



**SZENT ISTVÁN
EGYETEM**

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR, GÖDÖLLŐ



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

MŰSZAKI POLIMEREK „STICK-SLIP” HAJLAMÁNAK TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATA

Készítette: **SINKÓ DÁNIEL**
V. évf. hallgató

Témavezetők: **DR. ZSIDAI LÁSZLÓ**
egyetemi docens
DR. KALÁCSKA GÁBOR
egyetemi tanár



Gödöllő

2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Szakirodalmi áttekintés	5
2.1 „Mi a Tribológia?”	5
2.2 A tribológiai szakterületei	7
2.3 Tribológia történelmi áttekintése	7
2.3.1 Tribológia a történelmi előtti időben	7
2.3.2 Egyiptom- és előázsiai kultúrák kora	8
2.3.3 Görög-római kultúrák kora	8
2.3.4 A tribológia a középkorban	9
2.3.5 A tribológia kultúrtörténete	9
2.4 Súrlódás	9
2.4.1 Csúszó súrlódás	11
2.4.2 Stick-slip hatás.....	12
2.4.3 A stick-slip jelenséget befolyásoló tényezők.....	13
2.5 Szilárd testek kopása	14
2.5.1 Adhéziós kopás.....	15
2.5.2 Abráziós kopás	16
2.5.3 Tribokémiai (oxidációs) kopás	17
3. Kísérleti módszerek és eszközök.....	18
3.1 Bevezetés	18
3.2 Berendezés.....	18
3.3 Vizsgálati paraméterek	19
3.4 A próbatestek anyaga és előkészítésük.....	20
3.5 Hengeres polimer próbatestek	20
3.5.1 TECAMID 66 MH – POLIAMID 66 MH.....	21

3.5.2 TECAFORM AH LA – POM AH LA.....	21
3.5.3 TECAPET TF - PET TF	22
3.5.4 POM AD AF.....	22
3.5.5 TECAGLIDE - PA 6 GLIDE	22
3.6 Felhasznált műanyagok mechanikai tulajdonságainak összehasonlítása	23
4. A mérés.....	24
4.1 Bevezetés	24
4.2 A mérés előkészületei, beállításai.....	24
4.4 A mérés folyamata.....	27
5. A mérési eredmények és értékelésük.....	29
5.1 PA6 GLIDE és PA 66 MH mérési eredménye	30
5.2 A POM AH LA és a POM AD AF mérési eredményei.....	31
5.3A PET TF mérési eredményei	32
6. Az eredmények összehasonlítása és elemzése	34
7. Következtetések, Összefoglalás	36
Mellékletek	37
Irodalomjegyzék	54
Ábrajegyzék	54

1. Bevezetés

A legfontosabb elhasználódási mechanizmusok – korrózió és kifáradás – mellett a legnagyobb problémát a súrlódás jelensége okozza. Azok a kapcsolódó elemek, amelyek mozgásukkal egymásra terhelést adnak át bizonyos fokú csúszást szenvednek, amely súrlódást okoz. A csúszó súrlódás jelensége a mozgásban lévő gépelemeknél idézi elő a felületek kopását, elhasználódását és legvégső esetben pedig az érintkező gépelemek tönkremenetelét. Az alábbi probléma megoldására számos megoldás létezik. Nagyon sok esetben alkalmazott megoldás a megfelelő kenőanyagok alkalmazása, amely egyszerű és költséghatékony megoldást kínál a fennálló problémák kiküszöbölésére. Ha a rendszerünk működési körülményei adottak eltérő anyagpárosítások alkalmazásához, akkor előnyös megoldás lehet a fém és polimer gépelemek alkalmazása. A polimerek alkalmazása tribológiai vizsgálatokat igényelnek. A korábbi időkben alkalmazott vizsgálatok többnyire bonyolultak és jelentős költségeket emésztettek fel, ugyanis egyetlen vizsgálat elvégzésével nem kaphattunk teljes képet a vizsgált rendszer tribológiai viselkedéséről. Manapság a fejlődési irányok révén olyan költséghatékony megoldásokat alkalmazunk, amelyek ugyan szabványos laboratóriumi vizsgálatok, mégis komplex átfogó képet biztosítanak a vizsgált rendszerről. Nagy előnye ezeknek a fejlett mérési rendszereknek, hogy a korábbi large-scale modellek helyett kisméretű (small-scale) próbatesteket alkalmazhatunk, amelyek leegyszerűsítik mind a mérés menetét mind pedig a mérő műszer felépítését. Ezen felül könnyebb a próbatestek megfelelő helyzetbe pozicionálása, könnyen szabályozhatók a környezeti tényezők illetve alacsonyak a költségek. A közelmúltban alkalmazott műszaki műanyagokon végzett kísérletek, vizsgálatok eredményeként egyre szélesebb ismeretanyag érhető el. E kísérletek bizonyították, hogy a műszaki gyakorlatban alkalmazott polimerek tribológiai tulajdonságainak ismerete nem kielégítő. Az ismeretek hiánya az általánostól eltérő jellemzőkkel végzett tribológiai méréseknek köszönhető, mint például a nagy terhelés, kedvezőtlen geometria vagy az eltérő sebességi viszonyok. A laboratóriumi kísérletek nem adhatnak megfelelő adatmennyiséget a tribológiai jellemzők meghatározásához mindaddig, míg nem egyetlen próbatesten végezzük el a méréseket. A különböző mérési paraméterekkel illetve eltérő modellekkel végzett mérések képesek biztosítani a jobb összehasonlíthatóságot. Alapvető kérdésként merül fel a tribológiai vizsgálatok elvégzésének megkezdése előtt, hogy a polimerek illetve a polimer kompozitok szerkezetének sajátosságai hogyan és miként befolyásolják a súrlódási jellemzőket, amelyek kiemelt prioritással rendelkeznek az elhasználódási mechanizmusok területén.

Az fenti gondolatmenetet követően a TDK dolgozatom fő célja acélon csúszó kisméretű polimer próbatestek súrlódásának és súrlódási instabilitásának vizsgálata, ami közvetve jellemzi a stick-slip-re való hajlamot. A vizsgálatomat olyan rendszerben végeztem el, amely lehetővé tette számomra a váltakozó irányú csúszó súrlódás vizsgálatát. A polimer – acél párok egymáshoz képest alternáló mozgással mozdulnak el külső kenés alkalmazása nélkül és állandó statikus erőhatás mellett. A vizsgálat során alkalmazott kisméretű próbatestek lehetővé teszik a nagy nyomást az érintkező él mentén, ezért a nagy terhelésű műanyagok jellemzőitől várunk eredményt.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1 „Mi a Tribológia?”

A kifejezés 1966 márciusában jelent meg először egy bizottság közleményében, amelyet a brit tudományos és oktatásügyi miniszter hozott létre. Ennek a brit bizottságnak egyetlen fő feladata volt, ami nem volt más, mint a kenéssel kapcsolatos összes kutatási eredmény, illetve ismeretek összegyűjtése, amelyekkel az ipar által támasztott igények kielégíthetők. A britek oly jelentős mértékűnek találták ennek az új fogalomnak a honosítását, hogy annak nevét jelentésének címébe is belevették. A szó megalkotása a német születésű, de Angliában élő és dolgozó *Peter Jost* nevéhez fűződik. Azóta a tribológia tudománya önálló egységet képez a mérnöki tudományok terén. Ugyan csak megkérdőjelezhetetlen, hogy a tribológia mai napig is egy rendkívül összetett és alapvetően kísérletező tudomány.

A tribológiának, mint egy inter- és multidiszciplináris tudományágnak legtalálhatóbb mai meghatározása *Yves Berthier* nevéhez fűződik, aki a következőképp vélekedett e tudományág meghatározását illetően:

„A tribológia tudomány a tudományok útkereszteződésében”

[Eleőd, 2009.][1]

A tribológia új tudománnyá nyilvánítását 1966 –ra datálják, amikor a vizsgálatok és különböző mérések során felgyülemlett kenésméleleti anyagok illetve a gyakorlatban szerzett tapasztalatok alapot adtak eme új szó megalkotásának. A tribológia szót a görög *τριβειν* = **súrlódás** és a *λογος* = **tudomány** szavak képezik. A tudomány rövid megfogalmazása a következő:

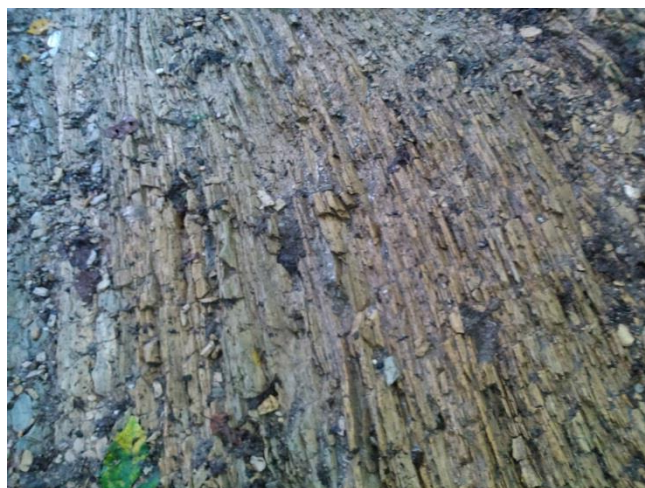
„A tribológia a kölcsönösen egymásra ható és egymáshoz viszonyítva elmozduló felületek tudománya és technológiája, egyben felöleli az ezzel kapcsolatban álló gyakorlati intézkedéseket.”

Az alábbi meghatározás szerint a tribológia tudománya jelentős területeket ölel fel, amelyek közé sorolható a súrlódás, kopás és a kenés folyamatának tudománya, illetve a gépelemek tribológiai tervezése. Ezeken felül számos területet foglal magában, mint például a szerkezeti anyagok viselkedésének, működésének tulajdonságait, valamint a súrlódó gépelemek optimális környezetének meghatározását. Azonban egyre nagyon teret nyer a műszaki polimerek és kompozitjainak tribológiai viselkedésével foglalkozó kutatási tevékenységek. Ezek a tendenciák rohamos növekedést mutatnak. A fejlődés nem csak a vizsgálati anyagok

területén, hanem a vizsgálati módszerekben is jelentős. [12-13]. A gyors fejlődésnek köszönhetően az alap polimereken kívül egyre lényegesebb a polimer kompozitokkal folytatott vizsgálatok. Korábbi kutatási eredményeknek köszönhetően számos forrást találunk a szakirodalomban, amelyekben polimer kompozitokkal végeztek kísérleteket találunk eltérő súrlódási rendszerekben. [14-15].

Alapvetően a súrlódás és tribológia tudománya nem csak a műszaki gyakorlatban, a műanyagoknál vagy éppen a súrlódó gépelemeknél figyelhető meg. Az említett területek kívül a gyakorlati életben is jól kimutathatók az eróziós jelenségek és más számos geológiai felületromboló hatás, amelyek a szélnek, esőnek, folyóvizeknek vagy akár az ár-apály ingadozásának tudható be. Az 1.ábrán látható sziklapart Eger hegyvidékén készült, amin nagyon jól megfigyelhető a heves esőzések által lehordott törmelék és a víz koptató hatása, amely igen érdekes felületet alakított ki. A laza talajt lemosta a sokkal szilárdabb és szívósabb közegről.

[Valasek, 1996.][2]



1. ábra Eső által kimosott sziklapart

A tribológia jelenségének tudatosulása az emberek számára kezdetben a megfigyelések és tapasztalatok alapján történt, mint például a folyóvizek vagy akár az ár-apály jelensége. A technika és a különböző tudományágak fejlődésének köszönhetően egyre több szakterületen fedezték fel, látott napvilágot a kenés tudománya. Az orvostudomány gyors fejlődésének köszönhetően hamar napvilágra került az emberi szervezet részét képező „ízületi nedv” jelenléte, amely az ízületek között egyfajta kenőanyagként szolgál a súrlódás csökkentése érdekében.

A nem teljes felsorolásból tökéletesen látható, hogy a tribológia tudománya és annak különböző szakterületei rendkívül széles skálán mozognak. A tribológia igazából egyfajta alaptudománynak tekinthető. Ennek az alaptudománynak számos szakterülete van.

2.2 A tribológiai szakterületei

TRIBOKUTATÁS

Jelenség vizsgálat

A jellemző nagyság kölcsönös függőségének és a fennálló törvényszerűségeknek mérés technikai meghatározása

TRIBOTECHNIKA

A tribológiai ismeretek technikai alkalmazása

TRIBOFIZIKA

a tribológiai folyamatok fizikai jelenségeinek vizsgálata

TRIBOKÉMIA

A tribológiai folyamatok kémiai és fizikai-kémiai jelenségeivel foglalkozik.

TRIBOLÓGIAI IGÉNYBEVÉTEL

Azon igénybevételek összessége, amelyeket a relatív mozgás és a felületek kölcsönhatása jellemez. [Valasek 1996.][2]

2.3 Tribológia történelmi áttekintése

A korábban említett problémákkal az emberek létezése óta foglalkozni kellett. A tribológia tudományának történelme nagy múltra tekint vissza egészen az emberi civilizáció kialakulásáig, hiszen a súrlódás az emberek életében óriási szerepet játszott, annak ellenére, hogy nem tudatosult bennük a jelensége mögötti tudományos háttér.

A következőkben tegyünk egy kis kitekintést a tribológia fejlődésében az őstörténetétől kezdve egészen napjainkig.

2.3.1 Tribológia a történelmi előtti időkben

A történelem előtti időkben a legfontosabb tribológiai hatású felfedezések mind empirikus úton történtek. Ehhez a véletlen felfedezésekhez köthetők az emberiség egyik legnagyobb felfedezései a pattintott kő és az ezt magával hordozó **tűzgyújtás szikrakeltés útján**. A tribológia fejlődése, lavinaszerűen a történelem múlásával egyre több eseményt hozott

magával. Ezek közé sorolható a kőcsiszolás felfedezése, szerszámok élesítése, csontfűrők feltalálása, az anyagművesség kezdetével a formázókorong felfedezése.

A kőeszközök koptatással történő kialakítása nagy fejlődést biztosított az akkori korban élő emberek számára. A koptatás útján kialakított tárgyak számos funkció ellátására alkalmasak voltak többek között vadászat vagy az élelem felaprítása. [Dr. Jenei, Ladányi 2013][3]

2.3.2 Egyiptom- és előázsiai kultúrák kora

Az egyiptomi és előázsiai kultúrák korában a tribológiával kapcsolatos találmányok és felfedezések száma rohamosan megnőtt. Ez az ugrásszerű fejlődés a monumentális építkezéseknek volt betudható, amikor is az egyes építőelemeket vagy monolit szobor-kolosszusokat kellett nagy távolságokra szállítani. Legjelentősebb emlékei az istenek tiszteletére emelt templomok, és a halottkultusz szolgálatában álló monumentális sírépítmények, templomok, emlékművek vagy paloták. Ámbár nem szabad kifelejteni a sorból a történelem mai napig fennálló csodáit, amit az ókori emberek építettek. Ezek voltak a piramisok. A piramisokat felépítő elemek, illetve egyéb nagy tömegű szobrok, épületelemek szállítására csúsztató szánt használtak, amely segítségével a teher mozgatása jóval könnyebbé vált az akkori ember számára. A szán talpának csúszófelülete kisebb méretű volt, mint a szállítandó test és a talaj közös érintkezési felülete.

2.3.3 Görög-római kultúrák kora

A Ókori Rómában és Görögországban felfedezett maradványok és leletek mind technikailag mind pedig tribológiailag fejlett kultúrára vezethetők vissza. E korszakban ugrásszerűen megnőtt az olyan találmányok felfedezése, amelyek a mai napig létező mechanizmusok, sőt a műszaki világnak meghatározó elemei, mint például a fogaskerék vagy akár a bronz csapágy. A technika fejlődése ebben az időszakban virágkorát élte. I.e. 550 –ben Theodoros feltalálta az esztergát, és őt tekintjük az első tribológusnak. I.e. 350 –re tehető azaz idő, amikor is Aristoteles definiálta a súrlódás fogalmát és kimondta, hogy a hengeres testek súrlódása a legkisebb. Az uralkodó Nagy Sándor gépészenek nevéhez fűződik a lineáris fagörgő csapágy felfedezése, amelyet a faltörő koshoz alkalmaztak I.e. 300 környékén. Egy nagyon fontos felfedezés fűződik az alexandriai Ktesibios nevéhez, aki I.e. 300 körül feltalálta a fogaskereket és a fogasrudat, amit akkoriban időmérő műszerben alkalmaztak.

[Valasek, 1996][2]

2.3.4 A tribológia a középkorban

A középkor a tribológia fejlődéstörténete számára is sötétnek számít. Mindez abban nyilvánult meg, hogy a gyakorlat és a felfedezőkedv is visszaesett. A fém megdrágulása miatt a fa gépelemekhez kellett visszanyúlni. Így a korábbi bronz és fémcsapágy helyett a fából készült gépelemek kerültek előtérbe. A faanyagok kenésére állati zsírt és növényi olajokat használtak. A középkorban egy ideig feledésbe merült a vízikerek, de az idő múlásával újra felfedezésre került, sőt az esztergát és a fémcsapágyakat is újra használták. Az 1200 –as években megjelent a rokka. Erre az időre tehető a nyílpuska felhúzó műveiben a csigahajtópár alkalmazása [Valasek, 1996; Jenei, 2013] [2],[3]

2.3.5 A tribológia kultúrtörténete

A késő gótika és korai reneszánsz tribológiai jellegű felfedezései kialakították azt a helyzetet, hogy a mennyiségi fejlődést felváltsa egy különlegesebb minőségi fejlődés. A döntő változást 1500 –as évekre datálják és ettől az időponttól számítható a tribológiai kultúrtörténete. Ebben az időszakban megélénkült a természettudományok, a technika és a művészetek iránti érdeklődés, a könyvnyomtatásnak köszönhetően jelentős mennyiségű műszaki rajz és könyv készült. Leonardo Da Vinci a korszak egyik legnagyobb tudósa egyre nagyobb érdeklődést mutatott a művészetek és tudományok iránt, aminek meg is lett az eredménye. Felfedezte a súrlódás két alaptörvényét, amit ma Coulomb első és második törvényének nevezünk. Megállapította, hogy „Minden mozgó test a saját súlya negyedrésszének megfelelő súrlódási ellenállást fejt ki”. Kúp-, csavar és globoidkerekes hajtásokat tervezett. Ezek a felfedezések már a tribológia tárgykörébe tartoznak, és ettől számítva a súrlódás, kopás és kenés vizsgálata a technika hasznosítása érdekében folyt tovább. Míg Leonardo a súrlódás jelenségével foglalkozott, addig B. Pascal a hidrosztatikai paradoxon jelenségén munkálkodott és megalkotta a nyomás terjedésének törvényét.

2.4 Súrlódás

Amikor két mozgó gépelem felülete érintkezésbe kerül egymással, és fennáll a lehetősége a csúszásnak, a felületeken a mozgást akadályozó jelenség lép fel. Ez a jelenség nem más, mint a súrlódás, amit akkor tapasztalunk, ha két érintkezésben lévő szilárd test egymáshoz képest ellentétes irányba elmozdul. Ez a testeknek egyfajta oszcilláló mozgását jelenti. A súrlódó felületek dinamikus rendszerben történő vizsgálatából kimutatható hogy a rezgések és a súrlódás egymással szoros kapcsolatban állnak. Számos kísérlet és vizsgálat ellenére nincs

egy általánosan elfogadott elmélet a tribológiában a súrlódás jelenségének felfedezésére. A súrlódás okozta rezgések időben változóak, nem lineárisak, sztochasztikusak. A tribológiai és mechanikai vibráció két különböző területen volt megtalálható. Azonban, a jelenlegi gyors fejlődésnek köszönhetően a súrlódás-rezgés kölcsönhatásának területén, a mérnökök és tudósok elkezdtek foglalkozni a hatalmas mennyiségű gyakorlati esetek elemzésével, analizálásával.

[Gang Sheng Chen, 2014][4]

Az első súrlódással kapcsolatos törvények felfedezése Leonardo Da Vinci nevéhez fűződnek, aki felismerte, hogy a súrlódás során fellépő terhelő erő és a súrlódási erő között összefüggés van. A külső súrlódási ellenállás nagyságát elsőként Amonton fogalmazta meg. Ez az úgy nevezett Coulomb-féle súrlódási törvény:

$$\mathbf{F}_s = \mu \cdot \mathbf{F}_n$$

[Keresztes, 2009][5]

[Kalácska, 2007]: A súrlódás jelensége elmozdulást vagy mozgást akadályozó hatás, amely az anyagok belsejében vagy a két anyag érintkezési felületén alakul ki. A súrlódás csoportosítása számos szempont szerint lehetséges:

- külső és belső súrlódás
- csúszó és gördülő súrlódás
- nyugvó és tapadó súrlódás
- kenésállapot szerint száraz, határ, vegyes és folyadéksúrlódásról beszélhetünk

[Kalácska, 2007][7]

[Valasek, 2002][6]: A súrlódás csoportosítása:

A súrlódás jelenségének csoportosítása leggyakrabban a megjelenési formájuk szerint történik. Ez lehet külső és belső súrlódás.

- Belső súrlódás: A belső súrlódás tulajdonképpen nem más, mint az a nyíróerő (viszkozitás), amely az anyag belsejében az alakváltozással szemben hat. A folyadékokban található szilárd részecskék, atomok, molekulák elmozdulása által keltett ellenállás.
- Külső súrlódás: Olyan akadályozó hatás, amely az egymással kölcsönhatásban álló szilárd testek felszínén vagy annak közvetlen közelében alakul ki. Ez a fajta súrlódás nemcsak energiaveszteséggel és hőfejlődéssel, hanem anyagveszteséggel, azaz kopással jár. A műszaki gyakorlatban a külső súrlódás meghatározása okozza a

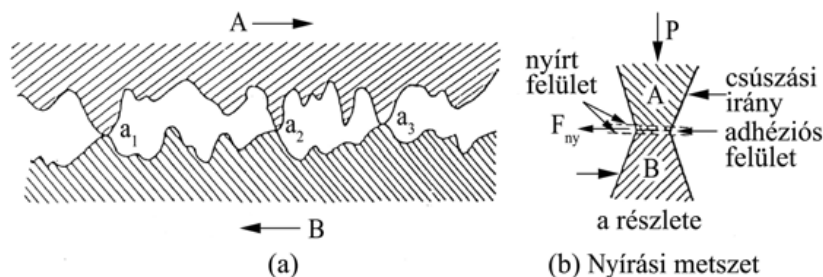
legnagyobb fejtörést, mert annak kialakulását, nagyságát és törvényszerűségeit nagymértékben befolyásolja az érintkező felületek jellege, az érintkezett felületek felszínének állapota illetve az esetleges felületi bevonatok milyensége.

[Valasek, 2002; Kalácska, 2007][6],[7]

2.4.1 Csúszó súrlódás

A csúszó súrlódás jelensége a csúszás megindulása utáni mozgásállapot jellemzője. Az egymáshoz képest relatív elmozdulás során a felületek között ha nem található bármilyen viszkozitással rendelkező anyag (folyadék vagy gáznemű) akár kenőanyag vagy szorpciós film réteg, akkor száraz súrlódásról beszélhetünk. Tiszta súrlódás jelenléte nagyon ritka és kevés esetben jelenik meg, ugyanis a súrlódó felületek között mindig található abszorbeálódott anyagok, oxidok, gázok, amelyek a súrlódás mechanizmusára nagy hatással vannak. A szakirodalmak szerint számos magyarázat és megközelítés lehetséges a csúszás jelenségének magyarázatára, de a leginkább elfogadott elmélet az úgynevezett „adhéziós nyírás elmélet”, amelyet *Bowden* és *Tabor* kutatásai alapján tártak fel.

A szilárd testek érdességi csúcsai a terhelés hatására belapulnak, a keményebb érdességi csúcsok a lágyabb ellendarabba benyomódnak. Ez a benyomódás az elmozdulással szemben ellenállást fejt ki. Ezt az ellenállást nevezzük súrlódási ellenállásnak, amelyet az elmozdulással párhuzamos F_s erővel szoktak kifejezni.



