

dc_589_12



POLIMER GÉPELEM-ANYAGOK TRIBOLÓGIAI JELLEMZÉSE

Doktori munka összefoglalója

Kalácska Gábor

2012.

Tartalomjegyzék

1. A kutatás célkitűzései	1
2. Vizsgálati rendszer	1
2.1. Tribológiai modellezés, dinamikus triboteszter fejlesztése.....	1
2.2. Műszaki polimerek súrlódásvizsgálati rendszere.....	2
2.3. Ionimplantált polimerek kutatási rendszere	3
3. Eredmények összefoglalása.....	4
3.1. Műszaki polimerek súrlódása.....	4
3.2. <i>Polimerek súrlódásáról feltárt új eredmények (tézisek)</i>	5
3.3. Ionimplantált (NPIII) polimer felületek tribológiai jellemzése.....	6
3.3.1. Polietilén-tereftalát (PETP)	6
3.3.2. Poliamid 6 (PA6)	7
3.4. <i>Ionimplantált polimer felületekkel kapcsolatos új eredmények (tézisek)</i>	8
4. Az eredmények hasznosítása.....	9
5. Az értekezés témaköréből készült folyóirat cikkek jegyzéke.....	10

1. A kutatás célkitűzései

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 tűztam 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 p_v terhelés szinteken.
- Laboratóriumi modellezés fejlesztése, a dinamikus hatások modellezésének megvalósítása a súrlódás bejáratási szakaszán, a rendszer érzékenységeinek kutatása a környezeti hatásokkal szemben.

A nagyszámú műszaki műanyag átfogó tribológiai jellemzése után, célom volt a súrlódó gépeleményként 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:

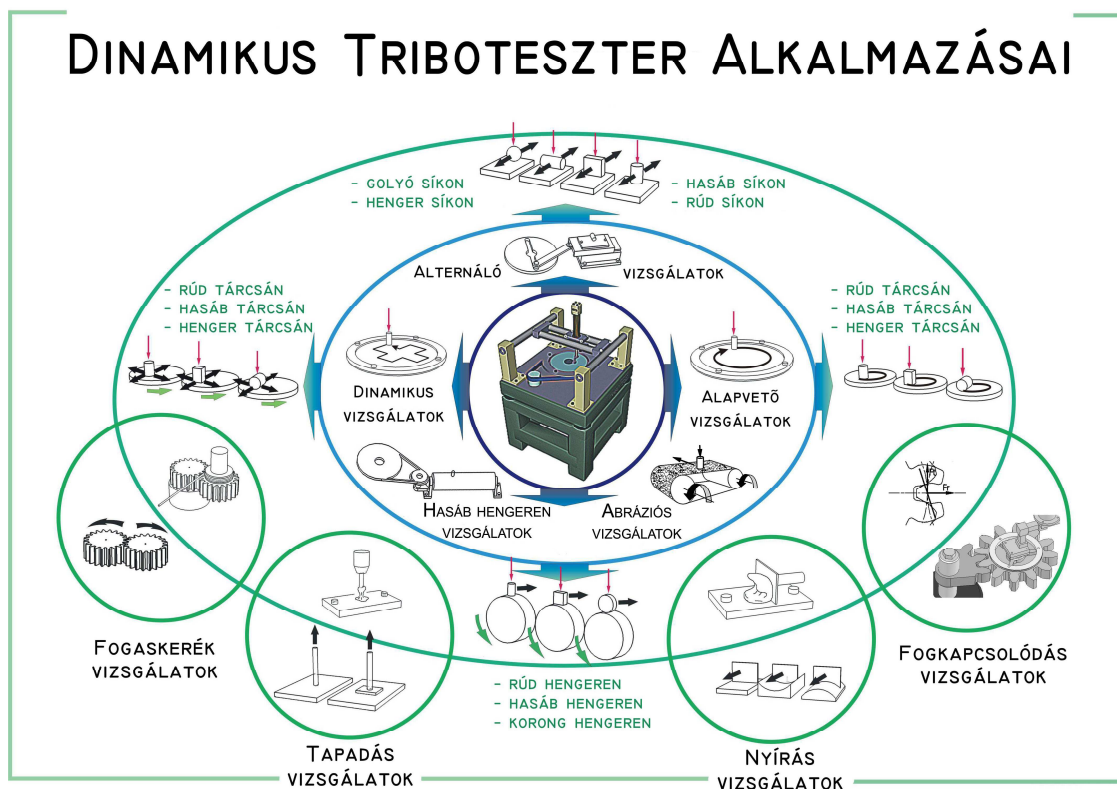
- Tribológiai jelenségek feltárása a csúszási úthossz függvényében, különböző terhelés és csúszási sebesség mellett száraz és víz- valamint olajkenésű körülmények között, pin-on-disc tribométer felhasználásával. Ezen belül:
 - a PIII kezelés felületmódosító hatása, úgymint a felületi réteg összetétele, 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. Vizsgálati rendszer

