

Szent István Egyetem

**MŰSZAKI MŰANYAG/ACÉL CSÚSZÓPÁROK
TRIBOLÓGIAI KUTATÁSA**
- polimer/acél fogfelületek súrlódása -

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Keresztes Róbert Zsolt

Gödöllő
2009.

A doktori iskola

megnevezése: **Műszaki Tudományi Doktori Iskola**

tudományága: **Műszaki Tudomány**

vezetője: **Dr. Farkas István, DSc**
egyetemi tanár, az MTA doktora
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Környezetipari Rendszerek Intézet
Gödöllő

Témavezető: **Dr. habil. Kalácska Gábor, CSc**
egyetemi tanár, kandidátus
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet
Gödöllő

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	- 5 -
2. ANYAG, MÓDSZER, EREDMÉNYEK.....	- 7 -
2.1. A modellvizsgálatok helyszíne	- 7 -
2.2. A kutatásban szereplő műszaki műanyagok.....	- 7 -
2.3. Kisméretű próbatestekkel végzett modellvizsgálatok	- 7 -
2.4. Nagyméretű próbatestekkel végzett modellvizsgálatok	- 9 -
2.5. Fogaskerék fogkapcsolódás modellvizsgálatok	- 10 -
2.5.1. Berendezés	- 10 -
2.5.2. Fogsúrlódási erő és a fogsúrlódási tényező meghatározása	- 11 -
2.5.3. Súrlódási részeredmények.....	- 13 -
- 1,1 Nm terhelés, 0,1 1/s szögsebesség és értékelésük.....	- 13 -
- 5,5 Nm terhelés, 0,1 1/s szögsebesség és értékelésük.....	- 15 -
2.6. Eltérő vizsgálati rendszerek eredményeinek összehasonlítása.....	- 18 -
3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	- 19 -
4. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBI FELADATOK, GYAKORLATI HASZNOSÍTÁS, LEHETŐSÉGEK.....	- 21 -
5. SUMMARY	- 23 -
6. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK.....	- 25 -

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A fém alkatrészek helyettesítése műszaki műanyaggal egyre gyakoribb a siklócsapágyak, tömítések, görgők és fogazott gépelemek (fogaskerekek) esetében. Az így létrehozott polimer-acél tribológiai rendszerek a felületek között ébredő fémes adhézió elkerülésének egyik lehetőségét jelentik. A műanyagok további előnye a fémekkel szemben, hogy külső kenés nélkül is működhetnek, zajsztintjük alacsonyabb, kiváló a rezgéscsillapításuk, kicsi a tömegük. A hajtástechnikában alkalmazott siklócsapágyak, fogaskerekek méretei, anyaga, kialakítása függ a hajtásrendszer jellemzőitől (teljesítmény, sebesség, hőmérséklet, esetleg élelmiszerhigiénia). Mindezek elősegíthetik a műanyag alkatrészek felhasználását.

Az egymással kapcsolódó és elmozduló felületek tribológiai viselkedése rendkívül összetett folyamatok eredménye, melyet számos tényező befolyásolhat. Ahhoz, hogy a polimerek az alkalmazott rendszerekben előnyös tribológiai tulajdonságokkal rendelkezzenek, megfelelő anyagkiválasztást, méretezést és működési feltételeket kell biztosítani. A fogaskerekek esetében a kapcsolódás jellegzetes vonása a csúszó és a gördülő súrlódás különleges kombinációja az érintkező fogak között. Az itt fellépő tribológiai folyamatok törvényszerűségeinek ismerete elengedhetetlen, mivel az egymáson csúszó és gördülő elemek érintkező felületein keletkező súrlódás és kopás, valamint azok irányítása, kenése döntő mértékben meghatározzák a fogaskerék kapcsolatok működését és a hajtás energetikai viszonyait. A fogazatok geometriai méreteinek meghatározására, a szilárdsági és tapasztalati összefüggések a szakirodalomban rendelkezésre állnak, de a már említett fogkapcsolódás során lejátszódó tribológiai folyamatok és hatások pontos feltérképezése és összehasonlítása a műszaki műanyagok esetében még nem megoldott, kevés az irodalmi adat, vagy anyagkiválasztási segédlet. A kenőolajok értékelésére általában fogaskerék próbapadokat használnak. A legtöbb ilyen készülék hengeres fogaskerekeket tartalmaz, így ezekkel a készülékekkel a polimer fogaskerekek kopásvizsgálata megvalósítható.

A polimerek tribológiai tulajdonságainak meghatározására számos szabványosított eljárás áll a rendelkezésünkre. Ezek a vizsgálati eljárások a legegyszerűbb laboratóriumi modell vizsgálatoktól egészen az üzemi vizsgálatokig terjednek. A kenés nélküli normál környezeti feltételek mellett végzett egyszerű próbatest vizsgálatok kisebb költségekkel járnak, pontosan elkészíthetők a próbatestek és a vizsgálat gyorsan felhasználható eredményeket ad. Ezek az eredmények általában összehasonlítható anyagvizsgálatokhoz használhatók. Ilyen lehet a laboratóriumi kisméretű próbatest vizsgálat (small scale test), ahol kis méretű, egyszerű geometriai alaptestekkel (henger, hasáb) végezzük el a kísérleteket. Ha az üzemelés során nagy igénybevételek is felléphetnek, akkor ezek vizsgálatához a nagyméretű próbatest vizsgálat (large scale test) ajánlott. A próbatestek itt is egyszerű geometriai alakzatok, de az anyagok teherbírás vizsgálati is elvégezhető. A valós rendszerre vonatkozólag pontosabb eredmények érhetőek el a valós gépelem vagy alkatrészvizsgálatokkal, ahol a modell a működési folyamatokat próbálja követni.

Kutató munkám célja az acéllal párosított műszaki polimerek súrlódási és kopási tulajdonságainak vizsgálata egyszerű alakú próbatesteken, valamint fogaskerekeken. Továbbá a feladatok közé tartozik a polimer fogaskerekek fogkapcsolódásánál fellépő erők és súrlódási folyamatok vizsgálata. Fontos célkitűzésem, hogy a gyakorlat számára olyan használható információkat szerezzek, melyek a polimerek alkalmazását és használhatóságát segítik.

A kutatómunkám megvalósításának fő fejezetei:

a, A vizsgálatokhoz kiválasztott műszaki polimerekből készített egyszerű henger alakú próbatestek, súrlódási és kopási tulajdonságainak vizsgálata szabványos rendszerekben, fém ellenfelületen. Az anyagok rangsorolása a súrlódási és kopási eredmények figyelembe vételével.

b, A hagyományos vizsgálati eljárás kiegészítése dinamikus terhelésű mérésekkel. A különböző polimerek ezen hatások alatti súrlódási és kopási folyamatainak leírása, valamint a hagyományos és a dinamikus eljárással vizsgált tribológiai tulajdonságok közötti összefüggések meghatározása.

c, A polimerek túlterheléssel szembeni viselkedésének elemzése nagyméretű próbatesteken végzett vizsgálatokkal. A kis és a nagyméretű vizsgálatok eredményei közötti összefüggések meghatározása.

d, A polimer/acél fogaskerekek kapcsolódása folyamán fellépő terhelő és súrlódási erők vizsgálata, valamint a kapcsolóvonal mentén a súrlódási tényező meghatározása. A mérésekhez fogkapcsolódási modellvizsgáló berendezés tervezése és megépítése. A kapott eredmények alapján összefüggések keresése a kis és nagyméretű vizsgálatokkal.

e, A kutatási programban szereplő polimer/acél anyagpárok üzemeltetési paraméterei határértékének meghatározása, segítségnyújtás az optimális anyagpárosítás kiválasztásához.

2. ANYAG, MÓDSZER, EREDMÉNYEK

2.1. A modellvizsgálatok helyszíne

A kisméretű polimer próbatesteken a súrlódás és kopásvizsgálatokra a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet Laboratóriumában került sor. Ezek a statikus és dinamikus „rúd tárcsán”, „henger síkon” és a fogkapcsolódás modell vizsgálatok voltak. A kisméretű próbatesteken végzett mérések célja a különböző polimerek acél ellenfelületen mért súrlódási és kopási tulajdonságainak alap kutatás szintű feltérképezése.

A nagyméretű polimer próbatesteket a Genti Egyetem Gépszerkezetek és Gépgyártás Tanszékén (Ghent University, Laboratory Soete, St Pietersnieuwstraat 41, B-9000 Gent, Belgium) mértem, valamint a vizsgálatokhoz szükséges berendezéseket ott fejlesztettem.

2.2. A kutatásban szereplő műszaki műanyagok

Az 1. táblázat mutatja be a vizsgált polimereket. A mérésekhez minden esetben öntéssel vagy extrudálással előállított műszaki műanyag féltermékek (rudak és táblák) kerültek felhasználásra, mint kiindulási alapanyag. A féltermékekből forgácsolással állítottam elő a kis- és nagyminta, valamint a fogaskerék próbatesteket.

