

„Stick-slip” PA és PEEK kompozitok súrlódásánál henger/sík modell vizsgálati rendszerben

Dr. Zsidai László* egyetemi docens, Dr. Kalácska Gábor* egyetemi tanár

1. Bevezetés/irodalmi összefoglalás

Az egyre szélesebb körben alkalmazott műszaki polimerek és kompozitjaik tribológiai viselkedésével foglalkozó vizsgálatok száma jelentősen növekedett a közelmúltban, és ez a tendencia egyre csak fokozódik [1–3]. A fejlődés nemcsak a vizsgált anyagok területén, hanem a súrlódási vizsgálati módszerekben is megfigyelhető. A korábban túlnyomórészt konkrét alkalmazások (kész berendezések) esetén elvégzett vizsgálatok többnyire bonyolultak és költségesek voltak, elsősorban azért, mert egyetlen vizsgálat nem elegendő a tribológiai viselkedés megfelelő leírásához, és az elhasznált gépek ára is jelentős. Napjainkban már költségkímélő megoldásként alkalmazzuk az általánosan elfogadott (szabványosított), célirányosan kialakított laboratóriumi vizsgálatokat, melyek kisméretű (small-scale) próbatesteket használnak.

Az alap polimer mátrixok vizsgálatán túl, egyre sürgebb igényként lép fel a polimer kompozitok vizsgálata, melyeknél még számos kérdést kell megválaszolni. Erre mutat a polimer kompozitok súrlódási modell vizsgálatával foglalkozó források egyre növekvő száma is [4–6]. A szakirodalomban találunk kisméretű blokk-gyűrűn [7], két tárcsán [8, 9] és különböző elrendezésű tű/tárcsán végzett vizsgálatokat, ahol az álló tű [10] vagy a forgó tárcsa készült kompozitból [11], eltérő kopási mechanizmusokat modellezve. Kompozitok nagyméretű modellvizsgálatával is foglalkoznak [12].

A natúr alap mátrixszal rendelkező polimerek helyett ma már túlnyomó részben kompozitjaikat használjuk a műszaki alkalmazásokban. A szálerősítés javítja a szilárdságot, ugyanakkor lényegesen befolyásolja a tribológiai jellemzőket. Például rövid üvegszál erősítésű poli(éter-imid) mátrixok esetében növeli az adhéziós és a fretting kopásállóságot, de rontja az abrúziót és az eróziót, és általában lerontja a súrlódási jellemzőket [13]. Az előzőhöz hasonlóan figyelték meg rövid üvegszál erősítésű PA66 esetében is, ahol a kedvezőbb mechanikai jellemzők mellett növekedett a súrlódás és a kopás is [14].

A gyakorlatban kis sebességű csúszásoknál gyakori probléma, hogy a csúszás nem egyenletes, hanem akadozó. Kedvezőtlen esetben gerjesztett lengés jön létre, amely nagy mozgó tömeg esetén jelentős dinamikai

igénybevételt okoz a csatlakozó gépelemekben. Ez az akadozó mozgás (stick-slip) minden olyan súrlódó párnál felléphet, ahol legalább az egyik elem bizonyos fokú elasztikus szabadsággal rendelkezik. A jelenséget a μ_{stat} statikus és a μ_{din} dinamikus súrlódási tényező közötti különbség okozza. Meg kell említenünk a magyar vonatkozást is, hiszen elsőként *Segner János András* természettudós nevéhez fűződik a nyugvó és a mozgó súrlódási tényező megkülönböztetése és definiálása.

Nyilvánvaló, hogy szükséges lenne a polimerek nyugalmi súrlódási tényező értékének az ismerete, így képet kaphatunk a polimerek és polimer kompozitok akadósúszás (stick-slip) hajlamáról is. A nyugvó és mozgó súrlódási tényezők együttes, folyamatos meghatározására alkalmas vizsgálati modell a különböző frekvencián működtethető oszcilláló, vagy közismert nevén HFRR (*High Frequency Reciprocating Rig*) [15] vizsgálat. Ide vonatkozó példa kevés [16] a polimer tribológiával foglalkozó szakirodalomban. A módszer korlátozott elterjedése a berendezés bonyolultabb felépítésével és ezzel együtt drágaságával, valamint az eredmények bonyolultabb kiértékelésével magyarázható.

Alapvető kérdés, hogy a kompozitok szerkezetéből adódó sajátosságok hogyan befolyásolják súrlódási jellemzőiket, jelen munkában kiemelten a stick-slip-re való hajlamukat tanulmányozzuk.

Vizsgálatainkban arra keresünk választ, hogy a poliamid és a poli(éter-éter-ke-ton) alapmátrixok és kompozitjaik a csúszósúrlódás megindulását követően milyen hajlamot mutatnak az akadó csúszás kialakítására nagy felületi terhelés alatt. Törekedünk az általános célú és a korszerű, nagyteljesítményű polimerek és kompozitjaik közül választani. További cél az is, hogy egy erre a célra kialakított vizsgálógép és kiértékelési módszer stick-slip jelenségek vizsgálatára való alkalmasságát ellenőrizzük.

Az előbbi célokat a következőkkel érjük el:

– a nagy felületi terhelést a henger/sík modell rendszer alkalmazásával biztosítjuk, amely nem illeszkedő vonalmenti érintkezésével kis érintkezési zónát ad a kopásvizsgálatok kezdetén, acél ellenfelülettel szemben dolgozunk eltérő, normál értékű környezeti paraméterek biztosításával,

*Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet, Gödöllő

– a mérési eredmények kiértékelésére speciális módszerrel különítjük el a statikus és dinamikus súrlódási értékeket.

2. Kísérleti módszerek és eszközök

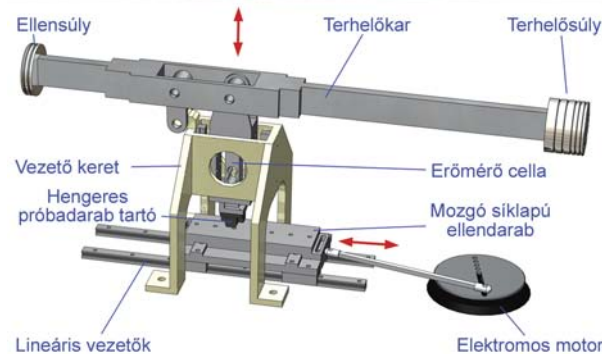
A bevezetésben megfogalmazott célkitűzések megvalósításához henger/sík modell rendszert és acél sík ellenadarabot alkalmazunk. A polimer/acél párok egymáshoz képest külső kenés nélkül, „száraz” lineáris csúszó súrlódású rendszerben, alternáló mozgással mozdultak el.

