

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK**

**POLYÁK ISTVÁN
OTDK DOLGOZAT**

A fajlagos forgácsoló erő jellemzése vékonyforgácsleválasztás technológiai körülményei között, akusztikus emisszió és mikrokeménység mérés segítségével

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK



OTDK DOLGOZAT

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK**

**POLYÁK ISTVÁN
OTDK DOLGOZAT**

A fajlagos forgácsoló erő jellemzése vékonyforgácsleválasztás technológiai körülményei között, akusztikus emisszió és mikrokeménység mérés segítségével

Konzulens:

Dr. Biró István
Adjunktus

Témavezető:

Dr. Biró István
Adjunktus

Budapest, 2022

Szerzői jog © Polyák István, 2022.

NYILATKOZATOK

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Polyák István* (GBRW6Q), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2022. november 7.

.....
Polyák István

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölések jegyzéke	vii
1. Bevezetés	1
1.1. Célkitűzések.....	1
2. Szakirodalmi áttekintés	2
2.1. Első módszer: Erőmérés	3
2.2. Második módszer: Akusztikus emisszió.....	4
2.3. Harmadik módszer: Mikro-Vickers keménység	9
3. Homlokbeszűrő esztergálási kísérletek	11
3.1. Folyamat közbeni vizsgálati módszerek	11
3.1.1. A kísérlet végrehajtása.....	12
3.2. Folyamat utáni vizsgálati módszerek: Profilmérés	14
3.3. Folyamat utáni vizsgálati módszerek: Mikro-keménységmérés.....	15
3.4. Mérési adatok kiértékelése (kiértékelő szoftver dokumentációja).....	17
3.5. Eredmények	22
4. Összefoglalás és Tanulságok	24
4.1. Összefoglalás	24
4.2. Javaslatok.....	24
5. Summary.....	25
6. Felhasznált források.....	26
7. Ábrajegyzék.....	28
8. Táblázatok jegyzéke	28
9. Mellékletek jegyzéke.....	28

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni hálámat Dr. Biró Istvánnak, témavezetőmnek a színvonalas témaajánlatért és szakmai tanácsadásáért. Szintén köszönetemet fejezem ki Farkas Balázs Zsoltnak szakmai tanácsaiért és a forgácsolási kísérletekben való segítségéért.

Köszönöm Breznay Csabának és a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek a mikro-keménység vizsgálatokban nyújtott segítségüket.

Budapest, 2022.11.07.

Polyák István

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk		
Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A	elméleti forgácskeresztmetszet	mm^2
a_e	fogás szélesség	mm
a_p	fogás mélység	mm
b	elméleti forgácsszélesség	mm
d_k	közepes átmérő	mm
F_c	fő forgácsoló erő	N
F_z	előtoló erő	N
f	fordulatonkénti előtolás	mm/1
f_s	mintavételezési frekvencia	Hz
f_N	Nyquist frekvencia	Hz
$f_{m,F}$	erőmérés mérési frekvenciája	Hz
$f_{m,AE}$	akusztikus emisszió mérési frekvenciája	Hz
f_z	élenkénti előtolás	mm/1·1
HV_m	mikro-Vickers keménység	1
h	elméleti forgácsvastagság	mm
k	fajlagos forgácsolóerő	N/mm^2
$k_{c,1}$	fő forgácsoló erő állandó	$\text{N/mm}^{x_F+y_F}$
r_β	forgácsolószerszám éllekerekítése	μm
s	szórás	1
n	fordulatszám	1/min
T	periódusidő	s
t	idő	s
u	kalibrációs állandó	V/N
U	mintavételezett feszültségérték	V
v_c	forgácsoló sebesség	m/min
v_f	előtoló sebesség	mm/min
x_F	forgácsszélesség hatványkitevője	1
y_F	forgácsvastagság hatványkitevője	1
y_k	korrigált homlokprofil	μm
Z	horonymélység	mm

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α_o	hátszög	°
γ_o	homlokszög	°
κ_r	főél elhelyezési szög	°
κ'_r	mellélél elhelyezési szög	°
φ	próbatest szögelfordulása	°

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
ae	akusztikus emissziós mérésre vonatkozó jelölés
f	erőmérésre vonatkozó jelölés
hv	mikro-keménységre vonatkozó jelölés
i	általános futóindex (egész szám)
kc	fajlagos forgácsoló erőre vonatkozó jelölés
m	terhelő tömeg értéke (kg)
max	maximális (legnagyobb érték)
min	minimális (legkisebb értéke egy sorozatnak)
n	általános futóindex (egész szám)
rms	négyzetes középérték

1. BEVEZETÉS

1.1. *Célkitűzések*

Napjaink miniatürizálódó világában egyre nagyobb az igény a megmunkált felületek minőségének növelésére, a folyamatok optimalizálására. Forgácsolás során az eltávolított forgács jellemző méreteinek csökkenésével azt tapasztalhatjuk, hogy az egységnyi forgácskeresztmetszet eltávolításához szükséges energia exponenciálisan nő. Ez az ún. mérethatás. Vékonyforgácsleválasztás technológiai körülményei között, a tranziens szakaszban -azaz a szerszámél be- és kilépésénél- a forgácsoló erők az exponenciális jellegtől való eltérést mutatnak.

A dolgozat célja, ezen eltérésének vizsgálata. Egy rövid elméleti összefoglaló rész után, amelynek központjában az akusztikus emisszió áll; bemutatásra kerül az elvégzett, speciálisan vékonyforgácsleválasztás folyamatának vizsgálatára tervezett kísérlet. A speciális beszűrő homlokesztergálás kísérlet előnye, hogy a szerszám forgácsolásba be- és kilépése kevesebb mint egy fordulaton belül történik, így vizsgálható a tranziens szakasz és a leválasztott forgácskeresztmetszet utólagosan mérhető. A forgácsoló erő és a megmunkált felület profilmérését akusztikus emisszió és mikrokeménység mérésekkel egészítettem ki.

A kiértékeléshez készítettem egy kiértékelő programot, amely automatikusan végzi el a később bemutatott számításokat.

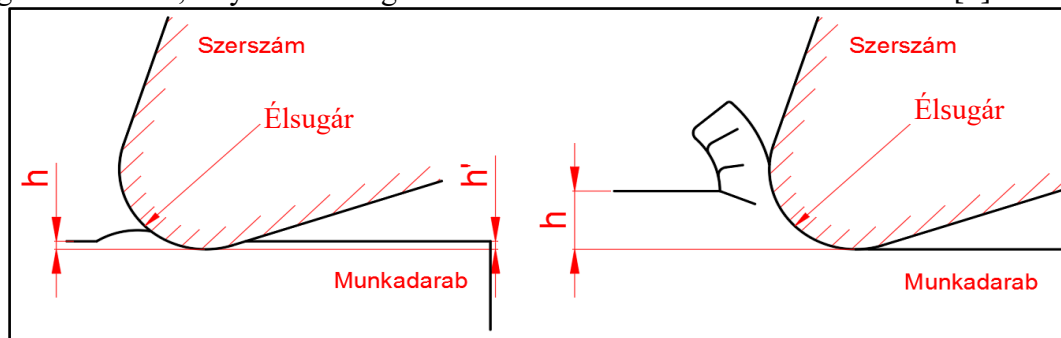
Végül pedig összefoglalom a kutatás során elért eredményeket, tanulságokat.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Forgácsolás során a kívánt felületet olyan anyagleválasztási módszer segítségével hozzuk létre, mely során az eltávolítani kívánt anyagréteg egy nagy mértékű alakváltozás során, forgács formájában kerül eltávolításra. A forgácsolási technológiák egyik, napjainkban egyre fejlődő csoportja a mikroforgácsolás. Nagyban hasonlít a hagyományos forgácsolási megmunkálásokhoz, azonban az eltávolított anyagréteg, a kialakított makro- és mikrogeometria jóval kisebb, mikrométeres tartományban található.

Jelen dolgozat különösen a kis- vagy ún. vékonyforgács vastagságú tartományra fókuszál. Azaz ahol az elméleti forgácsvastagság (h) az elméleti minimum forgácsvastagsághoz közeli, a szerszám éllekerekítésével (r_β) összehasonlítható méretű. A méretek csökkenésével domináns jelenséggé válik a vasalás, a rugalmas visszarugózás jelensége összefoglalóan a méret hatás (angolul: Size effect).

A folyamat során az elméleti forgácsvastagság (névlegesen) zérus értékről egy olyan nagyságú értékre nő; ahol a forgácsolás már stabil forgácsképződést mutat. Ezen ún. tranziens tartományban, a forgácsvastagság növelésével a szerszám a megmunkált felületet kezdetben csak rugalmasan, majd képlékenyen is alakítja, de még nem történik anyagleválasztás. Ezt a folyamatot nevezhetjük vasalásnak. Egy kritikus értéket: a minimális forgácsvastagságot elérve megindul a stabil, folyamatos forgácsleválasztás. Ezt szemlélteti az 2-1. ábra [1].



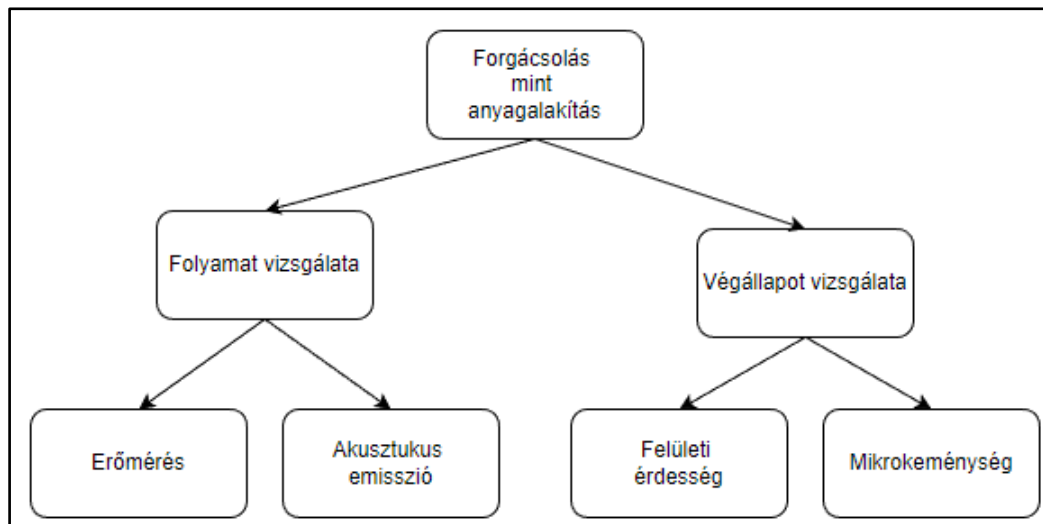
2-1. ábra. A forgácsolás tranziens szakasza: átmenet vasalásból stabil forgácsképzésbe [1, o. 3] alapján

Az egyre növekvő pontossági igények kielégítésére a mérnökök számos régi módszert fejlesztenek tovább, új módszereket dolgoznak ki. A megfelelő minőség eléréséhez szükség van a folyamat szabályozására, a kész munkadarabot pedig minősíteni kell. Azaz a forgácsolást vizsgálnunk kell folyamat közben és a folyamat lefolyása után egyaránt.

A mikroforgácsolási folyamat indikátorai: az ébredő forgácsolóerők, a rezgések, a felületi érdesség, forgácsalak, vágóhőmérséklet, akusztikus emisszió, mikrokeménység [1].

A forgácsolás folyamat közbeni vizsgálata erőmérések alapján ma már jól bevett gyakorlat, ellenben az akusztikus emisszió vizsgálatával, mely még csak feltörekvőben van. Ezen két módszerhez hasonlóan a végállapot vizsgálatára legtöbbször a felületi érdesség mérése az elsődleges választás. Emellett a mikrokeménység mérésére ritkán kerül sor (részben, mivel roncsolásos anyagvizsgálat, ezért a gyakorlatban nem praktikus). A mikrokeménységből a felületi rétegben bekövetkezett alakváltozásra, illetve annak mértékére következtethetünk.

Az erőmérések, akusztikus emissziós mérések és mikrokeménységmérések módszereket a következőkben (2.1-2.3 fejezet) részletesen is ismertetem. Ezen dolgozat részletesen nem tér ki a felületi érdesség módszerére. A módszerek csoportosítását a 2-2. ábra szemlélteti.



2-2. ábra. Vizsgálati módszerek csoportosítása

2.1. Első módszer: Erőmérés

Technológia tervezési szempontból a forgácsolás során fellépő erők előzetes becslése elengedhetetlen. A forgácsoló erő (F_c) becsülhető a fajlagos forgácsoló erő és a forgácskeresztmetszet szorzataként (2.1).

$$F_c = k_c \cdot A \quad (2.1)$$

A kifejezésben szereplő k_c az ún. fajlagos forgácsolóerő, amely az az erő, ami egységnyi keresztmetszetű forgács eltávolításához szükséges. Anyag és technológia függő, meghatározása többnyire empirikus módon történik. A (2.1) egyenlet alapján kiadódó mértékegysége: $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$. A forgácskeresztmetszet a (2.2) egyenlet alapján adódik, $[mm^2]$ mértékegységben.

$$A = h \cdot b \quad (2.2)$$

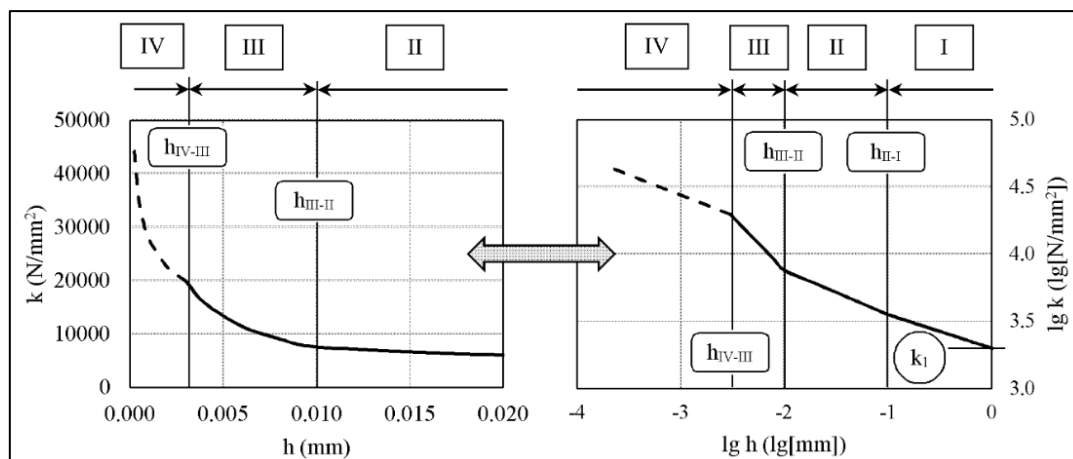
Ahol $h[mm]$ a forgácsvastagság és $b[mm]$ a forgácsszélesség.

A (2.1)-es egyenletet kibővítve kapjuk a Kienzle-Victor-féle hatványkitevős képletet (2.3), mely elterjedten használható a forgácsolóerő becslésére.

$$F_c = k_{c,1} \cdot h^{x_F} \cdot b^{y_F} \quad (2.3)$$

A kifejezésben szereplő $k_{c,1}$ az ún. forgácsolási erőállandó, amely azzal az erővel egyezik meg, amely 1mm oldalhosszúságú, négyzetes keresztmetszetű forgács eltávolításához szükséges. Kiadódó mértékegysége: $\left[\frac{N}{mm^{x_F+y_F}}\right]$. Az x_F és y_F az elméleti forgácsvastagság és elméleti forgácsszélesség hatását reprezentáló hatványkitevők [2].

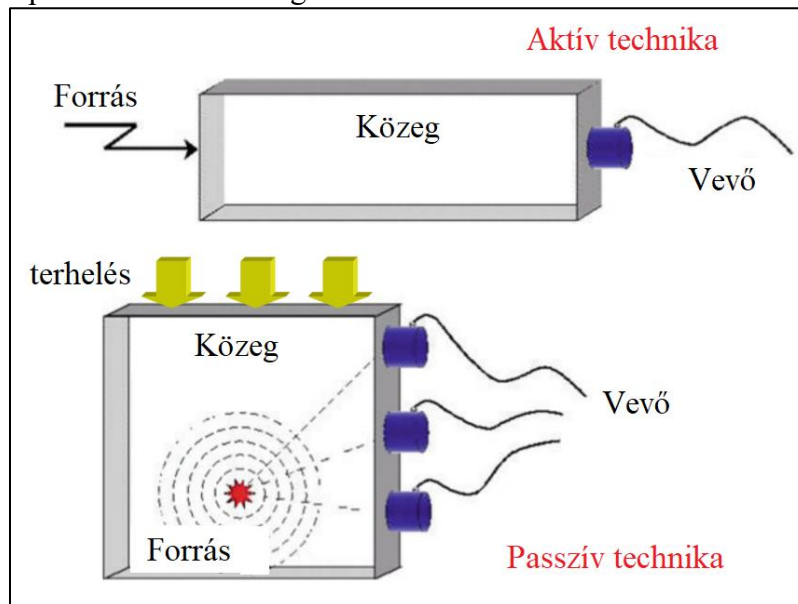
Amint az a (2.3) egyenletből is látszik, a forgácsvastagságot választva változóként, a fajlagos forgácsolóerő exponenciális jelleget mutat. Azaz a forgácsvastagság csökkenésével nő az egységnyi keresztmetszetű forgács eltávolításához szükséges energia. A kis forgácsvastagságú tartományban, ahol az elméleti forgácsvastagság az elméleti minimum forgácsvastagsághoz közeli értékű, a 2. fejezetben ismertetett tranzien্স jelenség miatt a fajlagos forgácsolóerő értéke eltér a (2.3) egyenlet modelljétől. Medina Clavijo és mtsai.[3] külön vizsgálja a kis elméleti forgácsvastagságú tartományban a fajlagos forgácsolóerő alakulását. Hasonlóan, Biró [4] a fajlagos forgácsolóerő modelljének kiterjesztésével vizsgálja a folyamatot, szakaszokra bontja, forgácsvastagság szerint a fajlagos forgácsoló erő alakulását (2-3.ábra).



2-3. ábra. Fajlagos forgácsolóerő exponenciális jellege [4, 38.o]

2.2. Második módszer: Akusztikus emisszió

Az akusztikus emisszió (AE) nem más, mint egy hanghullám, vagy nyomáshullám, melynek forrása jellemzően egy deformációs energiaváltozás. Mérnöki értelemben akusztikus emisszió az ultrahang frekvencia tartományban (20-2000kHz) értelmezett nyomáshullámok összessége. Az AE mérése egy passzív mérési módszer, a jel forrása a mintadarabban van, mely külső hatásra aktiválódik. Ellenben az aktív roncsolásmentes anyagvizsgálatok, mint például az ultrahangos, vagy röntgenes vizsgálat, ahol a jel forrása a mintadarabon kívül van és azt a mintadarab az áthaladás közben valamely módon változtatja. Az akusztikus emissziót napjainkban széleskörűen alkalmazzák roncsolásmentes anyagvizsgálatként számtalan iparágban: teherbíró szerkezeteknél, repülőgépiparban, minőségellenőrzések során és fontos szerepet tölt be a kompozit struktúrák vizsgálatában is.

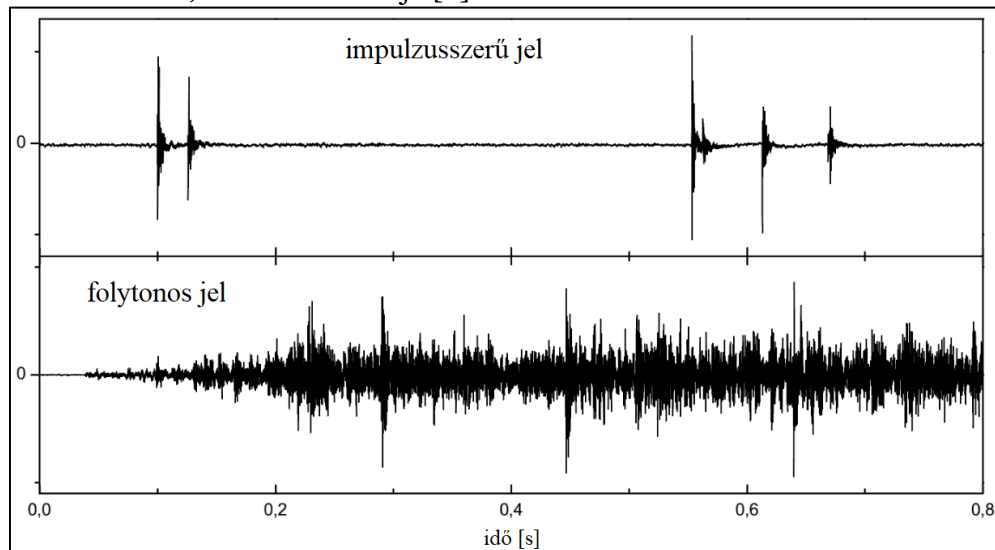


2-4. ábra. Aktív és passzív vizsgálati módszerek [5, 4.o]

Folyamat közbeni vizsgálatot biztosít, passzív mérési technikával (2-4. ábra). Előnye a vizsgált nagyfrekvenciás jelnek köszönhetően kevésbé hatnak rá a környezet (alacsonyfrekvenciás) zajai. Hátránya, hogy a jelenség forrásából adódóan, a mérések tökéletesen nem megismételhetők: egy repedés kezdőpontja, a töret felülete véletlenszerűen alakul.

Megkülönböztethetünk impulzusszerű (ütésszerű) és folytonosnak tekinthető akusztikus emissziót (2-5. ábra). A hirtelen töréskimenetelt, amely (itt) jellemzően a törés: a spontán energiakibocsátással jellemezhető, az impulzusszerű AE jel indukálja. Ezen dolgozat a tovább-

biakban a folytonos AE jellel foglalkozik, amely időben folytonos lefolyású folyamatok vizsgálatára alkalmazható. Ilyen folyamatok például egy próbatest alakváltozása; mechanikus, vagy termikus terhelése, illetve korróziója [5].



