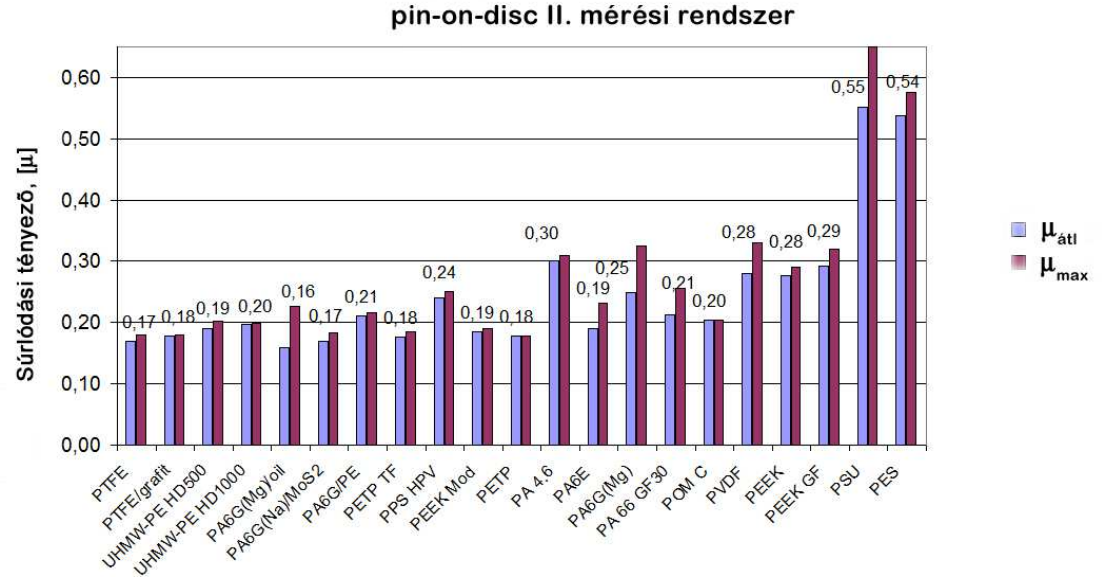
4.7. ábra. A dinamikus pin-on-plate rendszer súrlódási eredményei (bejáratási szakasz)
(az 1 ciklus és a teljes program átlagértékei, az utóbbi számszerűen is jelölve az ábrán)

A súrlódás stabilizálódott szakaszában, a „pin-on-disc I.” rendszerben mért eredményeket a *4.8. ábra* ismerteti. A viszonylag kis (0,8 $MPa \cdot ms^{-1}$) *pv* szint mérsékelt különbséget eredményezett az anyagcsoportok között, az amorf anyagok (PES és PSU) kivételével. Az 1. anyagcsoport stabilizált súrlódási együtthatói 5-10%-kal kisebbek, mint a 2. anyagcsoport esetében. Az 1. anyagcsoportban a μ_{max} és a $\mu_{átl}$ közötti különbség általában kisebb, mint a többiek esetében, amely simább átmeneti zónát jelez (*4.2 és 4.3. ábrák*) egyenletes transzfer polimer-film réteggel az acél felületén.

A *4.9. ábrán* a „pin-on-disc II.” rendszerben megemelt normálterhelés hatásának eredményei (*pv* = 2 $MPa \cdot ms^{-1}$) láthatók.



4.8. ábra. A pin-on-disc I. rendszerben mért átlagos és maximális súrlódási tényezők, stabil súrlódás szakasza (pv = 0,8 MPa·ms^{-1}, $\mu_{átl}$ számszerűen jelölve)



4.9. ábra. A pin-on-disc II. rendszerben mért átlagos és maximális súrlódási tényezők, stabil súrlódás szakasza (pv = 2 MPa·ms^{-1}, $\mu_{átl}$ számszerűen jelölve)

A két „pin-on-disc” rendszer (*4.8. és 4.9. ábrák*) eredményeinek összehasonlítása azt mutatja, hogy az 1. anyagcsoportba sorolt legtöbb polimer kisebb, vagy hasonló mértékű súrlódást eredményezett a megnövekedett terhelés hatására. A terhelés növelése PTFE, PETP/PTFE és a PA6G (Mg)/olaj esetén a súrlódás csökkenését mutatja, ami a *4.3. ábra* szerint azt jelenti, hogy a pin-on-disc I. vizsgálati rendszer a súrlódási optimum-ponthoz képest (minimum pont

a *4.4. ábrán*) balra helyezkedett el. Ez a viselkedés összhangban áll a korábban tárgyalt súrlódási elmélettel **[Yamaguchi Y. 1990, Bowden F.P. et.al 1954 és 1964]** és elsősorban az adott anyagpár kis felületi adhéziójával hozható kapcsolatba. Számos egyéb műanyag, mint például a PA4.6 és a PEEK viselkedése a *4.4. ábra* szerinti optimum-ponttól jobbra helyezkedik el, a növekvő terhelés nagyobb súrlódást eredményezett.

A továbbiakban a *4.11. – 4.14. ábrákon* a súrlódási eredményeket a mért mechanikai tulajdonságok függvényében ismertetem úgy, hogy a bemutatott anyagcsoportokat elkülönítve értékelem. Ez alól kivétel az általam „3. anyagcsoport"-ként jelzett PES és PSU, melyek eredményeit a könnyebb ábrázolhatóság miatt a „2. anyagcsoport" jelöléseivel láttam el, de megkülönböztetésül az anyagneveket is feltüntettem. Az amorf PES és PSU szinte sehol nem követte a részben-kristályos anyagokra jellemző trendeket, azaz nemcsak a molekuláris szerkezetben, a súrlódási viselkedésben is jelentősen eltérő termékeknek minősültek.

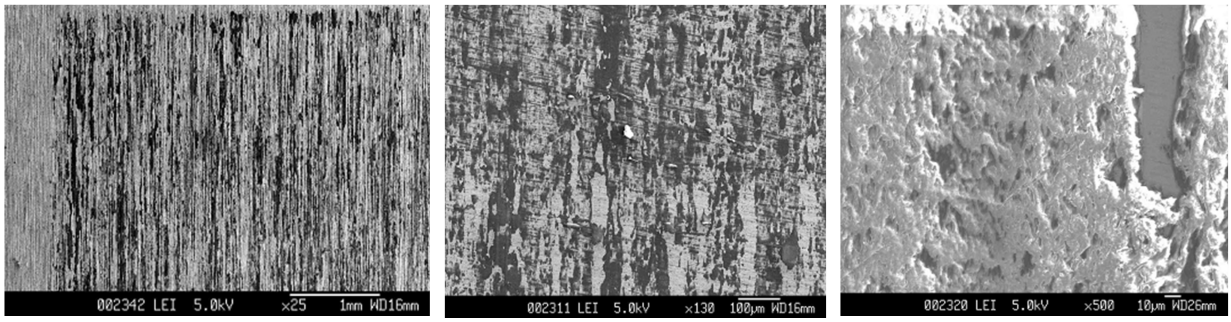
A *4.11. – 4.14. ábrák* könnyebb értelmezhetőségéhez fontos kiemelni az alábbiakat:

- három diagram szerepel egymás alatt: felül a bejáratási szakasz két mérése (a), középen a stabil súrlódás szakaszán kis *pv* szint mellett (0,8 $MPa \cdot ms^{-1}$) mért pin-on-disc I. mérése (b), majd alul a stabil súrlódás szakaszán, emelt *pv* szint mellett (2 $MPa \cdot ms^{-1}$) mért pin-on-disc II. mérése
- az (a) diagramok az 1. és 2. anyagcsoport, valamint a PES és PSU átlagos súrlódási tényezőit mutatja, azaz: a dinamikus modellezéssel vizsgált bejáratási szakasz kezdeti pillanatait jellemezve a $dinamikus_1$ jelöléssel (dinamikus mozgáspálya 1 ciklusa), valamint a súrlódás bejáratási szakaszán mért és $dinamikus_t$ jelöléssel szimbolizált hosszabb mérést (5 ciklus, a teljes mérés) mutatva
- az (a) ábrákon a $dinamikus_1$ esetén felismerhető trendeket vonalak jelölik mindkét anyagcsoport esetében, mely a $dinamikus_t$ esetén már csak felhővel jelölhető.
- a (b) és (c) diagramok a súrlódás stabil szakszán mért μ_{max} és $\mu_{átl}$ értékeket jelenítik meg mindkét anyagcsoport esetén, a $\mu_{átl}$ értékekre illeszthető trendek bemutatásával (a μ_{max} mérési pontok összehasonlítása a $\mu_{átl}$-hoz minden esetben utal a tranziens zóna és a stabil szakasz közötti átmenet egyenletességére)
- a (b) és (c) diagramok összehasonlításával az állandó csúszási sebesség (0,4 m/s), de változó normál terhelés hatására változó *pv* szint hatásai elemezhetők a stabil súrlódás szakaszán.

4.4.2. Súrlódási tényező alakulása a folyáshatár függvényében

A súrlódási tényezők és az anyagok folyáshatára közötti kapcsolat a *4.11. ábrán* látható.

A bejáratási szakaszban, amikor a sebesség és a terhelés dinamikus változásai ideiglenesen elérik a legnagyobb terhelési értéket (pv = 8 MPa·ms^{-1}), a súrlódási tényező a növekvő folyáshatár függvényében csökken (*4.11a. ábra*). A dinamikus mérés első ciklusában a kapcsolat hatványfüggvénnyel közelíthető, de a teljes dinamikus program (öt ciklus) átlageredményei már túl nagy szórást mutatnak a görbe illesztéséhez, azonban a törvényszerűség felismerhető a felhő terület illesztése után is. A jelenség magyarázható az első pillanatokra jellemző, még csak kezdődő súrlódási hőhatással, majd a továbbiakban eltérő módon alakuló tényleges kontaktzóna mérettel és annak felületi jelenségeivel (adhézió és deformáció), az eltérő módon formálódó polimer-film fejlődésével (*4.10. ábra,* SEM felvételek). Ez a hatás a *4.11. - 4.14. ábrák* mindegyikén felismerhető.



(i)
Dinamikus$_1$, a bejáratás kezdeti pillanatai (natúr PETP) 25X

(ii)
Dinamikus$_t$, a teljes dinamikus program után, (natúr PETP) 130X

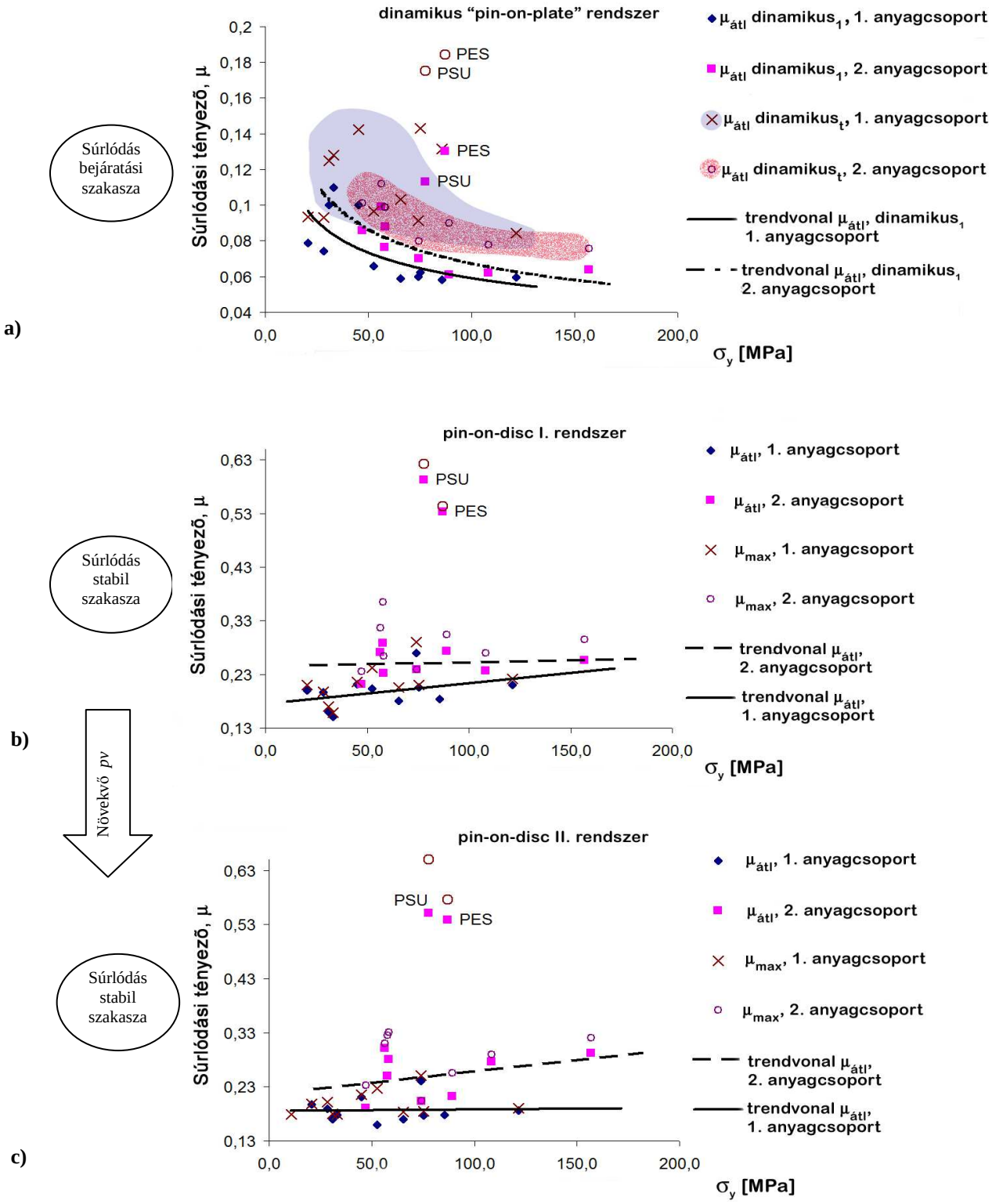
(iii)
Dinamikus$_t$, a teljes dinamikus program után, (PETP/PTFE kompozit) 500X

4.10.ábra. Polimer-film eltérő fejlődése köszörült S235 cél felületén, a súrlódás bejáratási szakaszán

A *4.11. ábrán* mindhárom vizsgálati rendszer azt mutatja, hogy a „csúszó gépelem anyagok” (1. anyagcsoport) kisebb súrlódási együtthatót biztosítanak a „szerkezeti polimerek” csoportjához (2. anyagcsoport) képest. A súrlódás stabil szakaszán, a „pin-on-disc” vizsgálati rendszerekben az „σ_y” csekély hatást gyakorol a súrlódásra. Kisebb pv szint esetén (*4.11b. ábra*, pin-on-disc I. rendszer, pv = 0,8 MPa·ms^{-1}), a „σ_y” nem befolyásolja a súrlódást a 2. anyagcsoport esetében.

Az 1. anyagcsoportnál, a bejáratás kivételével, a súrlódás enyhén növekszik a növekvő „σ_y” mellett a deformáció és a tapadás eredményeként. Ez a jelenség a polimer-film képződés dinamikus egyensúlyában szerepet játszó eltérő adhéziónak tudható be elsősorban, mert a kis

terhelési szintnél – ismerve az anyagok szilárdsági tulajdonságait – a deformáció hatása nem tekinthető meghatározónak (4.*11b. ábra*).



4.11. ábra. A súrlódási tényező és az anyagok folyáshatárának kapcsolata az egyes anyagcsoportoknál.

(a) dinamikus pin-on-plate, 1 és az öt ciklusú teljes programpálya, $\mu_{átl}$, (b) pin-on-disc I. (pv = 0,8 MPa·ms^{-1}), $\mu_{átl}$ és μ_{max}, (c) pin-on-disc II. (pv = 2 MPa·ms^{-1}), $\mu_{átl}$ és μ_{max}.

A pin-on-disc II. rendszer megnövekedett terhelése (pv = 2 MPa·ms^{-1}) befolyásolja az eredményeket (*4.11c. ábra*). A „σ_y” nincs hatással az 1. anyagcsoportra, de a 2. anyagcsoport esetén a nagyobb „σ_y” értékek a súrlódás enyhe növekedését okozzák.

4.4.3. A szakadási nyúlás és súrlódási tényező kapcsolata

A *4.12. ábra* a súrlódási tényezőket az anyagok szakadási nyúlásának függvényében szemlélteti. A dinamikus vizsgálati rendszer első ciklusában (*4.12a. ábra*) az összefüggés logaritmikus és lineáris trendekkel írható le. A teljes dinamikus program eredményei már csak felhővel közelíthetők a kontaktzóna változásból eredő nagyobb adathalmaz-szórás miatt, de a 2. anyagcsoport esetén a trend itt is felismerhető.

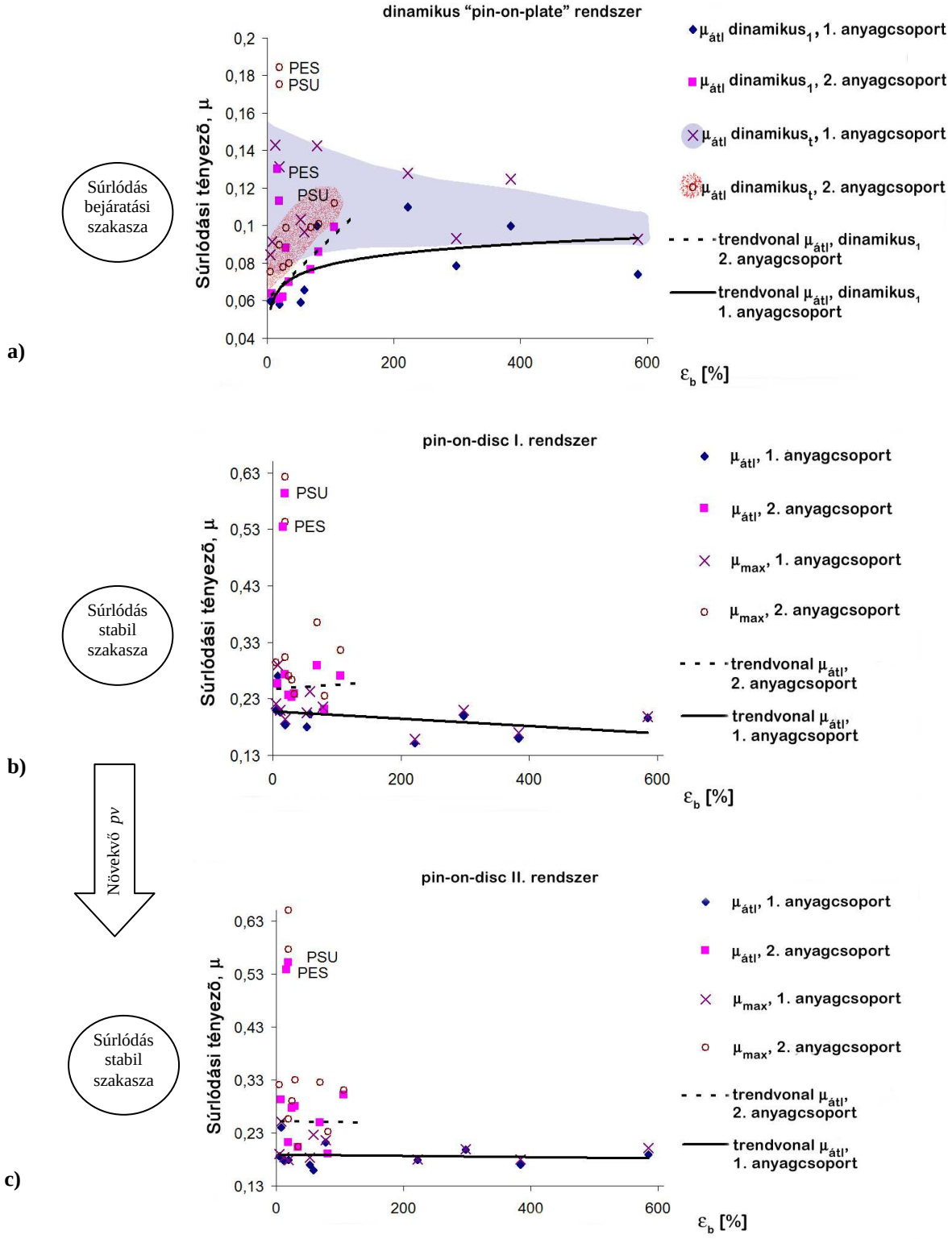
A bejáratás során a nagyobb „ε_b” értékek megnövekedett súrlódást eredményeznek még a 2. anyagcsoportban is. Ez a viselkedés a súrlódás deformációs összetevőjével hozható kapcsolatba. A nagyobb alakváltozási képességű anyagok esetén a tényleges érintkezési felület is nagyobb a kontaktzónában, így az adhézió kiterjedtebb felületen képes hatni. A stabil súrlódás szakaszán – a dinamikus egyensúly beállta után –, a „pin-on-disc” mérések alapján látható, hogy ekkor a szakadási nyúlás („ε_b”) hatása a súrlódási tényezőre nem jelentős. Kisebb terheléseknél (*4.12b. ábra*) az „ε_b” növelése a súrlódás elhanyagolható csökkenését okozza az 1. anyagcsoport és enyhe növekedését a 2. anyagcsoport esetében. A megemelt pv szinten (*4.12c. ábra*) az " ε_b " súrlódásra gyakorolt hatása elhanyagolható.

4.4.4. Súrlódási tényező alakulása a rugalmassági modulus függvényében

A *4.13. ábra* mutatja a súrlódási tényezők és rugalmassági modulusok kapcsolatát. A bejáratás kezdeti szakaszában mindkét anyagcsoport esetén hasonló eredmények tapasztalhatók (*4.13a. ábra*, dinamikus$_1$). Az 1. „csúszó” és 2. „szerkezeti” anyagcsoportban egyaránt megfigyelhető egy súrlódás szempontjából optimális rugalmassági modulus. A trendvonalaknak minimumpontja van. A mérési rendszerben ez az optimum „E” 5000 – 6000 MPa. Ez az érték rendszerfüggő (felületi érdesség, az érintkező felület összetétele, hőviszonyok alakulása…), de a vizsgálati rendszer megtervezése valós tribológiai alkalmazások figyelembe vételével történt. Az öt dinamikus ciklus lefutása után – a kontaktzónák jelentősen eltérő változásaiból adódóan, az adatok szórása (*4.13a. ábra*) miatt – a felhőábrázolás használható, így is fel lehet ismerni a hasonló trendeket, főleg a 2. anyagcsoportban.

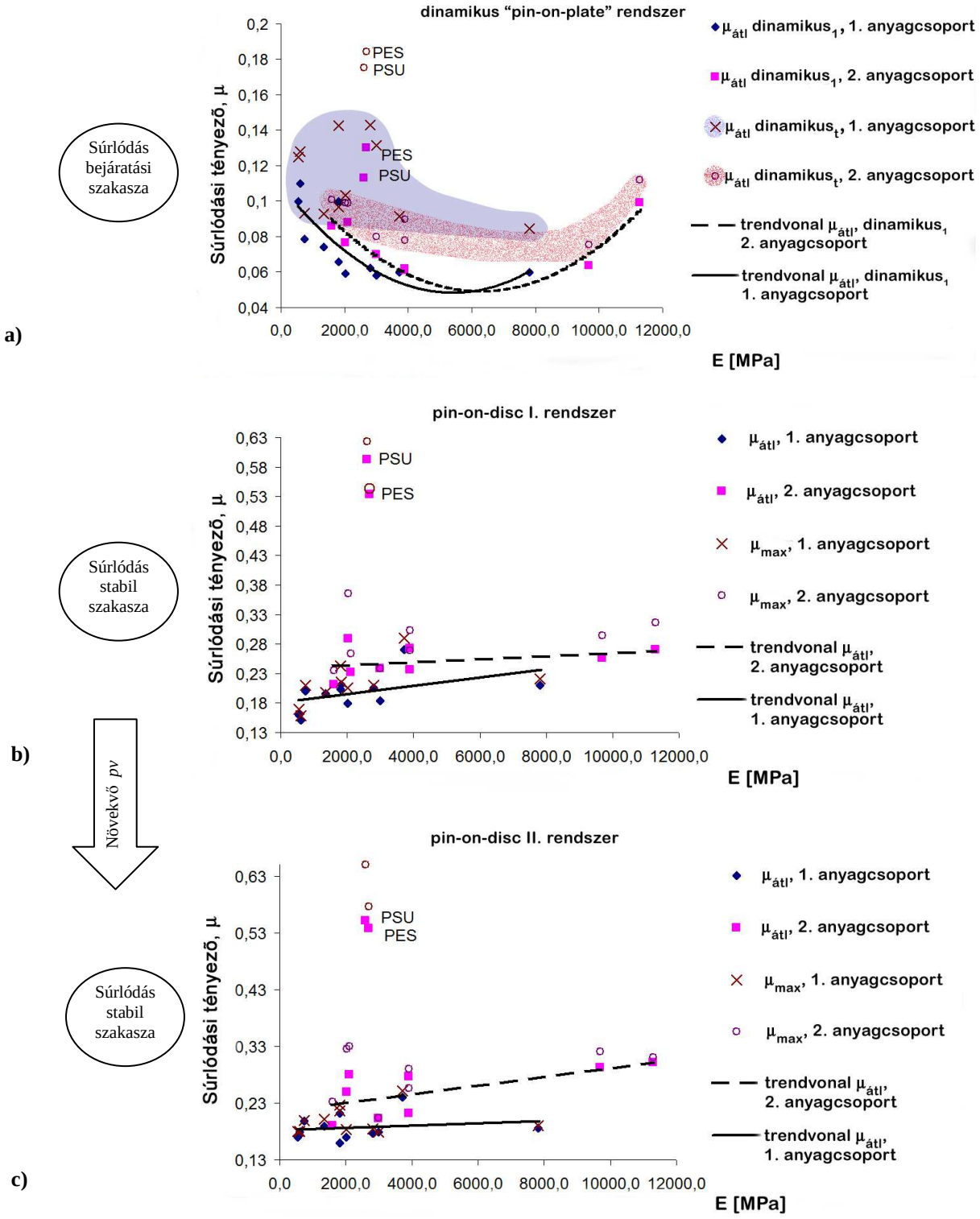
A súrlódás stabil szakaszán a „pin-on-disc” mérések közel lineáris kapcsolatot mutatnak a súrlódás és a rugalmassági modulus („E”) között. Az összefüggés a rendszerek terhelési

szintjével változik. A pin-on-disc I. esetben az „E” növekedése a súrlódás nagyobb mértékű növekedését okozza az 1., mint a 2. anyagcsoport esetében (*4.13b. ábra*).



4.12. ábra. Az anyagok szakadási nyúlása és a súrlódási tényező közötti kapcsolat az egyes vizsgálati rendszerekben

(a) dinamikus pin-on-plate, 1 és az öt ciklusú teljes programpálya, $\mu_{átl}$, (b) pin-on-disc I. (pv = 0,8 MPa·ms^{-1}), $\mu_{átl}$ és μ_{max}, (c) pin-on-disc II. (pv = 2 MPa·ms^{-1}), $\mu_{átl}$ és $\mu_{max.}$



4.13. ábra. Rugalmassági modulus és súrlódási tényező közötti kapcsolat a vizsgálati rendszerekben

(a) dinamikus pin-on-plate, 1 és az öt ciklusú teljes programpálya, $\mu_{átl}$, (b) pin-on-disc I. (pv = 0,8 MPa·ms^{-1}), $\mu_{átl}$ és μ_{max}, (c) pin-on-disc II. (pv = 2 MPa·ms^{-1}), $\mu_{átl}$ és μ_{max}.

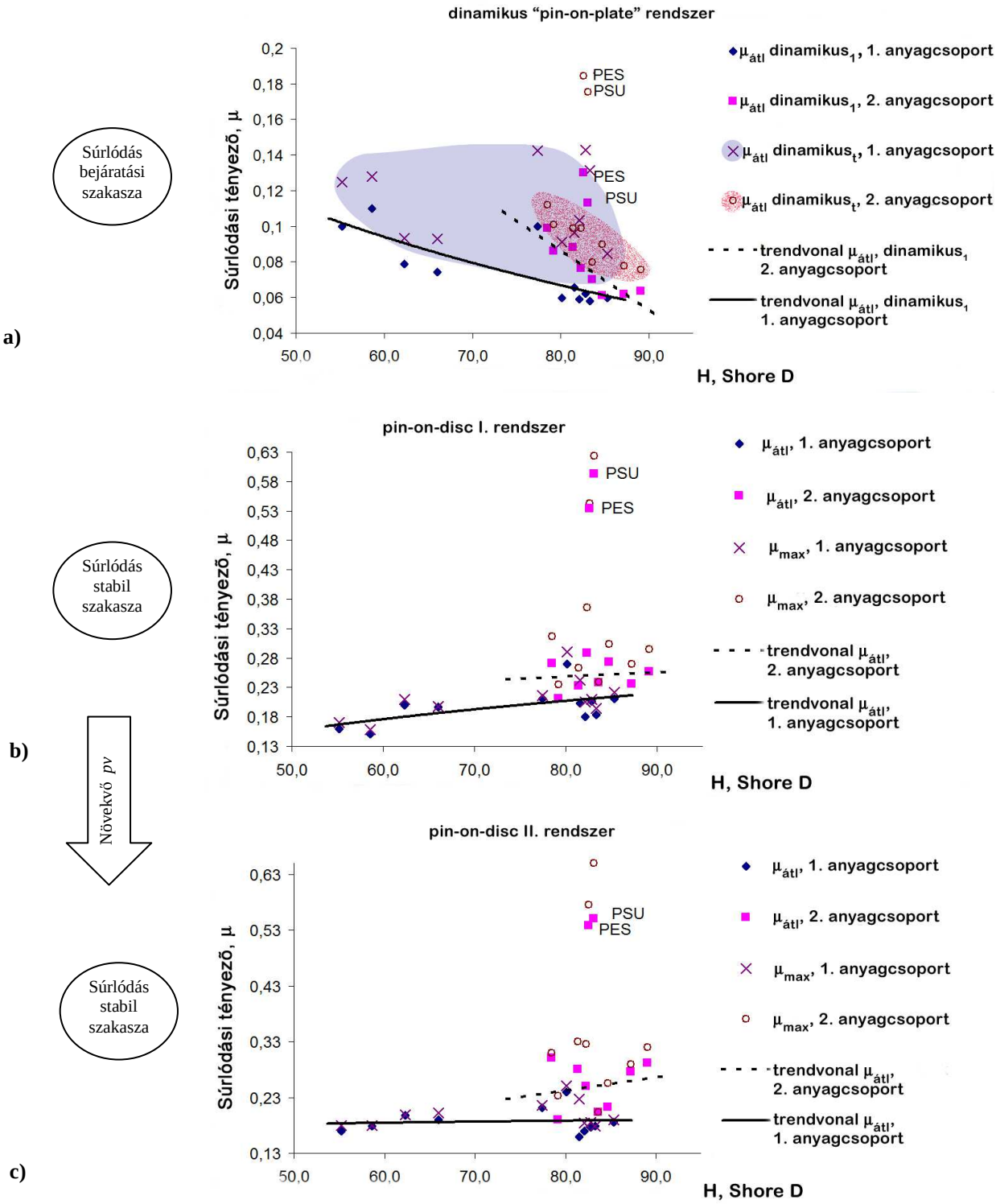
Az alkalmazott kis terhelési szinten (pv = 0,8 MPa·ms^{-1}) tapasztalt összefüggés, a szakirodalom szerint is (2. fejezet, **[Yamaguchi Y. 1990, Bowden F.P. et.al 1964]**), elsősorban a felületi energiaviszonyokkal kapcsolatban lévő, eltérő adhéziós hatások miatt fordulhat elő. Ismeretes pl., hogy a PEEK vagy PEEK kompozit anyagok esetében mind az „E" érték, mind a felületi energia nagyobb, mint más anyagok, mint például UHMW-PE esetében. A pin-on-disc II. vizsgálatok során alkalmazott nagyobb terhelési szint (pv = 2 MPa·ms^{-1}) már eltérő trendeket eredményezett (*4.13c. ábra*). A megerősödő deformáció és az adhézió együtt okozza a keletkező súrlódásváltozást a 2. anyagcsoportra vonatkozóan, míg az 1. anyagcsoportban a hatás nem olyan jelentős.