2.1. Kisméretű próbatetest vizsgálatok henger/sík modell rendszerben

Vizsgálataink legfontosabb célja acélon csúszó polimerek és kompozitjaik súrlódási jellemzőinek a meghatározása kisméretű próbatestekkel. A laboratóriumi vizsgálatok során alkalmazott alternáló modell rendszer henger/sík érintkezési geometriája lehetővé teszi, a próbatest kis méretei mellett, nagy érintkezési nyomás létrehozását. Ezért a nagy terhelésű polimerek súrlódási jellemzőiről várunk eredményeket.

2.1.1. Berendezés

Az alternáló mozgású (reciprocating) triboteszter kísérleti berendezés (1. ábra) egy korábbi munkában [17] már bemutatott PLINT tribométerhez (TE 77 High Frequency



1. ábra. Alternáló mozgású (reciprocating) triboteszter (SZIE, Gödöllő)

Tribotest) hasonló működésű, azonos modell rendszert biztosító és a főbb vizsgálati tartományban vele egyenértékűnek tekinthető. Kifejlesztését az indokolta, hogy a PLINT tribométer költséges, és jelenleg csak egy külföldi partner intézetnél érhető el.

A változtatható fordulatszámú villanymotor tengelyén lévő tárcsa hornyába rögzített csaphoz kapcsolódó tolórúd biztosítja az alternáló mozgást. Állítható a löket és a frekvencia. A vizsgálat alap-dinamizmusát a próbatest alternáló mozgásból eredő gyorsulási és irányváltási szakaszok hozzák létre. Erre szuperponálható a frekvenciaváltozás. A próbatestek statikus terhelése mérés közben nem változtatható. A rendszer méri a súrlódási erőt, a kopást és a súrlódási hőmérsékletet. A mérést a gép központi mérőrendszere biztosítja. A felépítménnyel a rezgő súrlódó hatásnak kitett tribológiai rendszerek modellezhetők.

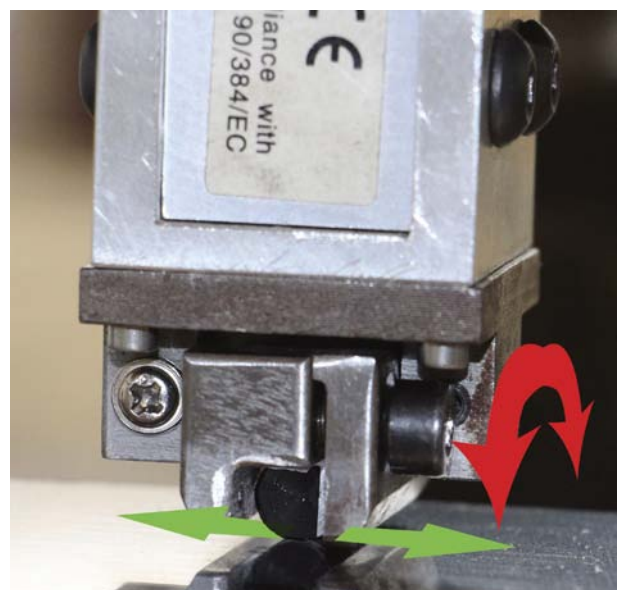
A forgó mozgás átalakítására eltérő kulisszák is használhatók, valamint a súrlódó kontaktus kialakítás is lehet illeszkedő vagy nem-illeszkedő. A mérés abrazív közegben vagy abrazív felületekkel is kivitelezhető. A vizsgálati tartományokat az 1. táblázat szemlélteti.

1. táblázat.

Működési feltételek az alternáló felépítménnyel

Normál terhelés	0–200 N
Lökethossz	0–50 mm
Frekvencia	0–30 Hz

A hengeres polimer próbatestet a 2. ábrán látható módon, párhuzamos szorítólapok közé fogtuk be. A befogófej lehetővé teszi a kisméretű keresztirányú elfordulást, így a próbatest „önbeálló” módon egyenletesen fekszik fel az acél sík ellenadarabra. Ez a megoldás kizárja az oly



2. ábra. A hengeres polimer próbatest önbeálló, elfordulásmentes befogása a mérőfejbe (SZIE, Gödöllő)

sokszor mérési hibát okozó ferde kopást és az ezzel járó egyenetlen csúszási felületet.

Kisméretű, gyorsan és egyszerűen előállítható próbatestekkel, dinamikus hatások biztosításával a vizsgálati rendszer képes mérni:

- a mozgásbeli súrlódás trendjeit, a hozzá kapcsolódó deformációkat és kopásokat, súrlódási hőmérsékletet,
- a statikus súrlódási erő értékeit,
- a statikus és mozgásbeli súrlódási erő közti különbségeket, a jellemző átmeneteket,
- a stick-slip hajlam és jelenség behatárolását adott rendszerfeltételek esetén,
- a felsorolt tribológiai jellemzőket a súrlódási út függvényében.

2.2.2. Vizsgálati paraméterek

A ténylegesen értékelt méréseket számos próbamérés előzte meg a konkrét vizsgálati beállítások meghatározására. A kisméretű próbatest vizsgálatok jellemzőit a 2. táblázatban láthatjuk.

2. táblázat.

Vizsgálati paraméterek

Vizsgálati paraméterek	Értékek
Acél ellendarab felületi érdessége, (R_z , μm , R_a , μm)	1,7 (0,16)
Vizsgálat időtartama, t , s	130
Terhelés, F_N , N	150
Alternáló mozgás frekvenciája, f , Hz	10
Átlagsebesség, v , m/s	0,05
Lökethossz, s , mm	6
Relatív páratartalom, RH , %	50

A vizsgálatokat azonos környezeti paraméterek biztosítása mellett egy terhelési szinten ($F_N = 150$ N) hajtottuk végre. A vizsgálati időt az előkészítő (próba) mérések során 130 másodpercben (csúszási úthosszban ez 7000 mm-nek felel meg) határoztuk meg. Ez elegendő a kezdeti tapadási (statikus) és a csúszási (dinamikus) súrlódási folyamatok megfigyeléséhez és a köztük lévő kapcsolatok értékeléséhez. A mérési időtartamot az adatok nagy száma (közel 32 000 adatsor) és ezek számítógépen való feldolgozhatósága is behatárolta, hiszen az egyes ciklusokhoz is jelentős számú mérési adat (130 adatsor) tartozik. Minden vizsgálatnál azonos (köszörült) felületi érdességű acél ellendarabot alkalmaztunk.

