

Műanyagok kopásállóságának javítása csúsztató adalékokkal és sugárzással

A műanyagok kopásállóságának javítására, azaz a súrlódás csökkentésére csúsztató adalékokat használnak, amelyek hatásmechanizmusa még nem tisztázott teljes mértékben. Egy másik módszere a kopásállóság javításának a besugárzás, amellyel térhálósítják a műanyagot és ezzel kedvezőbbek lesznek a tribológiai tulajdonságok.

Tárgyszavak: kopásállóság; csúsztató; súrlódás; kopási mechanizmus; sugárzásos térhálósítás; tulajdonságok; műszaki műanyagok.

Belső csúsztatók hatásmechanizmusa a műanyagok kopásállóságának javításában

A polimerek kopását a műanyag és a súrlódó felület határán kialakuló átmeneti filmréteg befolyásolja, ahol a polimer/fém határfelület polimer/polimer határfelületté alakul át. A kopás folyamán a műanyag felületéről részecskék válnak le, amelyek egymással kölcsönhatásba lépnek, és fokozatosan kialakul az átmeneti filmréteg. A mechanikai kölcsönhatás mellett figyelembe kell venni a termikus és kémiai kölcsönhatást is, amely a leváló műanyag lágyulását eredményezheti pl. a csökkenő molekulatömeg révén. Ennek a filmnek jellemzői határozzák meg a csúszás stabilitását, ami a polimer összetételétől is függ. Vagy egy viszonylag vastag (0,1–1,0 μm -es) részecskékből álló film alakul ki, vagy egy vékony (10–50 nm-es), erősen orientált film. Az utóbbi kedvezőbb a stabil csúszás szempontjából. Ilyen figyelhető meg egy korlátozott csúszási tartományban a PE-HD, az ultranagy molekulatömegű PE (PE-UHMW), a poli(tetrafluor-etilén) (PTFE) és a poli(oxi-metilén) (POM) esetében. Ezek a műanyagok viszonylag lágy, duktilis (plasztikusan alakítható) polimerek. A polimermolekulák a csúszás során fellépő erős nyírás hatására orientálódnak, könnyen kialakul a vékony, orientált film. Az így létrejött egybefüggő film kis nyíróellenállást fejt ki. Kimutatták, hogy egyes kristálytípusok (pl. a poliamidok közül az α -kristálymódosulat) kedvezőtlen hatást fejtenek ki, míg a szilárd amorf fázis orientációja (pl. a PET-ben) vagy polikondenzációs reakciók fellépése (pl. poliimidben) kedvező hatással van a lágy film kialakulására.

A szobahőmérsékleten üveges amorf polimerek (pl. PS, PMMA) láncai nem mozgékonyak, kicsi az esély lágy polimerfilm kialakulására. A repedések vékony polimerlemezeket eredményeznek, aminek eredményeként egyenetlen, nem összefüggő átmeneti film alakul ki. A hőre lágyuló polimerek magas hőmérsékleten folynak, így

könnyebben alakítanak ki folyadékfilmet. Ha részben kristályos polimerekről van szó, az üvegesedési hőmérséklet fölötti, de a kristályos olvadáspont alatti hőmérsékleten az amorf rész polimerláncái könnyen orientálhatók a nyírás hatására, viszonylag könnyű az anyagtranszfer. A kevésbé duktilis, részben kristályos polimerek esetében (PP, PA, PET) fennáll a darabolódás veszélye a folyamatos réteg kialakulása helyett. A molekulák ugyanis még azelőtt elszakadnak, hogy az orientáció kialakulna. A nagy teljesítményű műszaki műanyagok (PI, PEEK, PPS) esetében a magas üvegesedési hőmérséklet miatt nincs esély lágy polimerfilm kialakulására, ezért a kopási/csúszási jellemzőket tipikusan lemezes adalékokkal (grafit, MoS₂) vagy pl. szilikonolajokkal javítják. Esetenként kis mennyiségben ún. belső csúsztatót (pl. PTFE) adnak a rendszerhez, amelynek eloszlását és hatékonyságát a feldolgozás módja is befolyásolja.

A csúsztató adalékok hatékonyságának vizsgálata

Egy kísérletsorozatban kisebb és nagyobb mintákon, széles paramétertartományban vizsgálták különböző csúsztató adalékok hatását *poliimidre, PET-re és PA-ra*. A kisebbik vizsgálóberendezés 6 mm átmérőjű, 15 mm magas polimer hengert alkalmaz acélfelülettel szemben, a kontaktnyomás 30–60 MPa, az excenterrel lineárisan alakított forgómozgás úthossza 15 mm, a mozgás sebessége 0,3–1,2 m/s, a teljes koptatási úthossz 15 000 m. Az acélfelület hőmérsékletét ellenállásfűtéssel 80–260 °C tartományban lehet beállítani. A nagyobbik minta mérete 1050x150x20 mm, a nyomás 8–150 MPa, a csúszási sebesség viszont csak 0,005 m/s, a teljes kopási út 3000 m. A kopási jellemzőket a csúszási sebesség, a kopási út, a hőmérséklet és a nyomás és a sebesség szorzata (pv) függvényében vizsgálták, ill. értékelték.