4.4.5. A keménység hatása a súrlódásra

A *4.14. ábra* mutatja az összefüggést a Shore D keménység és a súrlódási tényező között. A dinamikus vizsgálatok azt mutatják, hogy a súrlódás korai szakaszában (*4.14a. ábra*, dinamikus$_1$) a nagyobb keménység előnyös, és kisebb súrlódást eredményez mindkét anyagcsoportban. Ennek oka a nagyobb keménységből származó kisebb kontaktzóna deformáció, így kisebb a tényleges érintkezési felület is. Ennek eredménye a kisebb deformációs és adhéziós ellenállás. A teljes dinamikus vizsgálat alatt (öt ciklus) jelentősen átalakuló kontaktzóna és transzferréteg formálódást eredményező folyamatok miatt az adathalmaz felhővel közelíthető, de a trendek nem változnak (*4.14a. ábra*, dinamikus$_t$).

A steady-state mérések során (polimer-film dinamikus egyensúlya) a felületi keménység szerepe megváltozik. Kisebb terhelési szinten (pv = 0,8 MPa·ms^{-1}) a 2. anyagcsoportban a keménységnek nincs jelentős hatása a súrlódásra, de az 1. anyagcsoportban a súrlódás enyhe emelkedése a keménység függvényében tükrözi a műanyagok különböző adhéziós és felületi energiájának (*4.14b. ábra*) hatását.

A terhelés növelése (pv = 2 MPa·ms^{-1}) módosítja a keménységnek a súrlódásra gyakorolt hatását (*4.14c. ábra*). Az 1. anyagcsoportban a 80-as vagy annál nagyobb Shore D keménységű műanyagok kisebb súrlódást mutattak. Ezek az anyagok a 4.4. ábra elmélete szerint a pin-on-disc I. rendszerben az optimum-ponttól balra üzemeltek, mert a terhelés növelésével csökkent, azaz az optimum-pont felé mozdult a súrlódás a pin-on-disc II. rendszerben. A 2. anyagcsoportban lévő polimerek esetében a terhelés növelés hatására tapasztalható súrlódás-növekedés az optimumponttól jobbra történő elmozdulást jelenti (*4.4. ábra*).



4.14. ábra. Shore D keménység és a súrlódási tényező közötti kapcsolat a vizsgálati rendszerekben

(a) dinamikus pin-on-plate, 1 és az öt ciklusú teljes programpálya, $\mu_{átl}$, (b) pin-on-disc I. (pv = 0,8 MPa·ms^{-1}), $\mu_{átl}$ és μ_{max}, (c) pin-on-disc II. (pv = 2 MPa·ms^{-1}), $\mu_{átl}$ és μ_{max}.

4.5. A kutatás összefoglalása és következtetések

Huszonegy, különböző műszaki műanyag (natúr és kompozit) került kiválasztásra a gépészmérnöki gyakorlat alapján. Célszerűen három csoportba soroltam a termékeket a *pv* határértékeik és alkalmazási tapasztalatok alapján.

1) Csúszó gépelem-anyagok, mint például a PTFE, UHMW-PE, PA6G, PETP, PPS és PEEK családok bizonyos termékei;

2) Szerkezeti gépelemanyagok, melyek a mechanikai terhelések mellet gyakran ki vannak téve súrlódó hatásnak is, mint pl. a PA4.6, PA6E, PA6G, PA 66, POM, PVDF és a PEEK családok bizonyos termékei, valamint

3) Amorf szerkezetű PES és PSU anyagok, melyeket vegyileg ellenálló anyagként használnak és ritkán meghatározó a csúszó terhelésük.

A súrlódás bejáratási szakaszának (running-in) elemzésére dinamikus "pin-on-plate" rendszert terveztem. A stabil súrlódás (steady-state) méréseihez két *pv* szinten (0,8 és 2 MPa ms^{-1}) pin-on-disc vizsgálati rendszert alkalmaztam. A köszörült felületű S235 szerkezeti acél és a polimer minták között, száraz csúszás esetén mért erők alapján történt a súrlódási tényezők meghatározása és értékelése. A súrlódási eredmények összehasonlítása mellett az egyes anyagcsoportok vonatkozásában történt a mechanikai jellemzők – folyáshatár (σ_y), Shore D keménység (H), rugalmassági modulus (E), szakadási nyúlás (ε_b) – súrlódásra gyakorolt hatásának vizsgálata.

A három anyagcsoport különböző súrlódási trendeket mutatott az eltérő mechanikai tulajdonságok tekintetében. Lineáris (változó pozitív és negatív meredekségű), logaritmikus és exponenciális összefüggések feltárására került sor, egyes esetekben pedig nem volt megállapítható semmilyen kapcsolat. A dinamikus tribológiai modell, amely jobban korrelál a valós gépelem-alkalmazásokkal, azt mutatta a súrlódás bejáratási szakszán, hogy a H és az „σ_y” növekedése kisebb súrlódási tényezőt eredményez. A stabil súrlódás szakaszán (steady-state) a szakadási nyúlásnak a hatása a legkisebb a súrlódásra. A steady-state súrlódás során a *pv* szint növelése gyakran eredményezte az anyagtulajdonságok és a súrlódási tényező közötti lineáris összefüggés előjelének változását, amely a korábban kifejtettek szerint értelmezhető a polimer/acél csúszó párok súrlódását magyarázó elméletekkel.

4.6. Tézisek

1. A kutatási rendszerben megállapítottam, hogy a műszaki műanyag súrlódó gépelemek tervezésének alapjául szolgáló *pv* határérték – mely a kontaktzóna adhéziós és deformációs

viselkedésének együttes következménye – változása alkalmas olyan anyagcsoportok létrehozására, melyek esetén kapcsolatok, trendek fogalmazhatók meg az anyagok mechanikai jellemzői (σ_y) (H) (ε_b) (E) és mért súrlódási tényezők között. Ez érvényes a súrlódás bejáratási és stabil szakaszára egyaránt. 0,1 és 2,1 m/s csúszási sebességhatárok között definiáltam az 50%-nál kisebb *pv* változás anyagcsoportját, mint „klasszikus súrlódó" anyagcsoportot, illetve az 50%-nál nagyobb *pv* változást mutató „szerkezeti polimerek" csoportját. A harmadik csoportba sorolt amorf polimerek semmilyen tekintetben nem követik a részben-kristályos szerkezetű polimerek súrlódási trendjeit.

2. A vizsgált huszonegy különböző műszaki polimert három csoportra osztva (csúszó gépelemanyagok, szerkezeti polimerek és amorf műszaki műanyagok), olyan kísérleti rendszert terveztem, mely alkalmas:

- a súrlódás bejáratási szakaszának elemzésére dinamikus tribológiai modellezéssel. A programozott terhelés és sebesség-változás, valamint a gyorsulási és inercia-hatások eredményeként létrejövő eltérő dinamikai hatások a polimer-film kialakulásban mérhető változást okoznak, melyet a dinamikus$_1$ és dinamikus$_t$ mérési programok összehasonlításával lehet elemezni.
- a súrlódás stabil szakaszán a polimer-film adhéziós és re-adhéziós dinamikus egyensúlyának kezdetét jellemző μ_{max} és a stabilizálódott dinamikus egyensúlyt jellemző $\mu_{átl}$ meghatározására, eltérő terhelési, azaz *pv* szintek alkalmazásával.

A megalkotott modellrendszer így olyan komplex, részletes tribológiai elemzést tett lehetővé, mely a bejáratás kezdeti jelenségeit és az azt követő kontakzóna átalakulást, továbbá a tranziens zóna súrlódási maximumát és a stabilizálódott dinamikus egyensúlyt teszi folyamatában áttekinthetővé és értelmezhetővé az ismert súrlódási elméletek alapján.

3. A *pv* határérték-változás szempontjai alapján megalkotott anyagcsoportok súrlódási viselkedése és az anyagok mechanikai tulajdonságai közötti összefüggések keresése során megállapítottam, hogy az adott vizsgálati rendszer:

3/a bejáratási szakaszában (running-in):

- a súrlódási tényező csökken a folyáshatár (σ_y) és a Shore D keménység növekedésével,
- a súrlódási tényező nő a nagyobb szakadási nyúlással (ε_b),

- a súrlódási folyamat kezdeti szakaszában kimutatható egy optimális rugalmassági modulus (E), amikor a súrlódási tényező trendvonalának minimuma van,
- a bejáratás kezdeti pillanatait jellemző trendvonalak a további bejáratás során a trendeket leíró pontfelhővé alakulnak, melynek oka az eltérő módon/dinamikával fomálódó kontaktzóna és polimer-film formálódása az acél felületén.

3/b állandósult (stabil) súrlódási szakaszában (steady-state):

- az alkalmazott kisebb *pv* szint esetén (pv = 0,8 MPa·ms^{-1}) a súrlódási tényező növekedett a folyáshatár (σ_y), a rugalmassági modulus (E) és a Shore D keménység (H) növekedésével. A mechanikai tulajdonságoknak a súrlódásra gyakorolt hatása erősebb az 1. anyagcsoportnál (csúszó anyagok), mint a 2. anyagcsoport (szerkezeti polimerek) esetében. A súrlódási tényező csökkent a növekvő szakadási nyúlással (ε_b) a csúszó anyagcsoport esetében, de nem fejtett ki jelentős hatást a szerkezeti anyagcsoportnál,
- a megemelt *pv* szintnél (pv = 2 MPa·ms^{-1}) a „csúszó anyagok” csoportjában a mechanikai tulajdonságok nem gyakorolnak jelentős hatást a súrlódásra. A „szerkezeti anyagok” csoportjában a szakadási nyúlás nem gyakorolt hatást a súrlódásra, míg a növekvő folyáshatár (σ_y), rugalmassági modulus (E) és a Shore D keménység (H) megnövelte a súrlódást.

3/c Az amorf PES és PSU anyagok a súrlódás szempontjából kevéssé értékelhető viselkedést mutattak, folyamataik jelentősen eltértek a többi, részben-kristályos szerkezetű polimerekétől. Ez alapján kimondható, hogy a *pv* határérték-változás szempontjai alapján történő anyagcsoportosítás a mechanikai tulajdonságok és a súrlódás együttes értékelésére, csak a részben-kristályos és amorf anyagok szétválasztása mellett lehetséges.

5. Ionimplantációval módosított polimer felületek adhéziós tribológiai viszonyai

A tribológiai alkalmazásokban gyakori megoldás az alapanyagtól eltérő tulajdonságokkal rendelkező felület létrehozása, amelynek célja az alapanyagok kedvező tulajdonságainak megőrzése – pl. szívósság, szilárdság, – mellett olyan felületi jellemzők biztosítása, amelyek javítják pl. az abráziós vagy adhéziós kopásállóságot, vagy a csúszási tulajdonságokat. A megtervezett tulajdonságú felületek és rétegek kialakításával kapcsolatos eljárások gyors fejlődése következtében az elmúlt években az anyagtudomány egy új fejezete, a műszaki felülettudomány (surface engineering) kialakulása és térnyerése volt tapasztalható.
Mint **[Bertóti I. 2003]** összegzi, az alkalmazott korszerű felületmódosítási eljárások során a cél leggyakrabban különféle elektronikai célú, optikai, korróziógátló, keménység- és kopásállóság növelő, hőszigetelő, dekoratív, stb. bevonatok, vagy vékonyrétegek hatékony kialakítása. A felületmódosítás hagyományos módszerei, amelyeket főleg fémek esetében alkalmaznak (pl. festékbevonat-kialakítás, oxidálás, tűzi zománcozás, elektrokémiai fémleválasztás, kéregedzés, betétedzés cianidos sófürdőben, stb.) sok területen hasznosak, azonban számos új felhasználási célra nem, vagy csak korlátozottan alkalmazhatók. Ezenkívül gyakran károsanyag-kibocsátással járnak és mérgező melléktermék-elhelyezési problémákkal terheltek. A korszerű felületmódosítási eljárások ugyanakkor – amellett, hogy pontosan szabályozhatók, reprodukálhatók, jól kézben tarthatók és ezért új területeken (is) alkalmazhatók – általában anyag- és energiatakarékosak, valamint környezetbarátok.
A felületmódosított műszaki műanyag gépelemeknek a tribológiában is jelentőségük van, mint azt már néhány jól ismert alkalmazás is bizonyította, ilyen pl. az ionimplantációval módosított UHMW-PE HD1000 anyagok használata kent súrlódó rendszerben, mint a csípőprotézis vápa elem **[Allen C. 1996, Tóth A. 2003].** Az ionimplantációs felületmódosítás eddigi ismert polimeres eredményei felvetik azt a kérdést, hogy a tribológiai rendszerekben klasszikusan alkalmazott műszaki műanyagok, mint PETP és PA6 hogyan reagálnak ionsugár felületmódosító hatására és ennek eredményeként hogyan változik meg súrlódási-kopási viselkedésük, van-e előnyös alkalmazási lehetőségük.

5.1. A kutatás célja

Célul tűztem ki nitrogén PIII-val kezelt polietilén-tereftalát (PETP) és poliamid 6 (PA6) tribológiai jellemzőinek vizsgálatát a csúszási távolság függvényében, különböző felületi nyomás és csúszási sebesség mellett száraz és víz,- valamint olajkenésű körülmények között, pin-on-disc tribométer felhasználásával. Ezen belül pontos képet kívántam kapni:

- a PIII kezelés felületmódosító hatásáról, úgymint a felületi réteg összetételéről, vastagságáról, a gradiens zóna vastagságáról, a felületi energia viszonyok változásáról,
- kezelt és kezeletlen próbatestek pin-on-disc mérése alapján a súrlódási, kopási és hőviszonyok alakulásáról,
- a mért tribológiai jellemzők és a felületet jellemző energia közötti kapcsolatokról, összefüggésekről.

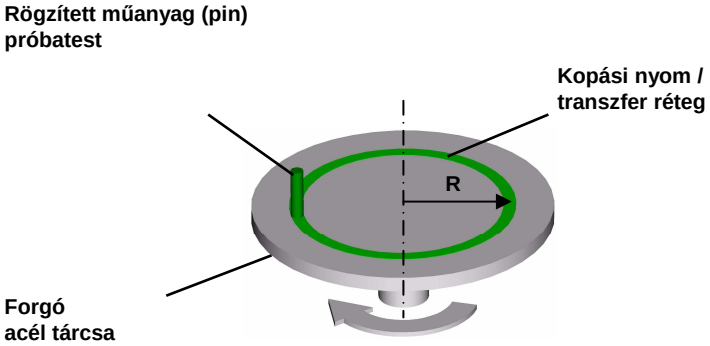
5.2. Kezeletlen és plazmaimmerziós ioninplantációval (PIII) kezelt PETP tribológiai jellemzői

5.2.1. Vizsgálati rendszer és anyagok (PETP)

Az Ensinger GmbH által gyártott, Docapet kereskedelmi nevű extrudált polietilén-tereftalát (PETP) műszaki műanyag féltermékből (rúdból) készültek a próbatest korongok, amelyek átmérője 10 mm és magassága 2 mm. Az ionimplantációra kerülő homloklap felületek először SiC-(sziliciumkarbid) csiszolópapírral (P1200 és P4000 szemcsézetű), majd filc lemezzel polírozásra kerültek. Polírozás után következett a PETP próbatestek kezelése nitrogén plazmaimmerziós ionimplantációval (PIII). Egy kezelés során egyszerre 7 db próbatest került elhelyezésre a vákuumkamrában. A kezelés az MTA KK AKI laboratóriumában és eszközeivel (plazmaberendezés és nagyfeszültségű ANSTO (Ausztrália) impulzusgenerátor) történt. Az alapnyomás $5x10^{-5}$ Pa volt. Nagytisztaságú (4N5) N_2 gáz 20 cm^3min^{-1} (STP) áramlási sebességgel, $3x10^{-1}$ Pa nyomással 75 W teljesítménnyel került alkalmazásra, 30 kV gyorsítófeszültség, $4x10^{17}$ cm^{-2} felületi részecskedózis és $3x10^{13}$ $cm^{-2}s^{-1}$ felületi dózisteljesítmény beállítása mellett. E paraméterek beállítását korábbi felületmódosítási előkísérletek eredményei indokolták.

A felület összetételének meghatározása XPS módszerrel történt, Kratos XSAM800-as berendezéssel, MgK$\alpha_{1,2}$ sugárzás és rögzített analizátor-transzmisszió alkalmazásával (80 eV az áttekintő és 40 eV a részletes spektrumok esetén). A spektrumok referálása a szénhidrogén típusú szén C 1s vonalára (kötési energia, BE=285,0 eV) történt.
Az adatok gyűjtését és feldolgozását a Kratos Vision 2 program végezte.
A felületi energiaviszonyok változásának meghatározása peremszögméréssel történt, SEE System (Advex Instruments, Cseh Köztársaság) típusú berendezéssel, ún. statikus ülőcsepp módszerrel, kétszer desztillált vízzel, 23 °C-on. A 2 µl-es cseppek Hamilton fecskendővel lettek feljuttatva a próbatestek felületére. Minden egyes mérési eredmény 5 db, száraz felületre felvitt független mérés átlagának az eredménye.

A tribológiai mérésekhez a 3. és 4. fejezetekben is (*4.5. ábra*) ismertetett, a SZIE Gépipari Technológiai Intézetben kifejlesztett dinamikus triboteszter hagyományos pin-on-disc (PoD) modulját használtam. A mérési rendszer megtervezése, kiépítése és a mérések végrehajtása valamint a megfogalmazott tribológiai következtetések a német DIN50322 szabvány **[DIN 50322, 1986]** VI. kopás vizsgálati kategória ajánlásai szerint történtek. Az 5.1. ábrán látható a PETP vizsgálat vázlata.



5.1. ábra. Pin-on-disc mérés elrendezése NPIII kezelt és natúr próbatestekhez (R = 40 mm)

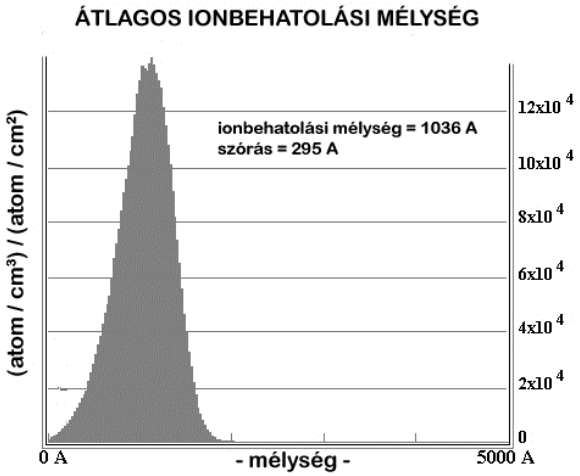
A kenéses összehasonlító vizsgálatoknál desztillált vizet juttattam cseppszerűen az érintkezési zónába, a csepp térfogata 10 µl, a csepegtetés frekvenciája 2 min^{-1} volt. A próbatestben az érintkezési zónához közel, 1 mm távolságban került rögzítésre hőelemes méréssel a kontaktzóna közeli hőmérséklet. A tárcsa anyaga St235 szerkezeti acél, köszörült felülettel, R_a=0,07-0,1 µm.

A vizsgálatok során rögzített normál terhelés és csúszási sebesség mellett F_x és F_y súrlódó erő komponensek mérése történt, ebből az eredő F_s majd a rendszerre jellemző súrlódási tényező (μ) került kiszámításra. A pin-on-disc mérési rendszer jellemzője az indirekt kopásmérés „d", mely tartalmazza a próbatestek deformációját is. Az összehasonlító pin-on-disc mérési rendszerben a folyamatos kopásmérésre a próbatest befogó fej tárcsa irányába történő függőleges elmozdulásának mérése szolgál. Így a mért érték mm-ben kifejezve tartalmazza a kopást, valamint a normál terhelés hatására bekövetkező próbatest deformációt.
Ez utóbbi tényező a reprodukálható pin-on-disc mérési rendszerben minden próbatest esetén bekövetkezik feltételezhetően azonos mértékben, így e hatást el lehet hanyagolni abban a tudatban, hogy a mérési diagramokban feltüntetett „d" kopás függvények nem a kontaktzóna elfogyás abszolút méret értékeit jelentik, hanem egy állandó deformációs értékkel meghaladják azt. A továbbiakban a „d" függőleges méretváltozás kifejezésére a „kopás" szót használom annak tudatában, hogy a tényleges kopás csak egy része a mért „d" értéknek.

5.2.2. Eredmények

5.2.2.1. Felület és rétegstruktúra jellemzése

Az XPS mérések tanúsága szerint a NPIII-kezelés eredményeként erősen megváltozik a PETP felületi összetétele és az elemek kötésmódja **[Kereszturi K. et.al. 2008]**, amelyet a jelen kutatás is igazolt. Az elemösszetétel megváltozott C 72,3%-ról (elméleti C 71,4%) O 27,7 %-ról (elméleti: O 28,6% a kezeletlen mintán) C 66,7%-ra, O 18,2%-ra és N 15,1%-ra. Ezenkívül a C 1s csúcs ún. plazmonveszteségi energiája *Ep* 21,7-ről 23,7 eV-ra növekedett a kezelés hatására. Ezek az eredmények NPIII-val kezelt PETP esetén amorf hidrogénezett szén-nitrid **[Barreca F. et.al. 2000]** típusú felületi réteg kialakulására utalnak. A kezeletlen PETP felületen a víz peremszöge 80,4º volt, míg PIII-val kezelt felületen 74,6º, jelezve a növekedést a felületi nedvesedésben és a felületi energiában. A kialakult PETP felületi réteg vastagságának alakulásáról 30 keV N ionok alkalmazása esetén, korábbi SRIM számítás alapján **[Tóth A. 2009]** az *5.2. ábra* tájékoztat, ahol a N ionok átlagos behatolási mélységét illetve annak mélységi eloszlását lehet látni. A függőleges tengelyen a dimenzió a nitrogén-koncentrációt mutatja egy adott mélységben, a felületegységre eső részecskedózisra viszonyítva.

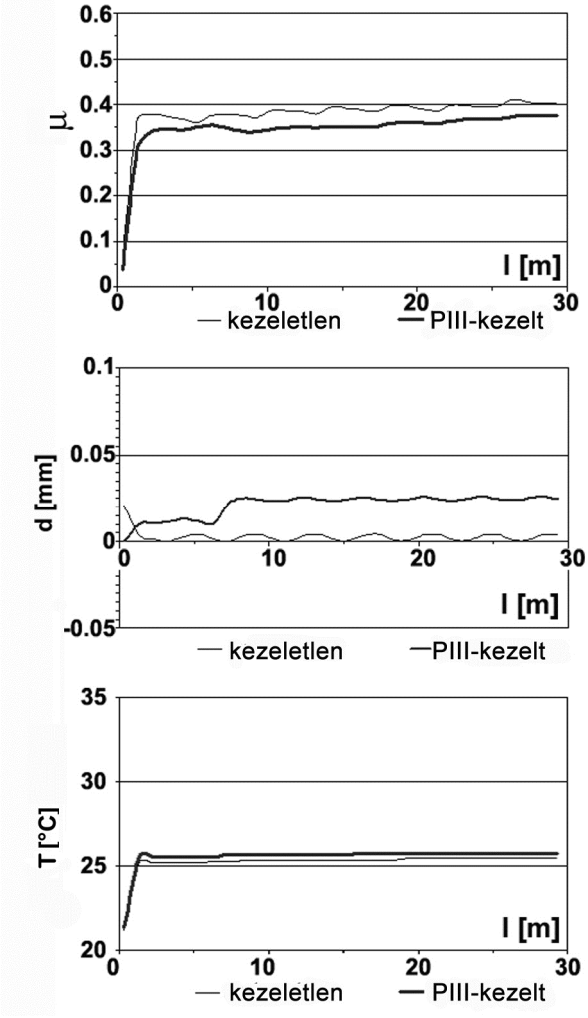


5.2. ábra. 30 keV energiájú N ionok behatolási mélységének eloszlása PET-ben **[Tóth A. 2009]**

5.2.2.2. Pin-on-disc tribológiai vizsgálatok száraz körülmények között

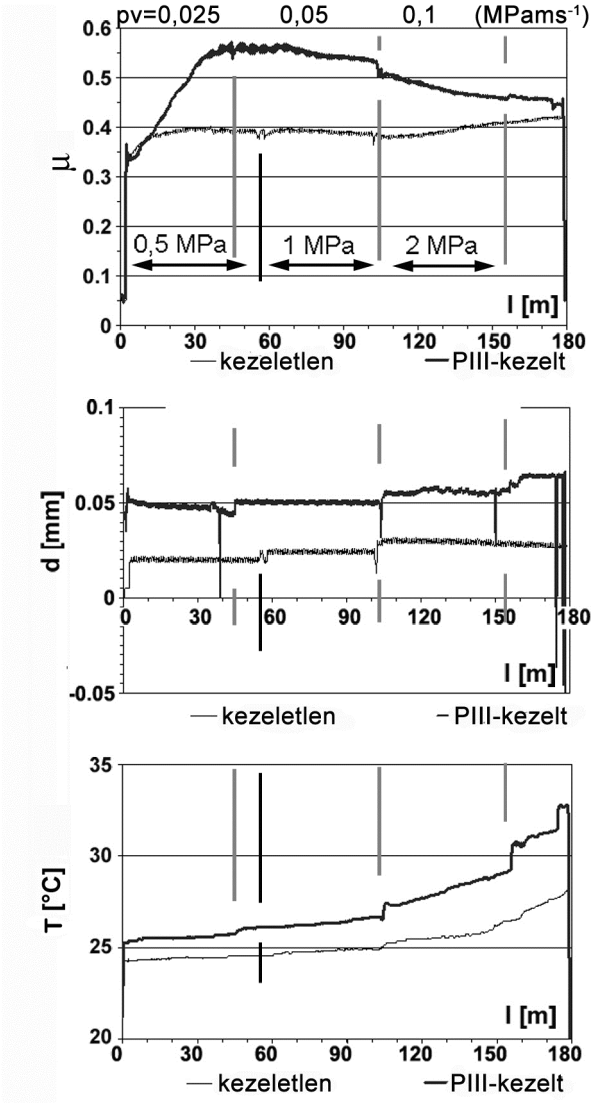
Először a súrlódási folyamat korai szakaszában (a bejáratási és a stabil elején) végeztem méréseket, száraz és tiszta körülmények között, mely az adhéziós felületi folyamatok által erősen befolyásolt súrlódás és kopás feltérképezését jelenti (továbbiakban e feltételrendszert „adhéziós" tribológiai rendszer rövidítéssel jellemzem). A PIII kezelt és kezeletlen próbatestekkel végzett mérések eredményeit a folyamatok összehasonlíthatósága érdekében közös diagramok szemléltetik.

A mérésekhez több feltételrendszert is meghatároztam annak a mérnöki gyakorlatnak a tükrében, hogy hosszú élettartamú siklócsapágyak olyan klasszikus anyaga a PETP, mely nem reagál a környező közeg nedvességtartalmára, a natúr PETP adhéziós kopási ellenállása acél felületen közismerten kiváló, így kis *„pv"* értékek esetén karbantartásmentes műszaki megoldások súrlódó anyaga. Elterjedten használatos pl. az irodatechnikában, a finom-mechanikában, mechatronikában. Így a kezdeti vizsgálati rendszerek jellemzője a kis csúszási sebesség (v=0,025 m s^{-1}) és kis nyomás (p=0,3 MPa), amely nagyon kis *pv*-tényezőt (0,0075 MPa·ms^{-1}) eredményezett. Az *5.3. ábra* mutatja a mérési eredményeket beleértve a súrlódási tényező „**μ"** alakulását, a „**d**" kopást, a próbatest kontaktzóna közeli hőmérsékletét „**t"** a súrlódási úthossz függvényében „**l"**.



5.3. ábra. Mért tribológiai jellemzők PIII kezelt és kezeletlen PETP esetén, száraz csúszás acél felületen. (p=0,3 MPa, v=0,025 ms^{-1})

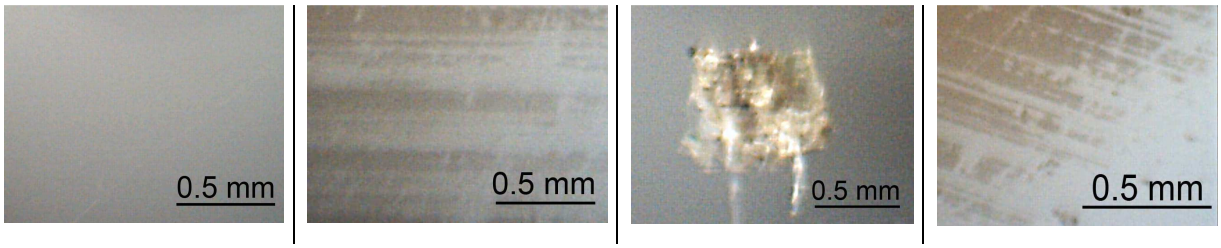
Látható, hogy **μ** alacsonyabb szinten stabilizálódott a PIII-val kezelt felületen a kezeletlenhez képest. A kezeletlen mintán a deformáció és kopás együttes értéke szinte elhanyagolható. (A megfigyelt hullámzás a mérőrendszer mechanikai rezgéseinek tudható be.) Azonban határozott deformáció és kopás érzékelhető a PIII-val kezelt mintán, amely magyarázható a rugalmassági modulus korábban tapasztalt **[Kereszturi K. et.al. 2008]** csökkenésével, $E_0 = 3{,}56 \pm 0{,}11\,\mathrm{GPa}$ -ról $E_{tr} = 2{,}88 \pm 0{,}16\,\mathrm{GPa}$ - ra csökkent a PIII kezelt felületi rétegénél. Az érintkezési felület közelében a hőmérséklet kissé magasabb volt a PIII-kezelésű mintánál. Tekintettel a csökkent súrlódásra, ez a jelenség a felületi bevonatok és rétegek rosszabb hővezető képességével, hőreflexiós hatásával magyarázható **[Zsidai L. 2005]**.



5.4. ábra. Mért tribológiai jellemzők PIII kezelt és kezeletlen PETP esetén, száraz acél felületen, három terhelés szinten. (p=0,5; 1 és 2 MPa, csúszási sebesség v=0,05 ms^{-1})

Az *5.4. ábra* szemlélteti a nagyobb csúszási sebesség (v=0,05 m s^{-1}) mellett végzett tribológiai vizsgálatok eredményeit és a lépcsőzetesen növelt nyomás (p=0,5 MPa-ról 1 és 2 MPa-ra) hatását.

A nyomás és csúszási sebesség így megfelel 0,025, 0,05 és 0,1 MPa·ms^{-1} *pv* értékeknek. A kezeletlen mintánál látható, hogy a **μ** a bejáratási szakasz után, már kb. 20 m csúszási után 0,4 alatti értéken stabilizálódott 0,5 MPa nyomásnál. 1 MPa-nál sem tapasztalható változás, míg a nyomás 2 MPa-ra növelése a súrlódás enyhe emelkedését okozza. A mért **d** fokozatosan növekedett, követve a nyomás fokozatos növelését. A minták hőmérséklete a vizsgálat során növekedett, különösen a vizsgálat végén a 0,1 MPa·ms^{-1} *pv* érték szinten.

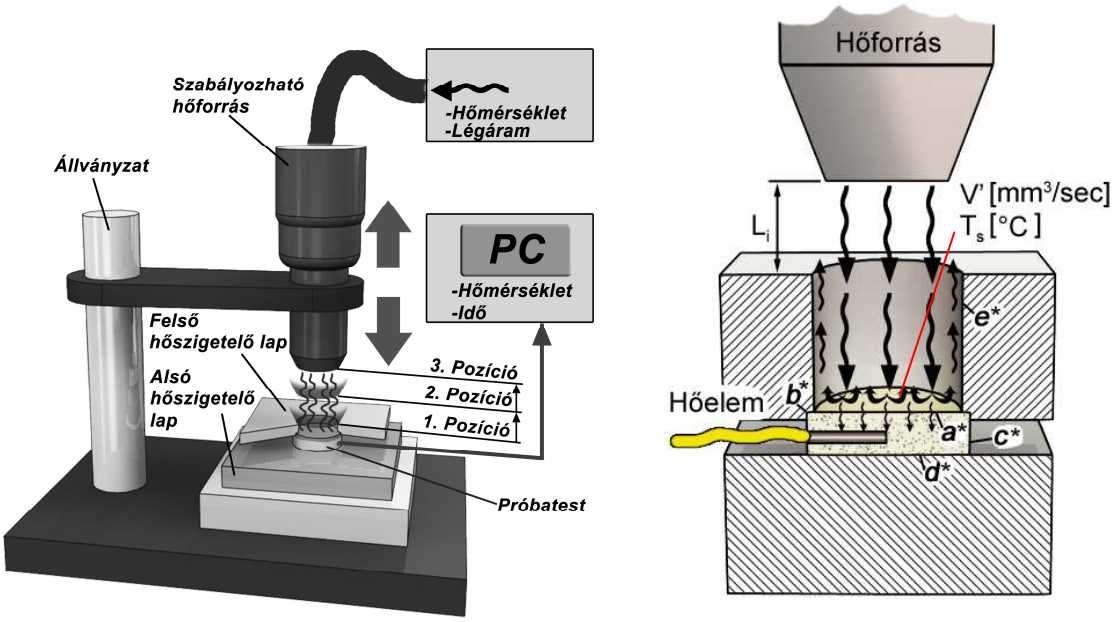


a) b) c) d)

5.5. ábra NPIII kezelt PETP felülete
a) kezelt felület kopás előtt, b) csúszási irányban felszakadó réteg, c) re-adhézió megjelenése, d) nagymértékű adhéziósan felszakított területek, ahol a fehér zóna a kezelt felületi réteg alatti fehér alapanyag megjelenése

A PIII-val kezelt PETP száraz csúszási viselkedése jelentősen különbözött a kezeletlen PETP-től (*5.4. ábra*). A **μ** nagymértékben növekedett 0,5 MPa-alatti nyomásnál. A bejáratási szakasz után egy másodlagos növekedés (telítődési jelleggörbe alakú) tapasztalható a súrlódásban, mely 0,57-es értéket ért el. A nyomás 1 MPa-ra történt növelésénél súrlódási instabilitás, az acéltárcsán adhéziós letapadások – transzfer réteg – volt tapasztalható akusztikus zaj kíséretében, utalva a módosított réteg adhéziós kopási folyamatára. 2 MPa terhelésen a kezelt minta **μ** -értéke már csökkent és megközelítette a kezeletlen minta értékét, mely a felületi réteg lekopásával összhangban kialakuló dinamikus egyensúlyi állapotra – adhézió, re-adhézió – utal (*5.5/c* és *5.5/d ábra*). A kezelt minták **d** értékei nagyobbnak bizonyultak, mint a kezeletlen minta **d** értékei. Ez ismét magyarázható a PIII-val kezelt minta rugalmassági modulusának korábban tapasztalt **[Kereszturi K. et.al. 2008]** csökkenésével. 2 MPa felületi nyomásnál a **d** változása szintén utal a módosított réteg folyamatos kopására, különösen a vizsgálat végén. A kontaktzóna közeli hőmérséklet a PIII-kezelésű próbatesten továbbra is meghaladta a kezeletlen mintánál kapott hőmérsékletet a teljes vizsgálat során. A hőmérséklet különbség kb. 1 °C volt a mérés első szakaszában, ami fokozatosan kb. 5 °C-ra emelkedett a vizsgálat végére. A csökkenő súrlódási tényező melletti folyamatos hőmérséklet növekedés ismét felveti a szakirodalmakban tárgyalt rétegszerkezetek hőáram korlátozó vagy reflexiós hatását, ezért ennek kimutatására kísérleteket végeztem az *5.6. ábra* szerint. A kezelt és kezeletlen natúr próbatestek egy 10 mm vastag POM-C hőszigetelő lemez ∅9 mm furatán keresztül 100 ºC induló hőmérsékletű hőlégsugárral (tip. CIF 852), szabályozott térfogatárammal (F51), két beállítási magasságból (L_2= 8 mm és L_3 = 20 mm a szigetelő lap felső síkjától) melegítésre kerültek, mely a felületen Ts hőmérsékletet eredményezett (*5.6/b ábra*). A szabályozott hőlégfúvó fúvókája egy Mitutoyo mérőasztal (tip. 178-039) precíziós állványán, míg a próbatest a POM C szigetelő lemezzel a gránitasztal bázisfelületére helyezett 15 mm vastag PA66-GF30 szigetelő bázison került rögzítésre. A 2 mm vastag próbatestek a

felső hőszigetelő lap alján egy 0,3 mm mélységű fészekben kerültek központosításra a 9 mm átmérőjű, hőlégsugarat bevezető furathoz képest. A próbatestek magasságának közepén elhelyezett ∅0,8 mm furatban került rögzítésre a K-típusú hőelem, amely a próbatest hőmérsékletét mérte a középpontban, jó közelítéssel jellemezve a próbatest mindenkori átlaghőmérsékletét.



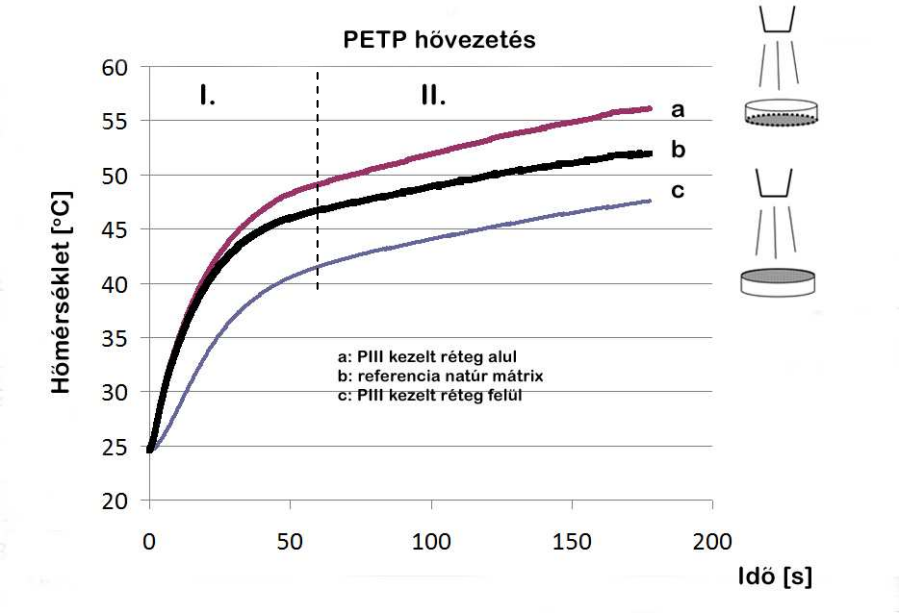
a) b)

5.6. ábra. PIII réteg hőáram korlátozó hatásának mérési elrendezése

Az L_2 és L_3 magassági beállítással, háromszori ismétléssel, a próbatestben kialakuló hőmérsékleti függvény került rögzítésre úgy, hogy a PIII réteg egyszer felül, azaz hőlégsugár előtt volt („c” jelű görbék a továbbiakban), majd másodsorban alul („a” jelű görbék a továbbiakban), a hőlégsugárral ellentétes oldalon. Ehhez jön referencia mérésként a kezeletlen próbatesttel végzett mérés adatsora („b” jelű görbék a továbbiakban). Az ismételt hőmérsékleti függvények egy-egy jellegzetes mintája az *5.7* (L_3=20 mm magasságból, lassabb melegítés) és *5.8. ábrán* (L_2=8 mm magasságból, intenzív melegítés) láthatók.

Az *5.8. ábra* szerint a lassú melegítésű (L_3) vizsgálati rendszerben kb. 60-70 s időtartamig – I. szakasz – követi a próbatest mért hőmérséklete az elméleti telítődési görbét. E szakaszon a környezeti hatások még elhanyagolhatók. A továbbiakban a hőszigetelő maszk oldalán és a próbatestnek kialakított fészekben történő érintkezésnél olyan plusz hőcsere indul meg, amely a telítődési hőmérséklet helyett egy folytonos, közel lineáris további növekedést eredményez – II. szakasz –. Még az első szakaszban felismerhető az az időpont (az *5.7. ábrán* 20-25 s

környékén), amikor az „a” görbe hőmérséklete meghaladja a referencia próbatest hőmérsékletét a PIII kezelt réteg hőáram korlátozó hatása miatt, mikor a próbatestben telítődő hő alsó felületen történő leadása gátolt.



5.7. ábra. PETP próbatestek közepén mért hőmérsékletek lassú melegítés (L_3) esetén

E vizsgálatból is látszik, hogy főleg a „c” elrendezésnél, a PIII kezelt réteg hőáram korlátozó hatása jelentős. A PIII kezelt réteg hőtranszport folyamatokat befolyásoló szerepe a kvázi-adiabatikusnak tekinthető, gyors melegítésű feltételrendszer mellett vizsgálható pontosabban. Ezért változatlan hőmérsékleti és hőlégsugár beállítás mellett, L_2 távolságról történt további mérés 60 s időtartományon belül *(5.8. ábra)*.

Az *5.8. ábra* tanúsága szerint az L_2 távolságról intenzíven melegített próbatesteknél az PIII kezelt réteg hőáram korlátozó hatása jól érzékelhető. A „b” referencia görbéhez képest – natúr PETP próbatest – kevésbé melegedett a kezelt próbatest („c” görbe), ha a réteg felül volt. Ennek oka lehet a réteg rosszabb hővezető képessége és nagyobb reflexiós képessége.

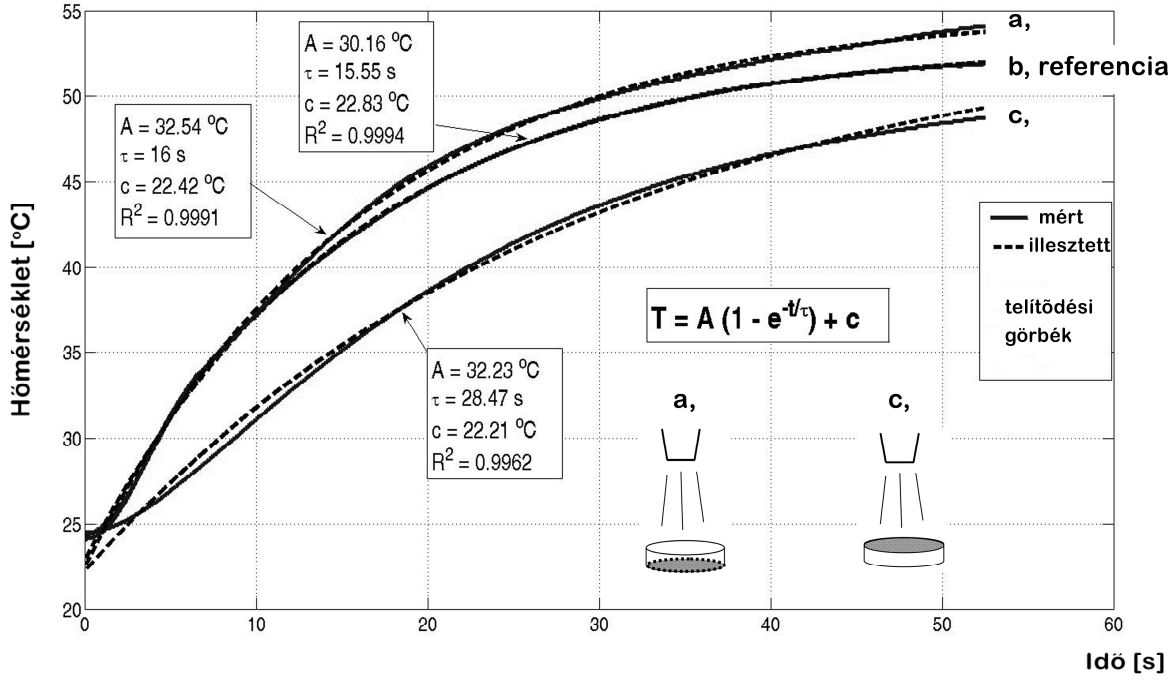
A próbatest és a hőlégsugár kölcsönhatásában elméletileg három jelenség játszódhat le: reflexió, transzmisszió és abszorpció **[Farkas I. 1999]**. Jelen esetben – kvázi-adiabatikus mérést feltételezve – a transzmisszió elhanyagolható, a nem ismert mértékű reflexiót pedig együtt kezelem a továbbiakban a hő abszorpciójával. Így számszerűsíthető a réteg tényleges hőáram korlátozó hatása egy „látszólagos hővezetési tényezővel”, mely a reflexiós hatást is magában foglalja. A módosított polimer és egyéb felületi rétegek reflexiós jelensége ismert, kiemelten kutatott a szolár- és reflektív üveg technikában, csomagoló és biztonsági fóliák terén, optikai eszközöknél **[Fraidenraich N. et.al. 2000, Arnaud A. 2007].** Meghatározása

igen összetett és bonyolult, függ a sugárzási spektrumtól, az alapanyag és a felületi réteg összetételétől, a rétegvastagságtól stb. **[Farkas I. 1999, Lievens 1995]**. Ezért a PIII réteg hőáram korlátozó hatásának számszerű bemutatására legegyszerűbben a szorpciós jelenségek energetikai és hőtani egyenletei használhatók annak a tudatában, hogy a hőreflexió ismeretlen %-ban része a PIII kezelt próbatestek felületi hőáramkorlátozó hatásának, és így egy látszólagos lineáris hővezetési tényező határozható meg a továbbiakban a hőszorpciós egyenletekkel.

A hőáram korlátozó jelenség kettős formában is jelentkezik az *5.8. ábrán*, mert amikor a PIII réteg alul helyezkedett el, a belső anyagmátrixon átvitt hő szigetelő hatásba ütközik, amely megemeli a próbatest hőmérsékletét a natúr mintához képest. E jelenség 10-12 s után következett be, mikor az „a” görbe meghaladja a „b” referenciát. A három mérési eset jó korrelációval követi az elméleti telítődési függvényt [**Farkas I. 2005**],

$$T = A(1-e^{\frac{-t}{\tau}})+c \qquad (5.1)$$

csak az együtthatóik térnek el *(5.8. ábra).*



5.8. ábra. PETP próbatestek közepén mért hőmérsékletek, gyors melegítés (a- L1 távolság, b- L2 távolság)

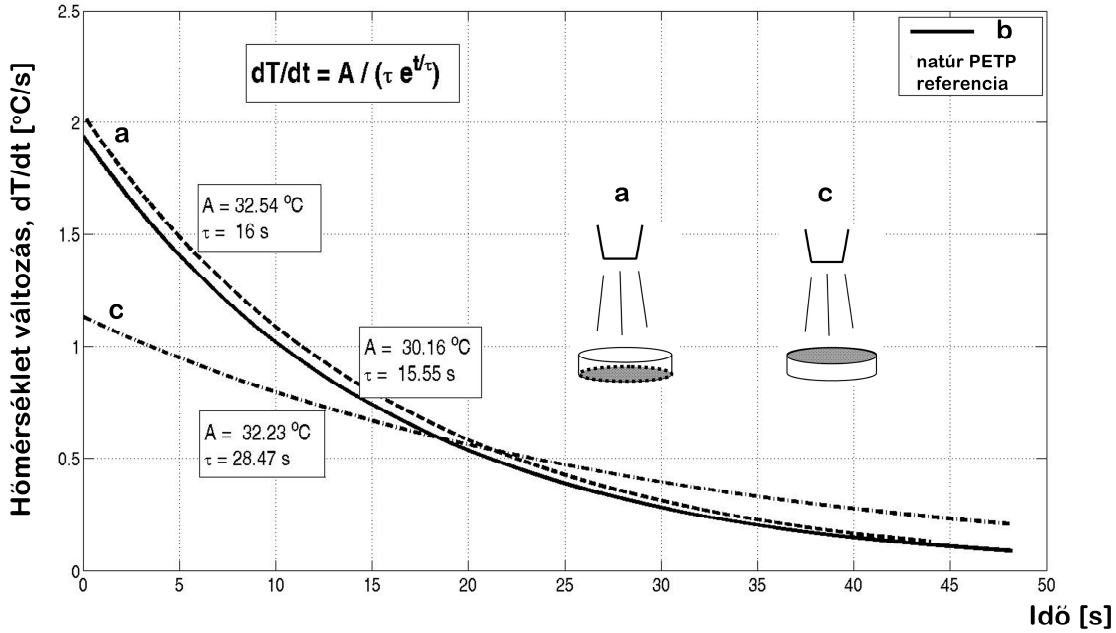
Az abszolút hőmérsékleti görbék ismeretében, a tribológiai jelenségeket befolyásoló szerep megítélése szempontjából fontos a melegedés változásának a részletes ismerete, egy adott

időponthoz tartozó melegedési intenzitás összehasonlítása a PIII kezelt és kezeletlen próbatestek esetén. Az *5.8. ábra* illesztett függvényeinek idő szerinti deriválása (*5.9. ábra*) megadja az egyes mérési beállításokhoz (a, b, c) tartozó melegedési sebesség alakulását az idő függvényében,

$$\frac{dT}{dt} = \frac{A}{\tau e^{\frac{t}{\tau}}} \tag{5.2}$$

alakban.

Az 5.9. ábrából megállapítható, hogy amikor a hőlégsugár az alapmátrix felületet éri (natúr próbatest „b” görbe, és PIII réteg alsó pozícióban „a” görbe), a hőmérséklet-változás sebessége közel azonos. Az alsó PIII felület gátló hatása miatt az „a” görbe nagyobb meredekségi értékről indul, de 40-45 s után a változás sebessége 0,25 ºC/s értéknél már megegyezik. A „c” görbe jól mutatja a felülről gátolt melegedés lassabb változását. A referencia natúr próbatesthez képest kb. 60%-os sebességváltozásról indul, és az időben elnyújtott folyamat miatt valamivel magasabb értéken zárta a mérést.



5.9. PETP próbatestek melegedési sebességének változása

Az elvégzett mérések lehetővé teszik a modell (*5.6/b ábra*) pontosabb hőtani elemzését. A rövid idejű, gyors melegítésnél kapott hőmérséklet-növekedési függvények (*5.8. ábra*) az *5.6/b ábra* szerinti a*, c* és d* felületeken végbemenő hőátszármaztatás eredője, a b* és e*

felületek hatása elhanyagolható. A rendszerre felírható az energia-egyensúlyi differenciálegyenlet **[Isermann R. 2005]:**

$$\dot{E}_i(t) - \dot{E}_o(t) = \frac{dE_t}{dt}(t) \quad \text{azaz} \quad c \cdot m \cdot \dot{T}(t) = Q_{a*}(t) - Q_{c*}(t) - Q_{d*}(t) \tag{5.3}$$

ahol: E_i energia bemenet, E_o energia kimenet, E_t tárolt energia.

Az a* és c* felületeken konvekció, míg a d* felületen kondukció valósul meg. Az 5.3. egyenletet kifejtve, a próbatest közepén mért hőmérsékletre az alábbi differenciálegyenlet felírható:

$$c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} = \kappa_a \cdot A_a (T_S - T) - \kappa_c \cdot A_c (T - T_o) - \frac{\lambda_d}{\delta_d} \cdot A_d (T - T_o) \tag{5.4}$$

ahol: κ- az adott felület hőátszármaztatási tényezője,
c- a próbatest fajhője,
m- a tömeg.

Az egyenlet numerikus integrálásával meghatározható az egyes próbatestek hőátszármaztatása, illetve a PIII réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezője. A modell-számítások Matlab program segítségével történtek. Első lépésben a bevonat nélküli natúr PETP próbatestekre végeztem el a modell-indentifikációt.

Az 5.4. egyenlet jobb oldalán, az utolsó tagnál – mely a próbatest alatti szigetelő lap felé történő hőátadást jellemzi – minden ismert a PA66-GF30 szigetelő anyagra vonatkozóan: λ_d=0,24 W/mK, δ_d=15 mm, A_d=78,5 mm^2 T_o = 23 ºC. A jobb oldal középső tagja a próbatest levegővel érintkező palástfelületén keletkező szabad konvekciót jelenti, ahol κ_c hőátszármaztatási tényező a konvekciós tényező jelen esetben. Értéke hőtani táblázatok szerint, szabad konvekcióra 20 W/m^{2}K. A palástfelület A_c=53,38 mm^2.

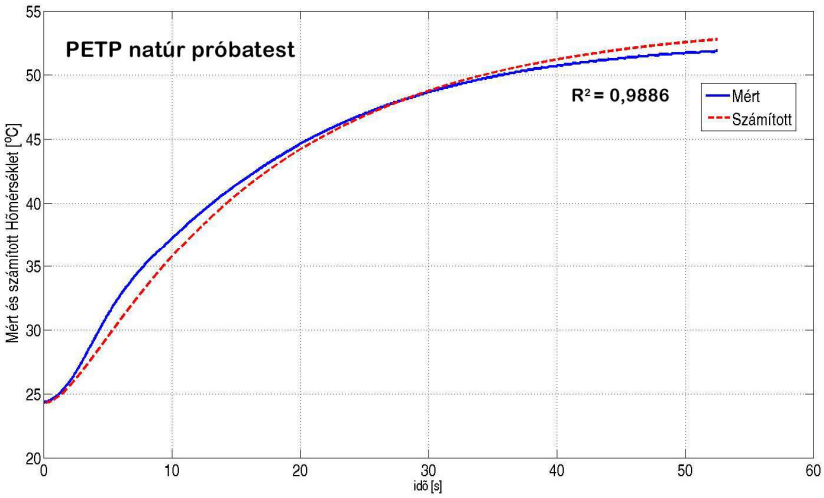
A natúr próbatestet úgy tekintve, mintha saját anyagából lenne egy virtuális felületi rétege a PIII kezelt réteggel megegyező vastagságában, a κ_a hőátszármaztatási tényezőre felírható:

$$\kappa_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta}{\lambda_{PETP}}} \tag{5.5}$$

A natúr PETP saját anyagából vett virtuális rétegvastagsága δ=103,6 nm (megegyezően a PIII kezelt réteggel), a lineáris hővezetési tényező λ_{PETP}=0,28 W/mK, illetve a mért T_s=61,2 ºC.

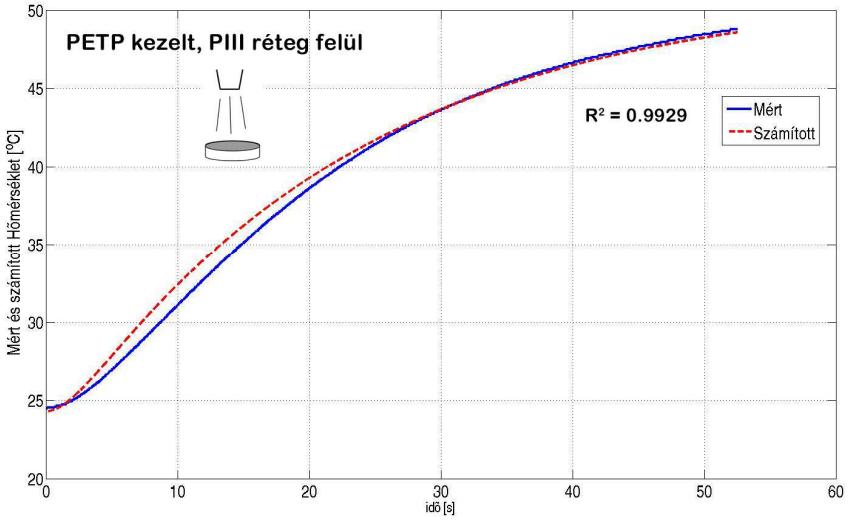
Az 5.5. egyenletet behelyettesítve az 5.4. egyenletbe, egy ismeretlen marad, a kísérleti rendszerben a próbatest felületét jellemző kényszer-konvekciós tényező, α_a. A modell-

identifikációt elvégezve megállapítható, hogy a referencia PETP próbatestre mért melegedési görbe (*5.8. ábra „b" referencia mérés*), és a modell által számított görbe jó egyezést mutat (*5.10. ábra*).



5.10. ábra. Natúr PETP próbatest mért és hőtani modellel számított hőmérséklet változása, modell identifikáció.

A számított α_a konvekciós tényező értéke 150,0665 W/m^{2}K, illetve a κ_a=150,0582 W/m^{2}K. Ezt felhasználva a PIII bevonatos próbatest esetén – behelyettesítve az 5.5 összefüggésbe – egy ismeretlen marad, a λ_{PIII}, azaz a felületi réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezője.
A modellszámítást elvégezve a kezelt próbatestre (*5.11. ábra*) $\lambda_{PIII\text{-}PETP}$=3,0508·10^{-5} W/mK, így a kezelt réteg oldaláról melegített PETP próbatest esetén a hőátszármaztatási tényező κ=99,408 W/m^{2}K. A hőtani modell számítási eredményeit *az 5.1. táblázat* foglalja össze.



5.11. ábra. Kezelt PETP próbatest mért és hőtani modellel számított hőmérséklet változása.

5.1. táblázat. Referencia és számított hőtani értékek a modellben

	Natúr PETP	PIII kezelt PETP, réteg a hőforrás felőli oldalon	Eltérés
Hőátszármaztatás κ [W/m^{2}K]	150,058	99,408	- 33,75%
Látszólagos lineáris hővezetési tényező, λ [W/mK]	0,28	$3{,}0508 \cdot 10^{-5}$ a PIII kezelt rétegre vonatkozóan	- 99,989%

A táblázatból megállapítható, hogy a PIII kezelés hatására létrejövő felületi réteg több, mint 30%-kal csökkentette a hőátszármaztatást, melynek oka, hogy a kezelt réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezője (tartalmazza a hő-reflexió hatását is) több nagyságrenddel kisebb (a modell rendszerben legalább négy nagyságrenddel), mint a natúr PETP-nek.

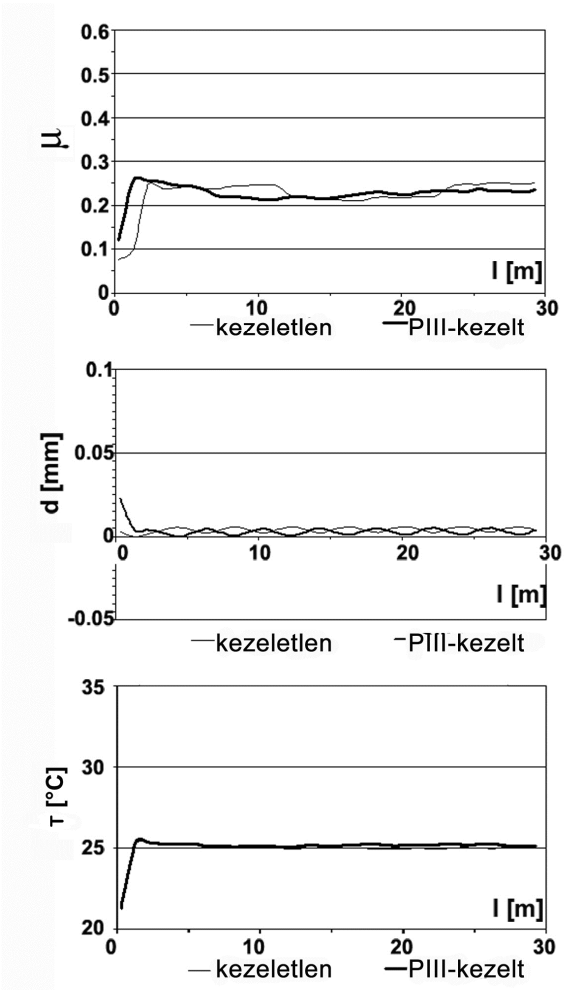
A PIII kezelt PETP felületi réteg hőáram korlátozó hatása a kísérleteknél mindkét elrendezési módban érvényesült. A külső hőforrásnak kitett réteg alatt a melegedés elmaradt a natúr próbatest hőmérsékletétől. Ellentétes elrendezés esetén pedig visszatartotta a hőt a próbatestben, gátolva a hővezetést az alsó szigetelő lap irányában, mely a natúr próbatesthez képest magasabb hőmérsékletet eredményezett a súrlódási mérések során (*5.8. ábra*).

A leírtak tükrében az *5.4. ábra* tribológiai hőmérsékleti görbéi már jobban értelmezhetők. Az I. terhelési szakaszban kis *pv* szinten a kontaktzóna közeli hőmérséklet alig változik a natúr próbatestnél és a súrlódási tényezője is stabilizálódik. Ellenben a kezelt próbatestnél a súrlódási ellenállás jelentősen növekszik a kontaktzónában, de a belül mért hőmérséklet a réteg hőáram korlátozó hatása miatt enyhén emelkedik csak. Így a keletkezett hő nagy része az ellen-fémfelület felé áramlik a kontaktzónából. A második szakaszban duplájára emelve a normál terhelést, a natúr próbatest súrlódása továbbra is stabil, a hőmérséklete a kontakt zónától 1 mm-es mélységben enyhén emelkedik. A PIII kezelt próbatestnél a súrlódás eléri maximumát, majd csökkenni kezd, ennek ellenére a hőmérséklet tovább emelkedik a próbatestben a réteg alatt, mivel az anyag deformációs munkájából keletkező hő a kontaktzóna felé korlátozottan jut csak el a réteg miatt. A harmadik terhelési szinten, tovább duplázva a normál terhelést, intenzív belső hőfejlődés és hő visszatartás mérhető a kezelt próbatestnél annak ellenére, hogy a súrlódási tényező csökken. A natúr próbatest pedig követi a polimertribológia feltárt törvényszerűségeit **[Yamaguchi Y. 1990, Zsidai et.al. 2004]**: enyhén emelkedő súrlódási tényező mellett arányosan növekszik a mérhető hőmérséklet is.

Tovább vizsgálva az *5.4. ábra* eredményeit a szakirodalom tükrében, a kezelt PETP próbatestek magasabb súrlódási eredményei a kontaktzóna adhéziós hajlamával magyarázhatók. A súrlódás adhéziós elmélete szerint **[Bowden F. P. et.al 1954, Yamaguchi Y. 1990]** a száraz súrlódási erő F_f egyenlő a tényleges érintkezési területen, a mikrogeometriában ébredő adhéziós és deformációs komponensek összegével, azaz $F_f=F_a+F_d$. Kis terhelésnél a deformációs összetevő nagyságrenddel kisebb lehet, mint az adhéziós összetevő ($F_a>>F_d$) ami ebben a tartományban az $F_f\approx F_a$ összefüggéshez vezet. A pin-on-disc mérési rendszer is ebben a tartományban működött a beállított kis *pv*-körülményekkel (0,1 $MPa\cdot ms^{-1}$-ig). A *5.4. ábrán* szemléltetett eredmények arra utalnak, hogy a súrlódás adhéziós komponense sokkal erősebb a nitrogén PIII kezelésű PETP mintánál megemelve a súrlódási ellenállást, mint a natúr PETP-nél. Ez összhangban van a csepp-próbával meghatározott nagyobb felületi energiával, de nincs ellentmondásban azzal a korábbi, már publikált megfigyeléssel, amely szerint a mikroabráziós kopásellenállás (kopásállóság) jelentősen növekedett **[Kereszturi K. et.al. 2008]** a nitrogén PIII-kezelés után, mivel az egy teljesen más tribológiai jellemző mérésére irányult, egy teljesen más vizsgálati rendszerben (scratch-test).

5.2.2.3. Pin-on-disc tribológiai vizsgálatok vízkenésű körülmények között

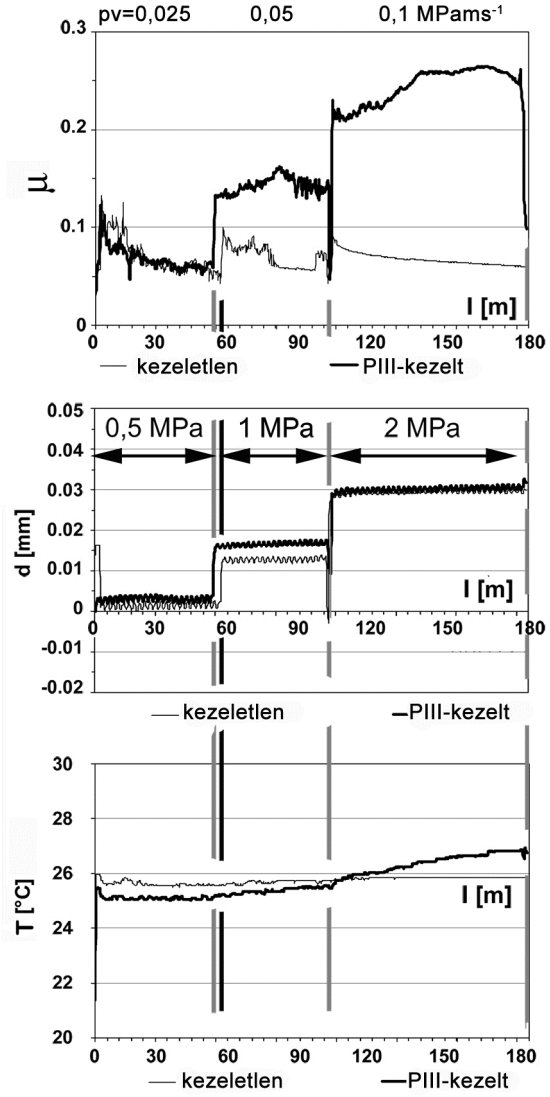
A *5.3.* és *5.4. ábrán* szemléltetett száraz tribológiai vizsgálatokat megismételtem a súrlódási nyomban a próbatest elé automatikusan csepegtetett desztillált víz kenéssel is. A *5.12.* és *5.13. ábra* mutatja a mért eredményeket. Az alkalmazott geometriák és csúszási körülmények következtében vegyes kenési állapot várható a vízkenésű vizsgálatoknál. Vízkenésnél és nagyon kis *pv*-tényezőnél (*5.12. ábra*) a **μ** és a **t** csökkenése látható mind a kezeletlen mind a kezelt mintáknál, összehasonlítva a száraz csúszással (*5.3. ábra*). A deformáció és kopás hiánya észlelhető az *5.12. ábra* középső részén. Gyakorlatilag a **μ**, **d** és **t** értékek között különbség nem figyelhető meg a kezeletlen és a PIII-val kezelt minta összehasonlítása kapcsán vízkenés és nagyon kis *pv* érték esetén.



5.12. ábra. Mért tribológiai jellemzők PIII kezelt és kezeletlen PETP esetén, vízkenés mellett acél felületen. (p=0,3 MPa, v=0,025 ms^{-1})

Az *5.13. ábra* szemlélteti a vízkenésű, de nagyobb *pv*-tényezőjű eredményeket. Az *5.13.* és *5.4. ábra* eredményeinek összehasonlítása azt mutatja, hogy amint várható a **μ**, **d** és **t** jelentősen kisebb vízkenésnél, mint száraz körülmények között mind a kezeletlen, mind a kezelt mintáknál. Figyelemre méltó különbségek mutatkoznak a görbék trendjeinél.

A *5.13. ábrán* látható, hogy 0,5 MPa nyomásnál a kent **μ** értékei szignifikánsan nem térnek el, míg a száraz siklás esetén (*5.4. ábra*) határozott különbség tapasztalható. A nyomás 1 és 2 MPa-ra történő növelésekor a kent **μ** 0,1 alatt maradt a kezeletlen PETP-esetén, míg a PIII-val kezelt PETP-nél – a kezelés hatására megnövekedett nedvesítő képesség ellenére – a kent **μ** nagymértékben növekedett. A **d** görbéi jellemezve a deformációt meg a kopást, egymáshoz közeli eredményeket mutatnak vízkenésű körülmények között. Ez száraz csúszás esetén szintén jelentősen más trendet mutatott (*5.4. ábra*).



5.13. ábra. Mért tribológiai jellemzők PIII kezelt és kezeletlen PETP esetén, vízkenés alkalmazásával, acél felületen. (p=0,5, 1 és 2 MPa, v=0.05 ms^{-1})

A kent súrlódási rendszer összetettségére utal, hogy a kontaktzóna közeli hőmérséklet mérési eredményei kis nyomásnál (0,5 és 1 MPa) alacsonyabbak voltak a kezelt mintánál, de 2 MPa nyomáson már fordult a trend a kezeletlen minta javára.

Figyelembe véve a száraz és kent mérési eredményeket látható, hogy a nagyobb *pv* szinten (közel 0,1 MPa·ms^{-1}) regisztrált tribológiai viselkedés hasonlóságot mutat. Magasabb súrlódási tényezők és magasabb próbatest hőmérsékletek figyelhetők meg a kezelt mintánál, utalva a súrlódás adhéziós tényezőjére, mely jelentősen nagyobb a nitrogén PIII-kezelt PETP-nél, mint a natúr PETP-nél.

A súrlódás megnövekedett adhéziós komponensének pontos oka nem ismert, azonban egy nemrég **[Franklin S. E. et.al. 2007]** publikált kutatás az acéllal szembeni, amorf

hidrogénezett szén típusú bevonat súrlódási- és kopási jelenségéről szóló cikkben a szerzők leírják, hogy az acél felületre átvitt transzfer réteg felépülése és dinamikus változása okozza a súrlódás növekedését. Hasonló jelenség magyarázhatja meg szintén a PIII-val kezelt PETP súrlódási viselkedését.

A kutatási eredményekből az is látható, hogy létezik olyan *pv* alkalmazási körülmény (kis *pv* szint, 0,0075 MPa·ms^{-1}), amikor száraz csúszás esetén a PIII-val kezelt PETP hasznos lehet a gyakorlatban. Ezt a következtetést erősítheti az a gyakorlati tapasztalás DLC bevonat és POM-C közötti kis sebességű siklás esetén (szintén kis *pv* szint), a polimer extrudálási technológiája során, hogy a DLC bevonat jelentősen csökkentette a stick-slip hajlamot a felületek között.

5.2.3. PETP eredmények összefoglalása

Polietilén-tereftalát (PETP) műszaki műanyag próbatestek plazmaimmerziós ionimplantációval (PIII vagy PI^3) kerültek felület módosításra nitrogénben. A felületi változások XPS-el, és nedvesítési peremszög mérésekkel kerültek jellemzésre. A kezeletlen és nitrogén PIII-val kezelt PETP S235 kis széntartalmú szerkezeti acéllal szembeni csúszó súrlódás jellemzőit mértem száraz és vízkenésű körülmények között, pin-on-disc tribométerrel.

Az XPS eredmények hidrogénezett szén-nitrid jellegű réteg kialakulására utalnak. A kezelés után a nedvesítési peremszög csökkent, azaz megnövekedett a felületi nedvesítés és felületi energia. Nagyon kis *pv*-tényezőnél (0,0075 MPa·ms^{-1}) a nitrogén PIII-val kezelt PETP száraz súrlódási tényezője kisebb volt, míg a kent súrlódási tényező hasonló volt, mint a kezeletlen PETP megfelelő értéke. Nagyobb *pv*-tényezők (közel 0,1 MPa·ms^{-1}) esetén azonban mind a száraz, mind a kent súrlódási tényezők értékei magasabbak voltak a kezelt mintáknál, mint a kezeletlennél, jelezve a súrlódás megnövekedett adhéziós összetevőjét a nitrogén PIII-val kezelt PETP-nek a vizsgált tribológiai rendszerben. A tribológiai folyamat összetettségét befolyásolja a kezelt réteg hőáram-korlátozó hatása, mely a kontaktzóna és környezetének deformációs kézségére hat. A PIII kezelt réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezője (hőreflexió és hőabszorpció együtt kezelve) λ_{PIII} négy nagyságrenddel kisebbre adódott a natúr PETP mátrixhoz képest.

5.2.4. Következtetések

- XPS eredmények a PIII-kezelésű PETP-nél amorf hidrogénezett szén-nitrid felületi összetételre és nitrogén megkötés kialakulására utalnak.
- Az ülő vízcsepp peremszöge csökkent a PIII kezelés hatására, ami a megnövekedett felületi nedvesítő képességet és felületi energiát jelzi.
- Nagyon kis *pv*-tényezőnél (0,0075 $MPa \cdot ms^{-1}$) a nitrogén PIII-val kezelt PETP-nél a száraz súrlódási tényező kisebb volt, míg a kent súrlódási tényező hasonló volt a kezeletlen PETP-hez képest.
- Emelt *pv*-szinten (0,1 $MPa \cdot ms^{-1}$) mind a száraz mind a kent súrlódási tényezők nagyobbak voltak a kezelt mintákkal, mint a kezeletlen változatnál, ami a megnövekedett adhéziós súrlódási komponensre utal a nitrogén PIII-val kezelt PETP-nél. Az emelkedő kontaktzóna közeli hőmérséklet a PIII kezelt réteg kétirányú hőáram-korlátozó hatásával magyarázható. A réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezője (hőreflexió és abszorpció együtt kezelve) négy nagyságrenddel kisebb, mint az alap mátrixé. A PIII kezelt réteg hőáram-korlátozó hatása módosítja a mikrogeometria és az alapmátrix deformációs viselkedését.
- A feltárt tények tükrében, a további kutatások során célszerű a felületi energia és komponenseinek pontos meghatározása a súrlódási viselkedés alaposabb megértése céljából.

5.3. Kezeletlen és plazmaimmerziós ioninplantációval (PIII) kezelt PA6 tribológiai jellemzői

Kezelt és kezeletlen PA6 anyagokkal kapcsolatban, a szakirodalomban az abráziós karcállóságra vonatkozóan találhatók következtetések **[Tóth A. et.al. 2007]**. E szerint jelentősen megnövekedett abrazív karc-ellenállását tártak fel a kezelt mintáknál, többszörös mikro-karcolási vizsgálatokkal. A tiszta száraz-, és kent csúszás tribológiai tulajdonságairól viszont nem állt rendelkezésre információ, ezért a PETP méréseknél kidolgozott módszerre építve kutatási programot dolgoztam ki NPIII-val kezelt PA6 felület csúszási viselkedésének feltárására. A PETP **[Kalácska G. et.al 2009]** vizsgálatoknál kifejlesztett módszert, vizsgálati rendszert és tapasztalatokat felhasználva célszerűnek tűnt a PA6 anyagmintákkal is elvégezni a kutatást, hiszen a PA6 a legnagyobb volumenben használt műszaki műanyag. Így a PA6 anyaggal kapcsolatos kutatás célja a kezeletlen és NPIII-val kezelt PA6 felületek jellemzése, azok adhéziós csúszási viselkedésének feltárása acél felülettel szemben száraz és különféle kenési körülmények között, továbbá összefüggések megállapítása a kiválasztott felületi jellemzők (például a felületi energia komponensei) és a tribológiai viselkedés között.

5.3.1. Kutatási rendszer és anyagok (PA6)

Az Ensinger GmbH cég által gyártott extrudált poliamid 6 (PA6E) anyag került vizsgálatra. Hasonlóan a PETP minták kialakításához, a pin-on-disc mérés polimer próbatestjei is 10 mm átmérőjű és 2 mm vastag korong alakú mintákból lettek kialakítva. A próbatestek csúszó homlokfelületeinek előkészítése során nedves SiC-csiszolópapírral (P1200 és P4000) és filc lemezzel történt a polírozás, majd ultrahangos tisztítás következett desztillált vízben és 96 %-os etanolban (Reanal). Ezt szárítás követte tiszta nitrogénáramban.

A NPIII kezelések során, egy művelet keretében 7 db próbatest került egyidejű ionimplantálásra. A kezelések az MTA KK AKI-ban történtek. A rozsdamentes acél kamrában az alapnyomás $4x10^{-4}$ Pa volt, a plazma előállítása 27,13 MHz RF plazmagenerátorral történt (Dressler, Németország). A kezelési technológia fő paraméterei a következők voltak: nagy tisztaságú (99,995%) N_2 (Messer Ltd.), áramlási sebesség = 25 cm^3 (STP) min^{-1}, nyomás = $4x10^{-4}$ Pa, RF teljesítmény= 150 W. Az ionimplantáció

nagyfeszültségű impulzusgenerátorral (ANSTO, Ausztrália) történt a következők szerint: feszültség = 30 kV, felületi dózis = $3x10^{17}$ cm^{-2} és felületi dózisteljesítmény = $5x10^{13}$ $cm^{-2}s^{-1}$.
A röntgenfotoelektron-spektroszkópiás (XPS) mérések Kratos XSAM800-as spektrométerrel történtek $MgK\alpha_{1,2}$ sugárzás és rögzített analizátor-transzmissziós mód alkalmazásával (80 eV az áttekintő és 40 eV a részletes spektrumok felvétele során). A spektrumok referálása a szénhidrogén típusú szén C 1s vonalára (kötési energia, BE=285,0 eV) történt. A spektrumadatok gyűjtése és feldolgozása Kratos Vision 2 programmal történt.
A felületi energia meghatározásához első lépésben peremszögmérés történt, statikus ülőcsepp módszerrel, SEE System berendezéssel (Advex, Cseh Köztársaság). Vizsgálati folyadékként kétszer desztillált víz és dijódmetán, DIM (Sigma-Aldrich, Reagent Plus 99% grade) került alkalmazásra. Az adagolás Hamilton fecskendővel, 2 µl-es cseppek alkalmazásával történt, 23 ºC-on. A megállapított peremszögértékek öt mérés átlagát jelentik. A felületi energia, valamint a poláris és diszperziós komponensek számítása Owens és Wendt módszerrel történt **[Owens D. K. et.al. 1969]**. A számítás alapja, hogy:

$$\sigma_S = \sigma_S^P + \sigma_S^D \tag{5.6}$$

$$\sigma_L = \sigma_L^P + \sigma_L^D \tag{5.7}$$

ahol: σ_S a szilárd felület felületi energiája, σ_S^P a szilárd felület felületi energiájának poláris komponense, σ_S^D a szilárd felület felületi energiájának diszperzív komponense. Az „L” index pedig az ismert referencia folyadékra vonatkozik. A szilárd felület ismeretlen σ_S^P és σ_S^D energia komponenseinek meghatározása, két referencia csepp ismert energiaviszonyait és mért peremszögeit felhasználva, az alábbiak szerint:

$$\frac{\sigma_L(\cos\Theta+1)}{2\sqrt{\sigma_L^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_S^P}\cdot\sqrt{\sigma_L^P}}{\sqrt{\sigma_L^D}} + \sqrt{\sigma_S^D} \tag{5.8}$$

két egyenletet felírva, a σ_S^P és σ_S^D és kiszámítható. A szakirodalom a σ mellett használja a γ jelölést is a felületi energia és komponensei kifejezésére. A továbbiakban az utóbbit használom a mechanikai feszültségtől való megkülönböztetésül.

A tribológiai vizsgálatok feltételi rendszere a PETP mérések szerint került rögzítésre. (Dinamikus triboteszter, pin-on-disc modul, DIN50322 VI. kopásvizsgálati kategória szerint, polimer próbatest a „pin" alkatrész S235 köszörült forgó acéltárcsán, melynek felületi érdessége R_a=0,07-1 µm volt. A „pin" elhelyezése 40 mm-es sugáron történt a tárcsa forgásközéppontjához képest.)

Az összehasonlító száraz pin-on-disc vizsgálaton kívül hidrofil és hidrofób kenőanyagokkal is történtek mérések. Az első esetben desztillált víz volt a kenőanyag, cseppenként juttatva azt az érintkezési zónába. A csepp térfogata 10 µl és a cseppentés frekvenciája 2 min^{-1} volt. A második esetben kereskedelmi hajtóműolaj (SAE80W90) volt a kenőanyag. A mérések során, hasonlóan a PETP rendszerhez, a következő paraméterek kerültek rögzítésre: a rendszerjellemző súrlódási tényező (µ), a próbatest befogó függőleges irányú elmozdulása, azaz kopás és deformáció (d) az 5.4.1. részben leírtak szerint, és a kontaktzóna közeli hőmérséklet (T) hőelemmel mérve 1 mm-re a súrlódó polimer felülettől a „pin" próbatestben. A csúszás viszonyai a következők voltak: csúszási sebesség v=0,05 m s^{-1} és lépcsőzetes nyomás növelés p=0,5 MPa-tól 1 és 2 MPa-ig. Ezek a beállítások 0,025, 0,05 és 0,1 MPa·ms^{-1} *pv*-tényezőket eredményeznek. A PETP méréseknél szerzett tapasztalatok alapján a kezeletlen és PIII-val kezelt PA6 minták adhéziós csúszási jellemzőit külön is vizsgáltam a súrlódás kezdeti szakaszán, kis csúszási sebességű (v=0,05 ms^{-1}) és kis nyomású (p=0,3 MPa) körülmények között, amely igen kis *pv*-tényezőnek (0,0075 MPa·ms^{-1}) felel meg. Minden egyes vizsgálat után optikai mikroszkóp felvételek (Carl Zeiss 2280, Németország) készültek a kopott felületek jellemzésére.

5.3.2. PA6 eredmények

5.3.2.1. XPS mérések

A PA6 próbatesteken kialakult felületi réteg összetételének változását, az NPIII kezelés hatását az 5.2. táblázat mutatja.

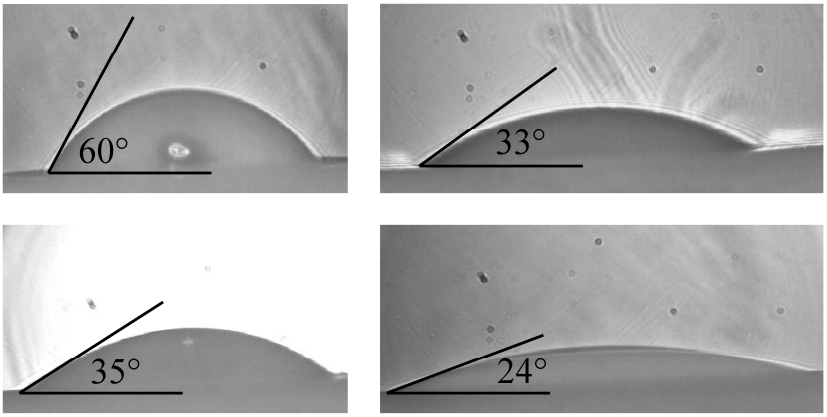
5.2. táblázat: Kezeletlen és PIII-val kezelt PA6 minták felületi összetétele

Minta	O [%]	N [%[	C [%]	Referencia
kezeletlen	10	7	82	**[Tóth A. et.al. 2007] [Kalácska G. et.al 2009]**
NPIII-val kezelt	8	15	77	**[Kalácska G. et.al 2012]**

A N-tartalom növekedett, míg a C- és O-tartalom jelentősen csökkent. Ezek a változások a plazmagázból származó nitrogén beépülésével magyarázhatók. Korábbi publikáció szerint, XPS mérések alapján, NPIII kezelés hatására, az amid csoport degradálódott és imin, protonált amin és uretán-szerű szerkezetek keletkeztek **[Tóth A. et.al. 2007]**. Ezek a kémiai változások az összetételben és kötésben várhatóan befolyásolják a NPIII-val kezelt PA6 polimer felületi energiáját, így a tribológiai viselkedését is. A továbbiakban ezért először meghatároztam a felületi energia viszonyokat.

5.3.2.2. Nedvesítő képesség és a felületi energia

Az *5.14. ábra* mutatja az ülő víz és dijódmetán (CH_2I_2) cseppeket kezeletlen és NPIII-val kezelt PA6 mintákon. Az *5.3. táblázat* foglalja össze a megfelelő peremszögek és a felületi energia (γ_{tot}), valamint komponensei (poláris (γ_{polar}) és diszperziós (γ_{disp})) számított értékeit.



5.14. ábra. Peremszögek PA6-on. (balra: víz, jobbra: dijódmentán, felül: kezeletlen próbatest, alul: N PIII kezelt próbatest)

5.3. táblázat. Mért peremszög értékek és a számolt felületi energia

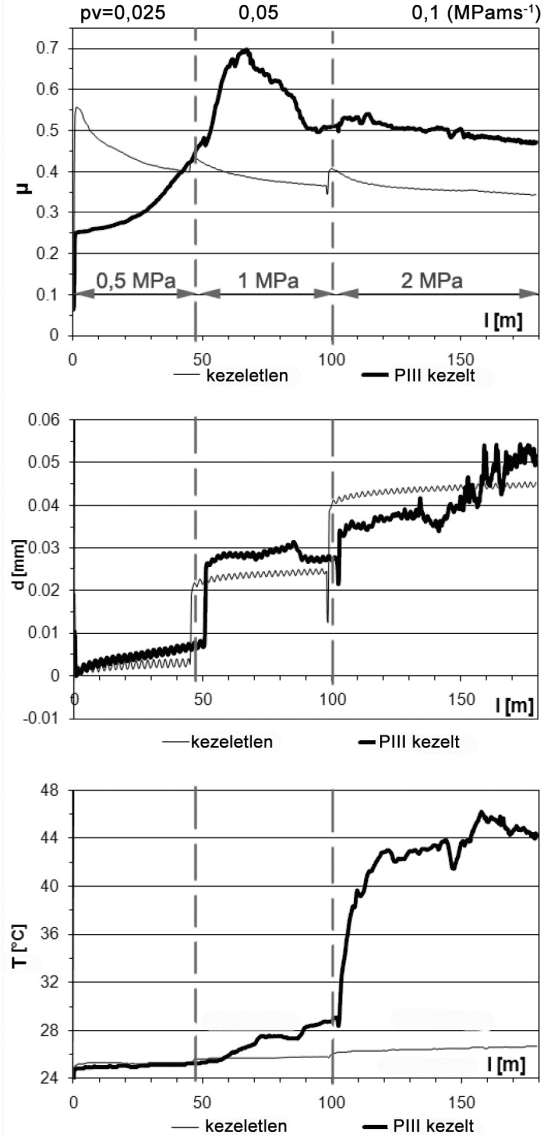
PA6 próbatest	θ_w **[fok]**	θ_{DIM} **[fok]**	γ_{tot} **mJ m^{-2}**	γ_{polar} **mJ m^{-2}**	γ_{disp} **mJ m^{-2}**
kezeletlen	60±4	33±4	54	11	43
N PIII kezelt	35±6	24±4	70	23	47

Látható, hogy NPIII kezelés után a peremszögek csökkentek és a teljes felületi energia, valamint poláris és diszperziós komponensei jelentősen növekedtek. Különösen a poláris komponens, mely gyakorlatilag megduplázódott, de a diszperziós komponens is kb. 10%-kal növekedett. Meg kell jegyezni, hogy a γ_{disp} abszolút értéke sokkal nagyobb, mint a γ_{polar}

komponensé mind a kezeletlen mind a NPIII-val kezelt mintáknál. A nedvesedés növekedése alapvetően a N-beépülésnek tudható be, amely poláris csoportokat eredményez, tekintettel arra, hogy a felületi réteg oxigén koncentrációja még csökkent is kismértékben a kezelés hatására. A felületi energiában leírt változások várhatóan erősen befolyásolják a NPIII-val kezelt PA6 adhéziós tribológiai viselkedését.

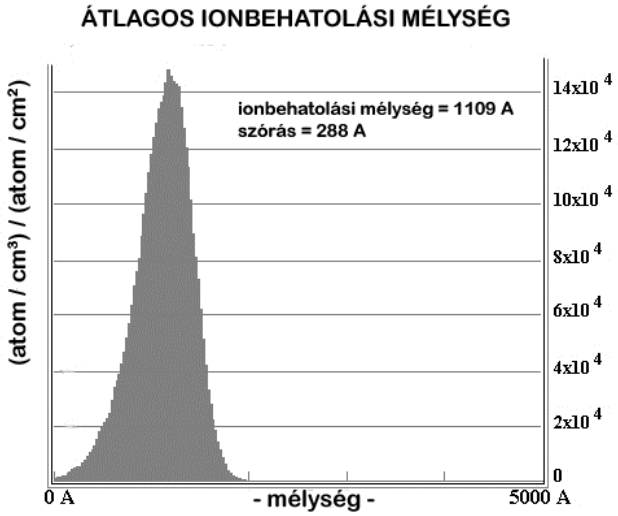
5.3.2.3. PA6 pin-on-disc tribológiai vizsgálatok száraz csúszási rendszerben

Az *5.15. ábra* szemlélteti a súrlódási tényező mért értékeit, a kopást és az érintkezési hőmérsékletet kezeletlen és NPIII-val kezelt PA6 anyagnál, a korábban definiált három terhelési szinten (0,5, 1 és 2 MPa) v=0,05 ms^{-1} csúszási sebességgel és 180 m maximális csúszási távolsággal.



5.15. ábra. Pin-on-disc vizsgálat eredményei száraz körülmények között (v=0,05 ms^{-1}). (felül: súrlódási tényező - μ, középen: kopás és deformáció – d, alul: hőmérséklet – T).

Az első terhelési szakaszban (0,5 MPa) az NPIII-val kezelt PA6 minta viszonylag kis kezdeti súrlódást ($\mu \cong 0{,}25$) mutatott, amely azonban folyamatosan növekedett a csúszási út függvényében. A második – növelt – normál terhelésnél (1 MPa) a kezelt minta súrlódási tényezője elérte a 0,7-es csúcsértéket, jelezve egy tranziens folyamatot, miután egy stabilizálódási szakasz következik. E jelenség a polimer tribológiában ismert, a szakirodalom jellemző módon a bejáratási és stabil szakasz határán értelmezi a tranziens kifejezést **[Blau P. J. 2009]**. Figyelemre méltó, hogy a kezdeti fázisban a kezelt minta súrlódási tényezője sokkal kisebb volt, mint a kezeletlené. Ez az ionsugár által előidézett nitrogén-gazdag széntartalmú felületi réteg képződésével magyarázható **[Tóth A. et.al. 2007]**. SRIM-program felhasználásával **[Ziegler J.F et.al. 1985]** megállapították az azonos körülmények között besugárzott PA6 elsődleges módosult réteg mélységi méreteit és eloszlását, azaz a gradiens zónát, mely átmegy az eredeti alapanyagra **[Tóth A. 2009]** (*5.16. ábra,* hasonlóan értelmezendő, mint az *5.2. ábra*).



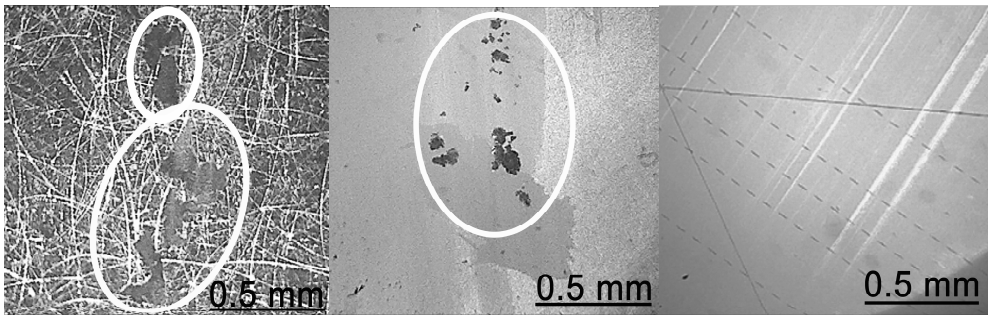
5.16. ábra. 30 keV energiájú N ionok behatolási mélységének eloszlása PA6-ban **[Tóth A. 2009]**

A rétegvastagság értékét nem lehet közvetlenül összehasonlítani a mért **d** értékekkel, mivel az utóbbi rendszerfüggő és tartalmazza a tényleges kopás mellett a próbatest deformációt is, a korábban leírtak szerint. A **d** egy komplex tribológiai értékelés eleme, ahol **d**-t együtt kell értelmezni a súrlódással, hőfejlődéssel, kopási nyom változással. A viszonylag kis kezdeti súrlódás fokozatos növekedése a kezelt minták esetében az adhéziós kopási mechanizmus hatásával magyarázható. Az acél tárcsán megjelenik vizuálisan is a letapadt „transzfer” réteg (*5.17. ábra,* bal oldal). Az *5.17. ábra* szerint a keletkezett transzfer réteg létrejötte, adhéziós

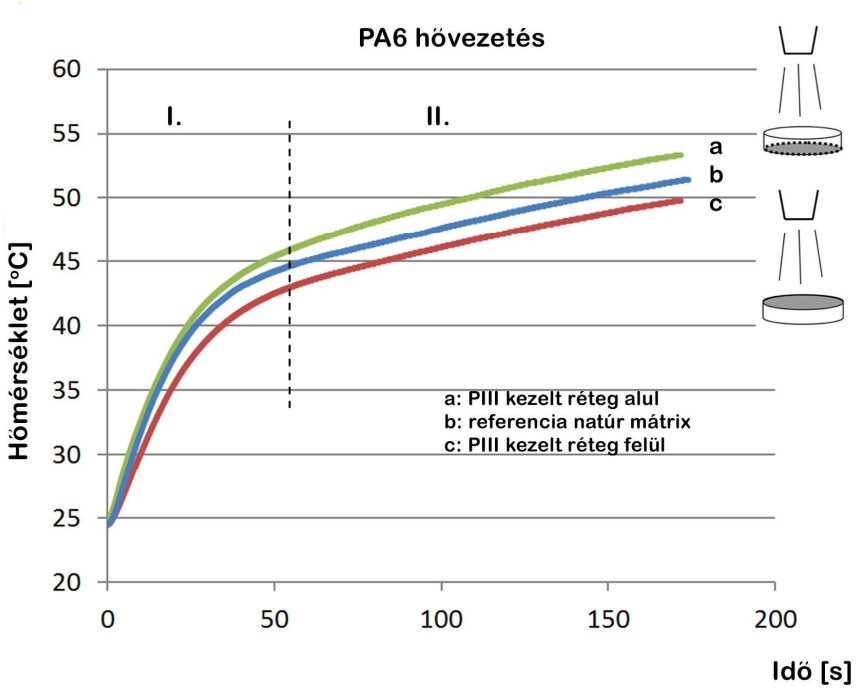
mechanizmus felerősödése alapvetően a második terhelési szinten (1 MPa nyomás) kezdődött. Ezután a harmadik terhelési szinten (2 MPa nyomás) a kezelt minta esetén is kialakul egy stabilizálódott súrlódási tényező 0,5-ös érték környezetében, ahol az adhézió és re-adhézió egyensúlyba kerül (*5.17. ábra* közepe).

Az *5.15.* és *5.17.* ábrák alapján megállapítható, hogy a kezeletlen PA6 minták a polimer tribológiai szakirodalomból ismert klasszikus viselkedést követték a beállított kis *pv* értéken. Mindhárom terhelési szinten felismerhető a súrlódási görbén a bejáratási és stabilizálódási szakasz mindamellett, hogy a valós kopása és sérülése a csúszó felületnek elhanyagolható. A PIII kezelt PA6-nál tapasztalt adhézió és re-adhézió a súrlódási és a hőmérséklet görbéket jelentősen módosította. A súrlódási folyamat jól hallható súrlódási zajjal párosult és az adhéziós munka részbeni hővé alakulása is segíti a folyamatosan emelkedő mért hőmérsékletet. Mint ismeretes, az adhéziós munka hővé alakulása általában meghatározó mértékben járul hozzá az érintkezési hőmérséklet növekedéséhez (*5.15.* ábra alsó része). A kezelt mintánál a harmadik 2 MPa-os terhelési szakaszban ez a jelenség igen szembetűnő.

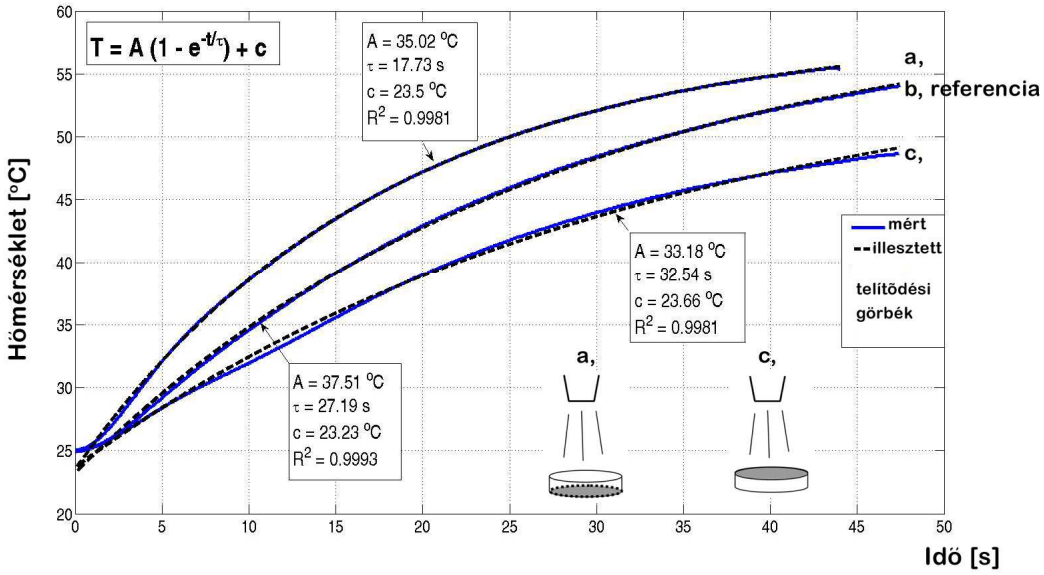
Korábban DLN felületi réteg tribológiai vizsgálatánál is megfigyelték, hogy jelentős felületi hőmérséklet-növekedés keletkezett száraz adhéziós csúszásnál **[Zsidai L. et.al. 2004]**, de kimutatták azt is, hogy a réteg hőreflexiós vagy hőáram-korlátozó hatása is fontos szerepet játszik. A PIII-val kezelt PA6 mintáknál a próbatestben mért nagy hőmérséklet (kb. 46 ºC-t ért el) 2 MPa nyomás alatt (*5.15. ábra* alul) arra utal, hogy a hővé alakult adhéziós munka mellett szintén szerepet játszik a módosított felületi réteg hőáram-korlátozó hatása, csakúgy, mint a PETP esetében. Ezt a feltételezést a PETP mérésekhez hasonlóan kísérletileg igazoltam (*5.18. – 5.22. ábrák*).



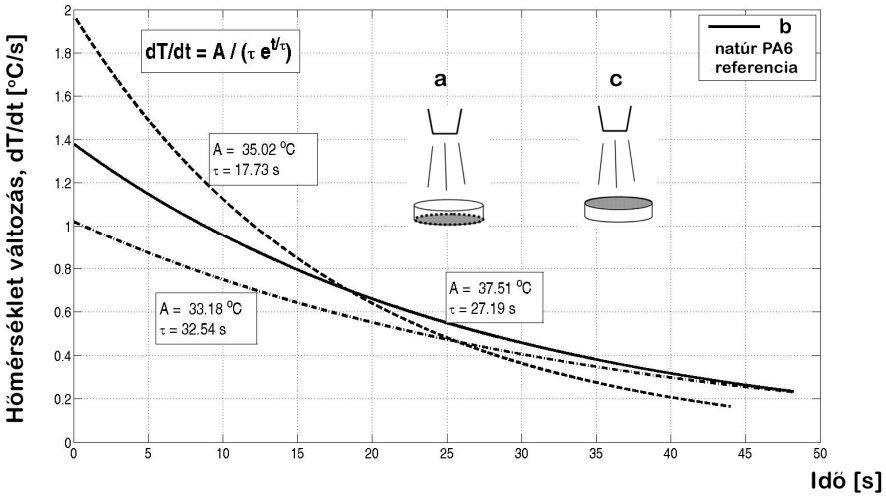
5.17. ábra. Optikai mikroszkópos felvételek a súrlódó felületekről, száraz csúszás esetén.
(Balra: adhéziósan letapadt zóna, transzfer réteg az acél tárcsán, középen: re-adhéziós felület a kezelt PA6 próbatest felületén a dinamikus súrlódási egyensúly szakaszból, jobbra: a kezeletlen PA6 próbatest alig sérült felülete a vizsgálat végén)



5.18. ábra. PA6 próbatestek közepén mért hőmérsékletek lassú melegítés (L_3-ról, 5.7. ábra szerint) esetén



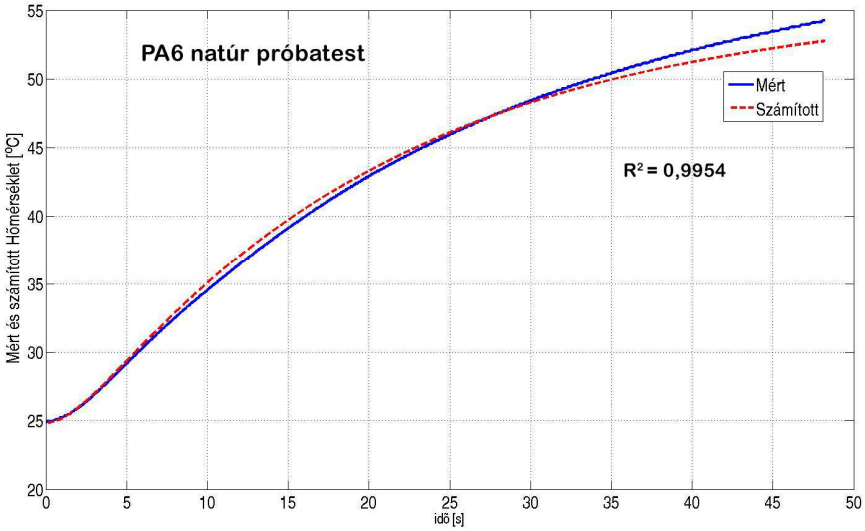
5.19. ábra. PA6 próbatestek közepén mért hőmérsékletek intenzív melegítés (L_2-ről, 5.7. ábra szerint) esetén



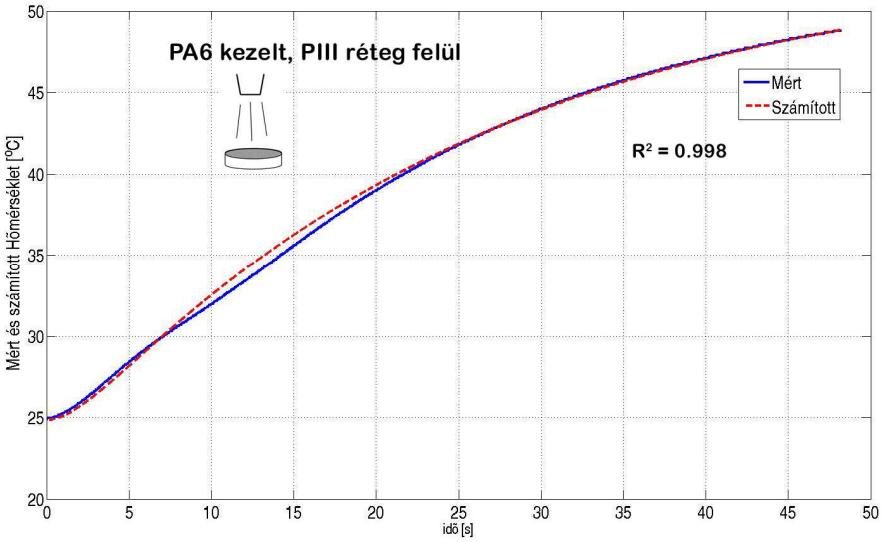
5.20. ábra. PA6 próbatestek melegedési sebességének változása

Az *5.18. ábrán* látható a felületi réteg hőáram-korlátozó hatása, hasonlóan a PETP-nél tárgyaltakkal. Rövid idejű intenzív melegítésnél a hatás látványosabb (*5.19 és 5.20. ábra*), mint a kiegyenlítettebb hőviszonyokat eredményező lassúbb melegítésnél. Az *5.8* és *5.19. ábrák* összehasonlítása alapján az is megállapítható, hogy az intenzív melegítés hatására hasonló, de nem azonos hőmérsékleti különbségek alakultak ki a PETP és PA6 esetében, míg az időben elnyújtott és kevésbé intenzív melegítés mellett (*5.7.* és *5.18. ábrák*) a PETP-n PIII-vel létrehozott réteg erősebb hőáram-korlátozó hatást fejtett ki, mint a PA6 esetében létrejött réteg. A megfigyelés igazolására elvégeztem a PETP-hez hasonlóan a hőtani modellezést és számítást.

Az 5.4.2.2. részben részletesen bemutatott kísérleti és számítási modellt alkalmazva meghatároztam a rendszerben a hőátszármaztatást illetve a PA6 felületen PIII-vel létrehozott réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezőjét $\lambda_{PIII\text{-}PA6}$-t (hőreflexió és abszorpció együtt kezelve). Először felhasználva az 5.5 és 5.4 egyenleteket, a natúr PA6 mérési eredményeire (*5.19. ábra, „b" referencia mérési sor*) identifikáltam a modellt (*5.21. ábra*), ezzel kiszámolva a próbatest felső felületét jellemző kényszer-konvekciós tényezőt, α_a-t. A modell-identifikációt elvégezve megállapítható, hogy a referencia PA6 próbatesten mért melegedési görbe (*5.19. ábra „b" referencia mérés*), és a modell által számított görbe jó egyezést mutat (*5.21. ábra*). A számított α_a konvekciós tényező értéke 160,6844 W/m^{2}K, illetve a felületi hőátszármaztatás κ_a=160,6719 W/m^{2}K. Ezt felhasználva a PIII bevonatos próbatest esetén – behelyettesítve az 5.5 összefüggésbe – egy ismeretlen marad, a λ_{PA6}, azaz a felületi réteg lineáris hővezetési tényezője.



5.21. ábra. Natúr PA6 próbatest mért és hőtani modellel számított hőmérséklet változása, modell identifikáció.



5.22. ábra. Kezelt PA6 próbatest mért és hőtani modellel számított hőmérséklet változása.

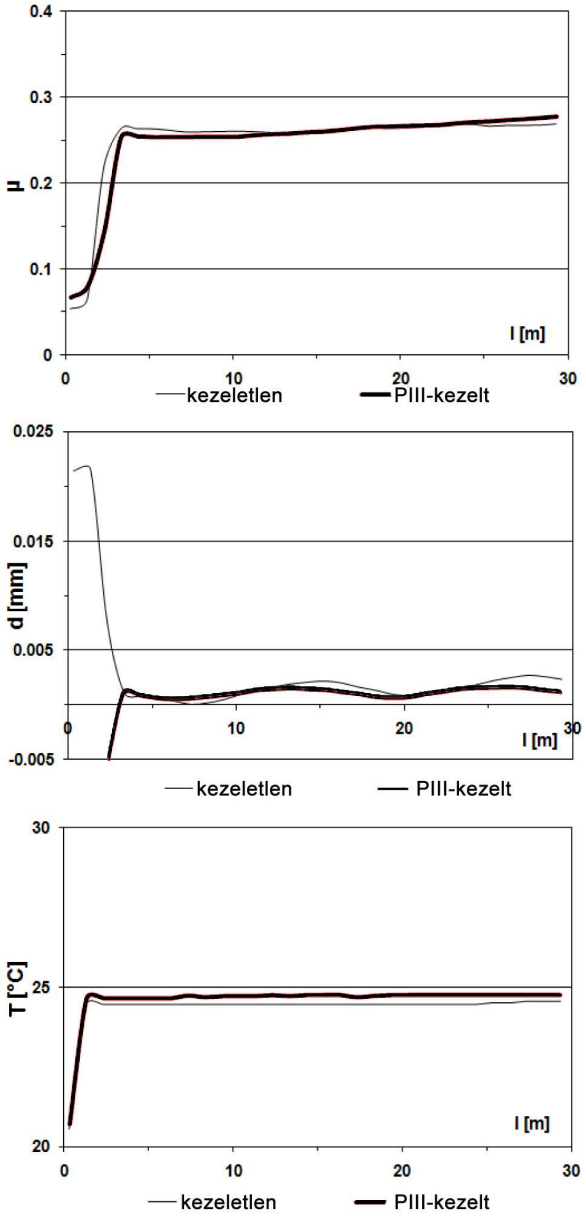
A modellszámítást elvégezve a kezelt próbatestre (*5.22 ábra*) $\lambda_{PIII\text{-}PA6}$=4,4902·$10^{-5}$ W/mK, így a kezelt réteg oldaláról melegített PA6 próbatest esetén a hőátszármaztatási tényező κ=115,0255 W/m^2K. Az eredményeket *az 5.4. táblázat* foglalja össze.

A táblázatból megállapítható, hogy a PIII kezelés hatására létrejövő felületi réteg valamivel kevesebb, mint 30%-kal csökkentette a hőátszármaztatást. Ez 5-6%-kal kisebb csökkenés, mint a PETP esetében, vagyis a PA6 felületi rétege valamivel kisebb – de még mindig jelentős – hőáram-korlátozó képességgel bír, mint a PETP.

5.4. táblázat. PA6 referencia és számított hőtani értékek a modellben

	Natúr PA6	PIII kezelt PA6, réteg a hőforrás felőli oldalon	Eltérés
Hőátszármaztatás κ [W/m^{2}K]	160,672	115,0255	- 28,4%
Látszólagos lineáris hővezetési tényező, λ [W/mK]	0,23	$4{,}4902 \cdot 10^{-5}$ a PIII kezelt rétegre vonatkozóan	- 99,98%

A PIII kezelt PA6 felületén létrejövő réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezője – hasonlóan a PETP-nél számítottakhoz – négy nagyságrenddel kisebb, mint a natúr PA6 alapmátrixé.



5.23. ábra. Pin-on-disc vizsgálat eredményei száraz körülmények között (Súrlódás kezdeti szakasza, csökkentett *pv* tényező, *p*=0,3 MPa, *v*=0,05 ms^{-1}, *pv*=0,0075 MPa·ms^{-1})

A PETP-vel végzett kutatás tapasztalatai alapján, külön figyelmet fordítottam a súrlódási folyamat kezdeti szakaszára, csökkentett *pv*-tényező (p=0,3 MPa, v=0,025 ms^{-1}, *pv*=0,0075 $MPa \cdot ms^{-1}$) alkalmazásával.

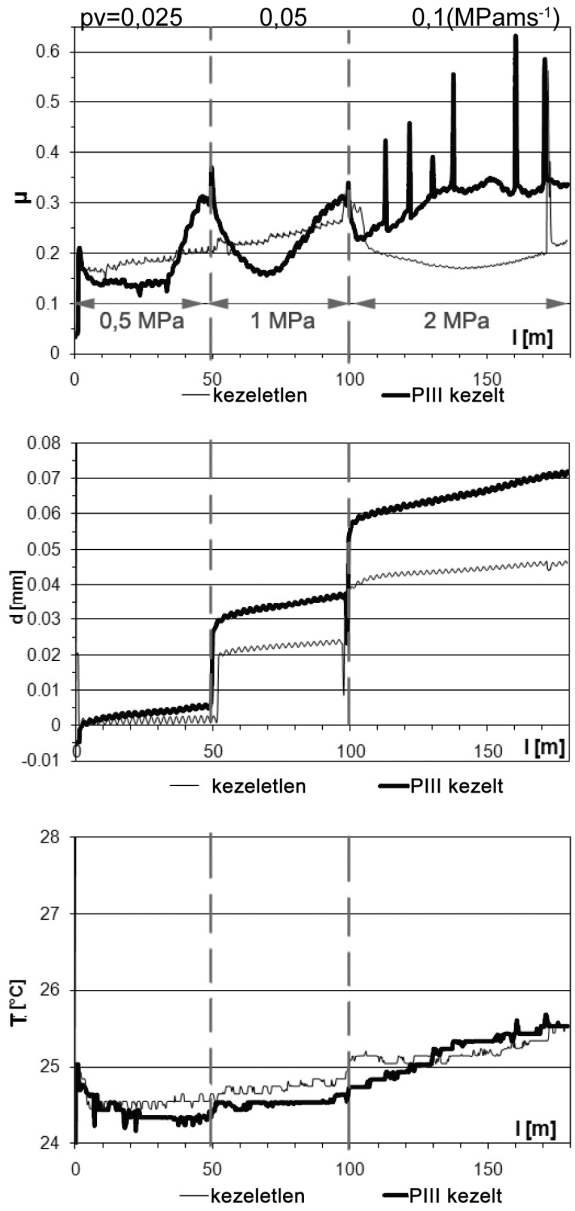
Az *5.23. ábra* szemlélteti az eredményeket, amelyek szerint jelentős különbségek nem tapasztalhatók a kezelt és kezeletlen minták viselkedése között nagyon kis *pv*-tényező esetén. Ez arra utal, hogy az érintkezési deformáció és tényleges felület túlságosan kicsi a kis terhelés következtében, a súrlódásnak sem az adhéziós- sem a deformációs összetevője nem domináns. A súrlódás adhéziós elmélete **[Bowden F. P. et.al 1954, Yamaguchi Y. 1990]** szerint, a száraz súrlódási erő (F_f) deformációs komponense nagyságrendekkel kisebb lehet, mint az adhéziós komponens ($F_a >> F_d$) kis terheléseken, amely az $F_f \approx F_a$ viszonyhoz vezet. Az *5.15. ábra* szerint az adhéziós komponens hatása már érvényesül a PIII-val kezelt PA6 esetén az első terhelési szinten a *pv*=0,025 $MPa \cdot ms^{-1}$ tényező alkalmazásánál, míg a csökkentett *pv*-tényező (0,0075 $MPa \cdot ms^{-1}$) esetén a tényleges érintkezési felület valószínűleg olyan kicsi, hogy sem az adhézió, sem a deformáció esetlegesen eltérő hatása nem volt mérhető a kezelt próbatesteknél sem.

A *pv*=0,05 $MPa \cdot ms^{-1}$ terheléstől kezdve (*5.15. ábra*) az NPIII-val kezelt minták nagyobb súrlódási tényezője és a magasabb érintkezési hőmérséklet arra utal, hogy a súrlódás adhéziós komponense sokkal erősebb a kezelt PA6 mintánál, mint a kezeletlennél. Hasonló jelenség volt felismerhető a NPIII-val kezelt PETP-nél **[Kalácska G. et.al 2009]** is. Tóth és szerzőtársai szerint **[Tóth A. et.al. 2007]** a kezelt PA6 adhéziós tribológiai eredményei nincsenek ellentmondásban a kezelés hatására mért mikro-abráziós kopásállóság javulásával mivel az az anyag/felület teljesen más tulajdonságaitól függ.

5.3.2.4. PA6 pin-on-disc tribológiai vizsgálatok vízkenéssel

A vízkenés esetén végrehajtott tribológiai vizsgálatok célja az volt, hogy megállapítható legyen a poláros kenőközeg hatása a kezelt és kezeletlen PA6 tribológiai viselkedésére, a módosított felületi jellemzők és a megváltozott súrlódási viselkedés közötti kapcsolatra. A vizsgálati körülmények hasonlóak voltak a száraz pin-on-disc csúszási vizsgálatok körülményeivel (p=0,5, 1 és 2 MPa, v=0,05 ms^{-1}, l=180 m); az egyetlen különbség a desztillált víz cseppenkénti érintkezési zónába juttatása volt. Az *5.24. ábra* mutatja az összehasonlító tribológiai vizsgálat eredményeit vízkenésű körülmények esetén.

A mérés kezdeti szakaszában a súrlódási trend hasonló volt a száraz súrlódásnál tapasztaltakkal: a súrlódási tényező a kezelt mintánál ismét kisebb volt a kezeletlen mintához képest, de mindkét próbatest esetén a μ abszolút értékei a kenés miatt természetesen alacsonyabbak csakúgy, mint a kopás és a hőfejlődés értékei is.

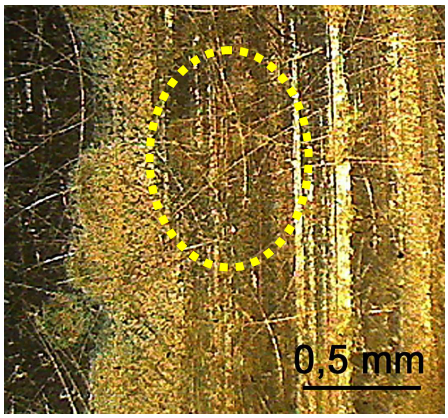


5.24. ábra. Összehasonlító pin-on-disc vizsgálat eredményei vízkenésű körülmények esetén ($v=0{,}05$ ms^{-1})

Az *5.24. ábra* súrlódási görbéjén látható a súrlódási instabilitás jelensége is a 2 MPa-os terhelési tartományban, mely a vegyes kenési állapotú súrlódó párok esetében ismert jelenség. Hasonló problémákat figyeltek meg nedves tengelykapcsolóknál, amikor a kopás nem volt kritikus, de az ingadozó súrlódás bizonytalan csúszást és üzemmódot eredményezett **[Ost W.**

2006, Ost W. et.al. 2010]. A folyamat több tényező együttes hatásának az eredménye: hőfejlődés, érintkezési deformáció, változó kenőfilm vastagság és változó felületi nedvesítő képesség a kopás miatt, stb. **[Ost W. 2006, Ost W. et.al. 2010]**.

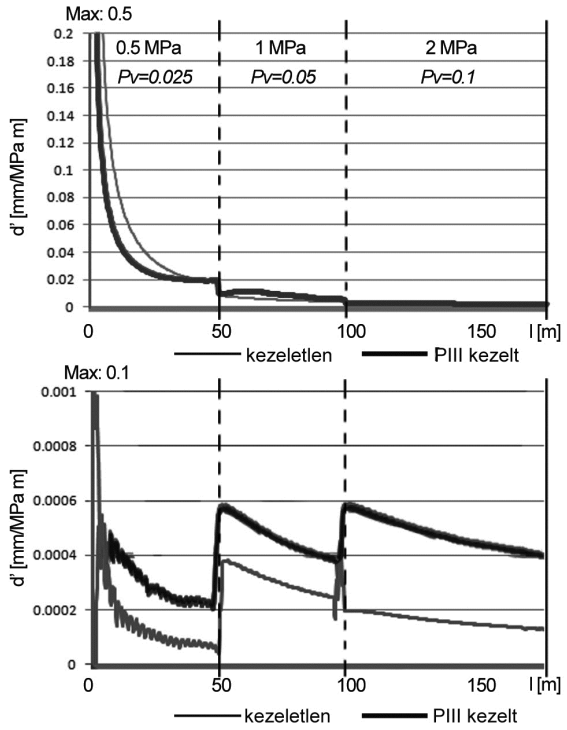
Az *5.25. ábra* azt mutatja, hogy a vízkenés ellenére is, képződött adhéziós transzfer réteg az acél tárcsán a kezelt PA6 felület kopása miatt.



5.25. ábra. Acél tárcsa felületéről készült optikai mikroszkópi felvétel, az adhéziósan letapadt kopadék (transzfer réteg) vízkenés esetén.

Összehasonlítva a vízkenés hatásait (*5.24. ábra*) az NPIII kezelés után megfigyelt felületi változásokkal (*5.3. táblázat*) látható, hogy a tribológiai viselkedés összhangban van a kezelt próbatestek nagyobb nedvesítő képességével (peremszög csökkenéssel), a teljes felületi energia és annak poláros komponensének növekedésével (*5.3. táblázat*). A kezelt PA6 esetén (*5.24. ábra*) a súrlódási tényező körülbelül a felére csökkent a száraz körülmények között mérthez képest (*5.15. ábra*). Az érintkezési hőmérséklet növekedése közel azonosan alakult a kezeletlen és a kezelt PA6-nál, nyilvánvalóan a víz hűtőhatása miatt. Összehasonlítva ezeket az eredményeket a NPIII-val kezelt PETP-vel **[Kalácska G. et.al 2009]** megállapítható, hogy a vízkenés kedvező hatása az NPIII-val kezelt PA6-nál erősebben jelentkezik, mint a hasonlóan kezelt PETP-nél.

További összehasonlító tribológiai vizsgálatokat végeztem vízkenéssel nagyon kis *pv*-tényezővel (pv=0,0075 MPa·ms^{-1} p=0,3 MPa, v=0,025 ms^{-1}, l=30 m) hasonlóan a száraz körülmények között végzett vizsgálatokhoz. Természetesen így sem adódott szignifikáns különbség a kezelt és kezeletlen próbatestek között, eltekintve attól, hogy a súrlódás, kopás és melegedés abszolút értékei csökkentek a száraz súrlódáshoz képest.



5.26. ábra Fajlagos kopás (Felül: száraz csúszás, alul: vízkenéssel)

A száraz súrlódás és vízkenés összehasonlítására a tribológiában gyakran alkalmazott, összehasonlíthatóságot célzó fajlagos kopási görbék használata is további információval szolgál. A jelenlegi vizsgálati rendszerben $d \cdot p^{-1}s^{-1}$ összefüggéssel számítható a fajlagos kopás $d'(mm \cdot MPa^{-1}m^{-1})$. Az *5.26. ábra* a kezeletlen és kezelt minták fajlagos kopási görbéit mutatja száraz és vízkenéses körülmények esetén. Száraz csúszás során a fajlagos kopás csökken növekvő *pv*-értékek esetén. Adott *pv* szinten belül a fajlagos kopás ugyancsak csökken a növekvő csúszási távolsággal. Száraz csúszáskor az kis *pv*-szinten a fajlagos kopás kisebb az NPIII-val kezelt PA6-nál, mint a kezeletlen próbatestnél. Vízkenéskor **d'** nagymértékben lecsökken és kevésbé érzékeny a *pv*-értékek változására.

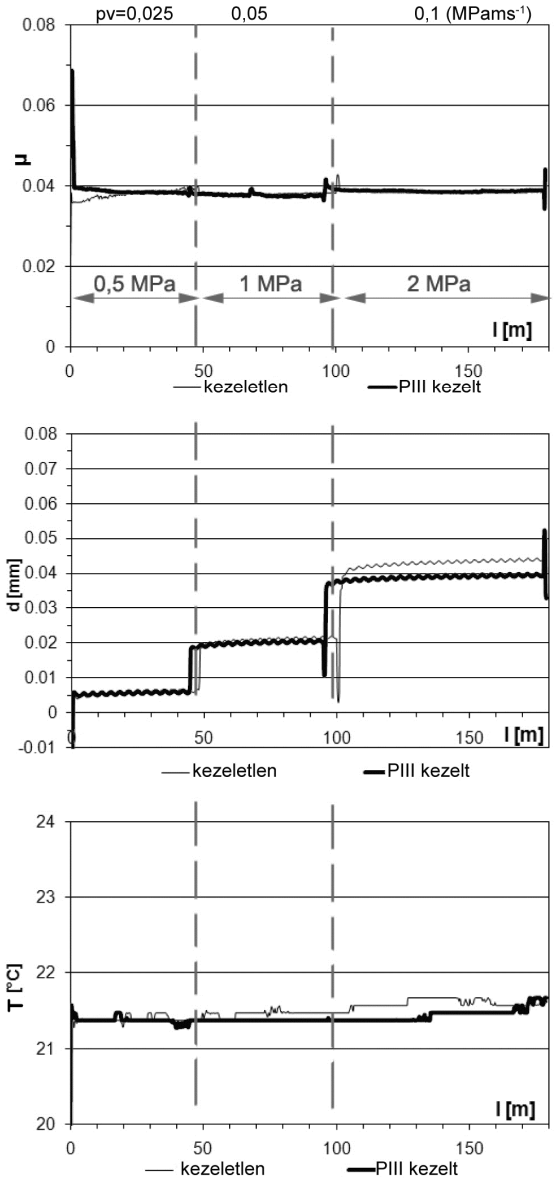
5.3.2.5. Pin-on-disc tribológiai vizsgálatok olajkenéssel

- Folyamatos olajkenésű vizsgálatok

Ezen méréseknek az volt a célja, hogy átfogó kapcsolatot találjak a NPIII-val módosított felület megváltozott felületi energiája és tribológiai viselkedése között, olaj kenés esetén. Ezen felül az eredmények összehasonlíthatók a száraz és vízkenésű mérési eredményekkel is. A vizsgálati rendszer megegyezett a korábbiakkal (p=0,5; 1 és 2 MPa, v=0,05 ms^{-1}, l=180 m).

Az egyedüli különbség a SAE 80W90-es hajtóműolaj cseppenkénti adagolása volt a súrlódási nyomban a próbatest előtt 5 mm-rel. Az *5.27. ábra* szemlélteti a kapott tribológia eredményeket.

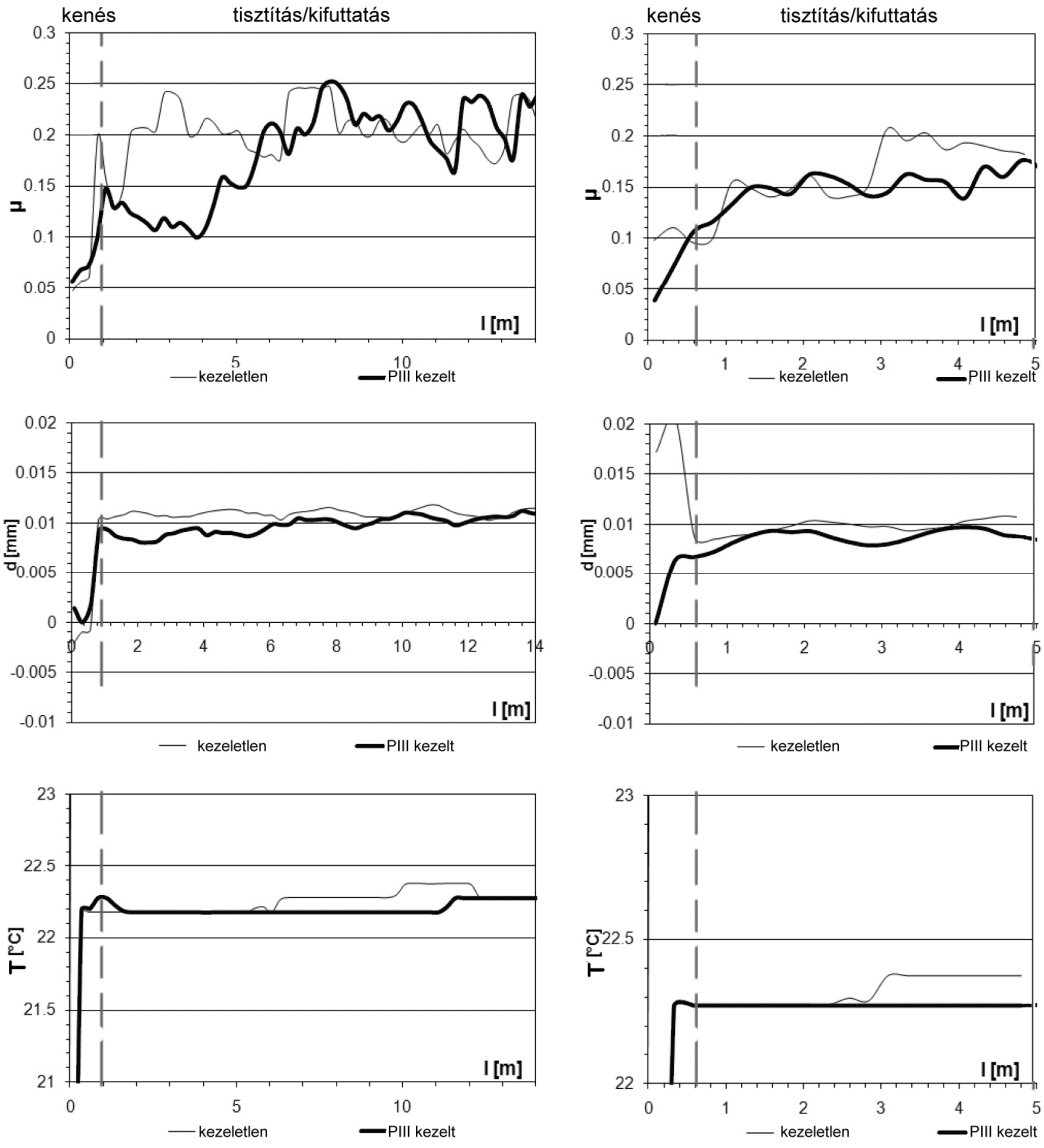
A folyamatos olajkenés esetén a **μ, d** és **T** értékei általában sokkal kisebbek maradtak, mint a megfelelő száraz és vízkenéses körülmények közöttiek. Nem lehetett szignifikáns különbséget tenni a kezelt és kezeletlen PA6 mérési eredményei között. Ezért szükségessé vált a kenési rendszer módosítása úgy, hogy egy-egy olajkenési csepp alkalmazása után kifutásos körülmények között lehessen mérni a hidrofób (olaj) kenőanyag hatását, azaz a vegyes kenési állapotból kifut a próbatest a határfelületi kenés állapota felé.



5.27. ábra Összehasonlító pin-on-disc vizsgálat eredményei olajkenésű körülmények esetén (v=0,05 ms^{-1})

- Olaj-kifutásos kenési vizsgálatok

Az olaj kifuttatásos vizsgálatnál a szabályozott automatikus kenőcsepp kijuttatást a súrlódási nyom automatikus tisztítása követte szűrőpapírral bevont tisztítófejjel. A diagramok minden terhelési szakaszának első részében így az olajkenés, míg ezután a kifuttatási folyamat tribológiai jelenségei láthatók.



5.28. ábra. Olaj-kifuttatásos kenési vizsgálatok eredményei
(Bal: p=0,5 MPa, v=0,05 ms^{-1}, l=14 m;
Jobb: p=0,3 MPa, v=0,025 ms^{-1}, l=5 m)

A határkenésre vonatkozó feltételezést kenőfilm rétegvastagság mérés nem erősíti, de az automatizált törléses módszer alkalmazása meghatározza a kenési jelleget. A törléssel elért módosított olajkenés már elegendőnek bizonyult a kezeletlen és kezelt felületek tribológiai jellemzői közötti különbségek megállapítására. Az olaj-kifuttatásos mérések két feltételrendszer mellett történtek: normál körülmények között, p=0,5 MPa, v=0,05 ms^{-1} és l=14 m (*5.28. ábra* baloldali oszlop) és kisebb *pv* esetén, p=0,3 MPa, v=0,025 ms^{-1} és l= 5 m (*5.28. ábra* jobboldali oszlop).

Nagyobb *pv*-szint alkalmazásánál (*5.28. ábra*, bal) a kezelt minta súrlódási tényezője jelentősen kisebb volt a kezdeti szakaszban, mint a kezeletlen mintánál mért súrlódási tényező. Ez a különbség annak tudható be, hogy a kezelt minta felületén az olaj-megtapadás növekedett. Ez a megnövekedett tapadás összhangban van a felületi energia megnövekedett diszperziós komponensével $\gamma_{disp.}$ (5.3. táblázat).

Az olaj-kifuttatás során a csúszás már jelentősen elvékonyított kenőolaj rétegen történik. A súrlódás emelkedése lassabb és később következik be a kezelt mintánál, mivel az olaj tapadása a megnőtt γ_{disp} komponens miatt hatásosabb a kezelt próbatesten. A kenés és tisztítás után a stabilizálódott súrlódási szint közel azonos mindkét próbatest esetén, a μ=0,2 körül ingadozik.

Az olajkifuttatásos vizsgálat – a mérnöki gyakorlatban kényszercsúszási folyamat – lehetővé tette a tribológiai különbség bemutatását a módosított és a nem módosított PA6 felületek között olaj (hidrofób) kenőanyag alkalmazása esetén.

Csökkentett normál terhelés és csökkentett csúszási sebesség esetén – 0,075 $MPa \cdot ms^{-1}$ értékű *pv*-tényező (*5.28. ábra*, jobb) – az előzőekben leírt különbség a μ-nél továbbra is észlelhető maradt, de kevésbé nyilvánvaló és hosszabb csúszási távolságon jelentkezik, mint nagyobb *pv*-szint esetén (*5.28. ábra*, bal). Ez annak köszönhető, hogy kisebb terhelés esetén a megtapadt olaj eltávolítása lassúbb folyamat. Így az *5.28. ábrán* közölt eredmények arra utalnak, hogy a kezelt minta esetén a felület és az olaj közötti kölcsönhatás tartósabb a felületi energia diszperziós komponensének növekedése miatt, ami úgy is kifejezhető, hogy javul a módosított PA6 felület olaj visszatartási képessége és tartósabb kenőhatást fejt ki az olajjal a súrlódó rendszerben a NPIII-val kezelés hatására.

5.3.3. PA6 eredmények összefoglalása

Korábban még nem kutatták a nitrogén plazmaimmerziós ionimplantációjával (NPIII) kezelt, extrudált poliamid-6 (PA6E) féltermékekből készült próbatestek adhéziós csúszási viselkedését annak ellenére, hogy a PIII egy ígéretes technika polimer felületek megváltoztatására. Tribológiai kutatásokat végeztem az NPIII kezelés hatásának feltérképezésére PA6 műszaki műanyaggal, S235 szerkezeti acél ellenfelület alkalmazásával. A felületi változásokat XPS, csepp-próba peremszög mérés és optikai mikroszkóp vizsgálatok jellemzik. A tribológiai jellemzőket (súrlódási tényező, a kopás és a kontaktzóna közeli próbatest hőmérséklet), pin-on-disc rendszerű tribométerrel, száraz és különböző kenési körülmények között határoztam meg. A kezelés hatására a PA6 felületi rétegének a N-tartalma növekedett, míg C és O tartalma csökkent. A teljes felületi energia és annak poláris és diszperziós komponensei jelentősen növekedtek. Száraz súrlódáskor a vizsgált kis *pv* szinten a kezelt próbatest súrlódási tényezője alacsonyabb értékről indult, mint a kezeletlen változaté és a fajlagos kopás értéke szintén kisebb volt. Száraz súrlódáskor a kezelt PA6 esetén a megnövekedett felületi energia általában megnövelte az adhéziót acél felületen (*pv* = 0,025 $MPa \cdot ms^{-1}$ terhelés felett), transzfer réteg letapadását eredményezve. A vízkenés hatékonyabb volt – a felületi energia megnövekedett poláris komponensének megfelelően – a kezelt PA6-nál, mint az korábban a PETP-nél tapasztalható volt. A kezelt PA6-nál lecsökkent súrlódást eredményezett az apoláros kenőanyag használata, mely olaj-kifuttatásos vizsgálatokkal igazolható. A módosított felület jobb olajvisszatartó képessége a felületi energia megnövekedett diszperziós komponensének hatásaként értelmezhető. Mindemellett a súrlódás komplex értékelésekor figyelembe kell venni, hogy a PIII kezelt réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezője (hőreflexió és hőabszorpció együtt kezelve) 4 nagyságrenddel kisebb, mint a natúr PA6 mátrixé, melynek eredményeként létrejövő hőáram-korlátozás a száraz csúszási alkalmazásokat jelentősen szűkíti.

5.3.4. Következtetések

- A PA6 műszaki műanyag NPIII-val történt kezelésének hatására a felületi réteg N-tartalma megnövekedett és ezzel párhuzamosan a C- és O- tartalom lecsökkent. Az

előidézett kémiai változások miatt a felület energetikai viszonyai megváltoztak. A víz és dijódmetán cseppek peremszögei csökkentek és a teljes felületi energia valamint annak poláris és diszperziós komponensei növekedtek.

- A PA6 NPIII-val történt kezelése hatással volt az adhéziós tribológiai viselkedésre acél felületen. Száraz csúszáskor a módosított felületi réteg hőáram-korlátozást okozott a súrlódó kontaktzónában, előidézve a próbatest jelentős hőmérséklet növekedését. Megfigyelhető az acél felületén az adhézió- és a polimer felületén a re-adhézió jelensége.
- Kis *pv*-tényező (0,025 $MPa \cdot ms^{-1}$) esetén száraz súrlódási körülmények között a kezelt minta súrlódási tényezője kezdetben alacsonyabb a kezeletlenéhez képest.
- Száraz csúszás esetén kis *pv*-rendszerben a fajlagos kopás az NPIII-val kezelt PA6-nál kisebb, mint a kezeletlen változatnál.
- Hidrofil kenőanyag – víz – alkalmazása az NPIII-val kezelt felületnél a súrlódási tényező adhéziós komponensét csökkentette. A víz előnyös kenő hatása a PIII-val kezelt PA6-nál határozottabb volt, mint a hasonlóan kezelt PETP-nél.
- Olaj kenés (hidrofób) alkalmazása a súrlódási tényezőt csökkenti a kezelt mintánál összhangban a felületi energia diszperziós komponensének növekedésével.
- A PIII kezelés jelentősen módosítja a száraz súrlódás hőegyensúlyát, mivel a réteg látszólagos lineáris hővezetési tényezője (hőreflexió és hőabszorpció együtt kezelve) több nagyságrenddel kisebb – a mérési rendszerben 4 nagyságrend –, mely kétirányú hőáram-korlátozást okoz.

5.4. Tézisek

Pin-on-disc rendszerben, acél tárcsa felületen PETP és PA6 próbatestekkel, natúr és NPIII felületkezelt változatban végzett modell-kísérletek alapján:

1. Kimutattam, hogy nitrogén gázban végzett plazmaimmerziós ionimplantáció hatására a PETP alapmátrixon közel 100 nm vastagságban kialakult hidrogénezett szén-nitrid és nitrogén tartalmú felületi réteg felületi energiája nagyobb, mint az alapmátrixé. Mérésekkel és modellszámítással igazoltam, hogy a kialakult rétegszerkezet az alapanyag tribológiai viselkedését az alábbiak szerint befolyásolja:

1/a Nagyon kis *pv*-értéken (0,0075 MPa·ms^{-1}) a nitrogén PIII-val kezelt PETP száraz súrlódási tényezője kisebb, mint a kezeletlen PETP esetében, míg kent állapotban a kezeletlen PETP-éhez hasonló. Nagyobb *pv*-tényezőknél (közel 0,1 MPa·ms^{-1}) a megnövekedett adhéziós súrlódási komponens hatására a súrlódási tényezők mind száraz mind kent állapotban, a nitrogén PIII-val kezelt PETP nagyobb felületi energiájával összhangban, nagyobbak voltak a kezelt minták esetében, mint a kezeletlen változatnál.

1/b Modellkísérlettel és számítással igazoltam, hogy a csökkenő, illetve állandósult súrlódási ellenállás mellet bekövetkező súrlódási melegedés a PIII kezelt réteg kétirányú hőáram-korlátozó hatásának következménye, mivel a PIII kezelt PETP próbatestek súrlódásának adhéziós és deformációs komponensét a módosult súrlódási hőegyensúly jelentősen befolyásolja. A modell-rendszerben a hőátszármaztatást közel 33%-kal csökkentette a kezelt réteg, amely a hőreflexiót és abszorpciót együtt kezelő, látszólagos lineáris hővezetési tényező $\lambda_{PIII\text{-}PETP}$ értékét négy nagyságrenddel csökkentette a natúr PETP-hez képest.

2. Nitrogén PIII-val történt kezelés hatására, a PA6 műszaki műanyag felületi rétegének N-tartalma átlagosan 110 nm vastagságban megnövekedett, és a réteg C- és O- tartalma lecsökkent. Mérésekkel és számítással igazoltam, hogy a kezelt réteg felületi energiájának diszperzív és poláros komponensei megnőttek, mely jelentősen kihatott a PIII kezelt felületek tribológiai tulajdonságaira, az alábbiak szerint:

2/a Víz kenés esetén összefüggést mutattam ki a kezelt réteg megnövekedett poláris energia komponense (γ_{polar}) és a súrlódás csökkenése között. Mérésekkel igazoltam, hogy hidrofil kenőanyag (víz) alkalmazása az NPIII-val kezelt felületnél a súrlódási tényezőt nagyobb mértékben csökkentette, mint a natúr PA6 esetében.

2/b Méréseim alapján megállapítottam, hogy a PIII kezelt PA6 felületi réteg megnövekedett diszperzív energia komponense (γ_{disp}) képes javítani az apoláros kenőanyag hatását. Olaj-kifuttatásos vizsgálatokkal igazoltam, hogy a nagyobb γ_{disp} olajvisszatartó képessége csökkentette a súrlódást.

2/c Száraz súrlódásnál megállapítottam, hogy csak igen kis csapágyterhelési szinten (*pv*=0,025 MPa·ms^{-1}) és korlátozott ideig tekinthető kedvezőnek a PIII hatása, mivel az adhéziós kopási mechanizmus elindulása – mely a nagyobb felületi energiával

hozható összefüggésbe – jelentősen megnöveli a súrlódást is. A natúr PA6 próbatestekhez képest a tribológiai folyamatokat a PIII kezelés hatására létrejövő réteg hőáram-korlátozó hatása jelentősen befolyásolja. Megállapítottam a modell rendszerben, hogy a PIII kezelt réteg hőátszármaztatása 28%-kal romlott, ami a réteg hőreflexióját és abszorpcióját együtt kezelő látszólagos lineáris hővezetési tényezőjét ($\lambda_{PIII\text{-}PA6}$) a mérések és modellszámítások alapján négy nagyságrenddel csökkentette. A hőáram-korlátozás eredményeként létrejövő magasabb próbatest hőmérséklet a próbatest deformációs készségét, ezáltal a kontaktzóna tribológiai viselkedését jelentősen befolyásolta.

6. A kutatás eredményeinek hasznosítása

A 3. fejezetben ismertetett dinamikus tribológiai modellezés, és a DIN 50322 szabvány szerinti VI. vizsgálati kategória kiterjesztése a megtervezett és elkészített dinamikus tribotesztterrel az alábbi hasznosításokat tette lehetővé:

- a tribológiai kutatás és dinamikus modellezés, melyet a Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Karán kívül több hazai és külföldi partner intézmény is használta és használja (BME, Óbudai Egyetem, Miskolci Egyetem, Széchenyi István Egyetem, University Gent, Universitatea De Nord, Baia Mare),
- a tribológia tantárgy oktatásának laborgyakorlatai a graduális és posztgraduális képzésekben, hazai (SZIE, BME) és nemzetközi szinten (ERASMUS, CEEPUS kurzusok),
- ipari partnerek támogatása anyagfejlesztési programokban (Innovációs Nagydíj nyertes polimer kompozit család fejlesztésénél).

A 4. fejezetben feltárt polimer-súrlódási törvényszerűségek hasznosítása:

- az eredmények publikáltak és szabad hozzáférésűek, így közvetlenül a mérnöki gyakorlatban alkalmazhatók: pl. a kutatást támogató Quattroplast Kft a végfelhasználó partnerei részére a polimer gépelem tervezésnél, anyagkiválasztásnál használja, de több más, külföldi partner is (pl. Proned Control Slr) használja gépelem tervezéshez,
- az oktatási anyagok korszerűsítésénél, pl. a SZIE Gépészmérnöki Kar, „Polimertechnológiák” tantárgy keretében, az Universitatea De Nord, Baia Mare a „Maintenace of Machinery” tantárgy keretében használja az információkat.

Az 5. fejezetben bemutatott, NPIII felületkezelt polimerek kutatási eredményeinek hasznosítása:

- a további alkalmazási lehetőségek kutatásához szükséges kísérleti rendszerek megtervezésének támogatása,
- extrudált PA6 és PETP gépelemek tervezése finommechanikai, irodatechnikai és mechatronikai rendszerekben, a súrlódó kapcsolatok optimálásának lehetősége,
- polimertribológiai oktatási anyagok korszerűsítése,
- műszaki műanyagokhoz használt nitrogén plazmaimmerziós ionimplantációs eljárás – melyből szabadalom is született – további fejlesztési elképzeléseinek támogatása.

7. Az értekezés témakörében megjelent fontosabb publikációk

A 3. 4. és 5. fejezetben tárgyalt saját kutatási tevékenységhez kapcsolódóan, jóval több, mint 100 publikáció került feltöltésre az MTMT adatbázisban. A jelentősebbnek ítélt hazai és nemzetközi folyóirat publikációk az alábbiak:

- **Kalácska G.** (2013): An engineering approach to dry friction behaviour of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties. EXPRESS Polymer Letters Vol.7, No.2 pp. 199–210. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2013.18

- **Kalácska G.,** Zsidai L., Keresztes R., Tóth A., Mohai M., Szépvölgyi J. (2012): Effect of nitrogen plasma immersion ion implantation of polyamide-6 on its sliding properties against steel surface. Wear 290-291. pp. 66-73. DOI: 10.1016/j.wear.2012.05.011

- Sukumaran J., Ando M., De Baets P., Rodriguez V., Szabadi L., **Kalacska G.,** Paepegem, V. (2012): Modelling gear contact with twin-disc setup. Tribology International ,Volume 49, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.12.007

- **Kalácska G**., Zsidai L., Kereszturi K., Mohai M., Tóth A. (2009): Sliding tribological properties of untreated and PIII- treated PETP. Applied Surface Science Vol. 255, Issue 11, pp. 5847 -5850. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.01.017

- Wittenberghe J.V., Ost W., Rezaei A., DeBaets P., Zsidai L., **Kalacska G.** (2009): Test setup for friction force measurements of large-scale composite bearings. Wiley Interscience. Experimental Techniques. Volume 33, Issue 1. pp. 45 – 50. DOI: 10.1111/j.1747-1567.2008.00371.x

- **Kalácska G. (**2008): Abrasive wear of polymer/steel gear drives. Progress in Agricultural Engineering Sciences 4 (1), pp. 1-26. DOI: 10.1556/Progress.4.2008.1

- Keresztes R., **Kalácska G.**, Zsidai L., Eberst O. (2008): Abrasive wear of polymer-based agricultural machine elements in different soil types. Cereal Research Communications 36 (SUPPL. 5), pp. 903-906. DOI: 10.1556/CRC.36.2008.Suppl.2

- **Kalácska, G.** (2008): Laboratory modelling of abrasive wear effects of soils. Cereal Research Communications 36 (SUPPL. 5), pp. 907-910. DOI: 10.1556/CRC.36.2008.Suppl.2

- Keresztes R., **Kalácska G**. (2008): Polimer/acél fogaskerekek súrlódása. Műanyag és Gumi. 45.évfolyam, 6.szám. pp. 236-242.

- Samyn P., DeBaets P., Keresztes R., Zsidai L., **Kalacska G**., Kislinder E., Kozma M. (2007): Influence of cylinder-on-plate or block-on-ring sliding configurations on friction and wear of pure and filled engineering polymers. Tribo Test. Volume 13. Issue 2, pp. 83-100. DOI: 10.1002/tt.35

- Samyn P., **Kalacska G**., Keresztes R., Zsidai L., De Baets P. (2007): Design of a tribotester for evaluation of polymer components under static and dynamic sliding conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology. Vol. 221 No. 6, pp. 661-674. DOI: 10.1243/13506501JET266

Kalácska G., Keresztes R., Kozma M. (2006): Research of friction properties on polymer/steel gears. Hungarian Agricultural Engineering. N.19/2006. Hungarian Academy of Sciences. pp. 12-15.

Zsidai L., **Kalácska G**., Pálinkás I., Ost W. (2006): Modular development of dynamic tribological test rig. Hungarian Agricultural Engineering. N.19/2006. Hungarian Academy of Sciences. pp. 15-18.

- Kalácska G., Keresztes R., Kozma M., Ost W. (2006): Dinamikus tribológiai rendszerek III. A polimer / acél fogaskerekek súrlódásának további kutatási eredményei. = Műanyag és Gumi. 43.évfolyam, 11.szám. pp. 449-452.

Kalácska G., Keresztes R., Zsidai L., Eberst O., Pop S., Kozma M., DeBaets P. (2005): Dinamikus tribológiai rendszerek II. Polimer-acél fogaskerék hajtások túlterheléses kopása. Műanyag és Gumi. 42. évfolyam, 11.szám. pp 413-422.

Zsidai L., Samyn P., Vercammen K., Van Acker K., Kozma M., **Kalácska G.**, DeBaets P. (2004): Friction and Thermal Effects of Engineering Plastics Sliding Against Steel and DLN-Coated Counterfaces. Tribology Letters 17 (2). Plenum Publishing Corporation. pp. 269-288. DOI: 10.1023/B:TRIL.0000032453.09366.d4

Keresztes R., **Kalácska G.**, Eberst O. (2004): Dinamikus tribológiai rendszerek – polimer fogaskerekek súrlódása I. Műanyag és Gumi. 41. évfolyam, 12.szám. pp. 472- 480 .

Keresztes R., Zsidai L., **Kalácska G**. (2002): Műszaki műanyagok dinamikus tribológiai vizsgálata I. Dinamikus hatások, módszer, anyagok. Műanyag és Gumi. 39. évfolyam, 11. szám. pp. 357-365.

Keresztes R., Zsidai L., **Kalácska G**. (2002): Műszaki műanyagok dinamikus tribológiai vizsgálata II. Eredmények és következtetések. Műanyag és Gumi. 39. évfolyam, 12. szám. pp. 393-400.

DeBaets P., Van Parys F., **Kalacska G. (**2002): The friction and wear of different polymers under high load conditions. Journal of Snthetic Lubrication 18 , pp. 109-118. Elsevier.

L. Zsidai, P. De Baets, P. Samyn, **G. Kalacska**, A.P. Van Peteghem, F. Van Parys (2002): The tribological behaviour of engineering plastics during sliding friction investigated with small-scale specimens. WEAR 253, Issue 5-6, pp. 673-688. Elsevier. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00149-7

Zsidai L., **Kalácska G.**, Vercammen K., Acker K., Meneve J., DeBaets P. (2001): Műszaki műanyagok súrlódása és kopása gyémántszerű karbonbevonaton és acél felületen mérve. I. Műanyag és Gumi. 38. évf. 10. szám. pp. 383-390.

Zsidai L., **Kalácska G.**, Vercammen K., Acker K., Meneve J., DeBaets P. (2001): Műszaki műanyagok súrlódása és kopása gyémántszerű karbonbevonaton és acél felületen mérve. II. Műanyag és Gumi. 38. évf. 11. szám. pp. 427-432.

Keresztes R., Zsidai L., **Kalácska G. (**2001): Polimer felületek adhéziós vizsgálata. Műanyag és Gumi. 38. évf. 12. szám. pp. 448-453.

Zsidai L., **Kalácska G**., DeBaets P. (2000): Korszerű műszaki műanyagok tribológiai tulajdonságainak kutatása, kisméretű próbatestek csúszósúrlódás vizsgálatával. Műanyag és Gumi. 37. Évfolyam, 11. szám. pp. 383-389.

G. Kalácska, L. Zsidai, M. Kozma, P. De Baets (1999): Development of tribological test-rig for dynamic examination of plastic composites. Hungarian Agricultural Engineering. N.12/1999. Hungarian Academy of Sciences. pp. 78-79.

DeBaets P., **Kalacska G**., Strijckmans K., Van De Velde F., Van Peteghem A.P. (1998): Experimental study by means of Thin Layer Activation on humidity influence on the fretting wear of steel surfaces. Wear, 216, Issue 2, pp.131-137. DOI: 10.1016/S0043-1648(97)00189-0,

De Baets P., **Kalacska G**., Strijckmans K. (1997): The influence of humidity on the fretting wear of steel surfaces using thin layer activation. Journal of Tribology - Transactions of the ASME 119 (4), pp. 840-845. DOI: 10.1115/1.2833894

8. A kutatási tevékenységet támogató programok

A tribológiai kutatási tevékenységre, az eredmények publikálására az alábbi támogatásokat nyertem el:

- OTKA W 015376: Nagyterhelésű súrlódások.... témakör (1995)
- OTKA U 18661: Nagyterhelésű súrlódások…. témakör, publikációs (1995)
- OMFB 88491/97: Fretting kutatás.... témakör (1997)
- OTKA U 24354: Fretting …. témakör, publikációs (1997)
- OTKA F024080: Lineáris csúszósúrlódások…. (1997-2000)
- OMFB TéT Flamand – Magyar, B-9/98, Önkenő szerkezeti anyagok…. témakör (1998-2001)
- OTKA T 032590: Korszerű műszaki műanyagok…. témakör (2000-2002)
- OTKA U 044629: Dinamikus tribológia vizsgálatok…. témakör, publikációs (2003)
- OTKA T 042511: Önkenő kompozitok…. témakör (2003-2006)
- OMFB TéT Flamand – Magyar, B-1/04, HPM és kompozitjaik tribológiai kutatása témakör (2005-2006)
- INNOCSEKK 111/2006. Poliamid 6 mikro-kompozitok fejlesztése és vizsgálata. Egyetemi kutatócsoport vezetése konzorciumon belül. (2006-2007)
- OTKA NI 62729: Három önálló kutatócsoport együttműködése konzorciumban. Polimer, kerámia és kompozit anyagok súrlódása és tönkremenetele témakör. A SZIE kutatócsoport vezetőjeként. (2006-2008)
- GVOP KKV-05/3-0233: Új generációs öntött poliamid termékcsalád, nanokompozitok fejlesztése…. Konzorciumi partnerként, a SZIE kutatócsoport vezetőjeként. (2006-2008)
- A Korszerű Technológiákért Alapítvány, KTA-010: Polimerek és kompozitok forgácsolásának sajátosságai…. témakör. (2010-2013)

valamint az alábbi programok részeként:

- RUG/BOZF 011135921992 Opstellen van een model voor fretting slijtage….. Promotor: C. Dekoninck, Belgium (1992-1996)
- NFWO G.0099.95 Onderzoek met behulp van DLA van slijtage en materiaaloverdracht bij het fretting proces… Promotor: C. Dekoninck, R. Dams, Belgium (1995-1998)
- BIL98/72 Heavily loaded and not oil based lubricated tribological systems… Promotoren: P. De Baets (RUG), K. Vercammen, VITO (Belgium) (1998-2001)
- BOF - BILA 011S1905. Tribological research of high performance self-lubricating polymers… Promotor: P. De Baets, G. Kalacska (2005-2006)
- OTKA-NKTH K67741. Műszaki műanyagok részecskesugaras felületmódosítása. Témavezető: Dr. Tóth András (2007-2012)

Felhasznált irodalom

A

- Allen C., Bloyce A., Bell T. (1996): Sliding wear behaviour of ion implanted ultrahigh molecular weight polyethylene against a surface modified titanium alloy Ti-6Al-4V. Elsevier, Tribology International, 29, pp 527-534.

- Arnaud A. (1997): Industrial production of coated glass: Future trends for expanding needs. Journal of Non-Crystalline Solids, 218, pp 12-18.

- Anders A. (2004): Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim.

- Archard J.F. (1953): Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics, 24, pp 981-988.

- Attia M.H., Ko P.(1985): On the thermal aspect of fretting wear temperature measurement in the subsurface layer. Wear of Materials, pp 287-292.

B

- Baba K., Hatada R. (2006): Deposition of diamond-like carbon films on polymers by plasma source ion implantation. Thin Solid Films, 506–507, pp 55-58.

- Barber J.R. (1973): Indentation of a semi-infinite solid by a hot sphere. International Journal of Mechanical Sciences, 15, pp 813–819.

- Barreca F., Mezzasalma A. M., Mondio G., Neri F., Trusso S., Vasi C. (2000): Optical constants of CNx thin films from reflection electron energy loss spectroscopy. Thin Solid Films, 377-378, pp 631-634.

- Bartenev G.M, Lavrentev V.V. (1981): Friction and wear of polymers. Elsevier; 1981, p 212.

- Bely V.A., Sviridenok A.I., Petrokovets M.I., Savkin V.G. (1982): Friction and wear in polymer-based materials. Pergamon Press, p 416.

- Berthier Y. (2001): Background on friction and wear. Handbook of Materials Behaviour Models, Chapter 8, Lemaitre Academic Press, 2001, pp 676-699.

- Bertóti I. (2003): A felületmódosítás korszerű módszerei, In: Műszaki felülettudomány és orvosbiológiai alkalmazásai. (Bertóti, I., Marosi Gy., Tóth, A., szerk.), B+V Lap és Könyvkiadó Kft, pp 95-114.

- Bhushan B. (2001): Modern tribology handbook. Volume One, Volume Two CRC Press, LLC.

- Blau P.J. (1989): Friction and wear transitions of materials. New York: Noyes Publication.

- Blau P.J. (2009): Friction science and technology: from concepts to applications. CRC Press, Taylor and Francis group, Second Edition.

- Briscoe B.J. (1986): Interfacial friction of polymer composites. General fundamental principles. In (ed. Klaus F): Friction and wear of polymer composites. Elsevier, pp 25-29.

- Briscoe B.J. (1992). Friction of organic polymers. In (ed. Singer I.L., Pollok H.M.): Fundamentals of friction: macroscopic and microscopic processes, Kluwer Academic Publishers, pp 167-182.

- Briscoe B.J., Fiori L., Pelillo E. (1998): Nano-indentation of polymeric surfaces. Journal of Physics D: Applied Physics, 31, pp 2395–2405.

- Bowden F. P., Tabor D. (1950). Friction and Lubrication of Solids. Part 1, Clarendon Press, Oxford.

- Bowden F. P., Tabor D. (1964): Friction and lubrication of solids. Clarendon Press, p 544.

- Bowers R.C., Clinton W.C., Zisman W.A. (1953): Frictional behaviour of polyethylene, polytetrafluorethylene and halogenated derivatives. Lubrication Engineering, 9, pp 204–209.

- Böhm H., Betz S., Ball A. (1990): The wear resistance of polymers. Tribology International, 23, 6, December 1990, pp 399–406.

- Buckley D.H. (1981): Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication. Elsevier, 1981, p 631.

- Byett J. H., Allen C. (1992): Dry sliding wear behaviour of polyamide 66 and polycarbonate composites. Tribology International, 25, 4, pp 237–246.

C

- Czichos H. (1987): Tribology- A System Approach to the Science and Technology of Friction. Lubrication and Wear, Elsevier, Amsterdam.

- Czichos H., Klaffke D., Santner E., Woydt M. (1995): Advances in tribology: the materials point of view. Wear, 190, 2, pp 155–161.

- Choy K. L. (2003): Chemical vapour deposition of coatings. Progress in Materials Science, 48, pp 57-170.

D

- DeBaets P. (1994): Wear simulation of a sliding system by means of large-scale specimen testing. Wear, 173, pp 65-74.

- DeBaets P. (1995): Karakterisatie van fretting slijtage van ongesmeerde stalen oppervlakken aan de hand van dunne laag activering. Ph.D. University of Gent.

- DeBaets P. (1995b): Comparison of the wear behaviour of six bearing materials for a heavily loaded sliding system in seawater. Wear, 180, pp 61-72.

- DeBaets P., Strijckmans K. (1996): The quantification of microscopic wear amount of steel surfaces with thin layer activation. European Journal of Mechanical Engineers, 41 (2), p 67.

- DeBruyne F. (1999): Technical training on engineering plastics. International training course, DSM EPP, Tielt, Belgium.

- DeBruyne F. (2004): Plastics in practice. Plenary session presentation. International Applicon Congress of Quadrant EPP, Brugge.

- Denes F.S., Manolache S. (2004): Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science. Progress in Polymer Science, 29, pp 815-885.

- Derjagin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P. (1975): Effect of contact deformation on the adhesion of particles. Journal of Colloid and Interface Science, 53, pp 314–326.

- Deryagin B.V., Krotova N.A., Smilga V.P. (1978): Adhesion of solids. New York: Consultant Bureau, 1978.

- DIN 50322 (1986). Kategorien der Verschleißprüfung, Deutsche Norm 50322, Beuth Verlag.

- Dowson D. (1970): History of Tribology. Longman, New York.

- DSM EPP (2000): Plastic Engineering Training. CAMSAD CD, Tielt, Belgium.

E

- Eleőd A., Balogh T., Baillet L., Berthier Y. (2000): Characterisation of the TTS and numerical modelling of the particle detachment. EUROMAT 2000, Advances in Mechanical Behaviour, Plasticity and Damage, 1, Elsevire, Tours, France, pp 555-556.

- Eleőd A., Baillet L., Berthier Y., Törköly T. (2002): Deformability of the near surface layer of the first body. Proceedings of the 20th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Tribology Research and Design for Engineering Systems, Elsevier Tribology Series 41, Leeds, pp 123-132.

F

- Farkas I. (1999): Számítógépes szimuláció. Szent István Egyetem, Gödöllő, Egyetemi jegyzet.

- Farkas I. (2005): Folyamatirányítás. Szent István Egyetem, Gödöllő, Egyetemi jegyzet.

Fayeulle S.,Vannes A.B.,Vincent L.(1993): Tribologically transformed structures formed during fretting wear of various alloys. 6th International congress on tribology, Budapest, 5, pp 187-192.

- Fink D. (2004): Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Springer, Berlin.

- Flom D.G., Porile N.T. (1955/a): Effect of temperature and high-speed sliding on the friction of teflon on teflon. Nature, 175, pp 682–685.

- Flom D.G, Porile N.T. (1955/b): Friction of teflon sliding on teflon. Journal of Applied Physics, 26, pp 1080–1092.

- Fort T. (1962): Adsorption and boundary friction of polymer surfaces. Journal of Physical Chemistry, 66, pp 1136–1143.

- Fouassier J.P., Rabek J. F., (1990): Lasers in Polymer Science and Technology: Applications.1-4, CRC Press, Boca Raton.

- Fraidenraich N., Vilela O. C. (2000): Exact solutions for multilayer optical structures: Application to pv modules. Solar Energy, 69, 5, pp 357–362.

- Franklin S. E., Baranowska J. (2007): Conditions affecting the sliding tribological performance of selected coatings for high vacuum bearing applications. Wear, 263, pp 1300-1305.

- Friedrich K. Flöck J., Váradi K., Néder Z. (1999): Numerical and finite element contact thermal analysis of real composite-steel surfaces in sliding contact. Wear, 225-229, pp 368-379.

- Friedrich K., Váradi K., Goda T., Giertzsch H. (2002): Finite element contact, strain and stress analysis of differently oriented fibre-reinforced composites subjected to a sliding steel asperity. Part 2, Parallel and anti-parallel fibre orientations, Journal of Material Sciences, 37, pp 3497-3507.

- Fu R.K.Y., Cheung I.T.L., Mei Y.F., Shek C.H., Siu G.G., Chu P.K., Yang W.M., Leng Y.X., Huang Y.X., Tian X.B., Yang S.Q. (2005): Surface modification of polymeric materials by plasma immersion ion implantation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, 237, pp 417-421.

G

- Gibson C.T., Watson G..S, Mapledoram L.D., Kondo H., Myhra S. (1999): Characterisation of organic thin films by atomic force microscopy: application of force vs. distance analysis and other modes. Applied Surface Science, 144–145, pp 618–622.

- Goda T., Váradi K., Friedrich K., Giertzsch H. (2002): Finite element contact, strain and stress analysis of differently oriented fibre-reinforced composites subjected to a sliding steel asperity. Part 1, Normal fibre orientation, Journal of Material Sciences, 37, pp 1575-1583.

- Godet M. (1984): The body approach. A mechanical view of wear. Wear, 100, pp 437–52.

- Gordon J.M., DesJardins J.D, LaBerge M., Gevaert M.R. (2005): The quantification of physiologically relevant cross-shear wear phenomena on orthopaedic bearing materials using the MAX-Shear wear testing system. ASME, Journal of Tribology, 127, pp 740-749.

- Greenwood J.A., Tripp J.H. (1971): The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 185, pp 625-633.

H

- Hirvonen J. K. (1984): Ion Implantation and Ion Beam Processing of Materials. North Holland, New York.

- Hurricks P.L. (1970): The mechanism of fretting wear - a review. Wear, 15, 1970, pp 389-409.

- Hutchings I.M. (1992): Tribology: friction and wear of engineering materials. London: Edward Arnold; 1992, p 273.

I

- Igarashi A., Hayashi H., Yamanobe T., Komoto T. (2006): Structure and morphology of diamond-like carbon coated on nylon 66/poly(phenylene ether) alloy. Journal of Molecular Structure, 788, pp 238-245.

- Ikeyama M., Miyagawa S., Nakao S., Choi J., Miyajima T. (2007): DLC coatings on inner walls of PET bottles by a simplified PBII technique. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, 257, pp 741-745.

- Iserrmann R. (2005): Mechatronic Systems Fundamentals. Springer, (ISBN 185233906).

- Israelachvili J.N. (1992): Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours. Surface Science Reports, 14, 3, pp 109–159.

- Iwabuchi A., Kato K., Kayaba T. (1987): Fretting properties of SUS304 stainless steel in a vacuum environment. Wear, 110, 1987.

J

- Jain V.K., Bahadur S. (1979): Surface topography changes in polymer–metal sliding. Proceedings of International Conference on Wear of Materials, Dearborn, pp 581–588.

- Johnson K.L, Kendall K., Roberts A.D. (1971): Surface energy and the contact of elastic solids. Proceedings of the Royal Society A - Mathematical, Physical & Engineering Sciences A, 324, pp 301–313.

- Johnson K.L. (1985): Contact Mechanics. Cambridge University Press, UK.

- Johnson K.L, Greenwood J.A. (1997): An adhesion map for the contact of elastic spheres. Journal of Colloid and Interface Science, 192, pp 326–33.

- Jost H.P. (1993): Modern Tribology – Past and Future. EUROTRIB 93, 6th International Congress on Tribology, Proceedings, part1, Budapest.

K

- Kalácska G. (ed) (1997): Műszaki polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban. 3C-Grafika Kiadó.

- Kalácska G., Zsidai L., Kozma M., De Baets P. (1999): Development of tribological test-rig for dynamic examination of plastic composites. Hungarian Agricultural Engineering, 12/1999, Hungarian Academy of Sciences, pp 78-79.

- Kalácska G., Zsidai L., Kereszturi K., Mohai M., Tóth A. (2009): Sliding tribological properties of untreated and PIII-treated PETP. Applied Surface Science, 255, pp 5847-5850.

- Kalácska G. (2009): Trends in tribology research. Plenary presentation. Trans-Trio-Sciensec Workshop. Presentation, manuscript, Szent István University, Gödöllő.

- Kalácska G., Zsidai L., Keresztes R., Tóth A., Mohai M., Szépvölgyi J. (2012): Effect of nitrogen plasma immersion ion implantation of polyamide-6 on its sliding properties against steel surface. Wear, 290-291, pp 66-73.

- Kato K. (2000): Wear in relation to friction - a review. Wear, 241, pp 151–157.

- Keresztes R., Kalácska G., Zsidai L., Eberst O. (2008): Abrasive wear of polymer-based agricultural machine elements in different soil types. Cereal Research Communications, 36, pp 903 – 907.

- Keresztes R. (2009): Műszaki műanyag/acél csúszópárok tribológiai kutatása: polimer/acél fogfelületek súrlódása. Doktori (Ph.D.) értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő.

- Kereszturi K., Tóth A., Mohai M., Bertóti I. (2008): Surface chemical and nanomechanical alterations in plasma immersion ion implanted PET. Surface and Interface Analysis, 40, pp 664-667.

- Khan M. S., Franke R., Gohs U., Lehmann D., Heinrich G. (2009): Friction and wear behaviour of electron beam modified PTFE filled EPDM compounds. Wear, 266, pp 175–183.

- Kim Y., Lee Y., Han S., Kim K.-J. (2006): Improvement of hydrophobic properties of polymer surfaces by plasma source ion implantation. Surface and Coatings Technology, 200, pp 4763-4769.

- King R.T., Tabor D. (1953): The effect of temperature on the mechanical properties and the friction of plastics. Proceedings of the Physical Society, Section B, 66, pp 728–737.

- Kondyurin A., Volodin P., Weber J. (2006): Plasma immersion ion implantation of Pebax polymer. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, 251, pp 407-412.

- Kondyurin A., Bilek M. (2008): Ion Beam Treatment of Polymers. Application Aspects from Medicine to Space, Elsevier, Amsterdam.

- Kovalev A., Shulga H., Lemieux M., Myshkin N., Tsukruk V.V. (2004): Nanomechanical probing of layered nanoscale polymer films with atomic force microscopy. Journal of Materials Research, 19(3), pp 716–728.

- Kozma M., Kislinder E. (1999a): Poliamid és poliacetál súrlódó elemek tribológiai tulajdonságainak összehasonlító vizsgálata. Műanyag és Gumi, 36, 11, pp 326-331.

- Kozma, M., Kislinder, E. (1999b): Műanyagok kopásának vizsgálata. Műanyag és Gumi, 36, 11, pp 355-362.

- Kozma Mihály (2001): Tribológia. Műegyetemi Kiadó, Budapest.

- Kragelszkij I.W. (1971): Reibung und Verschleiß. VEB Verlag Technik, Berlin, pp 24-33.

- Kragelszkij I.V. (1982): Friction and wear. Pergamon Press, p 458.

- Kragelszkij I.V. Mihin N.M. (1987): Gépszerkezetek súrlódás- és kopásszámítása. Műszaki Könyvkiadó.

L

- Lancaster J.K. (1969): Relationships between the wear of polymers and their mechanical properties. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1968–1969,183, pp 98–106.

- Lee Y., Han S., Lim H., Kim Y., Kim H. (2002): Surface analysis of polymers electrically improved by plasma-source ion-implantation. Analitical and Bioanalitical Chemistry, 373, pp 595-600.

- Lievens H. (1995): Wide web coating of complex materials. Surface and Coatings Technology, 76-77, pp 744-753.

- Ludema KC, Tabor D. (1966): The friction and viscoelastic properties of polymeric solids. Wear, 9, pp 329–348.

M

- Makinson K.R., Tabor D. (1964): The friction and transfer of polytetrafluoroethylene. Proceedings of the Royal Society A - Mathematical, Physical & Engineering Sciences, A, 281, pp 49–61.

- Mattox D.M. (1998): Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. Elsevier, Amsterdam.

- Milz W.C., Sargent L.E. (1955): Frictional characteristic of plastics. Lubrication Engineering, 11, pp 313–317.

- Moore D.F. (1972): The friction and lubrication of elastomers. Pergamon Press, p 256.

- Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Chizhik S.A. (1998): Simulation of real contact in tribology. Tribology International, 31, pp 79–86.

- Myshkin N.K., Grigoriev A.Y., Dubravin A.M., Komkov O.Y., Spencer N.D., Tosatti M. (2004a): Experimental equipment for interfacial force and friction measurements of micro scale samples. Tribology and lubrication engineering, In: 14th International Colloquium Tribology, Esslingen, Germany, 2004, pp 73–78.

- Myshkin N.K., Petrokovets M.I. (2004b): Mechanical behavior of plastics: surface properties and tribology. In (ed. Totten G.E. Liang H.) Mechanical tribology, materials, characterization, and applications. Marcel Dekker, Chapter 3, 2004, pp 57–94.

- Myshkin N.K., Petrokovets M.I., Kovalev A.V. (2005): Tribology of polymers: friction, wear, and mass-transfer. Tribology International, 38, pp 910-921.

O

- Odfalk M.,Vingsbo O. (1989):Influence of normal force and frequency in fretting. 35th STLE/ASME Tribology conference, Fort Lauderdale.

- Oloffson B., Gralben N. (1947): Measurement of friction between single fibers. Textile Research Journal, 17, pp 488–496.

- Ost W. (2006): Tribology and Vibration of Wet Clutches. PhD dissertation, Ghent University.

- Ost W., De Baets P., Loccufier M., Van Autrève S. (2010): Torsional vibrations of wet clutches: influence of mechanical parameters. Meccanica, 45, pp 341-353.

- Owens D.K., Wendt R.C. (1969): Estimation of the surface free energy of polymers. Journal of Applied Polymer Science, 13, pp 1741-1747.

P

- Pauleau Y. (1995): Materials and Processes for Surface and Interface Engineering. Kluwer, Dordrecht.

- Pendlebury R.E.(1988): Formation, readhesion and escape of wear particles in fretting and sliding wear in inert and oxidizing environments. Wear, 125, pp 3-23.

Q

- Quintelier J. (2007): Online wear monitoring of polymer matrix composites with advanced measurement technics. PhD dissertation, Ghent University, Belgium.

R

- Rajesh J. J., Bijwe J., Tewari U. S. (2002): Abrasive wear performance of various polyamides, Wear, 252, 9–10, pp 769–776.

- Rees B.L. (1957): Static friction of bulk polymers over a temperature range. Research, 10, pp 331–338.

S

- Sakudo N., Mizutani D., Ohmura Y., Endo H., Yoneda R., Ikenaga N., Takikawa H., (2003): Surface modification of PET film by plasma-based ion implantation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, 206, pp 687-690.

- Samyn P., De Baets P., Van Paepegem W., Degrieck J., Van Schepdael L., Gerber A., Leendertz J.S. (2006): Experimental study of the friction and wear behaviour of a polymer disc/primer coating combination used in ball-joints by means of large-scale testing. Wiley. Tribotest, 12, 2, pp 119–131.

- Samyn P. (2006): Large-scale specimen testing on friction and wear of pure and internally lubricated cast polyamides. Wiley, Tribotest, 12, 3, pp 237–256.

- Samyn P., Tuzolana T.M. (2007): Effect of test scale on the friction properties of pure and internal-lubricated cast polyamides at running-in. Elsevier. Polymer Testing, 26, 5, pp 660–675.

- Santner E., Czichos H. (1989): Tribology of polymers. Tribology International, 22, 2, pp 103–109.

- Sato J., Shima M., Takeuchi M.(1986): Fretting wear in seawater. Wear, 110, pp 227-237.

- Sato J., Shima M., Sugawara T., Tahara A.(1988): Effect of lubricants on fretting wear of steel. Wear, 125, pp 83-95.

- Schallamach A. (1952): The load dependence of rubber friction. Proceedings of the Royal Society B, 65 (393), pp 658–61.

- Schallamach A. (1955): The velocity and temperature dependence of rubber friction. Proceedings of the Physical Society, Section B, 66, pp 1161–1169.

- Shooter K, Tabor D. (1952/a): The frictional properties of plastics. Proceedings of the Royal Society B, 65, p 661.

- Shooter K, Thomas R.H. (1952/b): Frictional properties of some plastics. Research 2, pp 533-539.

- Shulga H., Kovalev A., Myshkin N., Tsukruk V.V. (2004): Some aspects of AFM nanomechanical probing of surface polymer films. European Polymer Journal, 40, p 949.

- Sridharan K., Anders S., Nastasi M., Walter K.C., Anders A., Monteiro O.R., Ensinger W. (2004): Nonsemiconductor Applications of PIII&D. in: A. Anders (Ed.), Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp 553-636.

- Stachowiak G.W. (2005): Wear, Materials, Mechanisms and practice. Tribology in practice sereies. John Wiley, UK.

- Sviridenok A.I., Bely V.A., Smurugov V.A., Savkin V.G. (1973): A study of transfer in frictional interaction of polymers. Wear, 25, pp 301–318.

T

- Tanaka K, Uchiyama Y, Toyooka S. (1973): The mechanism of wear of PTFE. Wear, 23, pp 153–172.

- Tanaka K. (1984): Kinetic friction and dynamic elastic contact behavior of polymers. Wear, 100, pp 243–262.

Tewari U. S., Bijwe J., Mathu J. N., Sharma I. (1992): Studies on abrasive wear of carbon fibre (short) reinforced polyamide composites. Tribology International, 25, 1, pp 53–60.

- Tóth A. (1994): Polimerek felületmódosítása és felületi kémiai szerkezetük jellemzése röntgenfotoelektron-spektroszkópiával. Kandidátusi értekezés, MTA SZKKL.

- Tóth A., Bertóti I., Szilágyi E., Dong H., Bell T., Juhász A., Nagy P. M. (2000): Surface characterisation of ultra-high molecular weight polyethylene after nitrogen ion-implantation. Surface and Interface Analysis, 30, pp 434 - 438.

- Tóth A. (2003): Ortopédiai anyagok. In: „Műszaki felülettudomány és orvosbiológiai alkalmazásai. (Bertóti, I., Marosi G., Tóth, A., szerk.), B+V Lap- és Könyvkiadó Kft, pp 278-289.

- Tóth A., Mohai M., Ujvári T., Bertóti I. (2006a): Hydrogen plasma immersion ion implantation of ultra-high molecular weight polyethylene. Surface and Interface Analysis, 38, pp 898-902.

- Tóth A., Mohai M., Ujvári T., Bertóti I. (2006b): Advanced surface modification of ultra-high molecular weight poly(ethylene) by helium plasma immersion ion implantation. Polymers for Advanced Technologies, 17, pp 898-901.

- Tóth A., Bertóti I., Mohai M., Ujvári T. (2007): Surface modification of polyethylene by nitrogen PIII: Surface chemical and nanomechanical properties. Materials Science Forum, 537-538, pp 255-262.

- Tóth A. (2009): Effect of N PIII on engineering polymers. Trans-Trio-Sciences Workshop, Presentation, manuscript, Szent István University, Gödöllő.

- Tóth A., Kereszturi K., Mohai M., Bertóti I. (2010): Plasma based ion implantation of engineering polymers. Surface and Coatings Technology, 204, pp 2898-2908.

U

- Ueda M., Kostov K. G., Beloto A. F., Leite N. F., Grigorov K. G. (2004): Surface modification of polyethylene terephthalate by plasma immersion ion implantation. Surface and Coatings Technology, 186, pp 295-298.

- Unal H., Findik F. (2008): Friction and wear behaviours of some industrial polyamides against different polymer counterparts under dry conditions. Industrial Lubrication and Tribology, 60, 4, pp 195-200.

V

- Valasek I. (1996): Tribológiai kézikönyv. Tribotechnik Kft., Budapest.

- Vámos E. (1983): Tribológiai kézikönyv. Műszaki könyvkiadó, Budapest.

- Váradi K., Néder Z., Friedrich K., Flöck J. (1998): Numerical and finite element contact temperature analysis of real composite-steel surfaces in sliding contact. Tribology International, 31, pp 669-686.

- Vinogradov G.V, Bartenev G.M, Elkin A.I, Mikhailov V.K. (1970): Effect of temperature on friction and adhesion of crystalline polymers. Wear, 16, pp 358–368.

W

- Wang J., Huang N., Pan C. J., Kwok S.C.H., Yang P., Leng Y. X., Chen J. Y., Sun H., Wan G. J., Liu Z. Y., Chu P. K. (2004a): Bacterial repellence from polyethylene terephthalate surface modified by acetylene plasma immersion ion implantation–deposition. Surface and Coatings Technology, 186, pp 299-304.

- Wang J., Huang N., Yang P., Leng Y. X., Sun H., Liu Z. Y., Chu P. K. (2004b): The effects of amorphous carbon films deposited on polyethylene terephthalate on bacterial adhesion. Biomaterials 25, pp 3163-3170.

- Wang J., Chen J. Y., Yang P., Leng Y. X., Wan G. J., Sun H., Zhao A. S., Huang N., Chu P. K. (2006): In vitro platelet adhesion and activation of polyethylene terephthalate modified by acetylene plasma immersion ion implantation and deposition. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, 242, pp 12-14.

- Waterhouse R.B. (1972): Fretting corrosion. Pergamon Press, New York.

- Waterhouse R.B., Taylor D.E. (1974): Fretting debris and delamination theory of wear. Wear, 29, pp 337-344.

- Waterhouse R.B.(1984): Fretting wear. Wear, 100, pp 107-118.

- White N.S. (1956): Small oil-free bearings. The Journal of Research of the National Institute of Standards, 57, pp 185–189.

X

- Xu D., Karger-Kocsis J., Schlarb A. K. (2008): Rolling wear of EPDM and SBR rubbers as a function of carbon black contents: correlation with microhardness. Journal of Material Science, 43, pp 4330–4339.

Y

- Yamaguchi Y. (1990): Tribology of plastic materials. Amsterdam, Elsevier.

Z

- Zang X.,Zang C.,Zhu C.(1989): Slip amplitude effects and microstructural characteristics of surface layers in fretting wear of carbon steel. Wear, 134, pp 297-309.

- Zhang Z., Friedrich K. (2003): Artifical neural networks applied to polymer composites: a review. Composite science and Technology, 63, pp 2029-2044.

- Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. (1985): The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon, New York. Program available from http://www.srim.org

- Zum Gahr K.H. (1987): Microstructure and wear of materials. Tribology Series 10, Elsevier, Amsterdam.

ZS

- Zsidai L., Samyn P., Vercammen K., Acker K. V., Kozma M., Kalácska G., DeBaets P. (2004): Friction and thermal effects of engineering plastics sliding against steel and DLN-coated counterfaces. Tribology Letters, 17, pp 269-288.

- Zsidai L. (2005): Műszaki polimerek tribológiai kutatása különböző rendszerekben. Doktori (Ph.D.) értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő.

- Zsoldos G. (2012): UHMWPE-biopolimer felületének módosítása polimerizációs technológiákkal. Miskolci Egyetem, PhD értekezés.

Köszönetnyilvánítás

A több mint két évtizedes tribológiai kutatásaim kezdetét még egyetemi hallgatóként Dr.Pellényi Lajos és Dr.Valasek István alapozták meg, majd Dr.Kozma Mihály professzor úr nyújtott kiemelkedő segítséget.

A hazai és nemzetközi szinten formálódott, sok doktorandusznak kutatási lehetőséget biztosító tribológiai iskola egyik alappillére, a Dr.Patrick DeBaets (University Gent, Belgium) professzorral kialakított két évtizedes kooperáció.

Köszönetem fejezem ki azoknak a volt diplomatervező, TDK-s és doktorandusz hallgatóknak, akik tevékenyen bekapcsolódtak a kutatási munkákba. Külön köszönet Dr.Zsidai László, Dr.Keresztes Róbert, Dr.Andó Mátyás és Dr.Ebest Ottó kollégáimnak, volt PhD doktoranduszaimnak, akik aktív részvétele nélkül a kutatási projektek nem valósulhattak volna meg.

Nagy segítséget nyújtott Dr.Tóth András az MTA TTK AKI kutatója, aki a polimer felületmódosítás hazai szaktekintélye.

A DSM EPP, a Teraglobus Kft, a Quadrant EPP, a Quattroplast Kft folyamatos szakmai támogatása a mérnöki gyakorlatot hozta be kutató laboratóriumunkba. A Korszerű Technológiákért Alapítvány, Dr.Pálinkás István, a tribológiai eszközök karbantartásának és fejlesztésének a záloga. Szabó Lajos és Gódor Gábor segítsége a dinamikus triboteszter gyártásában, megépítésében nélkülözhetetlen volt.

Nevek nélkül köszönöm az összes segítőkész kollégámnak, barátaimnak, tanműhelyi dolgozóinknak a közreműködést.

Legfőképpen köszönettel tartozom feleségemnek és gyerekeimnek, akik „eltűrték a munkaidőre tekintettel nemlévő” tevékenységemet.

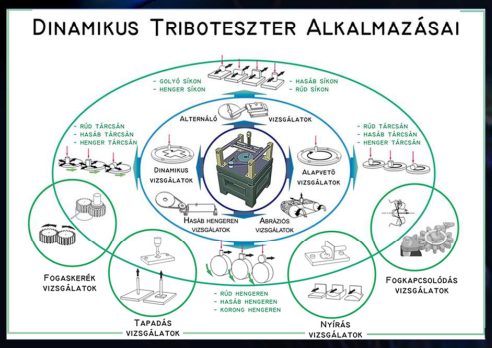
1. sz. melléklet. Tribológiai vizsgálatok folyamata

2. sz. melléklet. Dinamikus tribotesztер konstrukciója

Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet
Tribológiai Laboratórium

Dinamikus Triboteszter: konstrukció és mérési elvek

Fejlesztés szükségessége: tribológiai folyamatok jobb modellezése a DIN 50322 szabvány szerinti VI. vizsgálati kategóriában. A dinamikus hatások (csúszási sebesség-, normál terhelés-, hő és inercia hatások-, kenési állapot változás) reprodukálható programozása és figyelembe vétele.

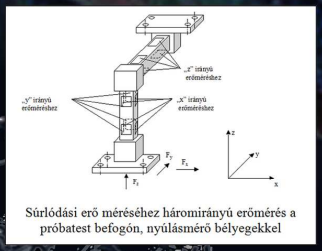


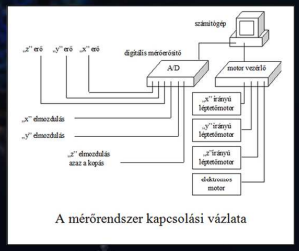
Mérési elv

Konstrukciós cél: Központi gépvázra szerelhető, különböző kontakt-forma és mozgás-szimulátor modulok kialakítása egy közös adatgyűjtő és feldolgozó mérőrendszerre illeszthetően.

Alap kialakítás: a központi gépváz egy pin-on-disc (tű-tárcsa) felépítményt tartalmaz, ahol a DIN 50322 szabvány VI. vizsgálati kategória szerinti egyszerű mérés végezhető forgó tárcsa és álló próbatest alkalmazásával. Lehetőség van fűtött tárcsafelület és/vagy kenőanyaggal ellátott tárcsafelület alkalmazására is. A rendszer méri a súrlódást, a kopást és deformációt, valamint a súrlódási hőmérsékletet.

A központi felépítmény működési tartományai		
terhelőerő, F_z [N]	I.	0 – 150
	II.	0 – 600
tárcsa kerületi sebesség, v [m/s]	I.	0 – 0,2
	II.	0 – 0,45
	III.	0 – 1
súrlódási sugár, R [mm]	0 – 140	
próbatest mozgatási sebesség, v_p [mm/s]	0 – 40	
elmozdulás, x [mm]	0 – 425	
elmozdulás, y [mm]	0 – 320	
elmozdulás, z [mm]	0 – 35	


Súrlódási erő méréséhez háromirányú erőmérés a próbatest befogón, nyúlásmérő bélyegekkel


A mérőrendszer kapcsolási vázlata

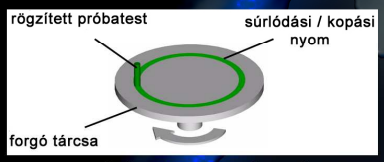
Felhasználási területek:
- *tribológiai alapjelenségek feltárása TDK, szakdolgozat és PhD kutatásokban*
- *magyar és nemzetközi, tribológai kutatási programok kiszolgálása*
- *ipari problémák modellezése*
- *konstrukciós fejlesztések támogatása*
- *anyagtudományi (pl. polimer és kompozitjaik fejlesztése) kutatások kiszolgálása*
- *műszaki felületek tribológiai értékelésének támogatása*

H-2103 Gödöllő, Páter Károly u. 1.
www.geti.gek.szie.hu
Telefon: +3628/ 522-949
Fax: +3628/ 522-000/1457

3. sz. melléklet. Pin-on-disc modul

Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet
Tribológiai Laboratórium

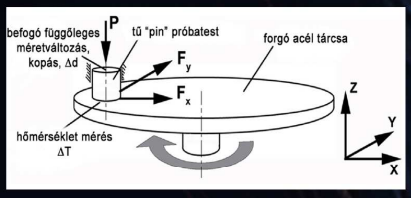
Dinamikus Tribotesztер: „pin-on-disc" modul



Alapmérés elrendezési vázlata

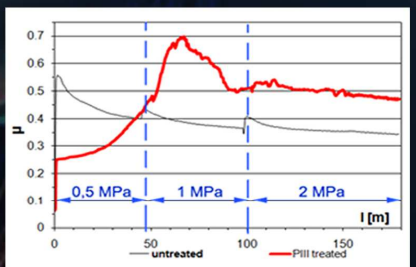
A „pin-on-disc" vagy „tű-tárcsa" mérés a VI. vizsgálati kategória egyik leggyakoribb elrendezési formája. Különböző anyagpárosítás és felületi kialakítás (mikrogeometria, felületi bevonatok) mellett a súrlódás, kopás és súrlódási melegedés mérhető. Egyszerű modell, mely könnyen reprodukálható, eltérő anyagok és tribológaiai rendszerek relatív összehasonlítására, alapjelenségek feltárására alkalmas.

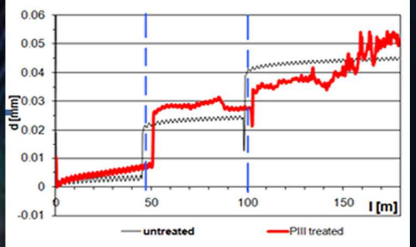
A Dinamikus Tribotesztер „pin-on-disc" modulja az alapmérési konfiguráció mellett további programozási lehetőséggel is rendelkezik, mely a terhelés és mozgáspálya változtatásával, dinamikus hatásokkal képes bővíteni a stabil csúszási modellt. A modul sajátossága, hogy a tárcsa fűthető, így különböző alaphőmérsékleti modellek is mérhetők.

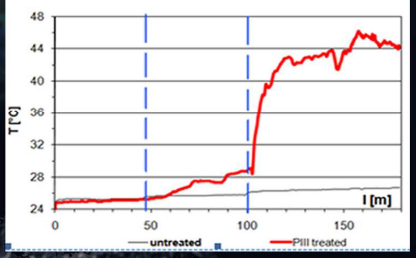


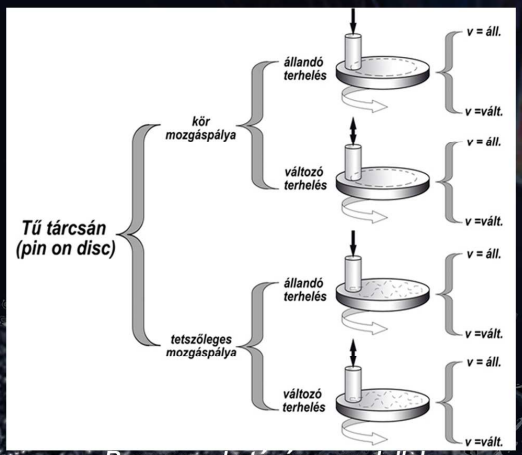
A próbatestre ható erők

$$F_s = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad [N]$$
$$P = F_z \quad [N]$$
$$\mu = \frac{F_s}{F_n} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z}$$









Programozhatóság a modullal:
terhelés és mozgásviszonyok

Minta-diagrammok:
Kezeletlen és plazmaimmerziós ionimplantációval (NPIII) kezelt PA6 mérési diagrammjai három terhelési szinten. (v=0,05 m/s, súrlódási tényező, kopás, súrlódási hőmérséklet)

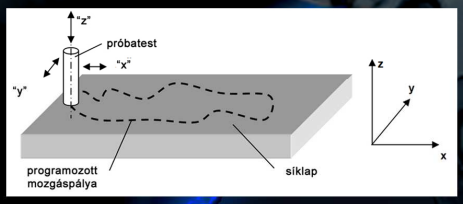
Felhasználás:
- Tribológiai alapkutatások, hazai és nemzetközi vonatkozásban,
- Anyag- és felületi bevonat fejlesztési projektek
- Ipari szakértések és egyéb megbízások
- Műszaki fejlesztések támogatása

H-2103 Gödöllő, Páter Károly u. 1.
www.geti.gek.szie.hu
Telefon: +3628/ 522-949
Fax: +3628/ 522-000/1457

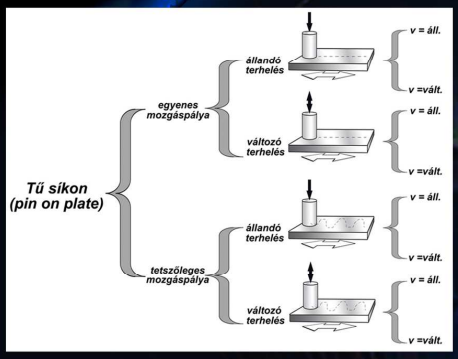
4. sz. melléklet. Dinamikus „pin-on-plate” modul

Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet
Tribológiai Laboratórium

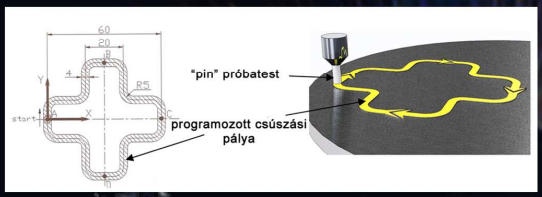
Dinamikus Triboteszter: dinamikus „pin-on-plate” modul



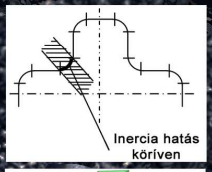
Elvi megvalósíthatóság



Programozhatóság a modullal: terhelés és mozgásviszonyok

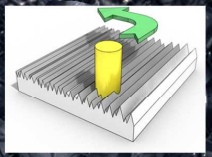


Körívekől és egyenes szakaszokból szerkesztett valós vizsgálati pálya



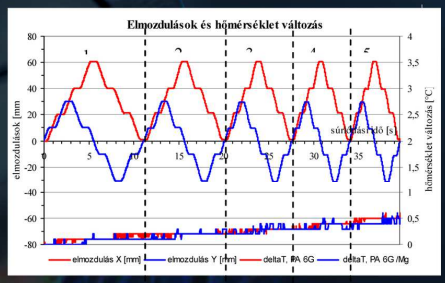
„m” tömeg mozgatásánál mért F súrlódási ellenállásból és Fn terhelésből:

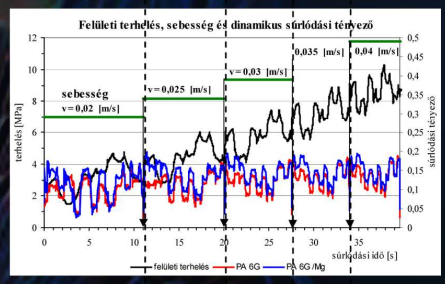
$$\mu = \frac{\sqrt{F^2 - m^2 \frac{v^4}{R^2}}}{F_n}$$

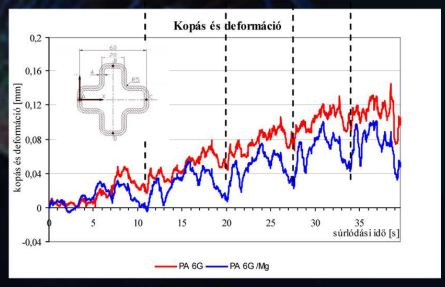


További lehetőség, a mikrogeometria hatásának tanulmányozása a tribológiai diagrammokban

Egyszerű próbatestek alkalmazásával a dinamikus hatások – sebesség és terhelésváltozás, inercia jelenségek – tribológiai következményei tanulmányozhatók reprodukálható módon. A dinamikus hatások programozhatók.







Mintadiagram:
a programozott pályán öt ciklusban mért súrlódás, kopás+ deformáció és súrlódási melegedés alakulása, öntött PA6 próbatestek száraz csúszása során, köszörült acél felületen

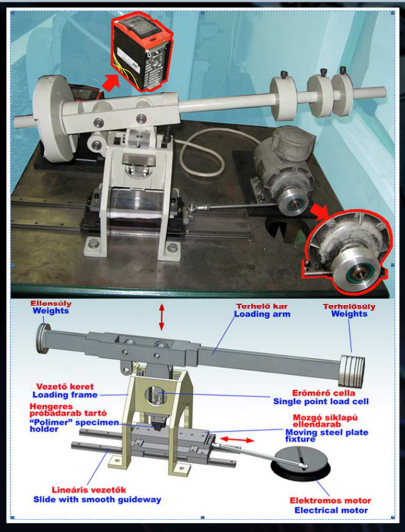
Felhasználás:
- Tribológiai alapkutatások, hazai és nemzetközi vonatkozásban,
- Anyag- és felületi bevonat fejlesztési projektek
- Ipari szakértések és egyéb megbízások
- Műszaki fejlesztések támogatása

H-2103 Gödöllő, Páter Károly u. 1.
www.geti.gek.szie.hu
Telefon: +3628/ 522-949
Fax: +3628/ 522-000/1457

5. sz. melléklet. Alternáló „reciprocating” modul

Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet
Tribológiai Laboratórium

Dinamikus Triboteszter: alternáló „reciprocating” modul

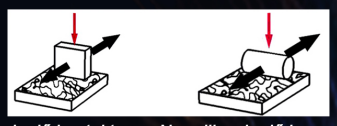


Alternáló mozgású felépítmény (reciprocating)

Gyakori probléma az azonos nyomon, vonalmentén történő mozgás (csúszás vagy gördülés) tribológiai viszonyainak tisztázása. Ezt segíti az alternáló modul.

A változtatható fordulatszámú villanymotor tengelyén lévő tárcsa hornyába rögzített csaphoz kapcsolódó tolórúd biztosítja az alternáló mozgást. Állítható a löket és a frekvencia. A vizsgálat alap-dinamizmusát a próbatest alternáló mozgásból eredő gyorsulási és irányváltási szakaszok hozzák létre. Erre szuperponálható a frekvenciaváltozás. A próbatestek statikus terhelése mérés közben nem változtatható. A rendszer méri a súrlódási erőt, a kopást és a súrlódási hőmérsékletet. A mérést a gép központi mérőrendszere biztosítja. A felépítménnyel a rezgő súrlódó hatásnak kitett tribológiai rendszerek modellezhetők.

A forgó mozgás átalakítására eltérő kulisszák is használhatók, valamint a súrlódó kontaktus kialakítás is lehet illeszkedő vagy nem-illeszkedő A mérés abrazív közegben vagy abrazív felületekkel is kivitelezhető.

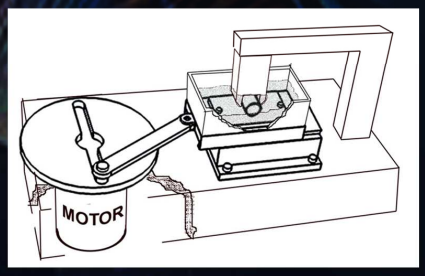


Illeszkedő kontaktus Nem-illeszkedő kapcsolat

Működési feltételek az alternáló felépítménnyel

Normál terhelés (N)	0 – 200 N
Lökethossz (mm)	0 – 50 mm
Frekvencia	0 – 30 Hz

PA6G súrlódási mintadiagram egy mozgási ciklusban.
(Hengeres próbatest köszörült acél síkfelületen, azaz nem-illeszkedő kapcsolat, henger/sík kialakítás. A PA6G próbatest átmérője 6mm hossza l=12mm. A mozgás frekvenciája 30 Hz és az alkalmazott normál terhelés 200 N. A súrlódási erő ellentétes előjelei az eltérő irányú (4,62 mm lökethosszal oda majd vissza) mozgásból adódnak).



Széleskörű tribológiai információk az alternáló mozgású felépítménnyel:

Kisméretű, gyorsan és egyszerűen előállítható próbatestekkel, dinamikus hatások biztosításával a vizsgálati rendszer képes mérni:

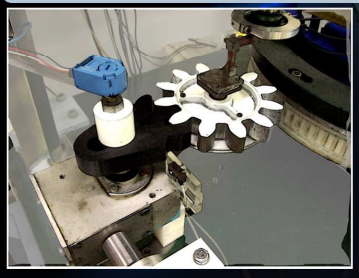
- a mozgásbeli súrlódás trendjeit, a hozzá kapcsolódó deformációkat és kopásokat, súrlódási hőmérsékletet
- a statikus súrlódási erő értékeit
- a statikus és mozgásbeli súrlódási erő közti különbségeket, a jellemző átmeneteket

H-2103 Gödöllő, Páter Károly u. 1.
www.geti.gek.szie.hu
Telefon: +3628/ 522-949
Fax: +3628/ 522-000/1457

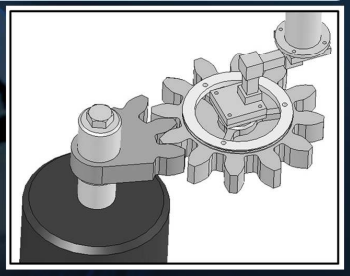
6. sz. melléklet. Fogaskerék fogsúrlódási modul

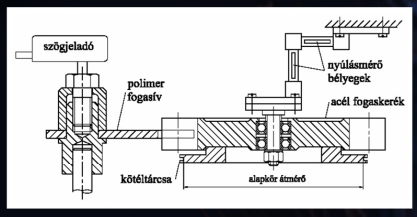
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet
Tribológiai Laboratórium

Dinamikus Triboteszter: fogsúrlódási modul - fogaskerék kapcsolatok fogsúrlódásának mérése -



A dinamikus modellezések egy gépelem-centrikus fejlesztése a fogsúrlódás mérő modul, mely az egy fogpár kapcsolódás szakaszán a kapcsolóvonal mentén képes mérni a tényleges súrlódási erőt, és számíthatóvá teszi a változó súrlódási tényezőt.
Ennek elsősorban a polimer/acél fogaskerekek esetén van kiemelt jelentősége, mert a kenés nélküli hajtások főleg ezen a területen használatosak.





Fogkapcsolódás modellvizsgáló berendezés vázlata

$F_x = F_s \cdot \cos\alpha$

A súrlódási erő:

$$F_s = \frac{F_x}{\cos\alpha} \quad [N]$$

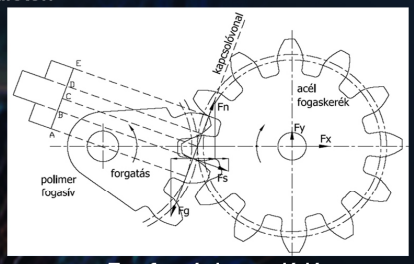
ahol:

F_x- a mért radiális irányú tengelyerő [N]
α- kapcsolószög [°]

A mérési adatokból számított súrlódási tényező értéke:

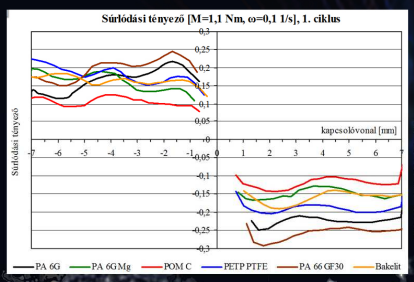
$$\mu = \frac{F_s}{F_n}$$

$$\mu = \frac{F_x}{F_n \cdot \cos\alpha}$$



Egy fogpár kapcsolódás

A motor csigahajtóművön keresztül forgatja a polimer fogasívet. Ehhez kapcsolódik az acél fogaskerék, amely a nyúlásmérőkkel ellátott befogófej tengelycsonkján van csapágyazva. Az állandó súlyterhelés, a fogaskerekek kapcsolóvonala mentén hat, a kerekek alapkör átmérőjének megfelelő kötélcsigán keresztül. A fogaskerék ív kapcsolóvonal menti fogkapcsolódás kezdeti és végpontjainak szöghelyzetei számításokkal pontosan meghatározhatók. Ezen helyzeteket két mikrokapcsoló jelzi és a motor forgásirányát változtatva a két végállás között forgatja a fogasívet. A szögjeladó a polimer fogasív tengelyén helyezkedik el.



Mintadiagram: Fogsúrlódási tényező az 1. fogkapcsolódási ciklusban, különböző polimer/acél fogaskerekek esetén (a negatív értékek az erő irányváltására utalnak)

Új tribológiai információk a fogsúrlódásvizsgáló modul alkalmazásával.

A fogsúrlódás mérésére alkalmas modul a fogfelületeken ébredő valós erőhatások esetén képes:
A fogaskerekek kapcsolódása során fellépő súrlódási erő meghatározására. A mérőrendszer az egy-fogpár kapcsolódás szakaszán méri az érintkező fogak közt ébredő súrlódási erő komponenseket. Ebből számítható az adott időponthoz és érintkezési helyhez tartozó súrlódási tényező.

- Méri és elemezhetővé teszi a kapcsolóvonal menti súrlódási erőt a használati idő (súrlódási út) függvényében. Megmutatja az eltérő anyagpárok közötti változó súrlódási tendenciákat.
- Jellemzi a főpont környezetében a gördülés és a csúszás viszonyát. Az egyes anyagpárokhoz tartozó főpont közeli átmeneti tartomány nagysága és annak változása az elhasználódás függvényében elemezhető.
- Megkülönbözteti és meghatározza a főpont előtti csúszási súrlódási tényező átlagot, a főpont előtti lokális súrlódási tényező maximumot, a főpontot és környékét jellemző átmeneti gördülési- tapadási zónát, a főpont utáni lokális súrlódási tényező maximumot és átlagos súrlódási tényezőt. A főpont után a gördülési- tapadási átmeneti szakasz nagysága és a főpont után mérhető lokális súrlódási maximum jellemzi az anyagpárosítás tapadó csúszási hajlamát.

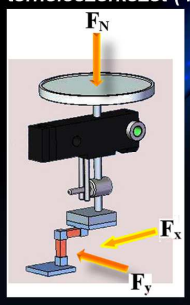
H-2103 Gödöllő, Páter Károly u. 1.
www.geti.gek.szie.hu
Telefon: +3628/ 522-949
Fax: +3628/ 522-000/1457

7. sz. melléklet. Lineáris mozgású abráziós modul

Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet
Tribológiai Laboratórium

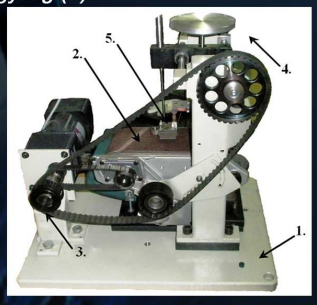
Dinamikus Triboteszter: Lineáris mozgású abráziós modul

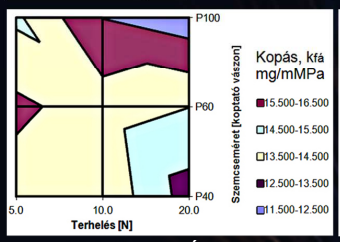
A modul kialakításának a célja, hogy szabványos koptatóközeggel (csiszoló vászon) gyors abráziós koptatási méréseket tegyen lehetővé úgy, hogy – igény esetén - program szerint változtatható legyen a siklási sebesség és on-line mérni lehessen a kopási folyamathoz tartozó abráziós súrlódási erőt is. Fő egységei: a központi gépalaphoz rögzíthető modul-asztal (1.), a koptatóvászon (2), a hajtásmechanizmus elemei (3), a terhelőszerkezet (4), és a központi géphez csatlakozó mérő– és adatgyűjtő egység (5).

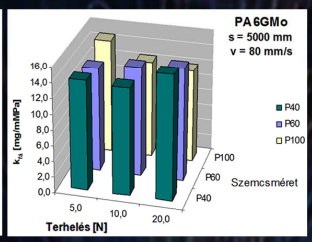


Mért értékek:

t – idő,
F_x – a vászon mozgásából adódó abráziós súrlódási ellenállás,
F_y – a próbatest oldalirányú előtoló mozgásából adódó abráziós súrlódási ellenállás,
F_N – a normálirányú terhelés,
S_{zv} – a mintadarab kopásából adódó függőleges elmozdulás.

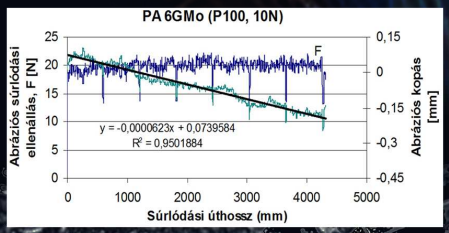




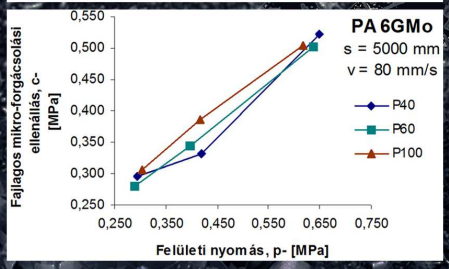


Mintadiagram: Általánosított, fajlagos abráziós kopás, PA 6GMo

Az abrazív koptatókörnyezetet egy végtelenített csiszolóvászon modellezi. A vászon egyenes vonalú egyenletes mozgásához, a mintadarab oldalirányú előtoló mozgása párosul, így a vizsgált próbatest nem halad át kétszer ugyanazon súrlódási felületen, mindig új abrazív felülettel érintkezik. A hajtást a motorról bordázott szíj adja át. A terhelőszerkezet egy – az előtoló mozgást megvalósító – menetes orsón mozgó anyához van rögzítve. A szerkezet alján található a próbatest-befogófej. A próbatest kopásából adódó elmozdulást indukciós távolságmérő méri.



Mintadiagram: Az abráziós kopási folyamat a súrlódási út függvényében: abráziós súrlódási ellenállás és függőleges méretváltozás (kopás), v = 80 mm/s



Mintadiagram: A fajlagos mikroforgácsolási ellenálás változása eltérő abrazív közeg felületi terhelés esetén

Tribológiai információk a fogsúrlódásvizsgáló modul alkalmazásával:

- A függőleges méretváltozásból (kopásból) adódó időfüggvény
- Próbatest tömegmérése koptatás előtt és után:
  A tömegkülönbözet és a megtett súrlódási út hányadosaként a „k" kopásérték kiszámítható.

$$k = \frac{\Delta m}{s} \left[\frac{g}{m}\right]$$

Az eredményt [g/m] a terhelő erővel [N] elosztva a *kr specifikus, fajlagos abráziós kopást* kapjuk. Rendszervonatkoztatású, mert figyelembe veszi a koptató rendszer normál terhelését.

$$k_f = \frac{\Delta m}{s \cdot F_{Nál}} \qquad \left[\frac{g}{m \cdot N}\right]$$

Az *általánosított, de fajlagos abráziós kopás, kfá*, az

$$k_{fá} = \frac{\Delta m}{s \cdot \frac{F_{Nál}}{A}} = \frac{\Delta m}{s \cdot p} \qquad \left[\frac{g}{m \cdot MPa}\right]$$

összefüggéssel számítható.

- A rendszer méri az abráziós súrlódási erőt, annak változását a mérés során. Ez meghatározhatóvá teszi az egyes anyagminták fajlagos forgácsolási ellenállását, (*fajlagos mikro–forgácsolási ellenállás, c–* [MPa]): ami az egységnyi forgácskeresztmetszet leválasztásához szükséges forgácsolóerő.

$$c = \frac{F_{fől}}{A_0} \quad [MPa]$$

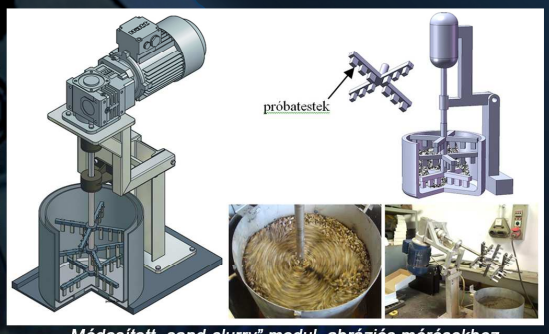
H-2103 Gödöllő, Páter Károly u. 1.
www.geti.gek.szie.hu
Telefon: +3628/ 522-949
Fax: +3628/ 522-000/1457

8. sz. melléklet. Módosított „sand-slurry” abráziós modul

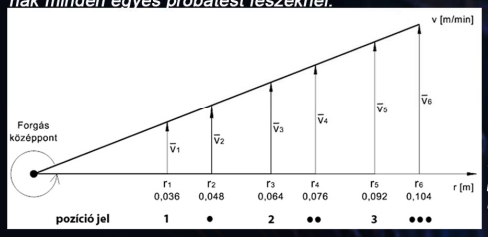
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet
Tribológiai Laboratórium

Dinamikus Triboteszter:
Módosított homok-keveréses („sand-slurry”) abráziós modul

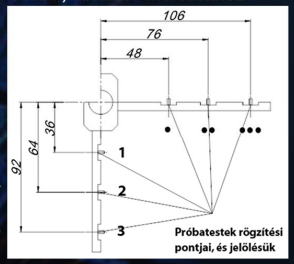
A homok-keveréses („sand-slurry”) elv közismert a VI. vizsgálati kategóriában. Többféle változat terjedt el, de abban mind megegyeznek, hogy pl. adott szemcseösszetételű homokban (mint koptató közegben) mozog a próbatest, általában körpályán, adott sebességgel.
Talajok, homok, kavicsok és egyéb abráziós anyagokkal történő tribológiai mérések elvégzésére alkalmas a berendezés úgy, hogy egyszerre többfajta próbatest is egy mérés-sorozatban összehasonlítható, egyúttal az eltérő sebesség és nyomás hatása is elemezhető a kialakítás miatt.
A koptatóközeget tároló edény egy külső tároló edénybe helyezhető, melyet hűtő/fűtő vízzel lehet feltölteni, így a mérési folyamat hő-dinamikája is szabályozható. (Nagysebességű koptatás esetén az abrazív közeg a súrlódásból adódóan túlhevülhet).
A vizsgált próbadarabok a koptató berendezés szerszámain különböző magassági szinteken és sugáron kerülnek elhelyezésre, más-más sebesség és nyomásviszonyok uralkodnak minden egyes próbatest fészeknél.

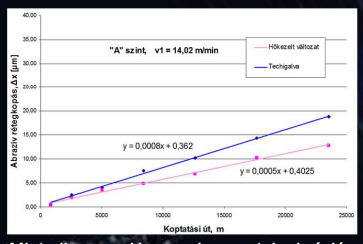


Módosított „sand-slurry” modul, abráziós mérésekhez



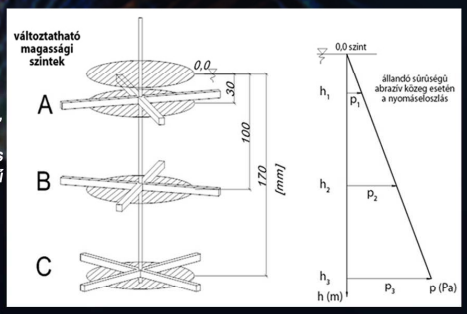
Próbatest-tartókon kialakított fészkek pozíciói, és az egyes helyeken lévő próbatestek sebességvektorai állandó tengelyfordulat esetén

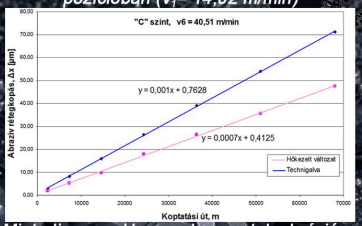




Mintadiagram: Horganybevonatok abrázjós kopása az „A” szinten (h_1 magasság), v_1 pozícióban (v_1= 14,02 m/min)

Változtatható próbatest-tartó szerszámszintek, és a lineárisan változó nyomáseloszlás állandó sűrűségű abrazív közeg esetén





Mintadiagram Horganybevonatok abrázjós kopása a „C” szinten (h_3 magasság), v_6 pozícióban (v_6= 40,51 m/min)

Új abráziós kutatási lehetőségek a „sand-slurry” modullal:

A létrehozott új berendezés a hagyományosan alkalmazott „sand-slurry” triboteszterekhez képest:

- *Hűtő/fűtő köpenye miatt hő-szabályozott mérést is lehetővé tesz.*
- *Nem homogén szemcsés halmazok rétegződési hatása figyelembe vehető.*
- *Egy mérési sorozatban 36 db próbatest vizsgálható.*
- *Egy mérési sorozat - állandó tengelyfordulat esetén is - a sebesség és nyomás hatását a kopásállóságra képes mérni.*
- *A hajtómotor programozott fordulatszám állításával dinamikus körülménye modellezhetők, mellyel felületi abrazív erőlökések hatása is kutatható.*
- *A belső súrlódási viszonyok is számszerűsíthetők, összehasonlíthatók.*

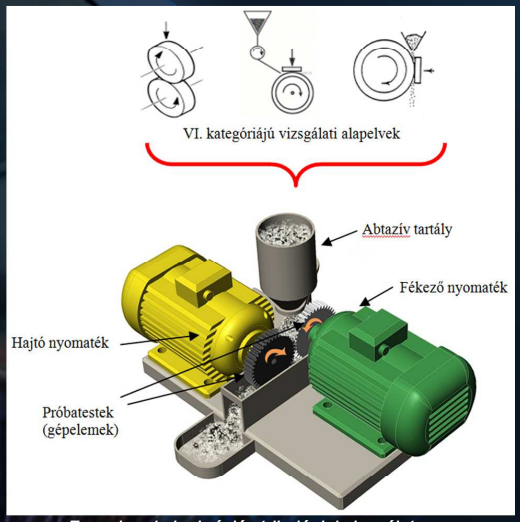
H-2103 Gödöllő, Páter Károly u. 1.
www.geti.gek.szie.hu
Telefon: +3628/ 522-949
Fax: +3628/ 522-000/1457

9. sz. melléklet. Forgó gépelemvizsgáló modul

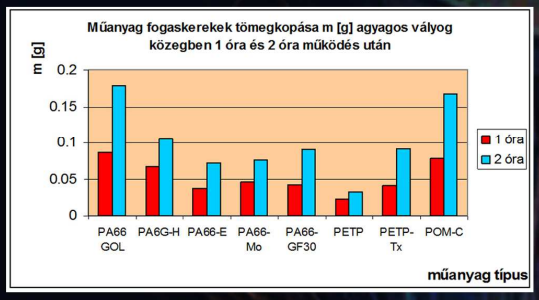
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet
Tribológiai Laboratórium

Dinamikus Triboteszter:
Forgó (abráziós csúszású) gépelemvizsgáló modul

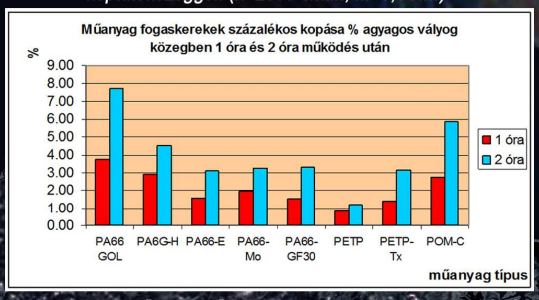
A berendezés egy nyílt erőláncú hajtás kapcsán hoz létre súrlódó erőátvitelt, melyhez szabályozott térfogatárammal vezethető abrazív részecske. A modul megépítésének célja, hogy ne csak egyszerű próbatestekkel, hanem valós gépelemekkel is értéklehetők legyenek az abráziós tribológiai folyamatok, így a VI. kategóriájú mérések kiterjeszthetők az V. és a IV. vizsgálati kategóriára is.
A berendezés fogaskerekek abráziós kopásállósági mérésére egyszerűen használhatótam, de más gépelemek, pl. siklócsapágyak („ring-on-ring") mérései is megvalósíthatók.
A változtatható fordulatszámú hajtómotor tengelyén található a hajtó fogaskerék, a fékezőmotor – mellyel a kívánt fékező nyomaték beállítható - tengelyén a kapcsolódó fogaskerék. Az abráziós portartályból egy adagoló szelepen keresztül jut a beállított térfogatáram szerint az abrazív részecske a súrlódó fogfelületek közé.



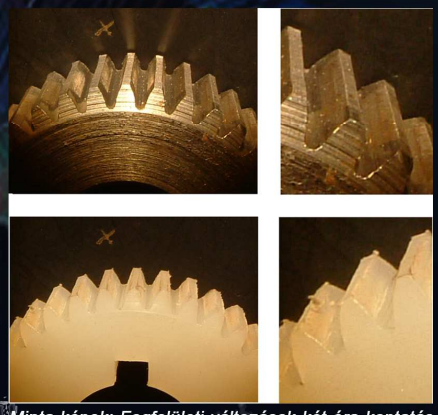
Fogaskerekek abráziós tribológiai vizsgálata az V. kategóriában (valós gépelemek, kontrollált feltételek)



Mintadiagram: Műszaki műnyag fogaskerekek abráziós tribológiai vizsgálati eredményei, acél fogaskerék ellenében, agyagos vályog koptatóközeggel. (n=2800 1/min, M=6,1 Nm)



Mintadiagram: Műszaki műnyag fogaskerekek fogainak abráziós kopása tömegszázalékban, acél fogaskerék ellenében, agyagos vályog koptatóközeggel. (n=2800 1/min, M=6,1 Nm)



Minta képek: Fogfelületi változások két óra koptatás után: acél fogaskerék (felül), POM-C (alul), agyagos vályog koptatóközeggel. (n=2800 1/min, M=6,1 Nm)

A modul használatával:

- Értékelhető az abráziós kopás különböző fogaskerékpárok esetén, mind a hajtó és hajtott kerék esetén.
- Tanulmányozható a gépelem súrlódó felületén létrejövő károsodási folyamat.
- A beállítható terhelési szint (nyomaték és fordulatszám) összehasonlíthatóvá teszi a normál és túlterheléses üzemmódok során fellépő abráziós kopást és felületi károsodást.
- Dinamikus körülmények modellezhetők, mellyel felületi abrazív erőlökések hatása is kutatható.

H-2103 Gödöllő, Páter Károly u. 1.
www.geti.gek.szie.hu
Telefon: +3628/ 522-949
Fax: +3628/ 522-000/1457

10. sz. melléklet. Anyagok és *pv* határértékek

Anyagok csoportosítva és a *pv* határértékek [DSM EPP adatbázis alapján]

Anyagok	* *pv* határértékek [MPa·ms^{-1}]			*pv* határértékek %-os csökkenése v_1 és v_3 között (Δv = 2 m/s)
	v_1 = 0,1 m/s	v_2 = 1,1 m/s	v_3 = 2,1 m/s	
Csúszó alapanyagok (1. anyagcsoport)				
PTFE	0,039	0,03	0,022	43,6
PTFE/graphite	0,087	0,033	0,058	33,3
UHMW-PE HD500	0,058	0,035	0,04	31,0
UHMW-PE HD1000	0,06	0,037	0,033	45,0
PA6G(Mg)/oil	0,212	0,131	0,12	43,4
PA6G(Na)/MoS_2	0,36	0,22	0,2	44,4
PA6G/PE	0,14	0,099	0,088	37,1
PETP TF	0,24	0,148	0,14	41,7
PPS HPV	0,866	0,263	0,231	73,3
PEEK Mod	1,133	0,407	0,358	68,4
PETP	0,139	0,086	0,076	45,3
Szerkezeti alapanyagok (2. anyagcsoport)				
PA 4.6	0,159	0,094	0,073	54,1
PA6E	0,104	0,06	0,046	55,8
PA6G(Mg)	0,13	0,074	0,06	53,8
PA 66 GF30	0,15	0,08	0,07	53,3
POM C	0,15	0,091	0,072	52,0
PVDF	0,155	0,094	0,073	52,9
PEEK	0,34	0,202	0,17	50,0
PEEK GF	0,355	0,23	0,175	50,7
Egyéb amorf alapanyagok (3. anyagcsoport)				
PSU	0,09	0,052	0,012	86,7
PES	0,088	0,049	0,014	84,1

* Száraz súrlódású, köszörült szerkezeti acéltengellyel párosított, szabad befogású, 50%RH és 23C^o környezeti hőmérséklet mellett folyamatosan üzemelő polimer siklócsapágyak esetén.

11. sz. melléklet. Anyagok és mechanikai tulajdonságok

A kísérleti anyagok csoportosítva és a mechanikai tulajdonságaik (mért és átlagolt)

Anyagok	σ_y [MPa]	ε_b [%]	E [MPa]	H [Shore D]
Csúszó alapanyagok (1. anyagcsoport)				
PTFE	30,9	384	544,8	55,2
PTFE/graphite	33,1	222	606,5	58,6
UHMW-PE HD500	28,4	585	1350,8	66,0
UHMW-PE HD1000	20,6	298	744,6	62,3
PA6G(Mg)/oil	52,5	58	1808,2	81,5
PA6G(Na)/MoS_2	65,5	53	2020,4	82,1
PA6G/PE	45,1	78	1811,4	77,4
PETP TF	75,3	12	2806,3	82,8
PPS HPV	74,1	8	3712,8	80,1
PEEK Mod	121,5	5	7808,2	85,3
PETP	85,6	19	2991,7	83,3
Szerkezeti alapanyagok (2. anyagcsoport)				
PA 4.6	56,5	106	11288,8	78,5
PA6E	47,2	81	1603,6	79,2
PA6G(Mg)	57,9	69	2034,4	82,3
PA 66 GF30	89,2	19	3900,8	84,7
POM C	74,5	34	2996,4	83,6
PVDF	58,3	30	2110,5	81,4
PEEK	108,4	25	3904,6	87,2
PEEK GF	156,9	5	9688,5	89,1
Egyéb amorf alapanyagok (3. anyagcsoport)				
PSU	77,8	19	2608,5	83,1
PES	87,1	16	2689,3	82,6

12. sz. melléklet. Súrlódási tényezők

Mérésekből számított súrlódási tényezők az egyes vizsgálati rendszerekben

	Dinamikus pin-on-plate		Pin-on-disc I.		Pin-on-disc II.	
Csúszó alapanyagok (1. anyagcsoport)	$\mu_{átl}$ 1 ciklus	$\mu_{átl}$ teljes (öt ciklus)	$\mu_{átl}$	μ_{max}	$\mu_{átl}$	μ_{max}
PTFE	0,10	0,13	0,16	0,17	0,17	0,18
PTFE/grafit	0,11	0,13	0,15	0,16	0,18	0,18
UHMW-PE HD500	0,07	0,09	0,20	0,20	0,19	0,20
UHMW-PE HD1000	0,08	0,09	0,20	0,21	0,20	0,20
PA6G(Mg)/kenőolaj	0,07	0,10	0,20	0,24	0,16	0,23
PA6G(Na)/MoS_2	0,06	0,10	0,18	0,21	0,17	0,18
PA6G/PE	0,10	0,14	0,21	0,22	0,21	0,22
PETP TF	0,06	0,14	0,21	0,21	0,18	0,18
PPS HPV	0,06	0,09	0,27	0,29	0,24	0,25
PEEK Mod	0,06	0,08	0,21	0,22	0,19	0,19
PETP	0,06	0,13	0,18	0,19	0,18	0,18
Szerkezeti alapanyagok (2. anyagcsoport)						
PA 4.6	0,10	0,11	0,27	0,32	0,30	0,31
PA6E	0,09	0,10	0,21	0,23	0,19	0,23
PA6G(Mg)	0,08	0,10	0,29	0,37	0,25	0,33
PA 66 GF30	0,06	0,09	0,27	0,30	0,21	0,26
POM C	0,07	0,08	0,24	0,24	0,20	0,20
PVDF	0,09	0,10	0,23	0,26	0,28	0,33
PEEK	0,06	0,08	0,24	0,27	0,28	0,29
PEEK GF	0,06	0,08	0,26	0,29	0,29	0,32
Egyéb amorf alapanyagok (3. anyagcsoport)						
PSU	0,11	0,18	0,59	0,62	0,55	0,65
PES	0,13	0,18	0,53	0,54	0,54	0,58
A mért értékek köszörült S235 acél felületen, száraz csúszás esetén lettek meghatározva a 4. fejezetben leírt vizsgálati rendszerjellemzők esetén.						

dc_589_12

...Friction is the „evil” of all motion. No matter which direction something moves in, friction pulls it the other way...