2-5. ábra. Impulzusszerű és folytonos AE jel[5, 5.o]

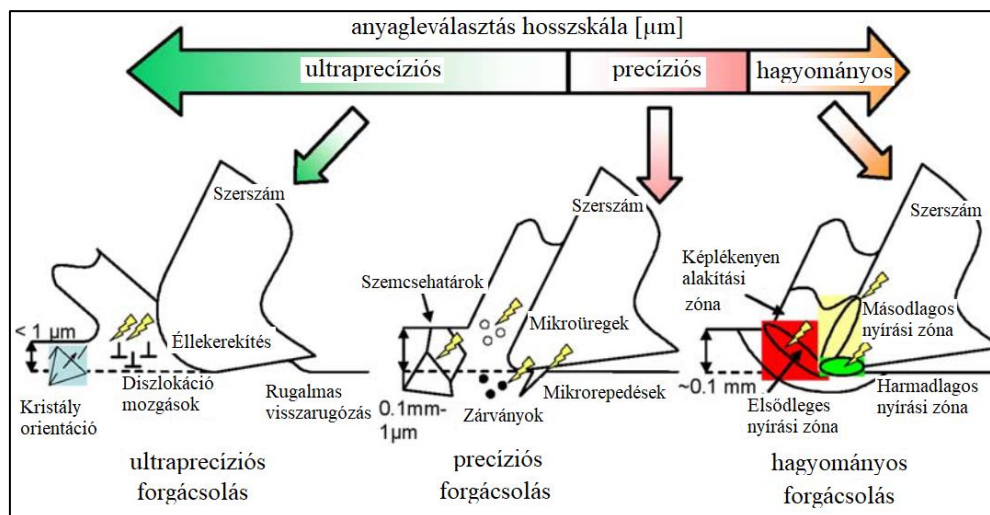
Az AE-t, fémekben, keletkezés szerint Maia és mtsai.[6] 3 csoportba sorolja:

1. Képlékeny alakváltozás ill. atomi mozgás: diszlokációk keletkezése és megsemmisülése azaz a Frank-Read forrás
2. Ikresedés és szemcsahatár mozgás: első- (polimorf, pl martenzites) és másodfokú (kiválás túltelített szilárd oldatból) fázisátalakulások
3. Sérülések: mikrorepedések keletkezése és terjedése, korrózió és korróziós repedés

Ezen túl nagy jelnetőségű a felületek súrlódása során keletkező AE. A súrlódás következtében a két felület lokálisan képlékeny alakul, továbbá létrejöhet összehegedés, mely tovább növeli az akusztikus emissziót [7].

Mian és mtsai.[8] zónákra osztja az AE forrásait. Forgácsolást tekintve az AE legfőbb forrása a (képlékeny)alakítás, azaz az elsődleges nyírási zóna. A forgács képlékeny alakváltozása a második nyírási zóna. További zónák a munkadarab és szerszám, illetve a szerszám és a forgács érintkezésének területe. Ezeknél az AE jelenség kialakulásának oka a súrlódás. Ezen zónák a hagyományos forgácsolásban jól helytállnak, azonban a mérethatás az akusztikus emisszióra is hatással van. Az egyre kisebb forgácskeresztmetszet (illetve annak mérete a szerszám élsugarához viszonyítva) a további tényezők hatásait felnagyítja. Precíziós forgácsolás során a szemcseméret és szemcsehatárok, a mikrorepedések és mikroüregek kialakulása, illetve az anyag inhomogenitásai is jelentős szerepet játszanak az AE alakulásában.

A méretek további csökkentésével, ultraprecíziós körülmények között felerősödnek a szemcseorientáció, a rugalmas visszarugózás és a diszlokációmozgások hatásai is (2-6.ábra) [9].

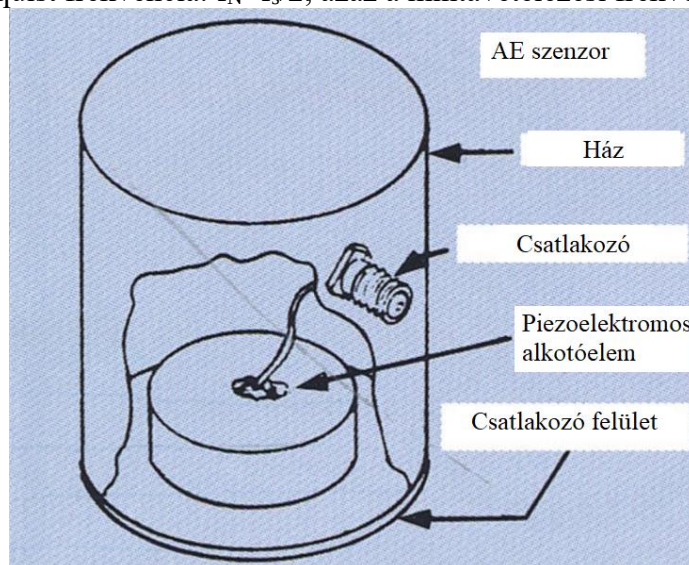


2-6. ábra. Az AE forrásai a megmunkálás méretskálájának függvényében[9, 5.o]

Mian és mtsai.[8] megemlíti, hogy ezen nyomáshullámok anyagban való terjedésük során veszítenek energiájukból, illetve a felületeken egy részük tükröződhet. A kis energiájú folyamatok (például a diszlokációmozgások) vizsgálata ezért jelentősen korlátozott.

Az akusztikus emisszió mérésére szolgáló eszköz egy piezoelektromos elven működő szenzor (2-7.ábra). A piezoelektromosság bizonyos (egy kristály) anyagok azon tulajdonsága, hogy külső terhelés hatására a felületein töltéskülönbség jön létre. Ebből a töltéskülönbségből következtetünk vissza a terhelésre. Tehát az AE szenzor az akusztikus emisszió nyomáshullámait alakítja analóg villamos jellé.

A szenzor által szolgáltatott kis energiájú villamos jelet egy jelerősítő segítségével könnyebben kezelhető energiaszintre hozzuk. Majd a nem kívánt (például zajokkal szennyezett) frekvenciák szűrésére különböző analóg szűrőket alkalmazhatunk. Az analóg jel digitalizálása, a mintavételezés minden alkalommal adatvesztéssel jár. A mintavételezési frekvencia ($f_s(\text{Hz})$) értékét ezért célszerű a lehető legmagasabb értéken tartani. A digitalizált, diszkrét-idő alapú „sorozat” torzításmentesnek mondható, ha jel maximális frekvenciája kisebb a Nyquist frekvenciánál. A Nyquist frekvencia: $f_N = f_s/2$, azaz a mintavételezési frekvencia fele [10].



2-7. ábra. AE szenzor[5, 23.o]

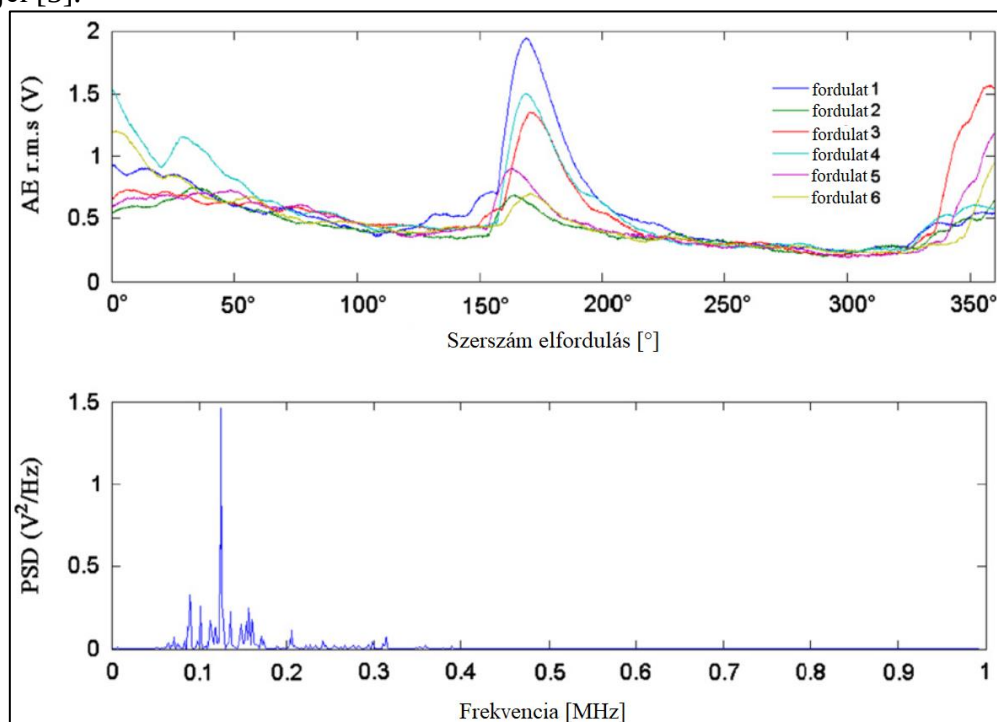
Míg szerkezeti vizsgálatoknál jellemzően több szenzor segítségével határozhatjuk meg a repedések helyzetét. Ezzel szemben a forgácsolási folyamat vizsgálatához elegendő egyetlen

szenzor. A szenzort általában az álló „résztvevőre” erősítjük, azaz esztergálásnál a szerszámra, marás és fúrás esetében a munkadarabra. Ez utóbbinál külön figyelmet kell fordítani arra, hogy a vizsgálandó folyamat (azaz a forgácsolás) a szenzor felfogatásától azonos távolságban történjen. Kiküszöbölve ezzel az AE jel disszipációjának hatását. A szenzor elhelyezéséből adódóan a mért AE jel karakterisztikájában más források dominálnak. A munkadarabra helyezett szenzor esetén az első és másodlagos nyírási zóna a domináns, a súrlódásból származó AE csak másodlagos. A szerszámra helyezett szenzor esetében pedig a szerszám-munkadarab(-forgács) kontakt az AE domináns forrása [8].

A rögzített akusztikus emissziót vizsgálhatjuk paraméter és jel alapú feldolgozással. A paraméterek általában az alábbiak:

- Beütés szám: egy meghatározott küszöb amplitúdót elérő csúcsok száma. A választott küszöbérték jelentősen befolyásolja ennek értékét.
- Amplitúdó: a hullámforma maximuma (vagy minimuma).
- Időtartam: két beütés között eltelt idő.
- Kelési idő: a küszöb amplitúdó elérése és a csúcs maximumának elérése között eltelt idő.
- Energia, vagy jelerősség: a jel (helyettesítő) görbéje alatti terület: függ mind az amplitúdók nagyságától, mind az időtől.
- Átlagos frekvencia: az időtartományon belüli csúcsok száma osztva a tartomány hosszával.
- PSD: (Power Spectral Density) avagy teljesítményspektrum. Megmutatja a jel energiaceloszlását a frekvencia függvényében. Segítségével könnyen meghatározható a folyamat domináns frekvenciatartománya.

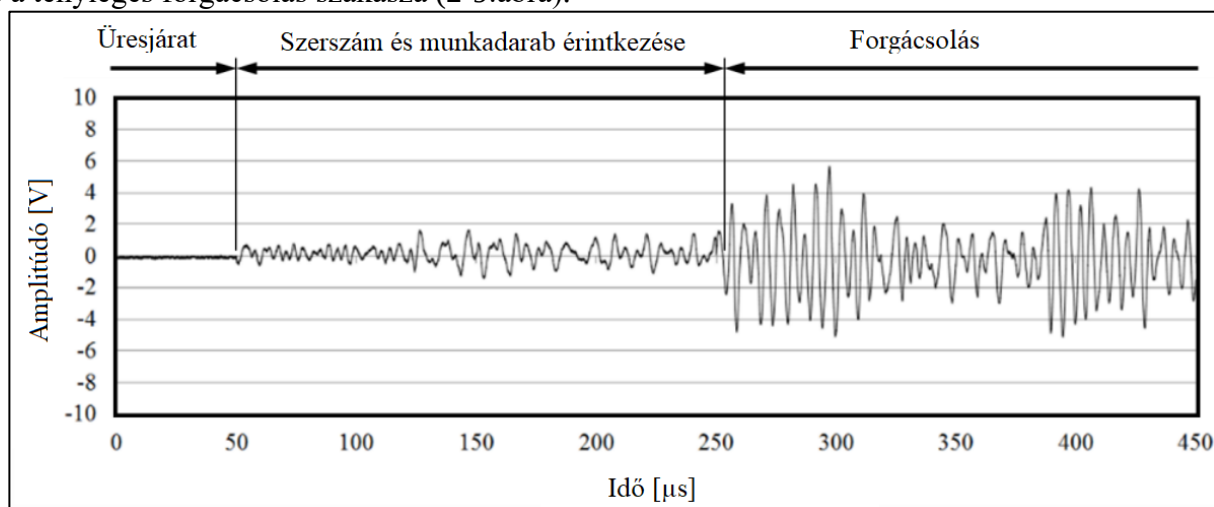
Jel alapú feldolgozással a folyamat egészét vizsgálhatjuk. Ezen belül a diszkrét hullámtranszformáció (Discrete Wavelet Transformation: DWT) lényegében a jel $n+1$ részre való osztása. A transzformáció során, n lépésben két részre osztjuk a jelet: A_n kisfrekvenciás („de nagyobb frekvenciatartománnyal rendelkező”) közelítő jelre és D_n nagyfrekvenciás („detailed signal”) részleteket tartalmazó jelre. A következő lépés bemeneti jele az előző lépésben kapott közelítő jel [5].



2-8. ábra. AE jel négyzetes középértéke és teljesítményspektruma marás során [8, 5.o]

Gyakran használt a jel négyzetes középértéke (Root Mean Square: RMS). A szakirodalomban elterjed kifejezés, mely jelfeldolgozás tekintetében a jel integráljaként értelmezhető. A módszert alkalmazva megmarad a jel időbelisége. Megkönnyíti a jel szemrevételezés alapú feldolgozását, de feldolgozható parametrikusan is.

Ribeiro és mtsai. [11] mikroesztergálás kísérletek során vizsgálta az akusztikus emisszió alkalmazhatóságát a szerszámfelügyelet (monitoring) alkalmazásában. Különböző forgácsolási paraméterek változtatásával vizsgálták az AE, felületi érdesség és mikrokeménység változását, illetve ezek egymáshoz viszonyított változását. Hase [12] precíziós keresztesztergálás kísérletei során bronz és alumínium ötvözeteket munkált meg kerámia és gyémánt egykristály szerszámokkal, változtatva a fogásmélységet (0,1-100 μm) és vágósebességet. A mért akusztikus emisszió hullámformáján egyértelműen elkülönülő szakaszokat figyelt meg: üresjárat szakasz; szerszám és munkadarab érintkezésének szakasza, mely során nő a jel amplitúdója; és a tényleges forgácsolás szakasza (2-9.ábra).



2-9. ábra. AE jel a tranziens szakaszban [12, 5.o]

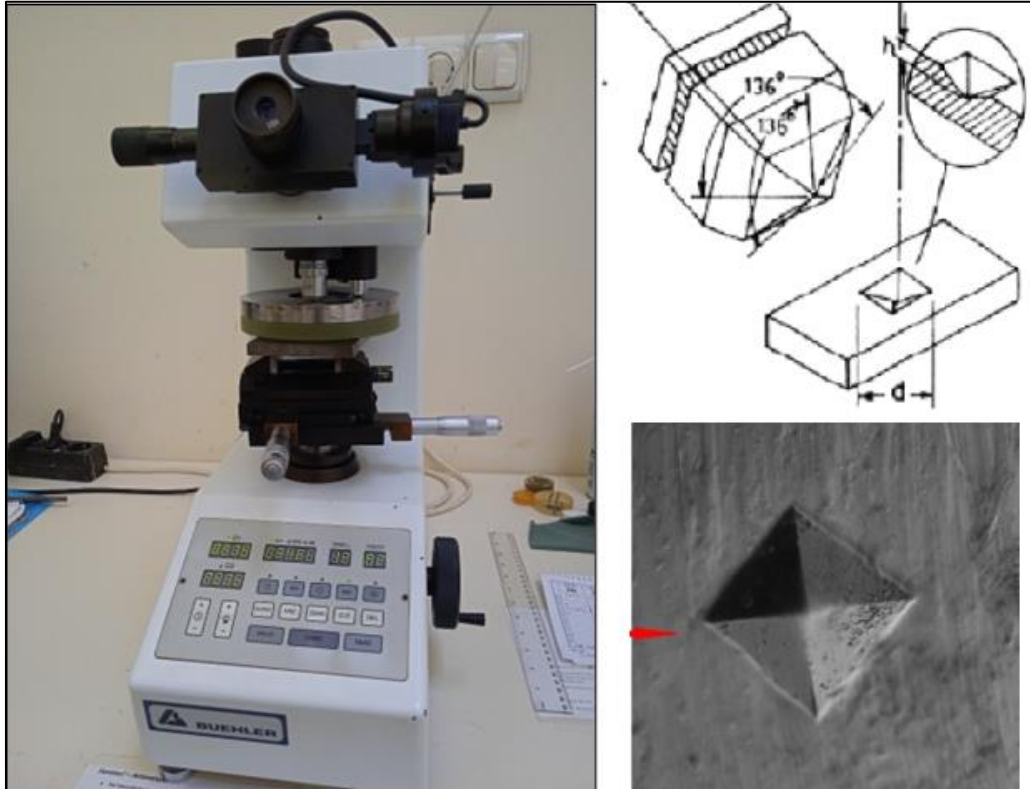
Mian és mtsai. [8] mikromarás kísérleteket végzett. Horonymarási kísérletekkel egyszerre lehet vizsgálni az egyen és ellen irányú stratégiák jellemzőit. Vizsgálták különböző forgácsolási paraméterek (v_c , f_z/r_p arány, a_p , bevonat) hatását az akusztikus emisszióra vonatkozóan. Növekedést figyeltek meg a jelerősségekben az él bekezdése, illetve kifutásakor (2-8.ábra). Ebből arra következtetnek, hogy itt a tényleges forgácsolás és a vasalás fázisa felváltja egymást. Továbbá megfigyelték, hogy a kilépésnél ez a jelenség kisebb mértékű, azaz ellen irányú megmunkálás esetén nagyobb, egyen irány esetén kisebb a jelenség mértéke. Emellett a jelenség a forgácsolási sebesség növelésével erősödött.

Mikroesztergálás kísérletek során Ribeiro és mtsai. [11] azt kapták eredményül, hogy az elméleti forgácsvastagság és forgácsszélesség növelésével nő az AE jel RMS értékének amplitúdója, mindezt kis frekvenciatartományokon vizsgálva (0,8-5 kHz). Hase [12] kísérletei alapján a forgácsszélesség és a vágósebesség növelésével nő az AE amplitúdója.

Mikromarás kísérletekkel Mian és mtsai. [8] megállapították, hogy a növekvő forgácsolási sebességgel nő az AE jel PSD amplitúdója (125kHz körüli tartományban), ebből az alakváltozási sebesség és a jelerősség közti kapcsolatra lehet következtetni. Az alakváltozási sebesség növelésével tovább csökken a szemcsehatárokon történő repedésterjedés.

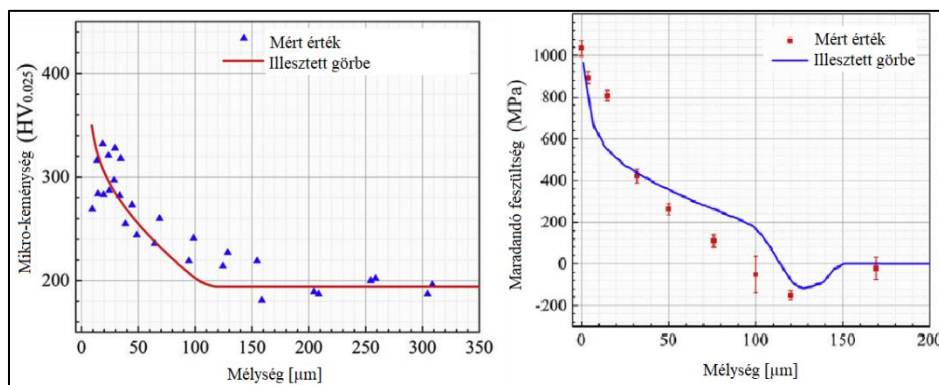
2.3. Harmadik módszer: Mikro-Vickers keménység

Hagyományos keménységméréshez hasonlóan, mikrokeménység (HV_m) mérésekor a mintadarabon egy lenyomatot készítünk. Az ehhez használt gyémánt gúla szerszámot adott erővel (1...100kg) terheljük, szabványban (ISO 6507) meghatározott ideig (10...15s) (2-10. ábra). Hagyományos esetben a benyomódás felületéből számítható a keménység, melyet mérőmikroszkóppal határozhatunk meg. A modern mikrokeménységmérő berendezések okulárjai rendelkeznek egy útmérő rendszerrel. Az okuláron a lenyomat átlóira beállított szálkereszt segítségével a berendezés automatikusan számítja a mikrokeménység értékét [13].



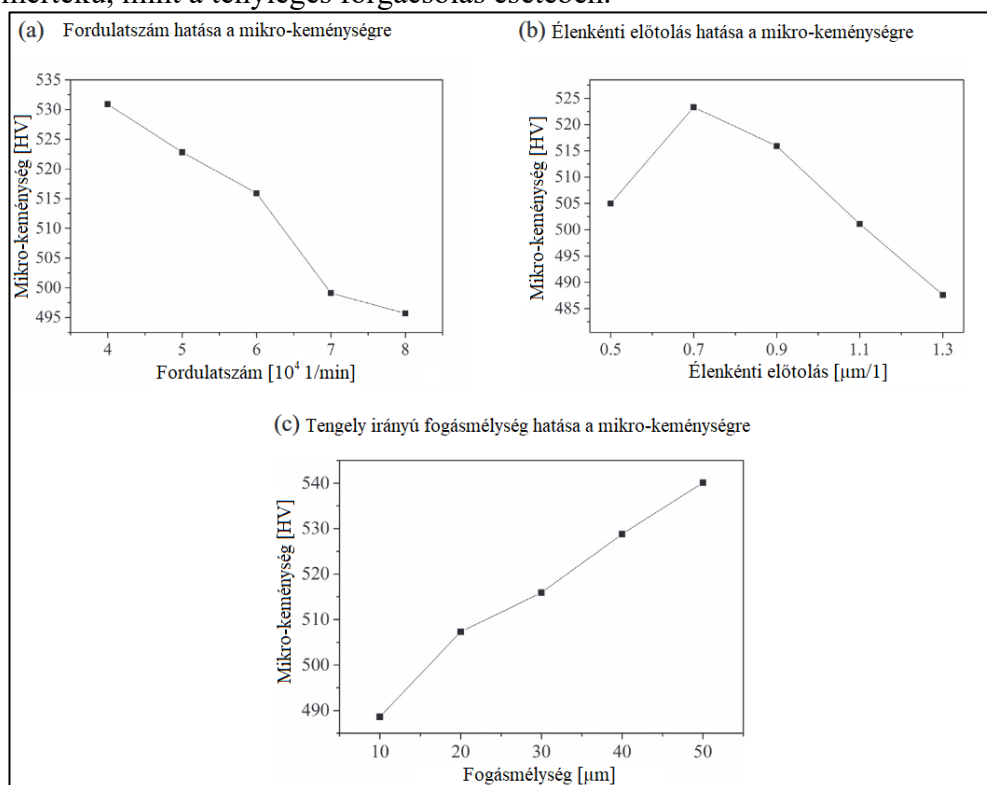
2-10. ábra. Mikro-keménységmérő berendezés, a mérés elve[14, 5.o] és az elkészített lenyomat[15, 3.o]

A mikrokeménység értékéből a felületi réteg által elszenvedett képlékeny alakváltozásra következtethetünk. Ezt bizonyítja az is, hogy Párhuzam vonható a mikrokeménység és a maradandó feszültség eloszlásaira. A megmunkált felülettől mért távolságban ábrázolva ezen eloszlásokat Zhang és mtsai.[16] az alábbi eredményt kapták. A felület alatti réteg vizsgálata a felületi réteg szakaszos eltávolításával oldható meg, mely polírozással történik. A 2-11. ábrán jól látható mindkét indikátor csökkenő trendje.