A vizsgált anyagok néhány jellemzőjét az *1. táblázat* foglalja össze. A poliimid kopási jellemzőinek javítása céljából 15 % (V/V) grafitlemezkeket (sűrűség 2,25 g/cm³, fajlagos felület 9 m²/g, részecskeméret 5–10 µm) adagoltak. A PET esetében 10% PTFE adalékot használtak, a PA-nál pedig szabadalommal védett, olajtartalmú rendszereket hasonlítottak össze az alappolimerrel. A PA-olaj1 kompozícióban egyenletes a szintetikus olajcseppek eloszlása, a PA-olaj2 rendszerben viszont a felületen lyukak láthatók. Ezek mérete és eloszlása lehetetlenné tette az utóbbi összetétel kis mintán történő vizsgálatát.

A grafitadalék hatása

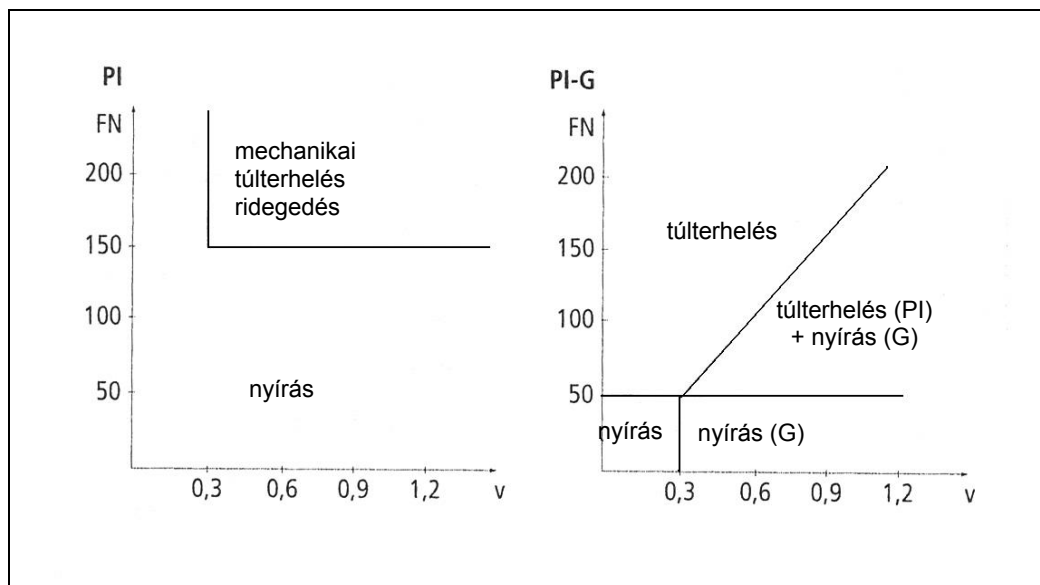
A grafit hatására folyamatosan csökken a súrlódási együttható a sebességgel – még inkább, mint a tiszta PI esetében. Ez a tendencia még kifejezettebb nagyobb nyomóerőknél, amikor a grafitadalék könnyebben kikerül a határfelületre. A grafittranszfer a töltött poliimidekben jelentősen befolyásolja a súrlódási tulajdonságokat. A grafittal töltött PI-G minta szilárdsága valamivel kisebb, mint a PI-é, aminek hatására fokozottabb a kopás, mechanikai túlterhelésnél a rendszer hajlamos darabos határréteget képezni. Homogén transzferfilm csak nagyobb (0,6–0,9 m/s) sebességnél alakul ki. Nagyobb sebesség és terhelés esetén a PI komponens rideggé válik, és kevert PI-G tar-

talmú film alakul ki. Az 1. ábra foglalja össze az adalékmentes, ill. az adalékolt PI rendszerben megfigyelhető csúszási mechanizmusokat.

