Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Gép- és Terméktervezés Tanszék

Írta:

Bódai Gábor
Okleveles Gépészmérnök

Gumi üveg csúszópár anyagi és súrlódási viselkedése

című témakörből,

amellyel a Ph.D. fokozat elnyerésére pályázik

Témavezető:
Dr. Goda Tibor

Budapest
2012.

I. Kutatási előzmények

Súrlódási, kopási és vegyi ellenálló képessége következtében a gumi a gépészet fontos anyagává vált az elmúlt században, különös tekintettel az autóiparra, a repülőgépgyártásra, és a vegyiparban. Annak ellenére, hogy a gumik súrlódási ellenállása lényegesen meghaladja más anyagok súrlódási ellenállását, mégis nagyszámú statikus, csúszó és forgó tömítést készítenek ebből a speciális tulajdonságokkal rendelkező anyagból. Ahogy a gumik alkalmazása egyre elterjedtebbé vált, egyre nagyobb szerepet kapott az anyag összetett mechanikai viselkedésének megértése, mely az elméleti és kísérleti tribológiai kutatások megjelenéséhez és fejlődéséhez vezetett.

Doktori munkámban egy, az elmúlt években egyre kutatottabbá vált gumi alkalmazást, az ablaktörlő lapát viselkedését tárgyalom. A vizsgálatok összetettségét a gumi alkatrészek jó ismert sajátságos viselkedése adja, mely következtében a nagyrugalmas viselkedésen keresztül, az idő- és hőmérsékletfüggő jellegnek köszönhetően, valamint a nagy belső súrlódás hatására az ablaktörlő lapát anyagi és tribológiai viselkedése különbözik más anyagokétól. A szakirodalomban ennek az összetett viselkedésnek az elemzése során száraz és kent eredmények egyaránt találhatóak. Ezek alapján megállapíthatjuk, hogy az ablaktörlő lapátok esetén tipikusan három működési módot tudunk megkülönböztetni. A legritkább eset a száraz állapot, amikor az érintkező (gumi és üveg) felületek között nincs jelen folyadék. Gyakoribb eset mikor a felületek közötti folyadék részleges vagy teljes hidrodinamikai kenésállapotot képes előidézni. Az említett két állapot között létezik még egy enyhén nedves állapot, mely meglepően magas súrlódási tényezőt okozhat. Ekkor az érintkezési tartományban kialakuló száraz zónák súrlódási instabilitásokat, rezgéseket, egyenetlen filmvastagságot és romlott látási viszonyt okozhatnak. Az említett működési állapotok vizsgálata az összetett anyagi viselkedés következtében számtalan nehézséget okoz a gumi alkatrészeket tervező mérnökök számára, mivel egyidejűleg kell az alacsony modulus, a nagy alakváltozó képesség, a hőmérsékletfüggés figyelembe vétele még a legegyszerűbb esetekben is. Összességében megállapíthatjuk, hogy a fent említett tényezők figyelembe vétele érdekében nem elkerülhető az anyagi és súrlódási viselkedés egyidejű vizsgálata. Ennek köszönhetően disszertáció első részében a gumik és gumiszerű anyagok anyagi viselkedésével, az alkalmazható anyagtörvényekkel illetve az anyagtörvényekben szereplő paraméterek meghatározásával foglalkozok. A második rész a választott gumi alkalmazás, az ablaktörlő lapát, próbatest szintű és szerkezet szintű tribológiai vizsgálatait tárgyalja elsősorban a súrlódás, de érintőlegesen a kenés szempontjából is. A bemutatásra kerülő eredmények kísérleti és szimulációs vizsgálatokat egyaránt tartalmaznak.

II. Célkitűzések

Munkám kidolgozása során két eltérő, mégis kapcsolódó területtel foglalkozom. Elsőként olyan paraméterillesztő módszert kívánok kidolgozni, mely alkalmas a viszkoelsztikus viselkedés matematikai leírására alkalmazott rugó-csillapítás modellek paramétereinek meghatározására. A paraméter meghatározást a jól ismert Standard-Solid és ennek kiterjesztett változatán az általánosított-Maxwell modellen keresztül mutatom be. Megjegyzendő azonban, hogy a bemutatásra kerülő módszer alkalmas bármely rugó-csillapítás modell paramétereinek meghatározására, a leíró egyenletek cseréjét követően. Munkám második részében egy kereskedelmi forgalomban kapható ablaktörlő lapátot vizsgálok tribológiai szempontból. Próbatest szinten vizsgálat alá kerül a csúszási sebesség, a terhelés és a kenés súrlódási tényezőre, érintkezési tartományra gyakorolt hatása. A szakirodalommal ellentétben az ablaktörlő lapát viselkedését azonban nem csak próbatest szinten, hanem szerkezet szinten is vizsgálom annak érdekében, hogy bizonyítsam vagy megcáfoljam azt az állítást, mely szerint ez megegyezik a próbatest szintű viselkedéssel.

A disszertációm által megválaszolásra kerülő kérdések a következőek:

1. Hogyan lehetséges a gumikra jellemző nemlineáris, idő- és hőmérsékletfüggést egyidejűleg mutató anyagok matematikai leírása?
2. Hogyan lehetséges egyes mérési eljárásokkal figyelembe vehető idő/frekvencia tartomány kiterjesztése az ún. hőmérséklet idő ekvivalenciával?
3. Hogyan tudunk rendelkezésre álló, egyszerű anyagvizsgálati módszerekből összetett anyagtörvényeket készíteni?
4. Hogyan lehetséges az említett módszerek alkalmazási határának kiterjesztése?
5. Mely hatások, tényezők befolyásolják a gumi-üveg csúszópár (ablaktörlő lapát) súrlódási viselkedését?
6. Milyen hatással bír a víz megjelenése különböző csúszási sebességek, terhelések esetén a súrlódási és kenési állapotra?
7. Mi a kapcsolat a szakirodalomban részben tárgyalt próbatestszintű és a szakirodalomban nem tárgyalt szerkezetszintű vizsgálati konfigurációk között?