2. ábra Csúszó érintkező felületek makroszkopikus metszete

Két test súrlódása során szabad szemmel megfigyelhető hogy az érintkező felületek teljes egész kiterjedésükben tökéletesen illeszkednek egymáshoz. Azonban az anyagok felületei közel sem tökéletesen sima képet mutatnak. A felületek érdessége, minősége az előállítás vagy akár a megmunkálás hatására változik. A 2.ábrán jól megfigyelhető, hogy a valóságos érintkezési felület jelentős mértékben kisebb, mint a látszólagos érintkezési felület. A két felület kapcsolata az ábrán jól látható a_1 , a_2 , a_3 pontokban található. Az „A” és a „B” testek elmozdulása abban az esetben történhet meg, ha ezek az a_1 , a_2 , a_3 pontokban kialakuló érintkezések elnyíródnak. Amikor a felülettel párhuzamos erőhatás legyőzi a tényleges

érintkezési felületeken kialakuló adhéziós kapcsolatok nyírószilárdságát és a benyomódott érdességi csúcsok ellenállását, a két test egymáson elmozdul, mozgó súrlódás alakul ki. A csúszáskor kialakuló súrlódási erő meghatározásánál két hatást kell figyelembe venni. Az adhéziós kapcsolatok által kifejtett ellenállást és a deformációs hatást.

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_{sa} + \mathbf{F}_{sd}$$

Az adhéziós összetevő nagysága a tényleges érintkezési felülettel és az adhéziós kapcsolat nyírószilárdságával arányos: $\mathbf{F}_{sa} = \mathbf{A}_t \mathbf{R}_{nyi}$

A deformációs összetevő nagysága pedig a barázda keresztmetszetétől és az anyag ellenállásától függ: $\mathbf{F}_{sd} = \mathbf{A}_b \mathbf{R}_b$

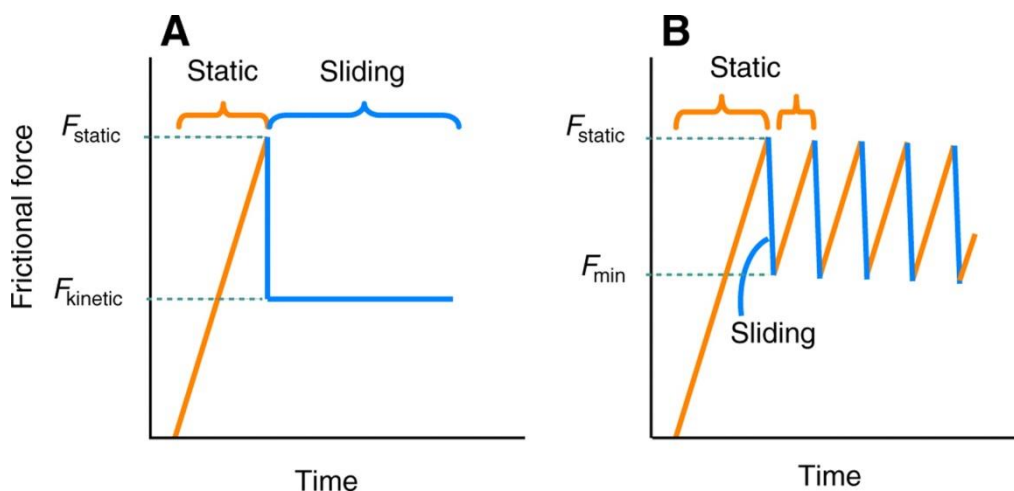
[Keresztes, 2009; Valasek, 1996][5],[2]

2.4.2 Stick-slip hatás

[Dr. Jenei][3]: Dr Jenei István szerint az akadozó súrlódási állapot lassan mozgó gépelemeknél többek között csúszóvezetékeknél fordul elő. A kis csúszási sebességnek köszönhetően a mozgás egyenlőtlen, lengésszerű vagy ugrásszerű változások sorát mutatja. Az akadozó mozgás oka, hogy a hajtásrendszer rugalmas alakváltozást szenved, vegyes súrlódási állapotban a nyugvási és mozgásbeli súrlódási tényezők értéke különböző és a súrlódási tényezők értékének változása a csúszófelület sebességétől nem lineárisan függ. A nyugvásbeli súrlódási tényező függ a két felület összeakadási idejétől. Nyugvásbeli súrlódási tényező mindig nagyobb, mint a súrlódásbeli tényező. [Dr. Jenei, 2013][3]

[Brian Armstrong-Hélouvry]: Brian Armstrong-Hélouvry az alábbi módon vélekedett a stick-slip hatásról. Amikor a mozgás nagyon kis sebességgel történik, a mozgásban lévő gépelemek akadozó csúszást mutatnak (stick-slip hatás). A lassú mozgás mellé az úgynevezett alternáló mozgás párosul. A Stick-slip hatás határozza meg a mozgó mechanizmusok kisebb teljesítmény határait: a legalacsonyabb fenntartható sebesség és a legrövidebb irányíthatóság. Azoknál az alkalmazásoknál, ahol nagyon precíz mozgást végeznek a testek, megérteni a stick-slip hatás dinamikáját továbbá nagy prioritást élvez a hatás megszüntetése.

[Brian Armstrong-Hélouvry, 1993][8]



3. ábra Stick-Slip hatás szemléltetése

Alapvetően a stick-slip jelenség kialakulásának fő oka az indítási és mozgási súrlódási ellenállás különbsége (3.ábra). Az F_s az indításkor kialakuló súrlódási erő, az F_k pedig az indítást követően a csúszó mozgás során fellépő súrlódási erő. A súrlódás akkor akadozik, amikor az $F_s > F_k$. Ha viszont az $F_s < F_k$, akkor az indítási ellenállás legyőzése után nő a súrlódási erő, amíg az F_k értéket el nem éri. Ilyen helyzetben a csúszás akadásmentes lesz.

Az akadozó csúszás elkerülhetőségének lehetőségei:

- a hajtás rendszer megfelelő merevsége
- a rendszer megfelelő csillapítása
- megfelelő csúszófelület kiválasztása
- a súrlódó felülethez jól tapadó, $\frac{\mu_s}{\mu_k} \leq 0,8$ hányadost adó, megfelelő súrlódási tényezővel rendelkező kenőanyag kiválasztása

2.4.3 A stick-slip jelenséget befolyásoló tényezők

Az akadozó csúszás jelenségének kialakulása többnyire rendszerfüggő, de paraméterfüggő is. Alapvetően adott sebességérték felett nem tapasztalhatjuk a jelenséget, ez a kritikus sebesség. Továbbá számos olyan paraméter van, ami a stick-slip kialakulásához vezethet. A hőmérséklet is igen jelentős mértékű befolyásoló hatással bír. Az akadozó csúszás kb $\mu_{(t)} > 0,4$ tapadási súrlódási tényezőnél lép fel. A felületi érdesség jelentősen befolyásolja az akadozó csúszás jelenségét. A felületi terhelés csökkenésével a csúszó súrlódási tényező is csökken. Ellenben a túl sima felületeknél fennáll a letapadás veszélye, ilyen szempontból a kerámiák különösen figyelmet igénylő csoportot képviselnek. A súrlódó rétegek között

felhasznált kenőanyagok segítségével csökkenthető, vagy jobb esetben teljesen kiküszöbölhető a csúszó lengések. [Valasek,2002][6]

2.5 Szilárd testek kopása

A súrlódás során a mechanikai, termikus és vegyi igénybevételek hatására az egymással kapcsolatban lévő mozgó felületekről anyagrészecskék válnak le, így a felület mérete, alakja megváltozik. Az alak- és méretváltozás a felület károsodását jelenti, amely a működése szempontjából megengedett vagy nem megengedett károsodás. A kopás egy lassú és fokozatosan felépülő károsodási folyamat, amely a szerkezet működésének velejárója, gazdaságilag nem kiküszöbölhető. A gyors kialakulású kopások a karcolások, bemaródások, összehegedések. A berágódások nem tekinthetők normális kopási folyamatnak, mert olyan változásokat okoznak a felületeken, amelyek rövid idő alatt működésképtelenné teszik a szerkezetet. A kopás nagyságának meghatározása elengedhetetlen egy súrlódó szerkezet működtetéséhez, ugyanis a leváló anyag mennyisége nagymértékben befolyásolja a szerkezet működését. A kopás nem más, mint anyagvesztés, amelyet alapvetően a leváló anyag tömegével vagy térfogatával jellemeznek. [Kalácska, 2007][7]

Dr. Jenei [2013] a kopás mértékét két csoportra osztotta, enyhe kopás és erős kopás. Az enyhe kopás a működés során megjelenő, elengedhetetlen, kiküszöbölhetetlen kopásforma. A tönkremenetel formája rendszerint erős adhézió következtében alacsony hőmérsékleten hideghegedéses, berágódás; magas hőmérsékleten meleg berágódás, erős adhéziós kopás, illetve eróziós kopás, intenzív súrlódási korrózió. Az enyhe kopás a legfelső felületi réteg leválását jelenti, amikor a felület viszonylag sima marad, a szerkezet hosszú időn át megőrzi működőképességét, és vékony, lemez alakú, erősen oxidált kopási részecskék keletkeznek.

Erős kopásnál anyagrészek szakadnak ki, a felület erősen feldurvul, a szerkezet működőképessége leromlik, vagy meg is szűnik, nagyméretű, főleg alapanyagot tartalmazó, kopási szemcsék keletkeznek. Ezt a kopásformát nem megengedhető kopásformának tekintik, a szerkezet azonnali tönkremeneteléhez vezet. [Dr. Jenei,2013][3]

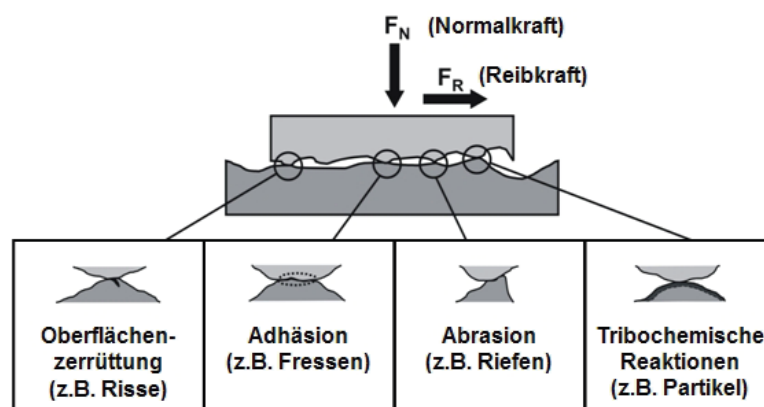
Kalácska [2007][7] megkülönböztette az alábbi kopási formákat:

- adhéziós kopást,
- abráziós kopást,

- fáradásos kopást,
- oxidációs (tribokémiai) kopást,
- frettinget (súrlódási korrózió)
- eróziós kopást,
- kavitációs kopást,

[Kalácska, 2007][7]

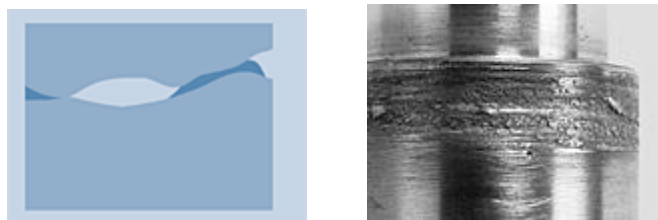
Rolf Prehn [2006][9] szerint egy rendszer technikai funkciójának leírása és a szűk keresztmetszetek meghatározása általában könnyedén elvégezhető. A kopási mechanizmusok pontos meghatározása viszont igen nehéz és bonyolult feladatok sorozata, ugyanis gyakran több tribológiai probléma lép fel egyszerre. Alapvetően négy fő kopási mechanizmust különítünk el (4.ábra). [Rolf, 2006][9]



4. ábra 4 fő kopási mechanizmus

2.5.1 Adhéziós kopás

Az adhéziós folyamat nagy felületi nyomás hatására, elsősorban fémek között alakul ki, amikor a súrlódó felületek egymáshoz képesti mozgása viszonylag kis sebességgel történik. A sebességen kívül a folyadékkenés vagy oxidhártya hiánya is okozója lehet a hegedéses kopásnak. A súrlódó felületek rossz kenési és kontaktviszonyai vagy szárazfutás esetén tapadási kötés alakulhat ki. Általában ez a fajta kötés hasonló anyag összetételű vagy nagy tapadási hajlamú anyagok esetén jön létre. Az adhéziós kopás a súrlódás során a tényleges érintkezési felületek kialakuló adhéziós kapcsolatok elszakadásakor létrejövő anyagvesztésre vezethető vissza, ami súlyos felületi károsodásokkal, berágódással járhat (5.ábra).



5. ábra Adhéziós kopás

Az adhéziós kopás ellen kenéssel védekezhetünk. A poláris molekulákat tartalmazó kenőanyagok erősen abszorbeálódnak a felületbe és hatékonyan csökkentik a súrlódást és az így kialakuló kopást. A gyakorlatban nagyobb igénybevételek fellépése esetén az adhézió megakadályozására kémiai reakció rétegeket visznek fel a felületre. A kopás teljes megakadályozására egyik módszer sem alkalmas, viszont sokkal enyhébb kopásformák kialakulásához vezethet (korróziós kopás). [Kovács Tünde, 2007][10]

2.5.2 Abráziós kopás

Az abrazív kopás kialakulása a kemény súrlódó felületek érdességi csúcsainak köszönhető, amikor is a súrlódás során a felületbe nyomódó kemény részecskék vagy érdességi csúcsok mélyedéseket, barázdákat, karcolásokat hoznak létre a lágyabb ellendarabban. A mélyedések keletkezésekor a kinyomódó anyagmennyiség bekerül a súrlódó felületek közé így szintén koptató anyagként fog megjelenni. Az abráziós kopásból származó anyagmennyiség függ a barázda keresztmetszetétől, a benyomódó csúcs alakjától, az elmozdulás nagyságától vagy a súrlódás úthosszától. Számos kísérlet eredmény szerint az abráziós kopás döntő mértékben az anyag keménységétől függ (6.ábra).



6. ábra Abrázív kopás

A következmény: karcolás és ennek eredményeként létrejövő durva felület. Az ilyen kopási folyamatot hasznosítják is az ún. abrazív megmunkálási eljárásoknál, mint pl. köszörülés, csiszolás. [Kovács Tünde, 2007][10]

2.5.3 Tribokémiai (oxidációs) kopás

Az oxidációs kopás alapvetően vegyi hatások, oxidáció következtében kialakuló felületi rétegek elhasználódását jelenti, amely leggyakrabban fémek súrlódásakor jön létre. Alapvetően a kopás mértékét a súrlódó testek közé bejutó közeg (oxigén) és a két felület dinamikus kölcsönhatása okozza. A kopás típusának ellenére nem egyszerű oxidációról vagy korrózióról beszélünk a súrlódás során, mert az igénybevételek hatására megváltozik a felület fizikai és kémiai tulajdonságai és a felületen kialakuló vegyi réteg jellemzői. A mechanikai igénybevételek hatására felkeményedik a réteg, ezáltal megnövekszik a felület energiaszintje és a hőmérséklete. A kémiai reakciók kialakulása hamarabb be fog következni. A vegyi hatásra létrejövő védőréteg rideg, fáradásos, abrázios vagy eróziós hatások következtében letöredezik és leválik a felületről. Az igénybevételek hatására a felszíni anyagréteg átalakul, képlékenyen deformálódik, kristályszerkezete széttöredezik, megreped. Az oxidációs kopás a leggyakrabban előforduló korróziós kopás.

[Dr. Janik, 2000][11]

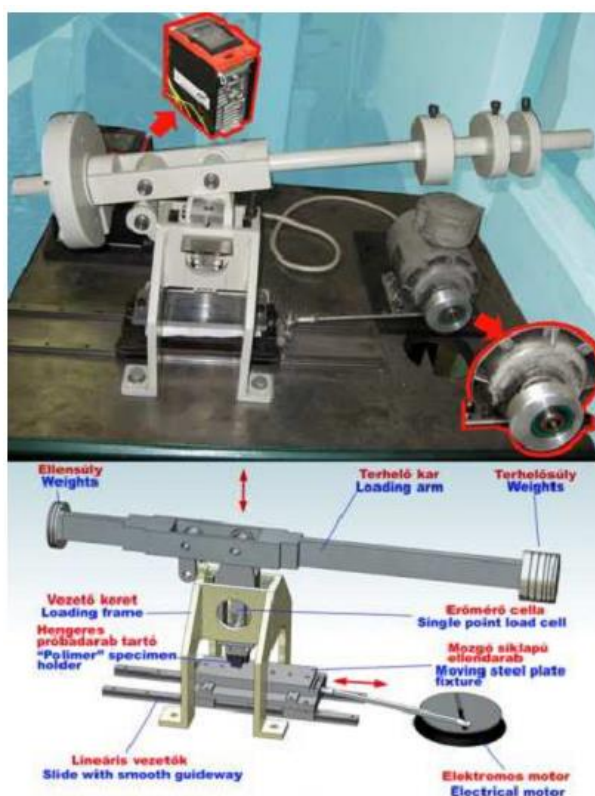
3. Kísérleti módszerek és eszközök

3.1 Bevezetés

A tudományos munkám elvégzésére egy kisméretű (small-scale) vizsgáló berendezést választottam. A próbatest mérete alapvetően meghatározza a vizsgálóberendezés felépítését. A kisméretű próbatest vizsgálatok gazdaságosságukkal és sokrétű felhasználhatóságukkal tűnnek ki a többi mérőrendszer közül. Ezek a vizsgáló berendezések lényegesen elterjedtek méretük, áruk, felhasználhatóságuk miatt. Ezért esett a választásom az alábbi small-scale vizsgáló berendezésre.

3.2 Berendezés

A kísérletem elvégzésére a Szent István Egyetem tanműhelyében található alternáló mozgású triboteszter kísérleti berendezés állt a rendelkezésemre (7.ábra). A berendezés alapján véve hasonló működésű, mint a PLINT triboteszter (TE 77 High Frequency Tribotest), amit Dr. Zsidai László használt egy korábbi értekezésében.



7. ábra Alternáló mozgású triboteszter (Forrás:SZIE GEK GÉTI)

A vizsgálati berendezés felépítésénél érdemes kitérni a különböző egységek megismerésére. A mérések során kialakuló alternáló mozgás eléréséhez egy változtatható

fordulatszámú villanymotort használtunk, amelyet egy tolórúd segítségével kapcsolunk össze a mozgást végző acél-csúszó lappal. A rendszerbe épített frekvenciaváltó segítségével növelhető illetve csökkenthető a mozgás frekvenciája továbbá a lökethossz is módosítható. A méréseinket statikus terhelés alatt vizsgáltunk. A próbatestek statikus igénybevétele a mérés közben nem változtatható. Az erőhatást egy erőkar és a rajta elhelyezett súlyok segítségével biztosítottuk. A pontos súrlódási eredmények és a stick –slip hatás kimutatásához szükségesek voltak különböző érzékelők és mérőrendszer felállítása. A statikus erő meghatározásához egy nyomásmérőt helyeztünk a szerkezetre. Ezen felül a rendszer képes mérni a súrlódási erőt, a kopást, és a környezeti hőmérsékletet. Az 1.táblázat tartalmazza a vizsgálati működési paramétereket.

1. táblázat Működési feltételek

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

A próbatest befogására egy befogófej áll a rendelkezésünkre. A párhuzamos szorítópozfák közé való befogást két csavar biztosítja. A befogófej jellegzetessége hogy kismértékű keresztirányú elfordulást enged, amely lehetővé teszi, hogy az próbatestünk önbeálló legyen. Ezáltal a munkadarabunk egyenletesen fekszik fel az acéllapra, így elkerülhetjük a félre kopás lehetőségét, vagy ami még rosszabb a pontatlan mérési eredmények sorozatát.

3.3 Vizsgálati paraméterek

Az éles mérések elvégzése előtt számos próbamérést kellett elvégeznünk, amelyek segítségével meghatározásra kerültek a rendszer megfelelő mérési paraméterei (2.táblázat).

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, R_h [%]	50

A vizsgálataimat állandó környezeti viszonyok mellett végeztem. A korábbi próbamérések alkalmával meghatározott vizsgálati időtartamot (130 sec) és a 150 N –os terhelést alkalmaztunk. Ezek a paraméterek lehetővé tették a számomra fontos, a mozgás során kialakuló kezdeti tapadási és csúszási súrlódási folyamatok megfigyelését és a köztük lévő kapcsolatok kiértékelését. A mérési időtartam rövidségének megválasztását az is indokolta, hogy a számítógépen történő adatmennyiség feldolgozhatósága korlátozott volt.

3.4 A próbatestek anyaga és előkészítésük

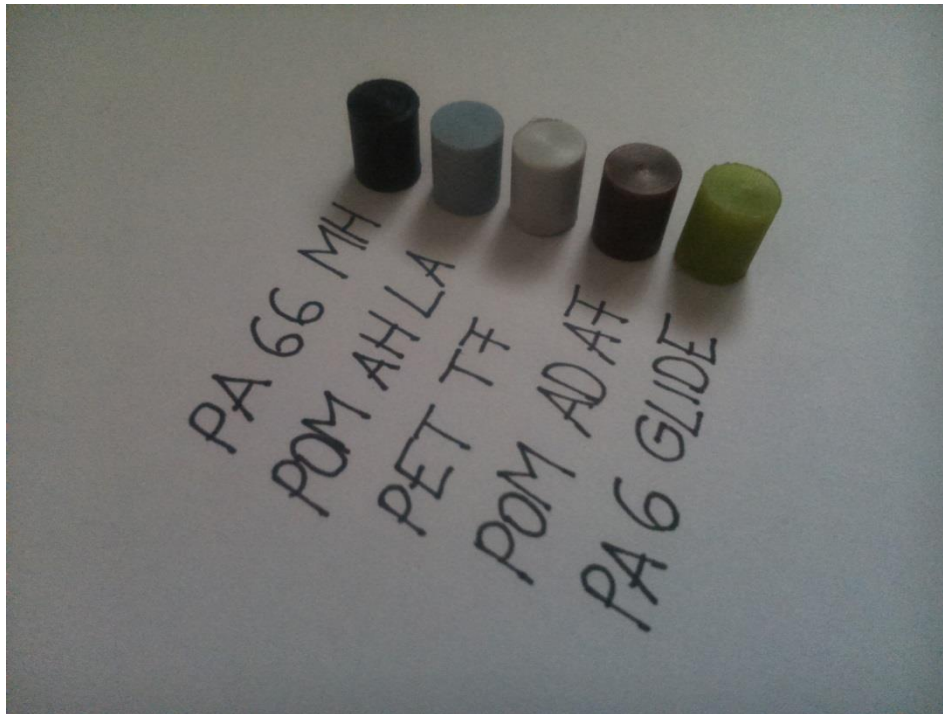
A mérés során használt polimerek ellenfelülete egy C45 általános rendeltetésű, szerkezeti nemesíthető szénacél. Az acéllap méretei: 200x100x12mm. A felületet a mérések előtt köszörülték, ezáltal kaptuk meg a megfelelő felületi érdességet. Az acéllap tulajdonságai az alábbi táblázatban láthatók (3.táblázat). Az acéllap megfelelő felületi érdességét köszörüléssel érték el.

3. táblázat Az acél ellendarab anyagjellemzői

	Sűrűség, kg/dm ³	Folyáshatár Rp0,2, N/mm ²	Szakítószilárdság Rm, N/mm ²	Nyúlás A, %
Minimum	7,85	370	630	16
Maximum	7,85	490	850	16

3.5 Hengeres polimer próbatestek

A vizsgálataim során stick-slip hajlam kimutatására 5 különböző polimer kompozitot használtam fel. A hengeres próbatestek forgácsolással készültek, amelyeknek az átmérője 8mm a hossza pedig 10mm. A 8.ábrán látható a mérés során felhasznált anyagok.