1. táblázat

A kopási vizsgálatokban alkalmazott minták néhány jellemzője

Minta	Sűrűség g/cm ³	Modulus MPa	Folyáshatár MPa	Szakadási nyúlás %	Nyírószilárdság MPa	Keménység	T _g , °C	T _m , °C	Hővezető képesség W/mK
PI	1,34	2480	nincs	7	90	M100	nincs	nincs	0,3
PI-G	1,42	3170	nincs	5	77	M90	nincs	nincs	0,46
PET	1,39	3700	90	15	55	M96	75	255	0,3
PET-PTFE	1,44	3450	85	7	59	M94	75	255	0,3
PA	1,15	1700	55	25	76	M88	80	220	0,29
PA-olaj1	1,14	1450	45	20	64	M82	75	220	0,28
PA-olaj2	1,14	1600	50	22	64	M85	75	220	0,28



1. ábra Az adalékoltatlan poliimid (PI) és a grafit-tartalmú PI-G csúszási mechanizmusának alakulása a nyomóerő (nyomás) és a sebesség függvényében

Az adalékmentes PI mintánál $p \cdot v < 1,5 \text{ MPa m/s}$ és a $T < 175 \text{ °C}$ tartományban mechanikai okokból kialakul egy csökkenő súrlódás, majd kémiai okokból a súrlódási

tényező stabilizálódik a $1,5 \text{ MPa m/s} < p_v < 3 \text{ MPa m/s}$ tartományban, 175 és $260 \text{ }^\circ\text{C}$ között. A PI-G minta esetében $p_v > 3 \text{ MPa m/s}$ és $T = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ mellett stabilizálódik a súrlódási együttható a kevert film kialakulása miatt. A grafitadalék $60\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ között növeli a kopást és instabil csúszást eredményez. $100 \text{ }^\circ\text{C}$ fölött és 50 N terhelés mellett azonban már csökken a súrlódás. A kopási sebesség $60\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ között nő, $140 \text{ }^\circ\text{C}$ -nál minimumot mutat. A grafit töltőanyag véd a túlterheléssel szemben is. Spektroszkópiai vizsgálatok szerint *a $100\text{--}180 \text{ }^\circ\text{C}$ tartományban a poliimid hidrolízisérzékeny, a $180\text{--}260 \text{ }^\circ\text{C}$ tartományban viszont az imidizálási reakció kedvezőbb.* Az is régóta ismert, hogy a grafit kenőképessége erősen függ a környezettől, ugyanis a szó szigorú értelmében lemezes szerkezete ellenére a grafit önmagában nem kenőanyag: csak vízgőz vagy egyéb illékony kismolekulás anyagok jelenlétében csökken jelentősen a nyírószilárdság. Ha teljesen száraz a környezet, megnő a nyírással szembeni ellenállás, ami növeli a súrlódást. Ezt azzal magyarázzák, hogy a „lógó kötések” erősen megnövelik az adhéziót a szomszédos rétegek között, ha azokat nem semlegesítik a kisebb molekulák. A mátrixanyag makromolekuláival fellépő reakció ugyancsak deaktiválhatja a „lógó kötések”et. A $60\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ -os tartományban a durvaszemcsés grafit nagy súrlódást okoz, a $140\text{--}180 \text{ }^\circ\text{C}$ -os tartományban a finomabb részecskék mellett csökken a súrlódás, és végül a $180\text{--}260 \text{ }^\circ\text{C}$ -os tartományban a poliimid molekulák kapcsolódása tovább csökkenti a súrlódást.

A PTFE mint kenőanyag

A PTFE kenőhatása elsősorban annak köszönhető, hogy maga is lemezes szerkezetű és kicsi a nyírással szembeni ellenállása. A részletesebb vizsgálat azt mutatja, hogy a PTFE hatása abban rejlik, hogy csökkenti a keletkező súrlódási hőt, ezért nagyobb p_v határértéket tesz lehetővé. A PTFE-t nem tartalmazó és a PTFE-t tartalmazó PET súrlódási együtthatóját és kopási sebességét hasonlították össze a p_v érték függvényében, és megállapították, hogy *a PTFE hozzáadása pozitív hatással van a súrlódási stabilitásra és gátolja a lágyulást.* A töltött poliészter esetében a p_v határérték $2,3 \text{ MPa m/s}$, amelyet a $T^* > 75 \text{ }^\circ\text{C}$ maximális felületi hőmérséklet szab meg. A nagyobb csúszási sebesség vagy erősebb terhelés hatására lágyul (esetleg megolvad) a polimer felülete, ami instabil csúszást eredményez.