2-11. ábra. Mikro-keménység és maradandó feszültség a felszíntől való mélység függvényében[15, 46.o]

Lu és mtsai. [15] mikro-horonymarási kísérletei során vizsgálta a forgácsolási paraméterek hatását a horony alján mérhető mikro-keménységre. Megállapították, hogy a növekvő forgácsoló sebességgel (v_c) csökken a felületen mérhető mikrokeménység értéke (2-12. ábra). Ezt a növekvő deformációs sebességgel és ezáltal az elsődleges deformációs zóna méretének csökkenésével indokolják. Az élenkénti előtolás (f_z) változtatásával (lokális) maximumot figyeltek meg a mikrokeménység alakulásában. Ez a maximum a minimális elméleti forgácsvastagság (h_{min}) értékénél jelent meg. Indoklasképp a vasalás felkeményítő hatására hivatkozik, mely nagyobb mértékű, mint a tényleges forgácsolás esetében.



2-12. ábra. Paraméterek hatása a mikro-keménységre [15, 60.o]

Zurita-Hurtado és mtsai. [18] hagyományos esztergálási kísérletek során azt állapította meg, hogy a felületen mérhető mikrokeménység a forgácsolási paraméterek (v_c , f , a_p) növelésével nő. Hasonló következtetésre jutott Che-Haron és Jawaid [19] titán ötvözet esztergálásakor, a forgácsolósebesség (v_c) és előtolás (f) hatásairól. A forgácsolási sebesség hatásáról hasonlóképp értekeznek Zurita-Hurtado és mtsai. [18], továbbá a nagyobb csúcssugarú szerszámot találták kedvezőbbnek AISI 420 acél esztergálása esetén. Homlokmarás kísérletek alapján Hamed és mtsai. [20] az előzőekhez hasonlóan növekvő tendenciát tapasztalt a paraméterek növelésekor acél forgácsolásakor.

Ezzel szemben Yao és mtsai. [21] nagyszilárdságú alumíniumötvözetten végzett nagysebességű marás kísérletekkel vizsgálta a forgácsolási paraméterek hatását a felületi integritásra. A kísérleti eredményeik alapján megállapították, hogy a felületi mikro-keménységre legnagyobb hatással a forgácsolósebesség (v_c) hat; kevésbé hat rá az előtolás (f_z) és a fogásmélység (a_p) és legkisebb hatása a fogásszélességnek (a_e) van. A paraméterek növelésével a mikrokeménység értékek gyenge csökkenő tendenciát mutattak. A maradandó feszültség vizsgálatok hasonló eredményeket kaptak.

3. HOMLOKBESZÚRÓ ESZTERGÁLÁSI KÍSÉRLETEK

3.1. Folyamat közbeni vizsgálati módszerek

A 2. fejezetben ismertetett vizsgálati módszerek alkalmazhatóságát vizsgáltam homlokbeszúró esztergálási kísérletek végrehajtásával. A Biró István [4] által tervezett kísérlet során a forgácsolás a munkadarab egy körül fordulásán belül valósul meg, nem egy teljes horony kerül kialakításra (3-1. ábra). Mivel a szerszám ugyanazon a szögpozíción csak egyszer halad át, a leválasztott elméleti forgácskeresztmetszet utólagosan pontosan mérhető. A mérőrendszert, ami a forgácsolás során fellépő erőket és a munkadarab fordulátát méri; kiegészítettem egy akusztikus emissziós mérőberendezéssel. Ezzel lehetőség nyílt a két folyamat közbeni módszer összehasonlítására.

Az alkalmazott próbatest egy 144mm átmérőjű, tárcsa jellegű munkadarab, melynek anyaga S960QL. A használt forgácsolószerszám egy 10EAL2.5FA kódú beszúrókés, melynek geometriai paramétereit a 3-1. táblázat tartalmazza.

3-1. táblázat. Beszúrólapka jellemző paramétereit

Fogásszélesség	Élsugár	Főél-elhelyezési szög	Mellékél-elhelyezési szög	Hátszög	Homlokszög
$b [mm]$	$r_\beta [\mu m]$	$K_r [^\circ]$	$K'_r [^\circ]$	$\alpha_o [^\circ]$	$\gamma_o [^\circ]$
2,5	20	90	2	10	3

A próbatest és szerszám méretei lehetővé teszik 10 darab horony elkészítését. Az egyes hornyok különböző technológiai paraméterekkel készültek. A változtatott paraméterek a forgácsolósebesség (v_c) és a horony mélysége (Z_{max}). A geometriából kiadódó paraméterek a beszúrás közepes átmérője ($d_{közepes}$), illetve a fordulatonkénti előtolás (f).

A fordulatszám a közepes átmérő és forgácsolósebességből a (3.1) egyenlet alapján számítható.

$$n = \frac{v_c}{d_{közepes} \cdot \pi} \cdot 1000 \left[\frac{1}{min} \right] \quad (3.1)$$

Annak érdekében, hogy a szerszámlé be és kilépése egy fordulaton belül megtörténjen a horony egy fordulat $\frac{3}{4}$ -ed részét teszi ki (3-1. ábra). A maximális horonymélység számítható a fordulatonkénti előtolás értékéből (3.2). A szerszám anyagba való süllyedése névlegesen a fordulat fele alatt játszódik le, ezt az egyenlet végén szereplő 2-vel való osztással veszem figyelembe.

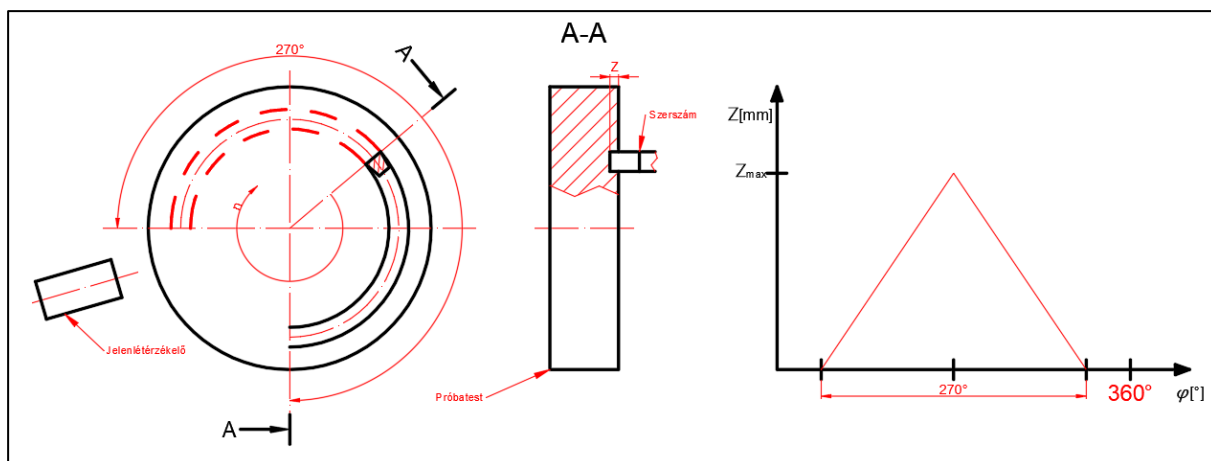
$$Z_{max} = f \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2} [mm] \quad (3.2)$$

Átrendezve megkapjuk a fordulatonkénti előtolás értékét (3.3).

$$f = Z_{max} \cdot \frac{8}{3} \left[\frac{mm}{1} \right] \quad (3.3)$$

Ezt a fordulatszámmal beszorozva adódik az előtoló sebesség értéke (3.4).

$$v_f = f \cdot n \left[\frac{mm}{min} \right] \quad (3.4)$$



3-1. ábra. Esztergálási kísérlet elrendezése és elméleti horonymélység [4, 42. o]

3-2. táblázat. A kísérletsorozat paramétertáblája

Kísérletterv - Homlokbeszűrő próba, 2022.07.27.									
Ssz.	$d_{belső}$	$d_{közepes}$	v_c	n	Z_{max}	f	v_f	$f_{m,F}$	$f_{m,AE}$
	[mm]	[mm]	$\left[\frac{m}{perc}\right]$	$\left[\frac{1}{min}\right]$	[mm]	$\left[\frac{mm}{1}\right]$	$\left[\frac{mm}{min}\right]$	[Hz]	[Hz]
1.	134,5	137	119	276	0,023	0,061	16,92	3318	102400
2.	126,5	129	119	294	0,030	0,081	23,65	3524	102400
3.	118,5	121	119	313	0,040	0,106	33,18	3757	102400
4.	110,5	113	200	563	0,035	0,092	52,04	6761	102400
5.	102,5	105	100	303	0,020	0,053	16,17	3638	102400
6.	94,5	97	84	276	0,040	0,106	29,21	3308	102400
7.	86,5	89	59	211	0,040	0,106	22,36	2532	102400
8.	78,5	81	168	660	0,040	0,106	69,97	7922	102400
9.	70,5	73	119	519	0,040	0,106	54,99	6227	102400
10.	62,5	65	119	583	0,052	0,139	81,28	6993	102400

Fontos szempont, hogy mind a folyamat közbeni- mind az utáni mérések a próbatest bizonyos szögpozíciójában történjenek. Az erőmérő szenzor mintavételezésének frekvenciája ($f_{m,F} [Hz]$) ezért a fordulatszám többszöröse (3.5).

$$f_{m,F} = \frac{n}{60} \cdot \frac{360^\circ}{\Delta\varphi} [Hz] \quad (3.5)$$

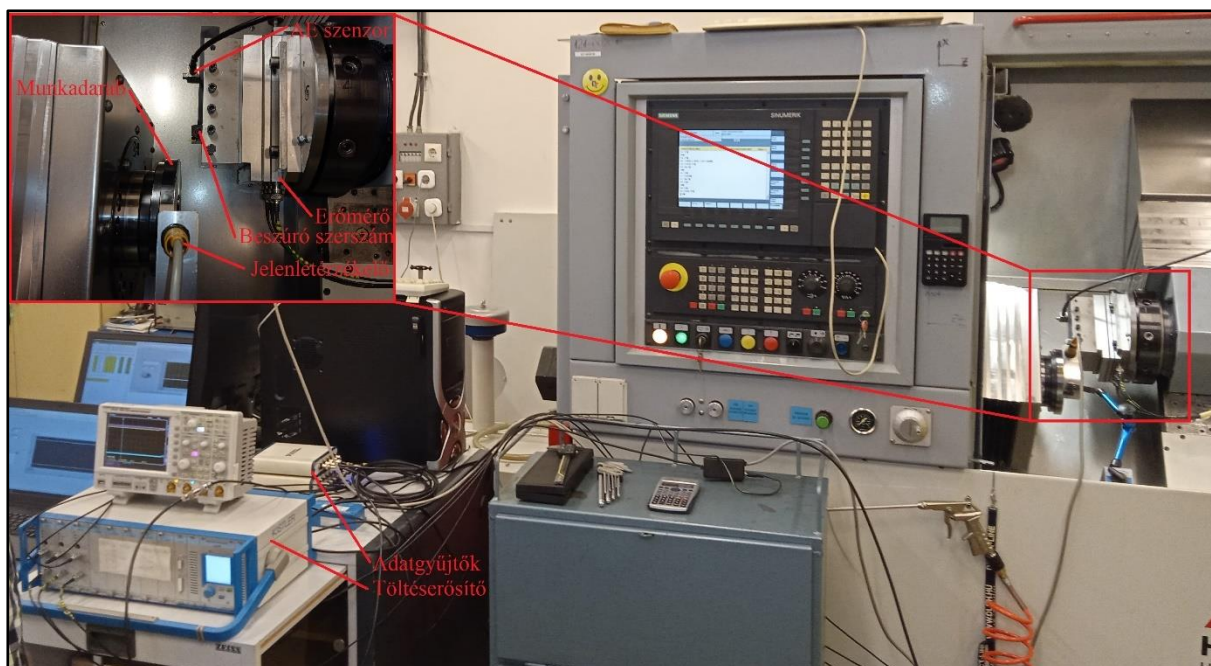
Az egyenletben szereplő $\Delta\varphi [^\circ]$ érték a mintavételezés névleges szöginkremense. Értékét $0,5^\circ$ -ra választottam. Ezzel a fellépő erőket (névlegesen) fél fokként rögzítjük.

Az akusztikus emissziós szenzor mintavételezését ezzel szemben a rendelkezésre álló berendezéseknek (adatgyűjtő) megfelelően, a lehető legnagyobb értékre választottam (3-2. táblázat).

3.1.1. A kísérlet végrehajtása

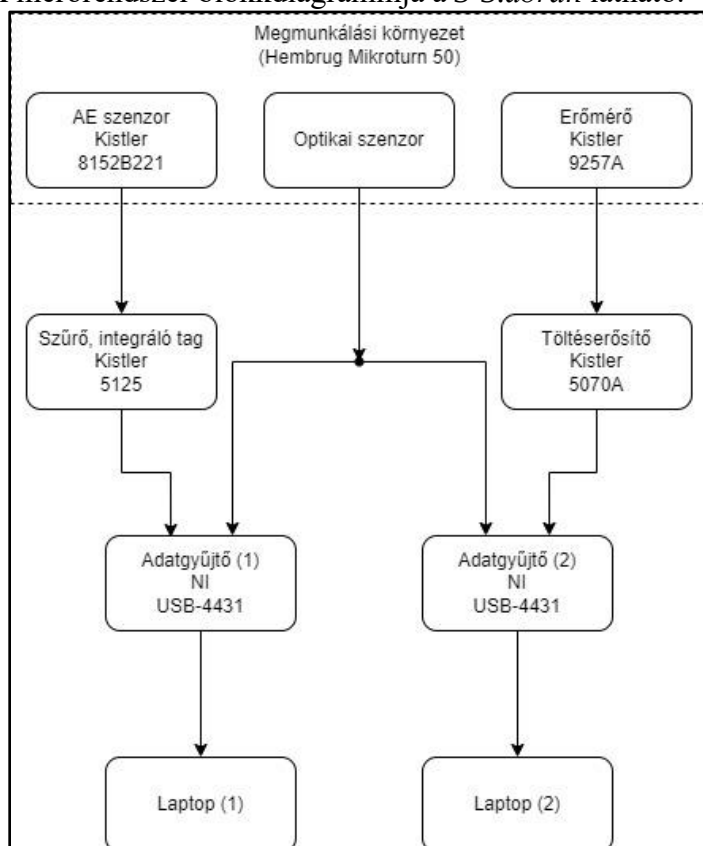
A kísérlet a Budapesti Műszaki Egyetem Gyártástudomány és -technológia tanszékének ultraprecíziós és mikro-megmunkáló laboratóriumában történt elvégzésre, Hembrug Mikrotorn 50 típusú esztergán.

Az erőmérő (Kistler 9257A) a késtartó szánra került felhelyezésre. Ezen foglal helyet a késtartó készülék. Ezen foglal helyet a CEAL2525M10D kódú szerszámszár. A szerszámszáron az előtolás irányára merőleges felületen került elhelyezésre a Kistler 8152B221 kódú akusztikus emissziós szenzor. A fordulatszám, illetve egy körül fordulás idejének pontos meghatározásához egy jelenlétérzékelő is elhelyezésre került. A kísérleti környezet a 3-2. ábrán látható.



3-2. ábra. Esztergálási kísérlet elrendezése

Az erőmérő által mért jel egy töltéserősítőn (Kistler 5070A) keresztül kerül bevezetésre az egyik adatgyűjtő (NI USB-4431) berendezésbe, amely által gyűjtött adatok egy személyi számítógépre továbbítódnak. Az akusztikus emisszió szenzor jelét átvezetve egy 50-1000kHz sáváteresztő szűrőn kapjuk a precíz („detailed”) ae-jel. Ezt kettéosztva az egyik ágát egy 1,2msec időállandójú integráló tagon keresztül vezetve kapjuk az AE_{rms} jelet. Ezen két jelet egy másik adatgyűjtőbe kötve lehetővé vált a kétféle mérőberendezés különböző frekvenciájú mintavételezése. A két adatgyűjtés között a mindkét adatgyűjtőbe bevezetett jelenlétsszenzor létesít kapcsolatot. A mérőrendszer blokkdiagramja a 3-3. ábrán látható.



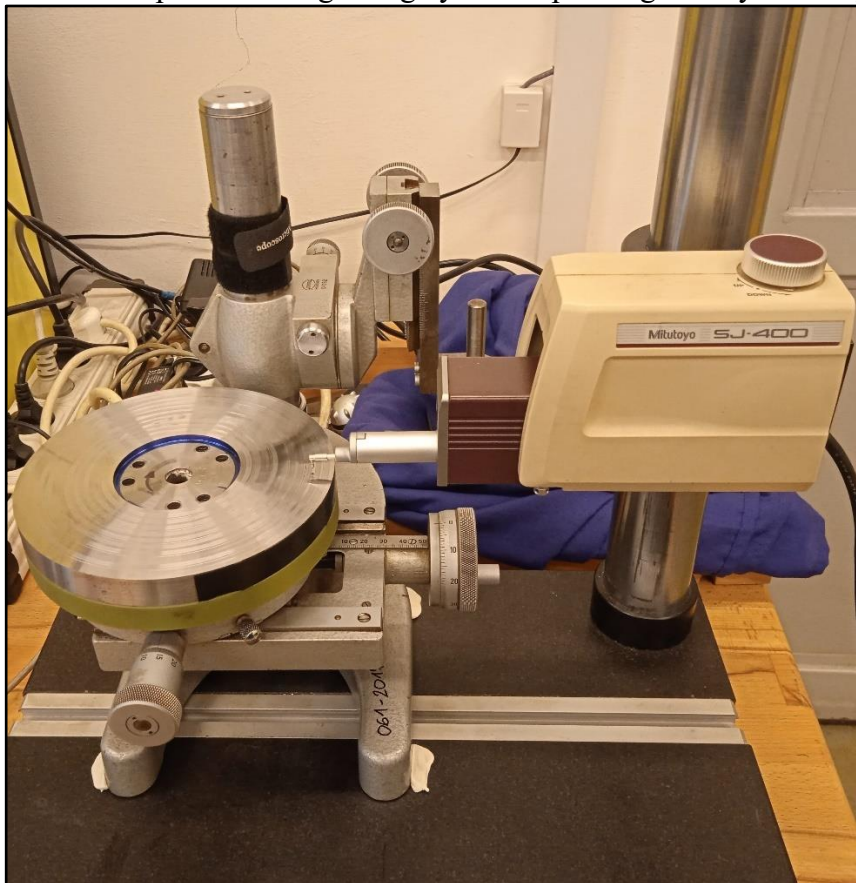
3-3. ábra. A mérőrendszer blokkdiagramja

A munkadarab precíz befogása után a homlokfelületét keresztesztergálással került megmunkálásra, biztosítva ezzel a felület síklapúságát, merőlegességét a forgástengelyre és az egyenletes felületi érdességet. Ezután megtörtént a beszúró szerszám (kézi) precíziós beállítása, fényrés segítségével; különösen ügyelve a szerszám élének homlokfelülettel vett párhuzamoságára. A kiértékelést segítő „karcok” egy speciálisan erre a célra készített szerszám segítségével, beszúró jellegű megmunkálással kerültek kialakításra a munkadarabon. A beszúró és karcoló szerszámok előtolás irányú pozicionálása érintő fogással történt, melyhez -a hagyományos módszeren felül- az akusztikus emisszió szenzor, mint érintkezés érzékelő berendezés kitűnően helytállt.

A mérési adatokat egy háromfős mérőszemélyzet rögzítette: egy személy kezelte a szerszám-gépet, míg kettő a két adatgyűjtő laptopot.

3.2. Folyamat utáni vizsgálati módszerek: Profilmérés

A kísérlet a Budapesti Műszaki Egyetem Gyártástudomány és -technológia tanszékének ultraprecíziós és mikro-megmunkáló laboratóriumában történt elvégzésre. A használt berendezés a 3-4. ábrán látható Mitutoyo SJ 400 felületi érdesség és profilmérő. A próbatestet egy hasonló méretű, polimer hordozóra helyeztem, így a további mozgatás során nem kellett közvetlenül a próbatestet érinteni. A felület tisztítása után egy körasztalon került elhelyezésre, mely a szögosztás mellett két irányban (a forgács tengelyére merőleges) elmozdulást is biztosít. A készülék a profilmérő (tartozék) állványán foglalt helyet. A pozicionálás kézzel történt, ügyelve arra, hogy a profilmérő a próbatest forgástengelyéhez képest sugár irányban mérjen.



3-4. ábra. Mitutoyo SJ 400 felületi érdesség és profilmérő [22]

A 60°-os kúpszögű és 2 μ m csúcssugarú tapintófejjel mért felületi profilt 5°-os osztásonként mértem le. A 8mm hosszú mérési hosszon, 1600 mérési pontot rögzítve, egyszerre 2 hornyot és a köztük lévő karcot mértem.