1. táblázat A vizsgálatoknál használt próbatestek anyaga

Termék megnevezés*	Teljes megnevezés	Saját jelölés
DOCAMID 6G	öntött poliamid 6, nátrium	PA 6G Na
DOCAMID 6G H	öntött poliamid 6, magnézium	PA 6G Mg
DOCAMID 66 GF30	extrudált poliamid 66 + üvegszál	PA 66 GF30
DOCACETAL C	Poliacetál	POM C
DOCAPET TF	polietilén tereftalát + teflon	PETP /PTFE
DOCALIT	Textilbakelit	Bakelit

*forrás: www.quattroplast.hu

2.3. Kisméretű próbatestekkel végzett modellvizsgálatok

A kisméretű próbatestekkel végzett modellvizsgálatok célja, a választott polimer próbatestek csúszó súrlódási jellemzőinek meghatározása köszörült acél felületen. A laboratóriumi modell vizsgálatokat először hagyományos rúd tárcsa rendszerekben végeztem el. Az egyirányú csúszó súrlódás és a felület menti érintkezésből adódó felületi terhelés alapján a polimerek súrlódási és kopási jellemzői jól rangsorolhatók és az adalékok hatása jól látható. A gyakorlatban az alkatrészek többségét dinamikus hatások érik. A dinamikus igénybevételek súrlódásra gyakorolt hatásának vizsgálatára, dinamikus mozgáspályát programoztam, amelyen a próbatest változó sebességgel halad, és közben a terhelés nagysága is változik. Így a statikus és dinamikus igénybevételek hatásai elemezhetők a polimerek súrlódási és kopási viselkedésében.

A vizsgálatok során meghatároztam a statikus- és dinamikus igénybevételi feltételekhez tartozó súrlódási tényező értékeket. A mérési rendszerek meghatározó feltételei közötti különbségek a 2. táblázatban találhatók.

A statikus feltételű rúd-tárcsa és a dinamikus rúd-sík vizsgálatoknál a hengeres polimer próbatestek méretei: átmérő Ø6 mm, hossz 15 mm.

A kisméretű próbatest méréseknél az ellenfelület anyaga S 355 szerkezeti acél, köszörült állapotban. Rugalmassági modulusa $E=210$ GPa. Az acél tárcsa átmérője 350 mm, vastagsága 13 mm.

2. táblázat Mérési kategóriák fő jellemzői

	I. kategória „statikus” rúd-tárcsa	II. kategória „statikus” rúd-tárcsa	III. kategória „dinamikus” rúd-sík
Acél ellenfelület felületi érdessége [μm]	Ra 0,05 – 0,15 Rz 0,31 – 0,93		
Felületi terhelés [MPa]	2	5	1 - 12
Vizsgálati sebesség [m/s]	0,4	0,4	0,02–0,025–0,3–0,35–0,4
Környezeti hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]	23		
Vizsgálati úthossz [m]	1000	1000	5 ciklus

Az eredmények összesítése a 3. táblázatban található.

Polimer/acél anyagpárosításokat kisméretű próbatesteken vizsgálva megállapítható, hogy:

- Textilbakelitnél kedvezőtlenül magas a súrlódás és súrlódási melegedés, gyenge a kopásállóság. A bejáratási szakaszban lassabban alakul ki a polimer film és dinamikus egyensúly.
- PETP /PTFE esetén kedvező (alacsony) súrlódás és súrlódási melegedés tapasztalható, ami jó kopásállósággal is párosul. Nem érzékeny a dinamikus hatásokra, a bejáratási folyamat, súrlódási egyensúly kialakulása egyenletes.
- Poliamidoknál az eltérő mechanikai tulajdonságok hatása részben felismerhető a tribológiai viselkedésben. A nagyobb alakváltozási képesség (PA 6G Mg) negatívan hat az egyenletes súrlódásra, de a kopásra nem. A bejáratás gyorsabb. A nagyobb merevség, rugalmassági modulus, kisebb ütőmunka (pl. üvegszál erősítés) viszont érzékeltlenebbé teszi az anyagot dinamikus terhelési hatásokkal szemben. Ez alól kivétel a Na katalizálású natúr öntött poliamid 6, mely nagyobb kopást eredményezett a dinamikus rendszerben.
- POM C súrlódása kedvező, de a kopásállósága a többi hőre lágyuló műanyaghoz viszonyítva gyenge. A bejáratás, polimer-film- és dinamikus egyensúly (adhézió, re-adhézió) kialakulás egyenletes, hasonló a PETP /PTFE kompozitához.

3. táblázat Kisméretű próbatest vizsgálatok mérési eredményeinek összegzése

	Anyagok	súrlódási rangsor	súrlódási tényező		hőmérséklet-változás		kopás+ deformáció	
			μ_{\max}	$\mu_{\text{dált}}$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$		$\Delta k [\text{mm}]$	
I. kategória	PETP /PTFE	1	0,209	0,205	3,79		0,00346	
	POM C	2	0,218	0,218	4,77		0,01026	
	PA 66 GF30	3	0,313	0,26*	5,4		0,0082	
	PA 6G Na	4	0,300	0,279	4,04		0,00836	
	PA 6G Mg	5	0,365	0,288	4,37		0,0108	
	Bakelit	6	0,519	0,36*	8,96		0,01518	
			μ_{\max}	$\mu_{\text{dált}}$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$		$\Delta k [\text{mm}]$	
II. kategória	PETP /PTFE	1	0,184	0,176	4,24		0,00692	
	POM C	2	0,203	0,203	4,84		0,01556	
	PA 66 GF30	3	0,255	0,212	5,41		0,00882	
	PA 6G Na	4	0,295	0,234	4,49		0,01236	
	PA 6G Mg	5	0,325	0,249	5,41		0,0157	
	Bakelit	6	0,755	0,55*	22,7		0,03946	
			1. ciklus	Teljes	1. ciklus	teljes	1. ciklus	teljes
			$\mu_{\text{lált}}$	$\mu_{\text{sált}}$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$		$\Delta k [\text{mm}]$	
III. kategória	Bakelit	1	0,065	0,078	0,09	0,29	0,041	0,089
	PETP /PTFE	2	0,067	0,084	0,09	0,29	0,019	0,048
	POM C	3	0,067	0,079	0,14	0,39	0,025	0,105
	PA 66 GF30	4	0,091	0,126	0,29	0,59	0,028	0,08
	PA 6G Na	5	0,099	0,116	0,19	0,59	0,048	0,133
	PA 6G Mg	6	0,113	0,137	0,19	0,59	0,032	0,102

* - folyamatosan változó, többnyire emelkedő tendenciák

2.4. Nagyméretű próbatestekkel végzett modellvizsgálatok

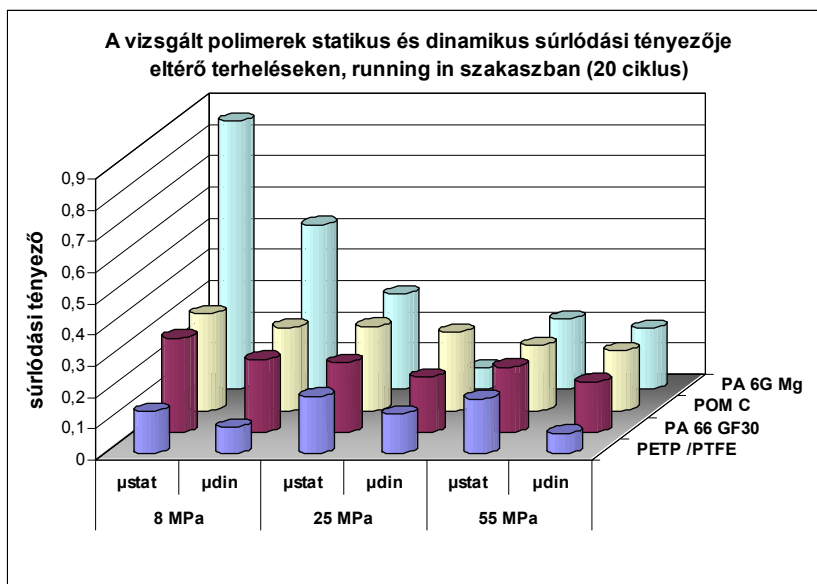
A tribológiai kutatások szempontjából fokozott jelentősége van a kontakt zóna és a próbatest méretének. Korábbi kísérletek igazolták, hogy a natúr és kompozit polimerekben lejátszódó hővezetés, deformáció és inhomogén feszültség-eloszlás nagymértékben befolyásolhatja a súrlódást és a kopást. Ezért munkám fontos kiegészítő részét képezi a dinamikus hatásokat is tartalmazó nagyméretű kutatási rendszer megtervezése és a mérési eredmények értékelése.

A mérésekhez berendezést építettem a Genti Egyetem Gépelemek és Gépgyártástechnológia Tanszék anyagvizsgáló laboratóriumában.

