

Műanyag fogaskerekek súrlódás- és kopásvizsgálata

Keresztes Róbert

Ph.D. hallgató, SZIE Gépészmérnöki Kar,
Gépgyártás és Javítástechnológia Tanszék

*Tárgyszavak: gépipar; műanyag; fém; fogaskerék; súrlódás; kopás;
fogkapcsolódás; modellvizsgálat.*

Összefoglalás

A műszaki gyakorlatban rendkívül sok helyen alkalmazunk fogazott gépelemeket. Ezek közül is leggyakrabban a fogaskerékhajtásokkal találkozhatunk, amelyek felhasználási területe igen széles körű. A hajtástechnikában alkalmazott fogaskerekek méretei, anyaga, kialakításai függenek a hajtásrendszer jellemzőitől (teljesítmény, hőmérséklet, esetleg élelmiszerhigiénia). Az alacsonyabb terhelés átvitelére egyre növekvő mértékben alkalmaznak különféle műszaki műanyagokból előállított fogaskerekeket, amelyekkel kiváltják a hagyományos szerkezeti anyagokat. E súrlódó rendszereket teherbírás szempontjából kielégítően lehet méretezni, de a súrlódási kopás (tribológia) szempontjából sok az ismeretlen terület, a megválaszolatlan kérdés. Ezért választottam ezt a kutatási területet.

1. Bevezetés

A műszaki műanyag–fém párosításnál, száraz csúszás esetén is a felületek között ébredő adhézió jóval kisebb, mint fém–fém súrlódó kapcsolatnál, így a fémes adhézió elkerülésének egyik lehetőségét jelenti. További előnye a polimer–fém kapcsolatnak, hogy külső kenés nélkül is megbízhatóan működhetnek egy adott terhelési szintig, zajszintjük alacsonyabb, kiváló a mechanikai csillapításuk, kicsi a tömegük. Mindezek elősegítik a műanyag fogaskerekek felhasználását.

Az egymással kapcsolódó fogaskerekek jellegzetes vonása a csúszó és a gördülő súrlódás különleges kombinációja az érintkező fogak között. A csúszó mozgás értéke a fogak érintkezésének kezdeti és végső pillanatában a legna-

gyobb, és nulla, amikor a kapcsolódási pont az osztóköron van („C” főpont). A csúszás a C főpontban irányt vált. Terhelésmentes állapotban vonal menti az érintkezés a fogprofilok között, de üzemi terhelés hatására a polimerek jelentősebb rugalmas deformációja miatt felületi érintkezés alakul ki. 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, nincs irodalmi adat vagy anyagkiválasztási segédlet.

A hagyományosan kent fém-fém fogaskererekes hajtóművek vizsgálatára a mérnöki gyakorlat kidolgozott általánosan használható próbapadi módszert, elsősorban a kenőolajok súrlódást és kopást módosító hatásának értékelésére [6, 7]. A legtöbb ilyen célra használatos készülék homlokfogaskerekeket tartalmaz, így ezekkel a készülékekkel a fogaskerekek kopásvizsgálata megvalósítható.

2. Célkitűzés

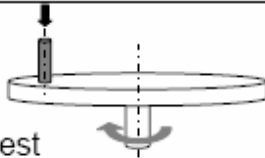
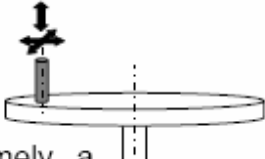
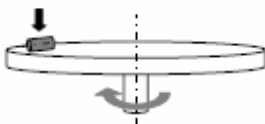
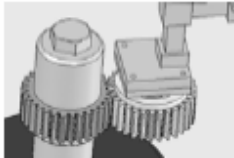


A hagyományos, kent fogaskerék vizsgálati rendszerekből kiindulva átfogó vizsgálati rendszert terveztem szárazon futó műanyag-fém fogaskerék-rendszerek optimalizálásához. A több felületkapcsolódási formát, terhelési viszonyt és kopási mechanizmust modellezve feltérképezem az egyes műszaki műanyag fogaskerekek tribológiai sajátosságait, létrehozva egy olyan adatbázist, amely a későbbiekben segíti a műanyag-fém fogaskerék-hajtóművek tervezését, az optimális anyagpárosításokat, anyagkiválasztást különböző üzemi körülményekhez.

E rendkívül széles és szerteágazó kutatási feladatot nemzetközi együttműködésben, több hazai (pl. OTKA) és külföldi kutatási támogatás segítségével végezzük, amelynek bizonyos rendszerei képezik az önálló Ph.D. kutatási programomat.

3. Kutatási rendszerek és módszerek

Az 1. táblázat összefoglalja a műanyag fogaskerekekkel kapcsolatos modell és üzemi vizsgálati rendszereinket.