8.ábra A mérés során felhasznált polimerek (forrás:SZIE GÉK GÉTI)

3.5.1 TECAMID 66 MH – POLIAMID 66 MH

A PA 66 MH egy hőre lágyuló műszaki műanyag, amely jó szárazon futási tulajdonsággal rendelkezik. Jó csúszási tulajdonsága mellett merev, nagy ellenállóságot mutat az olajokkal, zsírokkal, benzinnel és gázolajjal szemben. Ezeken felül UV és időjárás álló, elektromos szigetelő és könnyen megmunkálható. Az alábbi tulajdonságok fényében előszeretettel használják szállítási, csomagolási szerkezetekben, elektronikai berendezésekben, nyomtatókban és precíziós gépekben.

3.5.2 TECAFORM AH LA – POM AH LA

POM AH LA olyan műszaki műanyag, amely hozzáadott szilárd kenőanyaggal rendelkezik. A szilárd kenőanyag javítja a csúszási tulajdonságait és kopási viselkedését a normál TECAFORM AH –al szemben. Azonban, a hozzáadott kenőanyag veszélyeztetheti az anyag szilárdságát és a keménységét. Fő tulajdonságai, ami miatt a konveor technológiában, az autóiparban, elektronikai berendezésekben vagy precíziós műszerekben használják, a jó csúszási és kopási tulajdonsága, nagy merevsége és szívóssága, kiváló elektromos szigetelő, jól megmunkálható, azonban ragaszthatóság szempontjából gyenge.

3.5.3 TECAPET TF - PET TF

A PET TF molekula szerkezetét tekintve elérhető amorf vagy félig kristályos hőre lágyuló műanyagként. Az amorf típusú anyag átlátszó, kisebb mechanikai szilárdsággal rendelkezik valamint gyengébb csúszási tulajdonságokkal bír, mint a félig-kristályos típusa. Ez a típus viszont jelentősen nagyobb keménységgel, merevséggel és kiemelkedő csúszási viselkedéssel rendelkezik az alacsony kopási tulajdonságai mellett. Kedvezőtlen nedvesség felszívó tulajdonsága miatt rendkívül jól alkalmazható olyan helyeken, ahol összetett alkatrészekre és magas méretpontosságra, felületi minőségre van szükség.

3.5.4 POM AD AF

TECAFORM AD AF egy olyan félig kristályos, hőre lágyuló csapágyanyag, ami alacsony sűrűlési együtthatóval, nagy szilárdsággal, merevséggel és kiváló megmunkálhatósággal rendelkezik.

Fő tulajdonságai:

- nagyon jó csúszási tulajdonság
- merev és erős
- nagy keménység
- kiváló vegyszerállóság
- jó elektromos szigetelő
- könnyen megmunkálható

Felhasználási terület: Gépipar, autóipar, közlekedés és szállítószalag technológia, elektronika, finommechanika, orvostudomány

3.5.5 TECAGLIDE - PA 6 GLIDE

A PA6 GLIDE egy kemény félig kristályos poliamid öntvény jó csúszási tulajdonsággal és kopásállósággal.

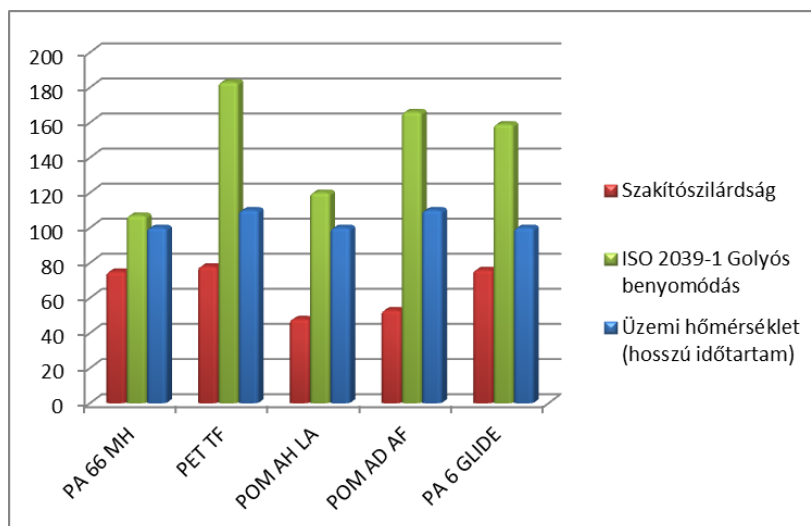
Fő jellemzők:

- jó csúszási tulajdonság még száraz működési körülmények között is
- kemény és erős
- kopásálló
- jó ellenállóság olajokkal, zsírokkal, benzinnel és gázolajjal szemben
- magas alkalmazhatósági hőmérséklet
- könnyen megmunkálható

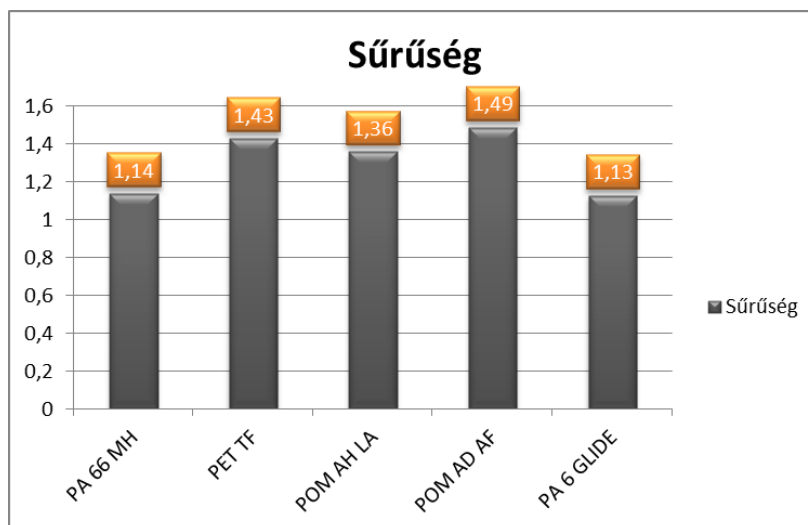
3.6 Felhasznált műanyagok mechanikai tulajdonságainak összehasonlítása

A 4. táblázatban megfigyelhető a legfontosabb jellemzői a választott vizsgálati polimer kompozitoknak. Alapvetően a szakítószilárdság és az üzemi hőmérséklet terén nem mutatnak jelentős szórást az értékek. Az igazán jelentős eltérések a kompozitok keménységét illetően jelennek meg. A legmagasabb értéket a PET TF hőre lágyuló műanyag képviseli ellentétben a PA66 MH-val. Az alábbi tulajdonságból adódóan a későbbi mérések során érdekes eredmények lesznek megfigyelhetők, amelyek majd alapjául szolgálhatnak a későbbi tézisek felállításánál. A polimerek sűrűségénél nem jelentkezik nagy szórás az értékeket illetően, így a mérési eredmények változására nem lesznek nagy hatással (5.táblázat).

4. táblázat Mechanikai anyagjellemzők



5. táblázat Felhasznált anyagok sűrűség értékei



4. A mérés

4.1 Bevezetés

A tudományos munkám legjelentősebb és minden tekintetben legmeghatározóbb része a kísérleti mérések elvégzése és azok kiértékelése. A méréseket megfelelő laboratóriumi körülmények között végeztük el. Próbamérések elvégzése szükséges volt a megfelelő mérési paraméterek beállításához, illetve a megfelelő gyakorlat elsajátításához a tökéletes eredmények elérése érdekében.

4.2 A mérés előkészületei, beállításai

A próbamérések elvégzése, és a paraméterek beállítása előtt nagy odafigyelést igénylő feladat volt a mérőkör helyes felállítása. A mérőkörben szereplő Spider8, Triboteszter, az asztali számítógép és a frekvenciaváltó megfelelő összeállítása elengedhetetlen volt a pontos mérési eredményekhez.

SPIDER 8: A Spider 8 egy elektromos mérőrendszer PC-k számára kifejlesztve, olyan jelek mérésére, mint nyúlás, erő, nyomás, gyorsulás, hőmérséklet. Magába foglalja az erősítő, A/D, PC interface, csatlakozó egységeket.

A kísérletek során mért paraméterek különböző mérőeszközök (kopásmérő, hőmérséklet-mérő, erőmérő) segítségével jutottak el a feldolgozó egységhez. Ezek a mérő berendezések a SPIDER8 mérőműszer hátlapján található csatlakozóaljhoz kapcsolódtak. A 9.ábrán látható, hogy az egyes érzékelők melyik csatlakozóba találhatók.



9. ábra SPIDER 8 csatlakozásai (forrás: SZIE GÉK GÉTI)

4.3 A SPIDER8 csatlakozásai

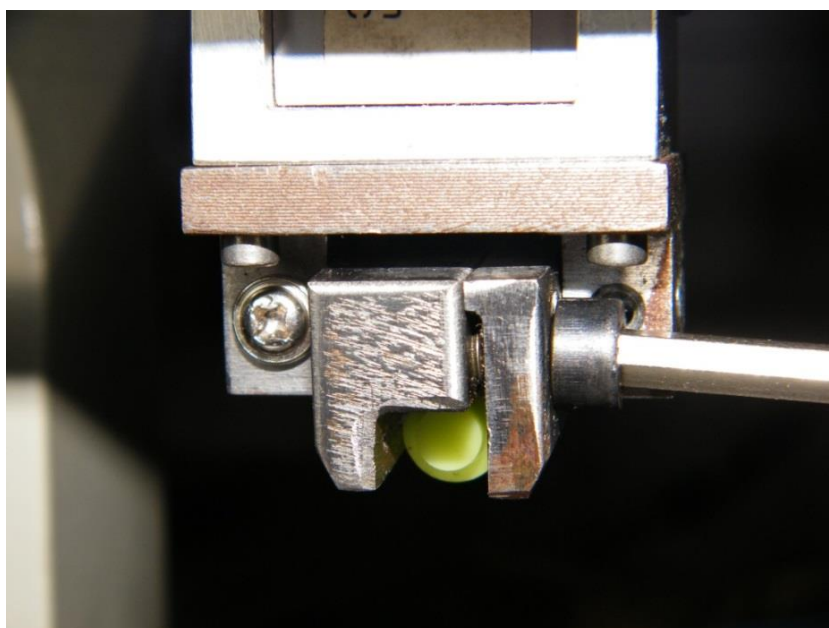
- 0.pozíció – Triboteszter Erőmérő
- 1.pozíció – Triboteszter Kopásmérő
- 2.pozíció – 0
- 3.pozíció – Légrésmérő (másik mérőgépen)
- 4.pozíció – 0
- 5.pozíció – Triboteszter Nyomáscella
- 6.pozíció – Hőmérsékletmérő
- 7.pozíció – 0

A mérőrendszer legfontosabb része a Triboteszter, amely segítségével végeztük a különböző polimer kompozitok súrlódásának mérését. A 10.ábrán látható a szerkezet felépítése.



10. ábra Triboteszter (forrás:SZIE GÉK GÉTI)

A szerkezeten megtalálható a statikus erős kifejtésére szolgáló erőkar és a rajta különböző pozícióban elhelyezhető súly, amely segítségével a kívánt terhelés könnyedén beállítható. A statikus terhelés a működés közben nem változtatható. A változtatható fordulatszámú villanymotor tengelyén lévő tárcsához kapcsolódik egy tolórúd, amely biztosítja az acéllap alternáló mozgását. A frekvenciaváltó lehetővé teszi különböző értékek beállítását. A forgácsolással kialakított munkadarab befogása a 11.ábrán látható módon történik.



11. ábra Befogás módja (forrás:SZIE GÉK GÉTI)

A hengeres próbatestet két szorítópofa közé fogtuk be, a rögzítést két belső kulcsnyílású csavarral oldottuk meg. A befogó fej jellegzetessége, hogy keresztirányban kis szög alatt képes elfordulni, ezáltal a rögzített munkadarab egyenletesen képes felfeküdni az acél ellendarabra. Ez a fajta technikai megoldás biztosítja azt, hogy a munkadarabon a mérés során ferde kopás ne alakuljon ki.

4.4 A mérés folyamata

A mérőrendszer felállítása és a próbamérések elvégzése után elkezdhattuk az éles mérések elvégzését. A mérés minden egyes folyamata nagy odafigyelést igényelt a megfelelő eredmények érdekében. Minden egy lépés során kesztyűt használtam!

1. lépés Az acél ellendarab tisztítása, amire a 12.ábrán látható denaturált szeszt és papír törlőkendőt használtunk. Az acéllap tisztítása fontos művelet, ugyanis számos olaj és zsír származékok kerülhetnek a súrlódó felületre, amik jelentősen befolyásolják a mérési eredményeket. A munkadarabunk teljes tisztítása is szintén ezzel a módszerrel történt.

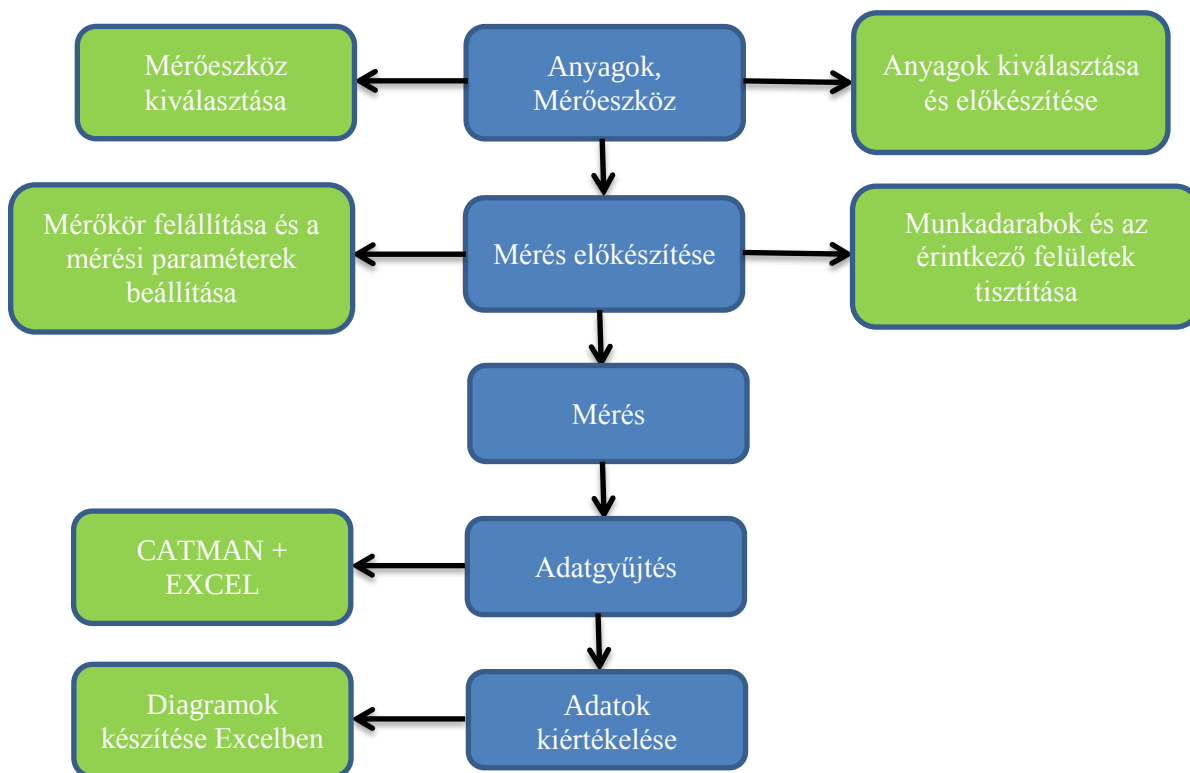


12. ábra Tisztító eszközök (forrás: SZIE GÉK GÉTI labor)

2. lépés A megtisztított munkadarabot a befogófejbe helyeztük. A befogófejben található két kis réz ütköző, amik közé pattintottuk be a vizsgált polimerünket a központosítás céljából.

3. lépés A munkadarabot a behelyezést követően az erőkar segítségével az acél ellendarabon „megkocogtattuk”. Az előbbi mozdulat célja, hogy a munkadarab a számára kialakított helyre tökéletesen beálljon. Ezt követően a két belső kulcsnyílású csavar segítségével rögzítettük a munkadarabot. Mivel a próbatestünk anyaga műanyag ezért az esetleges deformációk elkerülése végett nem kell nagy meghúzási nyomatékot kifejteni a csavarokra
4. lépés A mérés megkezdése előtti végső fázis az acéllap és a munkadarab ismételt megtisztítása az esetleges szennyeződésektől, zsíroktól, olajoktól.
5. lépés Mérés elvégzése

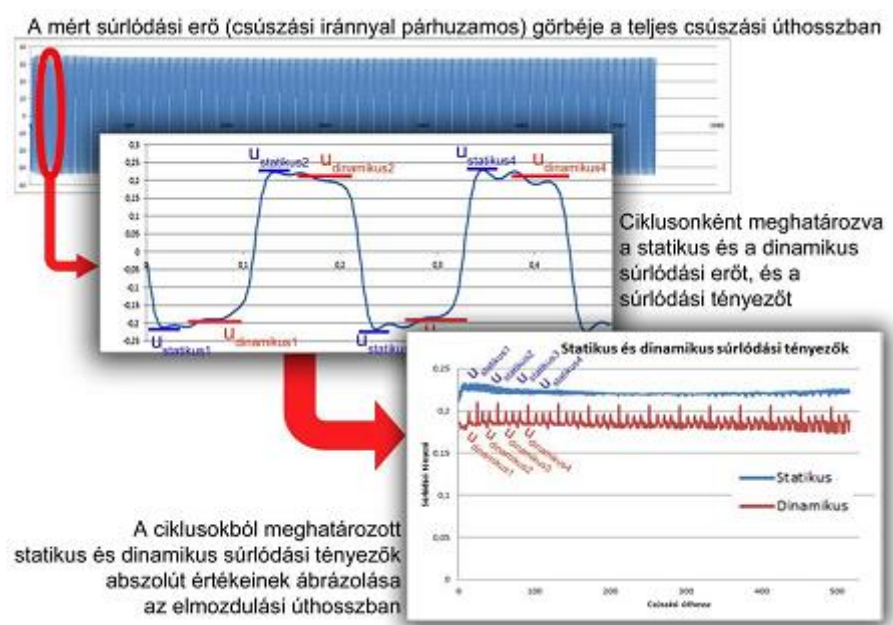
A 13.ábra szemléletesen ábrázolja a mérés folyamatának egymásra épülő lépéseit.



13. ábra Mérési folyamat lépéseinek sorrendje

5. A mérési eredmények és értékelésük

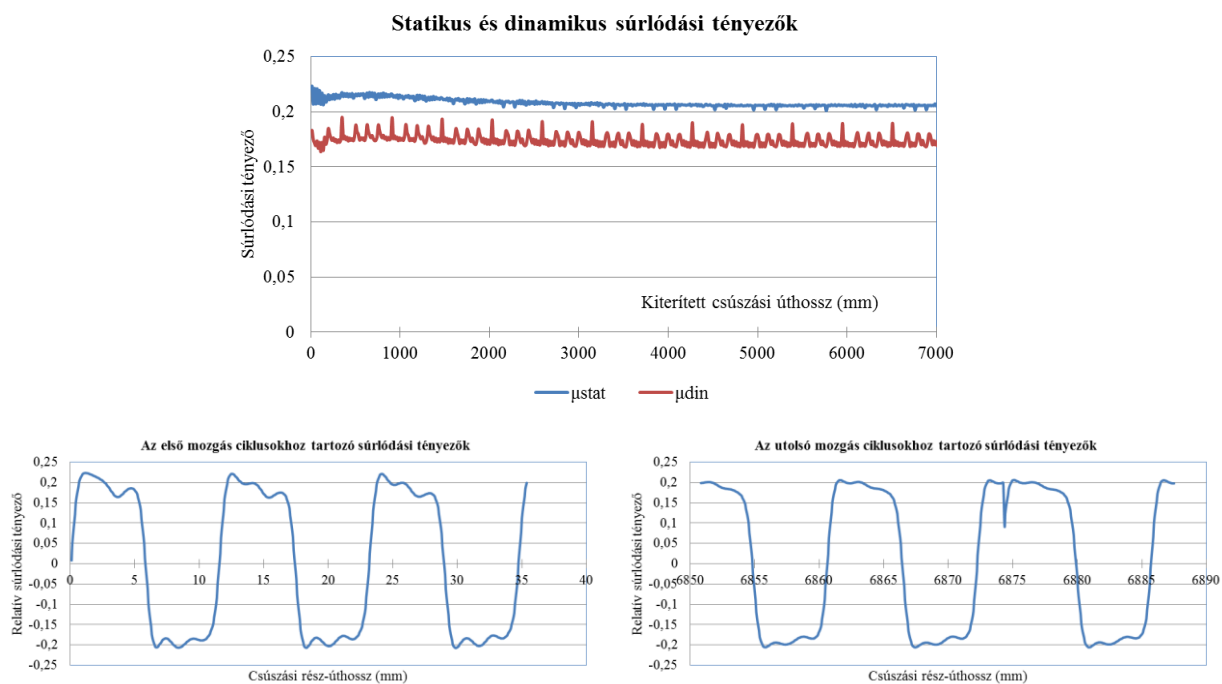
A súrlódási erőt ciklusonként határoztuk meg. A 14.ábrán jól látható hogy a statikus és a dinamikus súrlódási tényezőt a súrlódási erő görbékből a csúszási úthossz függvényében kerültek meghatározásra. A 14.ábra felső képén szembetűnő, hogy a diagram ebben a formában nem teljesen alkalmas a számunkra szükséges adatok kinyerésére, elemzésére. A pontos értékeléshez a középső ábrán látható módon, ciklusonként kell meghatároznunk a statikus és dinamikus súrlódási tényezőket. Az ábra utolsó képén kerültek ábrázolásra a ciklusonkénti statikus és dinamikus súrlódási tényezők az elmozdulási úthossz függvényében.



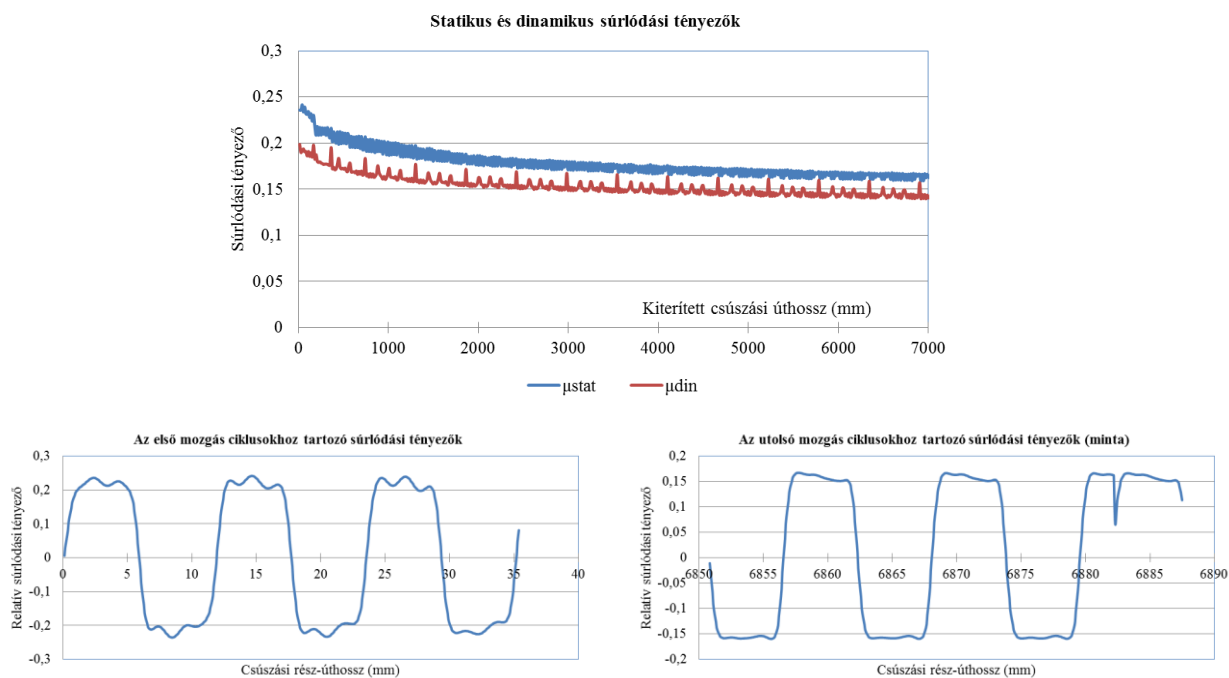
14. ábra A löketenkénti statikus és dinamikus súrlódási erők meghatározása a mért súrlódási erő görbéből

A vizsgálataink során mind a statikus mind pedig a dinamikus súrlódási tényezők meghatározásra kerültek. A statikus súrlódási tényezők értékei minden esetben meghaladták a dinamikus értékeket. Minden esetben három mérést végeztünk el, de a három mérés közül csak egy tipikus görbét emeltünk ki.