A műszaki műanyaggal súrlódó kapcsolatba kerülő acél ellenfelület (blokk) anyaga az európai mérnöki gyakorlatban gyakran használt 40CrMnNiMo8 ötvözt acél. Befoglaló méretei: 90x106x420 mm. Amíg a kisméretű próbatest vizsgálati rendszerekben a kontakt zóna nagysága 28,2 mm², addig a nagyméretű próbatestek mérési rendszerében 24000 mm² volt. Ez 851-szeres növekedés, majdnem három nagyságrend.

A méréseket alternáló mozgás mellett, több eltérő terhelési szinten hajtottam végre. Minden mérés kétszeri ismétléssel, azaz háromszori adatrögzítéssel történt. Az 1. ábra a méréssorozatokat átlagértékeit mutatják. Az irányváltások környezetében gyorsulási szakaszok, statikus és dinamikus súrlódási jelenségek lépnek fel. A polimer gépelemeknél alkalmazott feszültség szintekhez képest nagy felületi terhelések miatt pontosan megállapítható volt a statikus és dinamikus súrlódás közötti

különbség. Ennek pontos ismerete összevethető a fogaskerek felületén - a főpont környezetében - létrejövő átmeneti gördülési zóna és csúszás kezdete/vége határán tapasztalt jelenséggel. A vizsgáló berendezés hosszú, egyenes löketű szakaszain mért súrlódás pedig elvileg összehasonlítható a kisméretű mintákon végzett, állandó sebességű rúd-tárcsa mérésekkel.



1. ábra A statikus és dinamikus súrlódási tényezők alakulása a terhelés függvényében, a bejárati „running in” szakaszban

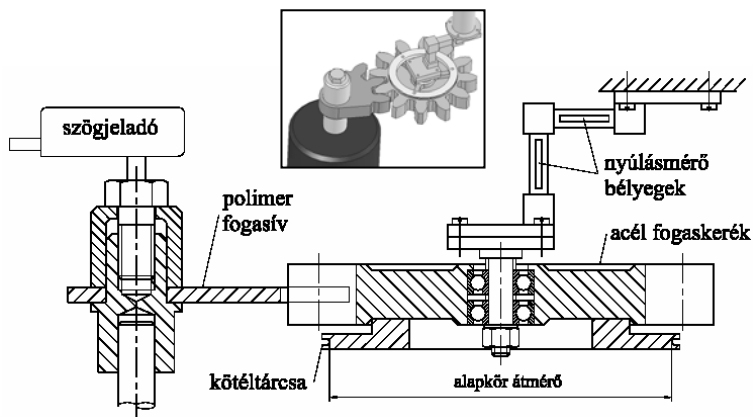
2.5. Fogaskerék fogkapcsolódás modellvizsgálatok

A fogaskerek kapcsolódása során a csúszó és gördülő súrlódás különleges kombinációjából adódó tribológiai folyamatok meglehetősen bonyolultak. A fogkapcsolódás geometriai és mechanikai elmélete a szakirodalomban pontosan meghatározott, de a fogsúrlódás jelenségét leegyszerűsítve és állandónak feltételezve tárgyalják.

A kapcsolódásnál lejátszódó súrlódási folyamatok és erőhatások összehasonlítására fogkapcsolódás modellvizsgáló berendezést fejlesztettem ki.

2.5.1. Berendezés

A fogkapcsolódási modellvizsgálatokhoz a kisméretű próbatetekhez használt berendezést építettem át (2. ábra). A motor csigahajtóművön keresztül forgatja a polimer fogasívet. Ehhez kapcsolódik az acél fogaskerék, amely a nyúlásmérővel ellátott befogófej tengelycsonkján van csapágyazva. A súlyterhelés, a fogaskerek kapcsolóvonal mentén hat a kerek alapkör átmérőjének megfelelő átmérőjű kötélszigán 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.



2. ábra Fogkapcsolódás modellvizsgáló berendezés vázlata

A vizsgálati paramétereket a polimer fogaskerek méretezésénél alkalmazott számítási eljárásokat alapul véve határoztam meg.

A kapcsolódó fogaskerek adatai:

fogsám:	$z_1 = z_2 = 12$
modul:	$m = 10 \text{ mm}$
kapcsolószög:	$\alpha = 20^\circ$
fogszélesség:	$b = 5 \text{ mm}$ (a polimer fogaskerék ív esetén)

A fogaskerék adataiból kitűnik, hogy alámetszett kerekekről van szó. A vizsgálatokhoz azért választottam ilyen nagy modulú fogaskereket, hogy a csúszásból és gördülésből származó súrlódási erő változások a fogkapcsolódás során jól meghatározhatók és egyértelműek legyenek. Azonban a helyes kapcsolódás érdekében a fogaskerek fejkör átmérőjét módosítanom kellett.

Az acél fogaskerék anyaga S 355.

A fogaskerék huzalszakra forgácsolással készült, a gyártási pontosság $\pm 0.01 \text{ mm}$.

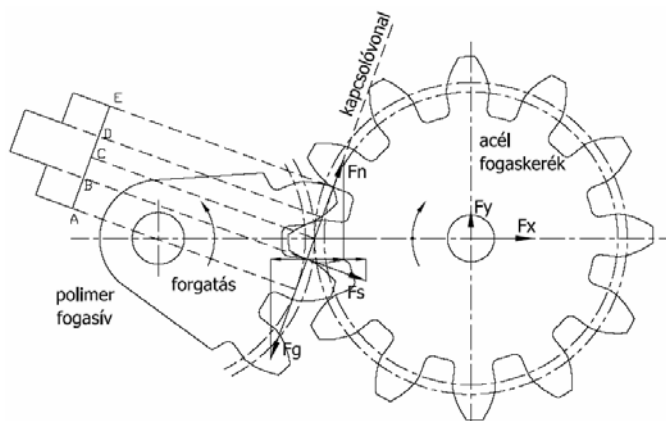
A polimer 3 fogú fogasíveket CNC marógépen kontúrmarással készítettem, vastagsága 5 mm. A vizsgált polimerek megegyeznek a kisméretű próbatest vizsgálatoknál ismertetett anyagokkal (1. táblázat).

2.5.2. Fogsúrlódási erő és a fogsúrlódási tényező meghatározása

A mérések során az F_y tengelyerő értéke a mérőrendszer tudatos tervezésével összhangban megközelítőleg zérusnak adódott, így elhanyagolható a további számításoknál. A súrlódási erő értékének számítását a BD egy fog kapcsolódási szakaszban a következőkben ismertetem.

A 3. ábra szerint az erők egyensúlyára felírható a következő egyenlet:

$$F_x = F_s \cdot \cos \alpha$$



3. ábra Egy fogpár kapcsolódás

A súrlódási erő:

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

ahol: F_x - a mért tengelyerő [N]
 α - kapcsolószög [°]

A fogkapcsolódás modellvizsgálati rendszerben értelmeztem egy statikus és egy dinamikus súrlódási tényezőt a kapcsolódó fogak közt a mozgásviszonynak megfelelően, amelyet a súrlódási erő és a normál erő hányadosaként határoztam meg. Közvetlenül a főpont előtt és után, ahol a csúszás sebessége közel zérus, valamint a főpontban, ahol a fogak egymáson gördülnek, a polimer fog rugalmas deformációjából adódóan nem értelmezhető a klasszikus értelemben vett csúszásból származó súrlódási tényező.

A mérési adatokból számított súrlódási tényező értéke:

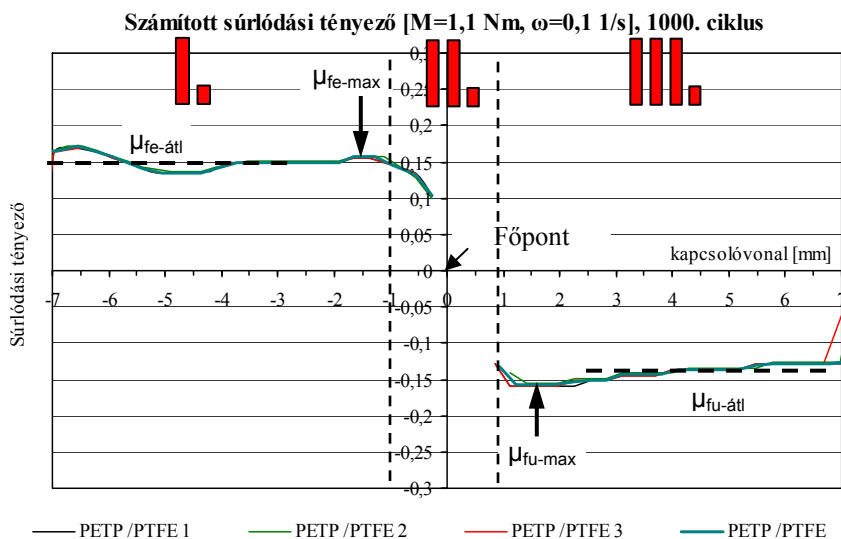
$$\mu = \frac{F_s}{F_n}$$

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

A mérések alapján számítással meghatározott súrlódási tényező változását a kapcsolóvonal mentén a 4. ábra mutatja. A főpontban egymáson gördülnek az érintkező fogak, ebben a pontban tisztán gördülő súrlódás ébred. A polimerek deformációja és rugalmassága miatt a főpont közvetlen környezetében, ahol a csúszás közel zérus, az érintkező felületek egymáshoz tapadhatnak. Ebből adódóan az elmozdulást az anyagon belüli rugalmas deformáció határozhatja meg. Ezért az általam számított csúszó súrlódási tényezőt a főpont közvetlen környezetében nem értelmeztem, a görbét tudatosan megszakítottam. A megszakítás helye a görbék 45°-os érintési pontja. Ezzel a mérési eredményeket kettő plusz egy átmeneti szakaszra bontottam (a 4. ábra szerint I. III. és az átmeneti II. szakasz). A főpont előtti szakaszban a csúszás értéke folyamatosan közelít a zérushoz, míg a főpont utáni szakaszban zérusról folyamatosan növekszik. Ez a változás a súrlódási tényező értékére is hatással van.