Alkalmazott vizsgálati rendszerek

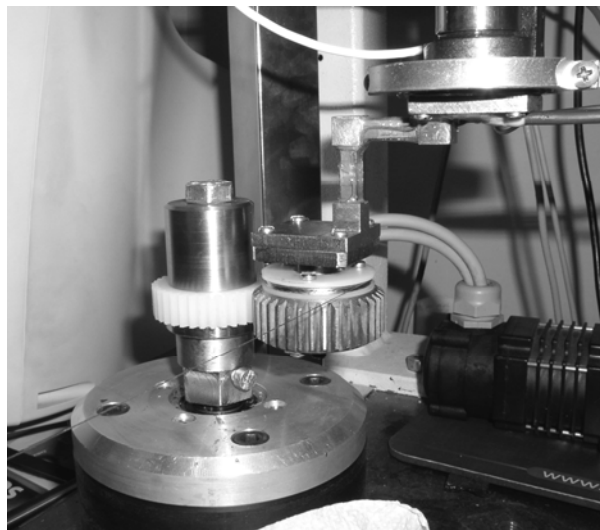
MÉRÉSI RENDSZEREK		
	Súrlódás kutatása	Kopás kutatása
I.	<p>- „<i>pin on disc</i>” vizsgálati rendszer Jellemzője az állandó terhelés és a folyamatos csúszósúrlódás, amely az elfordulásmentesen rögzített műanyag próbatest homlokfelülete és a forgó acéltárcsa között jön létre.</p> 	adhéziós
	<p>- <i>dinamikus pin on plate</i>” vizsgálati rendszer A dinamikus rendszer jellemzője a változó nagyságú terhelés és csúszási sebesség, valamint a folyamatos csúszósúrlódás, amely a mozgó műanyag próbatest homlokfelülete és az álló acéltárcsa között jön létre.</p> 	adhéziós
	<p>- „<i>cylinder on disc</i>” vizsgálati rendszer Itt a forgó koptatótárcsa és az elfordulásmentesen rögzített műanyag próbatest palástfelülete között jön létre csúszósúrlódás. (vonal menti érintkezés – fogmodell)</p> 	adhéziós, abráziós
II.	<p>- <i>fogaskerék-kapcsolódás fog-modell vizsgálati rendszere</i> Jellegzetessége az állandó nyomatékú kis terhelés, a csúszó és a gördülő súrlódás különleges kombinációja az érintkező fogak között, alacsony kerületi sebesség. Valódi fogaskerekek.</p> 	adhéziós
	<p>- <i>fogaskerék-kapcsolódás üzemi vizsgálati rendszere</i> Jellemzője az elektromos kapcsolású terhelőmotor, nagy terhelőnyomaték, nagy kerületi sebesség. Túlterheléses vizsgálatok adhéziós és abráziós környezetben.</p> 	adhéziós, abráziós
III.	<p>- <i>fogkapcsolódás modell</i> A kapcsolóvonal mentén változó súrlódási erő és súrlódási tényező vizsgálatához. A rendszer jelenleg építés alatti stádiumban van.</p> 	adhéziós

Egyszerűsített modellvizsgálatok

Az I. csoportba tartoznak az egyszerűsített próbatesteken végzett modellvizsgálatok [2]. Ezek a mérések a különböző műszaki műanyagok alapvető súrlódási és kopási tulajdonságainak feltérképezésére szolgálnak köszörült tiszta acél (adhéziós) és abrázíós (csiszolópapír) felületeken. A statikus vizsgálatokkal szemben a dinamikus modellvizsgálatok jobban tükrözik az anyagok valós viselkedését, hiszen az alkalmazások során számos dinamikus hatás éri az alkatrészek jelentős részét.

