



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Polimer kompozitok forgácsolásának tribológiája

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Sarankó Ádám

Gödöllő

2022

## **A doktori iskola**

**megnevezése:** Műszaki Tudományi Doktori Iskola

**tudományága:** Agrárműszaki tudományok

**vezetője:** Prof. Dr. Kalácska Gábor  
egyetemi tanár, DSc  
MATE, Műszaki Intézet

**Témavezetők:** Prof. Dr. Kalácska Gábor  
egyetemi tanár, DSc  
MATE, Műszaki Intézet

Dr. Keresztes Róbert Zsolt  
egyetemi docens, PhD  
MATE, Műszaki Intézet

.....  
a témavezető jóváhagyása

.....  
az iskolavezető jóváhagyása

## TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK .....	4
1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége.....	4
1.2. Célkitűzések.....	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER .....	6
2.1. Esztergálási vizsgálatok.....	6
2.2. Tribológiai vizsgálatok .....	7
2.3. Függvényillesztés és regressziós vizsgálatok módszere.....	8
3. EREDMÉNYEK.....	9
3.1. Az erőmérés eredményei .....	9
3.2. A rezgésmérés eredményei .....	10
3.3. A kontakt zóna felületének mérési eredményei.....	12
3.4. Tribológiai vizsgálatok eredményei .....	13
3.5. A függvényillesztés eredményei.....	14
3.6. A regressziós vizsgálatok eredményei.....	15
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	17
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK .....	20
6. ÖSSZEFOGLALÁS .....	21
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK .....	22

## JELÖLÉSJEYZÉK

$\mu$	súrlódási tényező	[-]
A	súrlódási erőt leíró függvény együtthatója	[-]
B	súrlódási erőt leíró függvény együtthatója	[-]
C	súrlódási erőt leíró függvény együtthatója	[-]
$F_{\text{dinamikus}}$	rezgésből adódó dinamikus alternáló erő	[N]
$F_{\text{statikus}}$	statikus tömegből és önsúlyból adódó statikus erő	[N]
$p_v$	felületi nyomás és súrlódási sebesség szorzata	[MPa·m/s]
$R^2$	determinációs együttható	[-]
s	súrlódási úthossz	[m]
$v_c$	forgácsoló sebesség	[m/perc]

### 1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésem ezen fejezetében a téma időszerűségét, jelentőségét, valamint a célkitűzéseimet mutatom be.

#### 1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége

A műszaki műanyagok területén különösen gyors műszaki fejlődés figyelhető meg. Jelentős helyet foglalnak el a különböző adalékolt polimer kompozitok. Ezen szerkezeti anyagok két fő alkotója a szívós mátrix és a nagy szilárdságú erősítőanyag, amelyek között kiváló adhéziós kapcsolat van.

A gépészmérnöki gyakorlatban egyre szélesebb körben alkalmaznak kompozit gépelemeket számos előnyös tulajdonságuk miatt. Ezeket a gépelemeket leggyakrabban fröccsöntéssel vagy valamely forgácsolási eljárással állítják elő.

Az egyik leggyakrabban alkalmazott forgácsolási eljárás az esztergálás, ahol egyélű, általában álló szerszámmal történik a megmunkálás. Fontos ismerni a forgácsolás során jelentkező főforgácsoló erő nagyságát. Ennek ismeretében a forgácsoló szerszám terhelése egyenletesebbé tehető, valamint a helyes forgácsolási paraméterek megadása esetén a forgácsolt anyagban a visszamaradó feszültség minimálisra csökkenthető.

A beállított paraméterek hatást gyakorolnak a forgácsolás során keletkező hőre is. Helyes technológiai beállítások során a forgácsleválasztási rendszer

jellemzői – erőhatások, súrlódás, hőkeletkezés - nem okozhatnak a kompozit anyagban jelentős változásokat, károsodásokat, mivel ezzel megváltozhat a kompozit anyag tulajdonsága.

A forgácsolás - mint tribológiai folyamat a szerszám és munkadarab között - befolyásolt a keletkező súrlódási és nyírási munkából disszipálódott hő által, mely jelentős hatást fejthet ki a megmunkált felület minőségére. Az érdekesség, a mikrorepedések, a hordozó felület nagysága, a tényleges felületi hordképesség, az elérhető méretpontosság, mely a forgácsolási eljárások igen nagy előnye, közvetlenül befolyásolt. A leváló forgács típusára a szerszám homloklapfelületén ébredő súrlódás is hat, melyet tovább bonyolít a technológiai folyamatot jellemző rezgő hatás a szerszámgép-munkadarab kapcsolatban.

Ez az összetett hatás polimerek esetén kevésbé ismert. Ennek következtében a forgácsolás optimalizálása és a potenciális mérnöki használhatóság, a súrlódó gépelemek méretezésének, tervezésének és gyárthatóságának részletes és pontos tisztázása a közeljövő feladata.

### **1.2. Célkitűzések**

Kutatási célom, hogy meghatározzam az egyélű megmunkálás (esztergálás) tribológiai vonatkozásait, néhány, a mérnöki gyakorlatban gyakran használt natúr és kompozit műszaki műanyag esetén.

Ennek eléréséhez a következő célfeladatokat tűzöm ki:

- forgácsolási vizsgálatok elvégzése extrudált poliamid 6 (PA 6 E) alappolimeren, illetve kétfajta kompozitján, eltérő paraméterek megadásával. Mérem a szerszámra ható főforgácsoló- és előtoló erőt. A mért értékekből látható lesz, hogy különböző műszaki műanyag kompozitok esztergálása esetén a forgácsolási paramétereket változtatva, milyen erők hatnak a szerszámra. Megvizsgálom továbbá, hogy anyagonként a paraméterek változtatásával hogyan változik a főforgácsoló erő,
- kiegészítő esztergálási vizsgálatokat végzek, mellyel meghatározom a leváló forgács és az esztergalapka homloklapja közötti tribológiai kontakt zónát. Megállapítom, hogy a zóna területének nagysága mely paraméterektől, hogyan függ,
- kisméretű próbatesteken egyszerű tribológiai vizsgálatokat végzek, melyeknél a vizsgálatok bemeneti paramétereit a forgácsolási vizsgálataim kimeneti paraméterei alapján állítom be,
- A tribológiai vizsgálatok eredményeit elemzem, majd matematikai statisztikai módszerrel a súrlódási erő változására vonatkozó összefüggést írok fel

## 2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben a kutatási céljaim megvalósításához használt kísérleti módszereket és eszközöket mutatom be.