A főponti átgördüléshez köthető súrlódási tényező irányváltás előtti egy fogpár kapcsolódási szakaszban mért lokális maximális súrlódási tényező értékének jelölése μ_{fe-max} . A

súrlódási irányváltás után is mérhető abszolút értékben egy lokális μ_{fu-max} , mely a 4. ábra skálázása szerint a főponti irányváltás miatt negatív előjelű.



4. ábra A fogsúrlódási tényező változásának diagramja

A főponti átgördülés előtt és után, a dinamikus csúszási súrlódási szakaszon értelmeztem az átlagos súrlódási tényezőket, melyek jelölése $\mu_{fe-átl}$, $\mu_{fu-átl}$.

Összegezve:

- μ_{fe-max} : főpont előtt ébredő lokális, maximális súrlódási tényező
- $\mu_{fe-átl}$: főpont előtti átlagos súrlódási tényező
- μ_{fu-max} : főpont után ébredő, lokális maximális súrlódási tényező
- $\mu_{fu-átl}$: főpont utáni átlagos súrlódási tényező

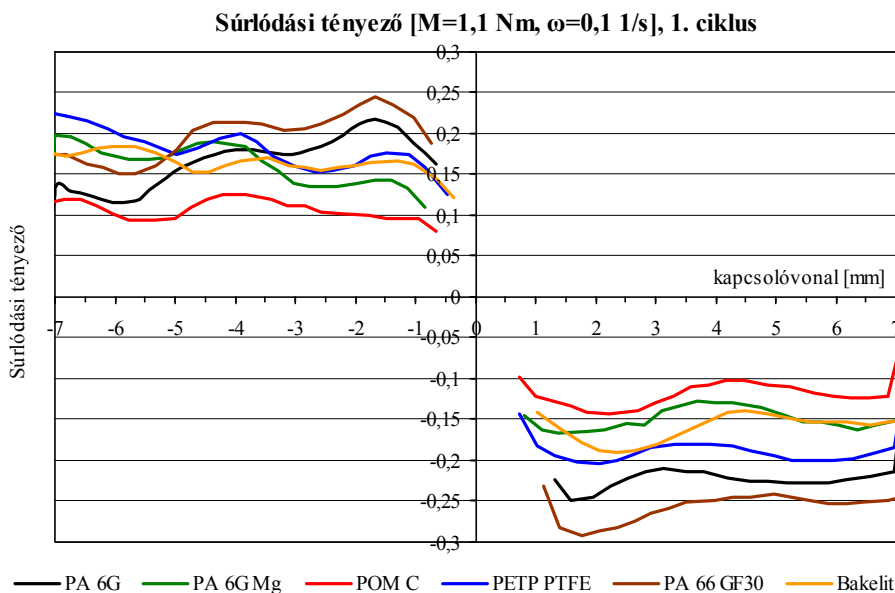
2.5.3. Súrlódási részeredmények

- 1,1 Nm terhelés, 0,1 1/s szögsebesség és értékelésük

Az 5. ábra a vizsgált műszaki polimer fogaskerék fogak és acél fogaskerék fog közt a kapcsolóvonal mentén ébredő súrlódási tényező értékeit mutatja az első ciklusban, míg a 6. ábra az 500. ciklusnál mért súrlódási tényező értékeit mutatja. A terhelő nyomaték és a forgás szögsebessége minden esetben azonos volt.

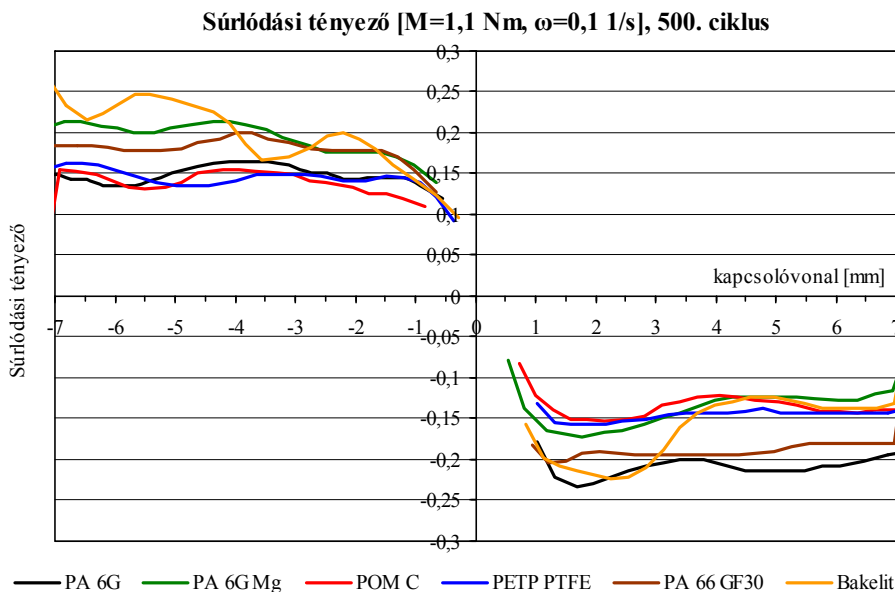
A számított fogsúrlódás elméleti egyenesei a valóságban összetettebb felületi folyamatokra utalnak, ha az 5. ábra eredményeit megvizsgáljuk. Az ábra szerint adott fogpárok esetén, állandó terhelő nyomaték mellett a kapcsolóvonal menti súrlódási tényező nem lesz állandó. Ez a jelenség még feltűnőbb a súrlódás kezdeti szakaszában (running-in), ahol az egyes anyagpárok között jelentős különbségek adódnak.

Amennyiben a főpont környezetében a súrlódás lokális maximuma határozottan kiemelkedik a csúszási szakaszok súrlódási értékeitől, ott a folyamat „stick-slip” hajlama is felismerhető. Ha ez a lokális maximum – a legkisebb csúszási sebességekhez tartozó súrlódás – alig, vagy egyáltalán nem tér el a csúszási szakaszok súrlódási értékeitől, ott a „stick-slip” hajlam is kicsi, azaz a fogaskerékpár futásának zajszintje is alacsonyabb. Ez a mérési eredmény a szubjektív megfigyelésekkel összhangban van.



5. ábra Egy fogpár kapcsolódás szakaszán, az első ciklusban tapasztalható fogsúrlódás

Az 500. ciklushoz tartozó ábrát (6. ábra) elemezve érdekes jelenségek figyelhetők meg.



6. ábra Fogsúrlódás az 500. ciklusban

- A PA 6G “átmeneti szakasz” a főpont körül a legnagyobb. Ez nem tudható be egyértelműen az adhéziós jelenségeknek, mivel a vizsgált anyagok között nem a PA 6G rendelkezik a legnagyobb adhéziós hajlammal, de a deformációk sem eredményezhetik önmagukban, hiszen a PA 6G átlagos rugalmassági modulussal rendelkezik. Minden bizonnyal egy olyan eredő hatás lép fel, amelynél az adhézió, transzferfilm létrejötté,

anyagrugalmasság és felületi geometria együttesen eredményezi a stick-slip hajlamos, viszonylag zajos futást.

- A textilbakelit súrlódása kezd instabillá válni.
- A főpont előtt és a főpont utáni súrlódási sorrend már nem azonos, nem egyértelmű, az egyes görbék keresztezik egymást.
- A főpont után a PA 6G és PA 66 GF30 határozottan nagyobb súrlódást mutat a többi polimerhez képest (kivéve textilbakelit)
- A POM C és PETP /PTFE közötti különbség már nem szignifikáns. A PETP /PTFE egyre jobban megközelíti a POM C kedvező súrlódását, a PTFE adalékolás egyre inkább kifejti hatását.