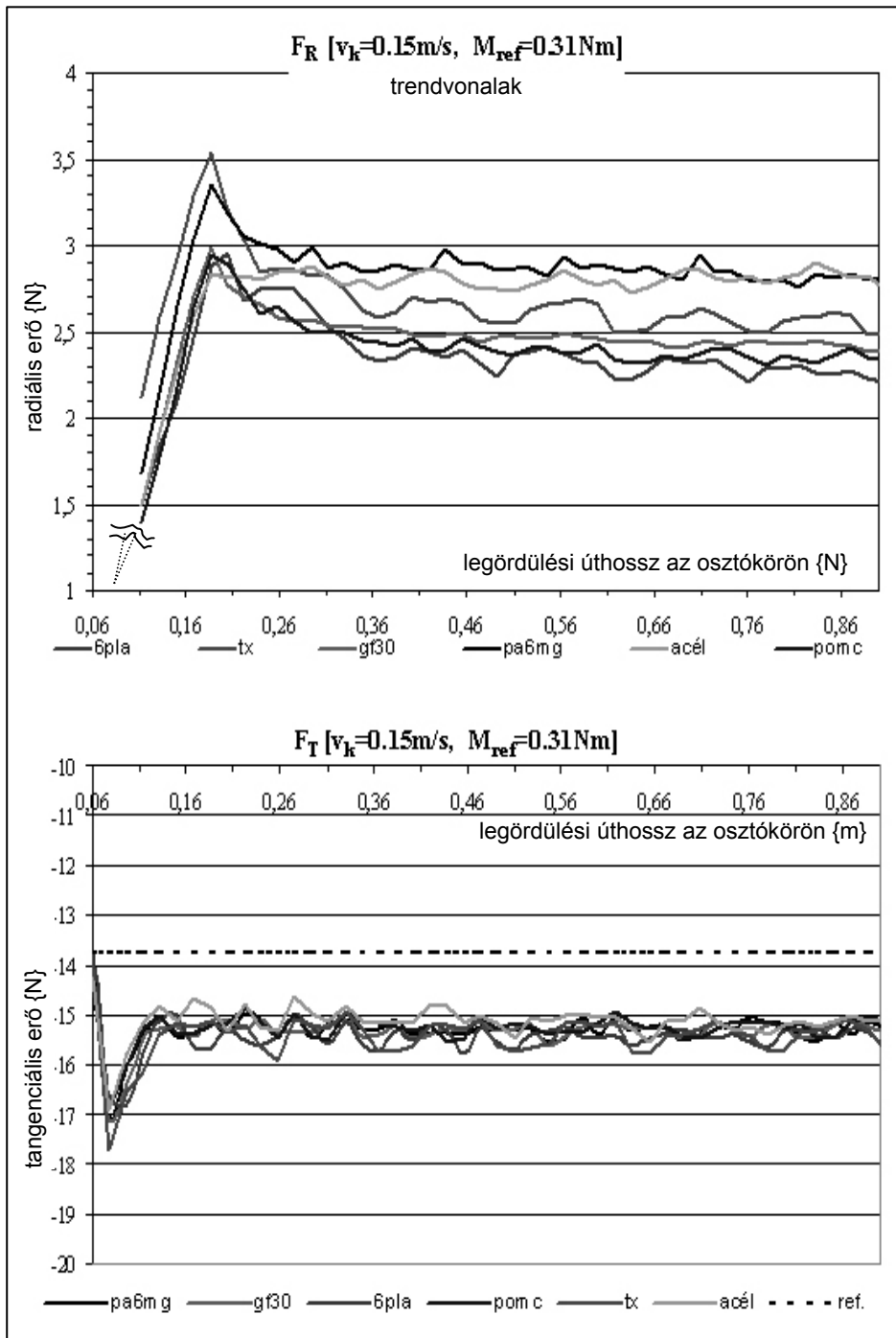
Fogaskerék-kapcsolódás modell- és üzemi vizsgálata

A II. csoportba két vizsgálati rendszer tartozik. A fogaskerék-kapcsolódás modellvizsgálatát az *1. ábra* szemlélteti. Előzetes vizsgálataink (I. csoport) és a gyakorlati tapasztalatok alapján a fogfelületek súrlódási folyamatainak összetettségét az is jelzi, hogy az átvitt nyomaték hatására bekövetkező mikrogeometriai deformációk (rugalmas és képlékeny) mellett a fogak makroszkópikus deformációja, feszültségállapota, relaxációja és kifáradása, a fogfelület megmunkálásának technológiája, felületi érdességi viszonyai együttesen alakítják ki a műanyag fogaskerek hajtás közbeni súrlódási állapotát. Ezek a súrlódási állapotok az anyagokra vonatkoztatva általában eltérő rangsort eredményeznek, mint egy siklócsapágy-modell esetében.



1. ábra Vizsgálóberendezés

Egy lehetséges fogaskerék alapanyagának kiválasztását elősegítendő, mérési módszert dolgoztunk ki műanyag-acél fogaskerék-kapcsolatok súrlódási viszonyának tanulmányozására. Álló helyzetből indítási gyorsulás után a



2. ábra



3. ábra

hajtott műanyag fogaskerék állandó fordulatszámmal hajtja az acél fogaskereket, amely állandó nyomatékkal terhelt, jelen esetben egy fordító csigán keresztül emel „m” tömeget. Ehhez az emeléshez – a csapágsúrlódási és kötélveszteségektől eltekintve – szükséges a fogkapcsolatban az F_t tangenciális állandó erő, ami az állandó nyomatékból adódik. A fogprofilokon ébredő erőhatás radiális komponense (F_r) közvetlen összefüggésben van a csúszásokból származó összetett súrlódási jelenséggel. A mérésekhez referenciaként szerkezeti acél fogaskereket használtunk. Kapcsolódó anyagként a gépüzemfenntartási gyakorlatban ismertebb műszaki műanyagokat hasonlítottuk össze.

