

VÁLASZOK

Dr. Szendrő Péter professzor úr bírálatára

Köszönöm az értékes bírálatát, a megfogalmazott észrevételeire és kérdéseire az alábbiakban szeretnék válaszolni:

1.*elvárható lenne a modell kísérletek, laboratóriumi körülmények közötti vizsgálatok összevetése, validálása fél üzemi, üzemi súrlódási, kopási szituációkkal. Ezek a gépelemek, mind a sík-vezetékek, mind a támasztó, mozgó gömb- és henger, mind pedig csúszó – gördülő kopásnak kitett erővel terhelt evolvens és ciklois felületek tekintetében ma már gépészeti rutin szerkezetek....*

Az alapkísérletek validálása a kutatás során több lépcsőben történik (a DIN50322 szerinti tribológiai modellvizsgálati kategóriáknak megfelelően [1]). Erről részletesen a dolgozat későbbi részében (2.4. fejezet), a 21. oldaltól számolok be. Ebből kiderül, hogy tribológiai alapjelenségek feltárására, a vizsgált anyagok összehasonlítására miért alkalmas a szabványban definiált VI. vizsgálati kategória, és a dinamikus modellezés megalkotásával hogyan tudtam továbblépni a valós gépelemekkel végzett, üzemi hatásokat szimuláló rendszerek felé. A vizsgálati rendszereim megtervezésénél polimer/fém radiális és lineáris siklócsapágyazások mérnöki gyakorlatát vettem alapul. A laboratóriumi méréseim, az egyes anyagok összehasonlításból levont következtetéseim visszaigazolták valós gépelemekkel végzett kísérletek, illetve ipari alkalmazások.

2. ... *Nem jó megoldás azonban a mintegy 40 oldal terjedelmű 5. fejezet különállása és mini disszertációkénti kezelése....*

A 4. és 5. fejezetet össze lehetett volna vonni, de olyan mértékben eltérő tribológiai rendszerek vizsgálatáról van szó, hogy jobbnak tartottam a különválasztást, márcsak azért is, mert az alkalmazott módszer, a célok, a felületek....stb., mások voltak. Ezért a külön fejezet számozás és külön tézis fogalmazás mellett döntöttem.

3. ...A feltételrendszerek modellezése azonban felületes, így továbbra is kérdéses, hogy mennyire gyakorlati. Ilyen szempontból nincsenek kidolgozva a vizsgálatok, az hogy a műszaki alkalmazásoknál (ágyazások, hajtások, armatúrák stb.) melyet azok a feltételek, és amelyek teljesítése esetén eredményes lehet a paraméter meghatározás....

A modellek megalkotása során maximálisan törekedtem a mérnöki gyakorlat figyelembevételére, de a dolgozatban a vizsgálati rendszerek kidolgozásának minden részletére nem térhettem ki a terjedelmi korlátok miatt. A disszertációban hivatkozott publikációimban megtalálható az alkalmazott feltételrendszerek részletesebb indoklása.

A polimer/acél radiális és lineáris siklócsapágyak tervezése viszonylag egyszerűnek tűnik a gépelem tankönyvek illetve polimer gyártó cégek ajánlásai alapján, de a valóság jóval összetettebb. A helyes anyagkiválasztás, tervezés csak az üzemi hatások ismeretében lehetséges. Függetlenül a súrlódási energia-viszonyoktól és a tribológiai élettartamtól, a csapágytervezés elsősorban a mechanikai teherviselésen, továbbá a gyártáson és szerelhetőségen alapul. Ma ezt a tervezési koncepciót már ki tudjuk egészíteni a befogás/ágyazás kialakításának, a statikus/dinamikus terhelésnek, a kenési állapotnak, a környezeti hőmérsékletnek és nedvességtartalomnak, valamint a siklási sebességnek a módosító hatásával. Mindezt gyakorlati tapasztalatokra alapozva a nagy műanyaggyártó cégek (pl. DSM EPP, CAMSAD adatbázis [2] „Computer Aided Material Selection and Design”) kidolgozták. Definiálták az egyes polimerekhez tartozó használhatósági kritériumokat, melyek jellegzetes anyagcsoportonként általánosíthatók. A polimer-specifikus részletek mellőzésével is definiálhatók olyan keretszámok, melyek a helyes polimer/acél súrlódó kapcsolatok feltételeiként értelmezhetők.

Az általános használatú műszaki műanyagok esetében ilyen alapszabályok: a siklási sebesség száraz csúszás esetén max. 3 m/s (terheléstől függő), ha a környezeti hőmérséklet és nedvességtartalom normál körülménynek tekinthető (0 - 30°C, RH 30-60%), továbbá az ellenfelület köszörült vagy finomesztergált szerkezeti acél (R_a 0,2 – 1,6 és R_z 0,8 – 6,3), a kontakt terhelés 0 -25 MPa (anyag- és sebesség függő). Ez utóbbit 40%-kal növelni lehet, ha a csapágypersely az anyagvastagság felében befogott és nem szabad axiális elmozdulású [3].

E kritériumokon belül, az egyes polimerekre lebontva történik a mechanikai (statikus jellegű) igénybevétel mellett a p_v kritériumra történő méretezés vagy ellenőrzés [4, 5, 6]. A disszertáció 4. és 5. fejezetében ismertetett nagyszámú polimer egyedi alkalmazhatóságának figyelembevételével alkottam meg azokat a vizsgálati feltétel-rendszereket, mikor a fenti

ajánlásokra alapozva definiáltam a terhelés és sebesség viszonyokat, környezeti feltételeket, és az acél ellenfelületet. Az adott feltételek között bármelyik műanyag siklócsapágyazás alkalmazása elfogadható lenne a jelenlegi tervezési ismereteink szerint, de a várható élettartam szempontjából is összehasonlíthatóvá kellene tenni őket. Viszont semmilyen információnk nincs a súrlódás során bekövetkező jelenségekről, a csapágyazásban elnyelődő energiáról, a súrlódásból eredő kopásokról. Erre vonatkozóan nyújtanak új információt az elvégzett kutatásaim. A vizsgálati rendszereimet a leírtak tükrében terveztem, a polimer fejlesztő és gyártó cégek (DSM EPP, Quadrant EPP, Ensinger GmbH, RÖCHLING A.G, Quattroplast,) tervezési-alkalmazhatósági kritériumainak és a DIN 50322 szabvány V. és VI. kategóriás vizsgálati rendszereinek megfelelően.