5.1 PA6 GLIDE és PA 66 MH mérési eredménye



15. ábra A PA 6 GLIDE polimer acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye



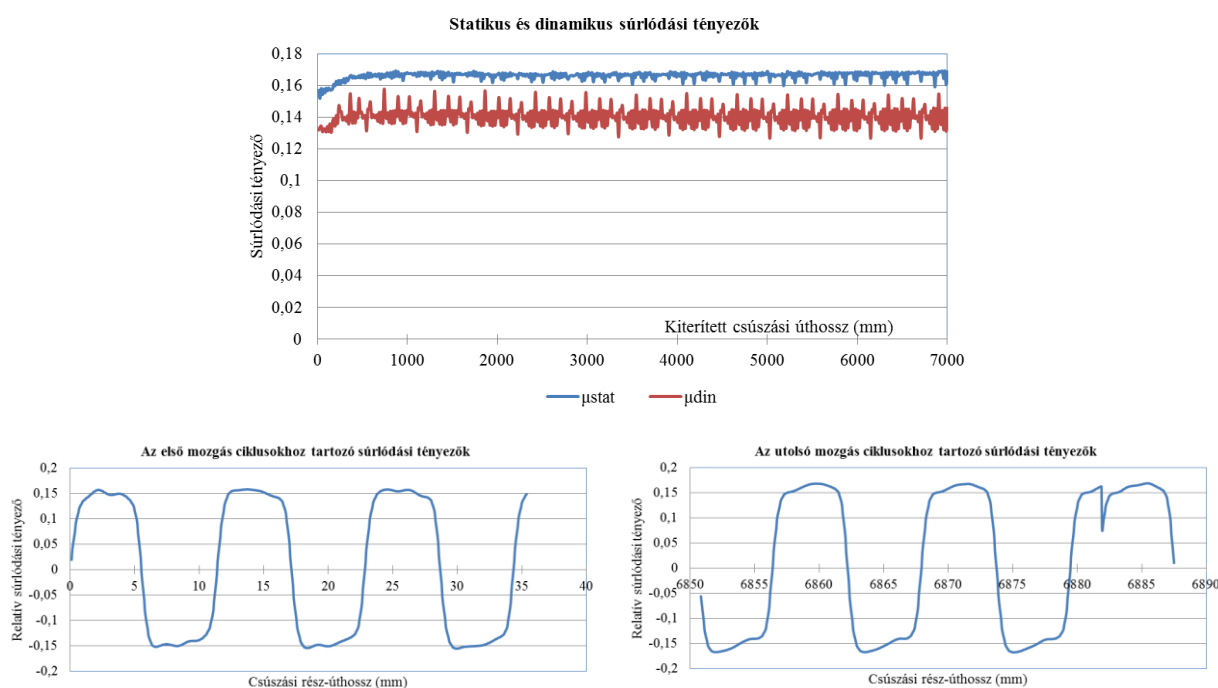
16. ábra A PA 66 MH polimer acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye

A PA-ok mérési eredményei között jelentős különbség látható (15-16.ábra). A PA6 súrlódási értékeit megfigyelve jól látható, hogy kezdetben enyhe fluktuáció jelentkezik, majd

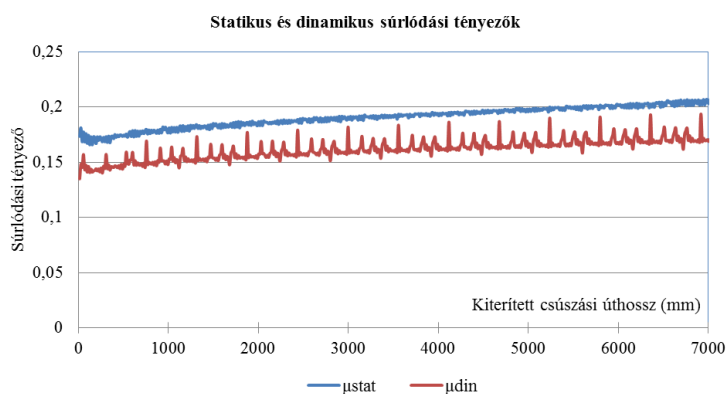
a diagram 0,25 körüli értéken stabilizálódik és a mérés végig ezt az értéket megtartja. A dinamikus értékek követik az előző diagram vonalvezetését.

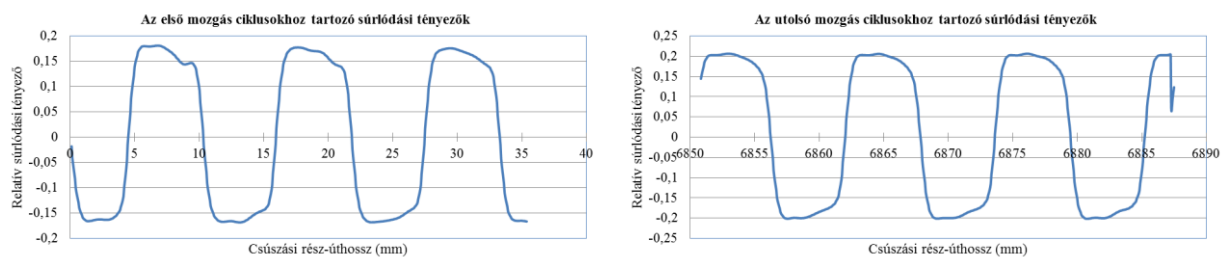
A PA 66-nál a PA 6-hoz képest jelentős különbség figyelhető meg. A statikus értékek kezdetben jelentős esést mutatnak, majd a mérés közepe után az értékek 0,18-on stabilizálódnak. A mérés kezdetén intenzív súrlódási hang volt megfigyelhető, ami a mérés végére jelentősen lecsökkent. Ezt a hanghatást okozó jelenség jól látható a mozgás első ciklusát ábrázoló diagramon, amikor a maximum és minimum értékeken fluktuáció figyelhető meg.

5.2 A POM AH LA és a POM AD AF mérési eredményei



17. ábra A POM AD AF polimer kompozit acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye

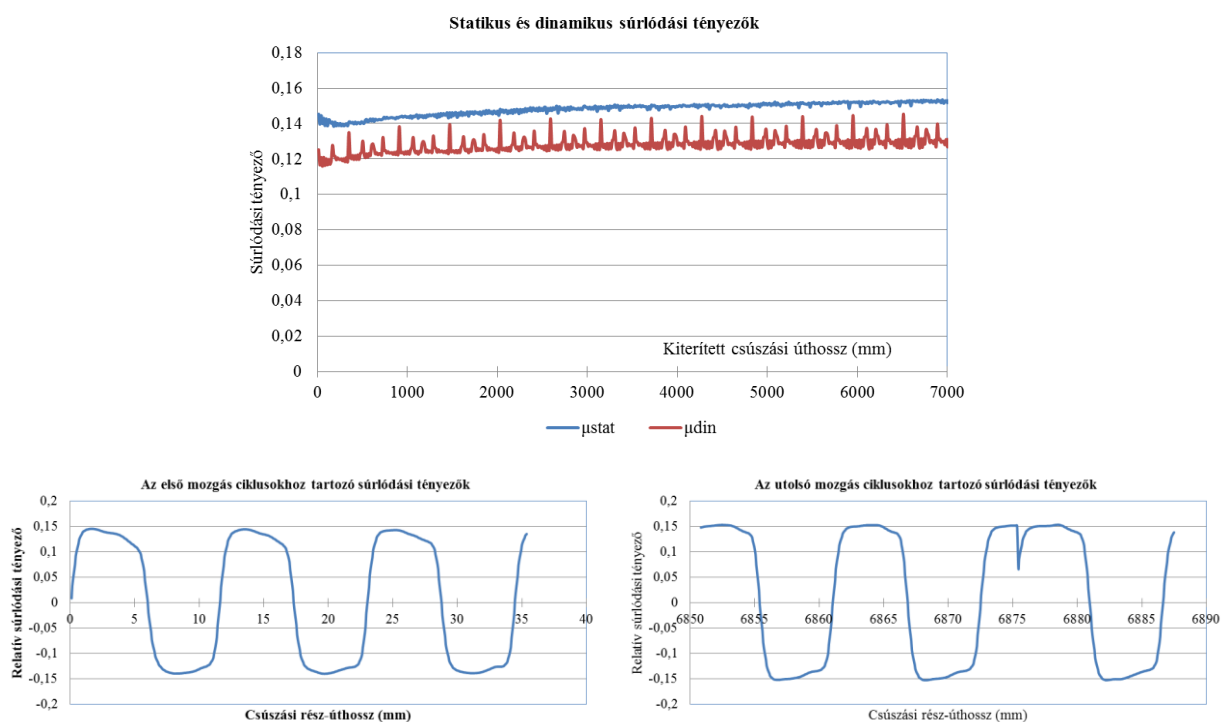




18. ábra A POM AH LA polimer kompozit acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye

A POM AH LA és a POM AD AF súrlódási tényezőiről készült diagram alapvetően hasonló tendenciákat mutat (17-18.ábra). Eltérések az értékeket illetően figyelhetők meg, míg a POM AD AF statikus súrlódási tényezője 0,15 –os értékről indul, addig a POM AH LA 0,17-es értékről kezdi meg emelkedését. Mindkét diagramnál egyenletes emelkedés figyelhető meg a mérés befejezéséig. A POM AH LA a mérés végére 0,21 –es statikus súrlódási tényezővel míg a POM AD AF 0,17 –es értékkel rendelkezik. Mindkét polimer kompozitnál megfigyelhető volt a mérés során enyhe letapadó, csikorgó hang.

5.3A PET TF mérési eredményei



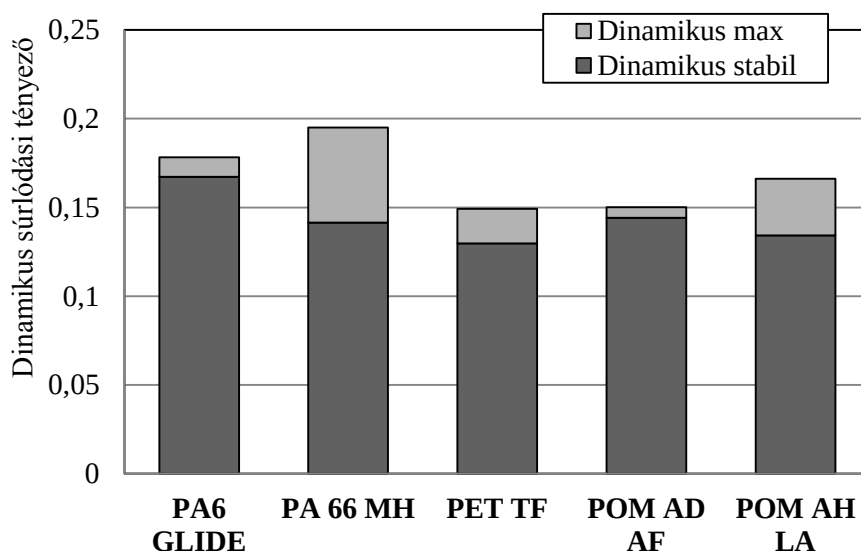
19. ábra A PET TF polimer kompozit acél ellenfelületen végzett súrlódási vizsgálatának eredménye

A PET TF polimer kompozit mérési eredménye nagy vonalakban hasonlóságot mutat a POM AH LA mérési eredményeivel (19.ábra). A statikus súrlódási tényezőjének kezdeti értéke 0,14

körüli értéket vesz fel, majd ez az érték a mérés végére eléri a 0,15 –ös értéket. A mérés során intenzívebb súrlódási hang volt tapasztalható.

6. Az eredmények összehasonlítása és elemzése

A 20. ábrán látható a mérések során fellépő dinamikus súrlódási tényező maximális és stabilizálódott értéke. A sötétszürke oszlop jelöli a stabil súrlódási tényezőt, míg a mérési időtartam alatt felvett maximális súrlódási értéket a világosszürke kiegészítő oszlopok jelölik. A oszlopok adattartománya 3 mérés átlaga jelöli.

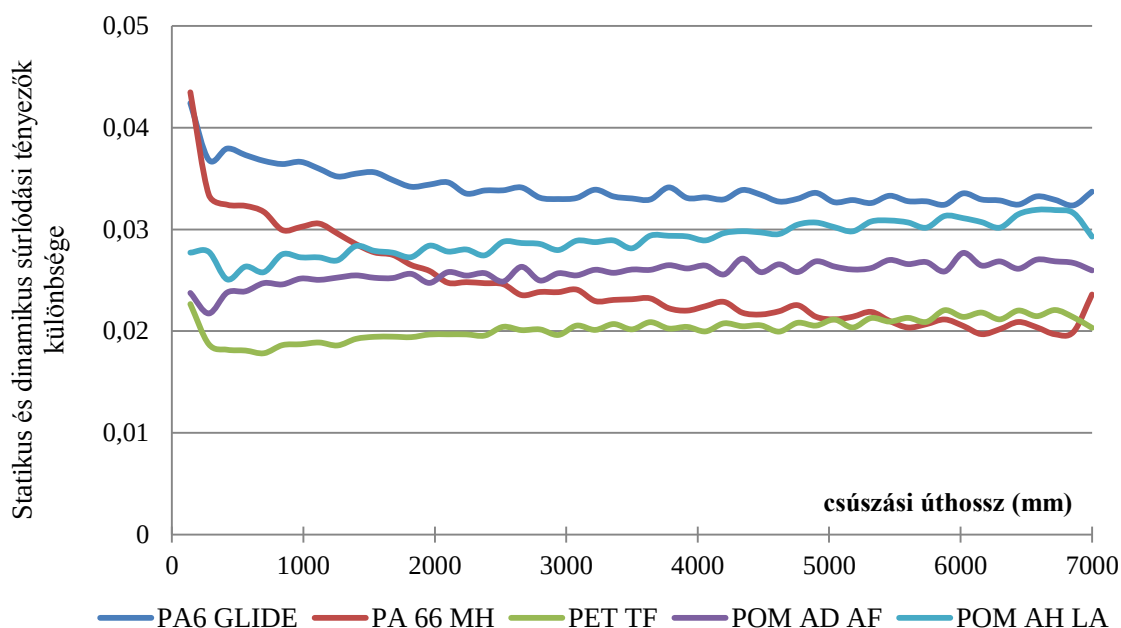


20. ábra Elterő polimerek és kompozitjaik dinamikus súrlódási tényezőinek stabilizálódott és maximális értékei

Az oszlopokból megfigyelhető, hogy a polimer kompozitok egymáshoz képesti súrlódási értékei nem mutatnak jelentős eltérést. Alapvetően a stabilizálódott értékek a gyakorlatnak megfelelő 0,15 körüli értékeket veszik fel. Az alábbi műanyagok közül a PA 66 MH mutat kisebb kiugrást a maximális értékeket illetően. Feltehetően nagy merevségéből adódóan mutat ilyen nagy maximális értéket a többi kompozithoz képest.

A 21. ábrán jól megfigyelhető, a statikus és a dinamikus súrlódási tényező értékeinek különbsége. Ez a különbségképzés mutat rá a kutatásunk fő céljára, a súrlódás instabilitásra, ami közvetlenül jellemzi a stick-slipre való hajlamot. Alapvetően minél nagyobb a differencia a két érték között annál nagyobb a lehetőség a súrlódási instabilitásra, így a stick-slip jelenség kialakulására. Az általunk vizsgálat polimer kompozitoknál jól látható, hogy a két érték közötti differencia a legtöbb esetben konstans közeli értékeket képviselt. A diagram segítségével felállíthatunk egy rangsort a vizsgált műanyagok között, azzal a céllal, hogy megmutassuk, hogy melyik anyag a leginkább és melyik a legkevésbé hajlamos az instabilitási állapot kialakítására.

A diagramok alapján két fő tendenciát állapíthatunk meg. A mért anyagok 40%-nál, PA6 GLIDE és a PA66 MH görbék alakulása csökkenő értéket mutatnak. A mérés közbeni megfigyelések és az eredmények is azt bizonyítják, hogy az alábbi anyagoknál a stick-slip kialakulásának kicsi az esélye. A kapott vizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy a POM AD AF és a POM AH LA anyagok a leginkább hajlamosak a súrlódási instabilitásra. A PET TF –nél a görbe jellege közel konstans értékeket vesz fel a mérési úthosszon.



21. ábra Elterő polimerek statikus és dinamikus súrlódása közötti eltérések a csúszási úthossz függvényében

Stick-Slipre való hajlam csökkenő sorrendben:

1. POM AH LA
2. POM AD AF
3. PET TF
4. PA6 GLIDE
5. PA66 MH

7. Következtetések, Összefoglalás

A dolgozatom célja nem volt más, mint eltérő tulajdonságú polimer kompozitok súrlódásának, azon belül is a statikus és dinamikus súrlódási tényezők különbségének meghatározása, amely a súrlódási instabilitást (stick-slip) határozta meg. A célkitűzéseimnek eleget téve összefoglaltam a témához kapcsolódó alapvető tribológiai fogalmakat, ismereteket, továbbá megismertem a méréshez elengedhetetlenül szükséges programok használatát. A mérések elvégzését követően a kapott értékeket diagramokba foglaltam és elvégeztem a szükséges elemzéseket a dolgozatom fő céljának meghatározása érdekében.

A vizsgálatom során alkalmazott hengeres műanyag – acél síklap páron végzett alternáló mozgású kísérletek alapján megállapítható, hogy

- vizsgált polimerek súrlódásának mértéke nagyban függ az adott műanyagok mechanikai tulajdonságaitól, összetevőitől, továbbá jelentősen befolyásolja a statikus és dinamikus súrlódási tényezők közötti különbségeket.
- a kutatásom során felhasznált alternáló mozgású rendszer lehetővé teszi a statikus és a dinamikus súrlódási tényezők mérését.
- a statikus és dinamikus súrlódási értékekből képzett különbségek diagramokban történő ábrázolása rámutat a felhasznált polimerek súrlódási instabilitásának mértékére.
- a henger/sík modellrendszer jellegzetessége a kezdeti vonali érintkezés. Ez az érintkezési forma jelentős felületi terhelést jelent a munkadarab számára. A mérés indításakor jelentős deformációhoz vezet, ami a későbbiekben a kopás hatására egyre nagyobb érintkezési felületet idéz elő. A nagyobb érintkezési felület hatására megnövekszik az adhéziós komponens is.

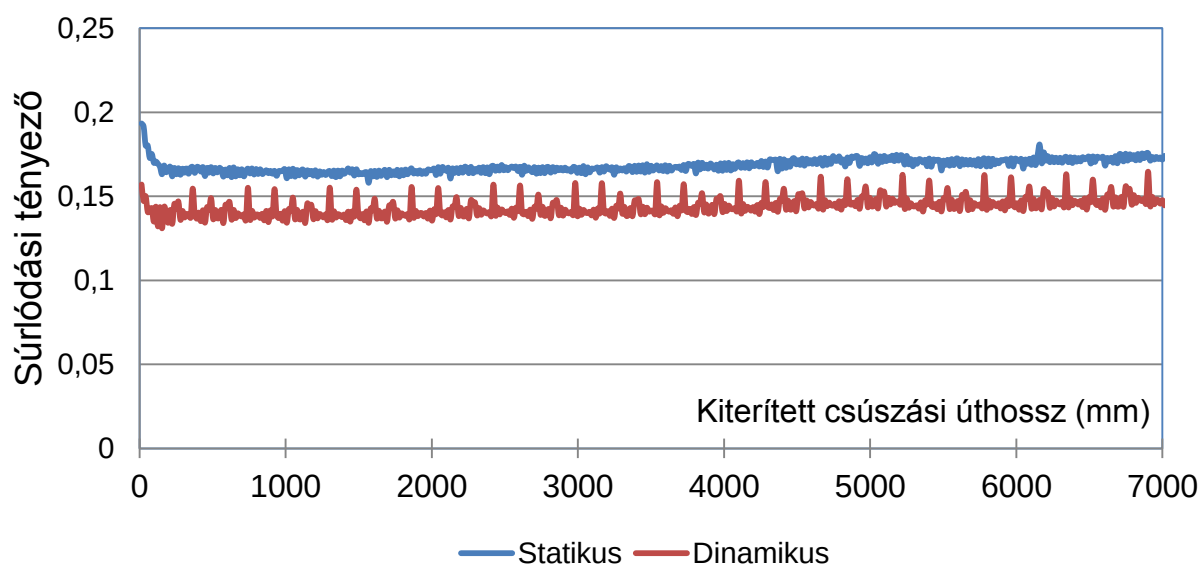
Kutatásom célja olyan információk meghatározása, amelyek segítségével szolgálnak a különböző csúszó- és rezgőrendszerek kialakításánál, lassan súrlódó gépelemek anyagválasztásánál, illetve olyan környezetben, ahol az alternáló mozgásból adódó stick-slip hatás kialakulása lehetséges.

A kutatásom továbbfejlesztése szempontjából összehasonlítást lehetne végezni más tribológiai modellrendszerben történő mérésekkel, a jelenlegi paraméterek használatával. Az ott megkapott eredmények összevetésével egy másfajta megközelítést kaphatunk a polimer kompozitok súrlódásáról.