4. Alkalmazott polimerek

- *PA6-Na*: öntött poliamid 6 (PA6 G), Na katalizálás,
 - *PETP-TX*: PETP/PTFE kompozit,
 - *PA66 GF30*: extrudált poliamid 66, 30% üvegszál-erősítés,
 - *PA6-Mg*: öntött poliamid 6 (PA6 G), Mg katalizálás,
 - *POM-C*: poli(oxi-metilén) kopolimer.
- A vizsgálathoz használt fogaskerekeket a 3. ábrán mutatjuk be.

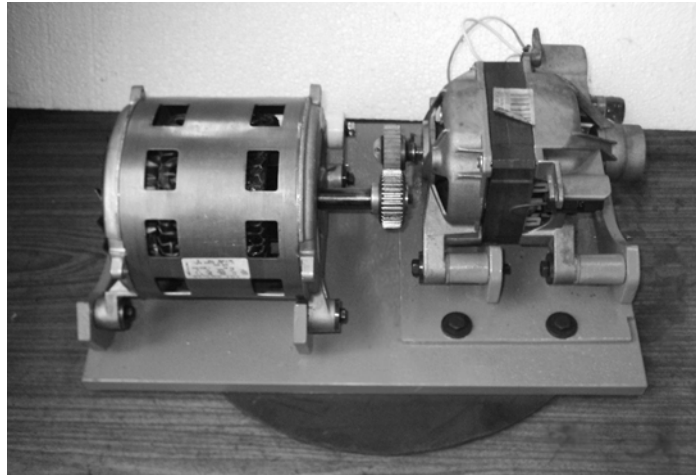
5. Eredmények, következtetések

A 2. ábra egy mérési diagramot szemléltet. Az F_t a fogak közötti tangenciális erő, az indítási gyorsulásnál a tehetetlenség miatt megnő, majd az állandó fordulatszám elérésével a nyomaték és az abból származó terhelőerő – anyagtól függetlenül – közel állandó értékre áll be, amely nagyobb a tiszta tömegernél a rendszer egyéb veszteségei (csapágy + kötél) miatt. Az F_r a fogak közötti radiális erő, szemléletesen mutatja az eltérő polimerek különböző viselkedését a fogcsúszásoknál. Minél nagyobb F_r értéke, annál nagyobb tapadásra, súrlódásra lehet következtetni a fogfelületek között [8].

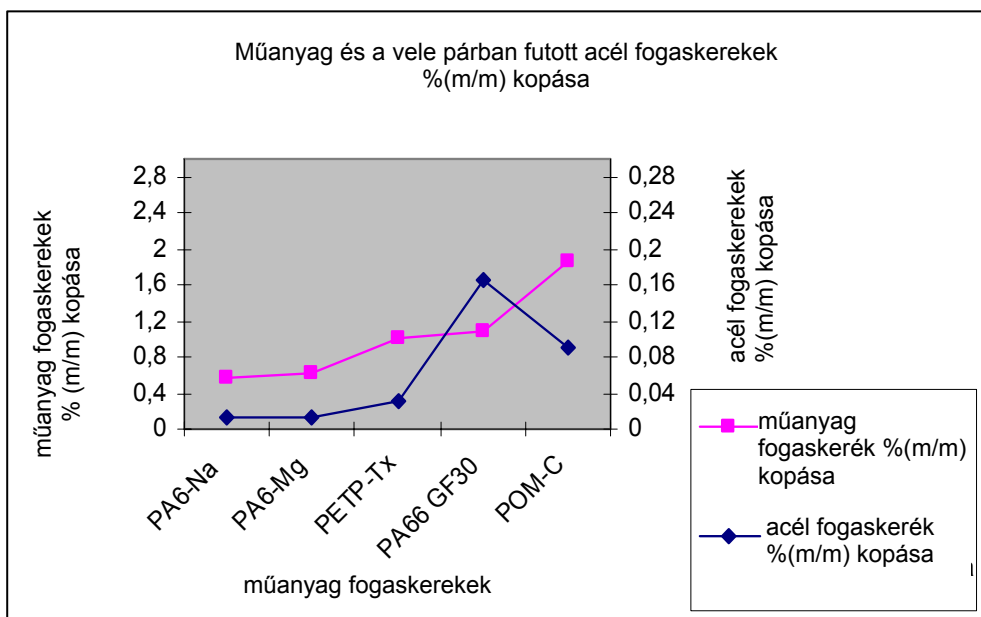
A fogaskerék-kapcsolódás üzemi vizsgálatát a 4. ábra mutatja. A berendezésen két motor helyezkedik el. Az egyik a hajtómotor, amely tengelyén helyezkedik el az acél fogaskerék, a másik a hajtott fékezőmotor a műanyag fogaskerékkel, amellyel a terhelőnyomaték áramköri kapcsolással állítható be. A megengedett átvihető teljesítmény műanyag fogaskerekek esetén a Lewis összefüggés szerint számítható [1]. Azonban túlterhelés esetén az anyagviselkedés nem ismert, ezért az üzemi vizsgálattal a túlterheléses állapotot valósítottuk meg ($M=6,1$ Nm, $n=1330$ 1/min). A mérési folyamat során a hajtásrendszer rezgésdiagnosztikai jellemzőit folyamatosan rögzítettük.