A mechanizmus a PET és a PET-PTFE esetében is hasonló, csak az utóbbi esetben a folyamatok később következnek be. Újabb (túlterhelési) átmenet lép fel a $p_v > 3,1 \text{ MPa m/s}$ tartományban és $T^* > 255 \text{ }^\circ\text{C}$ -nál, ahol a polimer megolvad. A határréteg elsősorban PTFE-ből áll, de a PTFE csak korlátozottan terhelhető. Kisebb terheléseknél a PTFE nem túl hatékony, ilyenkor a PET saját tulajdonságai a döntők. Ilyen körülmények között, mivel a tiszta PET szilárdsága nagyobb, mint a PET-PTFE kompaundé, ezért kisebb a kopása is; a leváló részecskék mennyisége nem elég ahhoz, hogy folyamatos film alakuljon ki. A nagy próbatestekkel $8\text{--}150 \text{ MPa}$ nyomás mellett végzett mérések alacsony súrlódási együtthatót és stabil kopási értékeket mutatnak. Két tendencia ismerhető fel: $8\text{--}55 \text{ MPa}$ terhelésnél stacionárius, növekvő súrlódás, $55\text{--}150 \text{ MPa}$ tartományban pedig állandó vagy csökkenő súrlódás. A statikus keménységi

vizsgálatok szerint ez a két tartomány a PET rugalmas, ill. plasztikus deformációjának felel meg. A nagy terhelés hatására az anyag meglágyul, kisebb terhelésnél pedig viszonylag gyorsan stabilizálódik a súrlódás/kopás. A súrlódási együttható terhelésfüggését egy F_N^{-n} típusú függvénnyel lehet leírni $n=0,75$ értékkel, $R^2=0,98$ korrelációs együtthatóval. A PET-PTFE kompozit súrlódásának kontaktnyomástól való függése erősebb, mint a tiszta PET-é, mert más az érintkező felület szerkezete és síkossága. A plasztikáló hatás közepes méretben nagy érintkező felületeknél és kis nyomásoknál mutatkozik meg. Azt is látni lehetett, hogy közepes méretben a szilárd csúsztatóanyag hatása kevésbé mutatkozik meg, mint a kis mintáknál. A viszkoelasztikus deformációs mód megjelenése nagy próbatesteknél a súrlódási együtthatók alakulásában mutatkozik meg. A nagyobb próbatesteknél jóval nagyobb a felület ($22\,500\text{ mm}^2$ versus 10 mm^2). A kopási sebesség a nagy próbatestek esetében $1,54\text{ mm}^3/\text{m}$ és $0,14\text{ mm}^3/\text{m}$ között változik. A nagy próbatesteknél könnyebben kialakul a csúszó film, mint a kis mintáknál, ahol a PTFE részecskék könnyebben eltávolíthatók a felületről és nem tudnak felhalmozódni. A kis mintákban hatékony csúsztatóréteg csak nagy terhelések mellett tud kialakulni.

Szintetikus olaj csúsztatóanyag

A szintetikus szilikonolajok csúsztató hatása abban áll, hogy az olaj kimigrál a tömbanyagból és a határrétegben keveredik a polimermolekulákkal. *A csúszás feltétele az, hogy a határfelület folyamatosan el legyen látva olajjal.* A migrációnak vannak „statikus” komponensei (pórusokon, kapillárisokon, felületi egyenetlenségeken keresztül) és „dinamikus” komponensei is, amelyek magával a csúszási folyamattal állnak kapcsolatban. A migrációs sebesség szerepét vizsgálták pl. olyan porózus poliimid próbatesten, amelynek hőmérsékletét 35 és 100 °C között változtatva gyorsítható az olaj migrációja. Ez a hatás más polimereknél (pl. polietilén) is kimutatható 60 és 80 °C között.

Ha kompakt (nem porózus) poliamidból történő olajmigrációról van szó, eleinte kis deformáció is elég ahhoz, hogy az olaj kijusson a határfelületre, később azonban a tömörebb határréteg gátolja a kapillárisokon keresztül a migrációt. Ez megmutatkozik a súrlódási együttható időfüggésében is. 50 N terhelésnél 2500 m , 100 N -nál 1500 m , 150 N -nál 1000 m után lép fel változás a súrlódási együtthatóban. Kis terhelésnél (50 N) a kenőanyag megtartja funkcionalitását, ezért még a nagyobb súrlódási együtthatók tartományában is alatta maradnak a tiszta PA-nak. Közepes terheléseknél (150 N) az olaj már nem elég hatékony, a súrlódás eléri a tiszta PA-n mért értéket. Nagyobb terheléseknél ($150\text{--}200\text{ N}$) újabb átmenet lép fel a kisebb súrlódási együtthatók felé, kialakul egy stabil és homogén olaj/polimer keverék a határrétegben. 50 N mellett az olajtartalmú PA minta kopási sebessége kisebb a PA-énál, $100\text{--}200\text{ N}$ között azonban a túlterhelés miatt nagyobb kopás alakul ki. Az olajtartalmú poliamid mechanikai jellemzői rosszabbak a tiszta poliamidénál. A kopási sebesség növekedése azonnal megérezhető, mihelyt az olaj kenőhatása elvész. Minél magasabb a hőmérséklet, annál nagyobb terhelés mellett következik ez be. Ez a hőmérséklet azonban nem függ össze