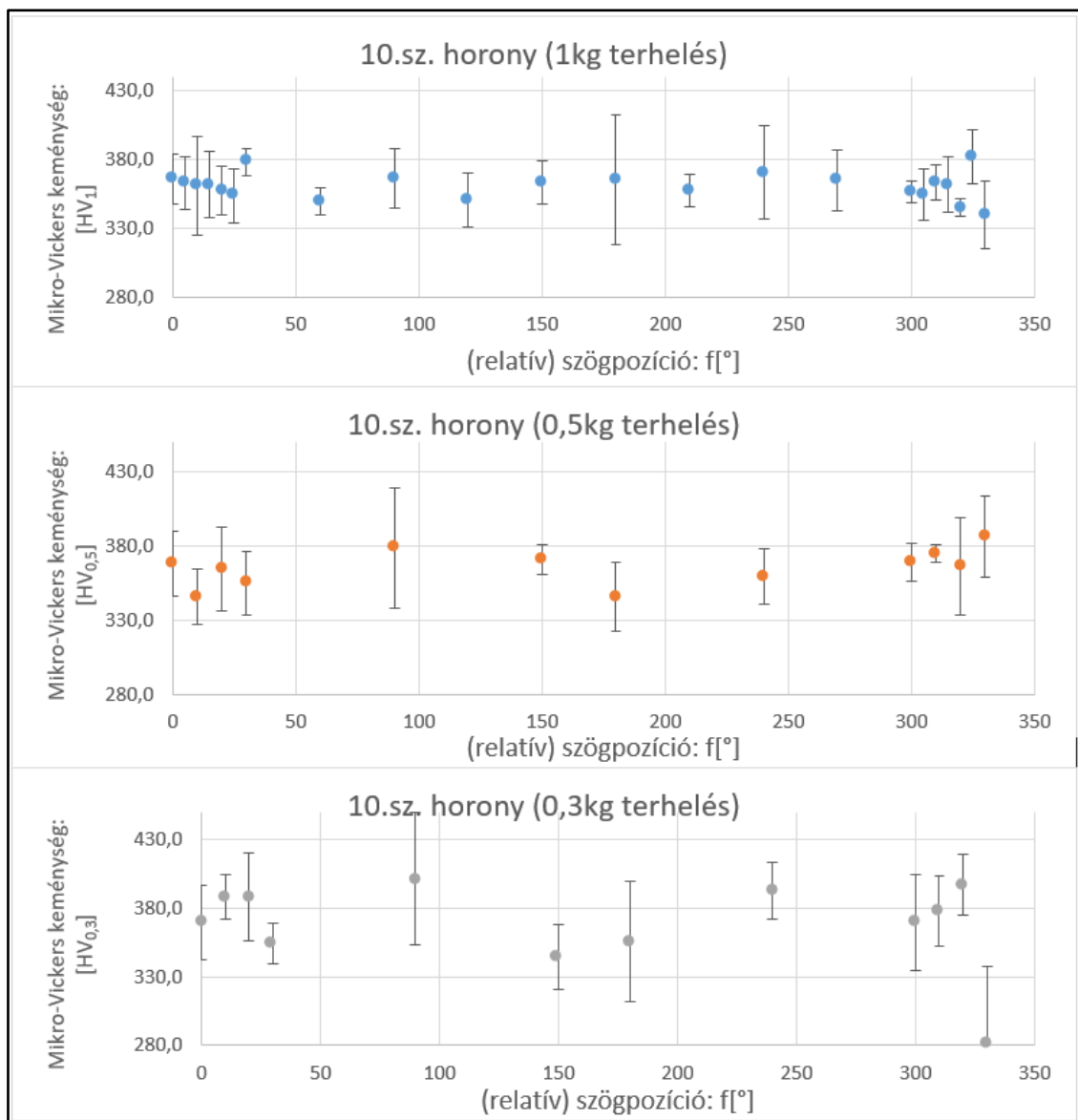
3.3. Folyamat utáni vizsgálati módszerek: Mikro-keménységmérés

A mérés a Budapesti Műszaki Egyetem Anyagtudomány és -technológia tanszékén történt. A használt mérőberendezés: Buehler Indentamet 1100 mikro-keménységmérő. A mérés elrendezése a 3-5. ábrán látható.



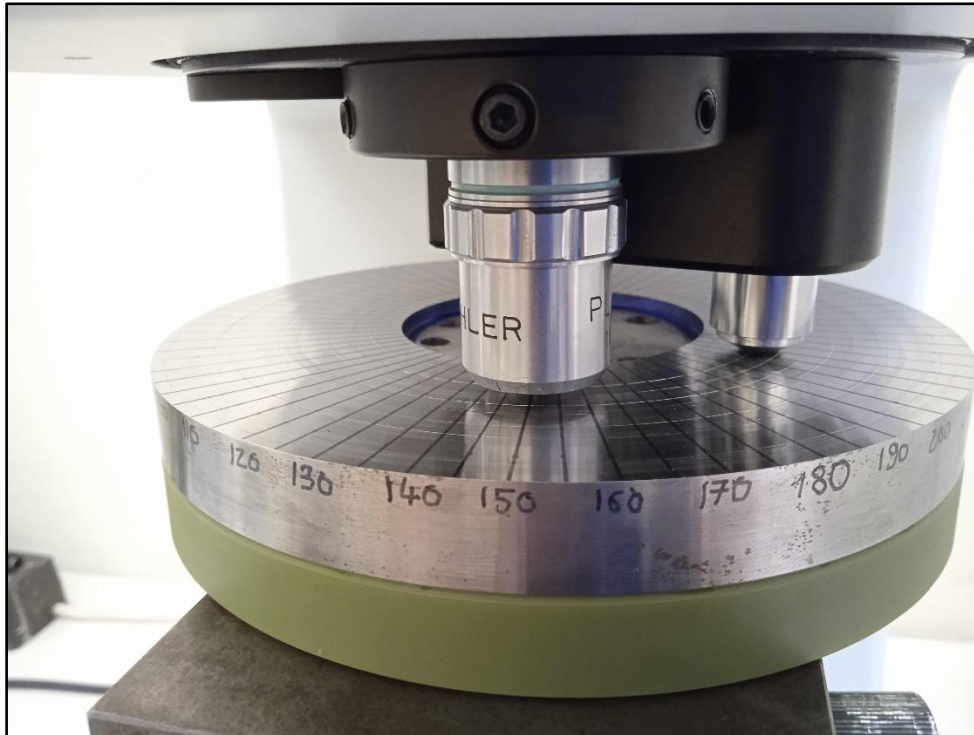
3-5. ábra. A próbatest mikro-keménységmérése

Próbamérések sorozatával vizsgáltam a keménységmérés terhelésének hatását (3-6. ábra). A próbamérést a legbelső, 10.számú hornyon végeztem el, mivel (az alkalmazott forgácsolási technológia alapján) itt a legintenzívebb az anyagalakítás. A három terhelés: 1kg; 0,5kg; 0,3kg. A terhelés időtartama a szabványnak (ISO 6507) megfelelően 12 másodpercre definiáltam. A próbamérések során azt állapítottam meg hogy a terhelés nincs lényeges hatással a mérési sorozat trendjére, a mérések szórása azonban a terhelés csökkentésével, nagyjából 20%-al nő. Ezért a továbbiakban 1kg terhelést alkalmaztam.



3-6. ábra. Próba-mikrokeménység mérések

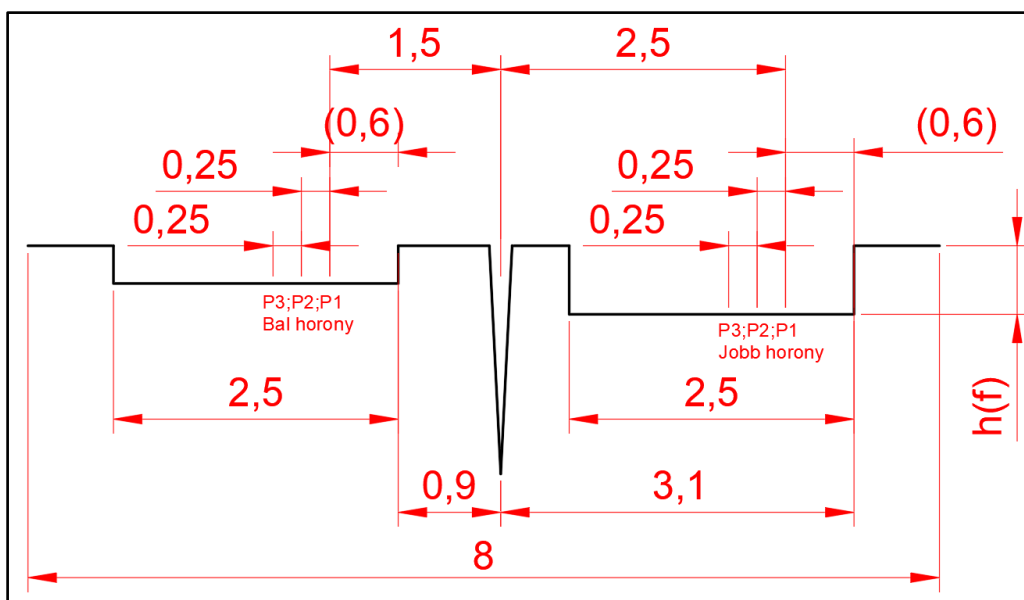
A mérések adott szögpozícióban történtek. A szögpozíciók a tranziens szakaszokban 5° osztással történtek, míg azon kívül 30° -onként. A mikro-keménységmérő kis munkateré miatt, a profil mérés körasztalát nem tudtam használni. Megoldásként a próbatest felületére kopásálló filctollal rajzoltam fel a szögosztást (3-7. ábra). Ezen, kézi pozicionálás, bár nagyobb hibával bír, mint egy készülék alkalmazása; az eredményül kapott mikrokeménység értékek hibájához képest mégis elhanyagolható.



3-7. ábra. Mikro-keménységmérés szögosztása

Az egyes szögpozíciókban és egyes hornyokban a mikrokeménység mérés háromszor került lemérésre a 3-8. ábrán szemléltetett geometriai pozíciókban (P3, P2 és P1 pontokban). A mérés bizonytalanságát a három mért érték szórásaként definiáltam.

A mérési pontok közötti előírt minimális távolság a lenyomat átlójának kétszerese. Mivel a próbamérések során az átló 60-70 μm tartományban mozgott, a távolságot 0,25 mm-re választottam.



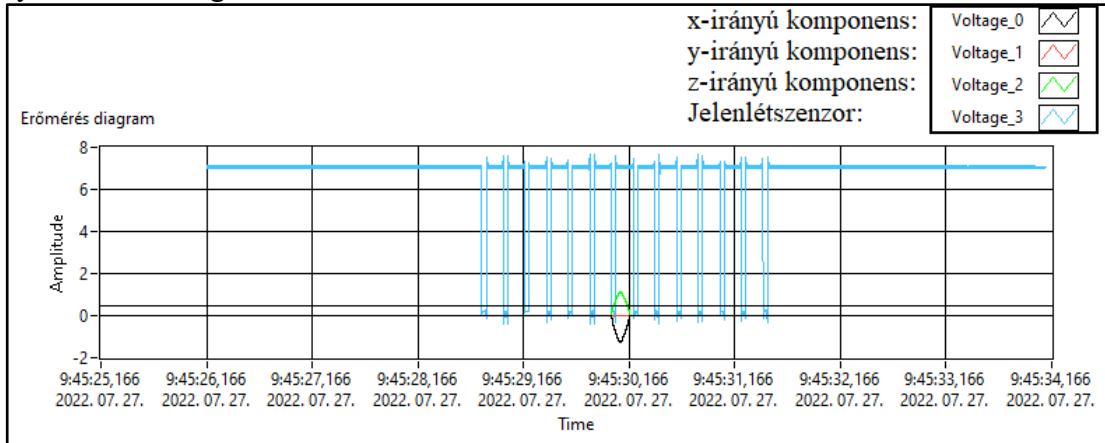
3-8. ábra. Mikrokeménység mérés mérési pontjai

3.4. Mérési adatok kiértékelése (kiértékelő szoftver dokumentációja)

A mérési adatok egyetlen, erre a célra készített kiértékelő szoftverrel kerültek kiértékelésre. A LabView 2020 programmal készített szoftver használati útmutatója a 9.1. mellékletben található. A szoftver megalkotása során a fő szempontok a könnyű kezelhetőség és az automatikus kiértékelés voltak.

I. Az erőmérés kiértékelése:

A nyers mérési diagramm a 3-9. ábrán látható.



3-9. ábra. Nyers erőmérés diagramm

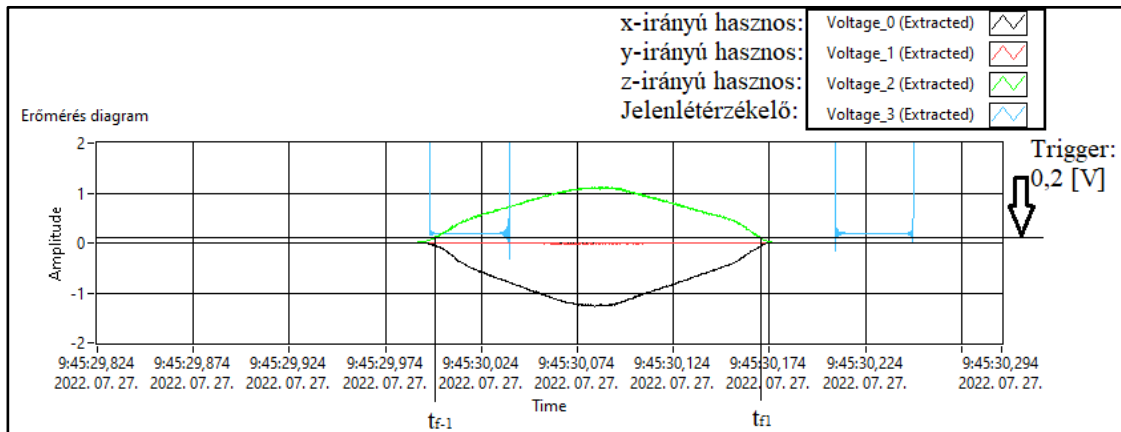
1. A z-irányú (előtolás iránya) komponens alapján a forgácsolásban töltött szakasz közepének ($t_{f,0}[s]$) meghatározása a (3.6) egyenlet alapján:

$$t_{f,0} = \frac{t_{f,1} + t_{f,-1}}{2} + t_{f,-1} [s] \quad (3.6)$$

2. A $t_{f,1}[s]$ és $t_{f,-1}[s]$ a z-irányú komponens bal- illetve jobb oldalát jelöli. Meghatározása a görbe és egy „trigger” metszéspontjából történik, melynek értékét 0,02 [V] értékre definiáltam (3-10. ábra).
3. Az egy körül fordulás periódus idejének ($T_{f,0}[s]$) meghatározása a jelenlétszenzor felfutó jeleiből (3.7). Ahol $t_{f,i}[s]$ a görbe közepét ($t_{f,0}$) követő felfutó jel pozícióját, míg $t_{f,i-1}[s]$ az ezt megelőző felfutó jel pozícióját jelöli.

$$T_{f,0} = t_{f,i} - t_{f,i-1} [s] \quad (3.7)$$

4. Hasznos rész kivágása: a szakasz közepétől mérve ± 1 periódusidőnyi rész.



3-10. ábra. Erőmérési diagramm hasznos szakasza

5. Fordulatszám ($n_f \left[\frac{1}{min} \right]$) számítása a periódusidőből (3.8).

$$n_f = \frac{60}{T_{f,0}} \left[\frac{1}{min} \right] \quad (3.8)$$

6. A mérési elrendezésből adódóan a forgácsoló erő a mért x-irányú feszültséggel arányos. Számítása a (3.9) egyenlet alapján történt. A mérőberendezés kalibrációs állandója: ($u_x = 200 \left[\frac{V}{N} \right]$).

$$F_c(t) = U_x(t) \cdot u_x [N] \quad (j = x, y, z)(3.9)$$

II. Az akusztikus emisszió mérésének kiértékelése:

1. Az AE_{RMS} komponens alapján a forgácsolásban töltött szakasz közepének ($t_{ae,0}$) meghatározása (az erőmérés kiértékeléséhez hasonló módszerrel).
2. Az egy körül fordulás periódus idejének ($T_{ae,0}[s]$) meghatározása a jelenlétszenzor felfutó jeleiből (3.10). Ahol $t_{ae,i}[s]$ a görbe közepét (t_{f0}) követő felfutó jel pozícióját, míg $t_{ae,i-1}[s]$ az ezt megelőző felfutó jel pozícióját jelöli.

$$T_{ae,0} = t_{ae,i} - t_{ae,i-1} [s] \quad (3.10)$$

3. Hasznos rész kivágása: a szakasz közepétől mérve ± 1 periódusidőnyi rész.

4. Fordulatszám ($n_{ae} \left[\frac{1}{min} \right]$) számítása a periódusidőből (3.11).

$$n_{ae} = \frac{60}{T_{ae,0}} \left[\frac{1}{min} \right] \quad (3.11)$$

5. A fordulatszám és névleges közepes átmérőből ($d_{köz}[mm]$) forgácsolósebesség ($v_{c,mért} \left[\frac{m}{min} \right]$) számítása (3.12).

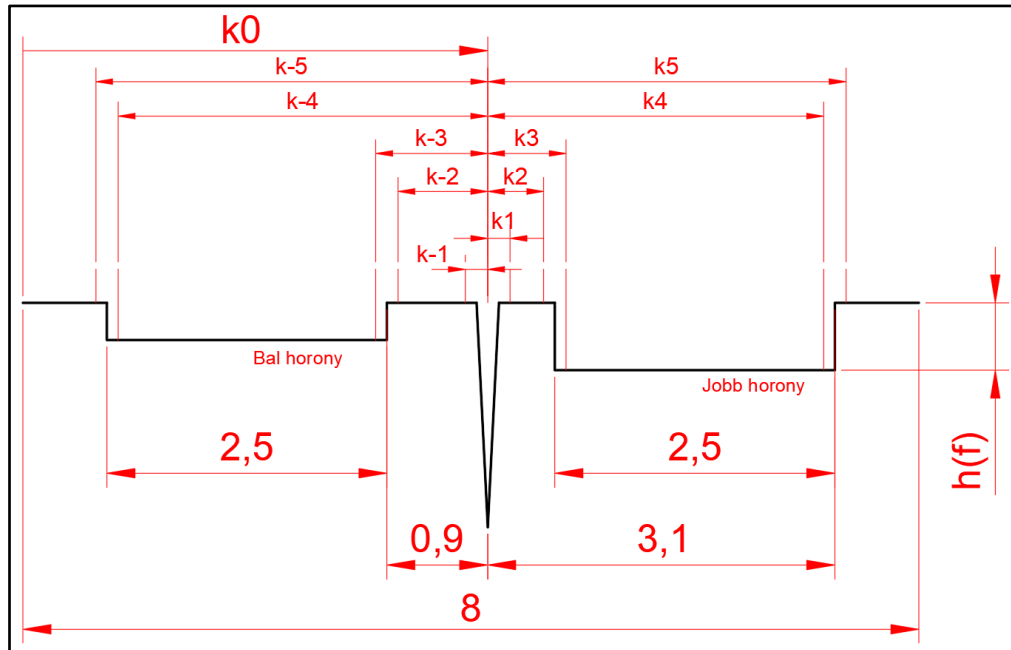
$$v_{c,mért} = \frac{d_{köz} \cdot \pi \cdot n_{ae}}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (3.12)$$

III. Profilmérések kiértékelése:

A profilmérések fájljainak ciklikus megnyitása:

Az első (abszolút 0° leforduláshoz tartozó) fájl megnyitása

1. Karc detektálása ($k_0 [mm]$)pozíció meghatározása): mivel a karc mélysége nagyobb, mint a hornyok (elméleti) mélysége, a karc pozíciója meghatározható minimumkérésével.
2. Profil szakaszokra bontása a karc pozíciója és a hornyok névleges pozíciója alapján (3-11. ábra).



3-11. ábra. Profilszakaszok definiálása a karc pozíciójához képest

3. Profil korrekciója: a mérési elrendezés hibájának korrekciója, az előmunkált homlokfelületre illesztett egyenes segítségével. Homlokfelület szakaszok definiálása balról haladva:

- A pontsorozat elejétől k_{-5} pontig ($[0; k_{-5}]$)
- k_{-2} ponttól k_{-1} pontig ($[k_{-2}; k_{-1}]$)
- k_1 ponttól k_2 pontig ($[k_1; k_2]$)
- k_5 ponttól a pontsorozat végéig ($[k_5; \infty]$)

4. A homlokfelület szakaszokra egyenest illesztve korrigálható a profil ferdesége, a korrigált profil pontjai:

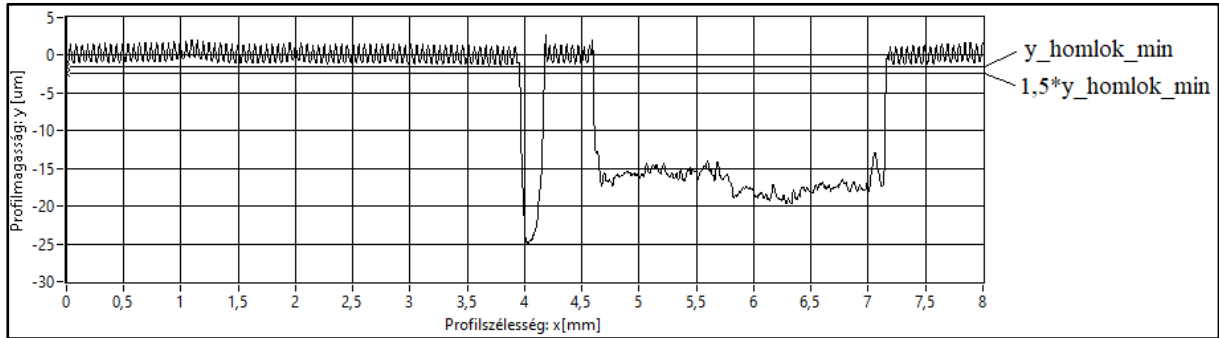
$$y_k(i) = y(i) - p(i) \quad (3.13)$$

5. Az illesztett egyenest pontjai pedig:

$$p(i) = a \cdot i \cdot \Delta x + b \quad (3.14)$$

Ahol $\Delta x = 0,5 [\mu m]$, azaz a profilmérő hosszirányú felbontása.

6. Átlagos horonymélység ($h [\mu m]$) első iterációjának számítása: $[k_{-4}; k_{-3}]$ és $[k_3; k_4]$ szakaszokon található pontok számtani átlaga.
7. Horonyszélesség meghatározása: $[k_{-5}; k_{-4}]$; $[k_{-3}; k_{-2}]$; $[k_2; k_3]$ és $[k_4; k_5]$ szakaszokon lévő görbék és az $y = 1,5 \cdot h_{h,min}$ egyenes metszéspontjának keresése. A $h_{h,min} [\mu m]$ érték a homlokfelület legmélyebb érdességvölgyének pontja (3-12. ábra).