2.2.3. A próbatestek anyaga és előkészítésük

Acél sík lap próbatest

A polimer próbatestek ellenfelülete C45 általános rendeltetésű, ötvözetlen, szerkezeti nemesíthető szénacél. Felhasználási területe az alacsonyabb igénybevételű, de kopásálló alkatrészek, hővezető képessége $46 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, gyártási szabványa jelenleg az EN 10083 [18] (3. táblázat).

3. táblázat.

Az acél próbatest fontosabb anyagjellemzői [18]

	Sűrűség kg/dm^3	Folyáshatár $R_{p0,2}$, N/mm^2	Szakítószilárdság R_m , N/mm^2	Nyúlás A, %
Minimum	7,85	370	630	16
Maximum	7,85	490	850	16

Az acél lap méretei $200 \times 100 \times 12$ mm. Az acél lapok felületének előkészítése során a próbatesteket köszörülték ($R_a = 0,11\text{--}0,18 \mu\text{m} \approx R_z = 1,4\text{--}1,7 \mu\text{m}$).

A köszörülés megmunkálási iránya merőleges volt a mérések során alkalmazott csúszás irányára. A felületi érdességet a köszörülés irányára merőlegesen határoztuk meg.

Hengeres polimer próbatestek

- PA 6E extrudált típust, mint referencia anyagot alkalmaztunk. A PA 6E kedvező kombinációját nyújtja a szilárdságnak, szívósságnak, mechanikai csillapító képességnek és kopásállóságnak, a termék „általános felhasználási célú” poliamid fajtának nevezhető.
- A PA 6G ELS magnézium katalizálású, öntött poliamid 6 vezetőképes változata.
- A PA 6MO (PA 6E+MoS₂) a molibdén diszulfid (MoS₂) tartalom miatt nagyobb szilárdságú és merevségű, mint a PA 6E. Hő- és kopásállósága is jobb, viszont a szívóssága és mechanikai csillapítóképesége rosszabb.
- PEEK natúr. Töltetlen, erősítetlen poli(éter-éter-ke-ton), rövid ideig 310°C-ig, tartósan 250°C környékén használható.

4. táblázat.

A vizsgált polimerek főbb jellemzői [19, 20]

Anyagjel	Szín	Sűrűség g/cm^3	Szilárdság/rugalmassági modulusz, MPa^*	Keményesség Rockwell M ^{**}	Súrlódási tényező, μ^{***}
PA 6E	fekete	1,15–1,16	70–110/3200–3500	M 85–M 98	0,15–0,5
PA 6G ELS					
PA 6MO					
PEEK	barna	1,31	100/4100	Brinell 253 MPa	
PEEK PVX	fekete	1,44	84/5500	Brinell 250 MPa	
PEEK GF30	barna	1,53	180/9500	M 103	0,38–0,46****

*folyási, szakító, nyomó az anyag normál környezeti jellemzők mellett 23°C/50% RH egyensúlyi állapotában értendő

**száraz anyagra értendő

***száraz csúszás simított és köszörült acélon

****edzett acéllal szemben, $p = 0,05 \text{ N}/\text{mm}^2$, $v = 0,6 \text{ m}/\text{s}$

– PEEK PVX (PEEK CF+PTFE+grafit) igazi csapágy fokozat, szén-szál, PTFE és grafit töltőanyagot tartalmaz.

– PEEK GF30 (PEEK+GF 30) 30% üvegszál erősítésű a nagyobb mérettartósság és a magasabb szilárdsági jellemzők érdekében.

A 4. táblázat mutatja a vizsgált polimerek és kompozit fontosabb fizikai és mechanikai jellemzőit, a gyártó katalógusaiban szereplő adatok [19, 20] alapján.

A hengeres polimer próbatest forgácsolással készült, átmérője 8 mm, hossza 10 mm. A 3. ábra a vizsgálatban szereplő műszaki polimer próbatesteket és méretüket szemlélteti.

A hengeres próbatestek köríves palástfelületükkel (nem-illeszkedő), vonal mentén érintkeztek az ellenfel-

let síkjával a mérőgépben. A kompozit irányultsága nem egyirányú szálszerkezetű, homogéne szétosztott összetevőkkel rendelkezik.

3. A mérési eredmények és kiértékelésük

A vizsgáloberendezéshez Spider 8 mérő-átalakító- és rögzítő berendezést kapcsolunk, amely a számítógépes mérőprogramban (CATMAN) valós időben rögzítette a mérés adatait. Az eredményeket Excel programban dolgoztuk fel és elemeztük.

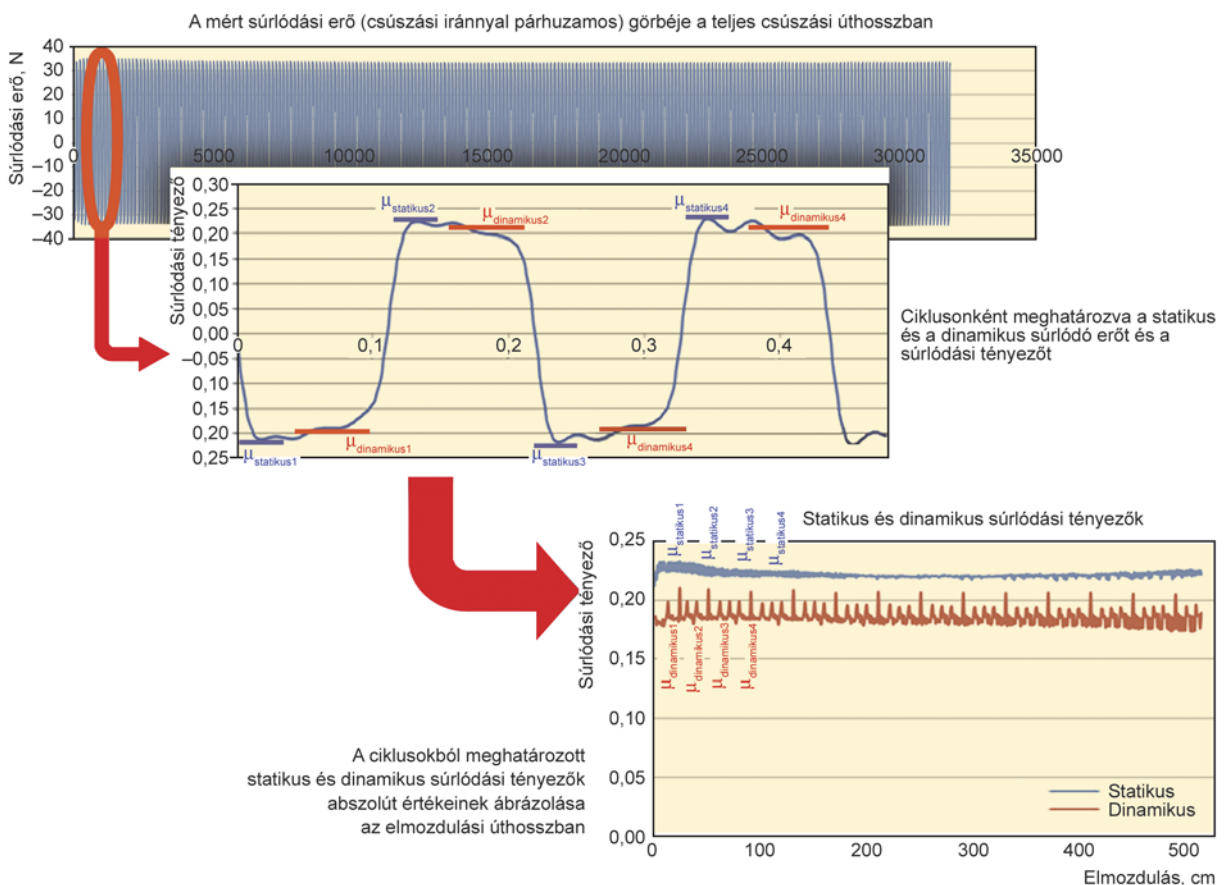
3.1. A súrlódási erők-súrlódási tényezők meghatározása

A súrlódási erőt minden ciklusban az irányváltási helyek között 65 mérési ponttal határoztuk meg. A 4. ábrán

nyomon követhető a statikus és dinamikus súrlódási tényezők löketenkénti (6 mm) meghatározása az alapadatként mért egybefüggő súrlódási erő ciklusgörbéből a csúszási úthossz függvényében.



3. ábra. A vizsgált polimerek és kompozitjaik külső megjelenése és a próbatestek méretei



4. ábra. A löketenkénti statikus és dinamikus súrlódási erők meghatározása a mért súrlódási erő görbéből

A 4. ábrán látható, hogy a súrlódási erők mért, váltakozó előjelű ciklikus görbéje (ábra felső része) ebben a formában nem alkalmas elemzésre. Ebből a görbéből ciklusonként (ábra középső része) kell kinyernünk az oda-, majd vissza löketekhez tartozó indítási maximum (statikus) és mozgásbeli (dinamikus) súrlódási tényezőket.

A súrlódási erő ellentétes előjelei az eltérő irányú (6 mm lökethosszal oda, majd vissza) mozgásból adódnak. A görbe elején, mindkét irányú elmozdulásnál erőcsúcsok jelennek meg, amelyek jelzik a mozgás megindulásához szükséges lényegesen nagyobb erőt (statikus súrlódási erő). Később az erő lecsökken, és bizonyos ingadozásokkal behatárolható értékek között marad (dinamikus súrlódási erő).

A feladat megoldására Excel adatkezelő programban készítettünk egy alkalmazást. Ez szűréssel minden ciklusból csak az két súrlódás értéket emeli ki, majd ezeket új adatsorba helyezve két új görbét kapunk (ábra alsó része) minden polimerhez. Az alkalmazás a normál erő (150 N) és a mért súrlódási erőből a Coulomb összefüggéssel számítja a súrlódási tényezőket is. Így a teljes mérés időtartamára kirajzolhatóvá vált a statikus és a dinamikus súrlódási tényezők görbéje, amelyek már szemléletesek és jól használhatók a súrlódási jelenségek értékeléséhez.

A kopás mélységének változását is folyamatosan rögzítettük légrés mérővel. A csúszási úthosszak rövidege, az alakváltozás és a súrlódási hő fejlődéséből származó lineáris hőtágulás miatt, érthető módon, nem kaptunk használható eredményeket, ezért a kopással most nem foglalkozunk.

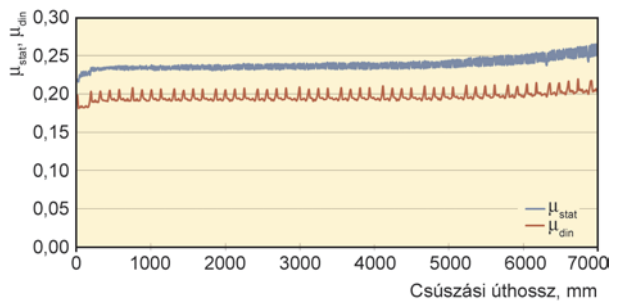
3.2. Vizsgálati eredmények

A vizsgálatok során mind a statikus, mind a dinamikus súrlódási tényező értékeket meghatároztuk. A statikus súrlódási tényezők minden esetben meghaladják a dinamikus súrlódási tényezők értékét, és eltérő mértékben követik azok lefutását.

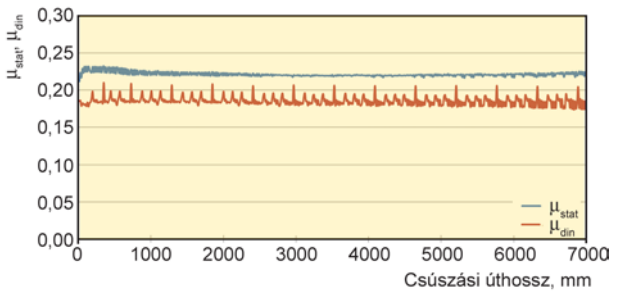
Az 5–7. ábrákon a poliamid és a poliamid kompozitok, a 8–10. ábrákon a PEEK és a PEEK kompozitok súrlódás mérés eredményeit mutatjuk be. Minden esetben három párhuzamos mérésre került sor, az ábrákon minden műanyag esetén egy tipikus görbét emeltünk ki.

A poliamidokra vonatkozó súrlódási görbéken a normál üzemi körülményekhez közelítő környezeti jellemzők mellett általános tendenciák (egyértelmű súrlódási felfutás, majd stabilizálódás) figyelhetők meg. Kismértékű növekedés csak a natúr polimer esetében tapasztalható, egyedül itt haladja meg a statikus a 0,25, a dinamikus pedig a 0,2 súrlódási tényező értéket.

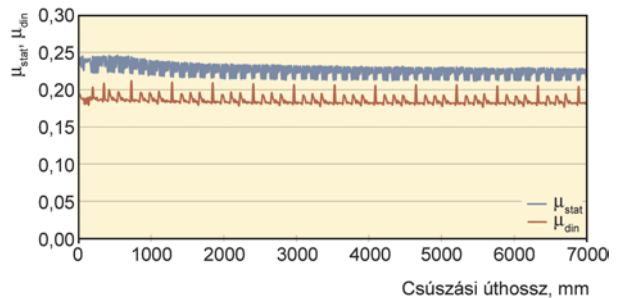
A poliamiddal ellentétben, a PEEK és kompozitjai eltérően viselkednek. A poliamidokhoz képest eleve magasabb értékű a PEEK súrlódási tényezője, ezen a PEEK



5. ábra. A PA 6E polimer acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye (referencia)



6. ábra. A PA 6G ELS polimer acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye



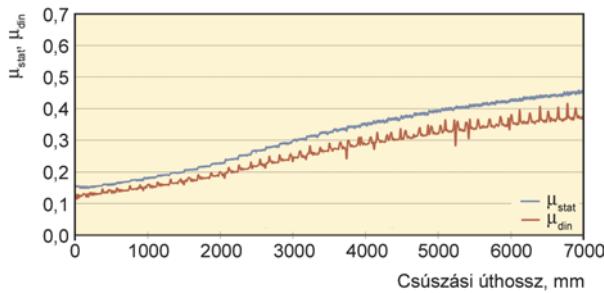
7. ábra. A PA 6MO polimer kompozit acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye

PVX modifikáció javított. Ugyanakkor – ahogyan ez várható is volt – a PEEK GF30 kompozitnál az üvegszál erősítés nagymértékben növelte a súrlódást.

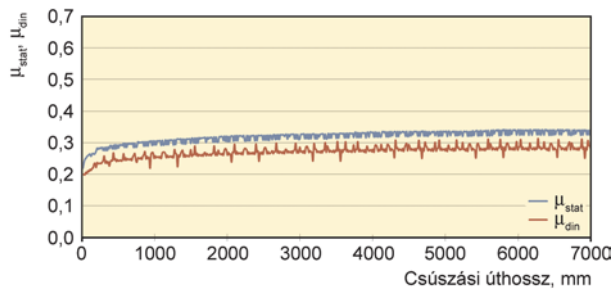
3.3. Az eredmények összehasonlítása és értékelése

A dinamikus súrlódási tényezők értékeit a 11. ábra foglalja össze. Minden műanyagnál a sötét oszlopok magassága a dinamikus súrlódási tényező uralkodó értékét képviseli, ugyanakkor a mérési idő alatt mutatott maximális dinamikus súrlódási tényezőt az oszlop feletti világosabb tartománnyal kiegészítve jelöltük. Az értékek mindegyike három párhuzamos mérés átlagát jelöli, és nem az előzőekben kiemelt görbék konkrét értékei.

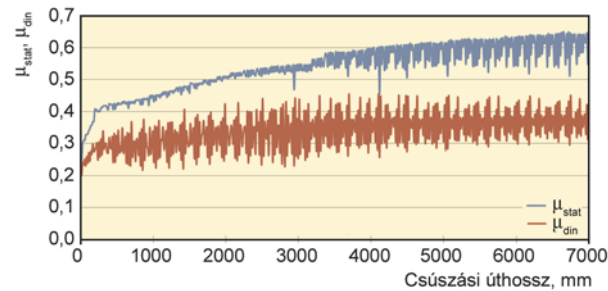
A 11. ábrán jól látható, hogy a poliamidok súrlódására nem voltak lényeges hatással az eltérő modifikációk. Még a stabilizálódott és a kiugró maximum csúcs közötti eltérés (világos diagram oszlop rész) is hasonló nagysá-



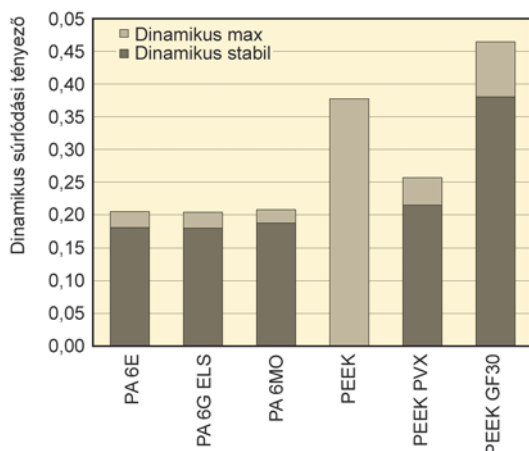
8. ábra. A natúr PEEK polimer acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye (referencia)



9. ábra. A PEEK PVX polimer kompozit acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye



10. ábra. A PEEK GF30 polimer kompozit acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye



11. ábra. Eltérő polimerek és kompozitjaik dinamikus súrlódási tényezőinek stabilizálódott és maximális értékei (csúszási úthossz 7 m, $F_N = 150$ N, $v = 0,05$ m/s, felület: $R_z = 1,7 \mu\text{m}$)

gú mindhárom esetben. A súrlódási tényezők, az adott paraméterek mellett, a műszaki gyakorlatnak megfelelően 0,2 körüli értéket vették fel.

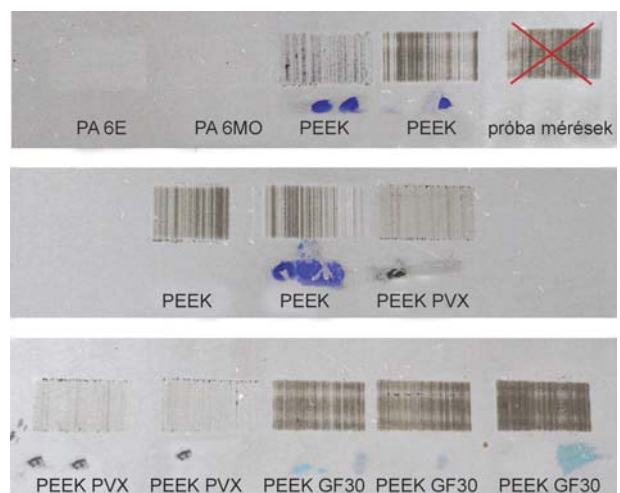
PEEK esetén jóval kedvezőtlenebbek a súrlódási értékek, ami a nagyobb keménységgel és kisebb alakváltozó képességgel is magyarázható. A PEEK kompozitok egyetlen közös hatása a súrlódásra az, hogy időben hamarabb stabilizálják a csúszósúrlódási tényezőt. Ez a natúr PEEK esetében a teljes vizsgálati hosszban sem tudott teljesülni. A PEEK világos oszlopán csak a folyamatos növekedés során elért értéket jelöltük, de hosszabb vizsgálatoknál feltételezhetően ez jóval nagyobb érték is lehet.

Az előbbieken leírt megfigyeléseket jól alátámasztják a 12. ábrán látható kopásnyomok, amelyeket a vizsgálat végén, az acél ellenfelületen láthatunk. A legnagyobb súrlódás értékeket mutató natúr PEEK és a PEEK GF30 hozta létre a leginkább összefüggőbb, a letapadások és a barázdák miatt színben legeltérőbb kopási nyomokat az acél felületén. Ez nem közvetlenül a súrlódás nagyságával függ össze, hanem inkább a vibrációval és a berágódással, amely megfigyelhető volt a mérések során. A poliamidok esetében alig látható, a PEEK PVX-nél pedig csak kismértékű kopásnyom adódott. Ezek a polimerek a vizsgálat során is csendes, vibrációmentes járást tanúsítottak. A kopásnyomokat a későbbiekben mikroszkóppal is megvizsgáljuk.

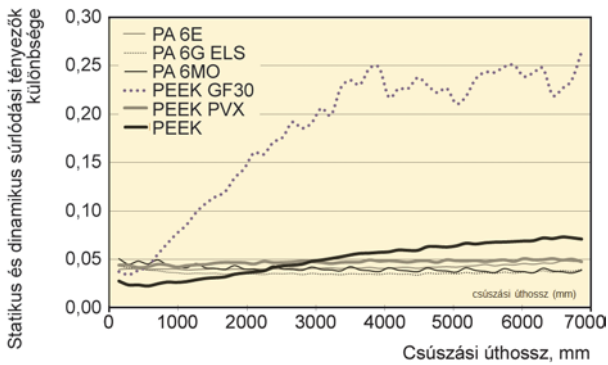
A stick-slip hajlam vizsgálatára szolgál a 13. ábra, amelyen minden polimernél a statikus és a dinamikus görbék különbségét képeztük a teljes csúszási úthossz függvényében.

A 13. ábrán jól látható, hogy mekkora eltérés lépett fel a dinamikus és statikus súrlódási tényezőkben – amint ezt a bevezetőben írtuk –, ez jól jellemzi a vizsgált polimerek stick-slipre való hajlamát. Két fő tendenciát emelünk ki:

- az egyenletes, közel állandó érték mentén alakuló görbék esetében, amelyek a PA 6G ELS, PA 6 MO és a



12. ábra. A vizsgált polimerek acél ellenfelületen megfigyelhető kopás és letapadási nyomai



13. ábra. Eltérő polimerek statikus és dinamikus súrlódása közötti eltérések a csúszási úthossz függvényében (csúszási úthossz 7 m, $F_N = 150\text{ N}$, $v = 0,05\text{ m/s}$, felület: $R_z = 1,7\text{ }\mu\text{m}$)

PEEK PVX-nél láthatók, nem tapasztaltunk sem a vizsgálatok során, sem a súrlódási görbéken, sem a kopási nyomokban stick-slip-re utaló jeleket,

– az eltérő mértékben, de folyamatosan emelkedő PEEK, PA 6E, valamint a kritikus értéket is elérő PEEK GF30 esetében egyértelmű a stick-slip jelenléte a súrlódásban. A vizsgálatok során mindhárom polimernél különböző mértékben, de jól érzékelhetően zaj és súrlódási instabilitás (rezgés) volt tapasztalható (kiemelten a PEEK GF30-nál).

A 14. és 15. ábra a vizsgálatban szereplő, két lényegesen eltérő súrlódású polimer már korábban bemutatott súrlódási görbéinek kezdeti és végső ciklusaiból mutat mintákat.

A 14. ábrán az alapkivitelű natúr poliamid esetében

mind a kezdeti, mind a végső ciklusok egyenletesen, szimmetrikusan helyezkednek el. Ez jól követi a súrlódási eredmények alacsony értékét. A mérés végső szakaszából vett mintákon, szemben a kezdetiekkel, azonban látható, hogy kis mértékben ugyan, de határozottan növekedett az eltérés a csúcserőértékek (statikus) és az azt követő (dinamikus) súrlódási értékek között. Ez a 13. ábrán tárgyaltakkal függ össze, a natúr PA 6E-nél kismértékben, de folyamatosan növekszik a stick-slip-re való hajlam.

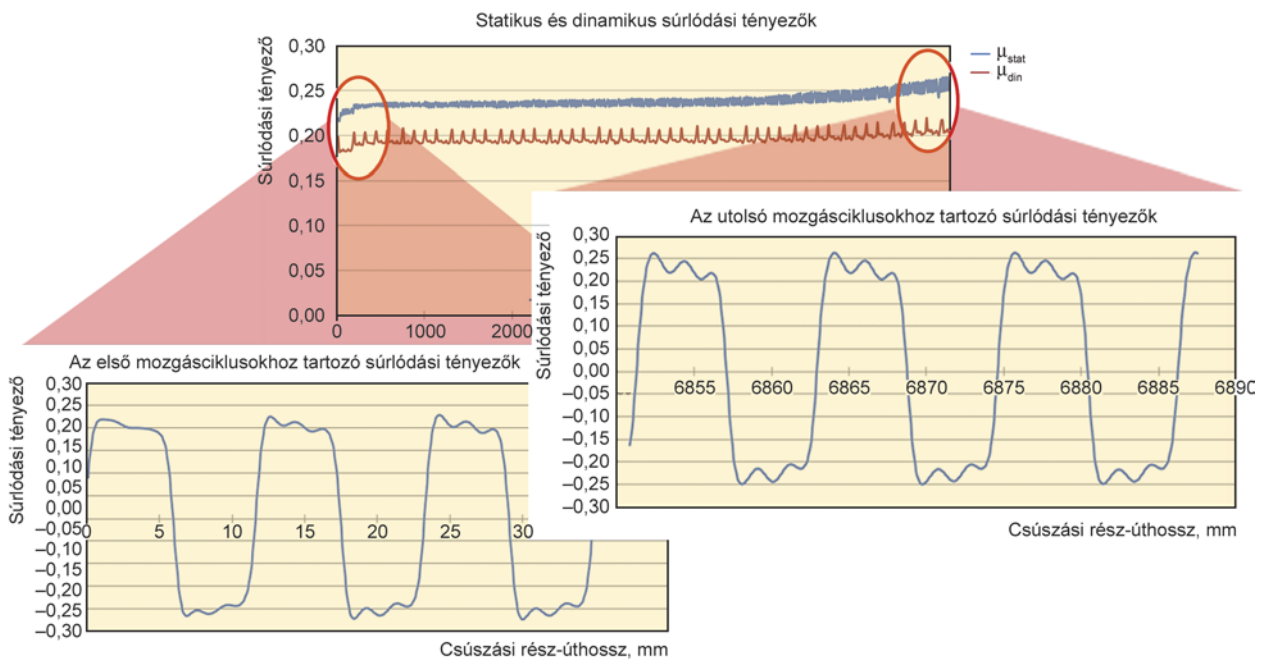
A 15. ábrán a vizsgált anyagok közül a legnagyobb súrlódást és stick-slip hajlamot mutató PEEK GF30 kezdeti és végső ciklusaiból mutatunk példát. Jól láthatók a nagy eltérések mind a súrlódási értékekben (~3 szoros), mind a lefutás jellegében (instabilitás). A görbe kezdeti szakaszában ciklusról-ciklusra megfigyelhető növekvő eltérés a statikus és a dinamikus értékek között a vizsgálat végére már jelentős egyenetlenségekhez és a súrlódás magas értékéhez vezet.

4. Következtetések, összefoglalás

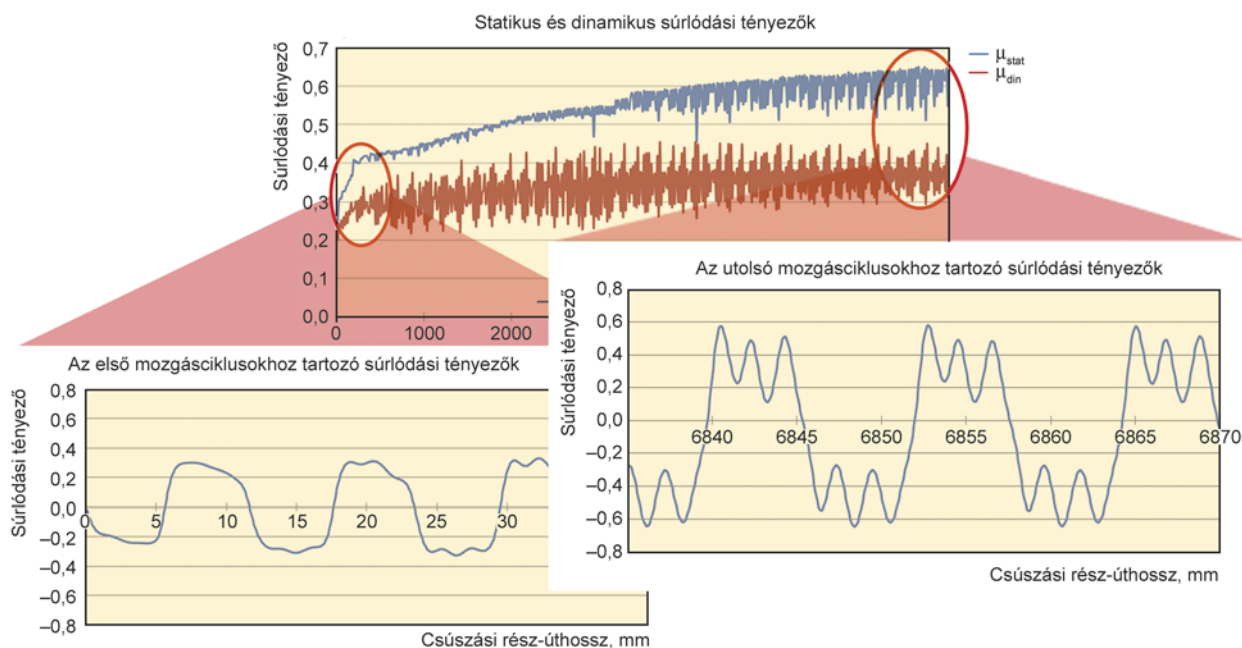
A „műanyag henger–acél sík” páron (cylinder on plate), váltakozó irányú csúszó mozgás esetén végrehajtott vizsgálataink alapján megállapítható, hogy

– a kompozitok súrlódásának mértéke alapvetően függ az alap polimerek típusától, ugyanakkor a belőlük képzett kompozitok összetevőinek típusa eltérő mértékben befolyásolja a statikus és a dinamikus súrlódások közötti eltéréseket,

– poliamidok esetén az összetevő típusa nem befolyásolta döntő mértékben a súrlódást, és csak kis mértékben a statikus és dinamikus súrlódás közötti eltéréseket,



14. ábra. A PA 6E polimer súrlódási görbéiből kiemelt első és utolsó mozgásciklusokhoz tartozó ciklusciklusból



15. ábra. A PEEK GF30 kompozit súrlódási görbéiből kiemelt első és utolsó mozgásciklusokhoz tartozó ciklusgörbék

– poli(éter-éter-keton) esetében nagymértékű eltérések tapasztalhatók, az üvegszál erősítés várhatóan kedvezőtlenül hat a súrlódási jellemzőkre, ugyanakkor a teflon és a grafit adalékolás meghozta a hozzá fűzött reményeket, lényegesen javított a súrlódáson, valamint a statikus és a dinamikus súrlódások közötti viszonyon is.

Munkánk során másik fő célunk magának a vizsgálati és a kiértékelési rendszernek az elemzése volt, hogy alkalmas-e a polimerek akadós csúszásának, „stick-slip”-jének vizsgálatára, melynek során rámutattunk arra, hogy

– a sűrű irányváltásokkal járó alternáló „reciprocating” modell rendszer lehetővé teszi a statikus és dinamikus súrlódási tényezők mérését, így ezek külön-külön és egymáshoz képest is értékelhetők,

– a statikus és dinamikus súrlódási értékek különbségéből képzett görbék a vizsgálatok közbeni megfigyelésekkel összhangban rámutatnak a polimerek stick-slip hajlamának mértékére,

– a látható kopási nyomok jó egyezést mutatnak a súrlódási görbéken látható értékekkel és jellegekkel, jelzésként szolgálnak a súrlódás során fellépő stick-slip okozta berágódásra és letapadásra,

– a henger/sík modellrendszer által biztosított kis érintkezési zóna indításkor közel vonali érintkezést, és így nagy felületi terhelést jelent, ami jelentős deformációs komponens hányadot jelent az indításkor, azonban a későbbiekben, a kopás/deformáció miatt megnövekvő érintkezési felület hatására megnövekszik az adhéziós komponens hatása is. Ez a kis méretek mellett is nagy felületi terhelés lehetővé teszi a túlterhelés vizsgálatokat is.

Korábbi munkánkban [17] rámutattunk a hőmérséklet

szerepére is az alternáló modell vizsgálatokban. Az ott megismert, nehezen hozzáférhető vizsgálati rendszert alapul véve fejlesztettünk ki egy új berendezést, melynél törekedtünk a hibák kiküszöbölésére. További kompozitokat és eltérő beállítási paramétereket használva bővítettük adatbázisunkat. Az így nyert eredményeket más tribológiai modellrendszerben (pin on disc: egyirányú csúszó súrlódással és abrazív koptató felülettel szemben) kapott eredményeikkel is összevetjük, hogy mind szélesebb körben megismerjük a polimerek és kompozitjaik tribológiai jellemzőit és a közöttük fennálló összefüggéseket.

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (BO/00127/13/6) támogatásáért.

Irodalomjegyzék

- [1] Uetz, H.; Wiedemeyer, J.: Tribologie der Polymere, Carl Hanser, Munich, 1985.
- [2] Antal, Gy.; Friedrich, G.; Kalácska, G.; Kozma, M.: Műszaki műanyagok gépészeti alapjai, Minervasop Bt., Sopron, 1997.
- [3] Yamaguchi, Y.: Tribology of Plastic Materials, Tribology Series 16, Elsevier, Amsterdam, 1990; DIN 50322, Kategorien der Verschleißprüfung, Deutsche Norm 50322, Beuth Verlag, 1986.
- [4] Friedrich, K.; Lu, Z.; Hager, A. M.: Recent advances in polymer composites' tribology, Wear, 190/2, 139–144 (1995).
- [5] Byett, J. H.; Allen, C.: Dry sliding wear behavior of polyamide-66 and polycarbonate composites, Trib. Int., 25, 237–246 (1992).
- [6] Zsidai, L.; De Baets, P.; Samyn, P.; Kalácska, G.; van Peltghem, A. P.; van Parys, F.: The tribological behaviour

- of engineering plastics during sliding friction investigated with small-scale specimens, *Wear*, 253, 637–688 (2002).
- [7] Zhang, Z.; Breidt, C.; Chang, L.; Hauptert, F.; Friedrich, K.: Enhancement of the wear resistance of epoxy: Short carbon fibre, graphite, PTFE and nano-TiO₂, *Composites A*, 35, 1385–1392 (1994).
- [8] Sukumaran, J.; Soleimani, S.; De Baets, P.; Rodriguez, V.; Douterloigne, K.; Philips, W.; Andó, M.: High-speed imaging for online micrographs of polymer composites in tribological investigation, *Wear*, 296/1–2, 702–712 (2012).
- [9] Andó, M.; Sukumara, J.: Tribological behavior of composite-steel on rolling/sliding contacts for various loads, *Sustainable Construction & Design*, 2, 29–34 (2011).
- [10] Theiler, G.; Hübner, W.; Gradt, T.; Klein, P.; Friedrich, K.: Friction and wear of PTFE composites at cryogenic temperatures, *Tribol. Int.*, 25, 449–458 (2002).
- [11] Quintelier, J.; Samyn, P.; van Paepegem, W.; De Baets, P.; Vermeulen, J.; Tuzolana, T.; van den Abeele, F.: Wear behaviour of carbon fibre reinforced poly-phenylene sulfide, *Polym. Composite*, 27, 92–98 (2006).
- [12] Samyn, P.; van Paepegem, W.; Leendertz, J. S.; Gerber, A.; van Schepdael, L.; Degrieck, J.; De Baets, P.: Large-scale evaluation of constrained bearing elements made of thermosetting polyester resin and polyester fabric reinforcement, *Journal of Tribology*, 128/4, 681–696 (2006).
- [13] Bijwe, J.; Indumathi, J.; Rajesh, J.; Fahim, M.: Friction and wear behaviour of polyetherimide composites in various wear modes, *Wear*, 249, 715–726 (2001).
- [14] Naga, S. A. R.: Wear behaviour of glass reinforced polyamide 66, in *Proc. of 5th International Conference on Applied Mechanical Engineering*, Cairo, Egypt, 1992, pp. 157–162.
- [15] Oláh, Zs.; Szirmai, L.; Resofszki, G.: A new aspect of the evaluation of diesel fuel lubricity properties, 8th International Conference on Tribology. In: *Proceedings*. 2004. június 3–4. Veszprém pp. 194–197.
- [16] Benabdallah, H.: Friction and wear of blended polyoxymethylene sliding against coated steel plates, *Wear*, 254, 1239–1246 (2003).
- [17] Zsidai, L.; Kalácska, G.; Samyn, P.: A hőmérséklet és a terhelés hatása poliészter/poliészter kompozit tribológiai viselkedésére henger/sík vizsgálati rendszerben, *Műanyag és Gumi*, 50/12, 474–480 (2013).
- [18] www.loksacel.hu
- [19] www.quattroplast.hu
- [20] www.ensinger.ltd.uk
-