A felmerült kérdések megválaszolása, valamint az összetett anyagi és tribológiai folyamatok megértése érdekében kísérleti és numerikus vizsgálatokat egyaránt alkalmazok. Minden következtetés a kettő együttes figyelembevételével került megfogalmazásra.

III. Vizsgálati módszerek és a disszertáció felépítése

Témám egyaránt tekinthető anyagtudományi és tribológiai jellegűnek, melyek alapját kísérleti vizsgálatok alkotják. Ennek megfelelően nagyszámú mérést készítettem hazai és németországi egyetemek és kutató intézetek vizsgáló laborjaiban. A BME Polimertechnika Tanszékén, a BME Biomechanikai Kutatóközpontjában és a Kaiserslauterni Egyetem Kompozit Anyagok Intézetében egytengelyű szakítóvizsgálatokat, feszültség relaxációs vizsgálatokat és DMTA (dinamikus-mechanikus-termikus-analízis) méréseket végeztem. A mérések elasztomer anyagokra jellemző széles hőmérséklet és frekvencia tartományban mutatott sajátságos mechanikai viselkedésének (hőmérséklet, idő és alakváltozás függés) feltárását, valamint az ezek matematikai leírását célzó összetett un. viszkoelasztikus és hiperelasztikus anyagmodellekben szereplő paraméterek meghatározási módszereinek vizsgálatát célozták meg.

A BME Gép és Terméktervezés Tanszékén saját tervezésű és építésű mérő berendezésen méréseket készítettem ablaktörlő lapát próbatest szintű tribológiai tulajdonságainak vizsgálatára száraz és kent esetekben. A Hannoveri Egyetem Dinamikai és Rezgéstani Intézetében a szakirodalomban nem tárgyalt szerkezetszintű, a teljes ablaktörlő lapátot figyelembe vevő méréseket végeztem. A nagyszámú kísérlet mellett minden vizsgálathoz analitikus és/vagy numerikus (számítógépes) számításokat készítettem a végeselem módszer (VEM) segítségével, melyek részben a mért eredmények jellegét magyarázó feltételezések helyességét, a nem mérhető mennyiségek meghatározását, valamint a témaválasztásban megfogalmazott modellezés lehetőségének alátámasztását szolgálják. A megfogalmazásra kerülő következtetések, tézisek a mért és számított eredmények együtteséből kerültek felállításra.

A disszertáció két egymástól részben elváló azonban mégis szoros kapcsolattal rendelkező fejezetből tevődik össze.

A gumik és gumiszerű anyagok anyagi viselkedésére vonatkozó irodalomkutatást követően, a vizsgálati módszerek és azok eredményeinek bemutatása következik. Az elvégzett vizsgálatok jellegére alapozva kerül bemutatásra egy paraméterillesztő módszer, mellyel minimális mérési igény mellett is előre jelezhető az anyag várható viselkedése. A módszer alkalmazásának bemutatását követően a számított eredmények más, szakirodalmilag elfogadott módszerrel is összevetésre kerülnek. A módszer alkalmazási határának részletezését követően a hőmérséklet idő ekvivalencia alapján javaslatot teszek az alkalmazási határ kiterjesztésére.

A következő fejezet a tribológiai vizsgálatok hátterét, előzményeit és elméleti alapjait bemutató tribológiai jellegű irodalomkutatással indul. Ezt követően részletes áttekintést ad a próbatest szintű mérés részleteiről és eredményeiről. Bemutatja a felhasznált, saját tervezésű mérő berendezést, a mérés körülményeit és eredményeit. Ezt követően bevezet egy újabb mérési konfigurációt az ablaktörlő lapát merevségi viszonyainak tanulmányozása érdekében. Ezt követően numerikus szimulációk segítségével vizsgálom az érintkezési tartomány szélességét. Az eredményeket szakirodalmi eredményekkel is összevetem.

Az ablaktörlő lapát vizsgálatát a szerkezetszintű vizsgálatokkal folytatom, mely során egy forgó üveg hengerrel érintkező teljes ablaktörlőt vizsgálok. A mérési eredmények kiértékelése érdekében egy matematikai módszert mutatok be, mely kapcsolatot teremt a forgó üveg henger alakhibája és excentricitása, valamint a mért eredmények ciklikus ingadozása között. A módszer felhasználásával bemutatom a mérési eredmények kiértékelésének folyamatát és a tényleges eredményeket, melyeket összevetem a próbatest szintű mérési eredményekkel is.

Végezetül a tézisek megfogalmazása és a következtetések összefoglalása után röviden kitérek a munkám során nem vizsgált hatások, továbblépési lehetőségek részleteire.