közvetlenül a tömbpoliamid termikus átmeneteivel, hanem egy terheléstől és időtől függő érték. *Lényegében az olaj migrációjának és kopásának relatív sebessége dönti el, hogy érvényesül-e a kenőhatás.* Ahogy kifogy az olaj a határrétegből, megnő a kopási sebesség, ami újabb olaj felszabadulásához vezet. Az üvegesedési hőmérséklet fölött lágyulás lép fel, és a felület deformációja blokkolja az olaj migrációját, ilyenkor a kopás mechanizmusa hasonlóná válik a tiszta poliamidéhoz: részecskék válnak le a tömb poliamidból. 10 MPa terhelés mellett végzett vizsgálatok szerint a nagyméretű PAoil1 mintánál a kezdeti súrlódási együttható kisebb, mint a tiszta PA mintáé, gyorsabban stabilizálódik a kisebb felületi energia és adhézió miatt. A migráló olaj keveredik a poliamiddal, így kisebb a súrlódás. Nagyobb terhelésnél ugyanakkor megnő a súrlódás, mert a felület deformációja meggátolja az olaj migrációját a határrétegbe. A PAoil2 minta esetében a PA eredeti jellemzői fontosabbak, nem zárható ki a letapadási/megcsúszási effektus. Ha kis terhelésnél jó csúszási jellemzőket akarnak kapni, célszerűbb homogén módon eloszlatni az olajat, nagy terhelésnél azonban a pórusokon át áramló olaj bizonyul jobb megoldásnak. Hosszabb csúszási idő után a homogén olajeloszlású mintában (PAoil1) egy átmenet alakul ki, ami nagy terhelésnél letapadási/megcsúszási jelenségeket produkál. A különálló nyílásokon át adagolt olaj (PAoil2) ilyen körülmények között hatékonyabban csökkenti a súrlódást és meggátolja az instabil csúszás kialakulását. A felületről készített mikroszkópos felvételek és a felületi spektrumok is segítettek a jelenségek jobb megértésében. A PAoil1 minta esetében vastag, viszkózus film alakul ki, amely 10 MPa terhelés mellett 162 °C-on a lágyulás miatt, 40 MPa terhelés mellett pedig 216–230 °C-on olvadás miatt szűnik meg, és ilyenkor a polimermátrix tulajdonságai válnak meghatározóvá. A PAoil2 esetében 10–30 MPa terhelés mellett a lágyulás a 92–166 °C tartományban megy végbe. Összefüggő, vastag transzferfilm alakul ki, amely kisebb terhelés mellett homogén és összefüggő, nagyobb terhelés esetén ridegebbé válik és a szélein töredezni hajlamos, akárcsak a tiszta PA-ban. Egyes poliamiddarabok leválnak és meglágyulnak, de azok a nyílások nem tömődnek el, amelyeken keresztül az olaj a felületre jut. Nincs szükség „bevezető időre” ahhoz, hogy kialakuljon a stabil csúszás, a súrlódás alacsony hőmérsékleten alacsony marad, és az anyag sem olvad meg. A megfelelő geometriájú és elrendezésű nyílások optimalizálása a minél jobb csúszás elérése érdekében még folyamatban van.

Sugárzással a kopás ellen

A polimereket egyre gyakrabban használják fogaskerekek, hüvelyes csapágyak és egyéb csúszóelemek gyártására – különösen irodagépek, háztartási gépek, gépjárművek alkatrészei stb. esetén. Az előnyök között szerepel a kis sűrűség, a nagy nyomószilárdság (500–1000 kg/cm²), rugalmasság, hornyolt ütésállóság (alacsony hőmérsékleten is), valamint a jó súrlódási és kopásállósági jellemzők – mindez a szabadon választható alak és a mérettartóság mellett. *A jó tribológiai jellemzők kenőanyag nélkül is fennmaradnak, tehát kenés és karbantartás nélküli csapágyak készíthetők belőlük.* Az egyetlen hátrányt az jelenti, hogy *a polimerek hőtágulási együtthatója jóval nagyobb a*

fémekénél, ezért előfordulhat, hogy ha nagyon nagy az alkalmazási hőmérséklet-tartomány és fémből készülnek az ellendarabok, a fogaskerék beragad vagy „kotyogni” kezd. Pedig pl. egy lézernyomtatóban könnyen lehet szobahőmérséklettől +150 °C-ig terjedő hőmérséklet, ahol a poliamid (PA) vagy poliacetál (POM) fogaskerekek teljesítőképességük határáig jutnak. Ha az anyag lágyulni kezd, már nem képes olyan erő átvitelére, mint szobahőmérsékleten.