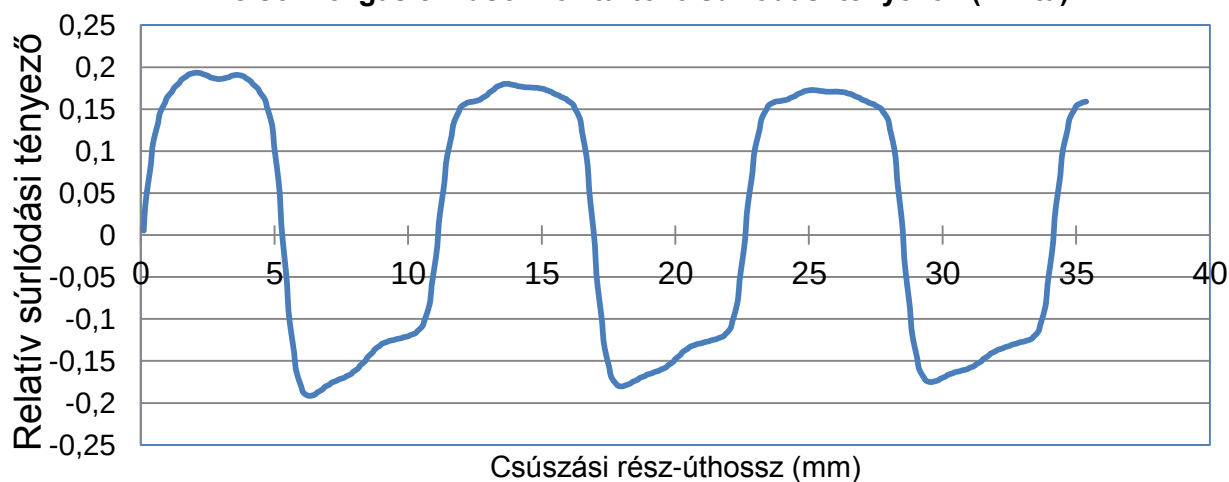
Mellékletek

(PA6_GLIDE_1.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

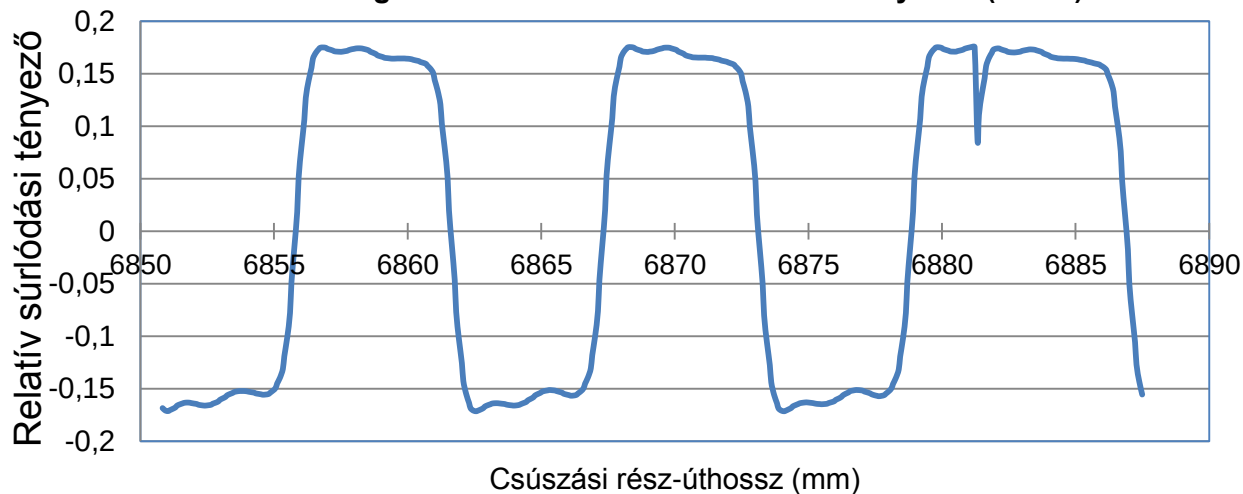
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

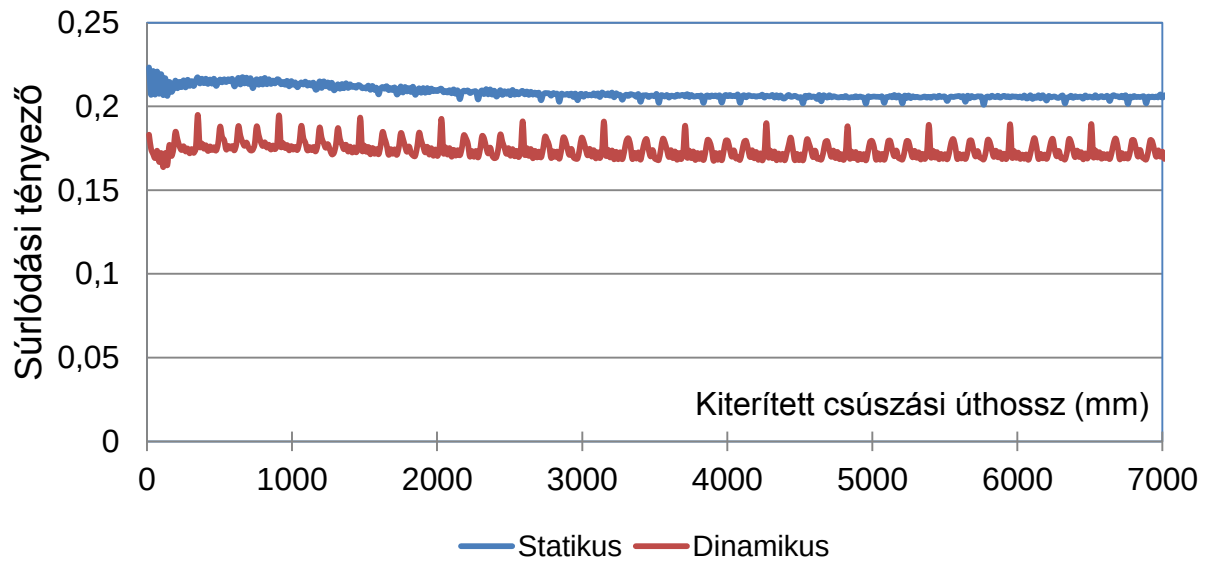


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

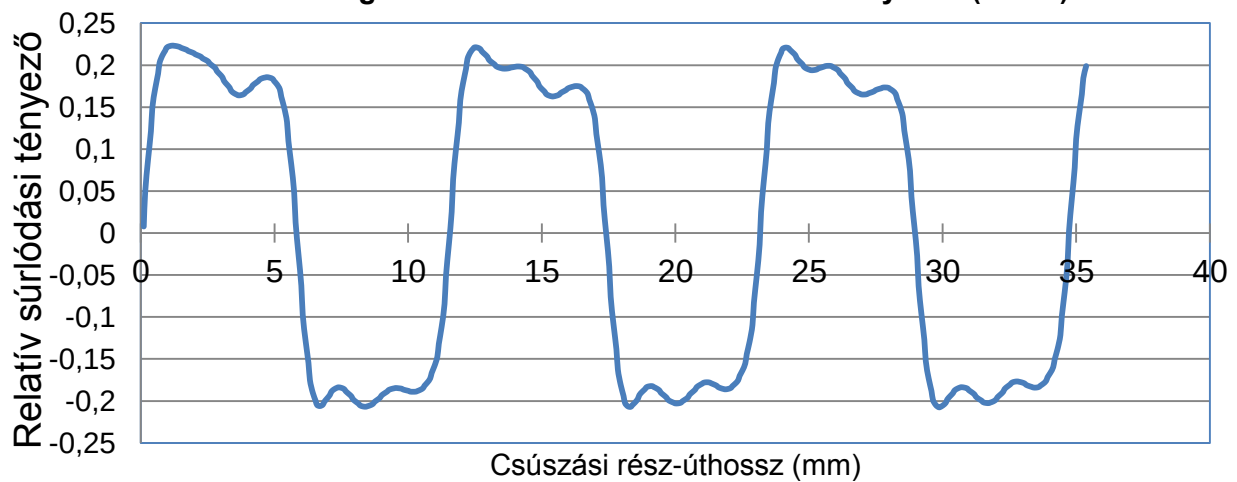


(PA6_GLIDE_2.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

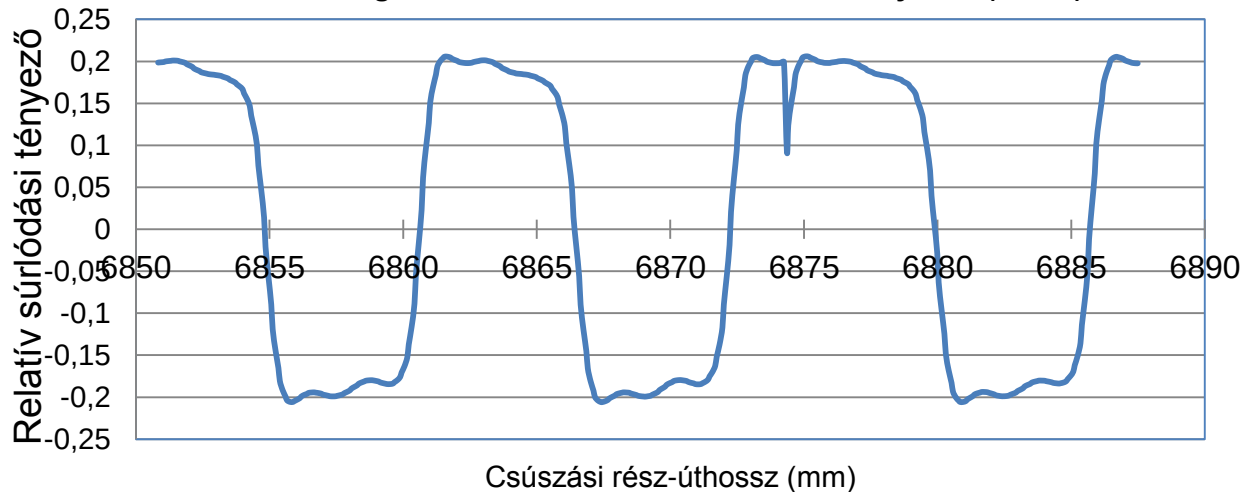
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

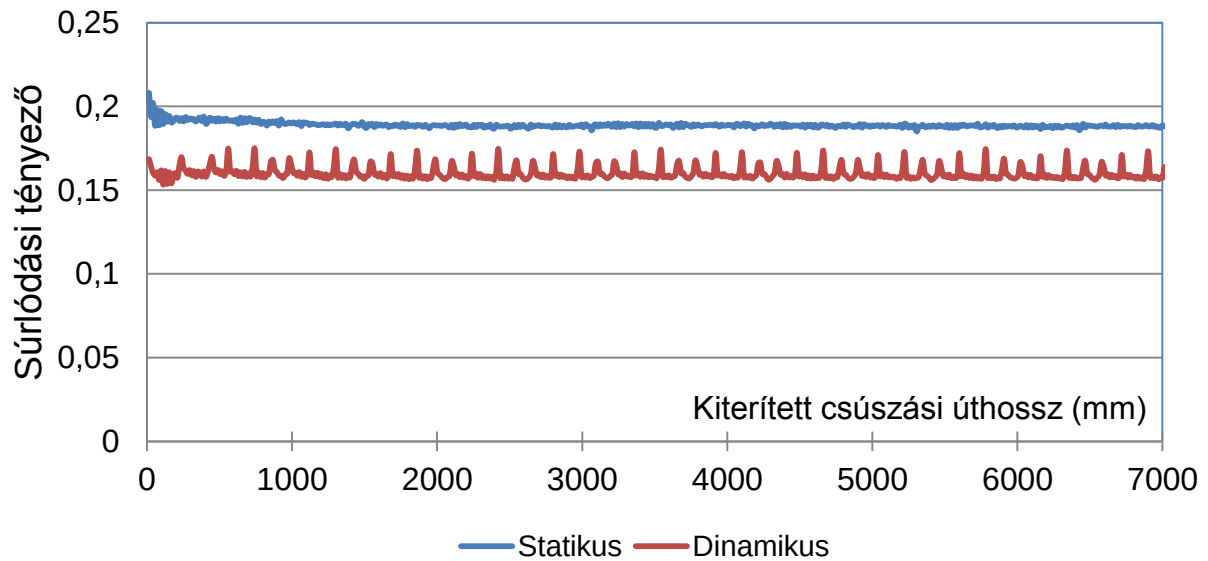


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

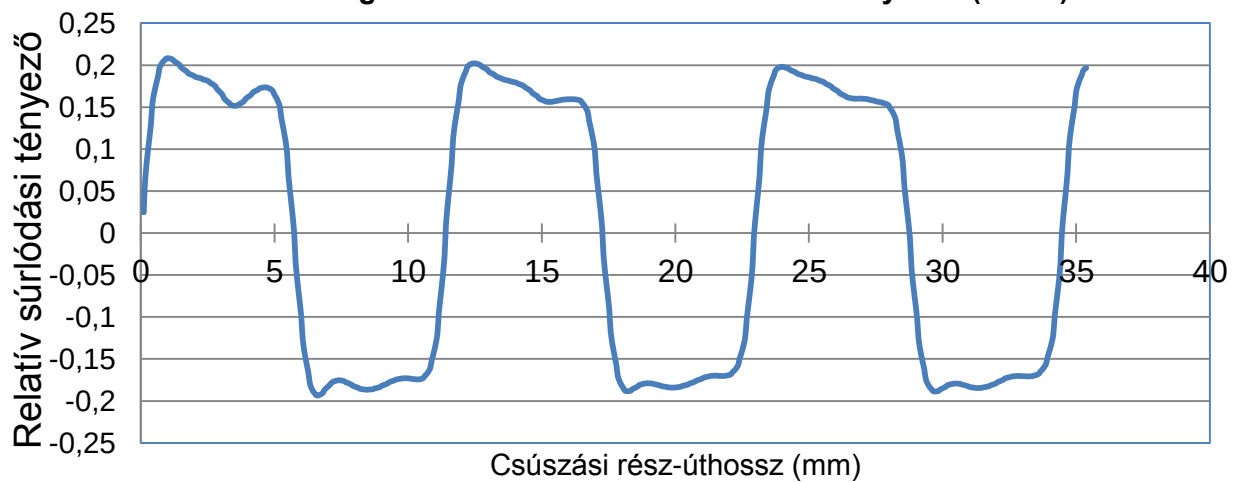


(PA6_GLIDE_3.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

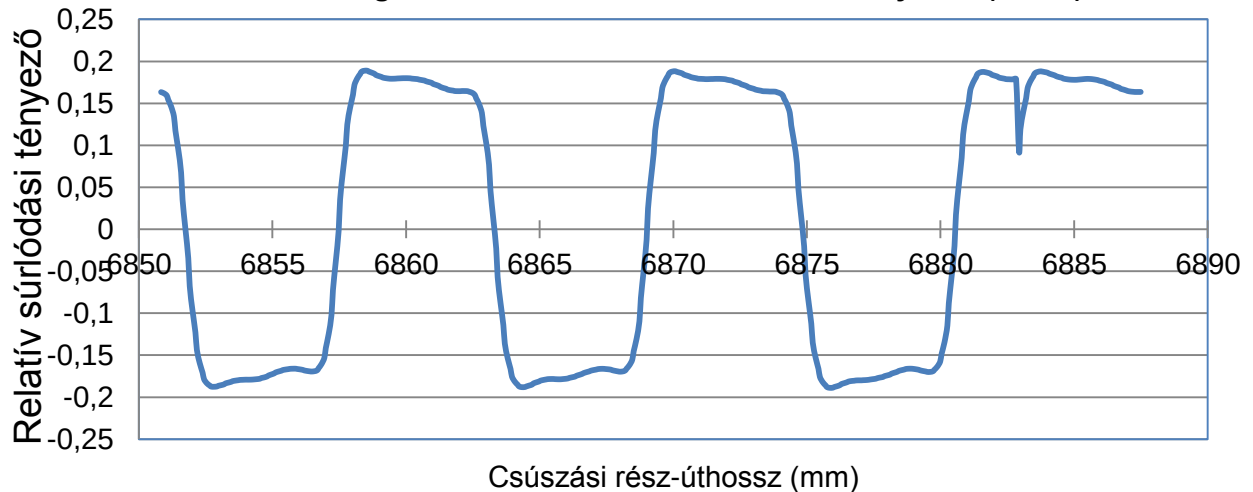
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



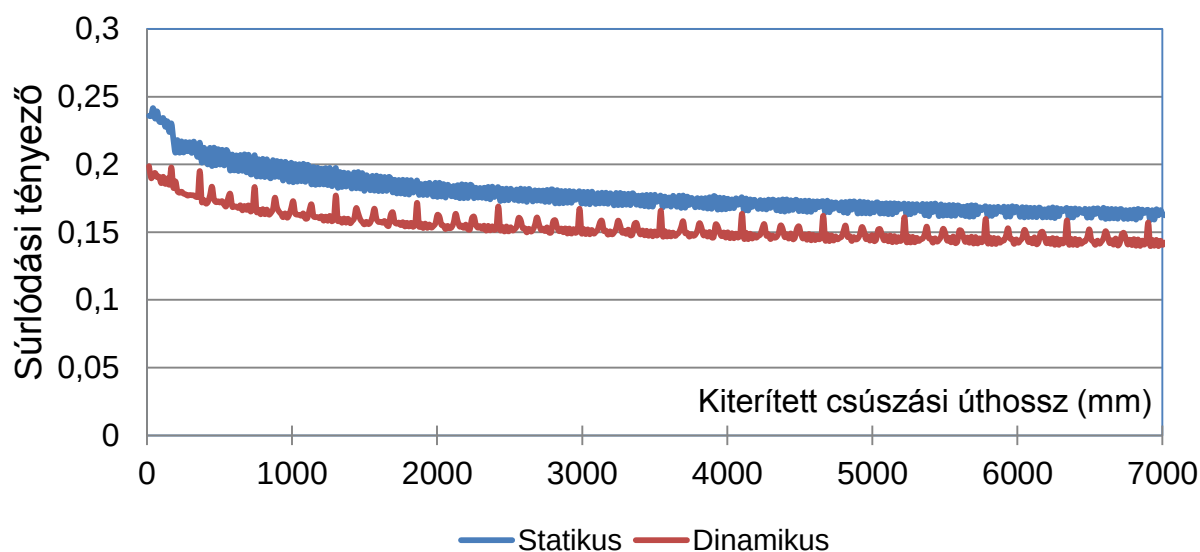
Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)



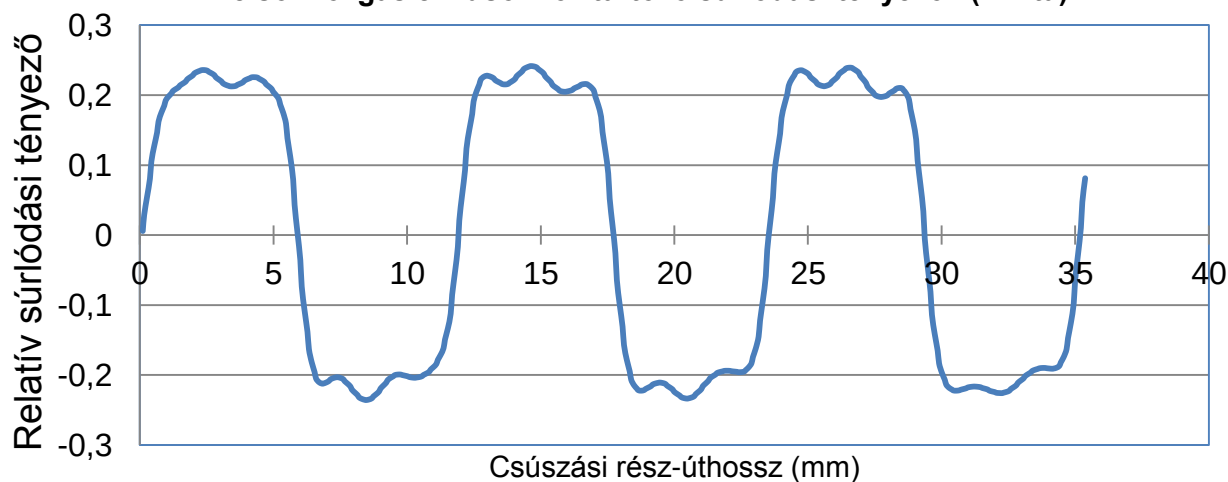
Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)



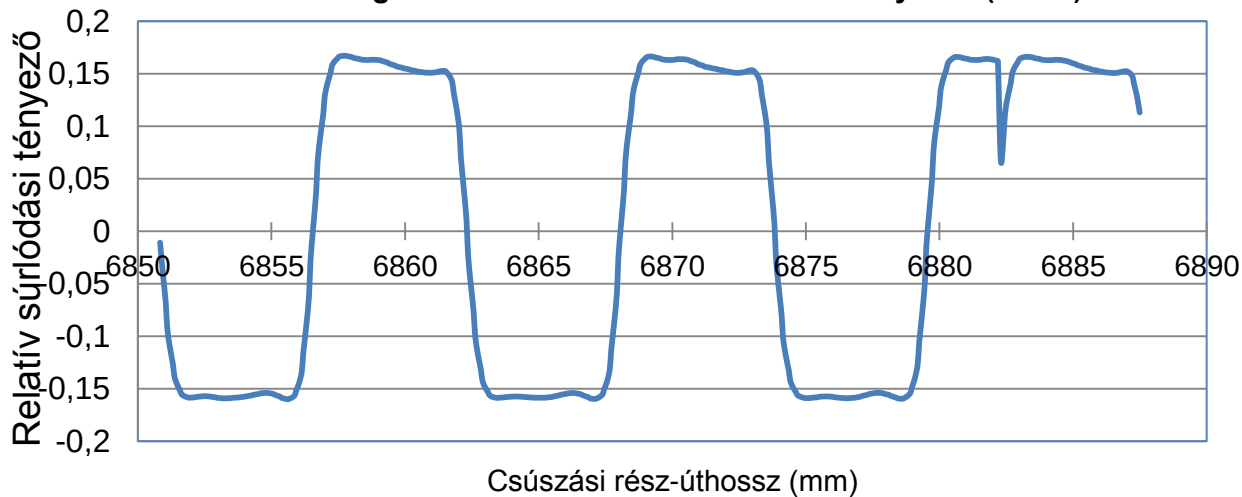
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

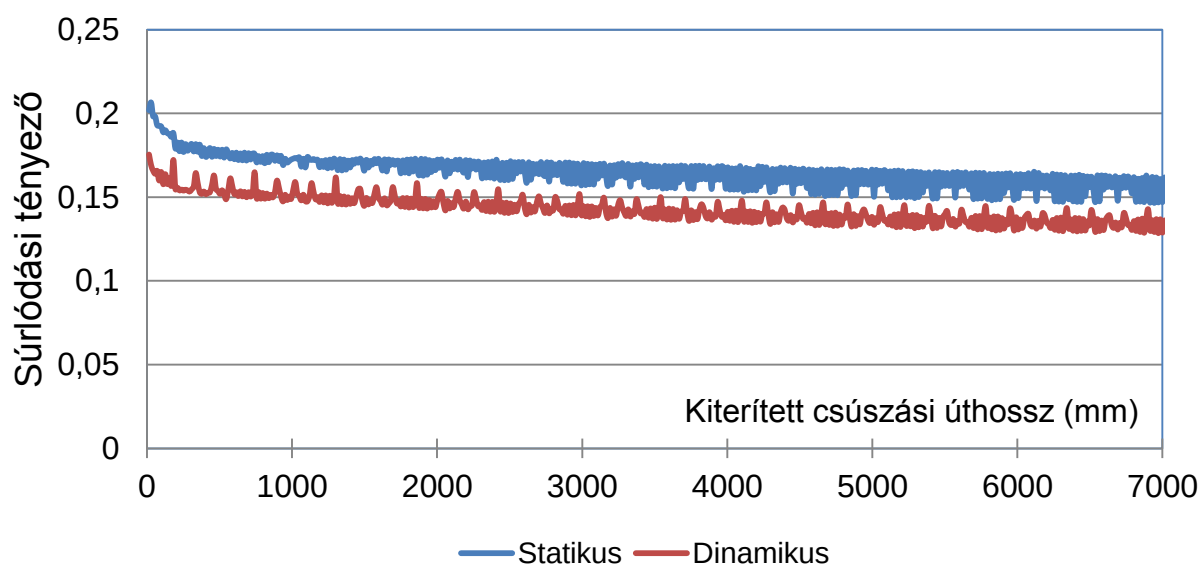


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

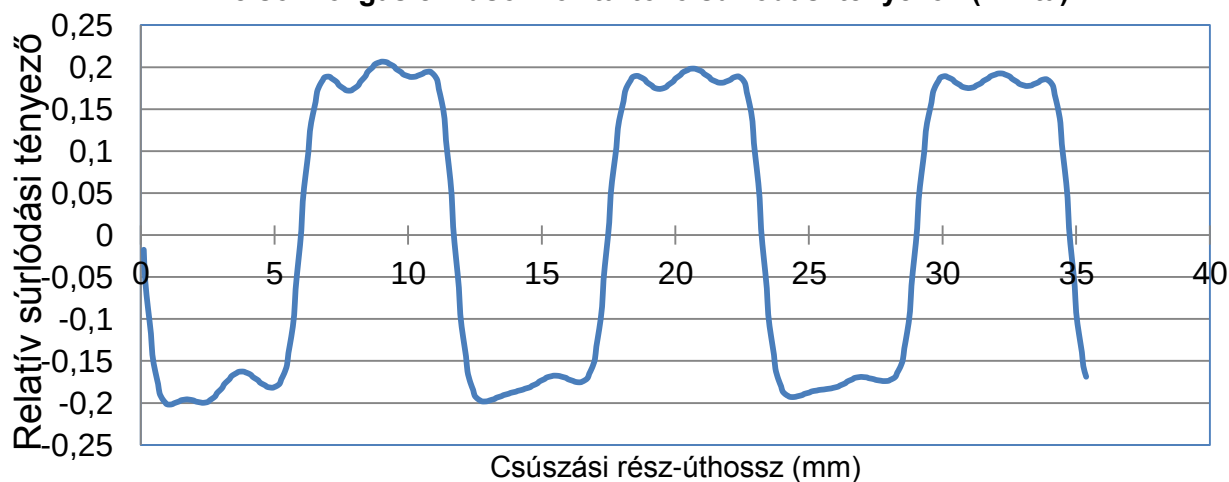


(PA66_MH_2.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

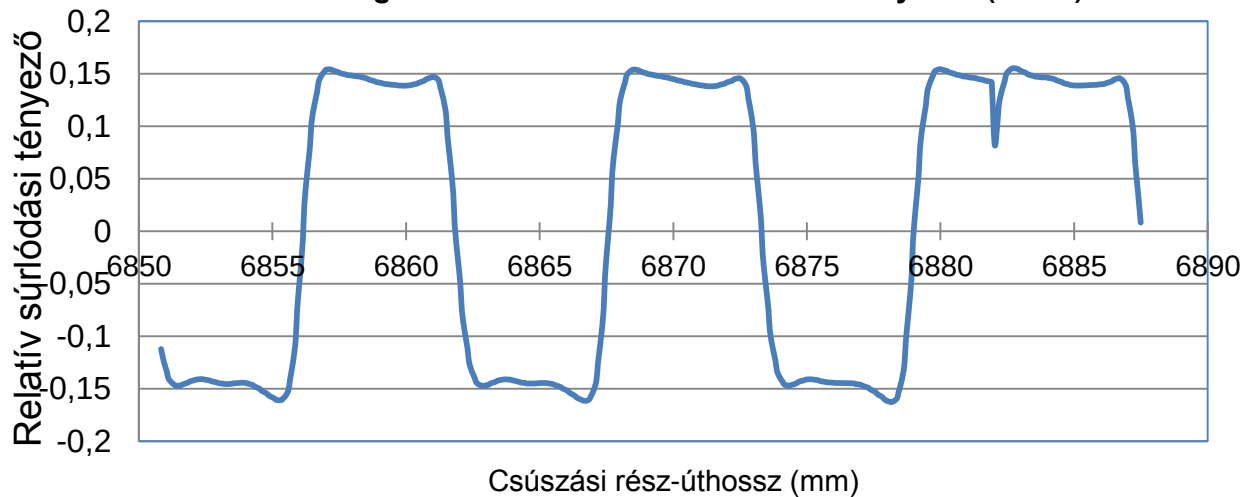
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