2.1. Tribológiai modellezés, dinamikus triboteszter fejlesztése

A tribológiai modellvizsgálatok célja a súrlódó szerkezet normális üzemi tartományát határoló kritikus igénybevételek és tribológiai rendszerjellemzők meghatározása. A DIN 50322 „Kopásvizsgálati kategóriák” ajánlására alapozva a tribológiai gyakorlatban hat vizsgálati kategória terjedt el a rendszer kiterjedésétől és bonyolultságától függően. 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 – korlátozott, az alap tribológiai jellemzők feltárásán kívül valós üzemi körülmények modellezését nem teszik lehetővé, csak relatív összehasonlításokra alkalmasak. Ezért dinamikus modellezési lehetőséggel kiterjesztett,

modul rendszerű, széles tribológiai vizsgálati spektrumot biztosító anyagvizsgálót fejlesztettem (1. ábra). A dinamizmus a feltételi rendszer meghatározó elemei esetében a szabadon programozhatóságot és reprodukálhatóságot jelenti.

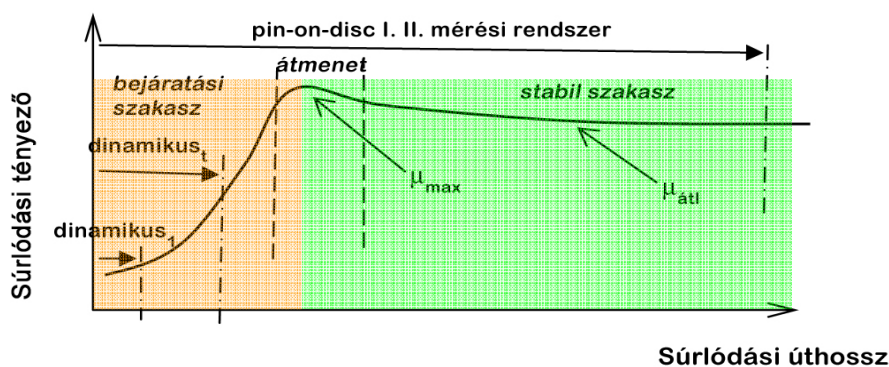


1. ábra. A moduláris rendszerű dinamikus triboteszterrel megvalósítható kontakt- és mozgásformák

A polimerek súrlódási vizsgálatánál a bejáratási szakasz (running-in) tanulmányozásához a dinamikus pin-on-plate modult, míg a stabilizálódott súrlódás (steady-state) elemzésére a hagyományos pin-on-disc modult használtam. Szintén pin-on-disc rendszert használtam az ionimplantált polimer felületek tribológiai méréseinél.

2.2. Műszaki polimerek súrlódásvizsgálati rendszere

A választott "pin-on-disc" és dinamikus "pin-on-plate" tesztrendszer (2. ábra) esetén meghatározó szempont volt, hogy hatásaiban megfeleljenek egy klasszikus száraz csúszású, nem túlterhelt polimer/acél súrlódási folyamatnak úgy, hogy tanulmányozható legyen a bejáratási (running-in) és a stabil (agy állandósult) csúszás (steady-state) szakasza egyaránt.