Az anyag kiválasztásakor tehát a mechanikai, a termikus és a tribológiai jellemzők kombinációját kell figyelembe venni. Csapágyak készítéséhez szívesen használják pl. a poli(tetrafluor-etilén)-t (PTFE), de ha nagy szilárdságú és keménységű anyagra van szükség, akkor a nagy teljesítményű műszaki műanyagok (pl. PEEK, PPS) közül választanak. Ezek az anyagok azonban nemcsak jóval drágábbak, mint a közönséges műszaki műanyagok, hanem a feldolgozásuk is jóval igényesebb.

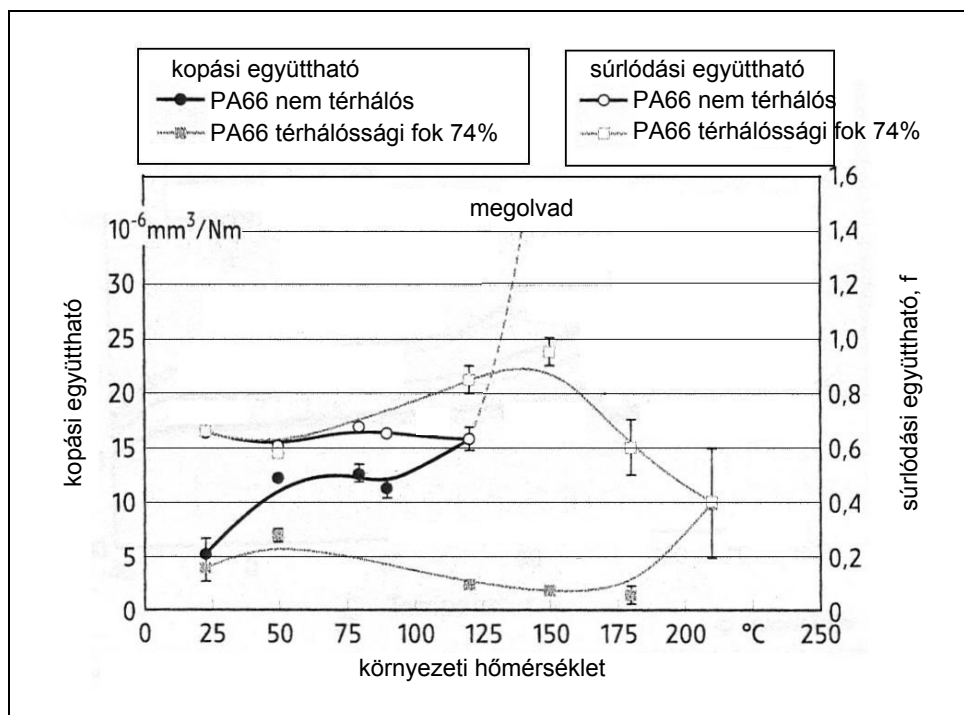
A műanyagból készült alkatrészek kopása csökkenti a készülékek élettartamát. A bemaródások, anyagkopás, összeforradás mind jól látható tribológiai problémákra utaló hibák. A magas hőmérséklet általában még tovább fokozza a kopást. Ha a kopás korlátozza az élettartamot, a gyakoribb csere vagy karbantartás költsége gyakran megszünteti az olcsóbb gyárthatóságból származó előnyöket.