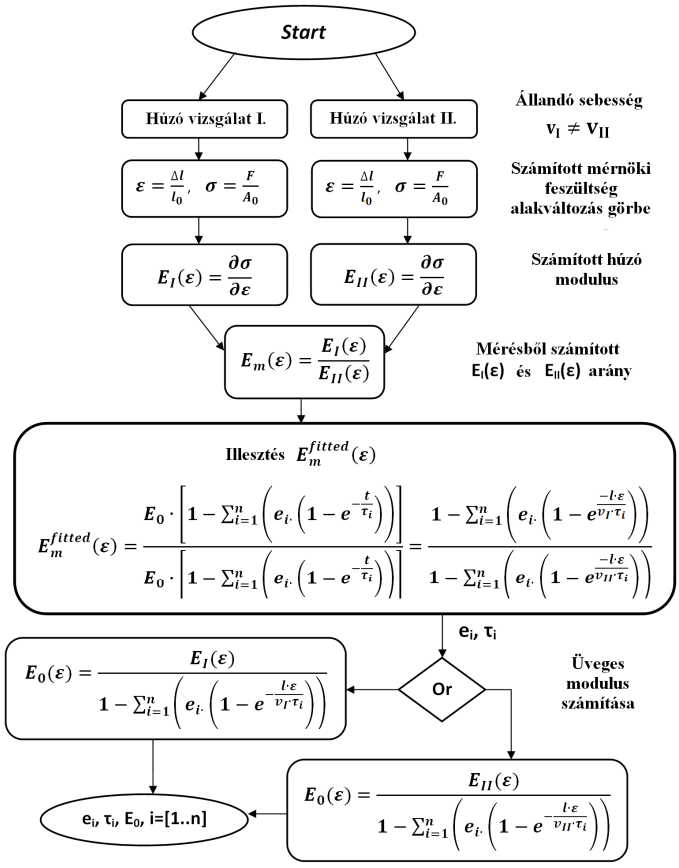
IV. Tézisek

1. Új módszert dolgoztam ki kis-alakváltozások elméletére épülő általánosított Maxwell-modell paramétereinek állandó alakváltozási sebességű húzóvizsgálatokból történő meghatározására. A módszert nagy-alakváltozásokra is kiterjesztettem a Green-féle alakváltozási tenzor invariánsain alapuló, nagy-rugalmas (hiperelasztikus) anyagtörvényekben szereplő paraméterek meghatározása céljából. A módszer alkalmazhatóságát öt vagy annál kisebb ágszám esetén saját kísérleti eredmények felhasználásával igazoltam. A kiterjesztésnek köszönhetően két eltérő, de állandó alakváltozási sebességű húzóvizsgálatból a viszkoelasztikus paramétereken túlmenően, az anyagi viselkedés alakváltozás függése is leírhatóvá válik.

Az értekezés kapcsolódó fejezete: 3.5.2.

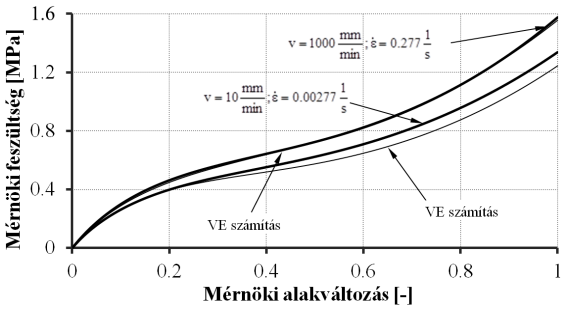
Kapcsolódó publikációk: [B2, B3, B4]

Az **1. ábrán** látható a kidolgozott paraméterillesztő módszer blokk diagramja. Ahogy látható elsőként ki kell számolnunk a feszültség-alakváltozás görbe első parciális deriváltját a két eltérő alakváltozási sebességű húzó vizsgálatból, mellyel megkapjuk a rugalmassági modulus alakváltozás függését ($E_I(\varepsilon)$ and $E_{II}(\varepsilon)$). Ezt követően a két görbe hányadosát képezzük ($E_m(\varepsilon)$), mely növekvő és csökkenő tendenciát is mutathat. Következő lépésként kifejezzük a $E_m^{fitted}(\varepsilon)$ összefüggését az általánosított Maxwell modellre jellemző matematikai függvényből és az idő paramétert helyettesítjük a próbatest hosszát, a húzás sebességét és az alakváltozás értékét tartalmazó kifejezéssel. A kapott $E_m^{fitted}(\varepsilon)$ összefüggést $E_m(\varepsilon)$-re illesztve a legkisebb négyzetek módszerével, nagy ágszámok esetén a genetikus algoritmussal megkapjuk a viszkoelasztikus viselkedést leíró modell paramétereit. Megjegyzendő, hogy az általánosított Maxwell-modell mindegyik rugó-csillapítás ágában két ismeretlen található, a relaxációs idő és a dimenziótalan energia paraméter (τ_i, e_i). Ezek közül a relaxációs idők illesztés nélkül is megbecsülhetőek, mellyel az illesztendő paraméterek mennyisége felére redukálható. A módszer utolsó lépése az üveges modulus meghatározása. Ennek a lépésnek a lefolytatásához a két mérés bármelyike felhasználható. Az egyetlen korlát az illesztő algoritmus konvergenciája.

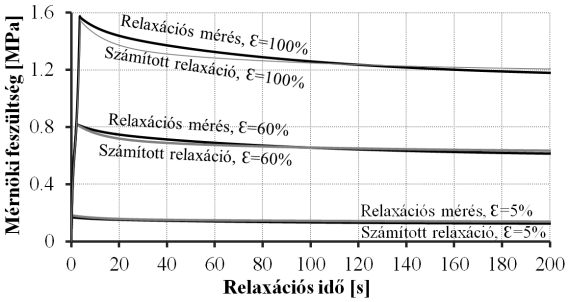


1. ábra Paraméter illesztő algoritmus blokk diagramja

A 2. ábra mutatja a mért és számított eredményeket a 10 és 1000 mm/perc-es húzóvizsgálatok esetén. A relaxációs vizsgálatra a mért és számított eredmények összehasonlítását a **3. ábra** szemlélteti 5, 60 és 100 %-os alakváltozások esetén. A számítások során a fent részletezett paraméter illesztő módszert alkalmaztam a nagyrugalmas és a viszkoelasztikus részek egyidejű meghatározásához.



2. ábra Analítikusan számított Különböző sebességű húzóvizsgálatok



3. ábra Számított és mért feszültség relaxációs eredmények összehasonlítása

Az eredmények egyezése a 10 mm/perc–es sebességen készített vizsgálat esetén kevésbé jó, de ennek ellenére is elfogadható pontosságú.

2. A száraz és nedves körülmények között üzemelő ablaktörlő lapát próbatest szintű viselkedését méréseken és végeselem szimuláción keresztül vizsgáltam. A méréseket egy saját tervezésű mérő berendezésen végeztem el. A vizsgálati eredmények alapján az alábbi megállapításokat tettem:

2a) Az ablaktörlő lapát vízzel kent mérési eredményei alapján megállapítottam, hogy egy adott csúszási sebességnél kisebb sebességen a terhelésnövekedés nem csökkenő, hanem növekvő súrlódási tényezőt okoz. Ez a kísérleti megfigyelés kiegészíti és pontosítja a szakirodalom azon megállapítását, mely szerint a terhelésnövekedés 10 és 2000 mm/s csúszási sebesség között csökkenő súrlódási tényezőt okoz víz jelenlétében. Az átmenet a növekvő és csökkenő tendenciák között 100 mm/s-os csúszási sebességnél adódik. A súrlódási tényezővel ellentétben, a súrlódó erő a növekvő felületeket összeszorító (normál) erő hatására 0.1 és 150 mm/s-os sebességek között minden esetben növekszik. A súrlódási erő növekedése azonban 100 mm/s felett sokkal kisebb, mint alatta. Méréseim szerint a súrlódási tényező nagysága 100 mm/s csúszási sebesség esetén jó közelítéssel független a normál erő nagyságától.