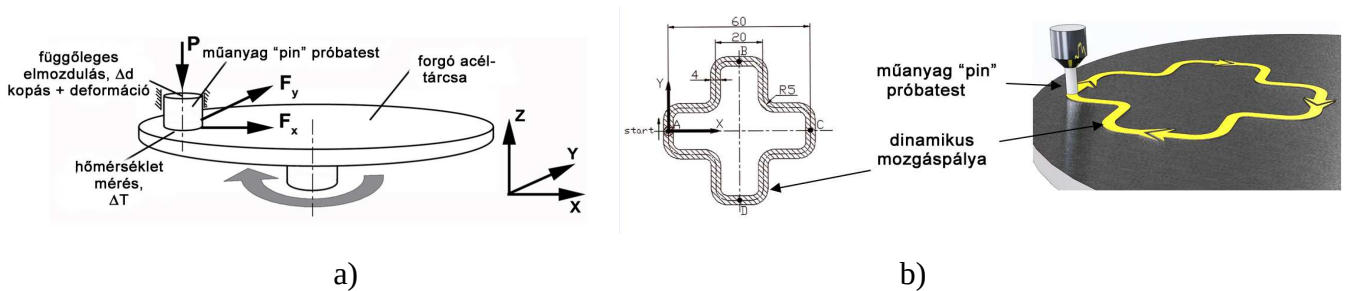
2. ábra. Az egyes vizsgálati rendszerek elhelyezése a súrlódás bejáratási és stabil szakaszának értelmezésével, polimer/acél párok esetén

Ahol:

- Dinamikus₁: a súrlódás bejratási szakaszán belül, 1 súrlódási ciklus átlageredményei a dinamikus mozgáspályán,
- Dinamikus₂: a súrlódás bejratási szakaszán belül, teljes (5 ismételt súrlódási ciklus) program átlageredményei a dinamikus mozgáspályán,
- Pin-on-disc I. és II. vizsgálati rendszerek: a bejratás után a $\mu_{\max}$ és $\mu_{\text{átl}}$ meghatározása

A „pin-on-disc” mérések (DIN 50322 szabvány VI. vizsgálati kategória) jellemzői (3a. ábra): A 6 mm átmérőjű és 15 mm magasságú rögzített műanyag tű „pin” próbatestek a köszörült felületű ($R_a=0,05-0,1 \mu\text{m}$) forgó S235 acéltárcsán a homloklfelületükkel 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).

A dinamikus súrlódási vizsgálatok során (dinamikus "pin-on-plate"), egy 4 mm átmérőjű mozgó műanyag tű „pin” haladt végig a programozott pályán (3b. ábra), a normál terhelés és a sebességértékek dinamikus változásával, a pályáívekben 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 bejratás kezdeti folyamatát is elemezhetővé teszi. Ez a rövid vizsgálati szakasz az acél felületen elinduló polimer-film kialakulás intenzitásával van összefüggésben. A vizsgálati rendszerek paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.



3. ábra. Pin-on-disc mérési elrendezés (a) és a programozott dinamikus csúszási pálya (b)

1. táblázat. A mérési rendszerek jellemzői paramétereit

	Pin-on-disc I. ($p v = 0,8 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$)	Pin-on-disc II. ($p v = 2 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$)	Dinamikus pin-on-plate ($p v$ tartomány $0 - 8 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$)
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 [$^{\circ}\text{C}$]	23	23	23

2.3. Ionimplantált polimerek kutatási rendszere

A polírozott felületű polimer PETP és PA6 „pin” próbatestek kezelése nitrogén plazmaimmerziós ionimplantációval (PIII) történt. 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, korábbi felületmódosítási előkísérletekkel meghatározott technológiai jellemzők beállítása mellett.