Célzott térhálósítás

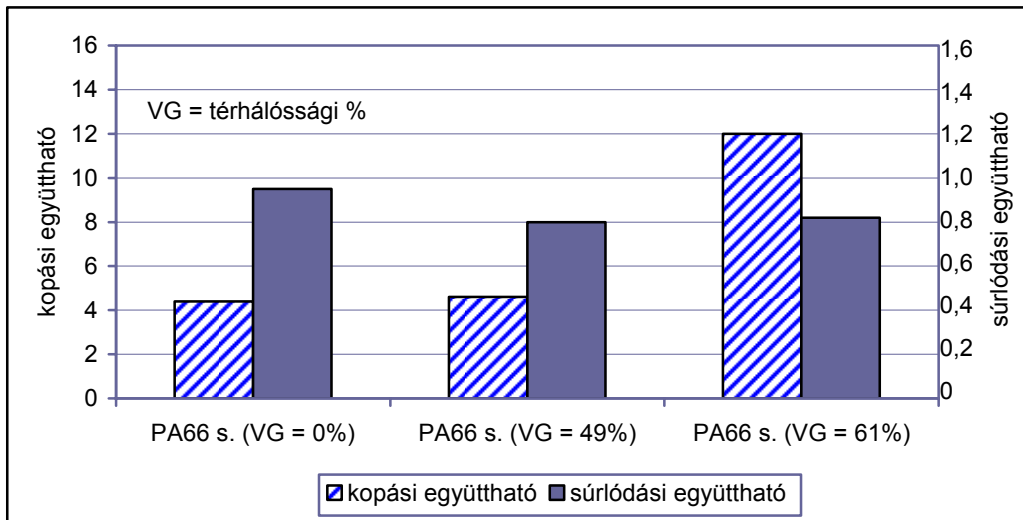
A nagy teljesítményű műszaki műanyagok alternatívái lehetnek bizonyos esetekben a normál műszaki műanyagok, amelyeket utólag sugárzással térhálósítanak. Ezzel a kezeléssel adott esetben versenyképes tulajdonságok hozhatók létre olcsóbban, ami a kialakult térhálós szerkezetnek köszönhető. A sugárzás hatására a főláncok tördelődnek, vagy atomok/csoportok hasadnak le róluk, a képződő gyökök pedig rekombinálnak. *A főlánc tördelődése rontja, a térhálós szerkezet kialakulása növeli a moduluszt és a szilárdságot.* Azt, hogy melyik folyamat kerül előtérbe, befolyásolják a besugárzás körülményei, az alkalmazott polimer és a benne levő adalékok típusa. A térhálósítás hatása olyan tulajdonságokban mutatkozik meg, mint a magasabb üvegesedési hőmérséklet, a kisebb hidegfolyási hajlam, a nagyobb magas hőmérsékletű alaktartás, a jobb tribológiai jellemzők, a nagyobb rugalmas helyreállási hajlam és a jobb ellenálló képesség a feszültségrepedéssel szemben. *A sugárzás valamelyest csökkenti a hőtágulási tényezőt is.* Manapság a célzott besugárzáshoz többnyire elektronsugárzást használnak, illetve, ha a nagyobb áthatoló képesség miatt szükség van rá, esetenként gamma-sugárzást. A részben kristályos polimereknél a térhálósodás túlnyomórészt az amorf fázisban következik be. A mikroalkatrészek és fogaskerekek esetében kedvezőtlen a felület-térfogat arány, és éppen a legnagyobb terhelésnek kitett felületeken viszonylag több az amorf rész. Más tekintetben viszont, az elektronbesugárzás szempontjából éppen ez kedvező körülmény, hogy a jól térhálósodó amorf rész a felszín közelében helyezkedik el, ezért a kezelés jelentősen javítja a kopásállóságot. A besugárzás többnyire szobahőmérsékleten történik, amely elsősorban a mozgékonyabb amorf fázisban okoz változást. A térhálópontok számának növekedésével a mozgékonyág csökken, azaz nő az üvegesedési hőmérséklet.