A tiszta felületek közötti (adhéziós) vizsgálati rendszer eredményeiből megállapítható (5. ábra), hogy tiszta, száraz adhéziós fogaskerékpár-kapcsolatban a műanyag fogaskerekek kopására kapott sorrendet követi a velük párban futó acélkerekek kopásának sorrendje. Ez alól kivételt képez a 30% üveg-

szál erősítőanyagot tartalmazó poliamid 66 kiugróan magas koptató hatása az acél fogaskereken. Megállapítható, hogy a legkedvezőbb eredményeket a Na és Mg katalizálású öntött poliamidok biztosították. Köztük szignifikáns eltérés nem adódott. Az extrudált poliamid 66 anyagba adalékolt üvegszál növelte az adhézions kopást. A legkisebb kopásállósággal és magas fémkoptató hatással a poli(oxi-metilén) kopolimer rendelkezett.



4. ábra

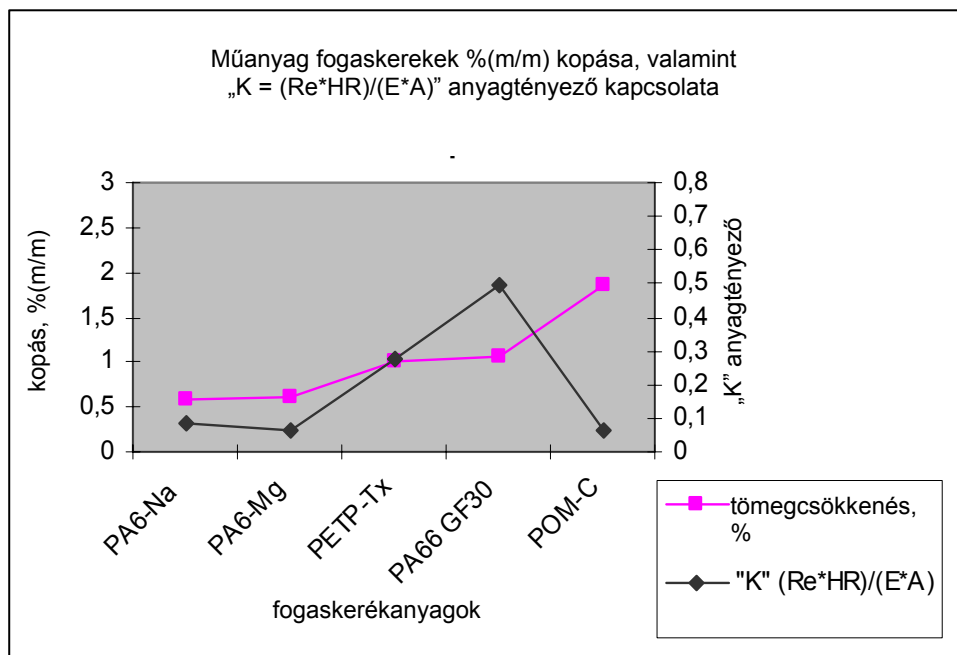


5. ábra

Kalácska javaslatára [8] a műanyagok gépelemként való használhatóságát meghatározó mechanikai jellemzőkből képezhető egy „K” dimenzió nélküli anyagtényező:

$$K = \frac{\text{folyási feszültség [MPa]} \cdot \text{keménység}}{\text{rugalmassági modulus [MPa]} \cdot \text{szakadási nyúlás}}$$

