

Kalácska Gábor:

„Polimer gépelem-anyagok tribológiai jellemzése” című akadémiai doktori értekezésének  
bírálatá

## 1. Témaválasztás

Az utóbbi évtizedekben és különösen az ezredfordulót követő időszakban jelentősen felgyorsult az a folyamat amely a fémes anyagok mellett egyre-inkább számol a különböző polimer kompozitok (továbbiakban polimerek) gépszerkezet alkalmazási lehetőségeivel. Ez egyrészt az anyagtudomány és a gyártástechnológia fejlődésének köszönhető, hiszen a polimerek kedvező tulajdonságai: anyagszerkezetük növekvő terhelést elviselő homogenitása, időtállósága, továbbá kiváló szilárdsági, kopási, súrlódási paraméterei, nem kevésbé pedig jó árfekvésük eredménye. Másrészt a gépépítés nagy teljesítményekhez tartozó magas élettartam, alacsony energetikai veszteségek iránti igénye által determinált jelenség. Ugyanakkor a polimer fém, polimer-polimer anyagpárosítással kialakított, kent és önkenő megoldású súrlódásnak kitett gépelemek tervezéséhez hiányosak a megbízható szilárdsági és tribológiai alapadatok. Ilyen értelemben tehát, a szerző témaválasztása mindenképpen időszerű és dicséretes.

A disszertáció címe anyagjellemzők megállapítására utal, és bár helyesebb lenne úgy fogalmazni, hogy: ipari felhasználású polimer kompozitok szilárdsági és tribológiai jellemzése, fedi a munka tartalmát. Jóllehet miután a doktor jelölt gépészmérnök („nem kevésbé jelen bíráló is az, aki még ráadásul a gépelemek, a gépszerkezettan kutatója, gyakorlott tervező és oktató”) 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. Így a doktor jelölt egyébként értékes alaptudományú munkássága valóban segítené a gépelem-anyagok tribológiai viselkedésének megértését és tulajdonságainak tervezési számbavételét. Vagyis, akár a vizsgálatok horizontális szűkítése (kevesebb anyagfajta kísérletbe vonása) árán is, a vertikális mélyítése (az eredmények elméleti- fizikai magyarázata és validálása) révén nagyban növelné a doktori munka értékét.

## 2. A disszertáció felépítése, formai megjelenítése és stílusa

Az értekezés jól átgondolt, szép kivitelezésű, jó stílusú, olvasmányos munka. Belső arányai, fejezet kiméretei elfogadhatóak, bár az egyébként értékes és hiányt pótló szakirodalmi áttekintés a dicséretesen szűkre szabott terjedelemben (nettó 96. oldal) képest kissé túlméretezett. Ugyanakkor a saját munkásságot taglaló részekben is vissza-vissza tér a terjedelmes forrás összevetés ami már ugyancsak nem szerencsés.

A további 2.,3. és 4. fejezetek sorrendje, terjedelme mondanivaló-arányos és jól illusztrált. Nem jó megoldás azonban a mintegy 40 oldal terjedelmű 5. fejezet különállása és mini disszertációkénti kezelése. Az újbóli cél-meghatározástól az ismételt tézis megfogalmazásokig. Való igaz, hogy itt kezelésnek kitett polimerek vizsgálatáról van szó, de az alapvető cél, a tribogiai jelenségek feltárása nem változik. Így az 5. fejezet előzőekbe építésének nem lett volna akadálya. Ezzel a dolgozat íve sem tört volna ketté, legfeljebb a fejezetek terjedelmén és tagolásán kellett volna változtatnia a szerzőnek.

A szűkszavú egy oldalas 6. fejezet az eredmények hasznosítása helyett, inkább az adatok használatának felsorolását és a további munkálatok kijelölését tartalmazza. Itt lett volna nagy jelentősége a modell vizsgálatok validációjának. Ez jelentős részben, ha az adatösszevetés is megtörténik, a szerző tanszékén készült és általa mentorált PhD doktori értekezéseket bemutató mintegy 20 oldalnyi terjedelmű mellékletben szerepeltetett posztereken feltüntetett adatok disszertációba emelése révén is megvalósítható lett volna.

A 7. fejezet Kalácska Gábor témakörben megjelent színvonalas publikációit szedi időrendbe. Ez, jóllehet önálló szerzőként csak három publikációt jegyez, a sok első és levelező szerzős művet is tekintve összességében kiváló teljesítmény a műszaki tudomány körében.

A mellékletek sora a felhasznált irodalom felsorolásával kezdődik. Ez igen jól szerkesztett, precízen hivatkozott, értékes összeállítás.