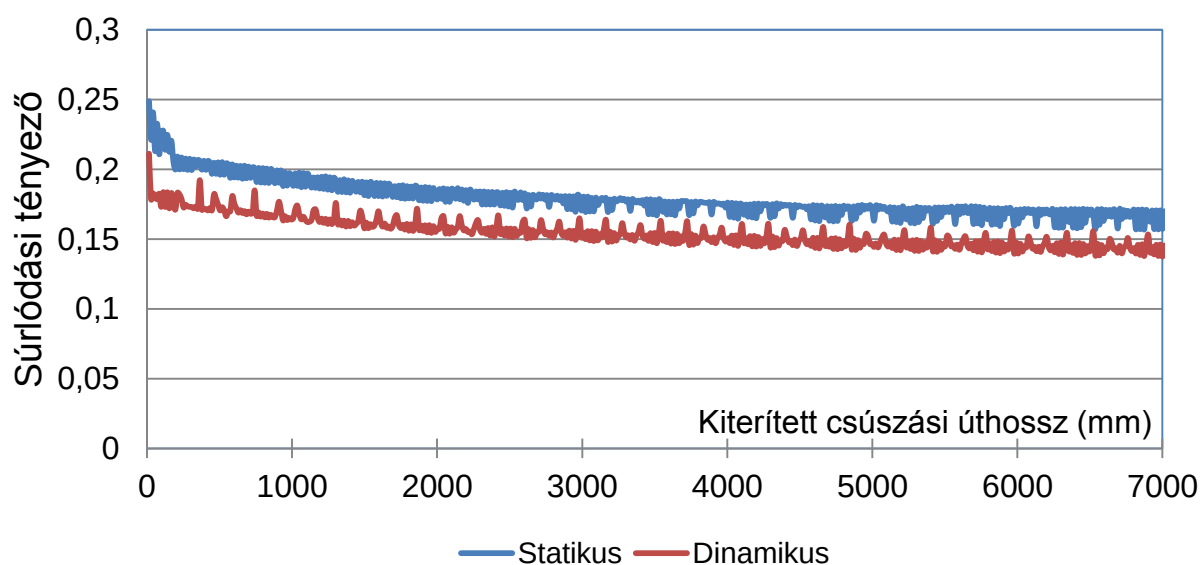


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

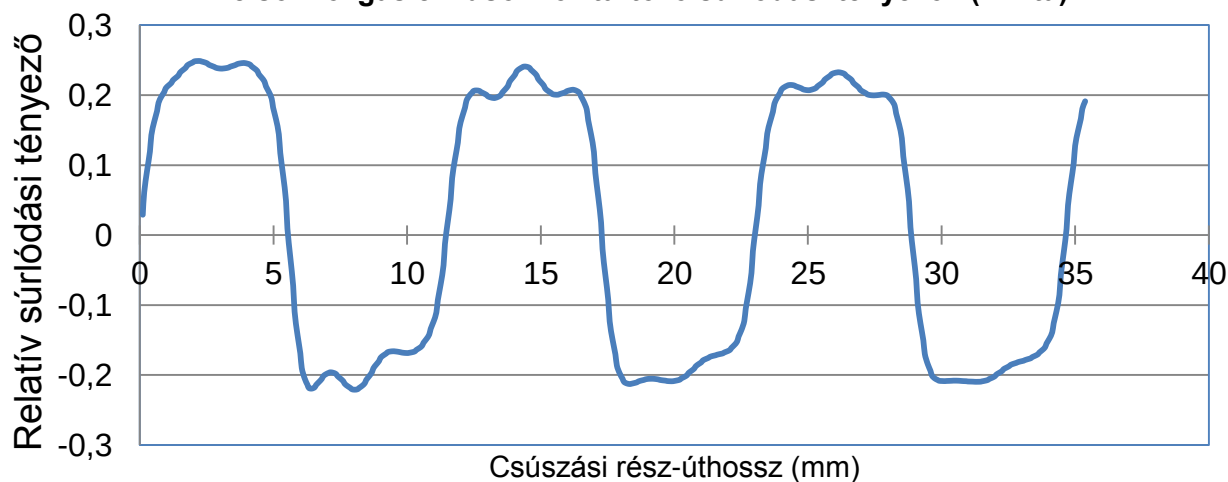


(PA66_MH_3.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

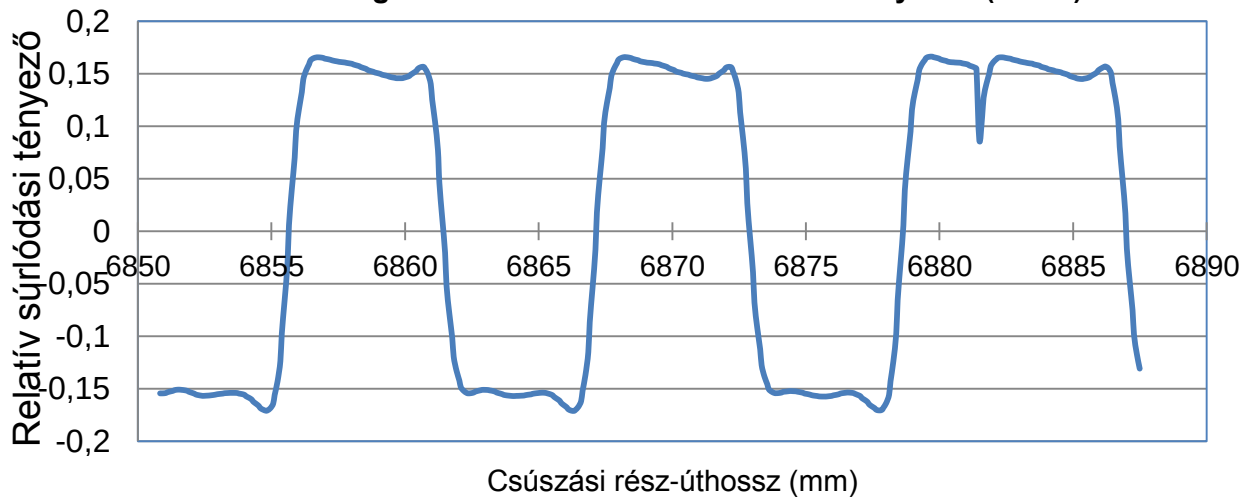
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

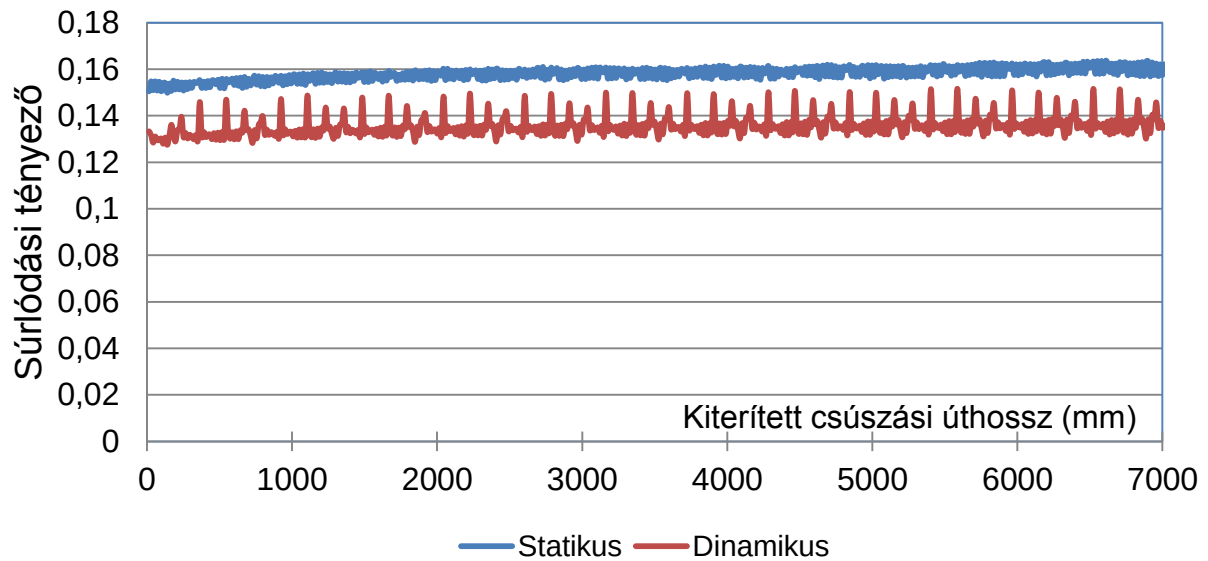


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

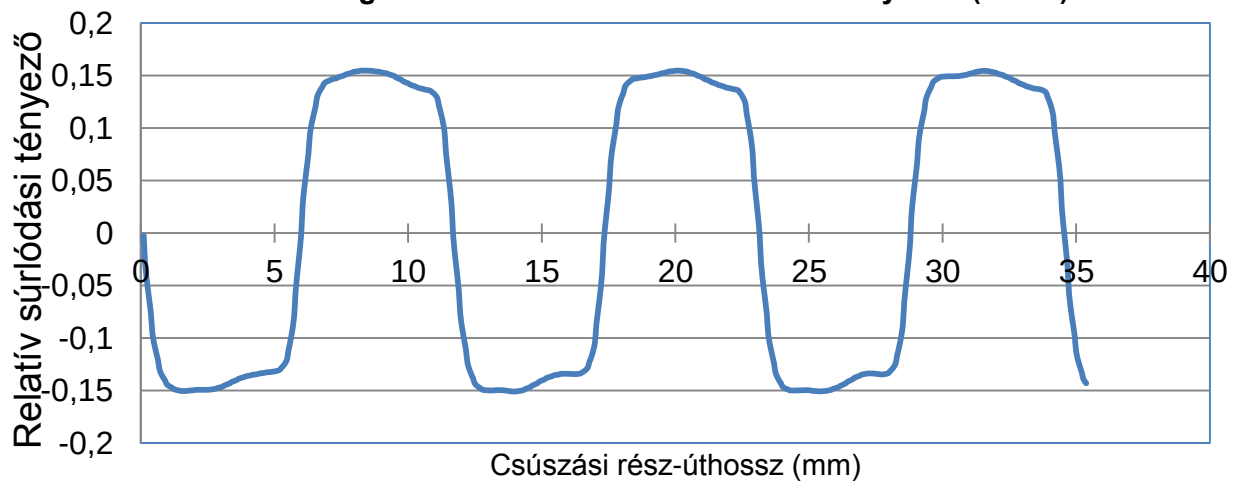


(PET_TF_1.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

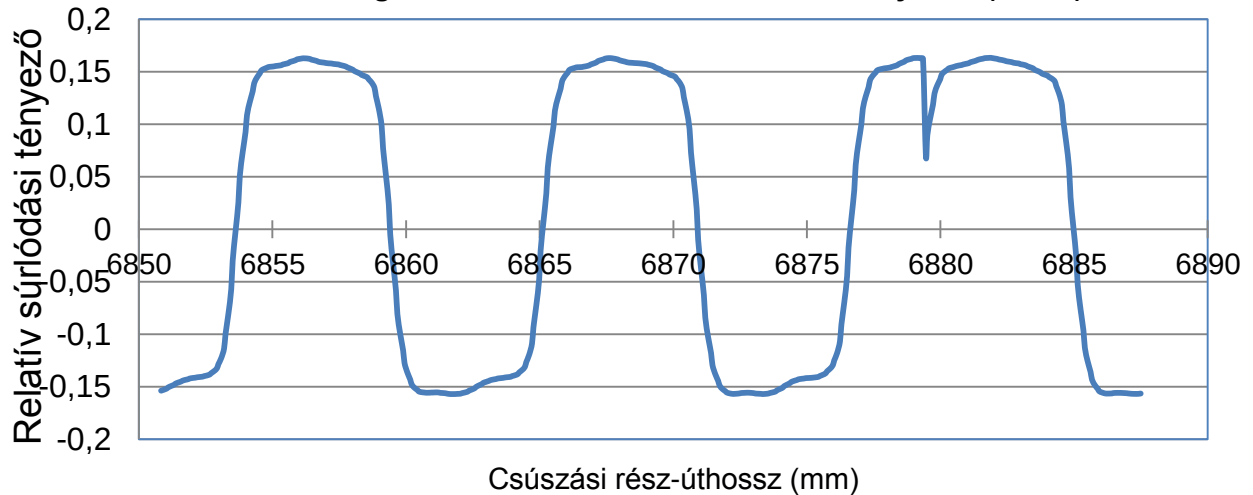
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

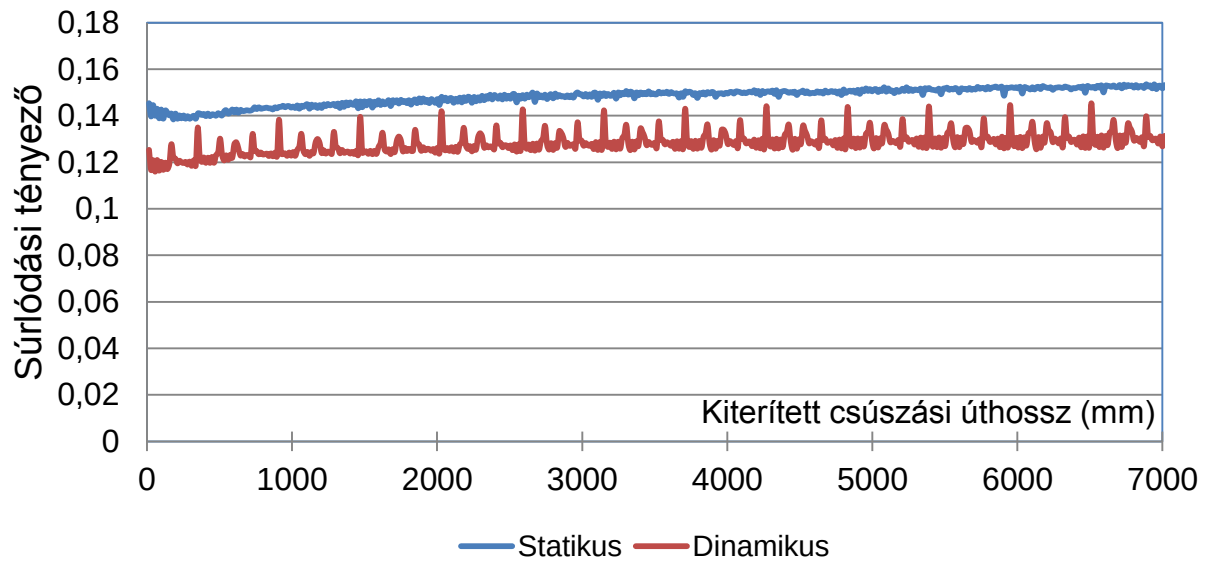


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

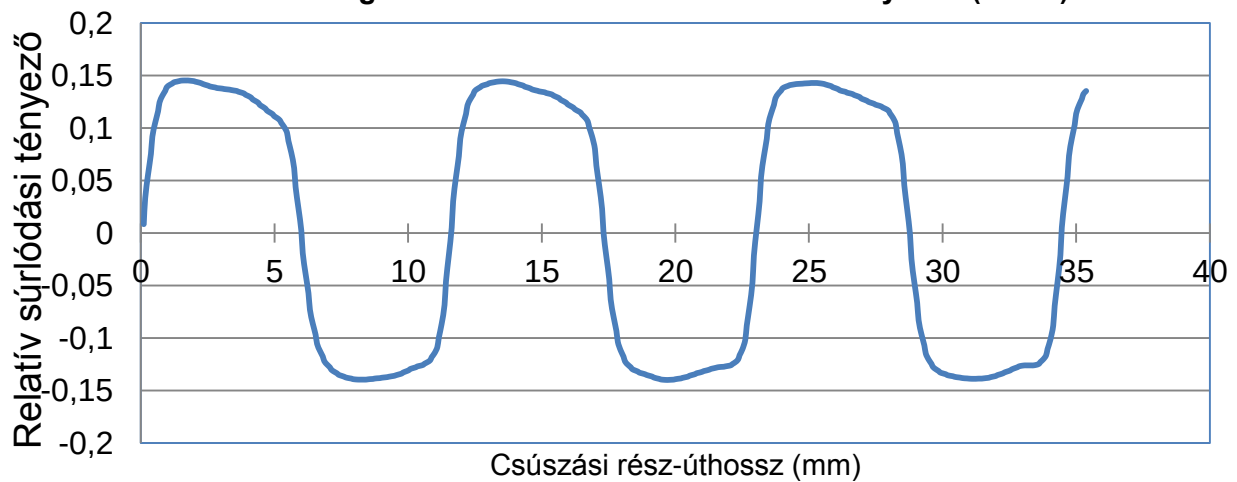


(PET_TF_2.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

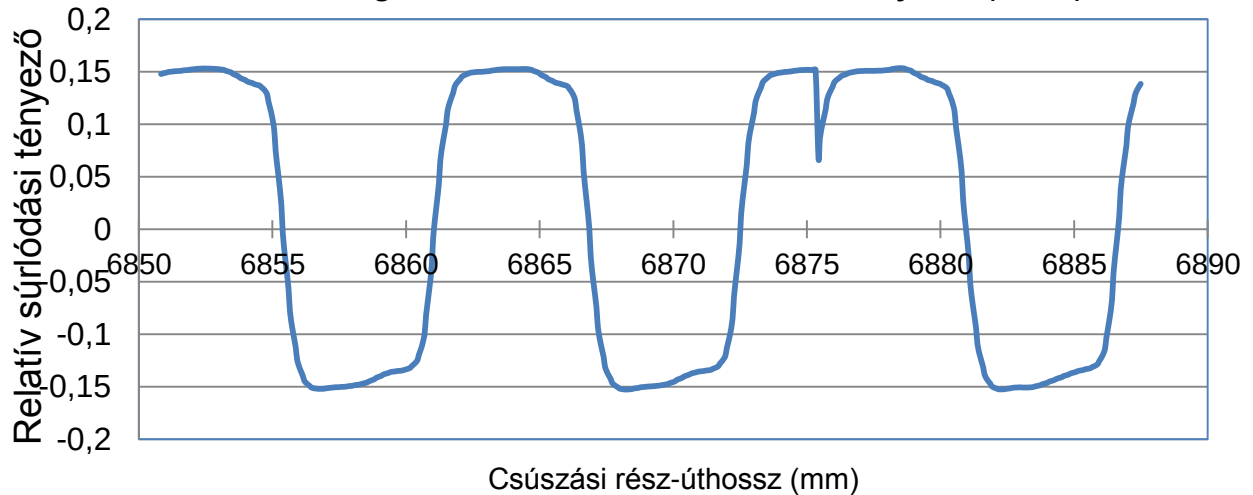
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

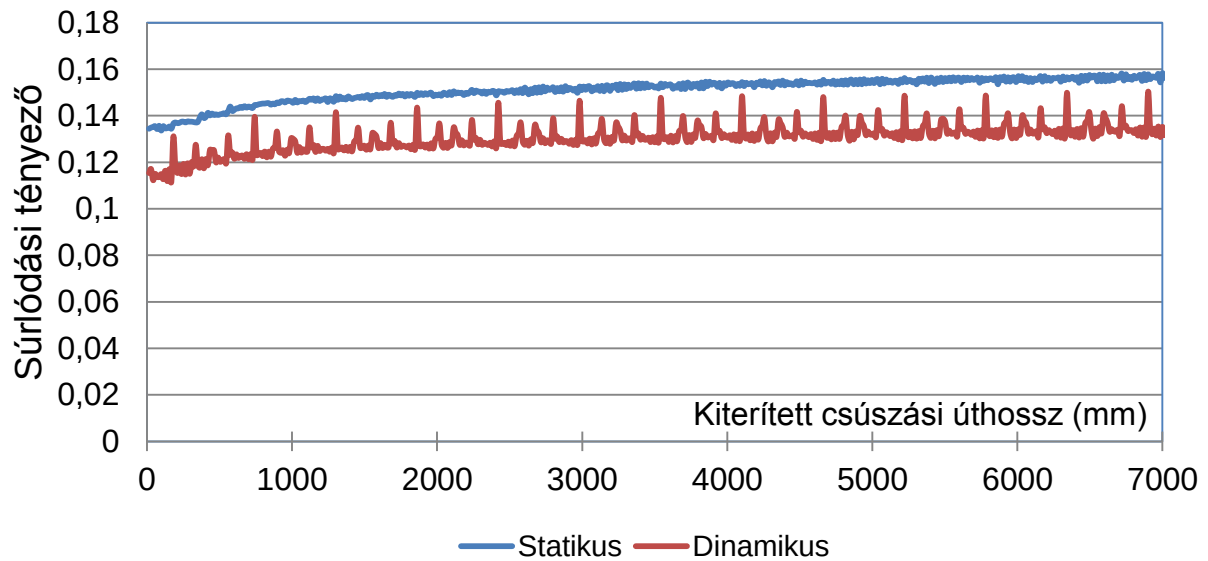


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

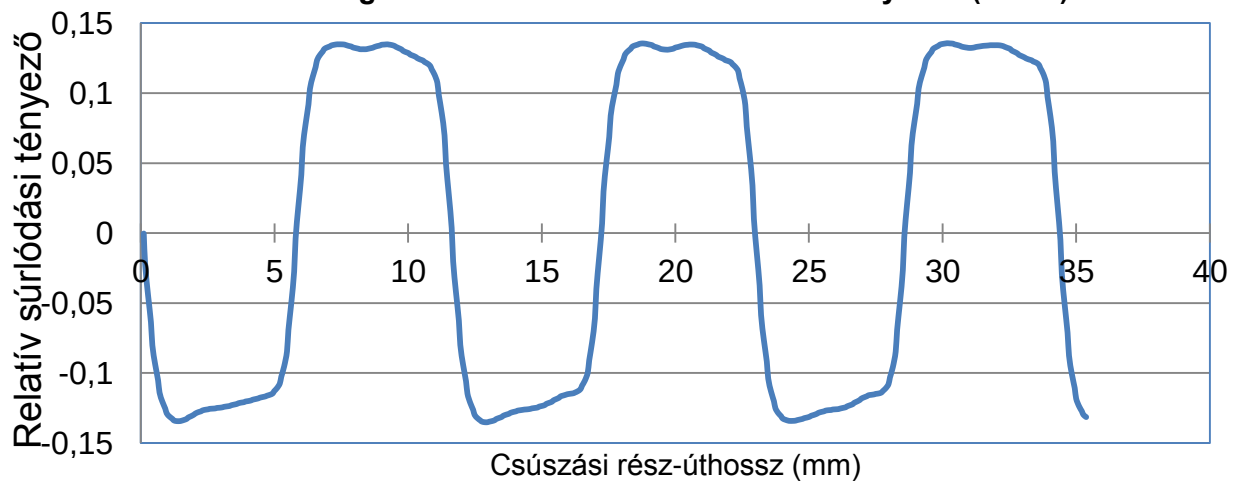


(PET_TF_3.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

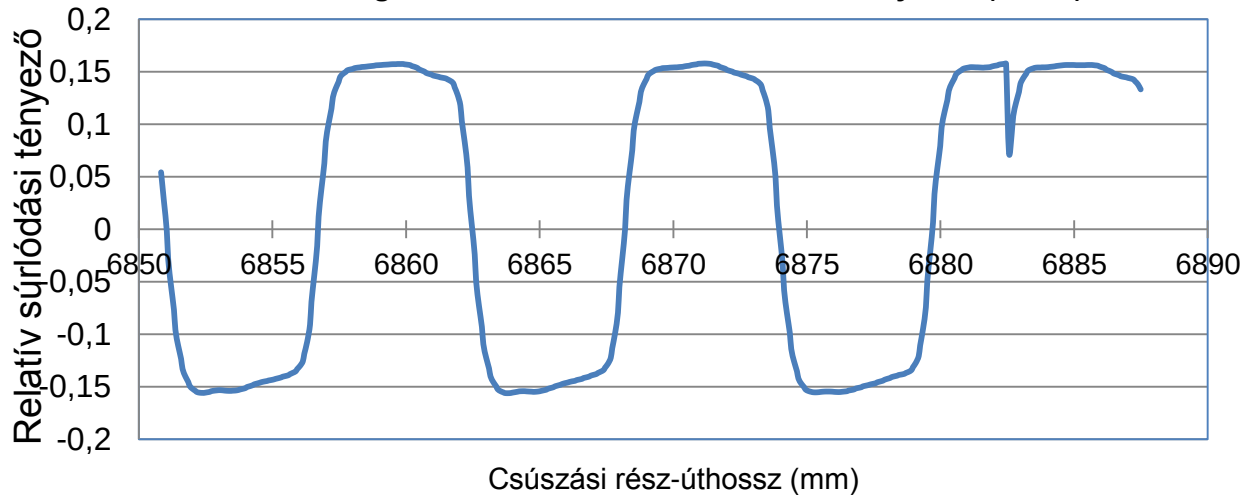
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