### 2.1. Esztergálási vizsgálatok

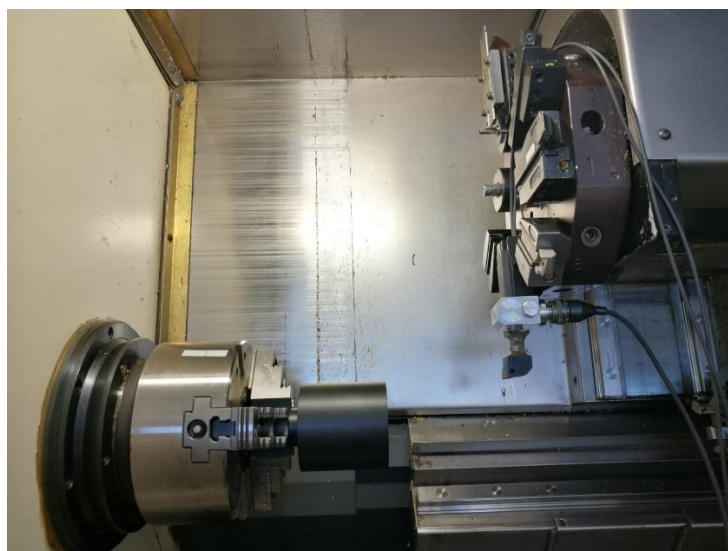
Esztergálási vizsgálataim elvégzése során három féle munkadarab anyagot használtam (PA 6 E, PA 66 GF30 és PA 6G-H ELS). Mindhárom anyagtypusból 3 darab hengeres munkadarabot készítettem palástesztergálási vizsgálataimhoz, melyeken a mérési hossz 4 darab 20 mm-es szakaszból áll. A mérési átmérők folyton változtak 12 érték között, melyeket úgy határoztam meg, hogy az NCT EUROturn 12-B típusú CNC esztergagép főorsója 4 különböző fordulatszámot vegyen fel (780, 1080, 1380 és 1680 fordulat/perc), valamint a forgácsolási sebesség értékek az általános katalógus adatoknak megfelelően 100 és 400 m/perc közé essenek és 50-nel oszthatók legyenek.

A szerszám gépbe egy szabványos B7-20x16x30 késtartóból készített egyedi késtartót helyeztem, mely egy nyúlásmérő bélyegekkel ellátott SCLCR 20.20 K09 típusú készszárat fogadott. Eszterga váltólapjának a munkadarabok anyagait figyelembe véve egy CCGW09T304FST típusú, KD1425 osztályú polikristályos gyémánt bevonatú lapkát választottam.

A főforgácsoló erők mérésekor mindig azonos fogásmélységet (0,5 mm), valamint négy különböző előtolást alkalmaztam a négy mérési szakaszon (0,1; 0,15; 0,2 és 0,25 mm/fordulat).

A készszár kábelén keresztül csatlakozott a Spider 8 típusú mérőerősítőhöz, mely szintén kábelén csatlakozott egy számítógéphez, amin a Catman nevű szoftverrel valós időben monitoroztam a mérést, majd elmentettem az eredményeket későbbi feldolgozás céljából.

A készszár rezgésértékeit egy SLD-144S típusú rezgésmérővel mértem. Ehhez a késnyúlást 50 mm-re módosítottam a késtartóhoz képest (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**). A rezgésmérő egy Leonova Diamond DIA-300 típusú adatgyűjtő egységhez kapcsolódott kábelek segítségével, mely elmentette az adatokat későbbi feldolgozás céljából. A feldolgozás számítógépen, a Condmaster Ruby nevű szoftverrel történt.



2.1. ábra Munkadarab és szerszám környezete mérés előtt

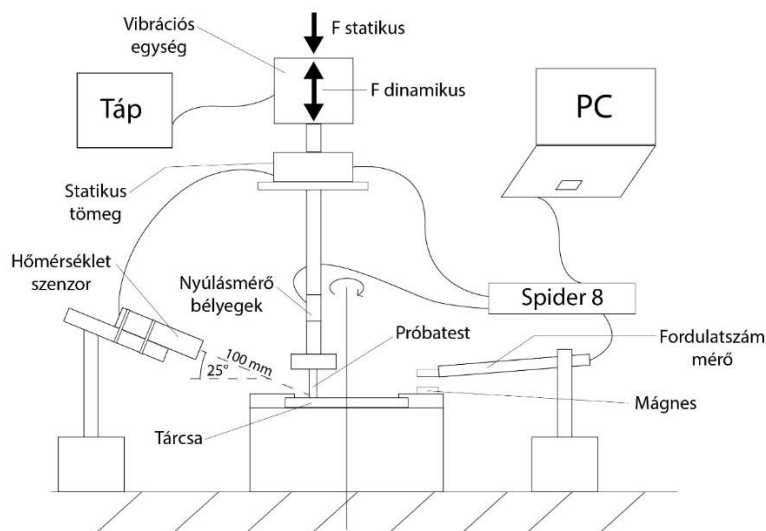
A kontakt zóna a szerszám homloklapja és a munkadarabról levált forgács tényleges súrlódó felületének nagysága. Ez tribológiai szempontból egy fontos adat, így ennek meghatározására további vizsgálatokat végeztem. Az E 400 típusú esztergagépen állandó fogásmélység (0,5 mm) mellett négyféle (0,1; 0,2; 0,4 és 0,6 mm/fordulat) előtolást alkalmaztam, állandó 530 1/perc főorsó fordulatszám mellett. A késszár és a lapka típusa megegyezett az erőmérésnél használtakkal. A lapkát minden mérés előtt gondosan megtisztítottam, majd befestettem. Esztergálás után a lapkát egy BMS 74290 típusú mikroszkóp tárgyasztalára helyeztem, majd egy BMS 764595 típusú digitális kamerával fényképet készítettem. A képek mentését a ScopePhoto 3.1.615 szoftverrel, a kontakt zóna kiszámítását pedig az Adobe Photoshop CC 2018 szoftverrel végeztem.

### **2.2. Tribológiai vizsgálatok**

Tribológiai vizsgálatok gyanánt Pin-on-Disc típusú tribológiai kisminta modellvizsgálatokat végeztem. A vizsgálatok bemeneti paramétereiként felhasználtam az esztergálási vizsgálatok kimeneti paramétereit. A próbatestek anyagai megegyeztek az esztergálási vizsgálatok munkadarabjainak anyagaival, tárcsa anyagának pedig Hard Carbon bevonatolású keményfém tárcsát választottam. A hozzáadott rezgések biztosítására készítettem egy vibrációs egységet, mely 13, 18, 23 és 28 Hz frekvenciájú rezgést biztosít. A rezgés a tárcsa felületére normál irányú alternáló erőket eredményezett (0,23; 0,53; 0,8 és 1,2 N), melyeket dinamikus erőknél neveztem el. Ezt hozzáadtam a statikus erőhöz, mely az eszközök tömegéből és esetenként egyéb hozzáadott tömegekből adódó erőt

eredményezett, szintén a tárcsára merőleges irányban. Az összegzés után eredményül a nyomóerőt kaptam.

A súrlódási erőt a két irányban mért súrlódási erőkomponensekből, számítással határoztam meg. A vizsgáló berendezés elvi vázlatát mutatja a 2.2. ábra.