4. ...11. oldal: Megállapítja, hogy a polimerek súrlódása a Kragelszkij által leírt módon változik (2.2. táblázat/f). Az azóta végzett kutatások a legújabb anyagokkal is ezt a trendet erősítik meg. Ezekhez a megállapításokhoz képest hol, milyen módon adnak új (újabb) tudományos eredményt a jelölt kutatási eredményei?...

A 2.2. táblázat/f ábra a normál terhelés hatását ábrázolja a számított súrlódási tényezőre. Ez a kádgörbe jellegű trend a legelfogadottabb, mely a súrlódás adhéziós és deformációs komponensének a változásából adódik. Kutatási célkitűzéseimben nem szerepelt nagyszámú terhelési szint alapján történő súrlódási folyamat-értékelés, de a Kragelszkij féle trenden belül értelmezhetők a kutatási eredményeim.

A görbe középső tartománya tekinthető súrlódás szempontjából optimális üzemelési körülménynek, mikor a minimumpont közelében keletkező súrlódási jelenségről beszélünk. A polimerekre a gyártók által kikísérletezett p_v határértékek ezt az optimális, azaz indokoltan használható zónát célozzák meg. Így én a kísérleti feltétel-rendszereimet, melyet az előző válaszponthoz ismertettem, az optimumpont környezeti zónájából kellett, hogy definiáljam. A 4. fejezet eredményeinek feldolgozásánál kiderült, hogy az általam alkalmazott normálterhelés változtatása (2 MPa-ról 5 MPa-ra) a pin-on-disc méréseknél az egyes polimerek esetében milyen munkapont elmozdulást jelent az optimum-pontjához képest.

5. ... A 2.2., 2.3, 2.4 táblázatok jó áttekintést adnak az egyes tényezők súrlódásra gyakorolt hatás trendjéről (szakirodalmi adatok). Kérdés, hogy a saját kutatási eredmények illeszkednek-e ehhez a trendhez? Miben jelentenek új eredményeket?

Válaszom lényege hasonló a 3. és 4. válaszpontokban leírtakhoz. Az említett táblázatok irodalmi információk alapján készültek, a normálterhelés, a siklási sebesség és a környezeti hőmérséklet extrém módon kiterjesztett hatását összegzik a súrlódási tényezőre nézve. Az általam definiált vizsgálati rendszerek viszont a leginkább valószínűsíthető, normál mérnöki alkalmazás feltételeit követik, a polimer anyaggyártók ajánlásait is figyelembe véve.

6. Bővebb magyarázatot kellene adni arra, hogy miért „csak” az adhéziós kopási mechanizmus sajátosságait tárgyalja, az egyéb kopási mechanizmusokkal miért nem indokolt foglalkozni? Keveslem azt a magyarázatot, hogy „ tekintettel a jelen értekezés kutatási területére”.

A jellegzetes kopási mechanizmusok közül a vizsgálati rendszerben az adhéziós kopás hatása domináns, a többi mechanizmus feltételei nem adottak vagy nem meghatározóak. Tiszta, köszörült acél/polimer kontaktusban nincs abrazív szemcse, az acél mikrogeometriájának forgácsoló hatása nem domináns. Fretting kopás mozgásviszonyai nem adottak, kavitációs és eróziós kopás nem értelmezhető, tribokémiai jelenség feltételei nem adottak. Ezért csak az adhéziós kopás polimereket érintő alapjaira tértem ki a 2.2. fejezetben.

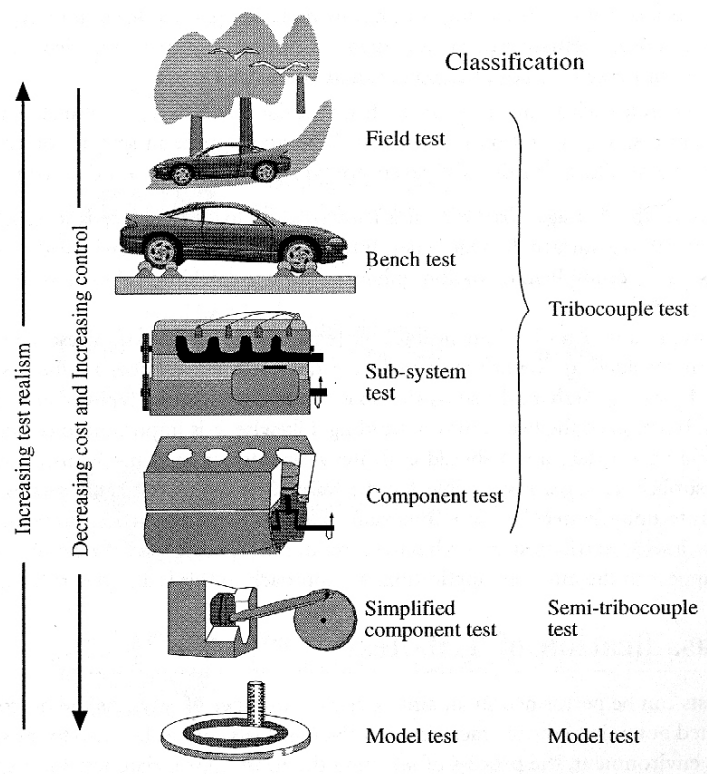
7. 23. oldal: A modell vizsgálati módszereknél azt írja, hogy nehéz megjósolni a polimer tényleges viselkedését adott üzemi körülmények között, ezekből az eredményekből. Ez a megállapítás hogyan egyeztethető össze az eredeti célkitűzéssel, ami a gépszerkezeti alkalmazhatóságot célozza?...