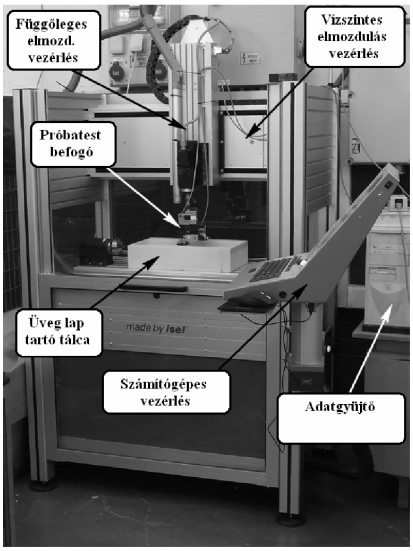
2b) A végeselemes szimulációk alapján megállapítottam, hogy állandó normál erő esetén a súrlódási erő nagysága hatással van a névleges érintkezési tartomány nagyságán és elhelyezkedésén kívül a törlő él és az üveg felület egymáshoz viszonyított pozíciójára is. A névleges érintkezési tartomány szélessége növekvő és csökkenő tendenciát is mutathat a növekvő súrlódási erő függvényében. 37.5 N/m vonalterhelés esetén növekvő, azonban 25 N/m terhelésnél már csökkenő tendencia figyelhető meg. A növekvő súrlódási erő hatására az ablaktörlő ugyanakkor egyre közelebb kerül az üveg felülethez.

Az értekezés kapcsolódó fejezete: 4.7.

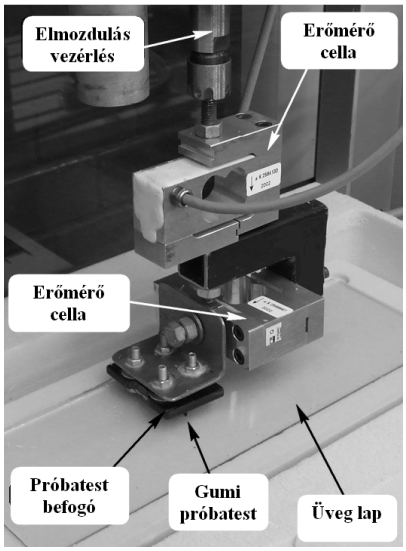
Kapcsolódó publikációk: [B10, B25]

Az alkalmazott mérő berendezés fényképe a **4. ábrán** látható. A 40 mm-es hosszal rendelkező próbatest egy kereskedelmi forgalomban kapható ablaktörlőből került levágásra. A mérés során a gumi próbatest a vízszintesen elhelyezkedő üveg felületre nyomva került mozgatásra. A csúszási sebesség 0.1 és 150 mm/s között, míg az ablaktörlő lapát függőleges elmozdulását 10 μm-es pontossággal állítottam. Az átfedés

(s) zérusnak tekintett az ablaktörlő ajkának üveg felülettel történő érintkezése pillanatában. Az átfedést 0.3 and 2.4 mm között változtattam.

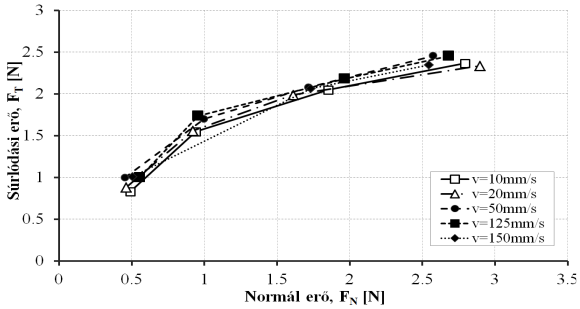


(a)

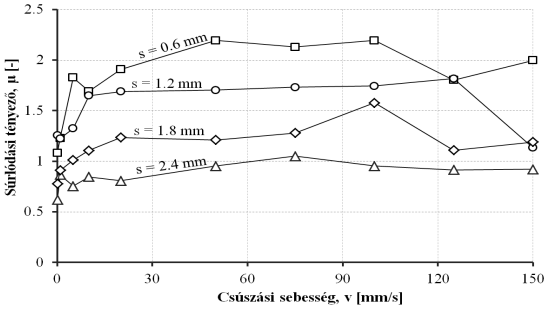


(b)

4. ábra (a) Mérő berendezés és (b) a próbatest megfogása



5. ábra Súrlódó erő változása a normál erő függvényében különböző sebességeken



6. ábra Mért súrlódási tényezők különböző átfedések mellett

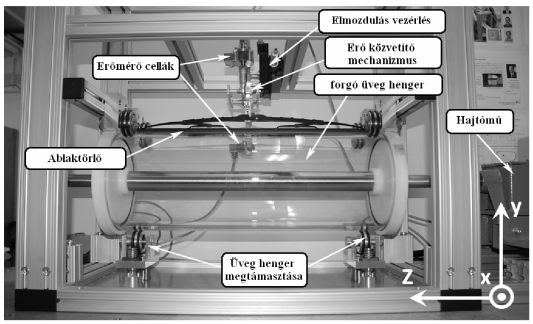
Az **5. ábrán** a súrlódási erő értékek kerültek ábrázolásra a normál erő függvényében különböző csúszási sebességek esetén. Az ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a súrlódási erő növekvő jelleget mutat a növekvő normálerők esetén. Alacsony erők mellett a súrlódó és normál erők kapcsolata közel lineáris, $F_N = 1$ N felett a meredekség jelentősen megváltozik. Ez a változás a súrlódási tényező csökkenését jelzi a normál erő növekedésével. A **6. ábrán** látható súrlódási tényező jelentős csúszási sebesség függést mutat alacsony csúszási sebességek ($v < 50$ mm/s) esetén. A súrlódó és normál erőkkel ellentétben állandó csúszási sebességen a súrlódási tényező csökken a növekvő átfedésekkel. Mindez a normál erők súrlódási tényezőt meghaladó mértékű növekedésének következménye.