2.2. ábra Tribológiai vizsgálataim elvi felépítése

### 2.3. Függvényillesztés és regressziós vizsgálatok módszere

Az esztergálási és a tribológiai vizsgálatok közötti kapcsolatok megteremtéséhez a  $p_v$  értéket használtam, ami egy csúszási súrlódási rendszerben a felületi nyomás és a csúszási sebesség szorzata.

A DIN 50322 szabványnak megfelelően tribológiai kisminta modellvizsgálatokat végeztem, melyekben az esztergálási vizsgálatoknál számított  $p_v$  értékek 250-ed részét vettem alapul.

Tribológiai vizsgálataim eredményeit függvényvizsgálatnak vettem alá, melyhez a MATLAB R2019b nevű szoftver függvénykereső funkcióját használtam. A függvénycsalád kiválasztása után a szoftverrel kiírtam a függvényben szereplő együtthatók értékét.

Az együtthatók regressziós vizsgálatait az IBM SPSS 27 nevű szoftverrel végeztem.

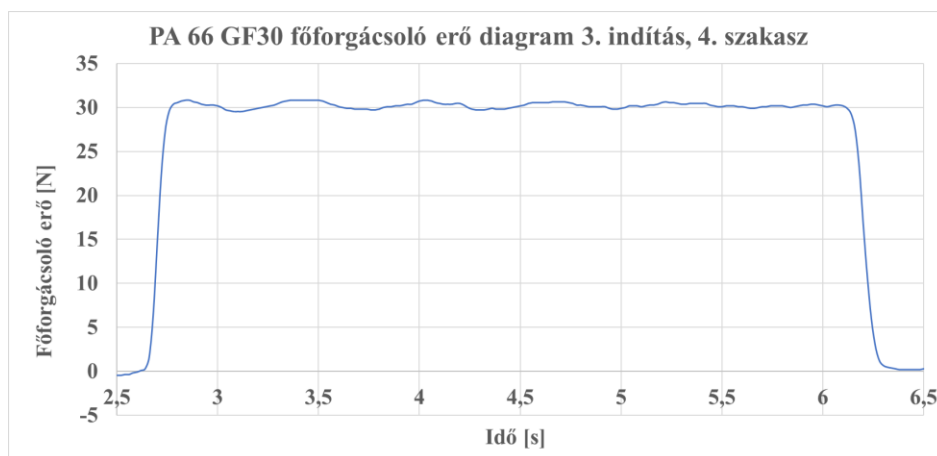


### 3. EREDMÉNYEK

Ebben a bemutatom a kutatómunkám során elért új, tudományos eredményeket. Az eredmények sokasága miatt minden esetben csak egy példát szemléltetek az eredményül kapott diagramokból.

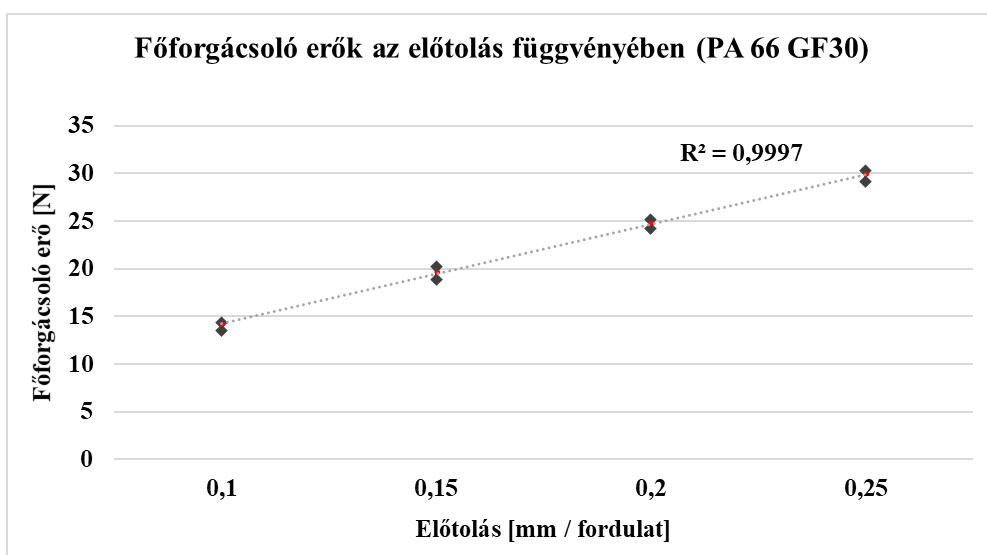
#### 3.1. Az erőmérés eredményei

A mentett fájlokból Microsoft Excel segítségével készítettem diagramokat, melyeknél a főforgácsoló erőt mutatom az eltelt idő függvényében. Egy ilyen diagramot mutat a 3.1. ábra. A diagramok címében az indítás a CNC program számára utal. Minden indítás más kezdeti átmérőt jelent. A szakasz a már említett 4 darab 20 mm hosszú mérési szakasz egyike, jelen esetben a negyedik.



3.1. ábra PA 66 GF30 egy főforgácsoló erő diagramja

A mérési szakaszon az Excel 'ÁTLAGHATÖBB' függvényét használtam az átlagos főforgácsoló erő meghatározására. Az eredményeket táblázatba gyűjtöttem, majd újabb diagramokat készítettem anyagonként, melyekben a főforgácsoló erőt ábrázoltam az előtolás függvényében. Erre mutat példát a 3.2. ábra. Az ábrán a megfelelő előtolás értékekhez tartozó főforgácsoló erők tartományát és átlagát jelöltem. Az átlagértékekre jó közelítéssel egy lineáris trendvonal illeszthető.



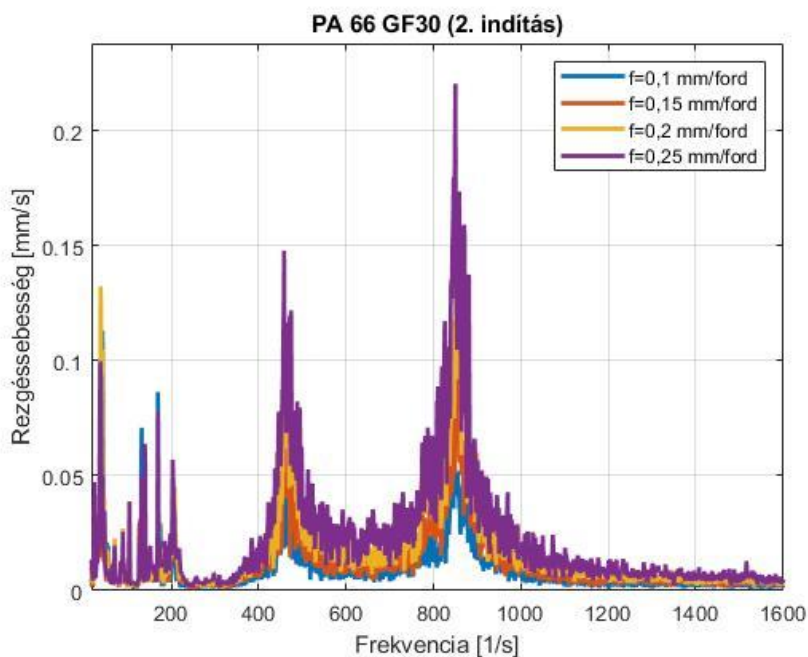
3.2. ábra Főforgácsoló erők ábrázolása az előtolás függvényében PA 66 GF30 esetén

### 3.2. A rezgésmérés eredményei

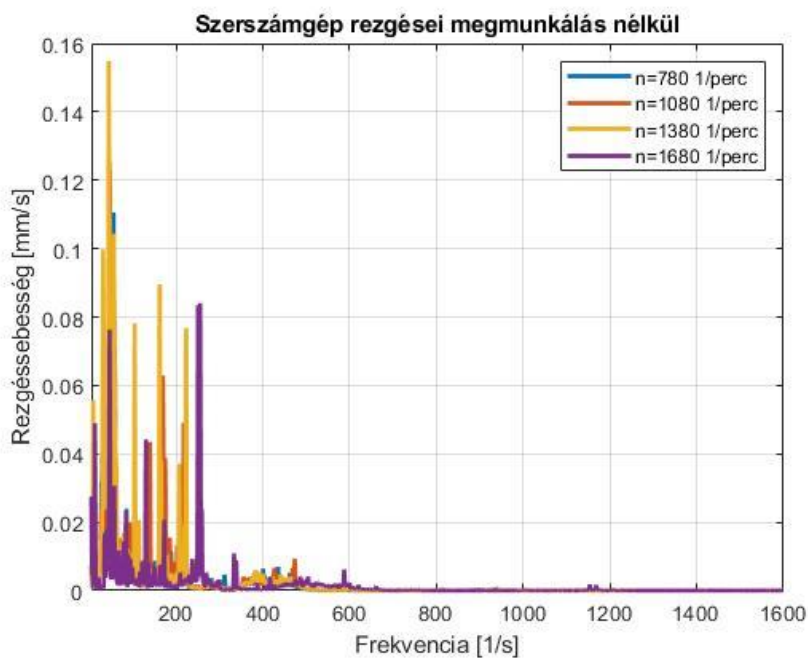
A rezgésmérés eredményeit szintén diagramok formájában ábrázoltam, melyeket a MATLAB R2019b szoftverrel készítettem. A diagramok a rezgéssebesség értékét mutatják a frekvencia függvényében. A 3.3. ábra egy példát mutat, melynél a különböző színek a négyféle előtolás értéket jelentik. A diagramon két jellemző csúcs látható, melyek minden esetben megfigyelhetők voltak.

Megmértem a szerszámgép rezgését megmunkálás nélkül is. A feltételek megegyeztek a korábban bemutatottakkal, viszont megmunkálás nem történt, az előtolást program indítás után megszüntettem. Ennek diagramját mutatja a 3.4. ábra.

A korábbi ábrán (3.3. ábra) látható két jellemző csúcs ebben az esetben egyáltalán nem jelenik meg. A korábbi kutatások alapján arra a következtetésre jutottam, hogy ahol jelentkeztek a jellemző csúcsok, azok jól elkülöníthetők voltak a modális frekvenciáktól, így ezeket a továbbiakban figyelmen kívül hagytam, mert ha a harmonikus komponensek frekvenciái jól elkülönülnek a rendszer modális frekvenciáitól, egyszerűen figyelmen kívül hagyhatjuk a nullához közeli csillapítású pólusokat az orsó forgási frekvenciájának harmonikusainál, mert ezek a válasz harmonikus összetevőit képviselik.

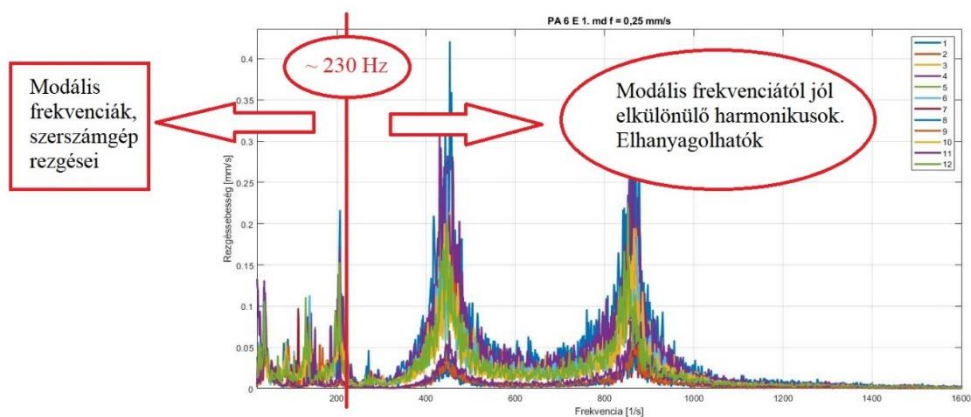


3.3. ábra Rezgéssebesség értékek a frekvencia függvényében PA 66 GF30 esetén



3.4. ábra Megmunkálás és előtolás nélkül mért értékek a szerszámgépen

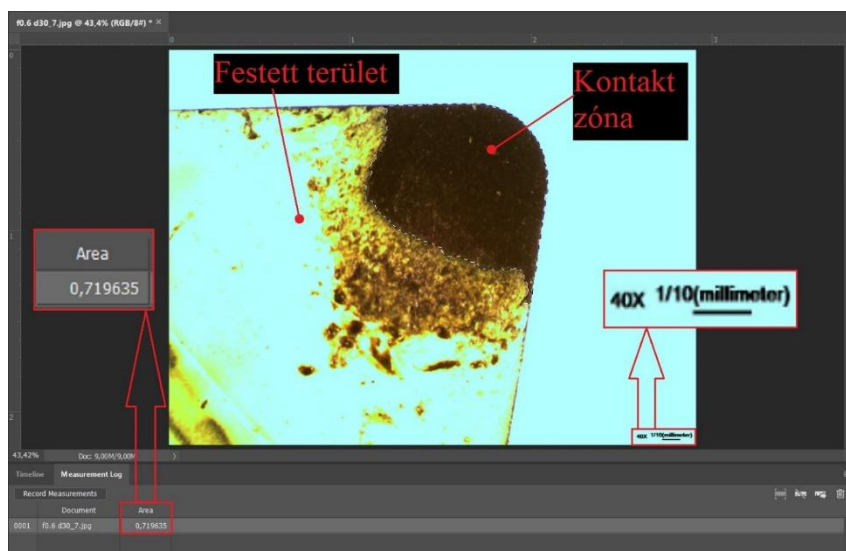
A 3.5. ábra mutatja a kutatásom szempontjából nem elhanyagolható rezgéstartományokat.



3.5. ábra Rezgéstartományok szemléltetése

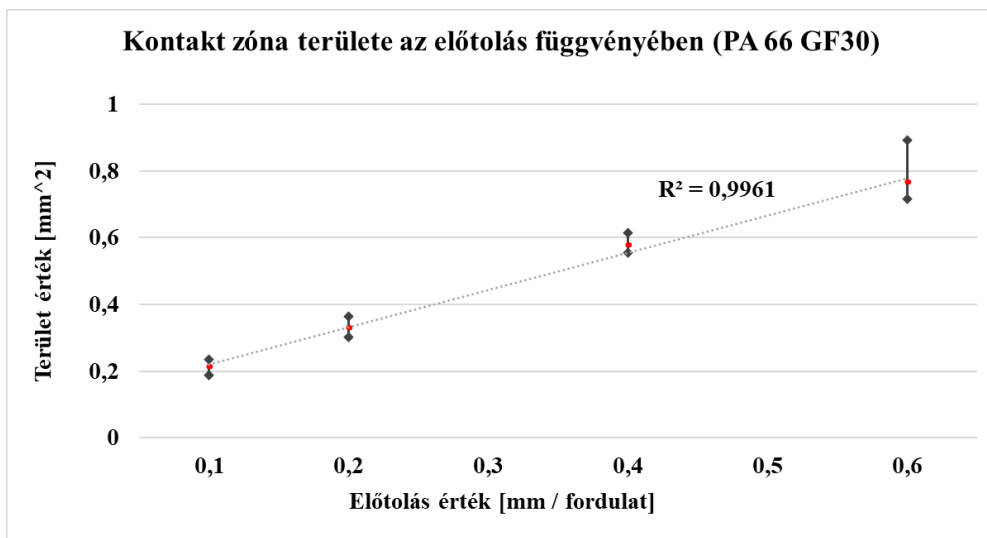
### 3.3. A kontakt zóna felületének mérési eredményei

A mikroszkóppal készített képeket betöltöttem az Adobe Photoshop CC 2018 szoftverbe, majd kijelöltem a festéklekopás területét a lapka homlokfelületén (3.6. ábra). A szoftverben előzetesen beállítottam, hogy hány képkocka hány mm hosszának felel meg, a nagyítás mértékének figyelembevételével. Ez alapján a szoftver kiszámította a kijelölt terület nagyságát mm<sup>2</sup>-ben.



3.6. ábra Terület kijelölése a szoftverben

Az így kapott eredményeket táblázatba gyűjtöttem, majd diagramokat készítettem belőlük, melyeken a kontakt zóna területét ábrázolom az előtolás függvényében (3.7. ábra).



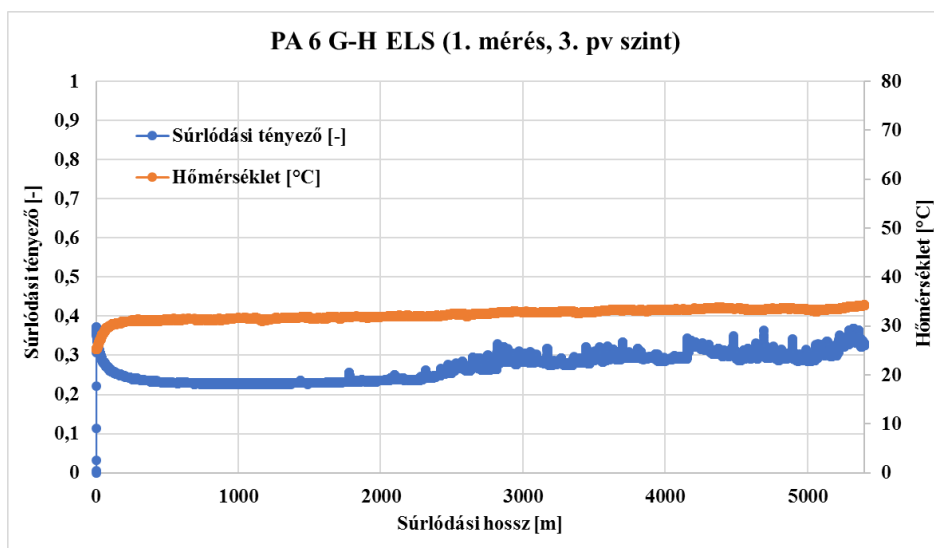
3.7. ábra Kontakt zóna területe az előtolás függvényében PA 66 GF30 anyag esetén

A méréseket előtolásonként és anyagonként 8 alkalommal ismételttem. Ezek tartományát jelöltem a megfelelő előtolás értékeknél, valamint jelöltem az értékek átlagát. Az átlagokra jó közelítéssel egy lineáris trendvonalat illesztettem.

### 3.4. Tribológiai vizsgálatok eredményei

A tribológiai vizsgálatok eredményeit szintén diagramok formájában ismertetem. A diagramokat Excel-ben készítettem. A diagramok kezdetben a súrlódási tényező és a hőmérséklet értékeit ábrázolták a súrlódási úthossz függvényében. A későbbiekben a hőmérséklettel nem foglalkoztam, illetve a súrlódási tényező helyett a súrlódási erőket ábrázoltam. A változtatás miatt a görbék jellege nem változott, hiszen a két fogalom között egy konstans osztó a különbség. Egy példát mutat a 3.8. ábra. Látható, hogy a súrlódási tényező diagramja egy bizonyos súrlódási úthossz megtétele után instabillá válik. Ennek számos oka lehet, melyet disszertációmban ismertetek. Az instabil szakaszt azonban megelőzi egy negatív exponenciális jellegű stabil görbe szakasz. Ezt a jelleget minden mérésnél megfigyeltem.

A diagram címében látható, hogy az összesen három ismétlésből épp melyik látható, illetve a forgácsolási vizsgálatoknál meghatározott pv szintet jelöltem, melyek a disszertációmban találhatók.



3.8. ábra Súrlódási tényező és hőmérséklet a súrlódási hossz függvényében PA 6G-H ELS esetén

### 3.5. A függvényillesztés eredményei

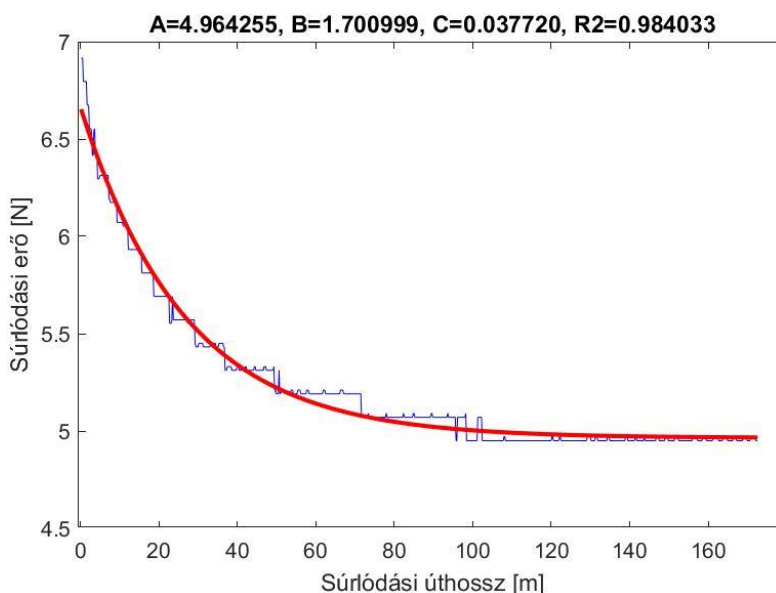
A stabil szakaszokra néhány kivételtől eltekintve jellemző volt a negatív exponenciális függvény jellegű lefolyás. Ennek eredményeképp MATLAB-ban függvényillesztést hajtottam végre. A függvényillesztés után megállapítottam, hogy a súrlódó erő a stabil szakaszokon az alábbi függvénnyel jól közelíthető, a súrlódási úthossz függvényében:

$$F_S(s) = A + B * e^{-C*s}$$

ahol: „A”, „B” és „C” a függvény együtthatóinak értékei.

Az együtthatók fizikai jelentőséggel bírnak. Az „A” jelenti azt a súrlódási erő értéket, amelyre a függvény alapján a súrlódó rendszer beáll (vagy beállna) az állandósult állapotban. A „B” jelenti a kezdeti érték és az állandósult érték különbségét, a „C” pedig az állandósult állapot elérésének mértékét jelenti, súrlódási hosszal kifejezve, azaz, hogy milyen hosszúságú úton következik be az állandósult állapot.

Egy függvénykeresési példát mutat a 3.9. ábra.



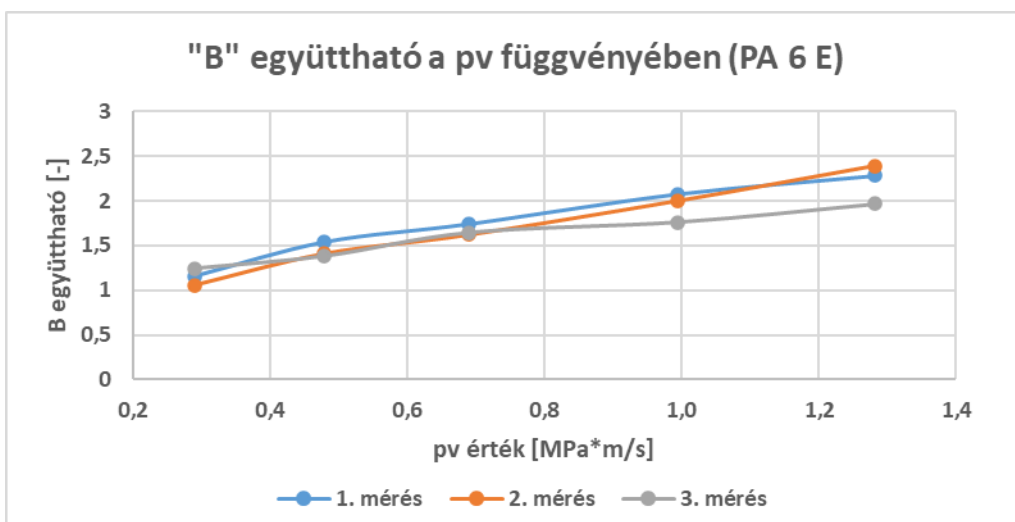
3.9. ábra Függvénykeresés MATlab-ban (PA 66 GF 30 anyag, 1. mérés, 1. pv szint)

A szoftverrel kiírtam az együtthatók értékeit, valamint az illeszkedés mértékét is a determinációs együtthatóval. Az együtthatók eredményeit táblázatba gyűjtöttem további vizsgálatok elvégzése céljából.

### 3.6. A regressziós vizsgálatok eredményei

A regressziós vizsgálatokat adattisztítás után végeztem el, hiszen a regressziós vizsgálatok érzékenyek a kiugró, vélhetően hibás mérésből származó adatokra.

A regressziós vizsgálatok esetén az együtthatókat ábrázoltam külön-külön mindhárom anyag esetén a pv érték függvényében. Erre mutat példát a 3.10. ábra. A példán a „B” együttható értékét mutatom a pv függvényében PA 6 E esetén. A különböző színek a mérési ismétléseket mutatják. Sejthető, hogy ebben az esetben lineáris összefüggés van az együttható és a pv érték között. A regressziós vizsgálatot az IBM SPSS 27 nevű szoftverben végeztem el.



3.10. ábra „B” együttható ábrázolása a pv függvényében PA 6 E esetén

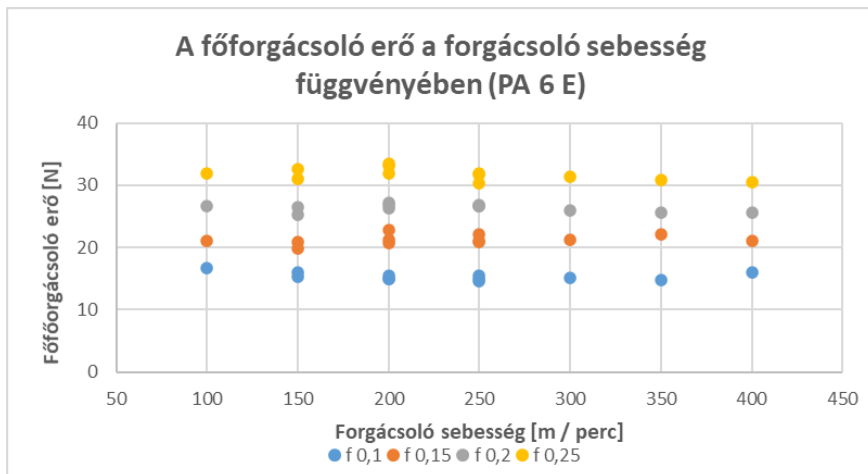


#### 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

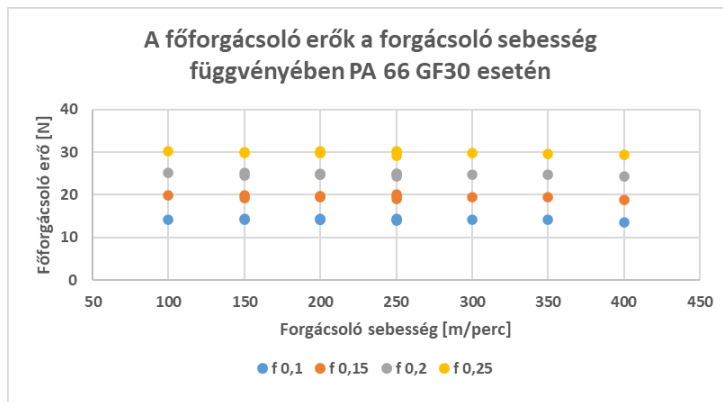
Forgácsolási kísérleteim (NCT EUROturn 12-B szerszámgép és E 400 egyetemes esztergagép, sík homloklületű CCGW09T304FST típusú, KD1425 osztályú polikristályos gyémánt bevonatú eszterga lapka, késszáron elhelyezett nyúlásmérők, Leonova Diamond DIA-300 rezgésdiagnosztikai eszköz, SLD-144S rezgésmérő egység, BMS 764595 digitális kamera) alapján az alábbi új eredményeket tartam fel a szerszám és munkadarab kapcsolatában.

##### 1. Tézis

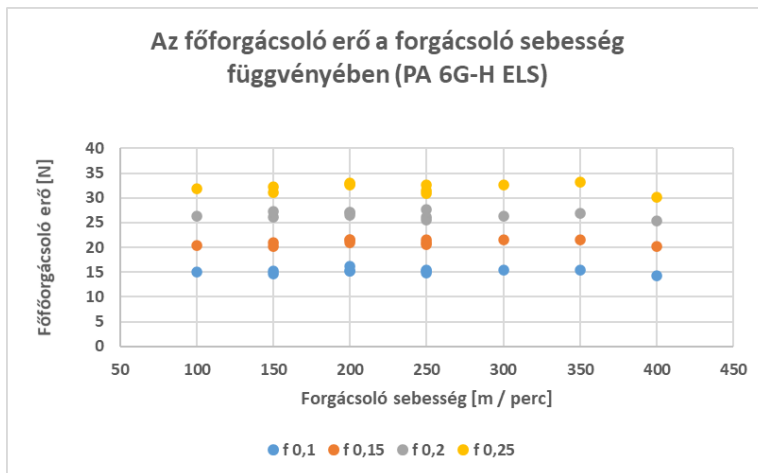
Méréseimmel igazoltam, hogy a vizsgált műszaki polimerek esztergálása esetén (PA 6 E, PA 66 GF 30 és PA 6 G-H ELS), adott fogásmélységnél (0,5 mm), különböző előtolásoknál (0,1; 0,15; 0,2; és 0,25 mm/fordulat), változó főorsó fordulatszámok (780 - 1680 1/perc tartományban) és az aktuális megmunkálási átmérőtől függő különböző forgácsoló sebességek (150-400 m/perc) esetén, valamint átlagosan 0-0,4 mm/s rezgéssebesség tartományban **a főforgácsoló erő nem függ a forgácsoló sebességtől** (4.1. ábra, 4.2. ábra és 4.3. ábra)



4.1. ábra Főforgácsoló erő és forgácsoló sebesség kapcsolata PA 6 E anyag esetén



4.2. ábra Főforgácsoló erő és forgácsoló sebesség kapcsolata PA 66 GF30 anyag esetén



4.3. ábra Főforgácsoló erő és forgácsoló sebesség kapcsolata PA 6G-H ELS anyag esetén

A függőség azért nem áll fenn, mert az említett beállított forgácsolási paramétereket alkalmazva a szerszámcúcsnál lokálisan nem keletkezik annyi hő, hogy az befolyásolja a főforgácsoló erőt. Megjegyzés: az ábrákon látható pontok az ismételt mérések számtani közepeit mutatja.

## 2. Tézis

**Méréseimmel igazoltam, hogy a vizsgált műszaki polimerek esztergálása esetén (PA 6 E, PA 66 GF 30 és PA 6 G-H ELS), adott fogásmélységnél (0,5 mm), különböző előtolásoknál (0,1-0,6 mm/fordulat tartományban), adott főorsó fordulatszám (530 1/perc), a kontakt zóna nagysága lineárisan függ az előtolás nagyságától.**

A forgácsolási folyamat egyszerűsített tribológiai modelljeként, Pin-on-Disc rendszerben (DIN 50322, VI. vizsgálati kategória) az alábbi megállapításokat tettem méréseim alapján (PA 6 E, PA 6G-H ELS és PA 66 GF30 anyagú „pin” és HC (Hard Carbon) bevonatú „disc” felület, száraz súrlódás, 0,3-2,01 pv érték tartományon, 0,23-1,2 N amplitúdójú és 13-28 Hz frekvenciájú rezgéssel módosított normáalterhelés esetén)

### 3. Tézis

A polimer anyagminták és HC (Hard Carbon) bevonatolású felület száraz súrlódása kapcsán megállapítottam, hogy a stabil súrlódást – „steady-state” – egy súrlódási instabilitási szakasz követ, mely hanghatással és instabil súrlódás növekedéssel jár. A stabil súrlódási út hossza függ az alkalmazott anyagpárosítástól és pv szinttől. A natúr PA 6 E esetén a növekvő pv szint hosszabb és alacsonyabb súrlódású steady-state szakaszt eredményezett, míg a kompozitok esetében eltérő trend fogalmazható meg. A stabil súrlódási szakasz jó közelítéssel írható le a

$$F_s(s) = A + B * e^{-C*s}$$

függvényalakokkal, ahol  $F_s$  a súrlódási erő [N],  $s$  a súrlódási úthossz [m],  $A$  együttható a közel állandósult súrlódási erő értéket,  $B$  együttható a kezdeti érték és az állandósult érték különbségét,  $C$  együttható pedig a súrlódási erő csökkenésének mértékét jelenti.

### 4. Tézis

Vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy a súrlódási függvény

$$F_s(s, pv) = A(pv) + B(pv) * e^{-C(pv)*s}$$

alakú függvénnyel írható le, ahol az  $A$ ,  $B$  és  $C$  együtthatók közül  $B$  lineárisan függ a  $pv$ -től, továbbá  $A$  és  $C$  másodfokú polinomja a  $pv$  értéknek.

A függvényben szereplő tagok:

$F_s$ : súrlódási erő [N],

$s$ : súrlódási úthossz [m],

$pv$ : felületi nyomás [MPa] és súrlódási sebesség [m/s] szorzata

$A$ : közel állandósult érték együtthatója,

$B$ : kezdeti érték és az állandósult érték különbségének együtthatója,

$C$ : a függvény csökkenésének mértékére vonatkozó együttható.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutatómunkám során a forgácsolási vizsgálataimmal kapcsolatban olyan eredményekre jutottam, melyek hasznos információval szolgálnak a műszaki gyakorlat számára. Megállapítottam, hogy az általam beállított peremfeltételek mellett a forgácsoló sebességnek nincs befolyásoló hatása a főforgácsoló erőre, holott ismert, hogy bizonyos tartományokon a forgácsoló sebesség egy meghatározó paraméter. Ez a tény is azt mutatja, hogy a polimerek és kompozitok forgácsolásának, illetve tribológiájának területe még számos újdonságot rejt.

Ahhoz, hogy a forgácsolási folyamat tribológiájának teljes megismeréséhez egy lépéssel közelebb kerüljünk, megállapítást tettem a szerszám és a munkadaraból levált forgács érintkező felületének nagyságának kapcsolatáról, azaz a tribológiai kontakt zónáról.

A súrlódó rendszerek egyik fontos jellemzője a rezgés jótékony, vagy épp kártékony hatása a súrlódásra. A rezgések súrlódó rendszerekre gyakorolt hatására vonatkozó kutatások mai napig korlátozott számban állnak rendelkezésre, holott, ahol különböző elemek mozognak, esetleg érintkeznek egymással, ott rezgés keletkezik. Nincs ez másképp a forgácsolásnál sem, ahol a rezgésnek számtalan forrása lehet, mint például a megmunkáló gép működésből adódó rezgései, vagy éppen a munkadarab keltette rezgések, melyek a szerszámra hatnak. Mindezeket figyelembe véve forgácsolási vizsgálataimat kiegészítettem rezgésméréssel, majd az eredményeket felhasználtam tribológiai vizsgálataim bemeneti paramétereiként.

Egy rezgést biztosító ún. vibrációs egységet terveztem és így egy külső forrásból biztosított, hozzáadott rezgéssel egészítettem ki tribológiai vizsgálataimat, valamint biztosítottam a közel megegyező anyagpárosítást. A főbb kimeneti eredmények a súrlódó erők és az ezekből számított súrlódási tényező, illetve a hőmérséklet voltak, melyeket a kontakt zóna közelében mértem.

Megállapítottam, hogy a súrlódó erők a megtett súrlódási úthossz függvényében változnak, és a függvényillesztés módszerét használva felírtam egy általános összefüggést, mely alapján ez a változás leírható a súrlódás stabil szakaszában. Az összefüggésben helyet foglaló együtthatók vizsgálatát elvégeztem, és megállapítottam, hogy jó közelítéssel ( $R^2 > 0,95$ ) az együtthatók kapcsolata a pv értékkel lineáris vagy másodfokú polinomok.

Javaslom olyan összefüggések feltárását, melynél a tribológiai vizsgálatok eredménye közvetlen információkat tartalmaz a forgácsolási vizsgálatok optimált bemenő paramétereit illetően.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A műszaki gyakorlat napjainkban számos területen alkalmaz polimereket, vagy valamilyen polimer kompozitot. Fémekkel szembeni előnyös tulajdonságaik közé sorolható például a kiváló tömeg-szilárdság arány, mely olyan alkalmazásokat nyit meg a gyakorlat számára, amelyek eddig kivitelezhetetlenek voltak. A műszaki polimerek és kompozitok szintén előnyös tulajdonságai a viszonylag alacsony ár és könnyű megmunkálhatóság.

A szerszám és a munkadarab közötti kapcsolatról keveset tudunk, főleg, ha a munkadarab anyaga valamilyen polimer. A megfelelő kapcsolat ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy a megmunkálás hosszú távon gazdaságos, a végeredmény pedig kielégítő legyen.

A szerszám homloklapfelülete és a levált forgács kölcsönhatása eddig nem ismert tribológiai rendszer. Kutatásom erre a speciális területre irányul, kiegészítve tribológiai vizsgálatokkal, melyek tartalmazzák a minden forgó mozgás során jelenlévő jelenséget, a rezgést.

A forgácsolás és a tribológiai modellvizsgálatok közötti kapcsolat megismerése céljából egyelű szerszámmal történő esztergálási vizsgálatokat és tribológiai kisminta modellvizsgálatokat végeztem. Az esztergálási vizsgálatok során rezgésméréssel egészítettem ki az erőmérést és az így kapott eredmények adták tribológiai vizsgálataim bemeneti paramétereit.

Forgácsolási vizsgálataim közben új eredményeket véltem felfedezni a forgácsolási sebességre, illetve a szerszám és a munkadarab közötti tribológiai kontakt zónára vonatkozóan. A kontakt zóna nagysága, a főforgácsoló erő és a forgácsoló sebesség együtt alkotják a tribológiában nagy jelentőséggel bíró számot, a  $p_v$  értéket, mely egy súrlódó rendszerben a felületi nyomás és a súrlódási sebesség szorzata.

Tribológiai vizsgálataim során megállapítottam a stabil súrlódás tartományában a súrlódó erőt leíró összefüggést a súrlódási úthossz függvényében, mely a megfelelő  $p_v$  tartományban a kezdeti szakaszt és az állandósult állapotot foglalja magába. Ezekre a szakaszokra függvényt illesztettem és az összefüggésben lévő együtthatókat a legkisebb négyzetek módszerével vizsgáltam.

Megállapítottam az összefüggéseket anyagonként, és felírtam a stabil súrlódási szakaszokra vonatkozó kétváltozós ( $p_v$ , valamint súrlódási úthossz) függvényeket a súrlódó erőre vonatkozóan.

Kutatásom eredményei felhasználhatók a vizsgált anyagpárosítások esetén, melynek lényege, hogy a súrlódási erők általános megadása mellett tudomást szerezhethetünk a stabil súrlódási állapot bejáratódási szakaszában keletkező súrlódó erőkről is.

## 7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

*Lektorált cikk világnyelven*

1. **Sarankó Á.**, Kalácska G., Keresztes R. (2019): Analysis of Vibration During Turning Process of Different Materials, International Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények, Vol. 4 (1), pp. 200-205., 6 p. ISSN 2498-700X
2. **Sarankó Á.**, Kalácska G., Keresztes R. (2019): Effect of sliding velocity and loads on friction coefficient and temperature in DLC and PA 6 contact in dry sliding conditions, Mechanical Engineering Letters: Research and Development, Vol. 18, pp. 34-42., 9 p. HU ISSN 2060-3789
3. **Sarankó Á.**, Kalácska G., Keresztes R. (2022): Analysis of formed chips in the case of turning different polymer materials, Hungarian Journal Of Industry And Chemistry, Vol. 49 No. 2, pp. 71-75., 5 p. ISSN 2450-5102
4. **Sarankó Á.**, Keresztes R., Kalácska G. (2018): New method for dynamic tribological test of engineering polymers, International Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények, Vol. 3 (1), pp. 25-29., 5 p. ISSN 2498-700X
5. **Sarankó Á.**, Keresztes R., Kalácska G., Sukumaran J. (2017): Evaluation of cutting force of PA6 and POM C, Mechanical Engineering Letters: Research and Development, Vol. 15, pp. 27-34., HU ISSN 2060-3789
6. **Sarankó Á.**, Szakál Z., Kalácska G., Samyn P., Sukumaran J., Klébert Sz., Károly Z., (2018): Adhesion and sliding tribological properties of polyolefins treated by diffuse coplanar surface barrier discharges, Express Polymer Letters, Vol. 12 (11), pp. 972-985. , 14 p., ISSN 1788-618X, (IF: 2,875)
7. **Sarankó Á.**, Zsidai L., Keresztes R., Schrempf N. (2019): Force Measuring methods of milling and turning for experimental use – A brief review, Mechanical Engineering Letters: Research and Development, Vol. 19, pp. 208-218., 11 p. HU ISSN 2060-3789