4. táblázat. Súrlódási értékek összefoglalása (bejártott, steady-state állapot, 1.1 Nm terhelő nyomaték és $\omega=0.1$ 1/s)

Főpont előtt				Főpont után			
Rangsor	Anyag	$\approx \Delta\mu$ (%)	lokális μ max.	Rangsor	Anyagok	$\approx \Delta\mu$ (%)	lokális μ max.
1.	POM C	48	-	1.	PETP/PTFE	38	-
2.	PETP/PTFE	53	+	2.	POM C	34	-
3.	PA 6G	35	\pm	3.	PA 6G Mg	72	\pm
4.	PA 66 GF 30	44	\pm	4.	PA 66 GF 30	46	+
5.	PA 6G Mg	66	+	5.	PA 6G	30	+
6.	Textilbakelit	760	+	6.	Textilbakelit	400	+

+ kiugró

\pm felfedezhető

- nem meghatározó eltérés

A 4. táblázat alapján megállapítható, hogy a súrlódási sorrend a bejártás kezdeti szakaszához képest alapvetően megváltozott, és elkülöníthető trendek fogalmazhatók meg a főpont előtti és utáni súrlódási folyamatokra.

- 5,5 Nm terhelés, 0,1 1/s szögsebesség és értékelésük

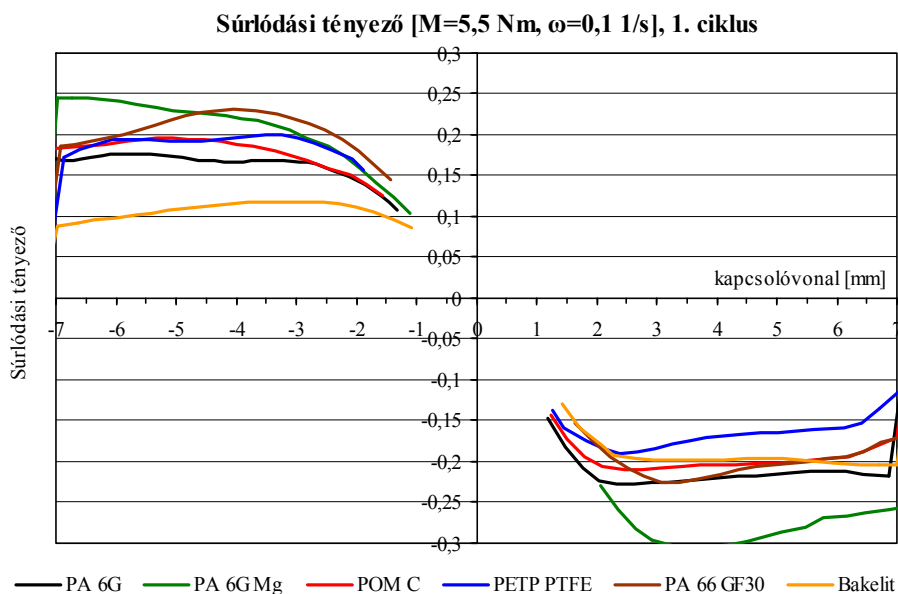
Az előző vizsgálati rendszerhez képest a terhelő nyomatékot ötszörösére emelve többféle összehasonlítást tehetünk. Egyrészt a kisebb terhelési szint súrlódási eredményeivel és trendjeivel lehet összehasonlítani, másrészt az egyes polimerek viselkedését egymáshoz képest.

A 7. ábra a bejártás első ciklusának súrlódási eredményeit mutatja 5,5 Nm terhelő nyomaték esetén.

Az alacsony terhelési szint eredményeihez képest a görbék más elrendeződést mutatnak.

- A PA 6G Mg a megnövekedett felületi nyomást nagyobb felületi deformációval és nagyobb adhézióval viszonzta, kiugróan magas súrlódással. A főpont körüli gördülési-tapadási zóna kiugróan nagy a többi műanyaghoz képest.
- A főpont után a csúszás megindulása egyértelműen eltolódik a főponthoz képest, ami a nagyobb terhelésből származó nagyobb deformációval magyarázható.
- A főpont utáni lokális maximumok helyzete is szórást mutat. Egyértelmű a poliamidok nagyobb tapadási hajlama a POM C-hez és a PETP /PTFE -hez képest.
- Meglepően alacsony súrlódási értékeket eredményezett a textilbakelit/acél fogaskerék párosítás.
- A POM C súrlódása a kisebb terhelési szintnél kapott eredményekhez képest romlik, míg a PETP/PTFE esetében javulás észlelhető.

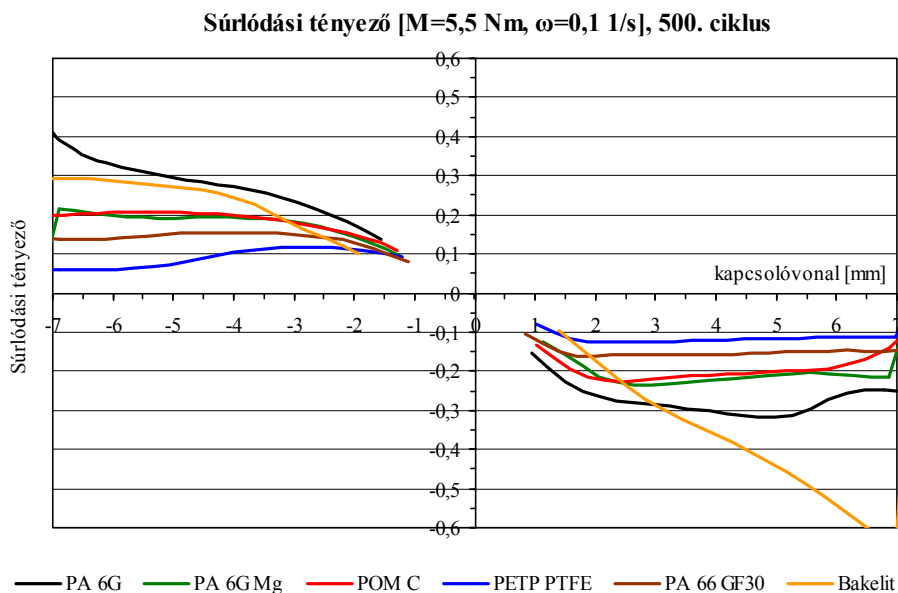
- A súrlódási tényezők intervalluma alapvetően megegyezik a két terhelési szinten, de a nagyobb terhelésen már nem lehet olyan egyértelmű rangsort felállítani, mint a kisebb terhelési szinten, mert az egyes anyagok súrlódási görbéi meredekségben és jellegben sem egyeznek meg, számos görbe metszi egymást.



7. ábra Fogsúrlódás a bejáratás első ciklusában, emelt terhelésen.

Az 500. ciklus eléréseivel (8. ábra) egyértelmű súrlódási trend kialakulása figyelhető meg, a főpont előtt és főpont után nincs alapvető eltérés a trendekben, csak súrlódás abszolút értékei térnek el.

- A PETP /PTFE, PA 66GF30, POMC, PA 6G Mg, PA 6G és textilbakelit sorrend egyértelmű.
- A textilbakelit minden ismert jellegzetességet és trendet felborít, főleg a főpont utáni súrlódása mutat nagyon intenzív tapadási hajlamot.
- A PETP /PTFE kompozit továbbra is a legjobb, a súrlódási tényező abszolút értéke a 100. ciklushoz képest tovább csökkent, a PTFE adalék kifejti hatását a csúszások során.
- A poliamidokat összehasonlítva feltűnő, hogy az üvegszálal PA 66 súrlódása kisebb, mint a natúr öntött poliamid 6 változatoké.
- A POM C és a PA 6G Mg esetében nincs szignifikáns különbség, a főpont utáni lokális maximum a PA 6G Mg esetén csökken, a 100. ciklushoz képest.
- A nátriummal katalizált PA 6G viszont jóval kedvezőtlenebb súrlódást mutat, mint a magnéziummal katalizált PA 6G Mg. Ez összefüggésben lehet azzal a korábban tapasztalt jelenséggel, hogy a PA 6G Mg esetében hamarabb alakul ki és vastagabb a transzferfilm a fém felületen, ami a dinamikus súrlódási egyensúly fennmaradásában fontos szerepet játszik.



8. ábra. Fogsúrlódás a vizsgálat 500. ciklusában, emelt terhelésen.

5. táblázat. Súrlódási értékek összefoglalása (bejártott, steady-state állapot, 5,5 Nm terhelő nyomaték és $\omega=0,1$ 1/s)

Főpont előtt				Főpont után			
Rangsor	Anyag	$\approx \Delta\mu$ (%)	lokális μ max.	Rangsor	Anyagok	$\approx \Delta\mu$ (%)	lokális μ max.
1.	PETP/PTFE	35	±	1.	PETP/PTFE	2	-
2.	PA 66 GF 30	25	-	2.	PA 66 GF 30	44	-
3.	POM C	90	-	3.	POM C	85	±
4.	PA 6G Mg	380	-	4.	PA 6G Mg	360	+
5.	PA 6G	270	-	5.	PA 6G	330	+
6.	Textilbakelit	260	-	6.	Textilbakelit	210	+

+ kiugró

± felfedezhető

- nem meghatározó eltérés

Az 5. táblázat alapján megállapítható, hogy a súrlódási sorrend az alacsonyabb terhelési szinthez képest megváltozott, és elkülöníthető trendek fogalmazhatók meg a főpont előtti és utáni súrlódási folyamatokra.