3. **Matematikai modellt dolgoztam ki a teljes ablaktörlő lapát szerkezetszintű tribológiai viselkedésének feltárása céljából végzett mérések eredményeinek értelmezésére. A modell kapcsolatot teremt a forgó henger alakhibája/excentricitása és a mért erő komponensek ciklikus ingadozása között. A modell alkalmazásával megállapítottam, hogy a horizontális és vertikális erő komponensek ingadozása a forgó üveg henger alakhibájának és excentrikus ágyazásának következménye. Megállapítottam továbbá, hogy a mért horizontális és vertikális erő komponensek jó közelítéssel súrlódó és normál erőknek tekinthetők.**

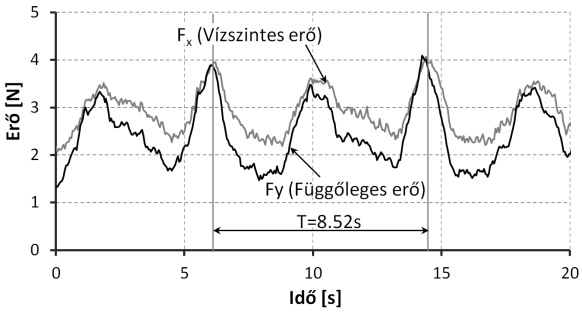
Az értekezés kapcsolódó fejezete: 4.8.2.

Kapcsolódó publikációk: [B1, B12]

A mérő berendezés főbb részei a **7. ábrán** láthatóak. A fokozatmentesen állítható fordulatszámú villany motor egy 220 mm-es átmérővel rendelkező üveg hengert hajt egy rugalmas tengelykapcsoló és egy fix áttételű fogaskerék hajtóművön keresztül. A hajtómű áttétele 51, melynek köszönhetően a maximális elérhető fordulatszám 6000 ford/perc, mely megfelel 1355 mm/s-os kerületi sebességnek. Az üveg henger hossza 700 mm, falvastagsága 5 mm. A henger alátámasztásáról három gumírozott felülettel ellátott, csapágyazott henger gondoskodott.



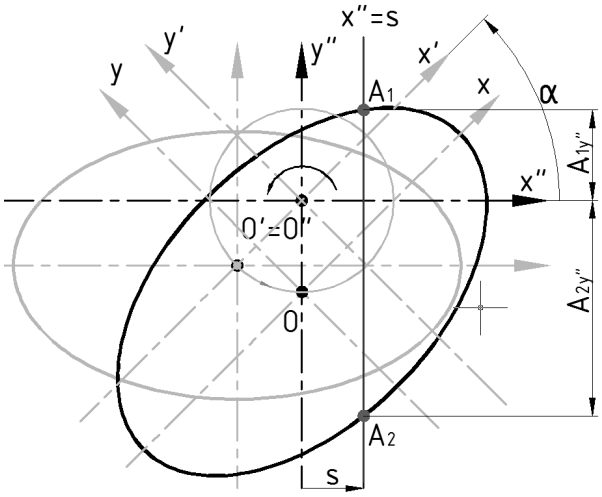
7. ábra Mérő berendezés



8. ábra Tipikus erő-idő görbe víz jelenléte mellett (v = 80 mm/s)

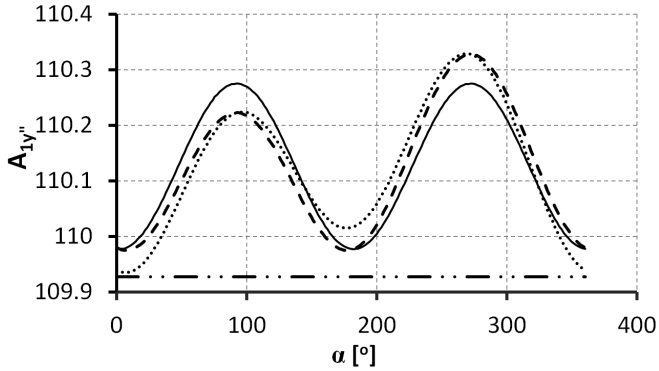
A mérések lefolytatása során a mért függőleges és vízszintes erő komponensek ciklikus ingadozást mutatnak a henger forgásával szinkronban (**8.ábra**) A mérés során meghatározott függőleges és vízszintes erő komponensek kiértékelése érdekében egy matematikai módszert dolgoztam ki, mely a nem hengeres jelleg és az excentrikus ágyazás hatását jelzi előre a mért erő komponensekre nézve. A matematikai modell a

9. ábra alapján felállított geometriai megfontolásokon alapszik. A henger excentricitása a forgásközépponttól mért vízszintes (h) és a függőleges (k) távolságokkal került megadásra, így ezek hatása akár külön is vizsgálható.