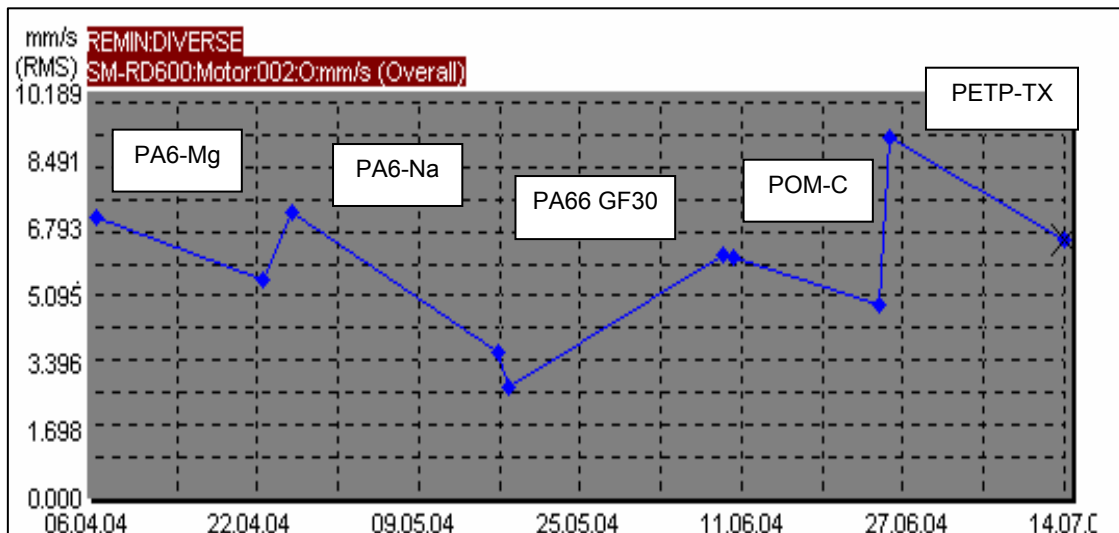
Megállapítható, hogy a műanyag fogaskerek kopása arányos az anyagjellemzőkből számított „K” anyagtényezővel (6. ábra). A növekvő „K” tényező növekvő polimerkopást eredményezett. Ez alól egyértelműen kivétel a POM-C anyag, amely a mérések szerint több szempontból – keménység, rugalmassági modulus – sem kezelhető együtt a poliamidokkal (PA) és a poli(etilén-tereftalát)-tal (PETP). A POM-C viszonylag kis „K” értéke ellenére is magas kopással rendelkezik. Szintén arányosság áll fenn a műanyag fogaskerekanyagok „K” anyagtényezője és a velük párban futott acél fogaskerek kopása között. A tendencia alól ebben az összehasonlításban is a POM-C anyag a kivétel. A növekvő „K” érték növekvő acélkopással járt a méréseknél [8].



6. ábra

Az összeszerelt hajtások rezgésereőségét (mm/s) mutatja a 7. ábra. A rezgésdiagnosztika abszolút értékeit a szerelési beállítás 0,04 mm-es tűrésmezője is befolyásolja. A megépített hajtások esetében jól látszik a bejáratás

hatása, azaz a kezdeti viszonylag magasabb rezgésereőség a 70 óra járatás után – a kopások ellenére – csökkent. Ez alól kivétel a PA66-GF30 anyaggal megvalósított hajtás, ahol rideg féméhez hasonlóan nőtt a rezgés a mérésorozatok végére, bár a mérések elején itt volt tapasztalható a legkisebb rezgésereőség (mm/s). A villanymotorral létrehozott hajtások zajszintjét, rezgésereőségi fokozatok táblázatos rendszerével az ISO 2372 szabvány minősíti. A keőnyanyag nélkül megvalósított kísérleti hajtások eredményei 7,1 mm/s alatt a megfelelő tartományba esnek.