2.6. Eltérő vizsgálati rendszerek eredményeinek összehasonlítása

A 6. és 7. táblázat a sűrűláadási rangsorokat alapul véve, eltekintve a rendszerfüggő, abszolút sűrűláadási tényező értékektől összefoglalja a rendszerek közötti korrelációkat.

6. táblázat A bejáratási szakaszokban tapasztalt sűrűláadási rangsorok közötti korreláció

	<i>Valós fogsűrűláadás, bejáratási szakasz (running in)</i>
Kisméretű próbatest, dinamikus rendszer	- POM C és poliamidok viszonya hasonló
	- Textilbakelit és a hőrelágyuló anyagok viszonya nem hasonló
	- poliamid közötti sorrend nem hasonló
	- PETP/PTFE és PA 6G, PA 66GF30 viszonya hasonló
Nagyméretű próbatest vizsgálatok	- POM C és a PA 6G Mg viszonya hasonló
	- POM C és PETP/PTFE viszonya nem hasonló
	- PETP/PTFE és PA 6GMg és PA 66 GF30 viszonya hasonló
	- PA 66 GF30 és POM C viszonya nem hasonló

7. táblázat A stabilizálódott (steady-state) szakaszokban tapasztalt sűrűláadási rangsorok közötti korreláció

	<i>Valós fogsűrűláadás, stabilizálódott szakasz (steady state)</i>
Kisméretű próbatest, tű-tárcsa rendszer	- POM C és PA 66 GF30 viszonya nem hasonló
	- Textilbakelit és a hőrelágyuló anyagok viszonya hasonló
	- poliamid közötti sorrend nem hasonló
	- PA 66GF30 és többi öntött natúr poliamid 6 viszonya hasonló
	- A magnéziumos és a nátriumos katalizálású öntött poliamid viszonya nem hasonló
	- PETP/PTFE és többi vizsgált polimer viszonya hasonló
Nagyméretű próbatest vizsgálatok	- PETP/PTFE a többi anyaghoz képest hasonló
	- PA 66GF30 a többi anyaghoz képest hasonló
	- POM C a többi anyaghoz képest hasonló
	- PA 6G Mg a többi anyaghoz képest hasonló

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Mérési módszert és mérőrendszert dolgoztam ki az evolvens fogprofilú fogaskerekek kapcsolódása során fellépő súrlódási erő meghatározására. A mérőrendszer az egy-fogpár kapcsolódás szakaszán méri az érintkező fogak közt ébredő súrlódási erő komponenseket.
2. Megállapítottam, hogy a kapcsolóvonal mentén mért súrlódási erő az idő függvényében változik. A polimer-acél fogaskerekek fogkapcsolódása során, a főpont környezetében, a görbdülés és a csúszás viszonya függ az anyagpárosítástól. Meghatároztam egyes anyagpárookra a főpont környezetében kialakuló átmeneti tartomány nagyságát és annak változását az elhasználdás függvényében (vizsgálati ciklusok száma).
3. A polimer/acél fogpárok közötti súrlódási tényező, állandó terhelő nyomaték és fogaskerék fordulatszám esetén, a kapcsolóvonal mentén nem állandó. Meghatároztam a főpont előtti csúszási súrlódási tényező átlagát, a főpont előtti lokális súrlódási tényező maximumot, a főpontot és környékét jellemző átmeneti csúszási- tapadási zónát, a főpont utáni lokális súrlódási tényező maximumot és átlagos súrlódási tényezőt. A főpont után a csúszási-tapadási átmeneti szakasz nagysága és a főpont után mérhető lokális súrlódási maximum jellemzi az anyagpárosítás tapadó csúszási hajlamát.
4. Megállapítottam, hogy a bejáratási állapothoz képest a stabilizálódott állapotban 5-10%-os súrlódás csökkenés következik be, a terheléstől függetlenül, a PETP/PTFE és acél fogaskerék párosítás esetén, ami a hajtás határfok növekedésével jár. Kis terhelés szinten (19,5 MPa max. Hertz feszültség) a POM C súrlódása stabilizálódott, a főpont előtt a súrlódási tényező enyhén emelkedik a használat során. A terhelés növelése (43,5 MPa max. Hertz feszültség) a POM C súrlódását a kedvezőtlen, lassan növekedő irányba mozdította el. Ez a megállapítás a főpont előtti és utáni súrlódási jellemzőkre egyaránt érvényes.
5. A natúr öntött poliamid 6 típusok és az üvegszál erősítésű extrudált poliamid 66 eltérő módon reagált a terhelési szint növelésére. Kis terhelési szinten a poliamidok között nem volt szignifikáns eltérés stabilizálódott állapotban. A PA 66 GF30 súrlódási tényezője csak a bejáratási szakaszban haladta meg a natúr anyagokét, 12%-kal. A poliamidok súrlódása a használati idő függvényében enyhén növekedett. A nagyobb terhelési szinten a natúr öntött poliamid 6 anyagok súrlódási vesztsége átlagosan 50%-kal emelkedett, míg a PA 66GF30 súrlódása 10%-kal alacsonyabb szinten stabilizálódott a bejáratáshoz képest.
6. A textilbakelit (hőre keményedő, krezol formaldehid gyanta + textilszövet) súrlódási tényezője, terheléstől függetlenül, csökken a használat során. Kenés nélküli rendszerben a súrlódási jellemzői alapvetően eltérnek a hőre lágyuló műszaki műanyagokétól. A textilbakelit esetében nem alakult ki súrlódási egyensúly.
7. Az anyagpárosítások súrlódási tulajdonságait előkísérletekkel, kisméretű próbatestekkel statikus körülmények között tű tárcsán (pin-on-disc) és dinamikus tű sikon (pin-on-plate) modellvizsgálati rendszerekben, valamint nagyméretű próbatestekkel dinamikus (plate-on-plate) rendszerekben tanulmányoztam. A vizsgálati rendszerek értelmezési tartományában, relatív súrlódási rangsorokat állítottam fel a bejáratási- és a stabilizálódott szakaszra vonatkozóan. A statikus és dinamikus rendszerek eredményeit összehasonlítottam a fogkapcsolódás vizsgálati rendszerben kapott eredményekkel, részleges, anyagfüggő, korlátozott mértékű korrelációkat állapítottam meg az egyes vizsgálati rendszerek között.

- 7/a, A vizsgálati rendszerek értelmezési tartományában, relatív fogsúrlódási rangsorok állíthatók fel a bejáratási szakaszra vonatkozóan, dinamikus tű tárcsa (pin-on-plate) módszerrel: POM C és PA 6G, PA 6G Mg anyagminőségek viszonyában S355 acéllal párosítva, továbbá PETP/PTFE és PA 66 GF30 viszonyában S355 acéllal párosítva.
- 7/b, A vizsgálati rendszerek értelmezési tartományában, relatív fogsúrlódási rangsorok állíthatók fel a bejáratási szakaszra vonatkozóan, nagyméretű próbatest módszerrel: POM C és a PA 6G Mg anyagminőségek viszonyában S355 acéllal párosítva, továbbá PETP/PTFE és PA 6G Mg és PA 66 GF30 viszonyában S355 acéllal párosítva.
- 7/c, A vizsgálati rendszerek értelmezési tartományában, relatív fogsúrlódási rangsorok állíthatók fel a stabilizálódott (steady-state) szakaszra vonatkozóan, kisméretű próbatestekkel tű-tárcsa (pin-on-disc) módszerrel: textilbakelit és a hőrelágyuló anyagok viszonyában S355 acéllal párosítva, továbbá PA 66GF30 és PA 6G, PA 6G Mg viszonyában S355 acéllal párosítva, továbbá PETP/PTFE és többi vizsgált polimer viszonyában S355 acéllal párosítva.
- 7/d, A vizsgálati rendszerek értelmezési tartományában, relatív fogsúrlódási rangsorok állíthatók fel a stabilizálódott (steady-state) szakaszra vonatkozóan, nagyméretű próbatest vizsgálatokkal az összes kutatott polimer (PETP/PTFE, POM C, PA 66 GF30, PA 6G, PA 6G Mg) viszonyában S355 acéllal párosítva.

4. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBI FELADATOK, GYAKORLATI HASZNOSÍTÁS, LEHETŐSÉGEK

A műanyag fogaskerekek és egyéb polimer,- kompozit gépelemek használata a műszaki alkotásokban egyre gyakoribb. Az előnyös és hátrányos tulajdonságok pontos ismerete elengedhetetlen. A tervezési tevékenység, a gyártástechnológiák és a gépüzemfenntartási stratégiák elképzelhetetlenek a pontos mechanikai, kémiai, elektromos és tribológiai jellemzők ismerete nélkül.