9. ábra Forgó excentrikus ellipszis (a 7. ábra bal nézetének felel meg)

Centrikus kör esetén a **9. ábra** szerinti $A_{1y"}$ távolság állandó értékű, nem függ a pozíciót meghatározó α értéktől. Centrikus ellipszis esetén $A_{1y"}$ távolság már egy minimális és maximális érték között változó periodikus jelleget mutat. Végezetül, ahogy a **10. ábrán** látható h értéke két eltérő lokális maximumot, míg k értéke két eltérő lokális minimumot okoz egy körülfordulás során. A mért eredmények (**8. ábra**) és a nem zérus h és k értékekkel számított eredmények hasonlósága bizonyítja, hogy a mérés során felhasznált üveg henger keresztmetszete valójában ellipszis alakú és ágyazására a kétirányú excentricitás jellemző.



	a [mm]	b [mm]	h [mm]	k [mm]	s [mm]
—·—·—	110	110	0	0	-4
———	110.3475	110.05	0	0	-4
- - - - -	110.3475	110.05	0.0525	0	-4
·····	110.3475	110.05	0.0525	0.04	-4

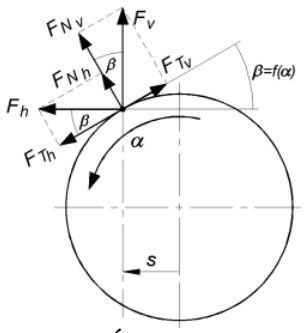
10. ábra A1y" változása a vizsgált esetekben

4. Az ablaktörlő lapát részleges felfekvése esetén, a szerkezetszintű tribológiai mérési eredményekből megállapítottam, hogy a vizsgált ablaktörlő lapát vonalmenti terhelés értéke, a látszólagos érintkezési tartomány változása következtében, gyakorlatilag függetlennek tekinthető a jelentősen eltérő súrlódási tényezőket eredményező vizsgált működési paraméterektől. Ez a jelenség teljes felfekvés esetén (mely a szakirodalomban részben vizsgálat alá kerül) nem figyelhető meg. A mérések rámutattak, hogy a szakirodalmakban fellelhető próbatest szintű vizsgálatokhoz hasonlóan a súrlódási tényező jelentősen csökken a növekvő csúszási sebesség vagy a felületeket összeszorító erő csökkenésének hatására, vízzel kent esetben. A szerkezetszintű vizsgálatoknál az ablaktörlő él felfekvésének hossza változó, mely a növekvő terhelés mellett is közel változatlan vonalmenti terhelés értéket idéz elő különböző súrlódási tényezők mellett.

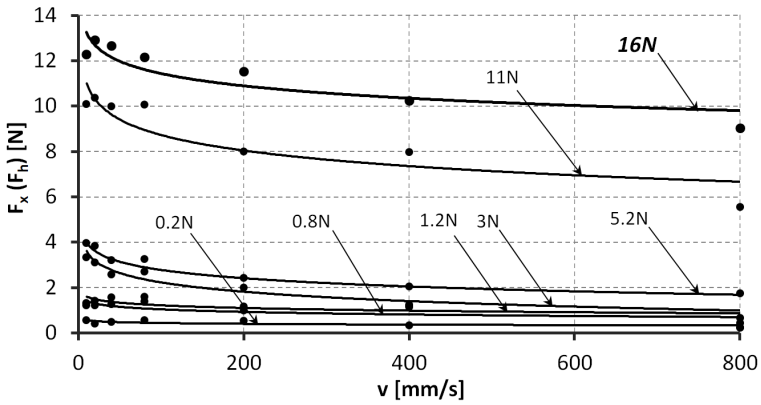
Az értekezés kapcsolódó fejezete: 4.8.3.

Kapcsolódó publikációk: [B1, B12]

Az ablaktörlő lapát és a forgó üveg henger érintkezése során nem zérus értékű erő mérhető vízszintes és függőleges irányokban egyaránt. Ezek az erők, valamint normális és tangenciális komponenseik a **11. ábrá**n láthatóak.



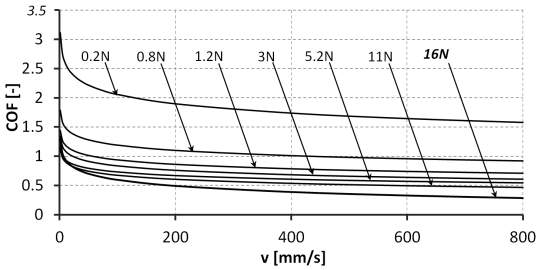
11. ábra Érintkezés során fellépő erők



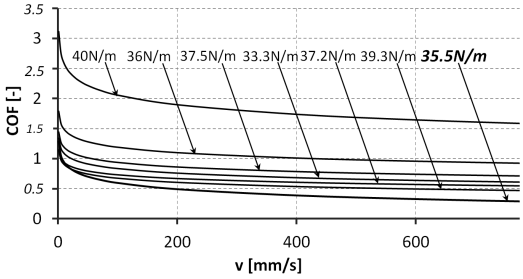
12. ábra Vízszintes erő csúszási sebesség függése különböző függőleges erők esetén víz jelenléte mellett

A kiértékelés során első lépésként az összes nedves körülmények között készült mérési eredmény összegyűjtése történt meg. Minden mérés állandó átfedés (s) mellett készült és a csúszási sebesség került változtatásra. Az összes mérést figyelembe véve beazonosítható a függőleges erő felső (F_{vmax}) és egy alsó (F_{vmin}) határérték. Második lépésként hét különböző erő értéket választottam ki (0.2, 0.8, 1.2, 3, 5.2, 11 és 16 N) a minimális és maximális erő értékek között. Ezt követően minden kijelölt erő értéknek

megfelelő mérési eredményből kigyűjtöttem az aktuális vízszintes erő komponens értéke. Az így elvégzett kiértékelést követően a kiválasztott erő értékekből a súrlódási tényező kiszámíthatóvá válik. Az eredmények a **13. és 14 ábrákon** láthatóak.



13. ábra Súrlódási tényező csúszási sebesség függése különböző függőleges erők mellett vízzel kent esetben



14. ábra Súrlódási tényező sebesség függése különböző vonalmenti terhelés mellett vízzel kent esetben

Ahogy látható a súrlódási tényező csökkenő jelleget mutat a csúszási sebesség növekedése, vagy a függőleges erő növekedése esetén. Meg kell említeni, hogy a próbatest szintű vizsgálatokban azonos tendencia figyelhető meg nagy sebességek esetén. A **14. ábra** majdnem azonos a **13. ábrával** azonban itt a függőleges erő értékét elosztottam a látszólagos érintkezési tartomány hosszával. Míg a **13. ábrán** különböző erő tartozik minden ábrázolt görbéhez, addig a **14. ábrán** minden görbe a vonalmenti terhelés értéke került megadásra, melyek közel azonos értékűek. Más szóval a **14. ábra** görbéi nem különíthetőek el egymástól a vonalmenti terhelés értéke alapján. Ennek ellenére drasztikusan különböző súrlódási tényezők tartoznak a közelítőleg azonos vonalmenti terhelést mutató görbékhez.