3-12. ábra. Horonyszélesség keresése

8. Az így kapott profilszélesség pozíciókból ($x_{b,1}$ és $x_{b,2}$ a bal oldali horony oldalfalának pozíciói, míg $x_{j,1}$ és $x_{j,2}$ a jobb oldali horony oldalfalának pozíciói) számítható a horonyok szélessége. Bal oldali horony esetén:

$$b = x_{b,2} - x_{b,1} [mm] \quad (3.15)$$

Illetve jobb oldali horony esetén:

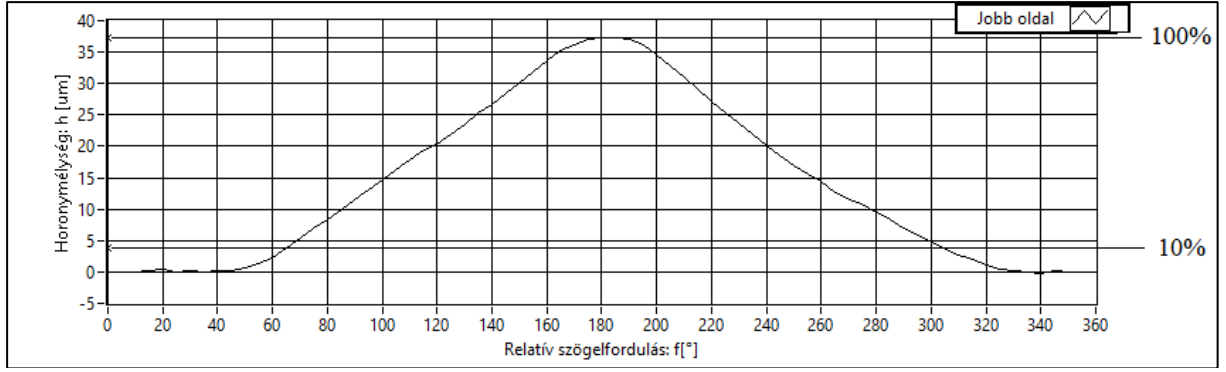
$$b = x_{j,2} - x_{j,1} [mm] \quad (3.16)$$

A horonyszélesség meghatározásának hibáját a mérési felbontás segítségével, a (3.17) egyenlet alapján definiáltam.

$$s_b = 2 \cdot \Delta x = 1 [\mu m] \quad (3.17)$$

9. A következő fájl megnyitása és 1-10 pontok újbóli végrehajtása

10. Az utolsó fájl megnyitása után; a horonymélység első iterációja alapján adatválogatás: a maximális mélység 10%-100% közötti értékek alapján horonyszélesség és pozíció meghatározása (3-13. ábra).



3-13. ábra. Horonymélység első iterációja

11. A válogatás során kieső adatok újraszámítása a horonyszélesség és pozíció alapján
12. A két adatsor összefűzésével adódnak a tényleges horonymélység ($h(\varphi)$) értékek.
13. A horonymélység görbe közepének meghatározása (hasonlóan az I. és II. pontokhoz).
14. A fenékprofilokra illesztett egyenes alapján a horonymélység számítási pontatlanságának számítása. A pontatlanság értékét a horonyprofil és az illesztett egyenestől való tapasztalati szórásaként számítottam. (3.18) Hasonlóan mint [4, 149.o].

$$s_h(\varphi) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(\varphi, i) - p(\varphi, i))^2} \quad (3.18)$$

15. A horonymélység és horonyszélességből deformálatlan forgácsvastagság számítása ($A [mm^2]$) a (3.19) egyenlet szerint.

$$A(\varphi) = h(\varphi) \cdot b \quad (3.19)$$

A forgácsvastagság meghatározásának hibája pedig a (3.20) egyenlet szerint:

$$s_A(\varphi) = \sqrt{s_h^2(\varphi) + s_b^2(\varphi)} \quad (3.20)$$

IV. Mikro-keménységmérés kiértékelése:

1. Mért adatok beolvasása és szögpozícióhoz rendelése
2. Tapasztalati szórás számítása (3.21)

$$s_{hv}(\varphi) = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (HV_{1,i}(\varphi) - \overline{HV}_1(\varphi))^2} \quad (3.21)$$

- V. Adatok párosítása a szakaszok közép pozícióinak alapján, áttérés elméleti forgácsvastagság változóra:

$$\varphi[^\circ] \rightarrow h[\mu m]$$

- VI. Fajlagos forgácsolóerő ($k_c(h)$) és fajlagos akusztikus emisszió ($ae_{rms}(h)$) számítása a (3.22-23) egyenletek alapján. (A fajlagos akusztikus emisszió szintén megtalálható a szakirodalomban, melyre példa mi és mtsai. [23] publikációja.)

$$k_c(h) = \frac{F_c(h)}{A(h)} \quad (3.22)$$

$$ae_{rms}(h) = \frac{AE_{rms}(h)}{A(h)} \quad (3.23)$$

- VII. A fajlagos forgácsolóerő és fajlagos akusztikus emisszió exponenciális jellegtől való eltérésének vizsgálata:

Iterációk sorozatával egyenes illesztése a logaritmizált értékekre. Kezdő tartományt definiáltam: a mérési pontok 30%-a az elméleti forgácsvastagság értékek növekvő sorrendje alapján. A következő iterációs lépésben további méréspont hozzáadása a tartományhoz és kritériumvizsgálat. Az illeszkedéskritériumot az illesztett egyenes pontja $f_{kc}(\lg(h_i))$ és az adott lépésben hozzáadott mért érték $\lg(k_c(\lg(h_i)))$ relatív 10%-os hibájaként definiáltam.

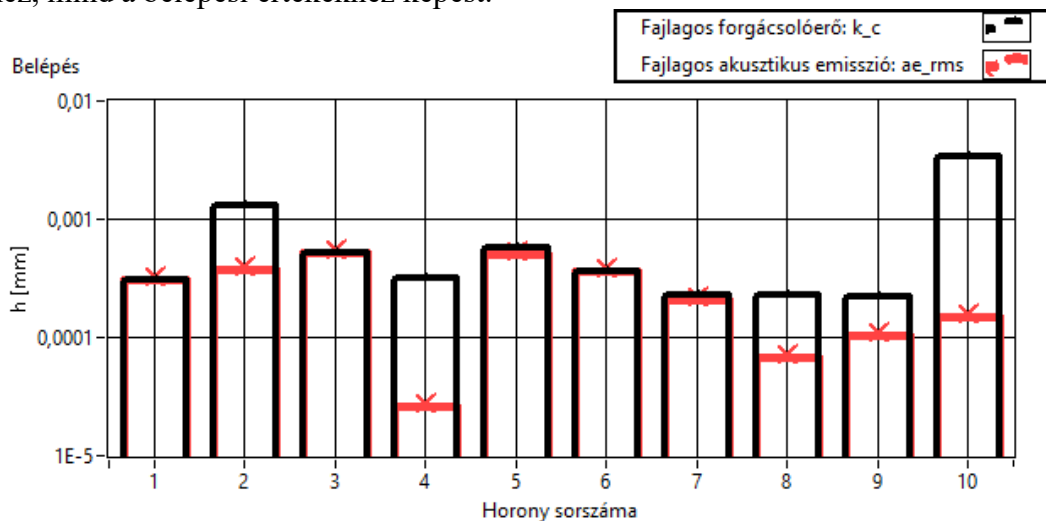
$$e_i = f_{kc}(\lg(h_i)) - \lg(k_c(\lg(h_i))) \quad (3.24)$$

$$e_i < f_{kc}(\lg(h_i)) \cdot \frac{10[\%]}{100[\%]} \quad (3.25)$$

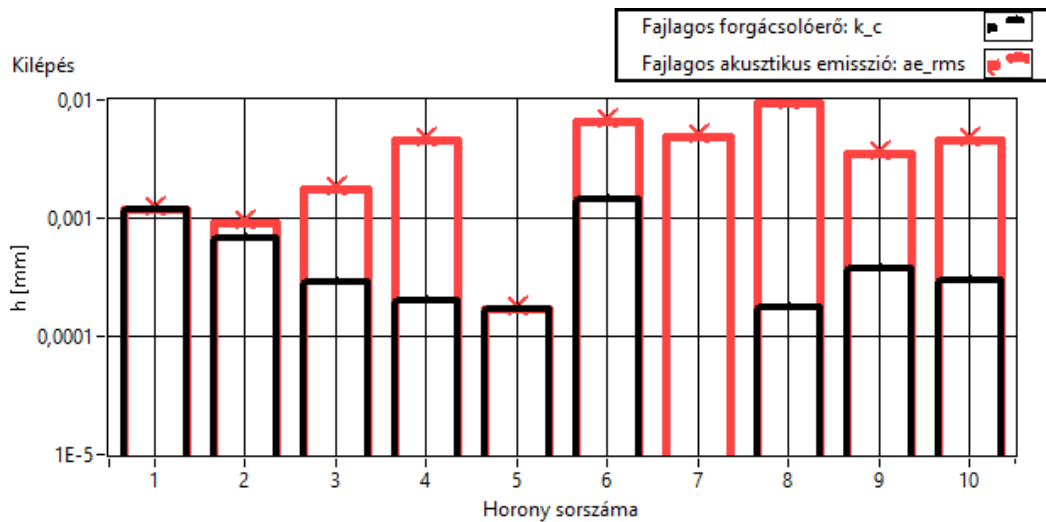
Az illeszkedés tartományát az az elméleti forgácsvastagság adja, ahol a kritérium még éppen teljesül.

3.5. Eredmények

A kiértékelés során kapott adatokat és diagrammokat a 9.2 számú melléklet tartalmazza. Mind a fajlagos forgácsolóerő, mind a fajlagos akusztikus emisszió diagrammokon szembevetve a 2. fejezetben ismertetett, exponenciális jellegtől (, illetve logaritmizálás esetén egyenestől) való eltérés. Az illeszkedésvizsgálat során meghatározott tartományhatárok a 3-14-15. ábrán láthatóak. A 3.4 fejezet VII. pontjában ismertetett módszer alkalmazásával, a forgácsoló él belépését vizsgálva többnyire azonos eredményeket kaptam. Míg a kilépést vizsgálva az eredmények eltérőek, a fajlagos akusztikus emisszió értékei jóval nagyobb forgácsvastagságok esetében éri el az exponenciális jelleg határát; mind a fajlagos forgácsolóerő kilépési értékeihez, mind a belépési értékekhez képest.

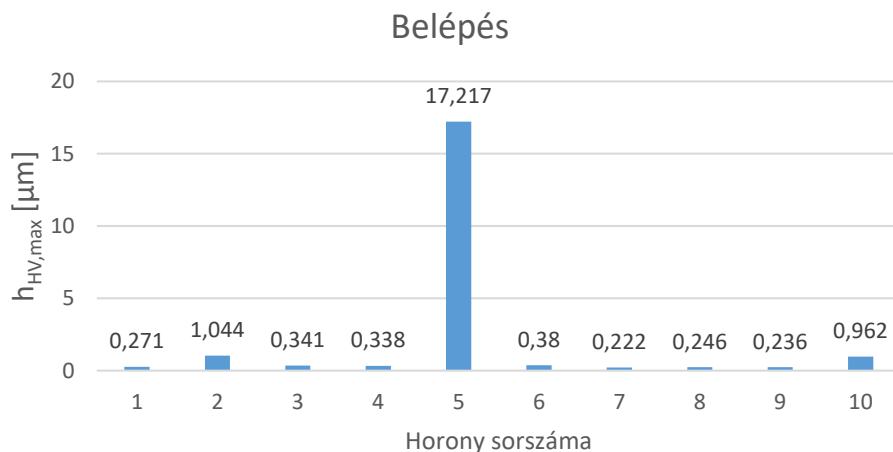


3-14. ábra. Tartományhatárok az illeszkedésvizsgálat során, belépő oldal

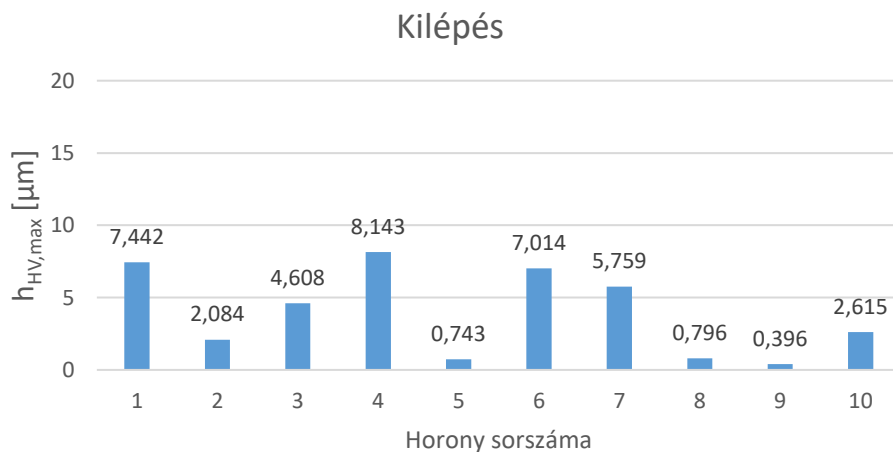


3-15. ábra. Tartományhatárok az illeszkedésvizsgálat során, kilépő oldal

A mikro-keménység mérések eredményeire nem sikerült érdemi modellillesztést kivitelezni. A mérési eredmények és az illesztésre történő próbálkozások a 9.3. mellékletben találhatók. Azonban kijelenthető, hogy a keménységértékek maximuma (egyetlen kivétellel) a transziens szakaszban található (3-16-17. ábra). Ez a jelenség megegyezik Lu és mtsa. [15] által tapasztalt eredményekkel.



3-16. ábra. Mikro-keménység maximum értékének pozíciója, belépésnél



3-17. ábra. Mikro-keménység maximum értékének pozíciója, kilépésnél

4. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TANULSÁGOK

4.1. Összefoglalás

Az elvégzett, speciális homlokbeszűrő esztergálási kísérletsorozatok segítségével sikerült kimutatnom a fajlagos forgácsolóerő és fajlagos akusztikus emisszió értékek exponenciális jellegtől való eltérését a vékonyforgácsleválasztás technológia esetén. Továbbá, a fajlagos forgácsolóerő és fajlagos akusztikus emisszió értékeinek összehasonlításával bebizonyosodott az akusztikus emissziós mérési módszer alkalmazhatósága az említett technológiára, ezáltal a mikroforgácsolás technológiájára is. A forgácsoló él belépését vizsgálva sikerült olyan módszert alkalmazni, amely többnyire azonos eredményeket adott, a két vizsgált indikátor (fajlagos forgácsolóerő és fajlagos akusztikus emisszió) összehasonlítását tekintve, az exponenciális jellegtől való eltérés határát illetően.

Bár a nagy mérési szórások miatt nem sikerült egyértelmű matematikai modellt illeszteni a mikro-keménységmérések sorozatára. A mikro-keménységértékek azonban egyértelműen azt mutatták, hogy a tranziens (azaz a szerszámél forgácsolásba belépésének és kilépésének) szakaszában nagyobb keménységértékek mérhetőek. Ez igazolja az elméletet, ami szerint a felület a legnagyobb alakváltozást és így legnagyobb alakítási keménységet itt szenved el. Megfigyelhető továbbá, hogy a keménységértékek a maximális értéküket a kilépés során, átlagosan nagyobb elméleti forgácsvastagság értéknél érik el. Ez összhangban van az akusztikus emissziós mérés exponenciális jellegtől való eltérésének karakterisztikájával.

4.2. Javaslatok

Az akusztikus emisszió direkt mérése kivitelezhető lehet, egy forgácsolási folyamatok szempontjából hasonló technológia, a mikromarás vizsgálatokor. Ezen esetben ugyanis a szerszám kis átmérője miatt nagy fordulatszámon történik a megmunkálás, azaz kis időközű periódusokat vizsgálhatunk, ami lehetővé teszi a mintavételezés digitális oszcilloszkóppal való megvalósítását. Illetve az élenkénti előtolás változtatásával közvetlenül meghatározható az elméleti minimális forgácsvastagság, amely fontos jellemzője a technológiának.

Kulcsszavak: *fajlagos forgácsolóerő, fajlagos akusztikus emisszió, mikrokeménység, mérés*

5. SUMMARY

With the help of the series of special grooving face-turning experiments, I was able to demonstrate the deviation of the specific cutting force and specific acoustic emission values from the exponential nature in the case of thin chip removal technology. Furthermore, by comparing the specific cutting force and specific acoustic emission values, the applicability of the acoustic emission measurement method to the mentioned technology, thus also to the technology of micro-cutting, was proven. By examining the entry of the cutting edge, it was possible to apply a method that mostly gave identical results, regarding the comparison of the two examined indicators (specific cutting force and specific acoustic emission), regarding the limit of deviation from the exponential nature.

Whilst, due to the large measurement deviations, it was not possible to fit a clear mathematical model to the series of micro-hardness measurements. Nevertheless, the micro-hardness values clearly showed that higher hardness values can be measured in the transient (i.e. when the tool edge enters and exits the cutting) section. This justifies the theory according to which the surface undergoes the greatest deformation and thus the forming hardness is the greatest here. It can also be observed that the hardness values reach their maximum value during the exit, on average, at a larger theoretical chip thickness value. This is consistent with the characteristic of the deviation from the exponential nature of the acoustic emission measurement.

With further experiments, the direct measurement of acoustic emission may be feasible. By using a similar technology in terms of cutting processes: micromilling. In this case, due to the small diameter of the tool, the machining takes place at a high speed, i.e. we can examine the periods of small intervals, which enables the implementation of sampling with a digital oscilloscope. Also, by changing the edge feed, the theoretical minimum chip thickness can be determined directly, which is an important feature of the technology.

Keywords: *specific cutting force, specific acoustic emission, micro-hardness, size effect*

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] B. Z. Balázs, N. Geier, M. Takács, és J. P. Davim, „A review on micro-milling: recent advances and future trends”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 112, sz. 3, Art. sz. 3, jan. 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06445-w.
- [2] J. Bali, *Forgácsolás*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1985.
- [3] B. Medina-Clavijo és mtsai., „In-SEM micro-machining reveals the origins of the size effect in the cutting energy”, *Sci. Rep.*, köt. 11, sz. 1, Art. sz. 1, jan. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-81125-7.
- [4] Biró I., „A forgácsleválasztás energetikai modelljének kiterjesztése nagy szilárdságú acél precíziós és mikroforgácsolási technológiájához”, *Extension of the energy consumption model of mechanical chip-removal for precision and microcutting processes*, 2017, Elérés: 2022. augusztus 22. [Online]. Elérhető: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/5479>
- [5] C. U. Grosse, M. Ohtsu, D. G. Aggelis, és T. Shiotani, *Acoustic Emission Testing: Basics for Research – Applications in Engineering*. Springer Nature, 2021.
- [6] L. H. A. Maia, A. M. Abrao, W. L. Vasconcelos, W. F. Sales, és A. R. Machado, „A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission”, *Tribol. Int.*, köt. 92, o. 519–532, 0 2015, doi: 10.1016/j.triboint.2015.07.024.
- [7] J. Ahmed, T. Zhang, D. Ozevin, és M. Daly, „A multiscale indentation-based technique to correlate acoustic emission with deformation mechanisms in complex alloys”, *Mater. Charact.*, köt. 182, o. 111575, dec. 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2021.111575.
- [8] A. J. Mian, N. Driver, és P. T. Mativenga, „Identification of factors that dominate size effect in micro-machining”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 51, sz. 5, o. 383–394, máj. 2011, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.004.
- [9] D. E. Lee, I. Hwang, C. M. O. Valente, J. F. G. Oliveira, és D. A. Dornfeld, „Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 46, sz. 2, o. 176–188, febr. 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001.
- [10] „DSA Device/Module Overview - NI”. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pci-pxi-pxie-usb-443x-446x-449x-feature/page/overview.html> (elérés 2022. november 1.).
- [11] S. L. M. Ribeiro Filho, J. A. de Oliveira, C. H. Lauro, és L. C. Brandão, „Monitoring of microturning process using acoustic emission signals”, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, köt. 41, sz. 6, o. 271, jún. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1774-z.
- [12] A. Hase, *Acoustic Emission Signal during Cutting Process on Super-Precision Micro-Machine Tool*. 2013.
- [13] „ISO 6507-1:2018(en), Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method”. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6507:-1:ed-4:v1:en> (elérés 2022. november 1.).
- [14] „Kemenysegmeres_sillabusz.pdf”. Elérés: 2022. november 1. [Online]. Elérhető: https://www.att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTMVV1/segedletek/Kemenysegmeres_sillabusz.pdf
- [15] X. Lu, Z. Jia, H. Wang, Y. Feng, és S. Y. Liang, „The effect of cutting parameters on micro-hardness and the prediction of Vickers hardness based on a response surface methodology for micro-milling Inconel 718”, *Measurement*, köt. 140, o. 56–62, júl. 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.03.037.
- [16] W. Zhang, X. Wang, Y. Hu, és S. Wang, „Predictive modelling of microstructure changes, micro-hardness and residual stress in machining of 304 austenitic stainless steel”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 130–131, o. 36–48, aug. 2018, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2018.03.008.

- [17] W. Zhang, X. Wang, Y. Hu, és S. Wang, „Predictive modelling of microstructure changes, micro-hardness and residual stress in machining of 304 austenitic stainless steel”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 130–131, o. 36–48, aug. 2018, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2018.03.008.
- [18] O. J. Zurita-Hurtado, V. C. D. Graci-Tiralongo, és M. C. Capace-Aguirre, „Surface hardness prediction based on cutting parameters in turning of annealed AISI 1020 steel”, *DYNA*, köt. 84, sz. 203, o. 31–36, 2017.
- [19] C. H. Che-Haron és A. Jawaaid, „The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti–6% Al–4% V”, *J. Mater. Process. Technol.*, köt. 166, sz. 2, o. 188–192, aug. 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.08.012.
- [20] „Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication | Elsevier Enhanced Reader”. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652615019162?token=7E7ECEA1F2E65C9D01E6E62E5EA24022000CD92E3033635BD71435E86D3B330C724D685F1B588F13F8D21F754A5FDF52&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220628144626> (elérés 2022. június 28.).
- [21] C. Yao, W. Zuo, D. Wu, J. Ren, és D. Zhang, „Control rules of surface integrity and formation of metamorphic layer in high-speed milling of 7055 aluminum alloy”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, köt. 229, o. 187–204, febr. 2014, doi: 10.1177/0954405414527268.
- [22] „2013_SJ-400.pdf”. Elérés: 2022. október 27. [Online]. Elérhető: https://www.mitutoyo.com/Images/003/308/2013_SJ-400.pdf
- [23] A. J. Mian, N. Driver, és P. T. Mativenga, „Chip formation in microscale milling and correlation with acoustic emission signal”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 56, sz. 1, o. 63–78, szept. 2011, doi: 10.1007/s00170-011-3185-x.

7. ÁBRAJEGYZÉK

2-1. ábra. A forgácsolás tranzien szaka sa: átmenet vasalásból stabil forgácsképzésbe [1, o. 3] alapján	2
2-2. ábra. Vizsgálati módszerek csoportosítása.....	3
2-3. ábra. Fajlagos forgácsolóerő exponenciális jellege [4, 38.o]	4
2-4. ábra. Aktív és passzív vizsgálati módszerek[5, 4.o]	4
2-5. ábra. Impulzusszerű és folytonos AE jel[5, 5.o]	5
2-6. ábra. Az AE forrásai a megmunkálás mére tskálájának függvényében[9, 5.o]	6
2-7. ábra. AE szenzor[5, 23.o].....	6
2-8. ábra. AE jel négyzetes középértéke és teljesítményspektruma marás során[8, 5.o]	7
2-9. ábra. AE jel a tranzien szaka sban[12, 5.o].....	8
2-10. ábra. Mikro-keménységmérő berendezés, a mérés elve[14, 5.o] és az elkészített lenyomat[15, 3.o]	9
2-11. ábra. Mikro-keménység és maradandó feszültség a felszíntől való mélység függvényében[15, 46.o].....	9
2-12. ábra. Paraméterek hatása a mikro-keménységre[15, 60.o]	10
3-1. ábra. Esztergálási kísérlet elrendezése és elméleti horonymélység[4, 42. o].....	12
3-2. ábra. Esztergálási kísérlet elrendezése	13
3-3. ábra. A mérőrendszer blokkdiagrammja	13
3-4. ábra. Mitutoyo SJ 400 felületi érdesség és profilmérő[22]	14
3-5. ábra. A próbatest mikro-keménységmérése	15
3-6. ábra. Próba-mikro keménység mérések	16
3-7. ábra. Mikro-keménységmérés szögosztása	17
3-8. ábra. Mikro keménység mérés mérési pontjai.....	17
3-9. ábra. Nyers erőmérés diagramm	18
3-10. ábra. Erőmérési diagramm hasznos szaka sa.....	18
3-11. ábra. Profilszaka srok definiálása a karc pozíciójához képest.....	19
3-12. ábra. Horonszélesség keresése	20
3-13. ábra. Horonymélység első iterációja	21
3-14. ábra. Tartományhatárok az illeszke désvizsgálat során, belépő oldal.....	22
3-15. ábra. Tartományhatárok az illeszke désvizsgálat során, kilépő oldal	23
3-16. ábra. Mikro-keménység maximum értékének pozíciója, belépésnél	23
3-17. ábra. Mikro-keménység maximum értékének pozíciója, kilépésnél	23

8. TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

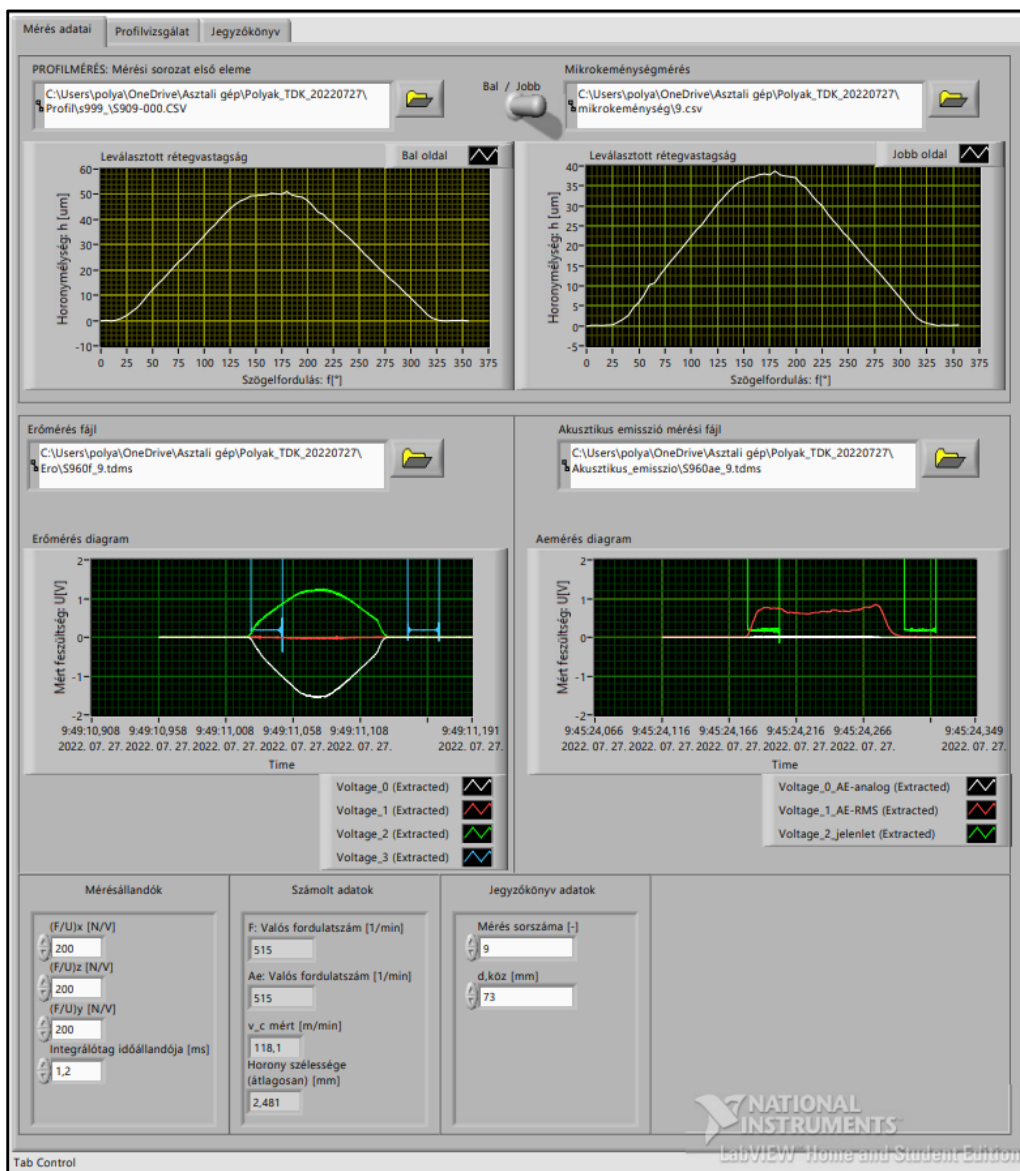
3-1. táblázat. Beszúrólapka jellemző paraméterei	11
3-2. táblázat. A kísérletsorozat paraméter táblája	12

9. MELLÉKLETEK JEGYZÉKE

9.1. A kiértékelő szoftver használata	M-2
9.2. Kiértékelés eredményei	M-5
9.3. Mikro-keménység mérések kiértékelése	M-15

9.1. A kiértékelő szoftver használata

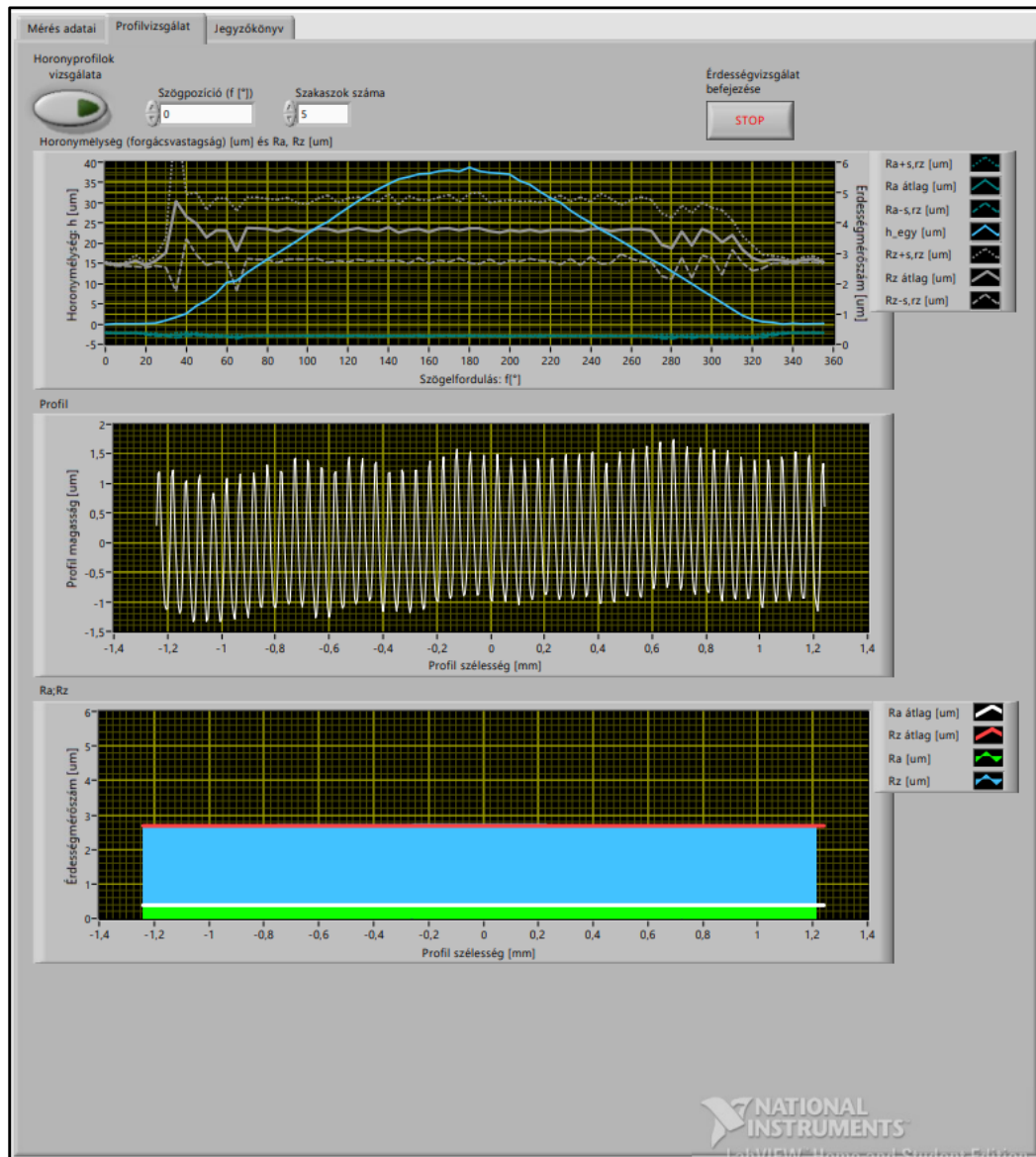
A FrontPanel, „Mérés adatai” fülön megadandó a mérési fájlok elérési helyei. Továbbá az erőmérő műszerállandója, az akusztikus emisszió szenzor integráló tagjának időállandója, a mérés száma és a horony névleges pozíciója a tárcsa átmérőjében definiálva (**Hiba! Nincs ilyen stílusú szöveg a dokumentumban.-1. ábra. Kiértékelő szoftver: "Mérés adatai"****Hiba! Nincs ilyen stílusú szöveg a dokumentumban.-1. ábra**). A felül található billenő kapcsolóval ki kell választani a profil mérés megfelelő hornyát. A program futtatása után itt található a profil-kiértékelés során kapott, két horony horonymélység-szögelfordulás diagrammja, az erő- és akusztikus emissziós mérésekből kivágott részek. Illetve további számolt adatok: a folyamat közbeni mérésekből meghatározott mért fordulatszámok, az ebből számolt mért forgácsolósebesség és a profil mérésből származtatott mért horonyszélesség.



Hiba! Nincs ilyen stílusú szöveg a dokumentumban.-1. ábra. Kiértékelő szoftver: "Mérés adatai"

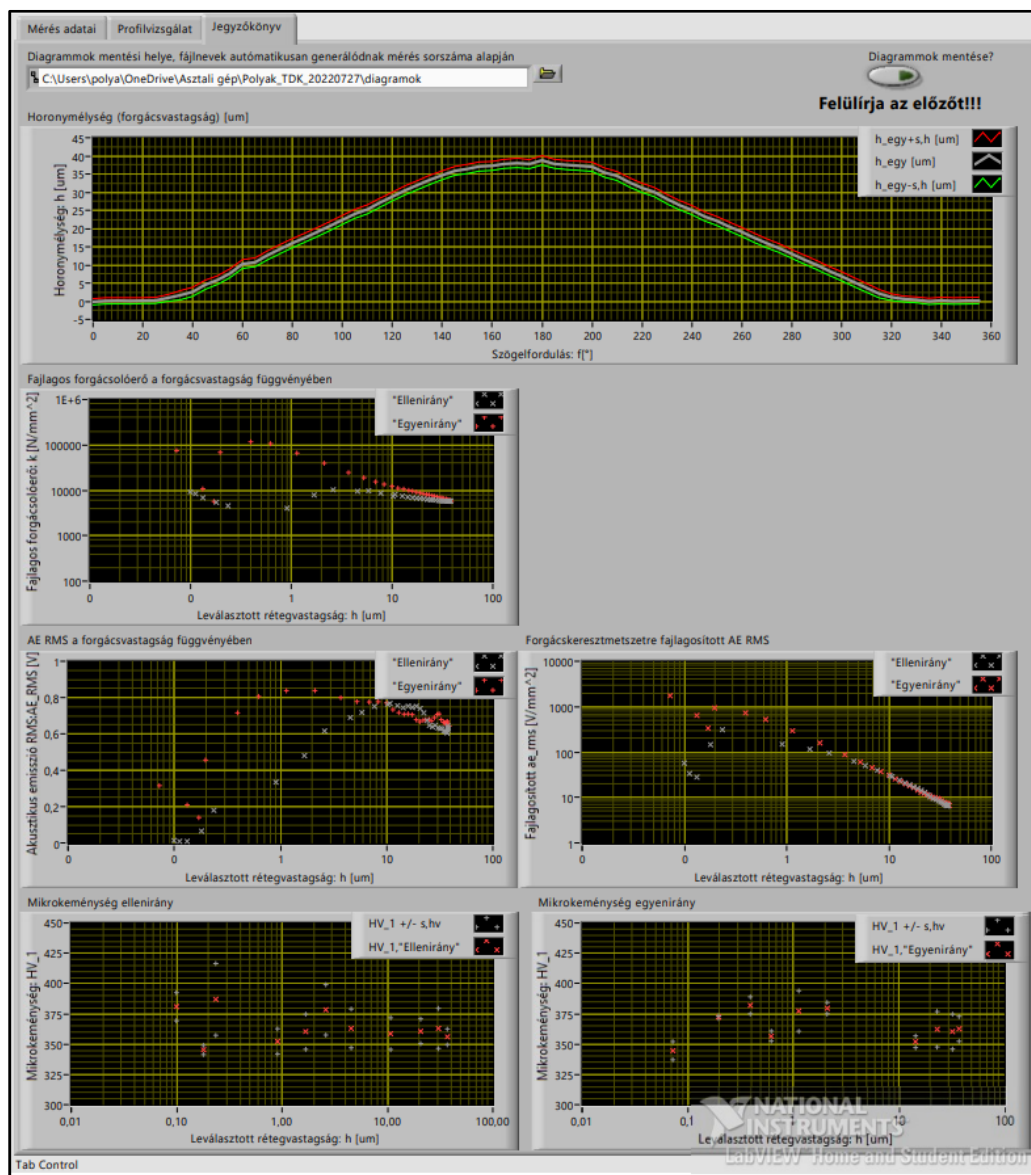
A „Profilvizsgálat” fülön található „Horonyprofilok vizsgálata” gomb aktiválásával a program futtatása során szemrevételelezhetők a horonyfenékprofilok. Itt kapott helyet továbbá az

átlagos felületi érdesség (R_a) és egyenetlenség-magasság (R_z) mérőszámainak diagrammja a relatív szögelfordulás függvényében. Ezen érdesség-mérőszámok változó paramétere, hogy az alapszakaszt hány szakaszra osztjuk; amely a „Szakaszok száma” beviteli egységgel változtatható. (Alapesetben: 5 szakasz). A „Szögpozíció” egység inkrementálásával léptethetünk az egyes profilok között. A profilvizsgálat befejeztét a „Horonyprofilok vizsgálata” gomb deaktiválásával, vagy a „STOP” gomb megnyomásával tehetjük meg. *(Hiba! Nincs ilyen stílusú szöveg a dokumentumban.-2. ábra)*



Hiba! Nincs ilyen stílusú szöveg a dokumentumban.-2. ábra. Kiértékelő szoftver: "Profilvizsgálat"

A „Jegyzőkönyv” fülön található a szoftver által készült kiértékelés. Megadandó a diagrammok mentési helye. A „Diagrammok mentése” gomb aktiválásával a (program futtatásakor) a diagrammokat automatikusan menti, az előző fájlok felülírásával. A gomb kikapcsolt állapota esetén a program rákérdez a fájlok felülírására. *(Hiba! Nincs ilyen stílusú szöveg a dokumentumban.-3. ábra)*

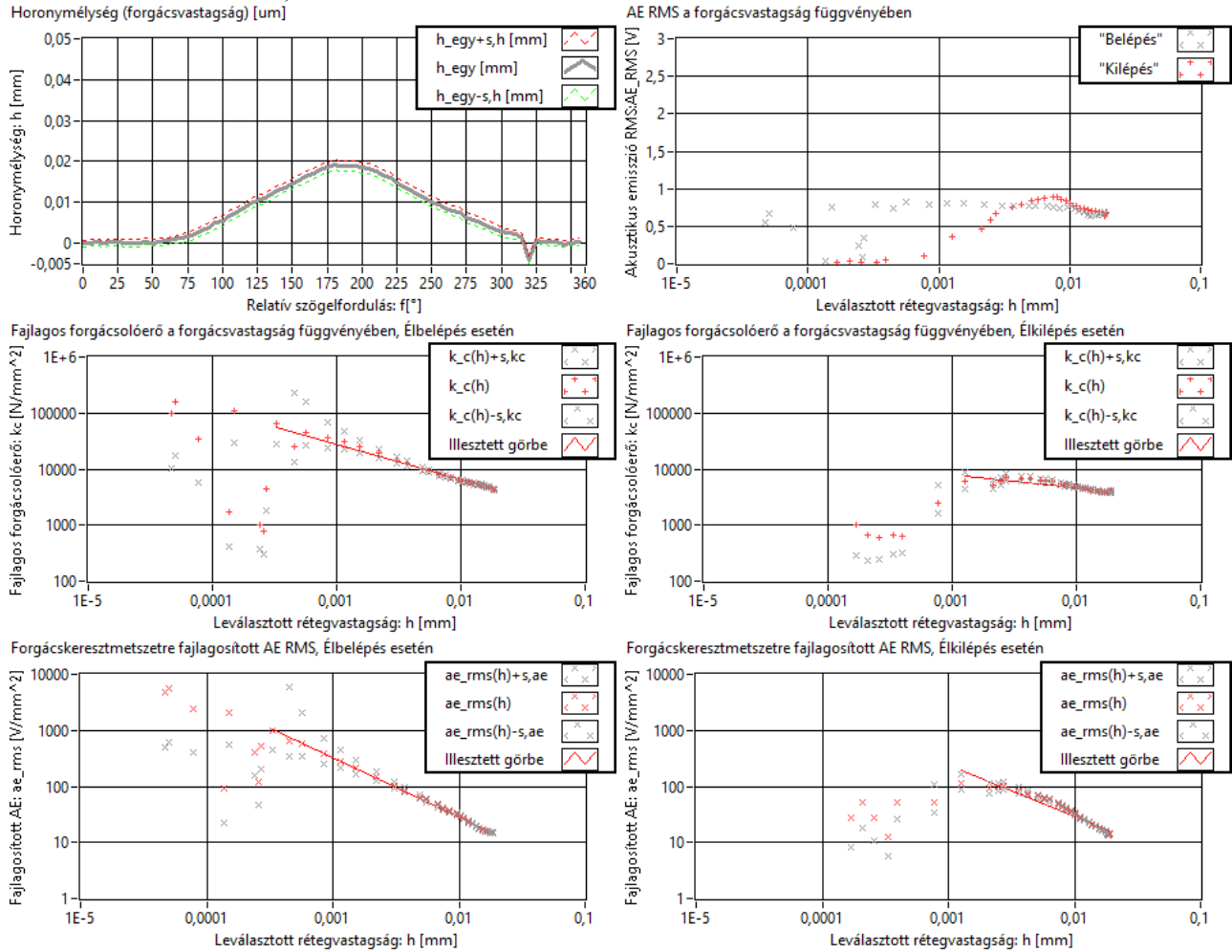


Hiba! Nincs ilyen stílusú szöveg a dokumentumban.-3. ábra. Kiértékelő szoftver: "Jegyzőkönyv"

9.2. Kiértékelés eredményei

1.sz. mérés

$v_{c,mért}=118$ [m/min]; $f=0,061$ [mm/1] ; $b=2,486$ [mm]

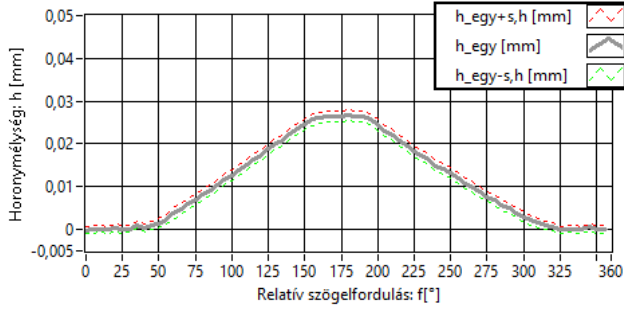


Megjegyzés: hibás profil mérés: relatív 320° (abszolút 160°) szögpozícióban.

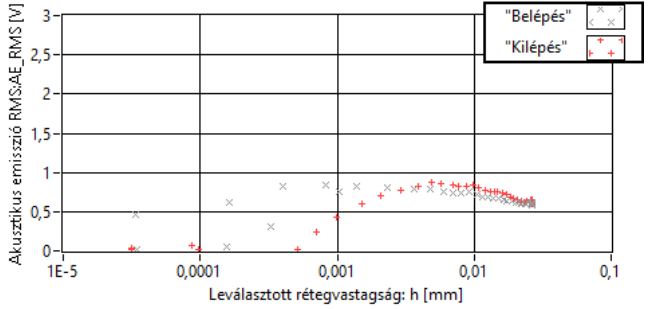
2.sz. mérés

$$v_{c,m\acute{e}rt}=116 \text{ [m/min]}; f=0,081 \text{ [mm/1]}; b=2,486 \text{ [mm]}$$

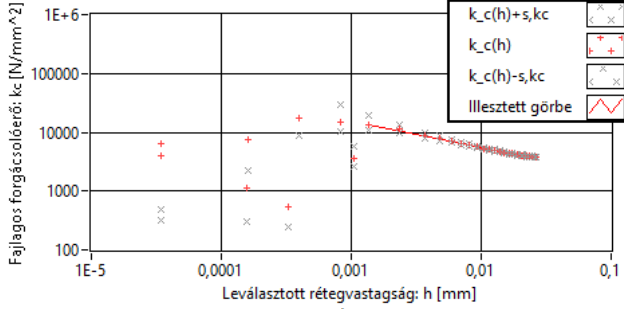
Horonymélység (forgácsvastagság) [μm]



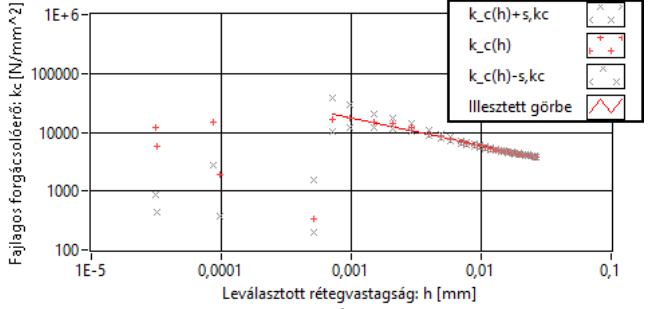
AE RMS a forgácsvastagság függvényében



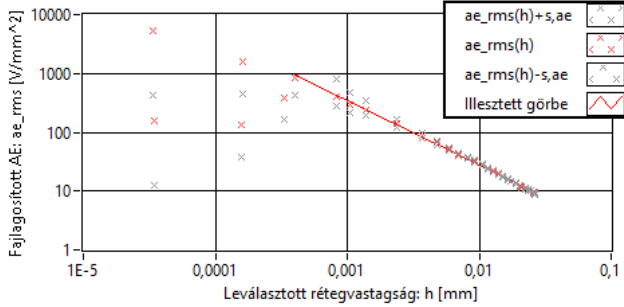
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élbélés esetén



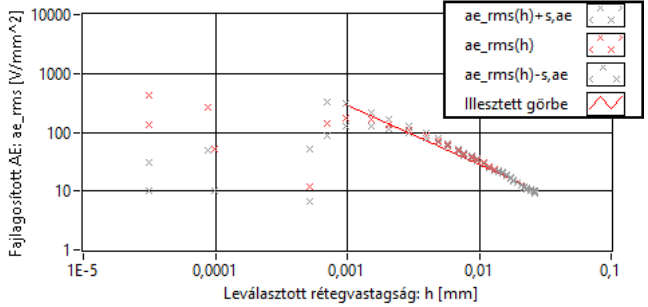
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élkilépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élbélés esetén



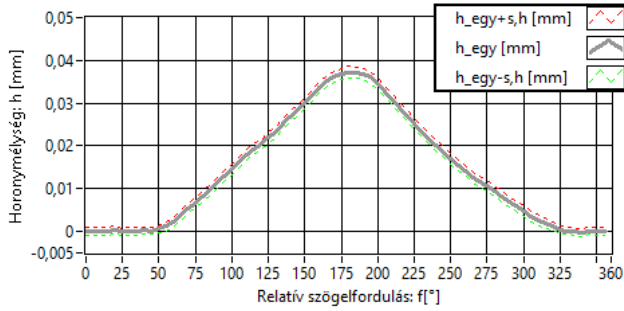
Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élkilépés esetén



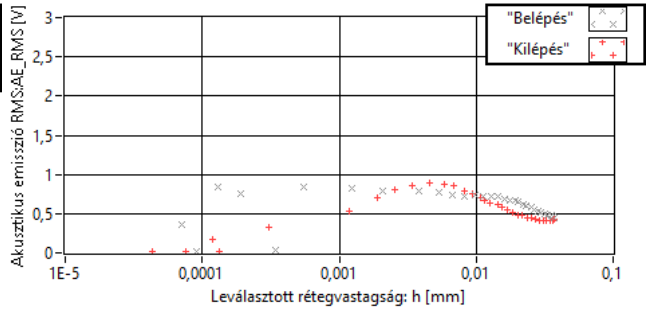
3.sz. mérés

$v_{c,m\acute{e}rt}=109$ [m/min]; $f=0,106$ [mm/1] ; $b=2,49$ [mm]

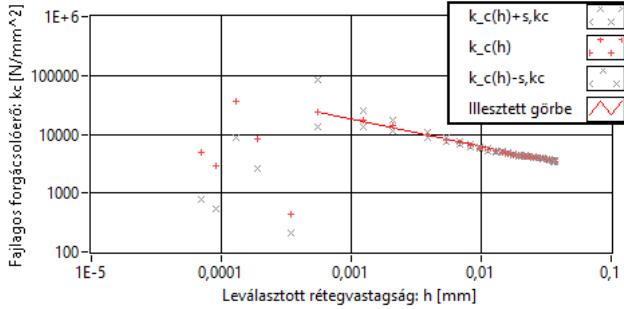
Horonymélység (forgácsvastagság) [μm]



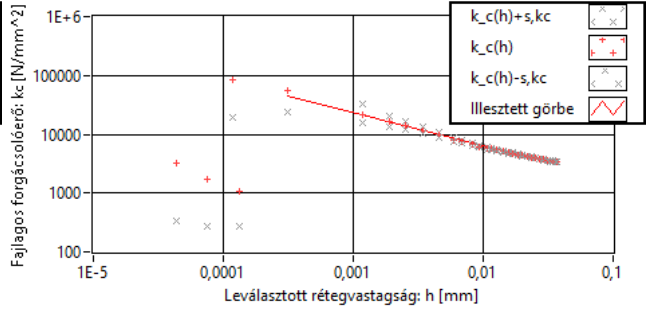
AE RMS a forgácsvastagság függvényében



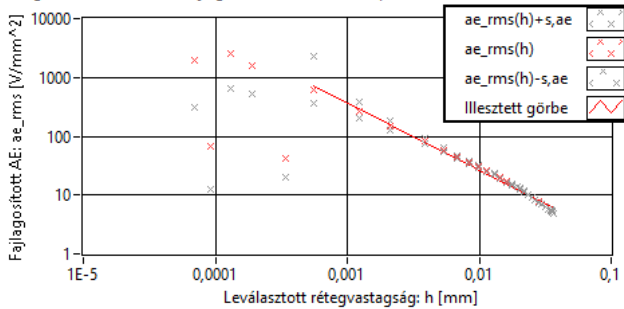
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élbélés esetén



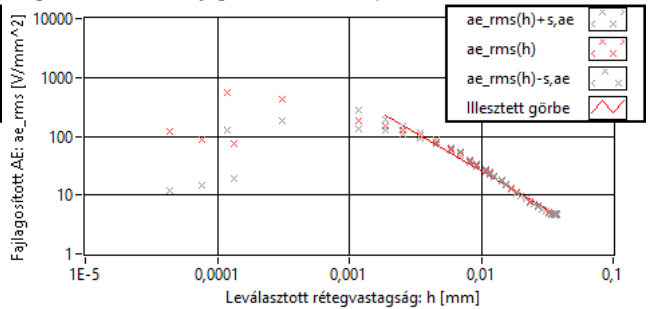
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élkilépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élbélés esetén



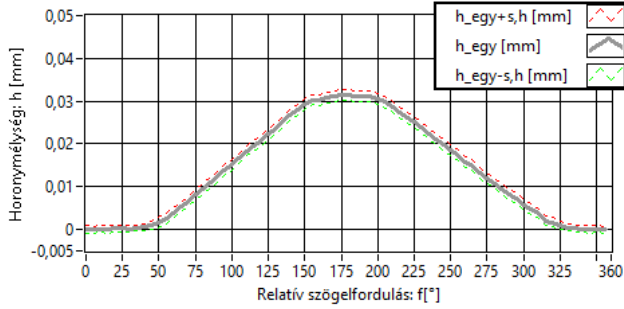
Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élkilépés esetén



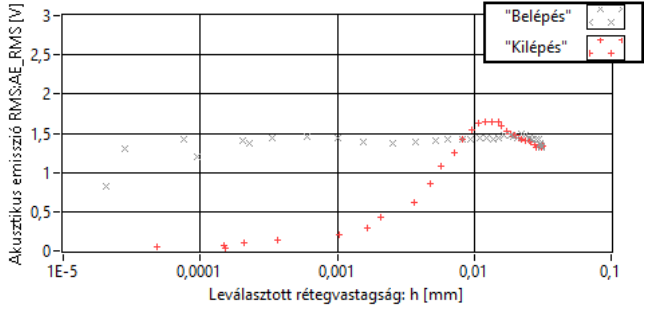
4.sz. mérés

$$v_{c,mért}=197 \text{ [m/min]}; f=0,092 \text{ [mm/1]}; b=2,483 \text{ [mm]}$$

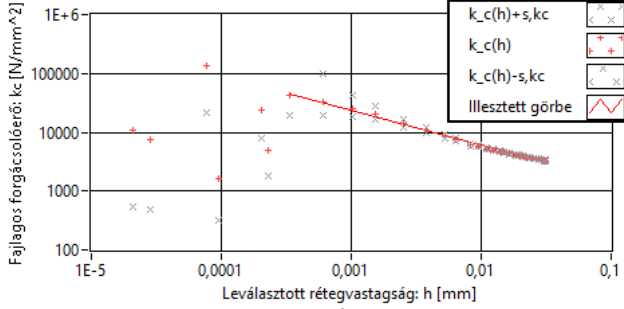
Horonymélység (forgácsvastagság) [μm]



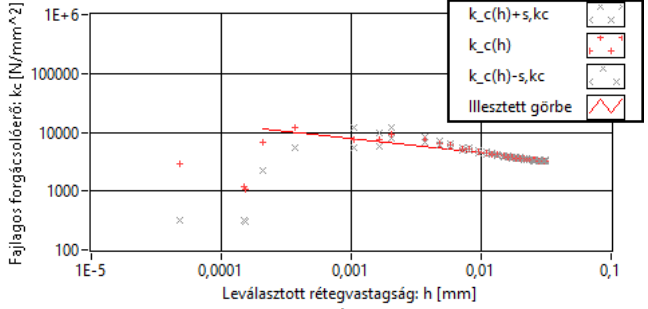
AE RMS a forgácsvastagság függvényében



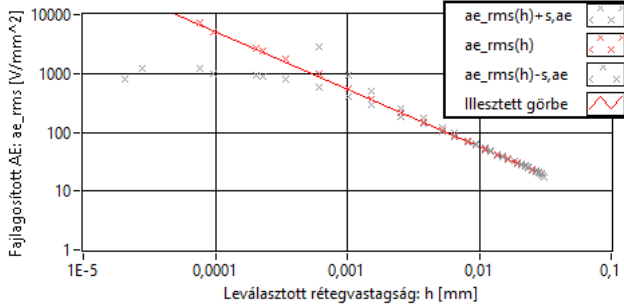
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élbélés esetén



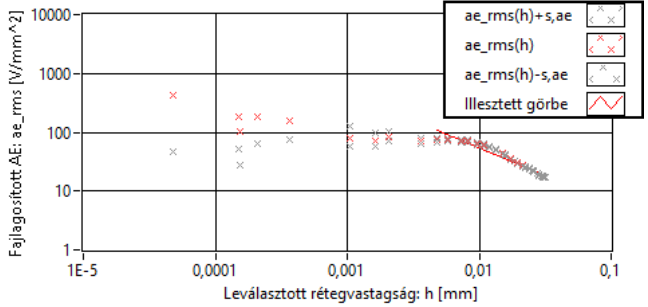
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élkilépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élbélés esetén

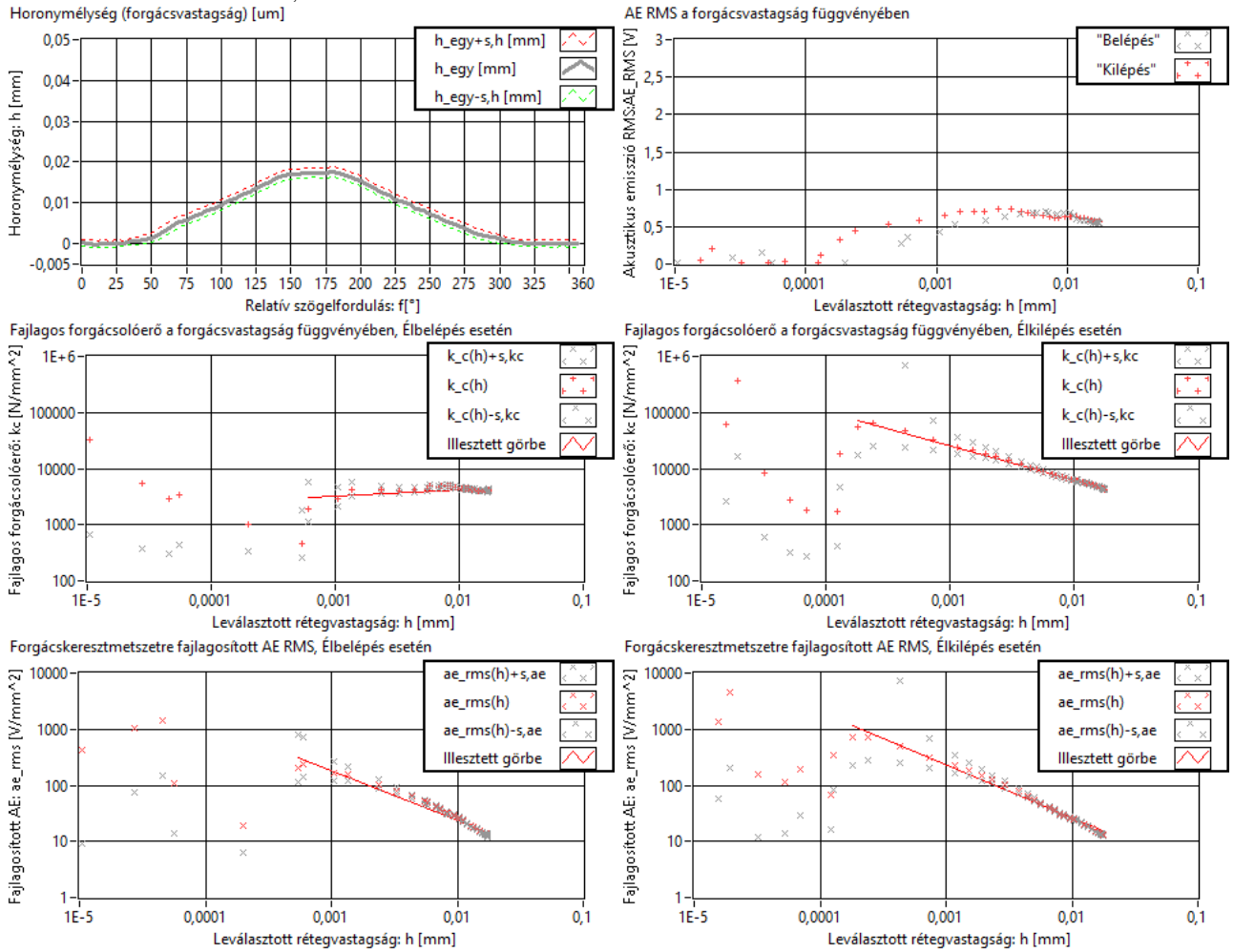


Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élkilépés esetén



5.sz. mérés

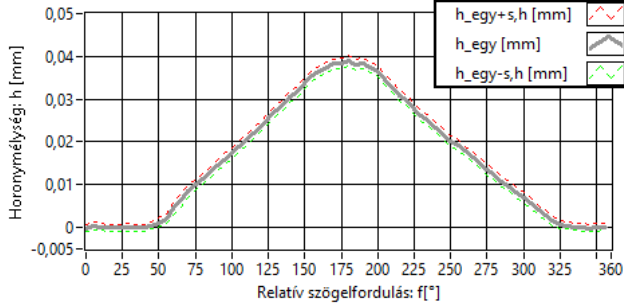
$v_{c,m\acute{e}rt}=99$ [m/min]; $f=0,053$ [mm/1] ; $b=2,483$ [mm]



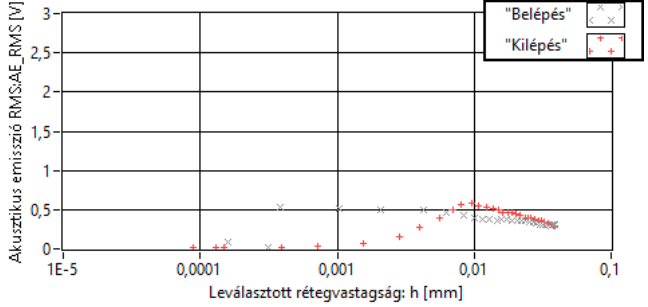
6.sz. mérés

$v_{c,mért}=80$ [m/min]; $f=0,106$ [mm/1] ; $b=2,483$ [mm]

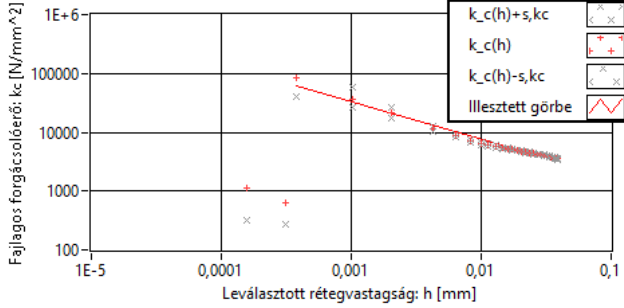
Horonymélység (forgácsvastagság) [um]



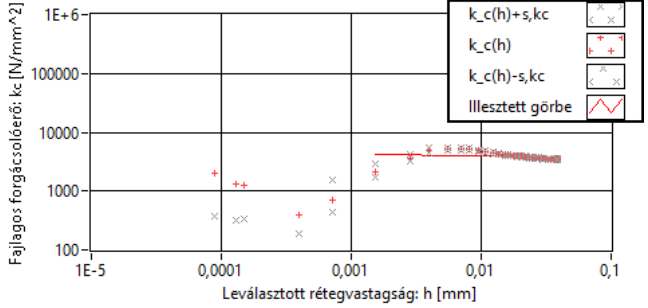
AE RMS a forgácsvastagság függvényében



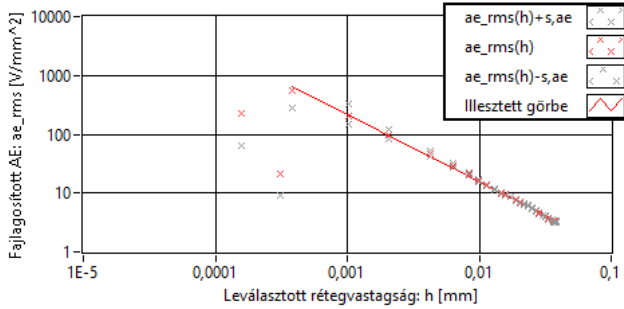
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élbélés esetén



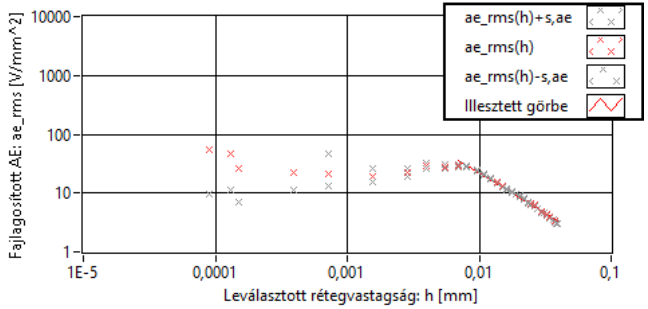
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élkilépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élbélés esetén



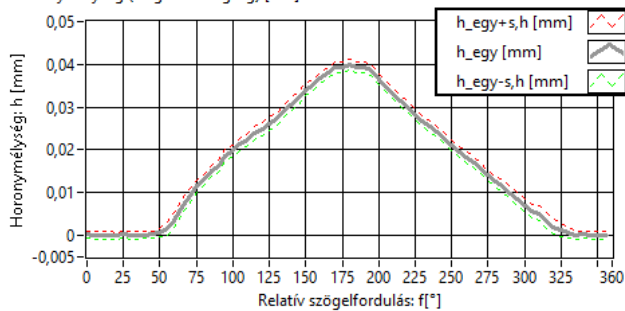
Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élkilépés esetén



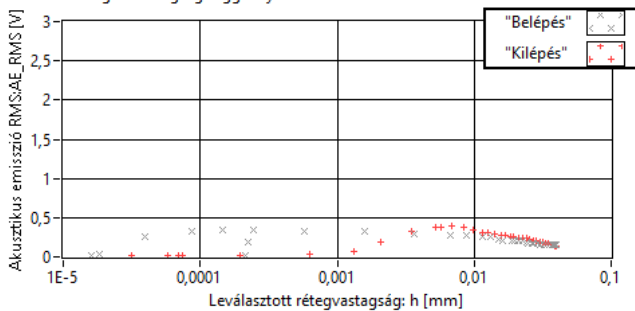
7.sz. mérés

$v_{c,mért}=58$ [m/min]; $f=0,106$ [mm/1] ; $b=2,483$ [mm]

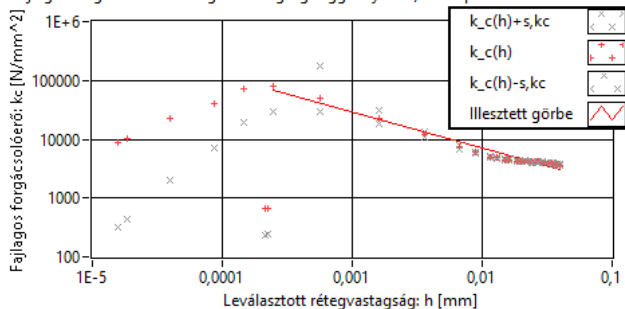
Horonymélység (forgácsvastagság) [μm]