A megállapítás a VI. V. és IV. vizsgálati kategóriákra vonatkozik, mely a különböző bonyolultságú laboratóriumi modelleket definiálja. Ez a megállapítás igaz, de emellett azt is írom a 23. oldalon, összhangban a szabvánnyal [1], hogy: „Új szerkezet, gép kifejlesztését a legegyszerűbb – a VI. csoportba tartozó – vizsgálatokkal kezdik, és fokozatosan haladnak a

többi csoporton keresztül az I. csoport felé, amely már a kész gépet vizsgálja az üzemi körülmények között. Bushan „Modern Tribology Handbook” I. kötete (1. ábra) további részletekkel szolgál [7].

A tribológiai szempontból is megfelelő gép(egység) tervezését hatlépcsős rendszerben végzik. A költségek és az idő minimalizálása érdekében a szóba jöhető megoldások közül kell fokozatosan kiszűrni a legjobbat. Ezt biztosítja a módszer a VI. kategóriától indulva az I. kategória felé. A VI. kategóriában alapjelenségek, anyagpár összehasonlítások végezhetőek reprodukálható körülmények között. Nyilvánvaló, hogy itt a legkisebb a korreláció az üzemi, sztochasztikus hatásokat is tartalmazható hatásokhoz.

A dinamikus modellezés megalkotásával viszont lehetővé vált a VI. és IV. kategória közötti átjárhatóság.



1.ábra. Tribológiai vizsgálati kategóriák (VI. – I.) értelmezése a próbatest modelltől a kész gépig [7]

8. A tribológiai modellrendszerre vonatkozó észrevételek és kérdések

a) A 3.4. ábra moduljai nincsenek beazonosítva a 2.5. táblázat kategóriáiban.

Igen, mert egy-egy triboteszt modul alkalmas a VI. kategória mellett - pl. valós gépelem, vagy annak metszete alkalmazásával – az V. vagy IV. kategória érvényességi területén is dolgozni. Ezt szolgálja továbbá a kidolgozott dinamikus modellezés lehetősége is. A 3.4. ábrán elvileg rá lehetett volna írni az egyes modulok mellé a lehetséges vizsgálati kategóriákat, talán még nem lenne túl zsúfolt az ábra.

b) ...nehezen értelmezhető és ellentmondásos az a megállapítása, hogy a VI. vizsgálati kategória csak tribológiai alapinformációkat ad, ugyanakkor a VI. kategóriában fejlesztett saját eszközrendszer (a dinamikus modellezés lehetőségével) már tervezhetővé teszi a valós gépelem igénybevételeinek közelítését?

Az állítás igaz, de fogalmazásbeli pontosítással, illetve további információval egyértelműsíthető.

A VI. vizsgálati kategóriában legtöbbször egyszerű alakú (henger, tárcsa, hasáb, gömb, prizma stb.) próbatesteket használnak és rögzítik az igénybevételt, a mozgásformákat. De ha egy valós gépelem tribológiai viszonyait ismerem (közelítem vagy megmérem), az átültethető a laboratóriumi mérésekre úgy is, hogy még nem használok eredeti, teljes méretű gépelemet. Maradhat az egyszerű próbatest, viszont utánozni tudom pl. a dinamikus erőhatásokat, súrlódási irányváltásokat, inercia hatásokat, külső hőmérséklet változásokat. Ezt valósítottuk meg a saját koncepciónkban: használhatjuk a VI. kategória mérő és próbatest befogó rendszerét, viszont program szerint, reprodukálható módon generáljuk a mérés során a valós gépelemet érő fontosabb dinamikus hatásokat.

Egy példa: 2000 és 2004 között a Széchenyi István Egyetem, Vasúti és Közúti Járművek Tanszékével, illetve a Rába győri telephelyével közösen megvalósítottunk egy rekonstrukciós műszaki fejlesztést, amikor busz és tehergépkocsik első futóművének kormány szerkezetében a függőcsap radiális támasztására szolgáló, eredetileg bronz alapú siklócsapágyazást PETP persellyel váltottuk ki. A Rába „bench-test” (valós futómű laborban, szimulált sokszoros túlterheléses mérések) és az azt megelőző laboratóriumi méréseink alapja pedig egy mozgó tehergépkocsi futóművére szerelt gyorsulás érzékelő volt. A mérési eredményekből generált erő-idő függvény volt az alapja a laboratóriumi dinamikus méréseink során programozott

erőhatásoknak. Mindezt ráültettük a VI. kategóriás pin-on-disc és pin-on-plate tribológiai rendszerre. A dinamikus modellezéssel – melynek alapja a tehergépkocsit a Győr-Sopron útvonalon ért erőhatások voltak - a VI. kategória érvényességi rendszerét kiterjesztettük az V. kategóriára. Egyébként csak súrlódási és kopási szempontok alapján, használva a VI. kategóriából a pin-on-disc méréseket, alkalmas polimer lehetett volna még a PETP/PTFE kompozit is. A vizsgálatokat a dinamikus modellezéssel kiterjesztve az V. kategóriára kizártuk a PETP/PTFE kompozitot a nagyobb alakváltozási képessége miatt. A natúr PETP perselyek a bench-test során már kiválóan működtek, nem lehetett valós kopást és deformációt mérni, viszont a túlterhelt rendszer miatt a kúpgörgős csapágyak sorra eltörték pár millió kormányzási ciklus után, így a projekt új irányt vett a továbbiakban.

c)A saját „large-scale” koncepcióra kifejlesztett vizsgálati eredményekkel a valós körülmények jobban modellezhetők megállapítás csak feltételezés. Erre vonatkozó validálás nélkül (valós körülményeket közelítő méréseket, vizsgálatokat nem ismert) nem bizonyított.