A következő melléklet a köszönetnyilvánítás, amely sokkal inkább a disszertációba illő, mint az annak első oldalaként szerepeltetett jelölési jegyzék, vagy az utolsó oldalon (a 8. fejezetben) közölt kutatást támogató programfelsorolás. Ha már itt szóltam a köszönetnyilvánításról meg kell jegyezni: hiányolom, hogy a disszertáció készítője nem emlékezik meg köszönettel első mesteréről, tanáráról, aspiráns vezetőjéről, tanszékvezető elődjéről Beer György professzor emerituszról. Valószínűleg ez nem szándékos, és a védésen szóban még pótolható.

A további mellékletekről nem szólok, fentebb már említettem néhányuk disszertációba emelésének indoklását.

Összességében megállapítom, hogy a disszertáció formai szempontból megfelel az MTA doktori szabályzatában előírt feltételeknek és így alkalmas az abban kifejtett szakmai tartalom megjelenítésére.

### **3. Tartalmi észrevételek**

Előrebocsájtva, hogy az értekezésben összefoglalt kutatómunkát igen értékes, eredményes, továbbá disszertábilis tevékenységnek ítélem, a következőkben megjegyzéseimet kifogásaimat és kérdéseimet jobbító szándékkal fogalmazom meg a dolgozat felépítésének logikája és nem az észrevételek súlya szerinti sorrendben. Ahol ez lehetséges, mindenütt megadom az oldalszámot is.

#### **Bevezetés, célkitűzések**

- A célkitűzések szerint „a gyakorlati feltételrendszerek modellezésével” kívánja a szerző a súrlódási folyamatokat elemezni. 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.

-

#### **Szakirodalmi alapok**

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

- 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?  
Végül megállapítom, hogy a szakirodalmi fejezetek végén található összefoglalások hasznosak, jó információt adnak arról, hogy melyek a jelölt kutatási elképzelései.

### **A tribológiai modellrendszer fejlesztése**

- 30. oldal: A 3.4 ábrán azt hiányolom, hogy a lehetséges vizsgálatok nincsenek a 2.5. táblázat (22. oldal) kopásvizsgálati kategóriáinak megfelelően csoportosítva és jelölés sem található az azonosíthatóságot illetően. Az ott megadott kategóriák közül nehezen követhető, hogy melyik vizsgálati kialakítás, melyik kopásvizsgálati kategóriába tartozik.
- 31. oldal: 3.4. Következtetések: 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 igénybevételének közelítését?  
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 műszaki polimerek súrlódása**

- 37. oldal: 4.2. ábrán a függőleges tengelyen a súrlódási tényezőt ( $\mu$ ) nem a legcélszerűbb feltüntetni. Ez már számolt, származtatott jellemző. Ugyanakkor a 4.4. ábrán pl. a súrlódási erő (ellenállás) szerepel.
- 39. oldal: 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).

### **Az eredmények értékelése**

- 41. oldal: 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 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?

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

- 4.11. – 4.14. ábrák: A súrlódási tényező mért értékei miért mutatnak ilyen nagy mértékű szórást? Ez mivel magyarázható?
- 4.10. ábra: i., ii., iii., részeinek összevetését nehezíti (és kérdéssé is teszi), hogy a SEM felvételek 25x, majd 130x, végül 500x nagyításúak!
- 4.12. ábra: A szakadási nyúlás ( $\epsilon_b$ ) és a súrlódási tényező ( $\mu$ ) kapcsolatát igen nehéz értékelni, amikor a mérési pontok között a  $\mu$  értékében több mint 40%-os eltérés is látható! Így levonható-e bármiféle következtetés a trendre vonatkozóan?

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”?

- 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.
- A 4.13. ábra b), ill. c) részén a mérési pontok között alig tapasztalható eltérés. A könnyebb összevethetőség érdekében, jó lett volna, ha a két ábrán a  $\mu$  tengely skálázása azonos.

A levont következtetések még a trendekre vonatkozóan is csak nagyon „óvatos” becslések. Kérdésem: mivel cáfolható az az állítás, hogy a „mért” súrlódási tényező nem a vizsgált egyetlen anyagjellemzőtől (mechanikai jellemzőtől,  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_b$ ), hanem leginkább a konkrét a polimer kompozit anyagától függ? Vizsgálta-e pl. az anyagjellemzők együttes (kölsönös) hatását, vagy a keresztthatásokat?