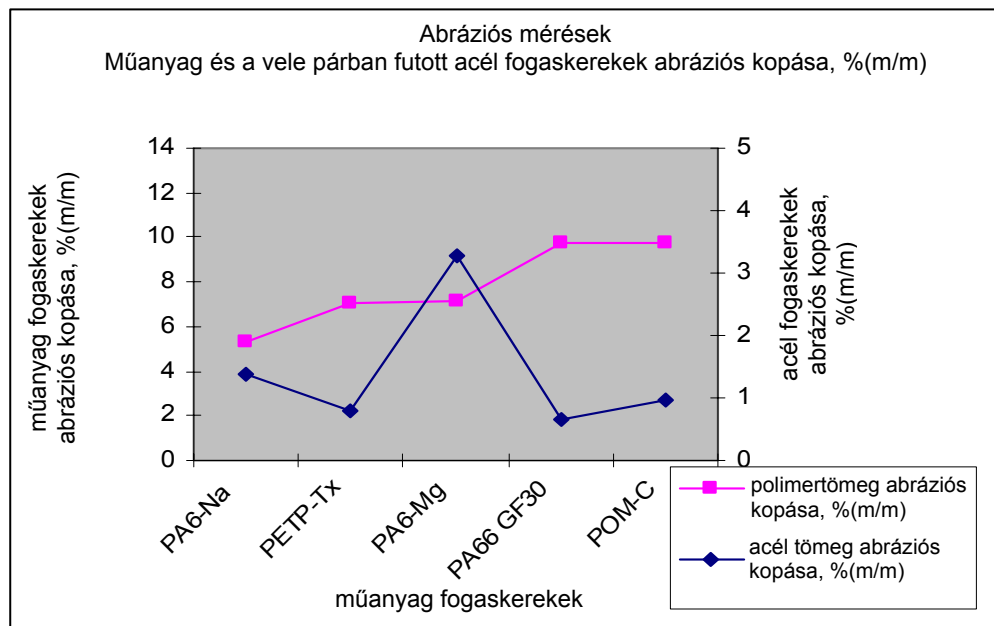


7. ábra

Abrázios vizsgálatok

Abrázio alatt értjük a kemény, apró porszerű részecskék, (pl. por, kvarc) felületkárosító hatását, amely gyakori az építőipari, bányászati, mezőgazdasági, bizonyos élelmiszeripari gépelemeknél. Az abráziós mérésekhez használt por kvarchomok, a szemcsék mérete <math><200\ \mu\text{m}</math>. Abrázios körülmények között a műanyag fogaskerékanyagok kopásrezisztenciai sorrendje a 8. ábra szerint közel lineárisan változott. Az öntött poliamid 6 anyagok kedvező értékei mellett jó kopásállóságot mutatott a vizsgált rendszerben a PETP/PTFE kompozit is. Viszonylag erősebb kopás a POM C és az üvegszálal poliamid 66 esetében volt tapasztalható. A műanyag fogaskerekekkel párban futó acél fogaskerekek kopása ellentétes tendenciát mutat a műanyagokéhoz képest. Növekvő polimerkopás enyhén csökkenő acélkopással párosul, ez alól kivétel a Mg katalizálású öntött poliamid 6 anyag [8]. A tapasztalt viselkedések az anyag tulajdonságaival részben magyarázhatók, mivel a nagyobb alakváltozási képesség miatt nagyobb a polimerfelület részecskebeágyazó képessége, így növekszik az abráziós hatás a fémfelületen. Érdekes eredmény, hogy míg

az adhéziós méréseknél az üvegszálás poliamid 66 szolgáltatta a legnagyobb acélkopást, addig az abráziós méréseknél a legkisebb acélkopás volt mérhető a PA 66 GF30 esetén.



8. ábra

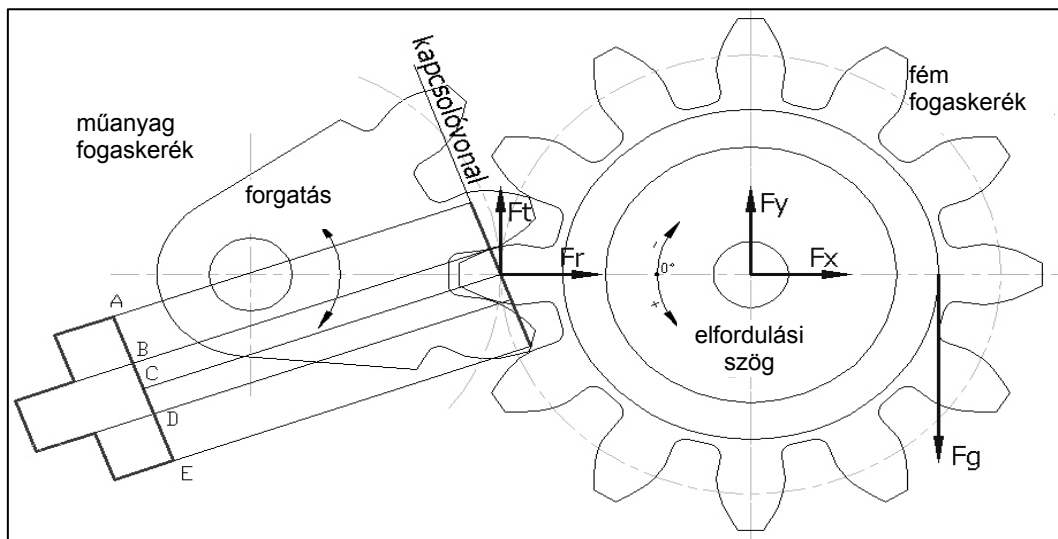
A bemutatott ábrák csak kiragadott érdekességek, nagyszámú hasonló diagramot dolgoztam fel, függvényanalízist végeztem, ahol a súrlódási és kopási értékeket különböző anyagjellemzők függvényében értékelem. Több törvényszerűség fedezhető fel, amelyek eddig ismeretlenek voltak a géptervezőknek, s az alapos feldolgozás után Ph.D. téziseim alapját képezhetik.