A „Large-scale” koncepció a genti egyetem egyik specialitása. A dolgozatomban ismertettem, hogy egy évig vendégkutatóként dolgoztam az UGENT Laboratory Soete-nél, ahol egy teljesen önálló projektet dolgoztam ki (fretting kopás kutatása TLA módszerrel), továbbá egy részterületi munkám is volt: különböző polimer kompozitok „large-scale” vizsgálata. Az ipari probléma, melyet tribológiai szempontból kellett kutatni, az a hídszerkezetek dilatációjánál használt síktámasztás súrlódása és kopása. Itt nem annyira a koncentrált dinamikus hatás és siklási sebesség, mint inkább a méretekből adódó inhomogén feszültségállapot, stick-slip hajlam, a csúszófelület kialakításából, a befogásokból adódó élek feszültségkoncentráció szerepe a kritikus. Megtörtént a modell validálása egy „Brugge” városában lévő híd szerkezeti és terhelési felmérése alapján. Ez képezte a laboratóriumi „large-scale” projektet eredeti geometriájú próbatestekkel, melyhez a megfelelő próbatest befogást és készülékét kellett megtervezni. A 16 lehetséges súrlódó anyagpárosításból a laboratóriumi mérésekkel 3 polimer kiválasztása történt meg. A továbbiakban valós kísérleteket is terveztek az előválasztott anyagokkal, de ez már az én kutatói évembe nem fért bele.

A „Large-scale” koncepcióval végzett kutatások használhatóságát és eredményességét számos genti publikáció és megvalósult ipari fejlesztés is igazolja. Világhírűvé vált mérnöki alkotás a rotterdami tengerzáró kapu óriási gömb-csapágya (2. ábra), melyet a „large-scale”rendszerrel Gentben, a Laboratory Soete-ben modellezték a fejlesztés során.

A „large-scale” koncepció valós mérnöki munkában való használatának alapja, azaz a validálás, minden esetben a modellezendő probléma rendszerjellemzőinek a pontos feltárása, és laboratóriumba való átültetése. Így az alapgép képességeinek birtokában egyedileg tervezendő a próbatestet érő erő és siklási hatás, a geometriai kialakítás, a befogások, hőelvezetés, kenési állapot. Ez alól kivétel lehet, mikor csak anyagokat akarunk összehasonlítani az adott rendszerben, és alkalmazunk egy már meglévő, kidolgozott tesztrendszert.



2. ábra. Rotterdam, tengerzáró kapuk, „large-scale” modellezési koncepcióval fejlesztve
Gömbcsapágyak: gömb, tömege $m = 10 \text{ kN}$, átmérője $d = 10 \text{ m} \pm 1 \text{ mm}$, terhelése 350 MN ,
siklási sebesség a kontakt zónában $v = 0,165 \text{ m/min}$) [8]

9. *4.2. ábrán a függőleges tengelyen a súrlódási tényezőt (μ) nem a legcélszerűbb feltüntetni. Ez már számolt, származtatott jellemző. Ugyanakkor a 4.4. ábrán pl. a súrlódási erő (ellenállás) szerepel.*

A 4.2. ábra szakirodalmi hagyomány: a μ változásának bemutatása a súrlódási út (vagy idő) függvényében, ennek tükrében a bejáratás (running-in) és a stabil súrlódás (steady-state) szakaszának értelmezése. Erre a hagyományos ábrázolásra illesztettem a saját vizsgálati rendszerek érvényességi tartományát. (Analog módon, hasonló mérnöki gyakorlat tapasztalható a polimerek szakítóvizsgálatainál is: 99%-ban nem a mért erő/nyúlás ábrázolása történik, hanem feszültség/nyúlás ábrázolás). A 4.4. ábra a súrlódási erőt (ellenállást) mutatja a normál terhelés változásának függvényében, ez irodalmi hivatkozás (disszertáció 9. és 38. oldal), mely a mérési rendszereim jelenségeinek megértését segíti.

10. *A 4.5. ábrán az erőkomponensek (F_x , F_y), valamint a koordináta rendszer értelmezése lényegesen egyértelműbb lenne, egy felülnézeti és egy elölnézeti képen (az „x” sugárirány és az „y” érintőirány).*

Megpróbáltam két nézeti rajz helyett egy axonometrikus ábrázolással érzékeltetni a vizsgálati koordináta rendszert.

11. *...A különböző anyagok súrlódási tényezőjét mutatja be egy-egy ábrán (pl. 4.7. ábra), a szöveges értékelésben pedig a korábban definiált anyagcsoportokra hivatkozik. Az ábrán is jelölni (szemléltetni) kellett volna, hogy mely anyagok, melyik anyagcsoportba tartoznak. A 4.11. – 4.14. ábrákon ez már megtörténik....*

A 4.7. - 4.9. ábrák összegző oszlopdigramok az egyes mérési rendszerekből. Valóban, lehetett volna az egyes anyagok súrlódási tényezőit bemutató oszlopokat a definiált három termék kategóriájának jelzésével is jelölni. Ennek ellenére a rendezés megtalálható az oszlopdigramokban. Az oszlopok felsorolási sorrendje követi a 11.sz. melléklet csoportjait és a benne lévő anyagsorrendet (1. anyagcsoport kezdve PTFE....majd befejezve 3. anyagcsoport PES). A 4.11. – 4.14. ábrák már egy más értékelési rendszer (mechanikai tulajdonságok függvényében elemzett súrlódás) bemutatását szolgálják, ott kiemelt jelentősége van az egyes anyagcsoportok elkülönítésének.

12. a) *..A súrlódási eredményeket bemutató ábrákon az a) rész (a bejáratás) miért „pin-on-plate” rendszeren történik, míg a stabil súrlódási szakasz „pin-on-disc” rendszeren? Miért nem azonos körülmények között (azonos vizsgálati rendszerben) történt a bejáratás mint a stabil súrlódási szakasz vizsgálata?...*