V. Továbblépési lehetőségek

Doktori munkám egy EU projekthez kapcsolódik, mely célja gumi alkatrészek tribológiai jelenségeinek megértése. Munkám során azonban olyan modelleket és elméleteket alkalmaztam, melyek sok más területen is alkalmazható, ahol gumiból vagy gumiszerű anyagból készült alkatrészek vizsgálata a cél. Ha figyelembe vesszük, hogy hány gumiból készült tömítést, abroncsot, vagy más alkatrészt alkalmaznak világszerte, akkor könnyen beláthatjuk, hogy a kidolgozott modellek más alkalmazásokban is eredményesen használhatóak. Ennek ellenére szem előtt kell tartani, hogy a gumi alkatrészek vizsgálata egy összetett feladat. Az összes befolyásoló tényező egyidejű figyelembe vétele nem lehetséges, így a disszertációmban csak a befolyásoló hatások egy részével foglalkozok. A vizsgálatok nem foglalkoznak a hőmérséklet tribológiai viselkedésre gyakorolt hatásával, mely jelentősen képes megváltoztatni az anyagjellemzőket (az üvegesedési hőmérséklethez közel akár 5000MPa-s modulus is mérhető egy elasztomer anyagon, míg szobahőmérséklet ez az érték csak 20 MPa körüli). Az általam előállított eredmények megismétlésével több hőmérsékleten az eredmények még részletesebb és alaposabb megismerése valósulna meg. Ismereteim alapján ezek a vizsgálatok eddig a szakirodalomban nem álltak rendelkezésre, az általam használt és tervezett berendezések alkalmasak lennének a vizsgálatok lefolytatására.

A tribológiai vizsgálatokban labor körülmények között előállított száraz vagy tisztán vízzel kent eseteken túl számtalan egyéb körülmény is vizsgálható lenne. Az üveg felület mesterséges vagy természetes szennyeződése révén a valós működést jobban közelítő vizsgálatok is készülhetnének a jelenlegi berendezések felhasználásával. Szintén vizsgálható lenne az ablaktörlő lapát kenésállapota korszerű numerikus algoritmusok segítségével, melyek előállításához szükséges nyomáseloszlások és ezek hátterében álló végeselemes modellek kidolgozása már disszertációmban bemutatásra kerültek [B18, B25]. A számítások természetesen akár 3D-ben lefolytathatóak lennének, melyet azonban már a disszertációmban (szükséges számítási kapacitás hiányában) nem részletezek. A numerikus szimulációk természetesen számtalan további lehetőséget is kínálnak ennek az összetett problémának a vizsgálatára, melyek között szerepel a dinamikai, termikus, akusztikai és ezek tetszőleges kombinációját figyelembe vevő kapcsolt számítások egyaránt.

VI. Hivatkozások

[1] G. A Holzapfel: Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering Science, Springer, 2002, ISBN 0-471-82319-8

[2] J. Bonet, R. D. Wood: Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Method, Cambridge University Press, 2008, ISBN 978-0-511-39468-3

[3] G. Bodor, L. M. Vas: Polimerek anyagszerkezettana, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2001.

[4] MSC Marc Volume A: Theory and user informations, Version 2007

[5] B. Marvalova: Identification Of Viscoelastic Model Of Filled Rubber And Numerical Simulation Of Its Time Dependent Response, Vibration problems, Vol.126 (2009) pp. 273-279; doi: 10.1007/978-1-4020-9100-1_28

[6] B. N. J. Persson: On the theory of rubber friction, Surface Science Vol.401, (1998) pp.445–454

[7] B. N. J. Persson: Theory of rubber friction and contact mechanics, Journal Of Chemical Physics Vol.115, 8(2001) pp.3840-3861

[8] F. P. Bowden and D. Tabor: The friction and lubrication of solids, Oxford University press, 2008, ISBN 978-0-19-850777-2

[9] A. Koenen, A. Sanon: Tribilogical and vibroacustic behaviour of a contact between rubber and glass (application to wiper blade), Trib. Int., Vol.40 (2007) pp.1484-1491

[10] F. Deleau, D. Mazuyer, A. Koenen: Sliding friction at elastomer/glass contact: Influence of the wetting conditions and instability analysis, Trib. Int., Vol.42 (2009) pp.149-159.

[11] B. N. J. Persson, M.Scaraggi: On the transition from boundary lubrication to hydrodynamic lubrication in soft contacts, J. Phys. Condens. Matter, Vol.21 (2009) pp.1-22.

VII. Publikációk

Folyóiratcikkek

[B1] G. **Bódai**, T. Goda: Friction force measurement at windscreen wiper/glass contact, Tribology Letters, Vol.45, Nr.3 (2012) pp. 515–52, IF: 1.574 (2010)

[B2] G. **Bódai**, T. Goda: Identification of large strain viscoelastic parameters of generalized Maxwell-models: Application oriented approach for engineers, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 8, 5(2011) pp. 89-108., IF: 0.284 (2010)

[B3] G. **Bódai**, T. Goda: Parameter identification methods for sprig-dashpot material models, engineering approach for small strain elasticity, Materials Science Forum, 659(2010) pp. 379-384.