A térhálósítás hatásának tudományos vizsgálata

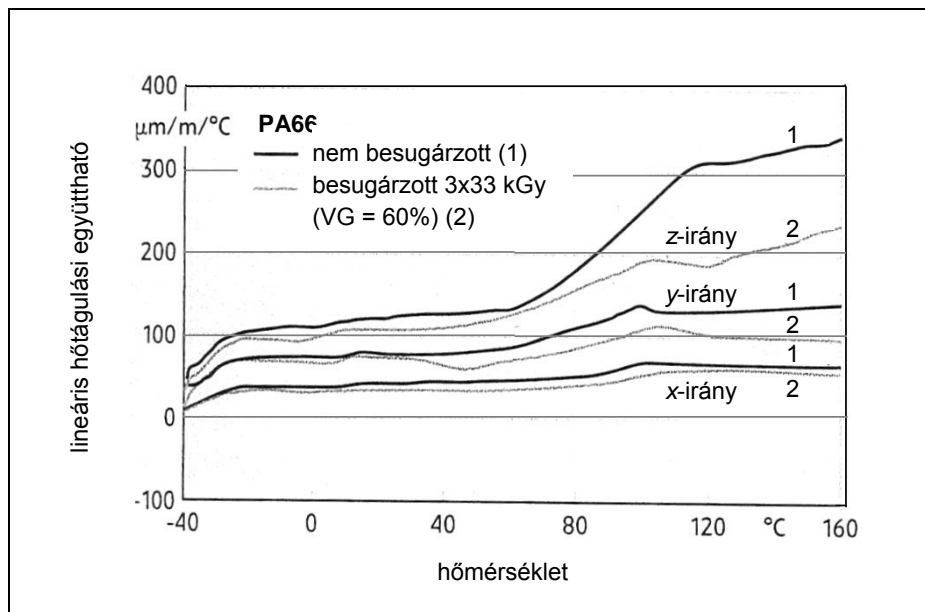
A német **BGS Beta-Gamma-Service** cég és az **Erlangeni Egyetem** együttműködésével nemcsak műszaki, hanem tudományos szempontból is megvizsgálták a poliamidok (PA66 fogaskerekek) tulajdonságváltozásait a sugárzás hatására. A vizsgálatokhoz a BASF *Ultramid A3* típusát használták, amelyet a hőstabilizált *Ceramid A3H2*-vel hasonlítottak össze (PA66 típus, a **PTS** cég terméke). A vizsgálatokhoz 100x100x4 mm lemezeket készítettek, amelyek kváziamorf felületét a szerszámhőmérséklet megfelelő beállításával alakították ki. Mintegy 53% térhálósági fok mellett a PA66 kopási együtthatója az eredeti érték kb. 37%-ára csökken, 60% térhálóság mellett pedig kb. 31%-ára. A hőstabilizált anyag esetében még jobb eredményt értek el, itt az eredeti érték 24%-ára csökken a kopás 61% térhálóság mellett (2. ábra). A sűrűlátsági együttható változása a sugárzás hatására elhanyagolható. A maximális termikus terhelhetőséget a sűrűlátsági hő és a környezeti hőmérséklet együttesen határozzák meg. A térhálós poliamidok kopási jellemzői jelentősen eltérnek a nem térhálósakétól (3. ábra). A térhálóság gátolja a polimer megolvadását – még a kristályos olvadáspont fölött is, ahol nem ömledék, hanem gumirugalmas állapot alakul ki. Ennek eredményeként a térhálós PA66 alkalmazhatósági hőmérsékletének felső határa majdnem 100 °C-kal magasabb, mint a nem térhálósé, miközben kopási sebessége is kisebb. A sugárzás hatására mérhetően csökken a hőtágulási együttható (4. ábra) és a kúszási hajlam, hiszen a térhálóság gátolja a láncok egymáshoz képest történő elmozdulását.



2. ábra Fröccsszáraz PA66 kopási jellemzőinek változása sugárzás hatására PA66/acél anyagpárt használva ($p = 4\text{N/mm}^2$, $v = 0,5\text{ m/s}$)



3. ábra Hőstabilizált PA66 kopási és súrlódási együtthatója a térhálóság függvényében (a vizsgálat körülményei azonosak a 2. ábrán közöltekkel)



4. ábra Az elektronsugárzás hatása a PA66 (víztartalom <0,2%) lineáris hőtágulási együtthatójára. Az x-irány megfelel a fröccsöntés irányának.

A sugárzásos térhálósítás viszonylag egyszerű, kényelmes, környezetbarát (nem használ vegyszereket), a tulajdonságjavulás független az alakadási folyamattól, a termoplasztikus (hőre lágyuló) tulajdonságeggyüttes helyett termoelasztikus alakul ki. Több fázisú (pl. töltött, erősített vagy polimerkeverék) rendszerekben kémiai kötések

alakulhatnak ki a különböző fázisok között. Mivel a sugárzás a különböző anyagok határfelületén is áthatol, fém-műanyag kombinációk is besugározhatók. Az előnyöket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat

A sugárzásos térhálósítás pozitív hatása a tribológiai jellemzőkre

Tribológiai követelmény/terhelés	Az elektronsugárzás hatása
Nagy kopásállóság	Nő a térhálósági fok, jobb a kopási ellenállás, kevésbé károsodnak a csúszó felületek
Termikus terhelhetőség (a súrlódási hő hatására)	Nagyobb az üvegesedési hőmérséklet, nő a magas hőmérsékletű alaktartóság, magasabb hőmérsékletekig használható az anyag
Nagy illeszkedési pontosság (fogaskerek), kis holtjáték (meghajtások)	Kisebb hőtágulási együttható, kisebb kúszási hajlam
Kenés	Jobb vegyszer- és feszültségrepedezés-állóság
Nagy mechanikai terhelhetőség (átvihető nyomaték fogaskerekeknél)	Nagyobb szilárdság, kisebb kúszási hajlam

Összeállította: Dr. Bánhegyi György
www.polygon-consulting.ini.hu

Samyn, P.; Schoukens, G.: Tribophysikalische Interpretation der Effekte interner Gleitadditive auf Reibung and Verschleiss von Polymeren = GAK, 63. k. 1. sz. 2010. p. 29–37.

Tatje, J.: Strahlen gegen Verschleiss = Kunststoffe, 100. k. 3. sz. 2010. p. 45–47.