A stabil súrlódási szakasz eredményeinek eléréséhez használt két pin-on-disc rendszer mérései során, az ottani bejáratási szakasz eredményei is rögzítésre kerültek, értékelhetők, de jóval kevesebb információt adnak a részletekről, mint a külön megtervezett és használt dinamikus pin-on-plate. A „steady-state” pin-on-disc mérések hosszabb idejű mérések voltak a VI. vizsgálati kategória szerint, melyeket eltérő terhelési szinteken végeztem. A mérési adatvételek frekvenciája csak 10 Hz volt, a kezelhetőbb és értékelhetőbb adathalmaz érdekében. Nagyszámú előkísérlet vezetett el a bejáratási jelenségek dinamikus pin-on-plate rendszerének kidolgozásához. Meg kellett határozni azt a feltételrendszert, mikor még nem érem el a tranziens állapotot a bejáratás és a stabil szakasz között. A bejáratás dinamikus hatásokkal kiegészített elemzése, az abból levont következtetések olyan információk, melyek a pin-on-disc mérésekkel nem, vagy csak részben érhetőek el. A bejáratás kiemelten fontos a súrlódó rendszerekben, hiszen a mikrogeometriák átalakulása hosszú távon határozza meg a rendszer stabil működését. Ezért a dinamikus pin-on-plate rendszer választása során a polimer-film képződés, a súrlódási tényező változás dinamikája, a gyorsulások alatt bekövetkező inercia hatások mind-mind külön elemezhetőek, melyet támogat a mérőrendszerben beállított jóval nagyobb mérési frekvencia (600 Hz) is. E területen számos hazai és nemzetközi publikációt írtam kollégáimmal, jelen disszertáció korlátaira és célkitűzéseire tekintettel a dolgozatban nem tértem ki a rendszer mély részleteit (pl. egy dinamikus csúszási irányváltásnál, az acél felületét jellemző megmunkálási nyomokon való eltérő irányú áthaladásra milyen válaszreakció mérhető az egyes polimerek részéről) taglaló elemzésre.

b) Milyen módszerrel történt a trendvonal felvétele (4.11.- 4.14. ábrák)? Hogyan történt a felhő kijelölése? Megtörtént-e ezek kontúrjának matematikai definiálása?

A kérdés a mérési eredmények megjelenítéséhez tartozó matematikai értékelésre vonatkozik. A válasz előtt pontosítani kell, hogy a tribológiai rendszerek eredményeit bemutató módszerekre nemzetközileg elfogadott ajánlások vannak [7, I. kötet, 9. fejezet] amit a kutatói gyakorlat követ. Ennek jellemzője, hogy általában trendekkel, sávokkal és területekkel

szemléltetnek jelenségeket. Továbbá a tribológiai mérési eredményekre jellemző a nagy szórás [9], ezért a pontos matematikai definícióknak nincs gyakorlati jelentősége: általában egyenleteket, korrelációs együtthatókat, konfidencia határokat nem tüntetnek fel.

Ezért a dolgozatban én sem emeltem ki e háttér információkat – hiszen a látható tribológiai trendet nem befolyásolja, hogy az R^2 0,9 vagy 0,7 – de a trendvonal-illesztésnél illetve sáv kijelölésnél erre szoftveresen lehetőség volt, és el is végeztem a műveleteket, hiszen ezek alapján fogalmaztam meg a trendekre vonatkozó jelleget (lineáris, exponenciális stb.) a későbbiekben.

A trendvonalak felvételére két szoftvert használtam: Excel és MathLab R 2007/b. A trendvonalak felvételét a szoftverek a Gauss-féle legkisebb négyzetek elvén számolják, illesztik a trendvonalat és számolják a hozzá tartozó R^2 értéket. Az ábrámban értelmezett felhők a mérési eredmények területére vonatkozó konfidencia sávok színes grafikus megjelenítése. A sávok felvételére a MathLab volt alkalmas, általános beállítást alkalmazva, azaz 95%-os valószínűségi szint mellett definiálta a sávokat. Viszont a grafikus megjelenítése gyenge, ezért a sávok színezését és a tartományok lezárását utólag kellett grafikusán elvégezni.

13. 4.11. – 4.14. ábrák: *A súrlódási tényező mért értékei miért mutatnak ilyen nagy mértékű szórást? Ez mivel magyarázható?*

Egy adott polimer anyag vonatkozásában, az ismételt mérések során 10% alatti szóródás adódott a súrlódási tényezőkre, ez tribológiai gyakorlatban jó eredmény, a vizsgálati rendszer reprodukálhatóságát igazolja. Mikor már több polimer anyagot hasonlítok össze egy-egy anyagcsoporton belül, akkor természetesen eltérő eredmények ábrázolása a feladat. Az eltérő súrlódás (akár 40%-os differencia) fő oka pedig az, hogy a különböző polimerek anyagszerkezetükből adódóan más anyagjellemzőket és más súrlódási (tribológiai) viselkedést eredményeznek a kontakt-zónában egy adott tribológiai rendszerben. Erre vonatkozóan a dolgozatban a súrlódás adhéziós és deformációs komponensének szerepét részletesen tárgyalom. Az alap molekulaszervezet által meghatározott mechanikai,- hőtani,- villamos,- tribológiai és energetikai tulajdonságokat pedig tovább befolyásolja a kompozitképzés (szálerősítés, kenőanyagöltés, más polimerrel való társítás).

A fenti tények tükrében, az általam definiált anyagcsoportok tekintetében pont ez az egyik kutatási feladat: a polimer-specifikus súrlódási tényezők alakulásának kutatása, ennek értékelése a mechanikai anyagjellemzők tükrében. Az eredmények értékelését befolyásoló anyagcsoport elkülönítés pedig két jellegzetes siklócsapágy alkalmazási sebességhatár vonatkozásában tapasztalható μ kritérium csökkenés (50% alatti és feletti) alapján történt, a dolgozatban részletesen leírtak szerint.

14. 4.10. ábra: *i., ii., iii., részeinek összevetését nehezíti (és kérdésessé is teszi), hogy a SEM felvételek 25x, majd 130x, végül 500x nagyításúak!*

Igaz, az összehasonlítást nehezíti, de a polimer film szerkezetét jobban kiemeli az 500X nagyítás.

15. a) 4.12. ábra: *A szakadási nyúlás (eb) és a súrlódási tényező (m) kapcsolatát igen nehéz értékelni, amikor a mérési pontok között a μ értékében több mint 40%-os eltérés is látható! Így levonható-e bármiféle következtetés a trendre vonatkozóan?*

Megítélésem szerint igen, hiszem a mintaszám elegendően nagy (11 és 8 db anyag az 1. és 2. anyagcsoportban), de a tribológiai gyakorlatot követve nem tüntettem fel a trendvonal korrelációs együtthatóját és egyenletét, mert R^2 0,7 – 0,8 esetén nincs jelentősége az egyenletnek. Ennek ellenére a folyamat, a kapcsolat feltárható a trend-ábrázolással. Kontrollként elvégeztem az elemzést úgy, hogy a mintából kivettem a legnagyobb és legkisebb értékeket. Ugyanolyan trendvonal (de más egyenlet és R^2) adódott abban az esetben is.

b) Mit jelent az értékelésnél „a kontakt zónák jelentősen eltérő változásaiból adódóan, az adatok szórása miatt” indokolás? Ezzel magyarázná a nagy szórást? Nem inkább az a helyzet, hogy a súrlódási tényező adott mechanikai jellemzőtől való függése nem jellemző, „véletlenszerű”?

A 13. és 15/a válaszokkal összhangban: a mért súrlódási eredmények a kontaktzónák adhéziós és deformációs jelenségeinek eredője. A jelentősen eltérő molekula szerkezetek (adhéziós

hajlam), a kontaktzóna mechanikai viselkedése (pl. alakváltozási képessége, keménysége) együtt eredményezi a tapasztalt súrlódási tényezőket. A mért 21 különböző polimer esetén ez jelentős szóródást mutat, természetesen. Ha ezeket a súrlódási eredményeket ábrázolom az anyagokhoz tartozó különböző mechanikai jellemzők tükrében, akkor a következtetés attól függ, mire vonatkoztatom. Egyben kezelve a 21 anyagot nehéz bármiféle kapcsolat megfogalmazása.

De, létezik olyan mérnöki szempont – erről szól a dolgozat – mely alapján elkülönített jellegzetes anyagcsoportok esetén van kapcsolat a súrlódás és bizonyos mechanikai tulajdonságok között, a jelenség nem véletlenszerű. A trendek ismerete a mérnöki gyakorlatba ültethető.

16. 46. oldal: *A súrlódási tényező és a rugalmassági modulus lineáris kapcsolatára tett megállapítás nehezen olvasható ki a mérési eredményekből. „Az összefüggés a rendszer terhelési szintjével változik.” megállapítás korrekt módon nem értelmezhető.*

Pontosítanom kell a megfogalmazásomon. A súrlódási tényező és rugalmassági modulus vonatkozásában a két terhelési szinten ($p_v = 0,8$ és 2 MPa·m/s, „b” és „c” ábrák) történt pin-on-disc mérések eredményeit az 1. és 2. anyagcsoportnál is lineáris trendvonalal tudtam jellemezni. A $p_v = 0,8$ MPa·m/s mérési rendszerben a 2. anyagcsoport trendvonala közel zéró meredekségű, ez a p_v szint emelésével pozitív iránytangensű lesz. Az 1. anyagcsoport esetén a $p_v = 0,8$ MPa·m/s mérési rendszerben a lineáris trendvonal pozitív iránytangensű, de a terhelési szint növelése csökkenti azt, közel zéró iránytangensűre.

17. Kérdésem: *mivel cáfolható az az állítás, hogy a „mért” súrlódási tényező nem a vizsgált egyetlen anyagjellemzőtől (mechanikai jellemzőtől, σ_y , ϵ_b), hanem leginkább a konkrét polimer kompozit anyagától függ? Vizsgálta-e pl. az anyagjellemzők együttes (kölcsonös) hatását, vagy a keresztthatásokat?*

Nem kell cáfolni, több ezer irodalmi oldal ismerteti azt a tényt, hogy a polimer kompozit anyaga nyilvánul meg a kontaktzónában. De a kontaktzóna anyagtulajdonságai átalakult jellemzők, ritkán egyezik meg a tömbi anyag jellemzőivel. Az átalakulás és az ebből adódó anyagviselkedés a tribológiai rendszer jellemzője. Ezért bír jelentőséggel a valós gépelem

működésének tribológiai feltételrendszere, annak minél pontosabb modellezése. Van tehát egy átalakult tulajdonsággal bíró kontaktzónánk - Berthier értelmezésében [10] „third body” - rendszerjellemező súrlódási, kopási jellemzőkkel, melyet az alapanyag tulajdonságaihoz viszonyíthatok.

Ismert, hogy a súrlódási és kopási eredményeket nemcsak egy szempont alapján, hanem akár két független változó szerint is meg lehet jeleníteni (pl. 3D kopás térképek szerkesztése [7]), sőt képzett mutatókkal további keresztthatások is tanulmányozhatók. A tribológia gyakorlatában elterjedt pl. a kopási eredmények értékelése H/E vagy E/H viszonyszám alapján, mely dimenzió nélküli jellemzőként definiálható (amennyiben a keménység N/mm^2). Volt korábban olyan kutatási projektem, ahol ilyen tribológiai értékelést is végeztem, de a dolgozatban bemutatott alap-értékelések után (21 polimer vonatkozásában) a területi korlátok miatt erre már nem tértem ki. A mérési adatbázis és szoftverek ezt az értékelést bármikor lehetővé teszik a továbbiakban.

18. *A kutatás összefoglalásában azt írja, hogy lineáris, logaritmus és exponenciális összefüggések feltárására került sor. Ezek nem jelennek meg sehol az értekezésben!*

A tribológiai szakirodalommal, illetve a korábbi válaszokban leírtakkal összhangban, a trendekre nem írtam fel az egyenletet és R^2 -et. Ennek ellenére a trend-függvény típusa az adatfeldolgozásból kinyerhető információ, rendelkezésre áll, melyet most pótlók:

4.11. ábra, a polimerek folyáshatára és a súrlódási tényezők kapcsolata

a) ábra: trendvonalak hatványfüggvénnyel, $y = a \cdot x^b$

b) és c) ábra: trendvonalak lineáris közelítéssel, $y = a \cdot x + b$

4.12. ábra, a polimerek szakadási nyúlása és a súrlódási tényezők kapcsolata

a) ábra: trendvonalak logaritmus függvénnyel, $y = a \cdot \ln(x) + b$, illetve lineárisal

b) és c) ábra: trendvonalak lineáris közelítéssel, $y = a \cdot x + b$

4.13. ábra, a polimerek rugalmassági modulusa és a súrlódási tényezők kapcsolata

a) ábra: trendvonalak másodfokú polinom függvénnyel, $y = a \cdot x^2 + bx + c$

b) és c) ábra: trendvonalak lineáris közelítéssel, $y = a \cdot x + b$

4.14. ábra, a polimerek Shore D keménysége és a súrlódási tényezők kapcsolata

a), b) és c) ábrákon lineáris trendvonalak

19. *57. oldal: A „pin-on-disc” mérési rendszerben a függőleges elmozdulás a deformáció és a kopás együttes eredménye, amelyet együtt kezel és megengedhető egyszerűsítésként kopásnak nevez. A deformáció nem lett volna kimérhető, vagy éppen számolható külön is? Miért nem tette meg?*

Igen, rendszerjellemző a pin-on-disc méréseknél, hogy a kopás mérésére kidolgozott, érintésmentes szenzor a terhelésből adódó deformációkat is érzékeli a kopásból adódó méretváltozás mellett. Van módszer egyébként a deformáció különválasztására, ezt Zsidai László végzett doktoranduszom PhD dolgozatában [11] részletesen bemutatja. Mivel a célkitűzéseimben nem abszolút kopás meghatározására törekedtem, hanem azonos alapanyagok esetén történő összehasonlításra a natúr és NPIII kezelt felületek esetén, a következtetéseimet nem befolyásolta, hogy a kopás mellett a deformációt is méri a szenzor. A 10 mm átmérőjű korong próbatestek 0 – 2 MPa terhelése szintén elhanyagolhatóvá tette a deformáció kiemelését. Ha a méréseket pl. 20-50 MPa normálterhelés intervallumban végeztem volna, akkor a deformációt már nem hanyagolhattam volna el, és külön ki kellett volna mérnem vagy számítanom. De az előkísérletek szerint a NPIII kezelt felületek potenciális munkatartománya jóval kisebb terheléseket tesz csak lehetővé.

20. *A nedvesítő képesség és a felületi energia kérdése és változtatása a PETP anyag esetén is felmerült, mégsem került ott olyan részletes tárgyalásra, mint a PA6 esetén. Miért??*

A PETP és UHMW-PE vonatkozásában az MTA KKI-ben jelentős kutatások folytak az elmúlt évtizedben Dr. Bertóti Imre és Dr. Tóth András vezetésével. Az UHMW-PE anyagokkal kapcsolatban, a csípőprotézisek kopásállóságát javítandó, szabadalmaztatták az NPIII eljárással módosított implantátum készítést. Mindemellett a PETP műszaki műanyaggal is történtek kísérletek [12] és karcállóságra vonatkozó mérések. 2007-ben az MTA KKI munkatársaival közösen szabadalmaztattuk: „Eljárás oxigén és/vagy halogén heteroatomot tartalmazó, hőre lágyuló műszaki műanyagok mechanikai és tribológiai jellemzőinek javítására. Magyar Szabadalmi Hivatal: P0700129” Ez lett az alapja a tribológiai kutatások tárgyává tett PETP és PA6 műszaki műanyagoknak.

Az általam vezetett tribológiai programban a PETP méréseit végeztük először. pl. a cseppelemzést. A dolgozat 57. oldala tartalmazza a PETP cseppelemzési eredményeit, de nem dokumentáltuk annak idején a részleteket [13] olyan mélységben (pl. nem készítettünk fotókat

a csepp-próbáról), mint azt a későbbi poliamid 6 kísérletek esetén tettük. Ennek oka az, hogy a PETP mérési eredményeinek értékelése után jöttünk rá a felületi energia változás domináns szerepére, így az Owens-Wendt módszert és a csepp-próbák fotóit már a PA6 kapcsán részletesebben tárgyaltam.

21. *Mi az oka, hogy az alkalmazott csúszási sebesség PA6 esetén ilyen kicsi ($v=0,05$ m/s) volt?*

Az előkísérletek és a tervezett alkalmazási célterület indokolta. Előkísérleteknél tapasztaltuk, hogy a módosított felület nagyobb energiája a száraz csúszást acél ellenében rontja, és a tized-mikron vastagságú módosított réteg kopásállósága rendkívül érzékeny az alkalmazott $p \cdot v$ szintre. Ezért állítottunk be a folyamatok tanulmányozására $p \cdot v = 0,025 - 0,1$ (MPa·m/s) kis $p \cdot v$ értékeket, alacsony siklási sebességet. A potenciális célterület lehet a kis terhelésű polimer/polimer csúszókapcsolatok módosítása, vagy kent tribológiai rendszerek (mint pl. csípőprotézis) javítása ipari területeken, mint a finommechanika, mechatronika, aktuátortechika egyes mozgó elemei.

22. *Sajnálatos, hogy a tribológiai jelenségekkel kapcsolatosan szinte egyetlen „saját” összefüggést sem ír fel. Nincs ezeknek matematikai leírási lehetősége, fizikai magyarázata, amely szintén leírható lenne valamilyen módon?*

De, meg tudok fogalmazni, de a disszertációban nem az volt a célom. Az új tudományos eredmények, összefüggések bemutatását és a gyakorlati mérnöki munkát segítő számítások kibővítését szétválasztottam. Az 5. fejezet kopási diagramjainak egy-egy szakaszára pl. alkalmazhatom a jól ismert Archard-féle összefüggést, amikor a kopási térfogatot a :

$$V = k \cdot A_f \cdot L \text{ (vagy a } k \cdot F_n \cdot H^{-1} \cdot L \text{) összefüggéssel}$$

írom fel. A kísérleteimből a rendszerben érvényes „k” kopástényezőt meghatározhatom, mely a tribológiai adatbázisok szélesítését, gyakorlati kiterjesztését fogja jelenteni.