Kutatási munkámban a leginkább elterjedt, illetve anyagfejlesztés szempontjából ígéretes polimerek tribológiai jellemzőit vizsgáltam. A szakirodalmi alapismeretekből kiindulva, az ismeretlen vagy kevésbé feltárt tribológiai összefüggéseket kutattam több vizsgálati rendszerben, eltérő próbatest és mozgási-, terhelési feltételek esetén. Valós gépelem (műanyag/acél fogaskerék) laboratóriumi vizsgálatához egyedi mérőrendszert terveztem és valósítottam meg. Ennek segítségével a fogaskerekek kapcsolóvonal menti súrlódását mértem, melyek az elméleti görbékhez képest anyagpáronként pontosíthatók voltak.

Az eredményeket összehasonlítottam a laboratóriumi mintavizsgálatok eredményeivel, és az anyagok közötti relatív trendeket, sorrendeket felállítva az egyes vizsgálati rendszerek közötti korrelációkat fogalmaztam meg.

A folyamat időbeni értékelése lehetőséget biztosított, hogy a súrlódás változásán keresztül a fogazott hajtás fogsúrlódási eredetű hatásfok változását indirekt módon megbecsülni, tervezni lehessen.

A kidolgozott módszerrel több más terhelési szinten és siklási sebességen, más anyagpárosításokkal is adatok nyerhetők a hajtások hatásfokváltozásáról, a fogsúrlódás stabilizálódásáról (vagy tönkremenetelről).

A mérőrendszer továbbfejleszthető más technikai lehetőségek alkalmazásával. Az erőmérés mellett a főpont környezetében definiált átmeneti zóna és a csúszási szakaszok tribológiai jellemzőinek időbeni változása egyaránt vizsgálható rezgésdiagnosztikai módszerekkel, és a tribológiai értékelés kiegészülhet rezgés RMS, amplitúdó, sebesség és gyorsulás analízissel.

A fogazott hajtások vizsgálata a száraz súrlódás mellett kiterjeszhető kent fogfelületek súrlódásának mérésére is, ami azonban a mérőrendszerem konstrukciós továbbfejlesztését kívánja.

A dolgozatban ismertetett súrlódási eredmények és azok hasznosítása, valamint a mérőrendszer fejlesztése a gépészmérnöki tevékenység egyik legsarkalatosabb területén jelent előrelépést: a súrlódásból és kopásból származó energia és anyagveszteségek minimalizálásához járul hozzá. Ezáltal a fenntartható környezet, az emberi jólét és környezetvédelem összhangját igyekszik támogatni.

5. SUMMARY

During operation of different machines large variety of failure process can occur. Dominant reason of the breakdowns is originated from the movements of machine elements that are subjected to friction. Friction generally results different wear mechanism and different form of wear. For correct and suitable use of those machine elements, it is necessary to know all their material properties. Nowadays designing for strength goes quite well, for life period and fatigue reasonably, but the tribological behaviour is not known in depth. There is a lack of good catalogue information and literature data, complicating the design and dimensioning of such a systems. Engineers in many fields frequently require estimates of the magnitudes of the friction and wear likely to be experienced by different combinations of materials sliding or rolling together in various environments.

Regarding the sliding pairs we can meet more often engineering polymers as replacement of conventional steels having advantageous tribological properties in general. Along with the new industrial applications there has been development of new materials, coatings, composites, which need tribological properties to be discovered. Following this idea in my research program I decided to clarify the exact friction behaviour of engineering polymer/steel friction pairs focusing finally on plastic/steel gear pairs.

I approached the tribological problem on the basis of system theory developed by Czichos. First I studied the literature of involute gear pairs and gear mesh with conventional materials and I paid special attention to new engineering polymers applied in gear systems. As a result I clarified the load and speed condition with some potential materials of gears to be tested. I designed the following tribology test systems:

1. Small-scale plastic specimens. Conventional pin-on-disc tribometer was used to obtain basic friction and wear data (plastic pin and steel disc). I designed a further method of dynamic modelling as well, with small-scale specimens having dynamic load and speed effects, just like between gear teeth profiles.
2. Large-scale plastic specimens. Tribological research on modern self-lubricating materials is generally performed by means of small-scale specimens, because of the lower costs and the flexibility of testing. The results of these small-scale tests, however, can not easily be extrapolated to real (large) constructions. Some of the reasons are: misalignment, edge effects, material inhomogeneity, features as wear particle grooves or anti-creep devices. Thus, large-scale (real-scale) specimen tribotesting was needed with dynamic conditions to have better approach to gear friction and to have more global tribological information about the selected material pairs.
3. Real machine element tribotesting. I designed a new method to measure the friction during gear mesh along the action line of involute gear profiles. Formerly there were no data about this phenomenon just calculated values (forces and torque) concerning constant friction coefficients. In my new tribotesting system I clarified the real friction process along the action line in the function of sliding distance (running time of gear drive).

With these test methods I carried out large number of tests about friction, wear and friction heat generation. Finally my focus went on friction concerning the present role of plastic/steel gear drives due to unlubricated applications. The obtained test result let me compare the different test systems and clarify the correlation between friction result of small-scale-, dynamic-, large-scale and real gear friction results. My conclusions about correlations of the test system are put into tables in the dissertation. The further statements can be concluded from my research work:

- The developed test method is useful to study the friction process along the action line under “one-tooth” connection phase between polymer/steel gears.

- The theoretical friction was discovered more in depth and described with a given friction pairs.
- The friction changes along the action line.
- The trends also change in the function of load and meshing time (test cycles)
- Different changing trends of friction means different change of efficiency of polymer/gear drive. In my database I set these trends.
- Pitch point rolling effect in the practice means pitch zone. The width of the pitch zone is different with different friction pairs due to the different adhesion and deformation.
- The comparison of local maximum friction and average sliding friction values gives information about “even” or “un-even” running of mesh, the sensitivity for “stick-slip” behaviour of gear drive. Where I find local maximum friction to be much higher to average friction values, that means potential “stick-slip” danger. That is typical for PA 6G under light load.
- Based on our new research method I discovered more material- and system-specific phenomena with polymer/steel gear pair friction and my new database can help to design and maintain such a kind of gear drives.

6. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

Folyóirat cikkek:

- *Lektorált cikk világnyelven:*

- [1] G. Kalacska, M. Kalacska, **R. Keresztes**, P. De Baets : Friction and wear of polimer composites under different load systems. 2005, Bulletin. p. 165-173. ISSN 1586-4502
- [2] Eberst Ottó, Pop Sever, ICPM SA, Baia Mare, Romania; Dr.Kalácska Gábor, **Keresztes Róbert**, Zsidai László, SZIE Gödöllő, Hungary; Dr.DeBaets Patrick, University Gent, Belgium: Abrasive wear of engineering polymer gears. 6th International Multidisciplinary Conference 2005 May 27-28. Nagybánya, Románia, Scientific Bulletin, p. 171-176.
- [3] G. Kalacska, **R. Keresztes**, M. Kozma : Research of friction properties on polymer/steel gears. Hungarian Agricultural Engineering N.19/2006, Hungarian Academy of Sciences. p. 12-15.
- [4] Samyn- De Baets- **Keresztes**- Zsidai- Kalacska- Kozma : Influence of cylinder-on-plate or block-on-ring sliding configurations on friction and wear of pure and filled engineering polimers. Tribotest 2007. Volume 13. Issue 2, p. 82-100.
- [5] **Róbert Keresztes**, László Zsidai, Gábor Kalácska, Mátyás Andó, Rajmund Lefánti : Friction of polymer / Steel gear pairs. R & D Mechanical engineering letters 2008. p. 97 – 106.
- [6] **R. Keresztes** – G. Kalácska – L. Zsidai – O. Eberst: Abrasive wear of polymer-based agricultural machine elements in different soil types. Cereal Research Communications. 2008. vol. 36. p. 903 – 907.

- *Lektorált cikk magyar nyelven:*

- [7] **Keresztes R.**- Zsidai L.- Kalácska G.: Polimer felületek adhéziós vizsgálata. Műanyag és Gumi. 2001. 38. évf. 12. szám. p. 448-453. ISSN 0027-2914
- [8] **Keresztes R.**, Zsidai L., Kalácska G.: Műszaki műanyagok dinamikus tribológiai vizsgálata I. Dinamikus hajtások, módszer, anyagok. Műanyag és Gumi. 2002. 39. évf. 11. szám. p. 357-365. ISSN 0027-2914
- [9] **Keresztes R.**, Zsidai L., Kalácska G.: Műszaki műanyagok dinamikus tribológiai vizsgálata II. Eredmények és következtetések. Műanyag és Gumi. 2002. 39. évf. 12. szám. p. 393-400. ISSN 0027-2914
- [10] Margaret Kalácska, **Keresztes R.**, Kalácska G.: Műszaki műanyagok vagy műszaki fa (Guaiacum sanctum)? A természet és a tudomány néhány kompozitjának tribológiai összehasonlítása, Műanyag és Gumi. 2003. 40. évf. 12. szám. p. 446-451. ISSN 0027-2914
- [11] **Keresztes R.** – Kalácska G.: Polimer fogaskerekek súrlódási vizsgálata. OKAMBIK GTE, Országos Karbantartási és Munkabiztonsági Konferencia. 2004, Nyíregyháza. OKAMBIK Célszám, Gépgyártás XLIV évfolyam, 2004 5 – 6. szám p. 24 – 26.
- [12] Zsidai L. – Kalácska G. – **Keresztes R.**: Túlterhelt műanyag gépelemek tribológiai sajátosságai. OKAMBIK Célszám, Gépgyártás XLIV évfolyam, 2004 5 – 6. szám p. 26 – 28.
- [13] **Keresztes Róbert**: Műanyag fogaskerekek súrlódás- és kopásvizsgálata. Műanyagipari szemle 2005/2. szám. p. 91-100. HU ISSN 1785-7856
- [14] Dr. Kalácska Gábor, **Keresztes Róbert**, Zsidai László, Eberst Ottó, Sever Pop, Dr. Kozma Mihály, Dr. De Baets Patrick: Dinamikus tribológiai rendszerek II. Polimer-acél fogaskerék hajtások túlterheléses kopása. Műanyag és Gumi 2005. 42. évf. 11. szám. p. 413-421. ISSN 0027-2914
- [15] Dr. Kalácska Gábor, **Keresztes Róbert**, Kozma Mihály, Ost Wouter: Dinamikus tribológiai rendszerek III. A polimer-acél fogaskerekek súrlódásának további kutatási eredményei. Műanyag és Gumi 2006. 43. évf. 11. szám. p. 449-452. ISSN 0027-2914

- [16] Samyn- **Keresztes**- Lefánti- Zsidai- Kalácska: A szinterezhető és termoplasztikus poliimidek súrlódási tulajdonságainak összehasonlítása. *Műanyag és Gumi*. 2007. 44. évfolyam, 8.szám. p. 327-332. ISSN 0027–2914
- [17] Zsidai- **Keresztes**- Lefánti- Kalácska- Kozma: Műszaki megbízhatóság és a tribológiai modellezés az üzemfenntartásban. I. rész. *Gépgyártástechnológia*. XLVII. Évfolyam, 2007
- [18] **Keresztes Róbert**, dr. Kalácska Gábor: Polimer/acél fogaskerekek súrlódása. *Műanyag és Gumi*. 2008. 45. évfolyam, 6.szám. p. 236-241. ISSN 0027–2914

Konferencia kiadványok:

- Nemzetközi konferencia proceedings, teljes terjedelemben:

- [19] Kalácska G.- **Keresztes R.**- Zsidai L.: Self-lubricating polyamides. VIII. International Intertribo Symposium 2002, Stará Lesná, Slovak Republic 2002. Október 14-17. p. 194-198.
- [20] Dr. Gabor Kalacska, **Ing. Robert Keresztes**, Dr. Patrick De Baets : Tenth annual international conference on composites/nano engineering, Dynamic tribological testing of polymers. July 20-26 2003, New Orleans, USA Louisiana.
- [21] Kalácska G., Eberst O., **Keresztes R.**: Investigation of Friction of Polymer Gears. 8th International Conference on Tribology, 3rd and 4th June 2004, Veszprém, proceedings
- [22] **Keresztes R.**, Kalácska M., Kalácska G.: Tribological Behavior of Polymer Composites under Different Load System. 8th International Conference on Tribology, 3rd and 4th June 2004, Veszprém, proceedings
- [23] Zsidai L. **Keresztes R.**, Kalácska G., Kozma M.: Development of Dynamic Tribotester. 8th International Conference on Tribology, 3rd and 4th June 2004, Veszprém, proceedings
- [24] Kocsis Z., **Keresztes R.**, Kalácska G.: Development Test Method for Laboratory Evaluation of Engine Oil. 8th International Conference on Tribology, 3rd and 4th June 2004, Veszprém, proceedings. p. 213-220.
- [25] Eberst Otto, **Keresztes Robert**, Pop Sever: Investigation of tribological properties of engineering plastics in gear transmissions, Fifth international meeting of the carpathian region specialists in the field of gears, Románia Baia Mare, 21-22 may 2004. Serie C, Volume XVIII. Supplement. p. 29-36.
- [26] Gabor Kalacska, Mihaly Kozma, Patrick De Baets, **Robert Keresztes**, Laszlo Zsidai: Friction and wear of engineering polymer gears. World Tribology Congress III. 2005 Szeptember 12 – 16. Washington Hilton & Towers, Washington, DC USA. ISBN 0-7918-3767-X
- [27] Kalácska G.- **Keresztes R.**- Zsidai L.- DeBaets P.: Friction research of polymer gears. Scientific Bulletin. The international conference of the carpathian euro-region specialists in industrial systems. 6th edition. Baia Mare, 2006. p. 180 – 187
- [28] Kalácska G. – **Keresztes R.** – Kozma M. – Zsidai L. DeBaets P.: Friction research of polymer gears. Intertribo 2006. IX.th International Symposium. Stara Lesna. 2006. p. 24 – 28.
- [29] **Keresztes**- Zsidai- Kalácska: Friction of polymer/steel gear pairs. „Gépészet 2008”. International conference, Budapest, BME 2008.05.28-29.

- Magyar nyelvű proceedings teljes terjedelemben:

- [30] **Keresztes R.**- Kalácska G.- De Baets P.: The effect of internal oil lubrication for different cast PA6 materials. MTA Agrárműszaki Bizottság, XXVI. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő, 2002 január.
- [31] **Keresztes R.**, Kalácska G.: Olaj töltőanyagok hatása különböző öntött poliamid 6 súrlódására és kopására. *Mechanoplast 2002*, Gyula, 2002. március 12-14. *Műanyag és Gumi*. 2002. 39. évf. 3. szám. p. 72-73. ISSN 0027-2914

- [32] **Keresztes R.** - Kalácska G.: Dinamikus tribológiai vizsgálatok, dinamikus hatások modellezése MTA Agrárműszaki Bizottság, XXVII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő, 2003. január 21-22. Összefoglaló
- [33] **Keresztes R.**, Zsidai L., Dr. Kalácska G.: Öntött poliamid 6 nano-kompozit tribológiai tulajdonságai. MTA Agrárműszaki Bizottság, XXIX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő, 2005. január 18-19.
- [34] Dr. Kalácska Gábor, **Keresztes Róbert**, Zsidai László, Eberst Otto, Sever Pop, Dr. Kozma Mihály, Dr. de Baets Patrick: Polimer-acél fogaskerék hajtások adhéziós kopása. Polimer-acél fogaskerék hajtások abráziós kopása. Mechanoplast 2005, Gyula 2005 március 8-10.
- [35] **Keresztes Róbert** – Kalácska Gábor – Kozma Mihály: Polimer fogaskerék felületek súrlódásának kutatása. MTA Agrárműszaki Bizottság, XXX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő, 2006. január 24, előadás
- [36] Kalácska- **Keresztes**- Eberst- Pop- DeBaets: Újabb kutatások a műszaki műanyagok abráziós kopásának területén. MTA Agrárműszaki Bizottság, XXXI. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő, 2007. január. CD kiadvány. p. 1- 5.
- [37] **Keresztes**- Lefánti- Kalácska- Kozma: Dinamikus tribológiai rendszerek: Polimer fogaskerék felületek súrlódási sajátosságai. MTA Agrárműszaki Bizottság, XXXI. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő, 2007. január. CD kiadvány. p. 1- 5.
- [38] **Keresztes**- Lefánti- Kalácska- Kozma: Polimer/acél fogaskerekek súrlódása. MTA Agrárműszaki Bizottság, XXXII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő, 2008. január. CD kiadvány.

- Nemzetközi konferencia abstract:

- [39] **Keresztes R.**- Kalácska G.- De Baets P.: The effect of internal oil lubrication for different cast PA6 materials. Internal Workshop, Gent, Belgium. 2001 November. Tribology of self-lubricating polymers. p 93 - 101
- [40] **Keresztes Róbert**: Measuring friction forces between the meshing teeth. Hungarian-Flemish Bilateral Scientific Cooperation 2005-2006. Workshop, Gödöllő, 2005. november 16.

- Magyar nyelvű abstract:

- [41] **Keresztes R.** – Kalácska G.: OKAMBIK Országos Karbantartási és Minőségbiztosítási Konferencia, Polimer kompozitok dinamikus tribológiai vizsgálata. Pécs, 2003. május 14-16.
- [42] Dr. Kalácska Gábor, Dr. Kozma Mihály, **Keresztes Róbert**, Dr. De Baets Patrick, Eberst Otto: Műszaki műanyagok dinamikus tribológiai rendszerekben - fogaskerekek kopása. OKAMBIK 2005, Pécs 2005 május 19.