- 51. oldal: A kutatás összefoglalásában azt írja, hogy lineáris, logaritmus és exponenciális összefüggések feltárására került sor. Ezek nem jelennek meg sehol az értekezésben! A bevezetőben említett gyakorlati alkalmazhatóság a kísérleti

eredményekből nem vezethető le egyértelműen. Hiszen ezek is modell kísérletek. Miért adnának több információt a konkrét konstrukciós alkalmazásokhoz. (A szerző maga is említi kritikaként ezt a szakirodalmi és a bevezető részben a modell-kísérletekre vonatkozóan).

### **Ioninplantációval kezelt műanyagokra vonatkozó vizsgálatok**

- 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?
- 60-69. oldal: Aránytalanul (az egész dolgozathoz viszonyítva) nagy terjedelmet szentel a hővezetési és hőátadási jellemzők elméleti és méréssel történő meghatározásának. Kétségtelen, hogy ezzel jól magyarázható, hogy miért viselkednek a hőmérséklet szempontjából eltérően a kezelt felületű anyagok, mégis kissé túlzott az a terjedelmes részletezés.
- 74-75. oldal: A PA6 implantációja esetében, mivel a módszer a PETP-nél ismertetettel azonos volt, elegendő lett volna csak a kezelésre vonatkozó adatokat megadni.
- 75. oldal: 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??
- 76. oldal: Mi az oka, hogy az alkalmazott csúszási sebesség PA6 esetén ilyen kicsi ( $v=0,05$  m/s) volt?
- 90-91 oldal: Célszerű lett volna diagramban összehasonlítani a száraz, a vízkenéses, és az olajkenéses kifuttatásos súrlódási állapotokat.

### **Összegzés:**

A jelölt kiváló felkészültséggel széleskörű szakterületi tájékozottsággal, dicséretes tárgyi és személyi bázison, egy jelentős témában szerteágazó, korrekt vizsgálatokat végzett. Számos mérés és vizsgálat történt, amelyek eredményeit két dimenziós (itt jegyzem meg, hogy egy harmadik dimenzió, vagyis az idő tekintetében sokszor igen erős a hiányérzetem) közelítő függvényekkel (miután az összefüggések többé-kevésbé sztochasztikusak jó lett volna a konfidencia intervallumokra is kitérni) ábrázolja. Ezt követően elismerésre méltóan törekszik a jelenségek szöveges magyarázatára (általában a szakirodalmi háttérre hivatkozva teszi ezt). 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?

A szerző a bevezetésben helyesen hangsúlyozza azt, hogy a vizsgált tribológiai rendszerek nagyon egyedi módon viselkednek és a rendszer felépítése befolyásolja az eredményeket. Ezért a kisminta (modell) kísérletek csak nagyon szűken értelmezhető eredményeket adnak. A jelölt sem tehet nagyon mást és az esetek többségében Ő is ilyen kísérleteket végez. Ezek viszont sajnos nem, vagy nagyon korlátozottan terjeszthetők ki, adott konstrukciós alkalmazásokra. Így az a kérdés, hogy hogyan használhatók az eredmények a műszaki gyakorlatban, mindvégig megválaszolatlan marad. Vagy nem ez volt az egyik lényegi célkitűzés? E tekintetben fontos lett volna a nyugvásbeli súrlódási tényező ( $\mu_0$ ) alakulását is vizsgálni, ugyanis ennek rendkívüli a jelentősége, az indítási és fékezési folyamatok tekintetében. Mindez természetesen semmit nem von le a munka értékéből, vagyis az ipari polimer kompozitok műszaki – mechanikai jellemzésének eredményeiből. De mindenképpen kijelöli Kalácska Gábor további kutatásainak irányát, melyhez jelen munkássága kiváló alapul szolgálhat.

#### **4. A tézisekben megfogalmazott tudományos eredmények értékelése.**

51. oldal.

1. Célra törőbben, tömörebben megfogalmazva, az adott vizsgálati eljárásra vonatkoztatva elfogadom.
2. Elfogadom, amennyiben kiegészül az eljárási peremfeltételek rögzítésével.
3. A részletes bírálat során feltett kérdéseimre adott meggyőző válaszok esetén elfogadom.

93. oldal: Kizárólag a modellkísérletekre vonatkoztatva, a hatályosság és a paraméter-reprodukálhatóság peremfeltételeinek megadása esetén

1. elfogadom
2. elfogadom

## **5. Összegzés**

Az értekezés önálló, értékes és új tudományos megállapításokat is tartalmazó igényes munka. Mindezek alapján a disszertáció nyilvános vitára tűzését, és eredményes védelem esetén az MTA doktora cím odaítélését javaslom.

Gödöllő, 2014. január 6.

Prof. Dr. Szendrő Péter

MTA doktor