[B4] G. **Bódai**, T. Goda: On the relation between stress relaxation and constant strain rate tensile behavior for linear viscoelastic materials; an engineering approach, Materials Science Forum, Vol. 729 (2013) pp. 314-319

[B5] G. **Bódai**, K. Váradi, L. Molnár, L. Oroszváry: Temperature dependent Examination of Brake Cylinder Membrane (Part I), FE Modelling of the Tension Examination of Cord-reinforced Specimens, Periodica Politechnica, 54/1 (2010) pp. 3–8

[B6] G. **Bódai**, K. Váradi, L. Molnár, L. Oroszváry: Temperature-dependent Examination of Brake Cylinder Membrane (Part II) FE Modelling of Cord-reinforced Rubber Membrane Behaviour, Periodica Politechnica, 54/1 (2010) pp. 9–13

[B7] L. Molnár, K. Váradi, G. **Bódai**, P. Zwierczyk: Simplified modeling for needle roller bearings to analyze engineering structures by FEM, Periodica Politechnica, 54/1 (2010) pp. 27–33

[B8] G. **Bódai**, K. Váradi, A. Szabó, L. Zóbory: Thermal simulation of pin on rotating cylinder jacket system, article submitted to Periodica Politechnica

[B9] G. **Bódai**, K. Váradi, L. Molnár, L. Oroszváry: Thermal simulation of a pin on a rotating cylinder jacket system, Periodica Politechnica 56/2 (2012) pp. 1–8

Konferencia kiadványban megjelent cikkek:

[B10] G. **Bódai**, T. Goda: Identification of the wiper blade coefficient of friction, XVII International Conference on Mechanical Engineering, Gheorgheni, Romania, 23-26 April 2009, EMT Technical Review Special Edition, (2009) pp. 64-67.

[B11] G. **Bódai**, S. Bisztray-Balku: Reciprocating elastomeric hydraulic seals' tribology and leakage calculation, Proceedings of the Sixth Conference on Mechanical Engineering, G-2008-B-1, 29-30 May 2008, Budapest, Hungary

[B12] G. **Bódai**, T. Goda: Analysis of the windscreen wiper on rotating glass cylinder test rig, Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering, 29-30 May 2010, Budapest, Hungary

[B13] G. **Bódai**, T. Goda: Mixed Friction Of Windscreen Wiper: Numerical Analysis, Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering, 24-25 May 2012, Budapest, Hungary

[B14] **Bódai** G., Váradi K., Bisztray-Balku S.: A tömítőnyomás végeselemes számítása és a résveszteségek meghatározása elasztomer dugattyúrúd tömítéseken, GÉP, 58. évfolyam, 2007/10-11, pp. 13-16.

[B15] **Bódai** G., Goda T.: Ablaktörlő lapát kvázistatikus és dinamikai viselkedésének mérése és modellezése, GÉP, 59. évfolyam, 2008/10-11, pp. 3-6.

[B16] **Bódai** G., Goda T.: Hiperelasztikus anyagok mechanikai viselkedésének elmélete és alkalmazása, AGTEDU konferencia 2009 , Kecskemét, 2009 november 5. pp. 155-160

[B17] **Bódai** G., Váradi K., Molnár L., Pálfi L.: Polietilén gázcső elszorítás kísérleti és numerikus vizsgálata, GÉP, 60. évfolyam, 2009/10-11, pp. 14-17.

[B18] Goda T., **Bódai** G.: O-gyűrű szivárgás számítása korszerű numerikus módszerrel, GÉP, 60. évfolyam, 2009/10-11, pp. 43-46.

[B19] Molnár L., Váradi K., **Bódai** G., Zwierczyk P.: Tűgörgős csapágyak egyszerűsített modellezése mérnöki szerkezetek végeselemes analíziséhez, GÉP, 61. évfolyam, 2010/9-10, pp. 55-58.

[B20] **Bódai** G.:, Váradi K., Molnár L., Oroszváry L.: Fékhenger-membrán hőmérsékletfüggő állapotvizsgálata, GÉP, 61. évfolyam, 2010/9-10, pp. 111-114.

[B21] L. Molnár, K. Váradi, G. **Bódai**, L. Oroszváry: Fékhenger-membrán numerikus állapotvizsgálata, XIX Nemzetközi gépészeti találkozó OGÉT 2011. Csíksomlyó, 04.28-05.01, pp. 160-164.

[B22] G. **Bódai**, T. Goda: Mixed Friction Of Windscreen Wiper: Numerical Analysis, Special Phd Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering, 29-30 May 2012, Budapest, Hungary (accepted for special edition of the conference)

[B23] G. **Bódai**, T. Goda: Measurements and FE calculations of windscreen wiper; examination of quasi-static and dynamic behaviour, IV European Conference on Computational Mechanics (ECCM), 16-21 May 2010, Paris, France

[B24] G. **Bódai**, K. Váradi, L. Molnár: Experimental and numerical examination of Brake Cylinder Membrane, Danubia-Adria-Symposium, Siófok, 2011. szept. 28.- okt.1.

Benyújtott folyóiratcikkek:

[B25] G. **Bódai**, T. Goda: Sliding friction of wiper pared with glass surface: Measurement, FE modeling and elastohydrodynamic calculation, submitted to Tribology International

Köszönetnyilvánítás

Jelen munka a Budapesti Műszaki Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszékén készült.

Elsőként szeretném kifejezni hálámat témavezetőmnek, **Goda Tibor**nak, türelmes iránymutatásáért és lelkesítéséért. Alaposságra és precizitásra törekvése nélkül jelen munka nem születhetett volna meg.

Szeretném kifejezni köszönetemet **Váradi Károly** irányába, aki ösztönzött doktori tanulmányaim megkezdésére és számtalan lehetőséget biztosított tudásom gyarapítására és kamatoztatására.

Minden kollégámnak szeretném megköszönni a lelkesítést és a jó hangulatot még a legnehezebb időkben is. Külön köszönettel tartozom alábbi kollégáimnak: **Forányi Ferenc, Máté László, Mógor-Győrffy Róbert, Szücs János és Zwierczyk Péter**

Hálával és köszönettel tartozom még barátnőmnek, **Buzai Beá**nak türelméért, megértéséért és bátorításáért.

Végül és elsőként ajánlom disszertációmat családomnak, édesanyámnak és nővéremnek és szeretném megköszönni az ember feletti támogatást, amire minden helyzetben támaszkodhattam.

A doktori disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthető.