

VÁLASZOK

Dr. Belina Károly professzor úr bírálatában megfogalmazottakra

Köszönöm az értékes bírálatot, a megfogalmazott kérdésekre az alábbi válaszokat adom:

1. Érdekes lett volna egy viszonylag alacsony üvegesedési hőmérsékletű amorf polimer (pl. polisztirol vagy poli(metil-metakrilát)), és egy magas üvegesedési hőmérsékletű amorf polimer (pl. poliimid) vizsgálata is. Történt esetleg ilyen jellegű vizsgálat?

Az amorf polimerek közül a PES, PEI és PSU anyagokat vizsgáltam tribológiai viselkedés szempontjából. Ezek közül a csak a PEI és PES kerültek be az értekezésbe, mert a PSU vizsgálatára nem az előzőekkel azonos feltételek között került sor. Így a PSU-t kihagytam a dolgozatból. E három anyag kiválasztását az amorf szerkezetűek közül - a dolgozatban leírtakkal összhangban – a jelenlegi mérnöki gyakorlat is igazolja. Az amorf anyagok alkalmazása súrlódó rendszerekben nem szerencsés, mivel kopásállóságuk közismerten gyenge, de a PSU, PES, PEI előfordul élelmiszeripari feldolgozás gépelemeiként (pl. szelepek mozgó alkatrészeként), amelyeknek ki kell bírni a gőz-sterilizálást is.

Napjainkban a nagy terhelésű súrlódó gépelemek tervezése és gyártása már sem polisztirolból, sem PMMA-ból nem jellemző, hacsak ezt valami különleges igény nem indokolja. A hőre lágyuló amorf PS-t már az 1930-as években is használták, ezek modern változatait, az ütészálló kopolimereket (pl. ABS és SAN) nem tribológiai célokra használják. Így az általam végzett tribológiai kutatásokba sem a sztírol termékeket, sem a PMMA-t nem vontam be.

A poliimid tribológiai vizsgálatára vonatkozó kérdésével egyetértek, hiszen egy magas hőállóságú, korszerű műszaki műanyagról van szó, melynek több kompozit változata is létezik a natúr polimer (pl. Vespel SP-1 vagy Tecasint 1011) mellett, amelyek kimondottan tribológiai igénybevételek kielégítésére alkalmasak. Esetükben jellemző a 15 – 40 m% közötti grafit, MoS₂ és PTFE adalékolás variálása, a hibridizálás. Van olyan megfordított arányú termék is, ahol a PTFE alapmátrixba adalékolnak PI részecskéket.

Ezen anyagok vizsgálata tervbe van véve, de a rendkívül magas beszerzési árak miatt eddig még nem került rá sor.

2. „Folyáshatár” vs „nyakképződés” értelmezése.

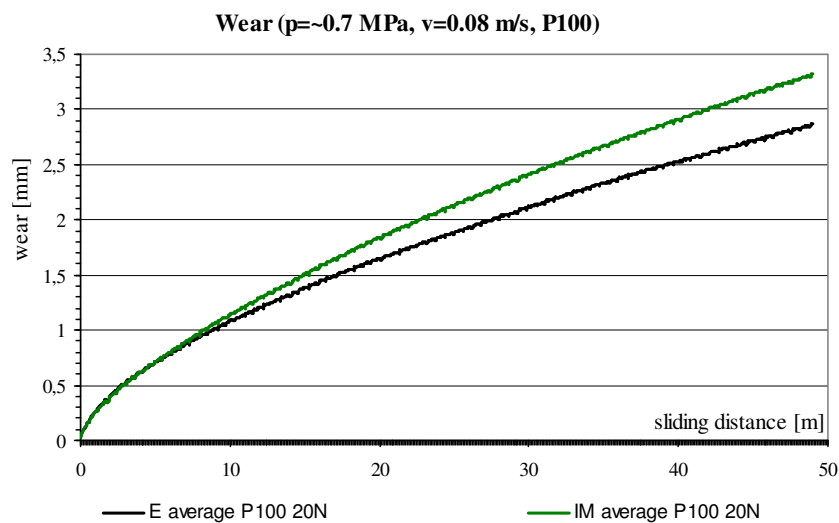
Az észrevételt elfogadom, mely anyagszerkezeti megközelítésből értelmezi a szakítóvizsgálat során fellépő jelenséget. Én a gépészmérnöki gyakorlatban használt elnevezést használtam - folyáshatár (σ_y) -, a műanyagok szakítóvizsgálatára vonatkozó MSZ EN ISO 527-1 (magyar nyelvű szabvány 1999-ből, angol nyelvű 2012-ből) szabvány alapján.

3. Orientáció szerepe:

Ezek alapján óhatatlanul felmerül az a kérdés, hogy ezek a jelenségek mennyiben befolyásolják a makromolekuláris anyagok tribológiai viselkedését? A kristályszerkezet szempontjából az is lényeges, hogy az olvadáspont, pontosabban az olvadáspont intervallum változása, illetve a kristályossági fok mekkora szerepet játszik a pv határérték változásban? Van-e arra vonatkozóan tribológiai tapasztalata, hogy az orientáció befolyásolja a súrlódást és/vagy a kopásállóságot?

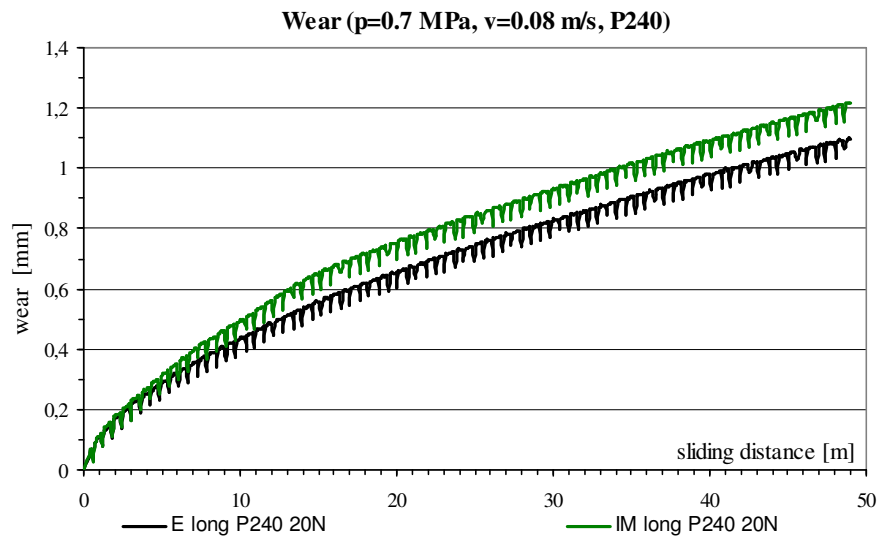
Az orientáció értelmezhető a makromolekulákra, illetve a töltő, erősítő anyagokra egyaránt. A polimeres szakkönyvek részletesen tárgyalják az orientáció jelenségét (mag-héj effektus) [1] [2] [3]. Főleg kompozit anyagok gyártása esetén fontos a jelenség ismerete, hiszen a technológiai elemek felületén létrejövő, áramlást módosító hatás (súrlódás, belső nyírás) orientált, azaz anizotróp tulajdonságú zónát hoz létre. Az anizotróp viselkedést jól szemléltetik a mechanikai jellemzők, mint pl. a különböző irányokban mérhető húzó és nyíró szilárdság. A mag-héj effektus natúr polimerek esetében is kimutatható, még öntött poliamid rudaknál is tapasztalható a jelenség (nemcsak extrudáltaknál), mely összefügg az eltérő kristályossági fokkal is. Ez hasonlóképpen technológia-függő, mert a polimerizáció hőegyensúlya, a termék hűlése (hűtése), jellemző méretei nagyban befolyásolják a végeredményt. Így az orientált óriásmolekulák és orientált töltő és/vagy erősítő anyagok más anyagjellemzőket eredményezhetnek a héjzónában a maghoz képest. Logikus, hogy ennek jelentkeznie kell a tribológiai tulajdonságokban is, elsősorban a kopásállóságban. Ha a kopásállóságot úgy értelmezzük, mint a mikrogeometria mechanikai ellenállását a felületi részecskék leszakító hatásaival szemben, akkor az orientáció hatásának jelentkeznie kellene a kopásállóságban is.

Ilyen jellegű, összehasonlító tribológiai méréseket végeztem a közelmúltban, mikor fröccsöntött és extrudált PA66 kompozitok (Pa66/MoS₂) kopásállóságát kutattam abrázíós (1-2. ábra) és adhéziós (3-4. ábra) súrlódó rendszerekben. Azonos receptúrával, de eltérő gyártástechnológiával előállított kompozit termékekből forgácsolt próbatesteket vizsgáltam, ahol az extrudált kompozit magrészét hasonlítottam a fröccsöntött termék héj részéből vett minta kopásállóságához. Az eredményeket az 1- 4. ábrán mutatom be.



1. ábra. Extrudált ((E) magból vett anyagminta) és fröccsöntött ((IM) héjrész koptatása) PA66/MoS₂ abrázíós kopásállósága, P100 csiszolóvásznon

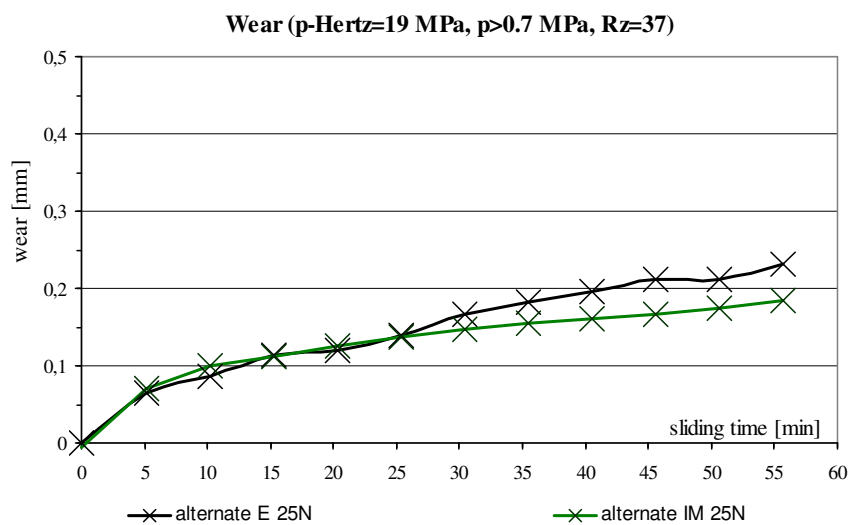
Az 1. ábra vizsgálati rendszerében az abrázíós kopást az álló hengeres próbatest magassági méretének csökkenése fejezi ki mm-ben. A próbatestek $v = 0,08$ m/s sebességgel, $p = 0,7$ MPa normálterhelés mellett saját nyomon csúsztak P100-as abrazív felületen (korund részecskék). Ez a folyamat az abrázíó mellett a kopásnyomban létrejövő polimer-film adhéziós hatásával is kiegészül a csúszás folyamán. E mérések szerint az extrudált magrészéből vett anyagminta kedvezőbb abrázíós kopásállóságot eredményezett, mint a fröccsöntött kompozit héjrészének koptatása. Hasonló eredményre jutottam egy jóval finomabb abrazív felületen, P240-es abrázíós csiszolóvásznon alkalmazása esetén (2. ábra), de a különbség nem olyan jelentős az anyagok között, mint az első esetben a P100-as felületen.



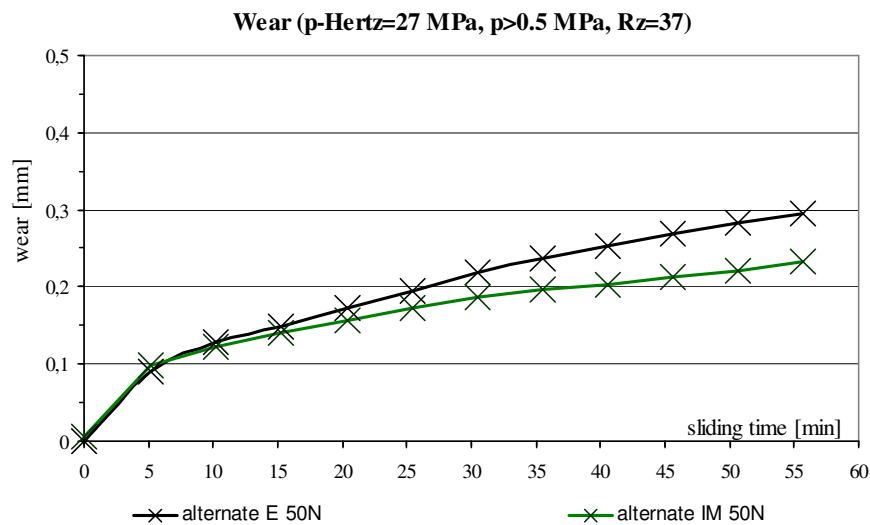
2. ábra. Extrudált ((E) magból vett anyagminta) és fröccsöntött ((IM) héjrész koptatása) PA66/MoS₂ abrziós kopásállósága P240 csiszolóvásznon

Az orientáció kopásállóságra gyakorolt hatása tehát valóban kimutatható volt az abrziós rendszerben.

Ugyanezen anyagmintákat egy alternáló csúszás melletti, adhéziós rendszerben is összehasonlítottam. A polimer próbatestek (fekvő henger acél síkon) ebben a vizsgálati rendszerben eltérő eredményt szolgáltattak (3. ábra). A csúszási lökethossz 6 mm, a mozgás frekvenciája 5 Hz, a kezdeti kontakt Hertz feszültség 19MPa (3. ábra) és 27 MPa (4. ábra) volt a beállított normálterheléstől függően. A polimerek St235 acél felületen (R_a 7 μ m) csúsztak, kenés nélkül.



3. ábra. Extrudált és fröccsöntött PA66/MoS₂ kompozitok kopása a 19 MPa induló kontakt Hertz-feszültség esetén



4. ábra. Extrudált és fröccsöntött PA66/MoS₂ kompozitok kopása a 27 MPa induló kontakt Hertz-feszültség esetén

Az 1. és 2. ábra eredményeihez képest megfordult a trend, a fröccsöntött próbatetek kisebb kopást szenvedtek. Ez egy teljesen más tribológiai igénybevételt jelentő rendszer volt, továbbá nem volt információ arról, hogy a fröccsöntött kompozitokból kimunkált hengeres próbatetekben az orientáció és az igénybevétel iránya milyen viszonyban volt.

A két eltérő mérési rendszer azonban bizonyította, hogy az orientáció (akár makromolekulák, akár töltő/erősítő anyag) hatással lehet a kopásállóságra, de annak előjele lehet pozitív és negatív is. Nem kizárt fröccsöntött (orientált) felületek tribológiai igénybevételénél elérni egy olyan kedvező igénybevételi irányt vagy esetet, mikor a kopásállóság javulhat is.

4. *Polimer-polimer rendszer esetén mennyiben módosulnak a tribológiai folyamatok?*

Jelentősen módosulnak a folyamatok, mert megváltoznak a kontaktzónában létrejövő hő- és hőelvezetési viszonyok (melyek kihatnak a mechanikai jellemzőkre), jelentősen megváltoznak az adhéziós jelenségek, továbbá a tényleges érintkezési felületek. Ezek eredő hatása érvényesül a súrlódásban és kopásállóságban.

A száraz súrlódású polimer-polimer tribológiai kapcsolatok terhelt gépelemeknél nem javasolt megoldások, a fém-polimer kapcsolatokhoz képest jelentősebb az adhézió szerepe a kontaktzónában. Kis mechanikai terheléseknél (pl. irodatechnikai gépek, műszergyártás), ahol

a súrlódási hő is minimalizálható, ott elfogadott megoldás. Továbbá vannak olyan egyéb követelmények is, mint pl. a korrózióállóság, vagy a kis tömeg, amikor szintén valamely polimer-polimer kapcsolatot kell optimalni egy adott súrlódó igénybevételhez.

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

Kalácska Gábor

Irodalmi hivatkozások

[1] Czvikoszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János (2006): A polimertechnika alapjai. Műegyetemi kiadó. ISBN 9634206212

[2] Sanjay K. Mazumdar (2002): Composites Manufacturing. Materials, Product, and Process Engineering. CRC Press LLC, London. ISBN 0-8493-0585-3

[3] Manas Chandra, Shalil K. Roy (ed.) (2007): Plastics Technology Handbook. CRC Press LLC, London. ISBN 0-8493-7039-6