A felület összetételének meghatározása XPS módszerrel történt, Kratos XSAM800-as berendezéssel, $\text{MgK}\alpha_{1,2}$ sugárzás és rögzített analizátor-transzmisszió alkalmazásával (80 eV az áttekintő és 40 eV a részletes spektrumok esetén). Az adatok gyűjtését és feldolgozását a Kratos Vision 2 program végezte. A felületi energiaviszonyok változásának meghatározása peremszögméréssel történt, SEE System típusú berendezéssel, ún. statikus ülőcsepp módszerrel.

A tribológiai mérésekhez a már ismertetett dinamikus triboteszter pin-on-disc modulját használtam.

3. Eredmények összefoglalása

3.1. Műszaki polimerek súrlódása

Huszonegy, különböző műszaki műanyag (natúr és kompozit) került kiválasztásra a gépészmérnöki gyakorlat alapján. Célszerűen három csoportba soroltam a termékeket a p_v határértékeik és alkalmazási tapasztalatok alapján (2. táblázat).

2. táblázat. Vizsgálati anyagok csoportosítva

<i>Csúszó alapanyagok (1. anyagcsoport)</i>	<i>Szerkezeti alapanyagok (2. anyagcsoport)</i>	<i>Egyéb amorf alapanyagok (3. anyagcsoport)</i>
PTFE	PA 4.6	PSU
PTFE/graphite	PA6E	PES
UHMW-PE HD500	PA6G(Mg)	
UHMW-PE HD1000	PA 66 GF30	
PA6G(Mg)/oil	POM C	
PA6G(Na)/MoS ₂	PVDF	
PA6G/PE	PEEK	
PETP TF	PEEK GF	
PPS HPV		
PEEK Mod		
PETP		

1. anyagcsoport. Súrlódás szempontjából a gyakorlatban igen kedvezőnek tartott, ún. „sikló” anyagok, melyekre jellemző, hogy 0,1 és 2,1 m/s sebességű csúszás esetén ($\Delta v = 2$ m/s) a p_v 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 p_v 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, fogaskerekekben és menetes orsóknál használják, ahol a p_v határérték képezi a tervezés és gyártás alapját.

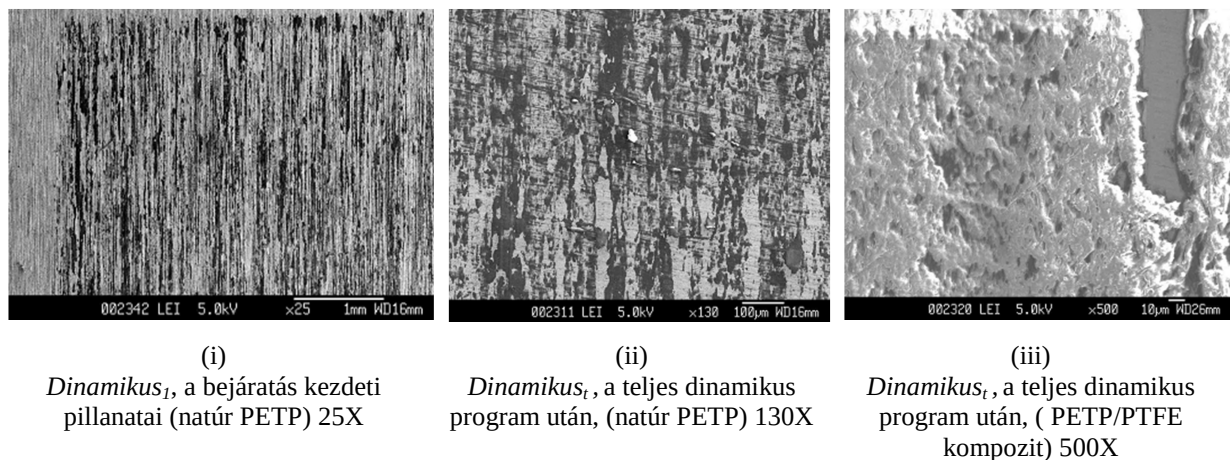
2. anyagcsoport. Azok a szerkezeti (mechanikai teherviselő) polimerek, melyek gyakran súrlódó igénybevételt is szenvednek a meghatározó mechanikai igénybevételek mellett. Ezekről megállapítható, hogy a p_v határérték csökkenés a fenti $\Delta v = 2$ m/s esetén $\geq 50\%$.