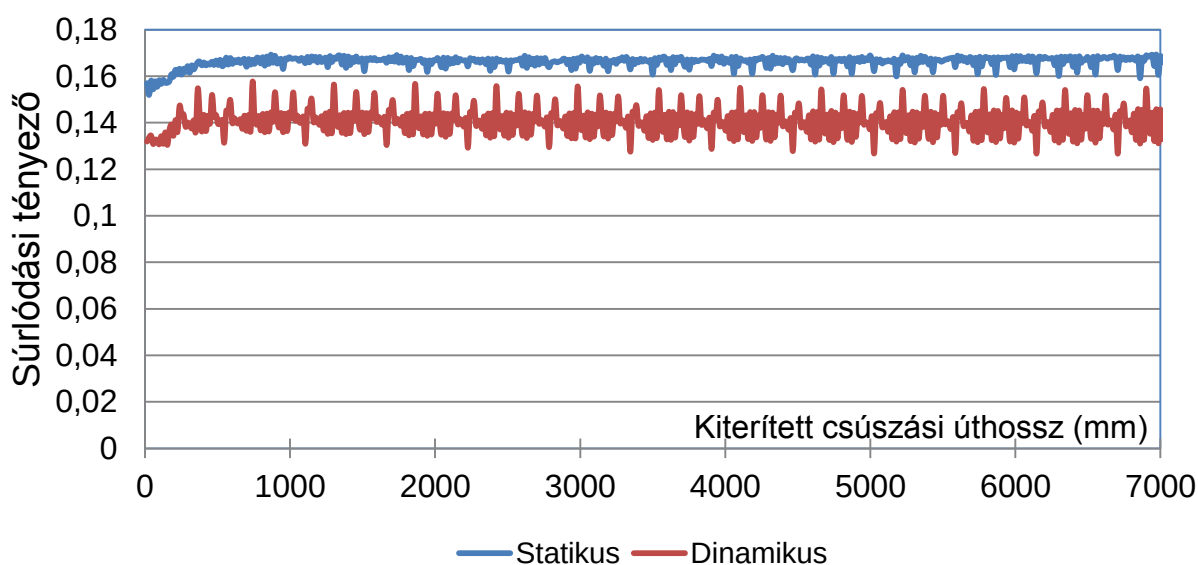


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

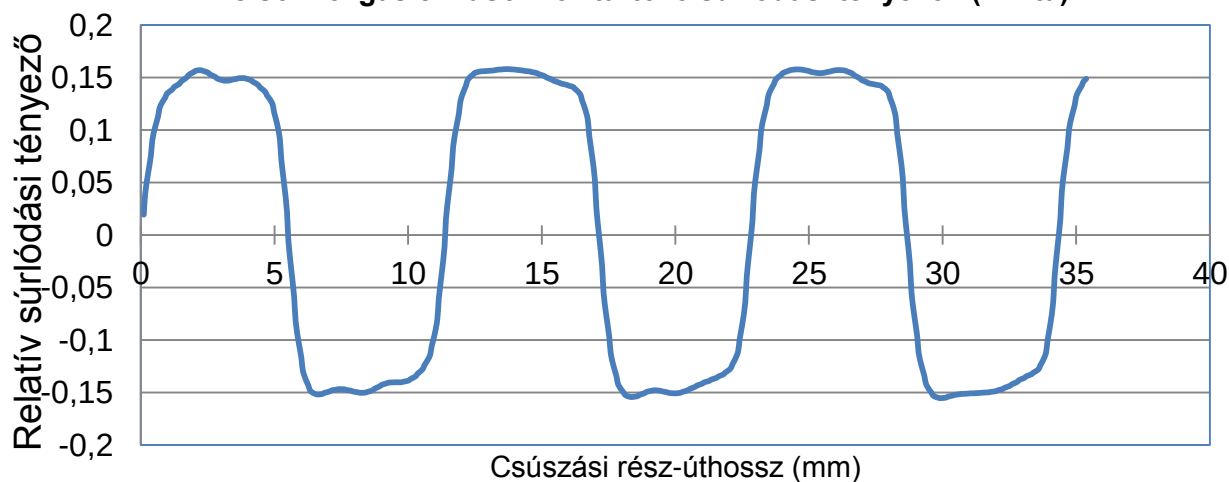


(POM_AD_AF_1.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

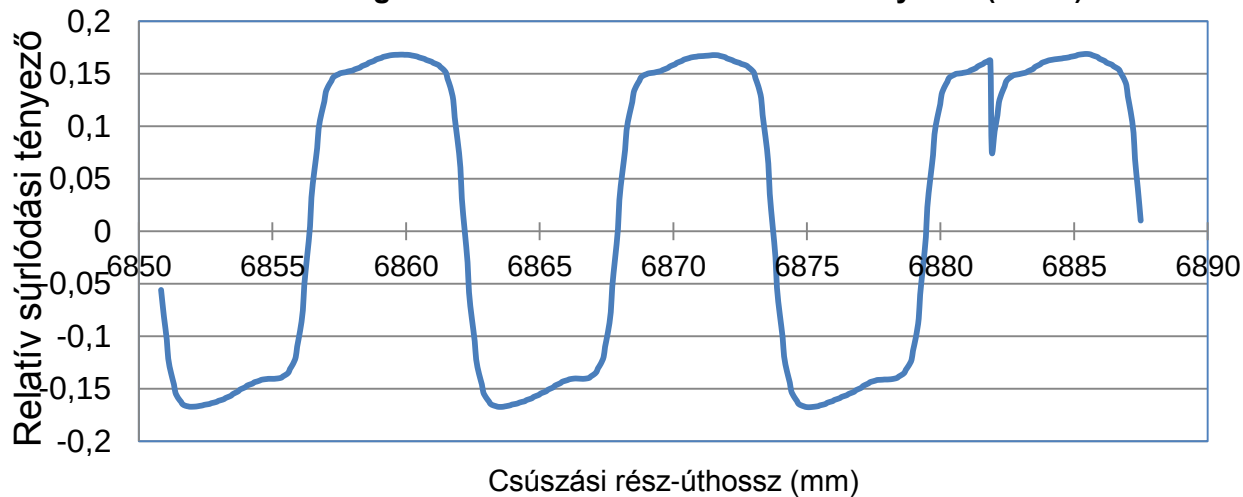
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

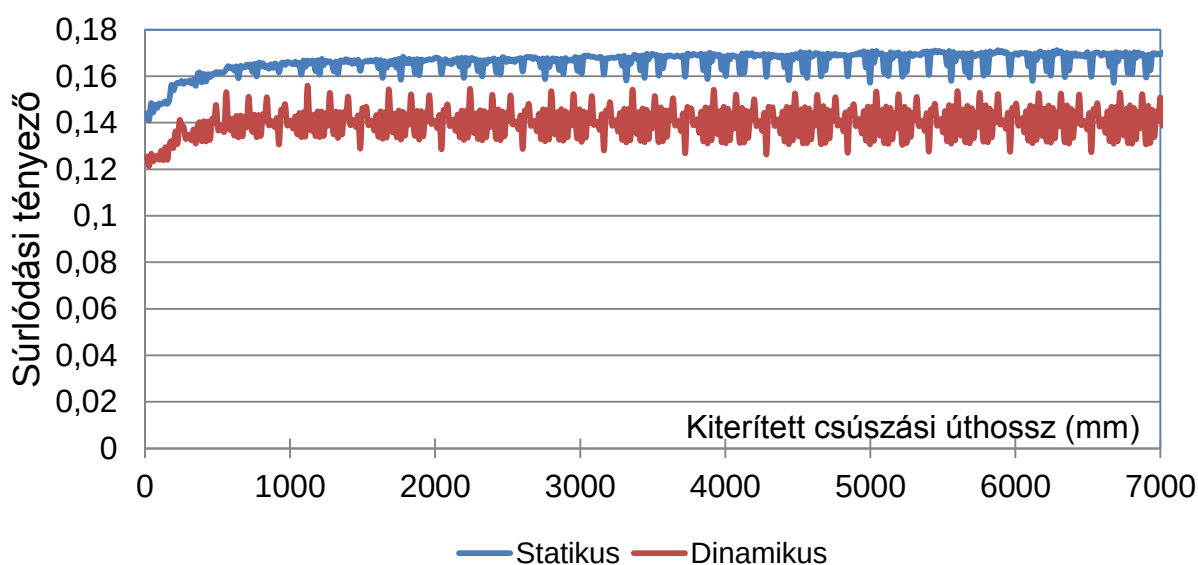


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

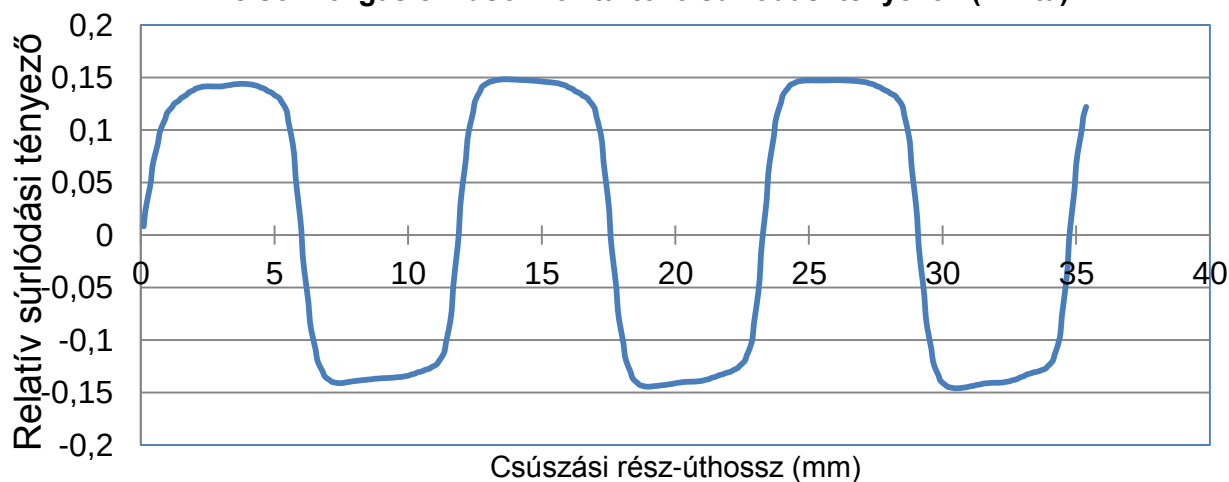


(POM_AD_AF_2.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

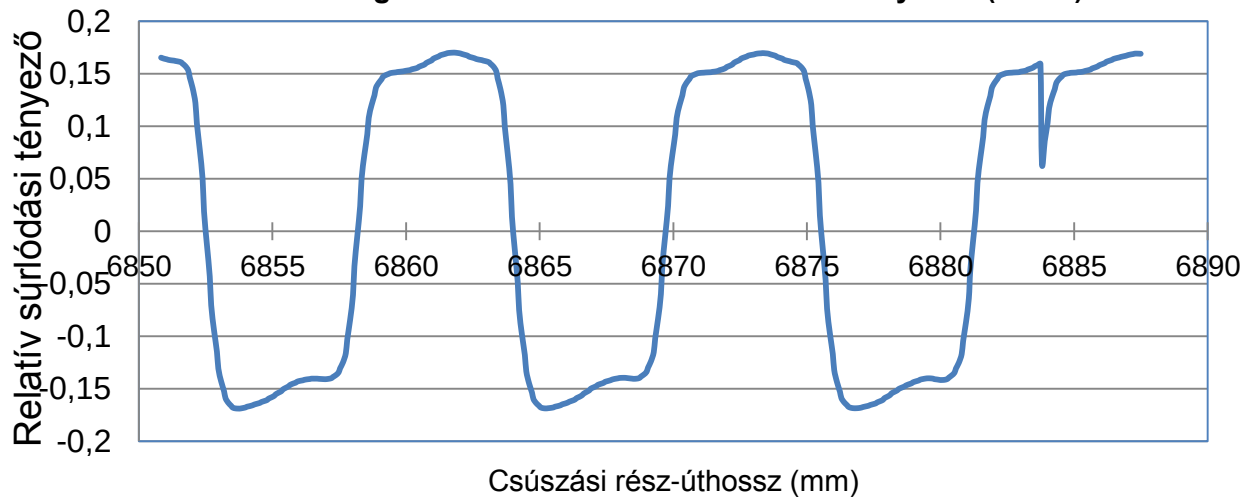
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

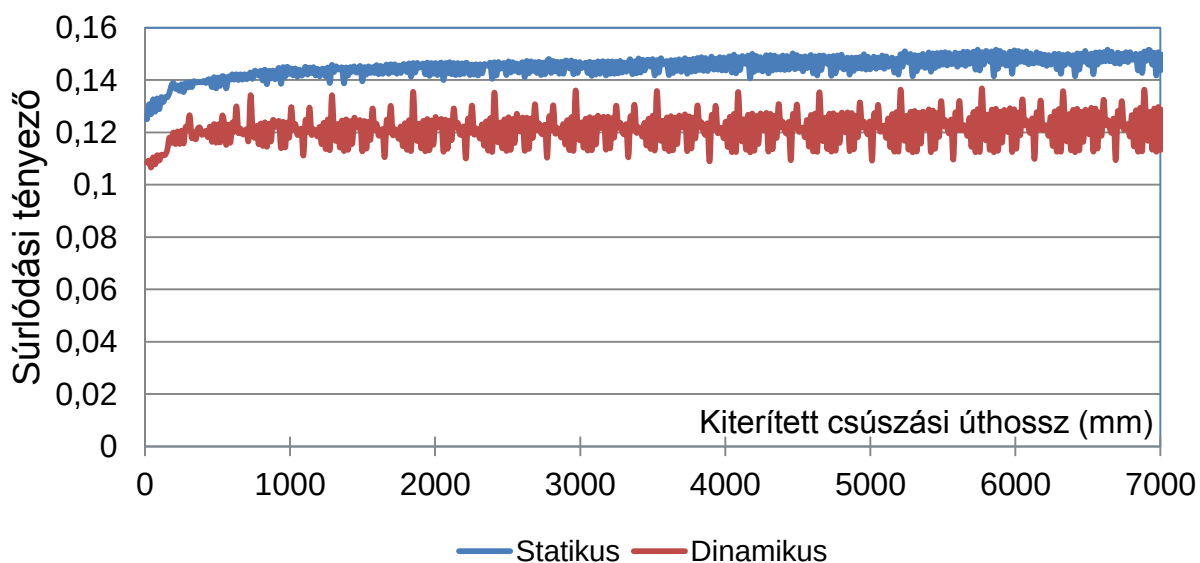


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

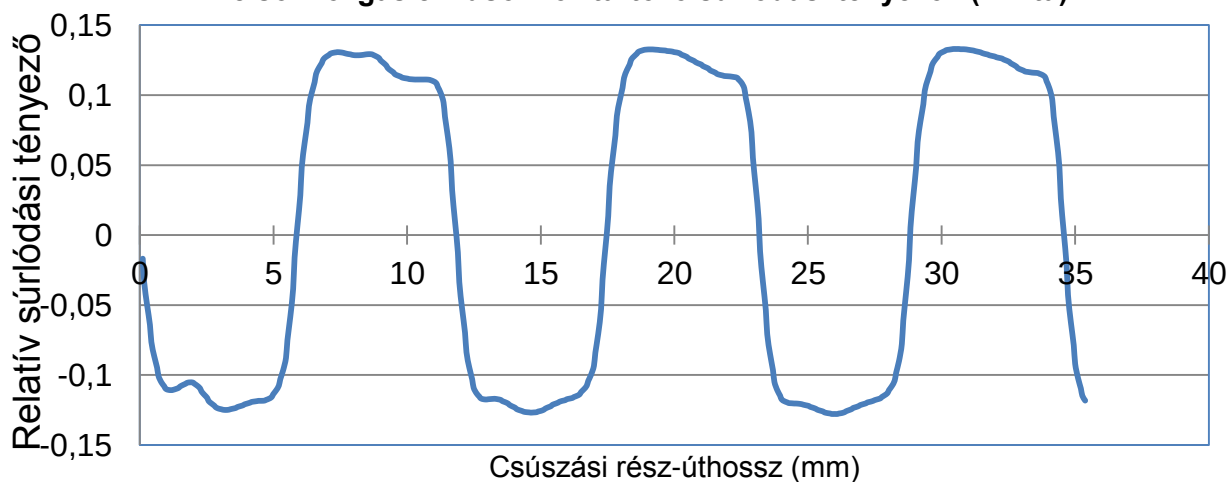


(POM_AD_AF_3.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

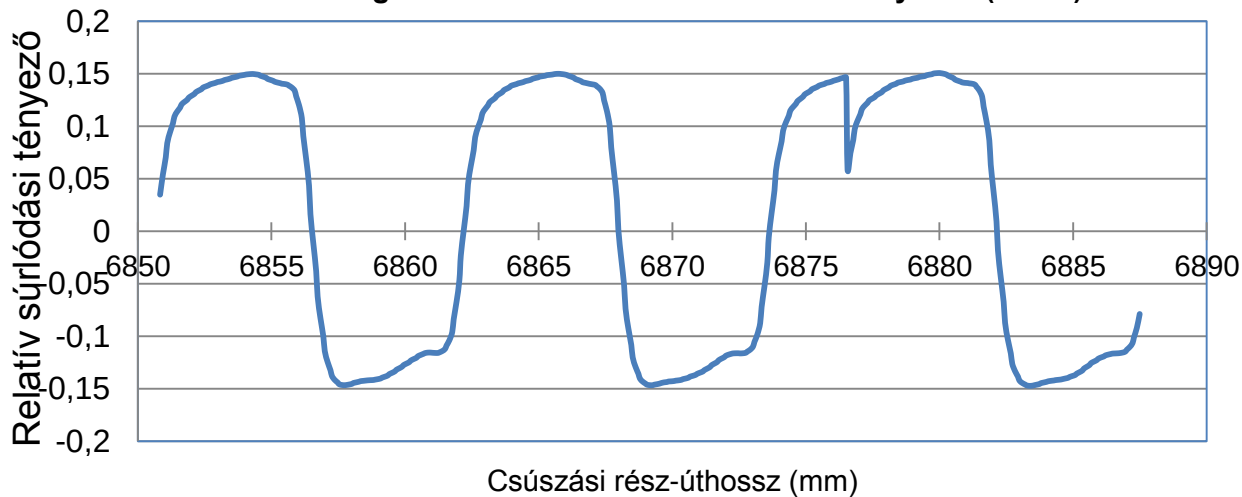
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

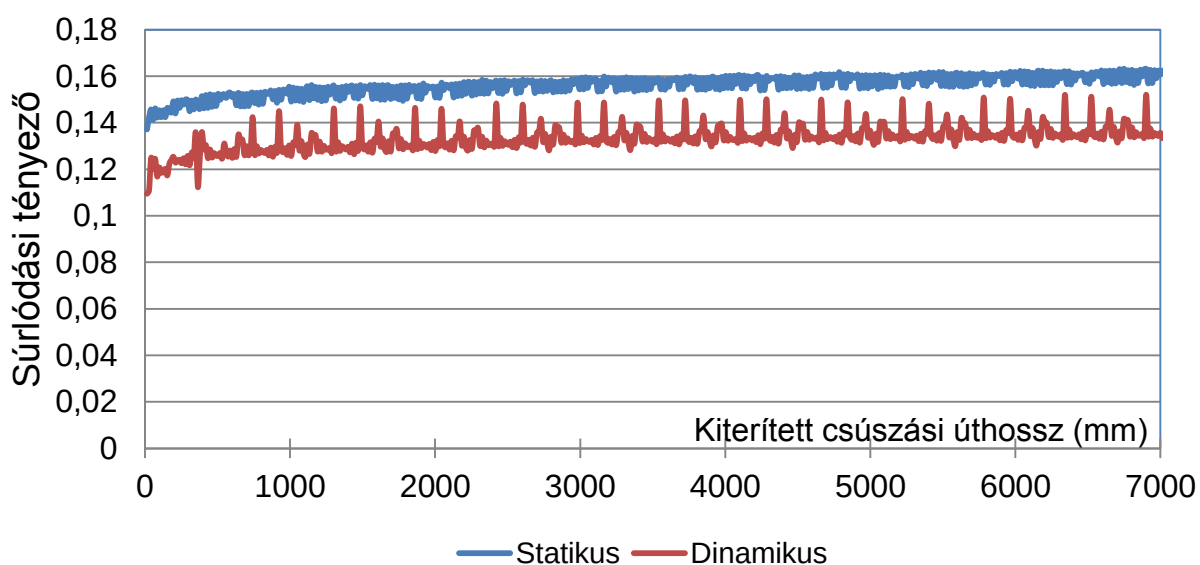


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

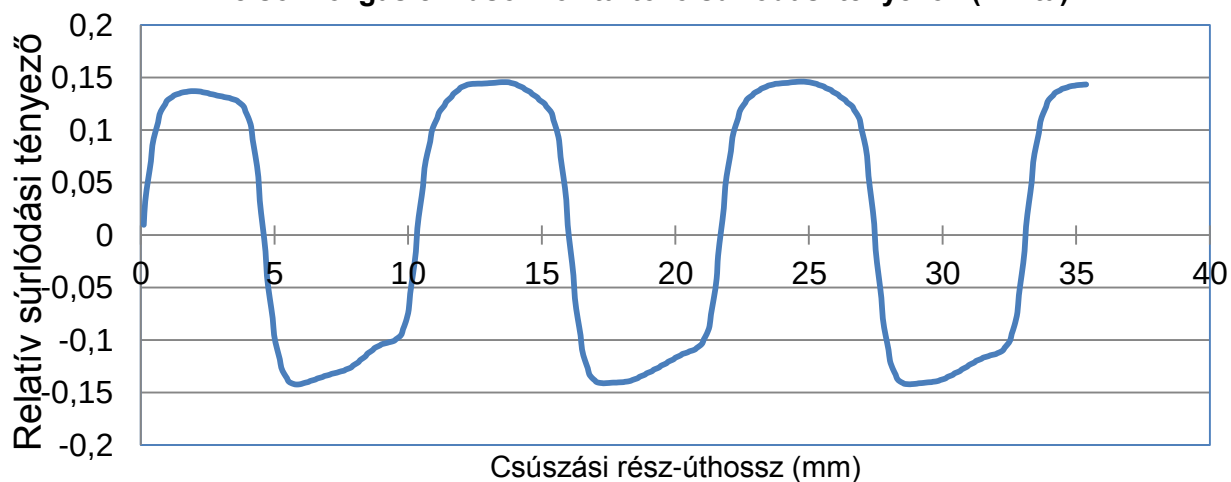


(POM_AH_LA_1.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

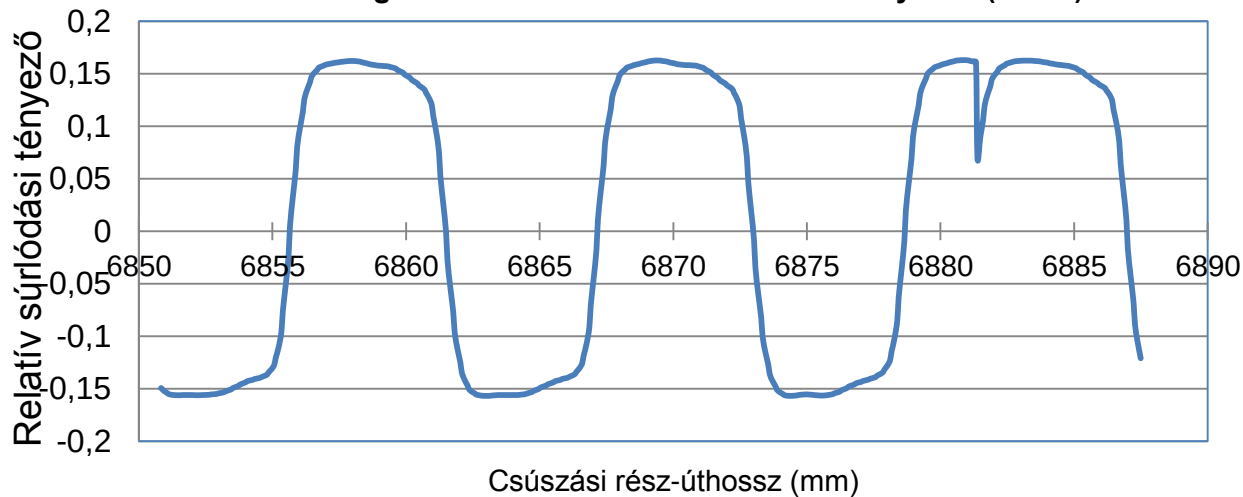
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