Fogkapcsolódás modellvizsgálata

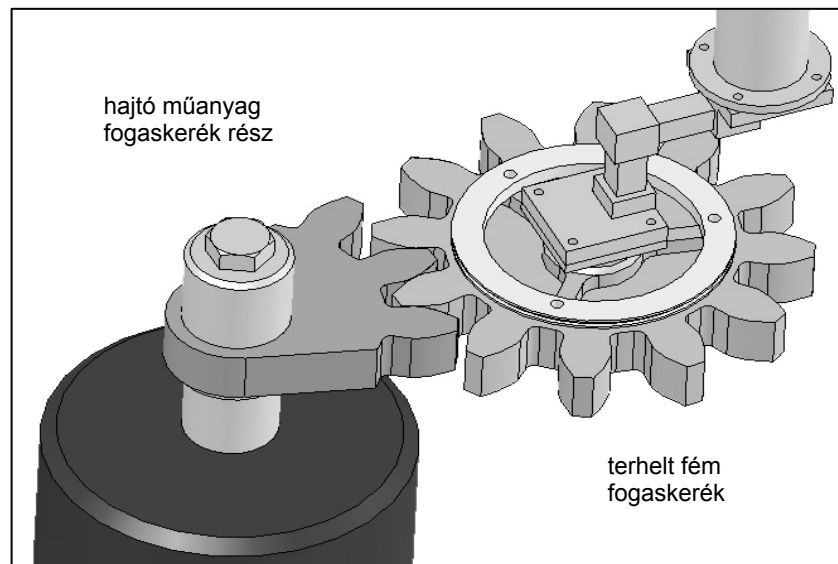
A III. csoportba a fogkapcsolódás modellvizsgálata tartozik. A fogaskerék-hajtások valós idejű vizsgálatai és a megfigyelések eredményei a gyakorlatban jól alkalmazható eredményeket adnak, de nem adnak pontos választ a kapcsolóvonal mentén történő súrlódási tényező változására és a tribológiai jelenségekre. Egy folyamatosan működő fogaskerék-kapcsolat esetében a mérési eredményekből nehéz kiválasztani azokat az értékeket, amelyek a kapcsolóvonal mentén pontosan behatárolhatók. Ezek alapján olyan rendszer kialakítása lenne ideális, amely a kapcsolóvonal mentén méri a fogak közt ébredő erőhatásokat.

Egy lehetséges megoldás elvi vázlatát szemlélteti a 9. ábra. A kapcsolódó fogaskerekeket nem forgatjuk körbe, hanem csak egy kapcsolódási pontot

vizsgálunk a kapcsolóvonal teljes hosszán. Ez kezdetben két fogpár egyidejű érintkezését jelenti, majd a legördülés során a főpont környékén egy fogpár kapcsolódik csak, majd ezt követően ismét két fogpár találkozik. Mivel nem forgatjuk körbe a fogaskereket, ezért a vizsgálathoz elegendő egy 3 fogú poli-mer "körcikk" (10. ábra). A fém fogaskereket az erőmérés miatt teljesen el kell készíteni, máskülönben a saját tömegközéppontjának vándorlása miatt befolyásolná a mért erőértékeket. Számítások alapján pontosan meghatározható a fogaskerek azon szöghelyzete, amely a kiválasztott fog kapcsolódásának kezdetét és végét jelenti. Vizsgálat során a két véghelyzet között kell mozgatni a fogaskereket, és közben mérni a rá ható erőket.



9. ábra



10. ábra

Az előzetes próbamérések szerint ezzel a módszerrel meg tudom határozni egy fogpár kapcsolódásának folyamán a műanyag-fém között ébredő súrlódást, annak változását, amelyet a gépelemek számítására használt szakirodalom és elméleti módszerek eddig nem tudtak figyelembe venni. Ezzel lehetőségem nyílt a műanyag fogaskerekek súrlódási veszteségéhez használt számítás pontosításához.

A bemutatott kutatási programot támogatja az OTKA T 32590, T 42511 sz. projekt, valamint a Flamand-Magyar bilaterális Tét együttműködés B-1/04.

6. Felhasznált irodalom

- [1] Antal – Fledrich – Kalácska – Kozma: Műszaki műanyagok gépészeti alapjai, Minerva-Sop Bt. Sopron, 1997.
- [2] Kozma Mihály: Gépelemek 9. Tribológia, Siklócsapágyak, Műegyetemi Kiadó, 1995.
- [3] Dr. Kozma Mihály Ph.D. BME Gép szerkezet-tani Intézet: A fogaskerekek súrlódási vesztesége, Gép LV. évfolyam, 2004/10–11.
- [4] Dr. Gabor Kalácska, Ing. Robert Keresztes, Dr. Patric De Baets: Tenth annual international conference on composites/nano engineering, Dynamic tribological testing of polymers. July 20-26 2003, New Orleans, Louisiana.
- [5] Dr. Vörös Imre: Gépelemek III. Fogaskerekek, Tankönyvkiadó Budapest, 1977.
- [6] Dr. Vámos Endre: Elméleti kenéstechnika (Tribológia), Tankönyvkiadó Budapest, 1970.
- [7] Dr. Zalai András: Kenőanyagok gépi vizsgálata, Budapesti Műszaki Egyetem, Vegyészmérnöki Kar, Szakmérnöki Tagozat, Kézirat, Tankönyvkiadó Budapest, 1970.
- [8] Dr. Kalácska Gábor, Keresztes Róbert, Zsidai László, Eberst Ottó, Pop Sever, Dr. Kozma Mihály, Dr. Patric de Baets: Polimer-acél fogaskerék hajtások adhéziós kopása, Polimer-acél fogaskerék hajtások abráziós kopása, XIV. Mechanoplast Konferencia, Gyula, 2005. március 8–10.