3. anyagcsoport. Két olyan amorf szerkezetű műszaki műanyag (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 100°C feletti hőállóságuk korlátozott p_v alkalmazást megengedhet (pl. élelmiszeripari gépekben, melyet gőzzel sterilizálnak). Megállapítható, hogy itt a p_v határértékek csökkenése jelentős, 80% feletti.

A súrlódás bejáratási szakaszának (running-in) elemzésére dinamikus "pin-on-plate" rendszert terveztem. A stabil súrlódás (steady-state) méréseihez két p_v 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 szakaszán, 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 p_v szint növelése gyakran eredményezte az anyagtulajdonságok és a súrlódási tényező közötti lineáris összefüggés előjelének változását, amely értelmezhető a polimer/acél csúszó párok súrlódását magyarázó elméletekkel (adhézió, deformáció, transzfer-film fejlődés a bejáratási szakaszon majd a dinamikus egyensúly kialakulása (4. ábra)).



4. ábra. Polimer-film eltérő fejlődése köszörült S235 cél felületén

3.2. Polimerek súrlódásáról feltárt új eredmények (tézisek)

1. A kutatási rendszerben megállapítottam, hogy a műszaki műanyag súrlódó gépelemek tervezésének alapjául szolgáló p_v 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 p_v változás anyagcsoportját, mint „klasszikus súrlódó” anyagcsoportot, illetve az 50%-nál nagyobb p_v 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 $\mu_{\max}$ és a stabilizálódott dinamikus egyensúlyt jellemző $\mu_{\text{átl}}$ meghatározására, eltérő terhelési, azaz p_v szintek alkalmazásával.

A megalkotott modellrendszer így olyan komplex, részletes tribológiai elemzést tett lehetővé, mely a bejáratás kezdeti jelenségeit és az azt követő kontaktzóna átalakulást, továbbá a tranziens zóna

súrlódási maximumát és a stabilizálódott dinamikus egyensúlyt teszi folyamatában áttekinthetővé és értelmezhetővé az ismert súrlódási elméletek alapján.

3. A p_v 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 formálódó kontaktzóna és polimer-film formálódása az acél felületén.

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

- az alkalmazott kisebb p_v szint esetén ($p_v = 0,8 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) 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 p_v szintnél ($p_v = 2 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) 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 kevésbé értékelhető viselkedést mutattak, folyamataik jelentősen eltértek a többi, részben-kristályos szerkezetű polimerektől. Ez alapján kimondható, hogy a p_v határérték-változás szempontjai alapján történő anyagcsoportosítás a mechanikai tulajdonságok és a súrlódás együttes értékelésére, csak a részben-kristályos és amorf anyagok szétválasztása mellett lehetséges.

3.3. Ionimplantált (NPIII) polimer felületek tribológiai jellemzése

3.3.1. Polietilén-tereftalát (PETP)

Polietilén-tereftalát (PETP) műszaki műanyag próbatetek plazmaimerziós ionimplantációval (PIII vagy PI³) 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 p_v -tényezőnél ($0,0075 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) 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 p_v -tényezők (közel $0,1 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) 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 készségére 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.

Megállapítottam, hogy:

- 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 ($0,0075 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) 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 ($0,1 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) 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.

3.3.2. Poliamid 6 (PA6)

Korábban még nem kutatták a nitrogén plazmaimerziós 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 ($pv = 0,025 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 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 olajkifuttatásos 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.

Megállapítottam, hogy:

- 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 dijudmetán cseppek peremszögei csökkentek és a teljes felületi energia valamint annak poláris és diszperziós komponensei növekedtek.