23. *Így az a kérdés, hogy hogyan használhatók az eredmények a műszaki gyakorlatban, mindvégig megválaszolatlan marad. Vagy nem ez volt az egyik lényegi célkitűzés?*

A 100 oldal terjedelmi korláton belül részletesen nem tudtam kifejteni, hogyan történik a gyakorlati hasznosítása a kutatási eredményeknek. A radiális és lineáris siklócsapágyak tervezésének alapjait és sajátosságait említettem a 3. válaszpontban. Nagyszámú műszaki műanyag gyártói adatbázisára alapozva egy szoftver fejlesztése van folyamatban (EDOQ – Electronic Database of Quattroplast), mely a hagyományos méretezésen túl tartalmazza a 4. fejezet súrlódási ábráit, valamint az azokhoz a mérésekhez tartozó kopási ábrákat, melyek bemutatására a disszertációban nem volt lehetőség. Az anyagválasztás szempontjából többesélyes műszaki megoldások így tribológiai szempontok alapján tovább optimálhatók. Ha egy új műszaki műanyag kerül a gyakorlatba, de nincsenek meg a részletes tribológiai információk róla, akkor az általam javasolt anyagcsoportokba való besorolás után, a mechanikai tulajdonságok ismeretében, a trendfüggvényeim alapján valószínűsíthető pl. a súrlódási viselkedése. Ez a későbbiekben akár pár méréssel is igazolható, nem kell teljes tribológiai mérésorozatot végezni.

Az EDOQ tehát egy mérnöki tervezést segítő, moduláris felépítésű programcsomag, mely 80%-ban már működik. Összehasonlíthatók a benne lévő műszaki műanyagok súrlódási és kopási szempontokból, elemezhetők a mechanikai tulajdonságok tükrében, új polimer esetén előrejelzésre ad lehetőséget.

24. *...fontos lett volna a nyugvásbeli súrlódási tényező (μ_0) alakulását is vizsgálni, ugyanis ennek rendkívüli a jelentősége, az indítási és fékezési folyamatok tekintetében.*

Igen, egyetértek. Ez a csapágytechnika egyik kiemelt területe a nagyterhelésű, kis siklási sebességű ágyazásoknál. Ez a terület a „stick-slip” kutatás. A már említett „large-scale” projektben, az irányváltási pontokban mértük a statikus súrlódási tényezőt, így a híd dilatáció modellezéssel az egyes konstrukciós megoldások akadó-csúszási veszélyét is modellezni tudtuk. Ez egy olyan önálló kutatási terület, ahol azt szeretnénk elérni, hogy a statikus súrlódás kisebb legyen, mint a mozgásbeli. Ezen kutatási tevékenységem eredményeit nem tudtam a disszertáció vezérfonalához integrálni sem tartalmában sem kiméretében, ezért kihagytam.

25. Tézisek észrevételei.

Kutató munkám filozófiája az volt, hogy valós gépelemek (pl. siklócsapágyak), konstrukciók tribológiai szempontok alapján javíthatók lehessenek, a műszaki megbízhatóság és súrlódási/kopási élettartam optimális legyen. A valós gépelemek üzemi körülményeinek a feltárása alapján laboratóriumi méréseket terveztem úgy, hogy eddig ismeretlen tribológiai információkat, összefüggéseket tárjak fel a kiválasztott anyagokról. Ezeket az eredményeket visszaültemtem úgy a mérnöki gyakorlat számára is értelmezhető formában a tervezői segédletekbe, hogy súrlódási és kopási szempontból is ideális mérnöki megoldás születhessen. Ennek a koncepciónak a része a dolgozatban bemutatott vizsgálati rendszerfejlesztés, az anyagcsoportok célszerű megalkotása, a trendek feltárása, a tudományos tézisek megfogalmazása.

A tézisekre vonatkozó részletes rendszer-körülhatárolást a fenti válaszokban megtettem, ami a dolgozatban leírtak további kifejtése. A tézisek rövid megfogalmazásánál a peremfeltételek újbóli részletes kifejtésétől eltekintettem (az összetettségük és a modellalkotás többlépcsős gondolatmenete miatt), de remélem válaszaimmal sikerült egyértelműbbé és elfogadhatóbbá tenni azokat.

Köszönöm Dr. Szendrő Péter professzor úrnak értekezésem támogatását, és tisztelettel kérem a bírálataira adott válaszaim elfogadását.

Kalácska Gábor

Irodalmi hivatkozások

[1] DIN 50322 (1986). Kategorien der Verschleißprüfung, Deutsche Norm 50322, Beuth Verlag.

[2] DSM EPP (1998) CAMSAD, Ccomputer Aided Material Selection and Design. Tielt, Belgium. CD.

- [3] DeBruyne F. (1999): Technical training on engineering plastics. International training course, DSM EPP, Tiel, Belgium.
- [4] Kalácska G. (ed) (1997): Műszaki műanyagok gépészeti alapjai. Minerva-Sop Kiadó.
- [5] Kalácska G. (ed) (2007): Műszaki polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban. 3C-Grafika Kiadó.
- [6] Walter Michaeli (2000): Training in Plastics Technology. Hanser Publisher. Munich. ISBN1569902933, 9781569902936
- [7] Bhushan B. (2001): Modern Tribology Handbook. Volume One. CRC Press LLC. ISBN 0-8493-8403--6
- [8] DeBates P. (2005): Tribotesting at Laboratory Soete, University Gent. TÉT Workshop presentation, Szent István University, Gödöllő
- [9] McKeen L.W. (2009): Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers, 2nd Edition, W.A. Publisher, ISBN-10: 0080964508
- [10] Berthier Y. (2001): Background on friction and wear. Handbook of Materials Behaviour Models, Chapter 8, Lemaitre Academic Press, 2001, pp 676-699.
- [11] Zsidai L. (2005): Műszaki polimerek tribológiai kutatása különböző rendszerekben. Doktori (Ph.D.) értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő.
- [12] Kereszturi K., Tóth A., Mohai M., Bertóti I. (2008): Surface chemical and nanomechanical alterations in plasma immersion ion implanted PET. Surface and Interface Analysis, 40, pp 664-667.
- [13] Kalácska G., Zsidai L., Kereszturi K., Mohai M., Tóth A. (2009): Sliding tribological properties of untreated and PIII-treated PETP. Applied Surface Science, 255, pp 5847-5850.