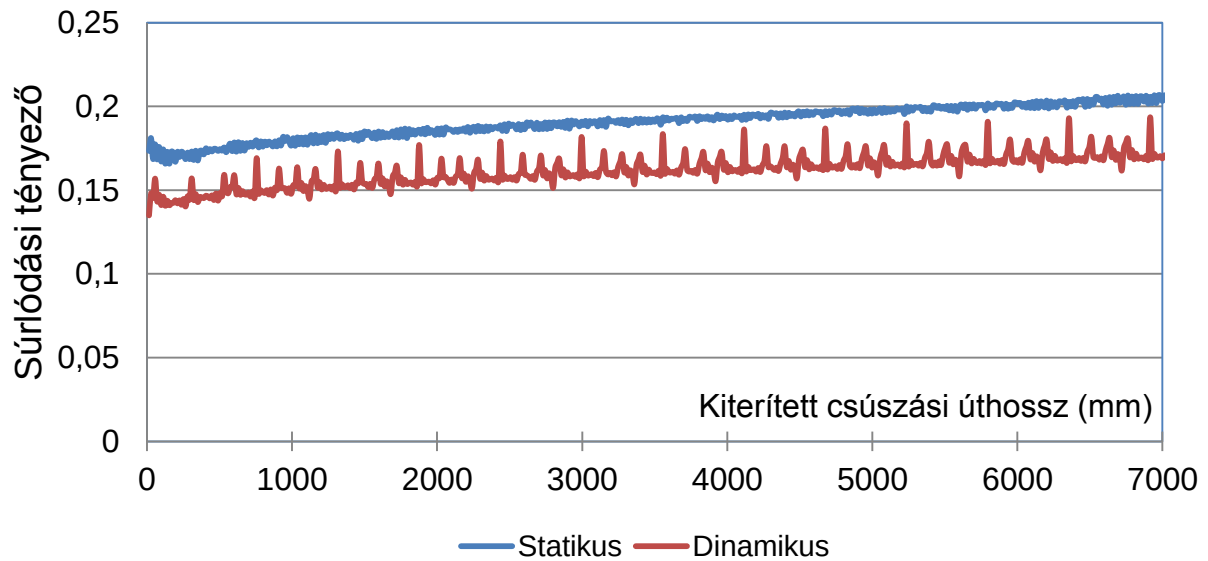


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

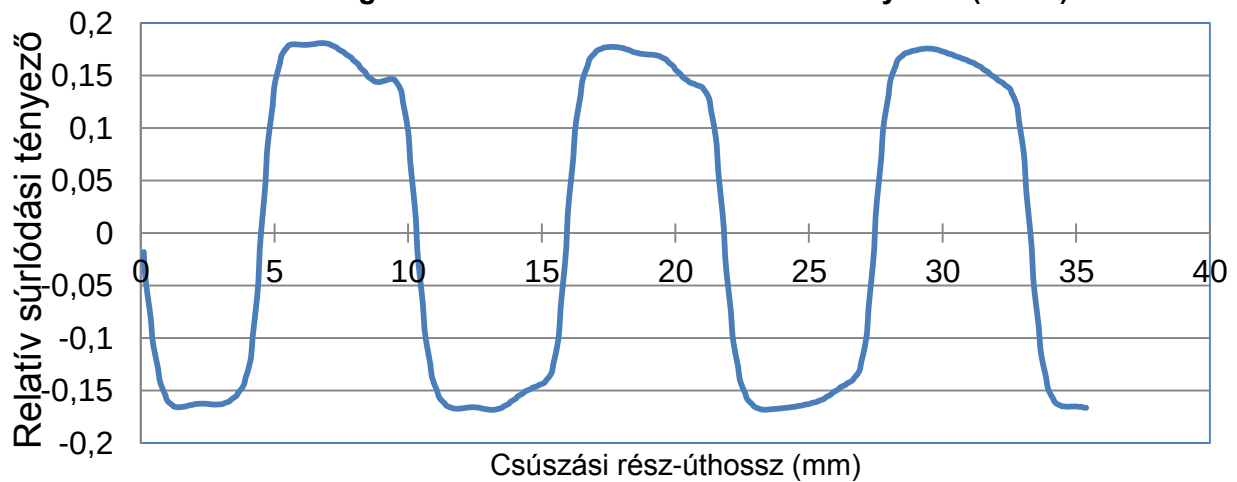


(POM_AH_LA_2.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

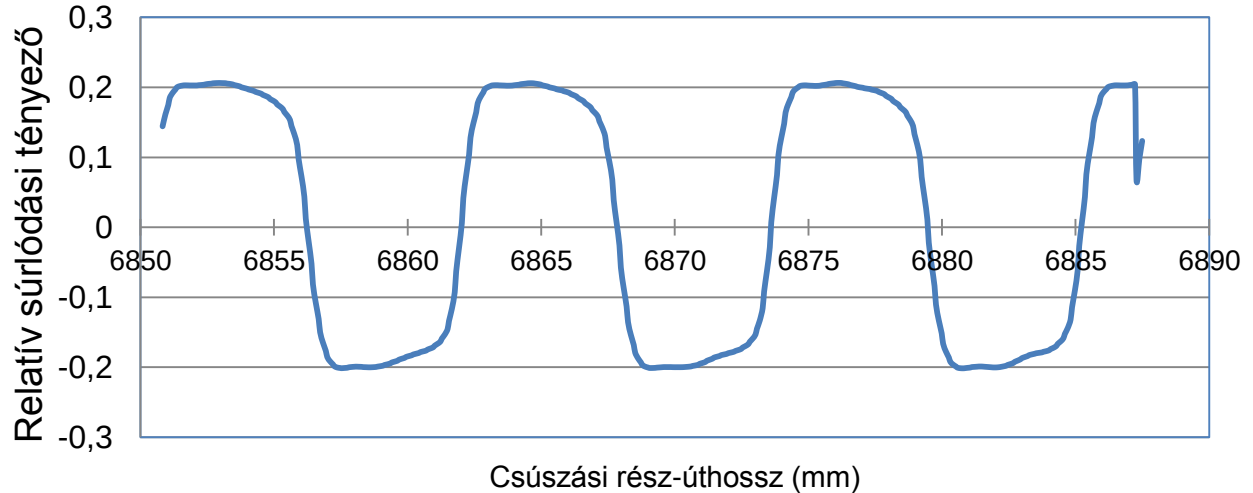
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők



Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

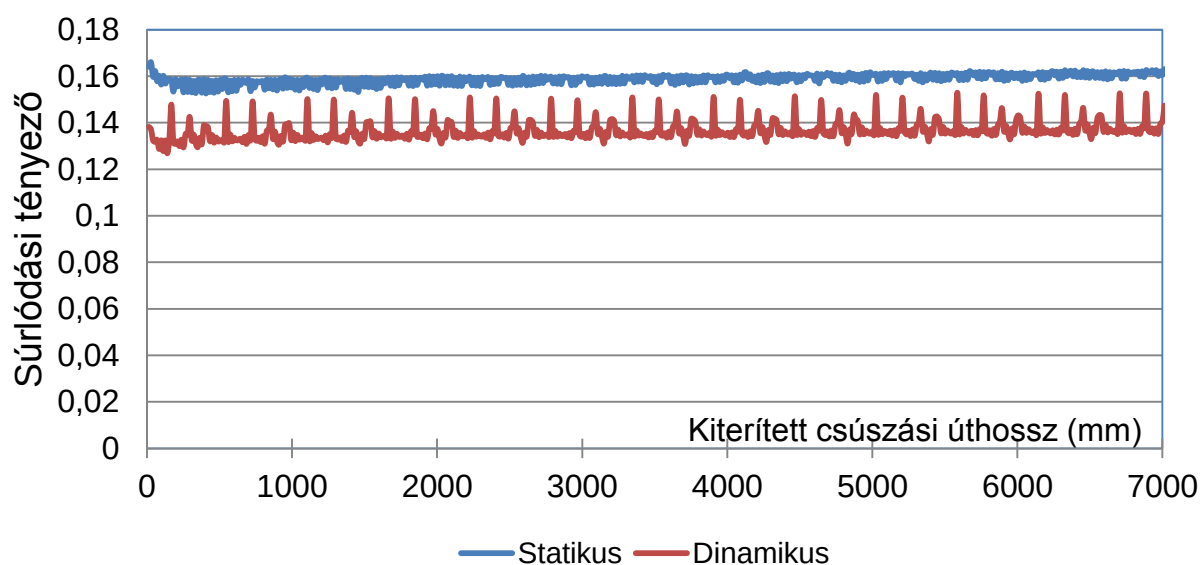


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

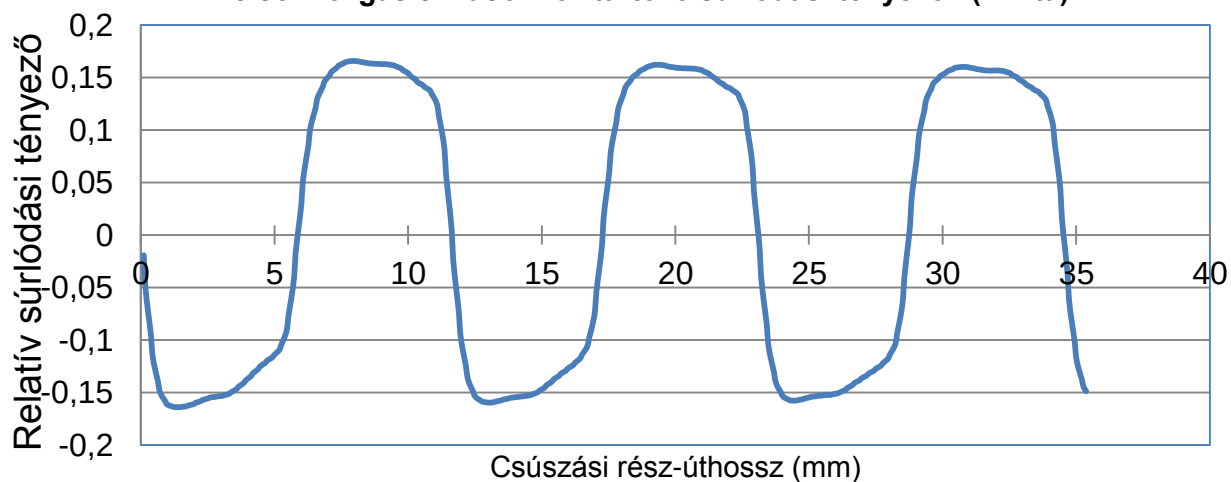


(POM_AH_LA_3.)10Hz150N40cycl_ertekeles.xlsx

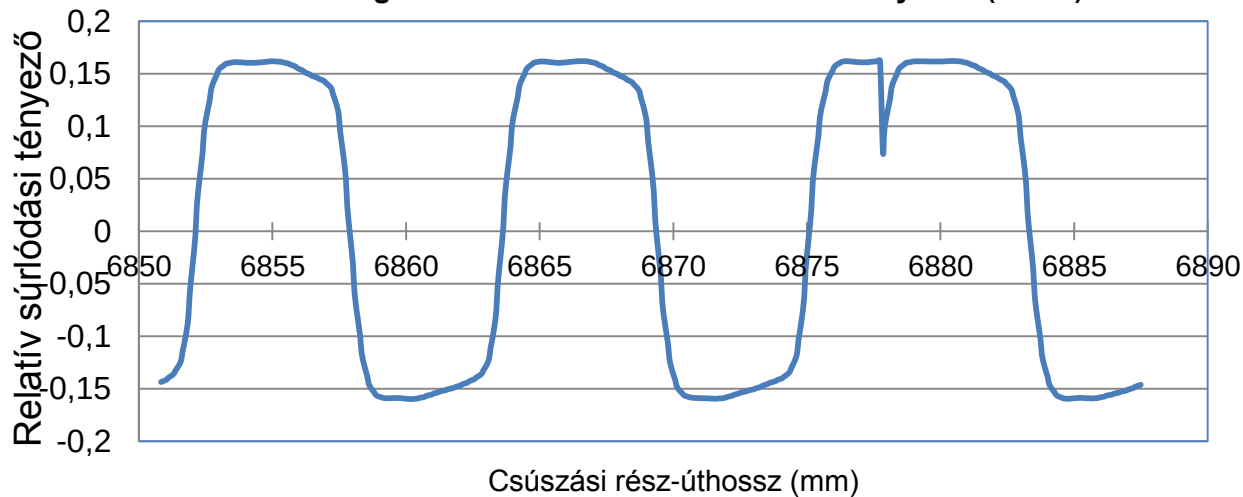
Statikus és dinamikus súrlódási tényezők

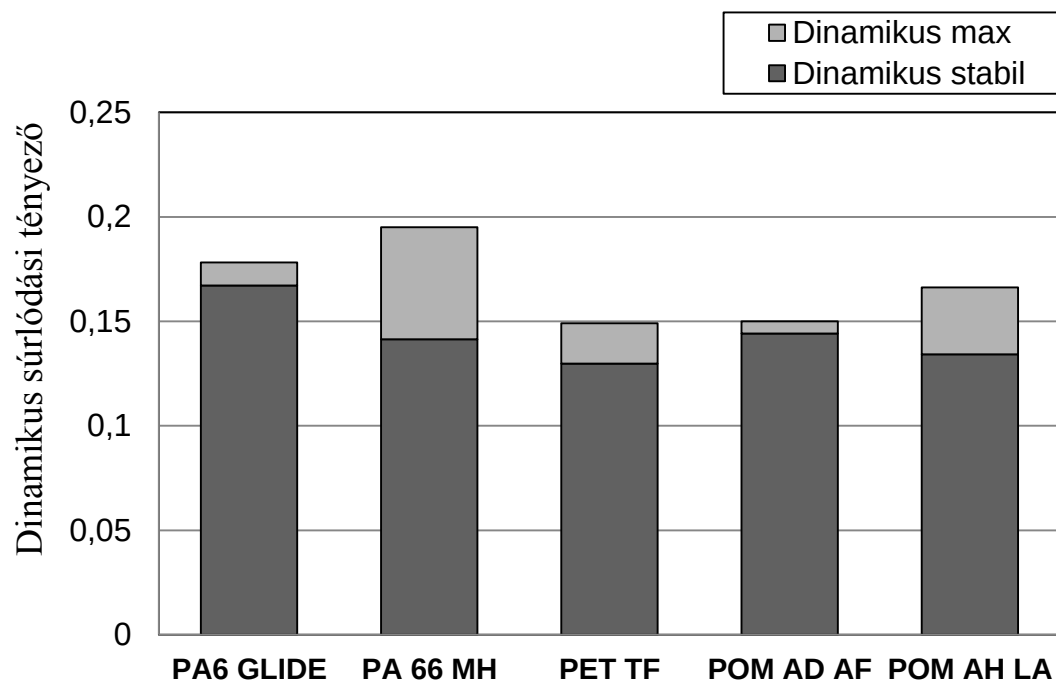


Az első mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)

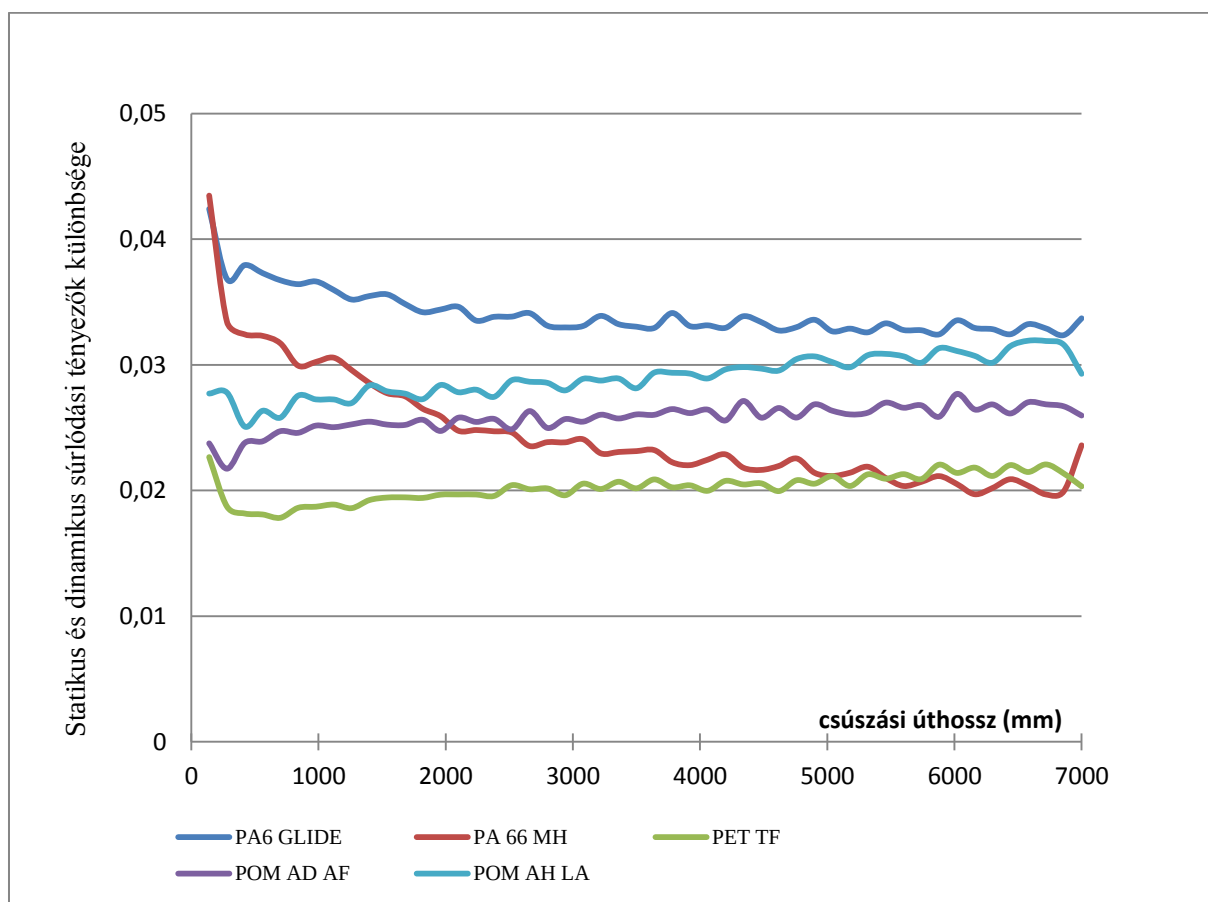


Az utolsó mozgás ciklusokhoz tartozó súrlódási tényezők (minta)





Dinamikus súrlódási tényező alakulása eltérő kompozitoknál



Eltérő polimerek statikus és dinamikus súrlódása közötti eltérések a csúszási úthossz függvényében

Irodalomjegyzék

- [1] Eleőd András - A felületközeli réteg viselkedése száraz súrlódás esetén, 2009
- [2] Dr. Valasek István – Tribológia kézikönyv, 1996
- [3] Dr. Jenei István, Ladányi Gábor – Kenésgazdálkodás, 2013
- [4] Gang Sheng Chen - Handbook of Friction-Vibration Interactions, 2014
- [5] Keresztes Róbert Zsolt - Műszaki műanyag/acél csúszópárok tribológiai kutatása, 2009
- [6] Dr. Valasek István – Tribológia kézikönyv, 2002
- [7] Dr. Kalácska Gábor – Műszaki polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban, 2007
- [8] Brian Armstrong-Hélouvry - Stick Slip control in low speed motion, 1993
- [9] Rolf Prehn - Tribologisch optimierte polymere Hochleistungsverbundwerkstoffe für den Einsatz unter abrasiven Bedingungen, 2006
- [10] Kovács Tünde Anna - Acélok szövetszerkezetének hatása, 2007
- [11] Dr. Janik József – Gépüzemfenntartás I., 2000
- [12] Uetz H.; Wiedemeyer, J.: Tribologie der Polymere, Carl Hanser, Munich, 1985.
- [13] Yamaguchi, Y.: Tribology of Plastic Materials, Tribology Series 16, Elsevier, Amsterdam, 1990; DIN 50322, Kategorien der Verschleißprüfung, Deutsche Norm 50322, Beuth Verlag, 1986.
- [14] Antal, Gy.; Friedrich, G.; Kalácska, G.; Kozma, M.: Műszaki műanyagok gépészeti alapjai, Minervasop Bt., Sopron, 1997.
- [15] Friedrich, K; Lu, Z; Hager, A., M.: Recent advances in polymer composites' tribology ,Wear 190/2 139-144 (1995).

Ábrajegyzék

Ábraszám	Ábraforrás
1.	Saját fotó
2.	Keresztes Róbert Zsolt - MŰSZAKI MŰANYAG/ACÉL CSÚSZÓPÁROK TRIBOLÓGIAI KUTATÁSA
3.	http://jeb.biologists.org/content/210/20/3538/F2.expansion.html
4.	Rolf Prehn - Tribologisch optimierte polymere Hochleistungsverbundwerkstoffe für den Einsatz unter abrasiven Bedingungen 2006
5.	Kovács Tünde Anna - ACÉLOK SZÖVETSZERKEZETÉNEK HATÁSA
6.	Kovács Tünde Anna - ACÉLOK SZÖVETSZERKEZETÉNEK HATÁSA