- A PA6 NPIII-val történt kezelése hatással volt az adhézios 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 adhézio- és a polimer felületén a re-adhézio jelensége.
- Kis p_v -tényező ($0,025 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) esetén száraz súrlódási körülmények között a kezelt minta súrlódási tényezője kezdetben alacsonyabb a kezeletlenéhez képest.
- Száraz csúszás esetén kis p_v -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 adhézios 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.

3.4. Ionimplantált polimer felületekkel kapcsolatos új eredmények (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 plazmaimerziós ionimplantáció hatására a PETP alaplátrixon közel 100 nm vastagságban kialakult hidrogénezett szén-nitrid és nitrogén tartalmú felületi réteg felületi energiája nagyobb, mint az alaplátrixé. Mérésekkel és modellszámítással igazoltam, hogy a kialakult rétegszerkezet az alapanyag tribológiai viselkedését az alábbiak szerint befolyásolja:

1/a Nagyon kis p_v -értéken ($0,0075 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) a nitrogén PIII-val kezelt PETP száraz súrlódási tényezője kisebb, mint a kezeletlen PETP esetében, míg kent állapotban a kezeletlen PETP-éhez hasonló. Nagyobb p_v -tényezőknél (közel $0,1 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) a megnövekedett adhézios 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 mellett bekövetkező súrlódási melegedés a PIII kezelt réteg kétirányú hőáram-korlátozó hatásának következménye, mivel a PIII kezelt PETP próbatestek súrlódásának adhézios 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 $\lambda_{\text{PIII-PETP}}$ 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 megnöttek, 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 ($p_v=0,025 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$) és korlátozott ideig tekinthető kedvezőnek a PIII hatása, mivel az adhézios 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 hőátzármaztatása 28%-kal romlott, ami a réteg hőreflexióját és abszorpcióját együtt kezelő látszólagos lineáris hővezetési tényezőjét ($\lambda_{PIII-PA6}$) 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.

4. Az eredmények hasznosítása

A DIN 50322 szabvány szerinti VI. vizsgálati kategória kiterjesztésére tervezett és gyártott dinamikus triboteszter 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 laborgyakorlatok 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 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 Srl) használja gépelem tervezéshez,
- az oktatási anyagok korszerűsítésénél, pl. a SZIE Gépészmérnöki Kar, „Polimertechnológiák” tantárgy keretében, az Universitatea De Nord, Baia Mare a „Maintenance of Machinery” tantárgy keretében használja az információkat.

Az 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 optimalizálásának lehetősége,
- polimertribológiai oktatási anyagok korszerűsítése,
- műszaki műanyagokhoz használt nitrogén plazmaimmmenziós ionimplantációs eljárás – melyből szabadalom is született – további fejlesztési elképzeléseinek támogatása.

5. Az értekezés témaköréből készült folyóirat cikkek jegyzéke

- **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., **Kalácska 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
- Andó M., Sukumaran J., Rodriguez V., Neis P., **Kalácska G.**, Czigány t., DeBaets P. (2011): Development of new PA6 composites. Mechanical Engineering Letters, R&D : Research & Development 5:(5) pp. 145-153. (2011) HU ISSN 2060-3789
- **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., **Kalácska 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
- Keresztes R., Zsidai L., **Kalácska G.**, DeBaets P. (2009): Friction of polymer/steel gear pairs. Scientific bulletin. Universitatea De Nord, Baia Mare. Serie C, Volume XXIII. pp. 63-73. ISSN 1224-3264
- Eberst O., Pop S., **Kalácska G.**, Keresztes R. (2009): Re-constructions with engineering polymers. Mechanical Engineering Letters, R&D : Research & Development 2:(1) pp. 310-315. HU ISSN 2060-3789
- Paepegem W Van., Rezaei A., Ost W., DeBaets P., Zsidai L., **Kalácska G.** (2009): Numerical and experimental analysis of friction of large scale self lubricating radial bearings. Mechanical Engineering Letters, R&D : Research & Development 1:(2) pp. 277-289. HU ISSN 2060-3789
- **Kalácska G.**, Eberst O., Pop S., DeBaets P. (2009): Abrasive Wear of Different Polymer/Steel Gear Pairs. Mechanical Engineering Letters, R&D : Research & Development 2:(1) pp. 190-210. HU ISSN 2060-3789
- Wittenberghe J.V., Ost W., Rezaei A., DeBaets P., Zsidai L., **Kalácska G.** (2009): Test setup for friction force measurements of large-scale composite bearings. Wiley Interscience. Experimental Techniques. Volume 33, Issue 1. pp. 45-50. ISSN:0732-8818
- Ost W, DeBaets P., Van Austrève S., Van Wittenberghe J., Zsidai L., **Kalácska G.** (2009): Tribotesting of large-scale specimens: the necessity of proper design. Mechanical Engineering Letters, R&D : Research & Development 2:(1) pp. 7-27. HU ISSN 2060-3789
- Keresztes R., Zsidai L., **Kalácska G.**, DeBaets P. (2009): Friction of polymer/steel gear pairs. Mechanical Engineering Letters, R&D : Research & Development 2:(1) pp. 1-12. HU ISSN 2060-3789

- **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
- Keresztes R., **Kalácska G.** (2008): Polimer/acél fogaskerekek kapcsolódásának súrlódási sajátosságai. GÉP, LIX. Évfolyam, 12. szám. pp. 17-21. ISSN 0016-8572
- **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. ISSN 0027-2914
- Samyn P., DeBaets P., Keresztes R., Zsidai L., **Kalácska 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., **Kalácska 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
- Samyn P., Keresztes R., Lefánti R., Zsidai L., **Kalácska G.** (2007): A szinterezhető és termoplasztikus poliimidek súrlódási tulajdonságainak összehasonlítása. Műanyag és Gumi. 44.évfolyam, 8.szám. pp. 327-332. ISSN 0027-2914
- **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. HU ISSN 0864-7410
- Zsidai L., **Kalácska G.**, Pálincás I., Ost W. (2006): Modular development of dynamic tribological test rig. Hungarian Agricultural Engineering. N.19/2006. Hungarian Academy of Sciences. pp. 15-18. HU ISSN 0864-7410
- **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. ISSN 0027-2914
- **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. ISSN 0027-2914
- 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. ISSN 0027-2914
- Cotetiu R., Cotetiu A., Eberst O., **Kalácska G.** (2003): Influence of load on the friction coefficient between steel and polyamide rolling couples. Hungarian Agricultural Engineering. N.16/2003. Hungarian Academy of Sciences. pp. 68-70. HU ISSN 0864-7410

- 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. ISSN 0027-2914
- 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. ISSN 0027-2914
- Zsidai L., **Kalácska G.**, Vercammen K., Van Acker K., DeBaets P. (2002): The different tribological behaviour of polymers on DLN coating and steel surface. (Poland). Tribologia nr.6/2002 (186), pp. 1737-1750. ISSN: 02087774
- Zsidai L., DeBaets P., Samyn P., **Kalácska G.**, Van Peteghem A.P., Van Parys F. (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. ISSN 0027-2914
- 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. ISSN 0027-2914
- Keresztes R., Zsidai L., **Kalácska G.** (2001): Polimer felületek adhéziós vizsgálata. Műanyag és Gumi. 38. évf. 12. szám. pp. 448-453. ISSN 0027-2914
- 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. ISSN 0027-2914
- **Kalácska G.**, Zsidai L., Kozma M., DeBaets P. (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. HU ISSN 0864-7410
- **Kalácska G.**, DeBaets P., Eberst O. (1999): Műszaki műanyagok tribológiai rendszerekben – bányagépek műszaki fejlesztése műanyag gépelemekkel. Műanyag és Gumi. 1999/10. pp. 319-326. ISSN 0027-2914
- DeBaets P., **Kalácska 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., **Kalácska 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