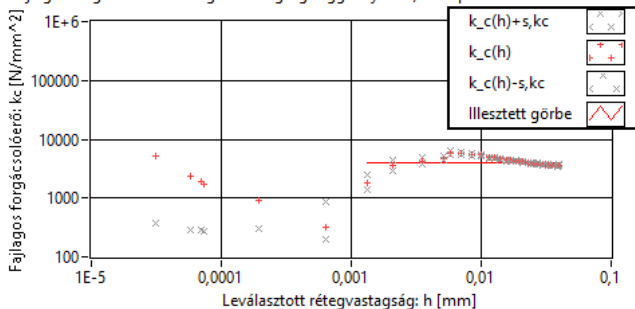
AE RMS a forgácsvastagság függvényében



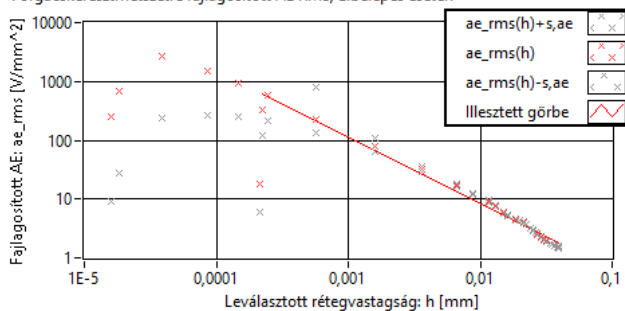
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élbélés esetén



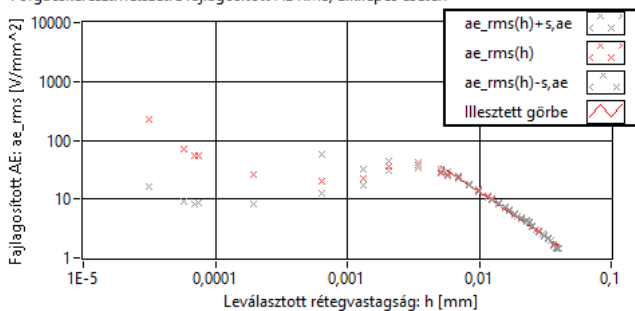
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élkilépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élbélés esetén



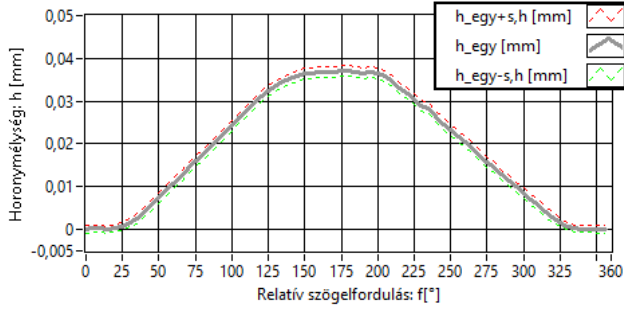
Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élkilépés esetén



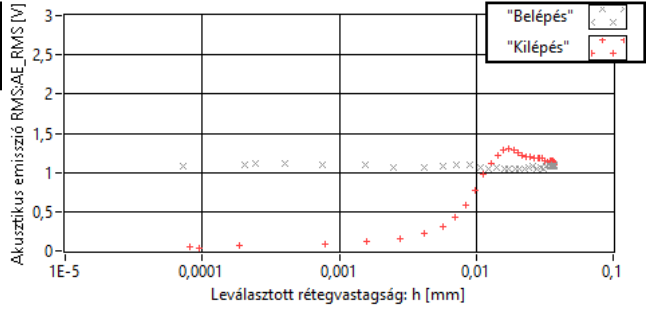
8.sz. mérés

$v_{c,mért}=165$ [m/min]; $f=0,106$ [mm/1] ; $b=2,483$ [mm]

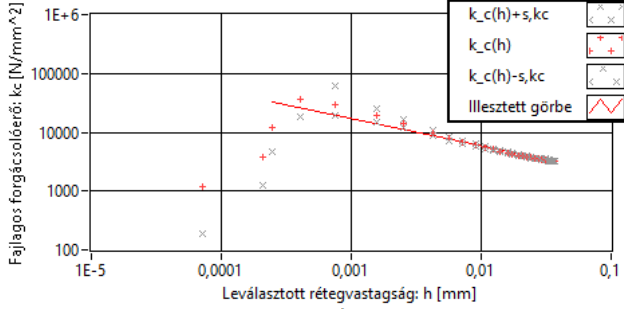
Horonymélység (forgácsvastagság) [μm]



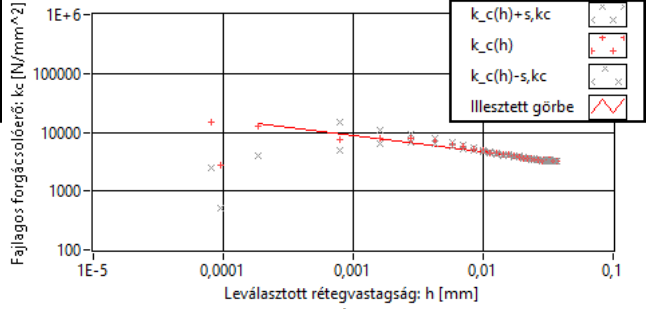
AE RMS a forgácsvastagság függvényében



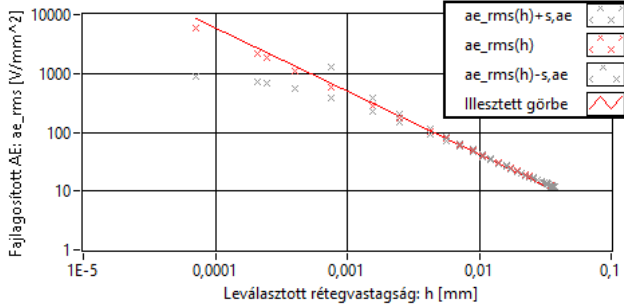
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élbélés esetén



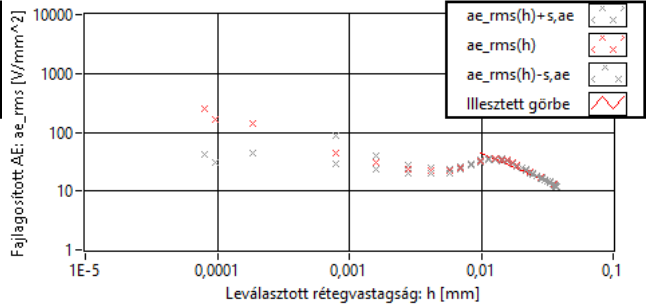
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élkilépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élbélés esetén



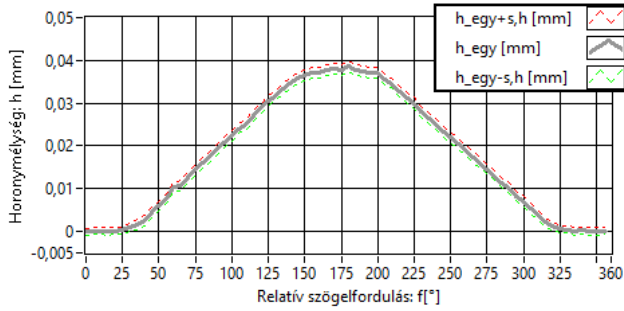
Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élkilépés esetén



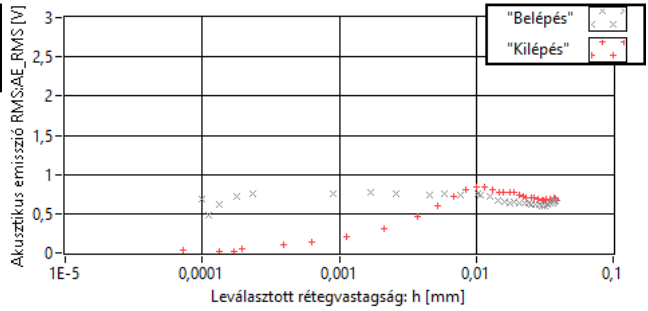
9.sz. mérés

$v_{c,mért} = 118 \text{ [m/min]}$; $f = 0,106 \text{ [mm/1]}$; $b = 2,481 \text{ [mm]}$

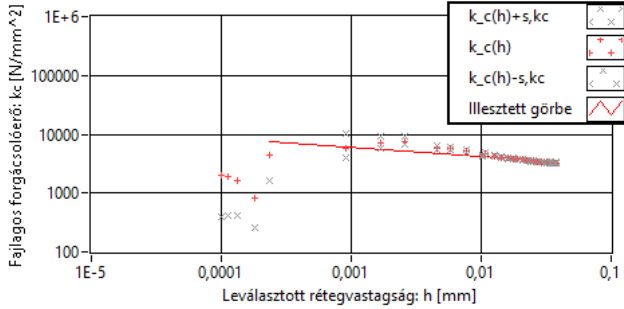
Horonymélység (forgácsvastagság) [μm]



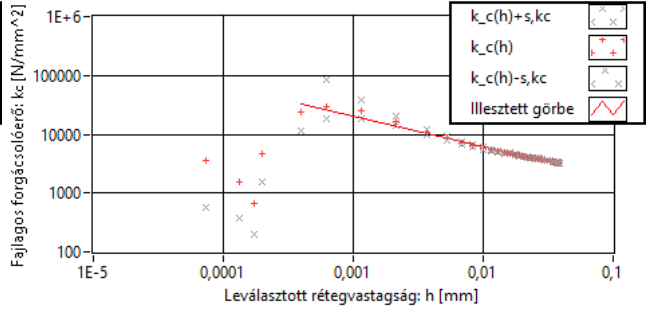
AE RMS a forgácsvastagság függvényében



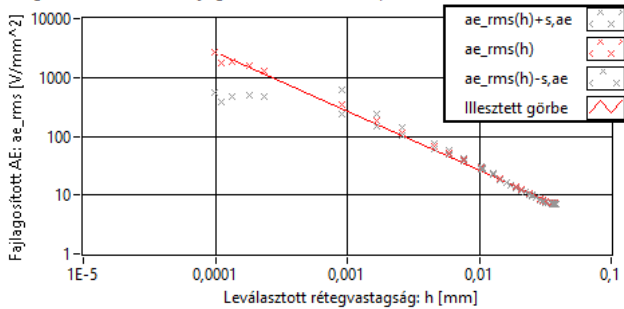
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élbélés esetén



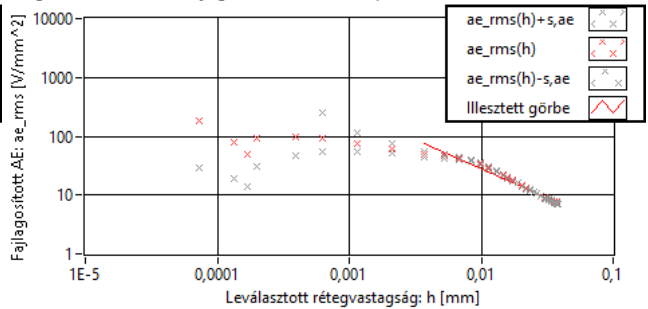
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élkilépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élbélés esetén



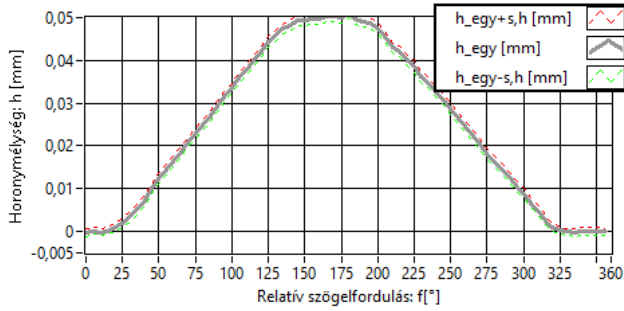
Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élkilépés esetén



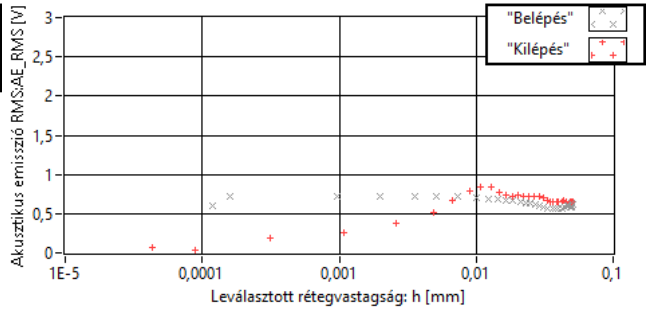
10.sz. mérés

$V_{c,m\acute{e}rt}=118$ [m/min]; $f=0,139$ [mm/1]; $b=2,481$ [mm]

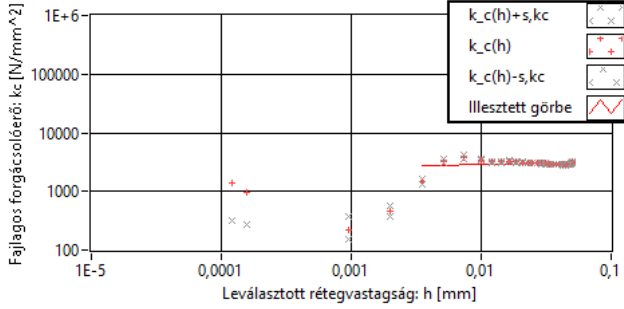
Horonymélység (forgácsvastagság) [μm]



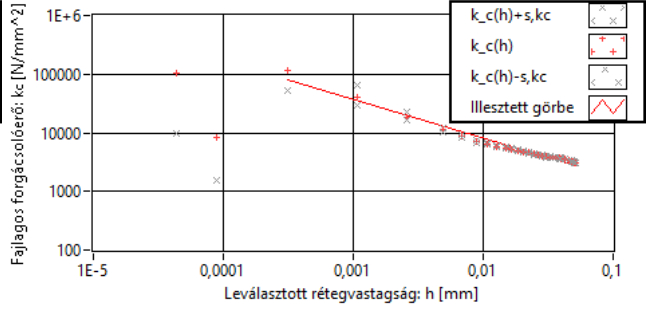
AE RMS a forgácsvastagság függvényében



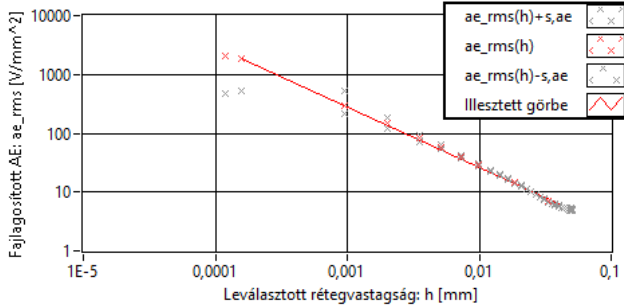
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élbélépés esetén



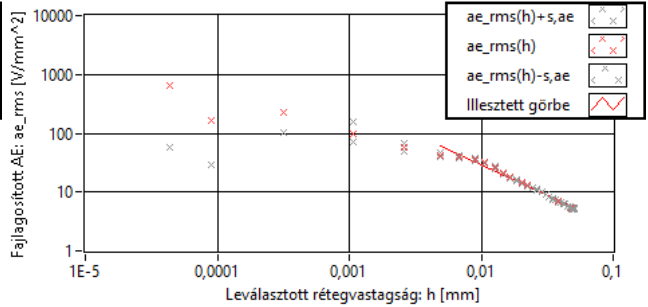
Fajlagos forgácsolóerő a forgácsvastagság függvényében, Élkilépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élbélépés esetén



Forgácskeresztmetszetre fajlagosított AE RMS, Élkilépés esetén

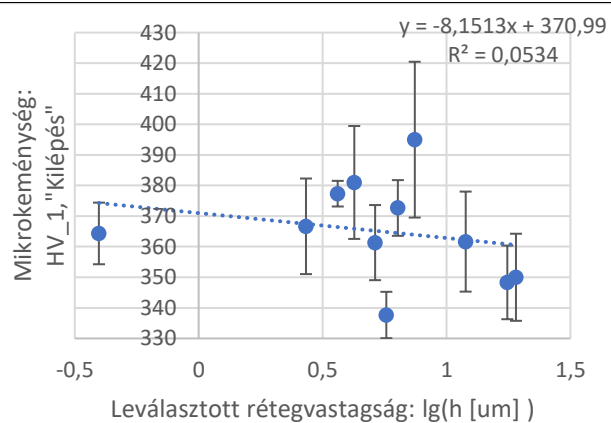
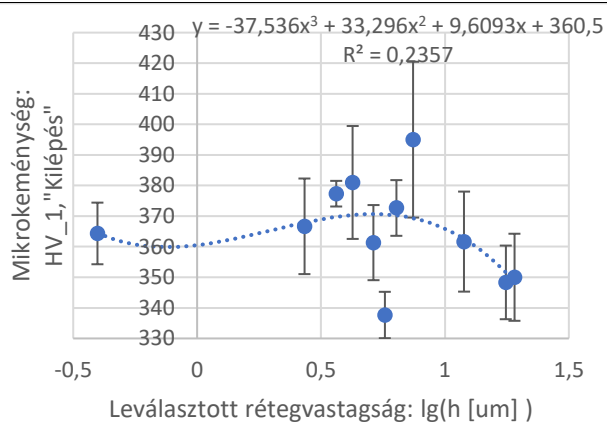
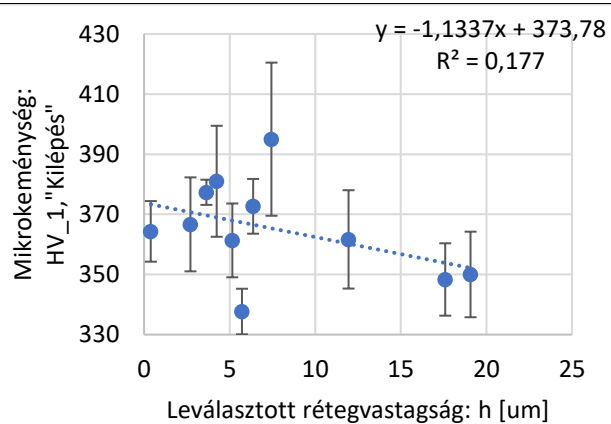
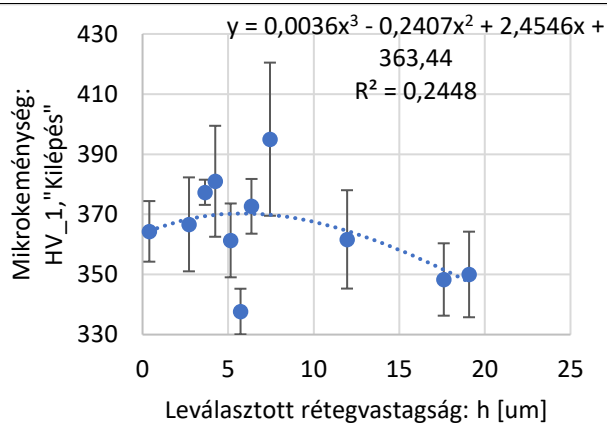
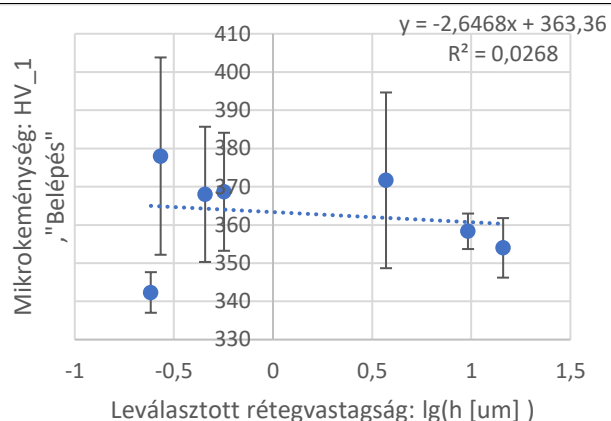
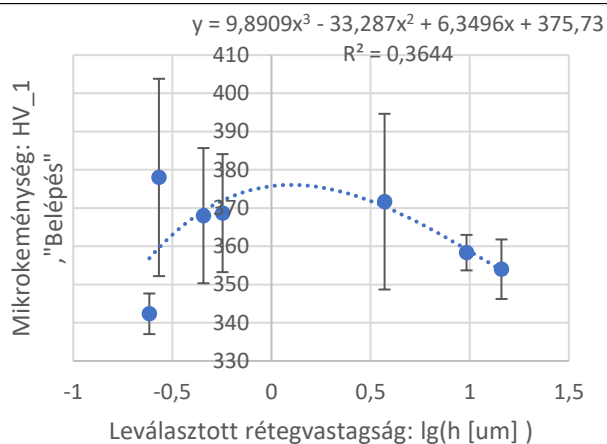
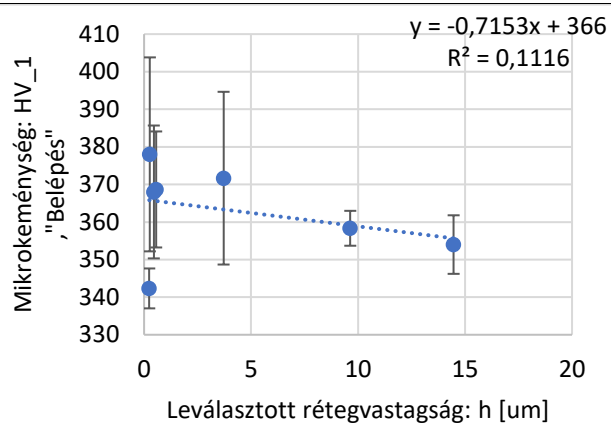
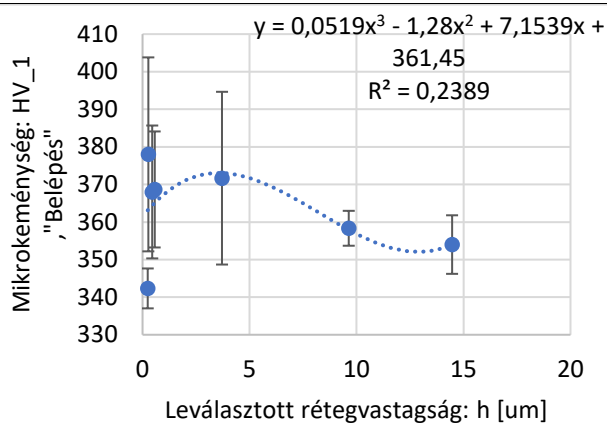


9.3. Mikro-keményység mérések kiértékelése

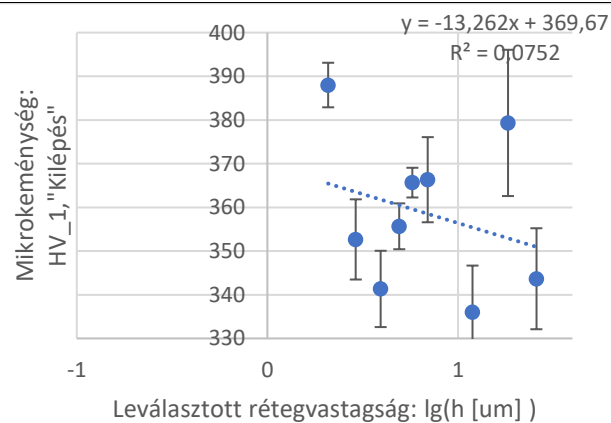
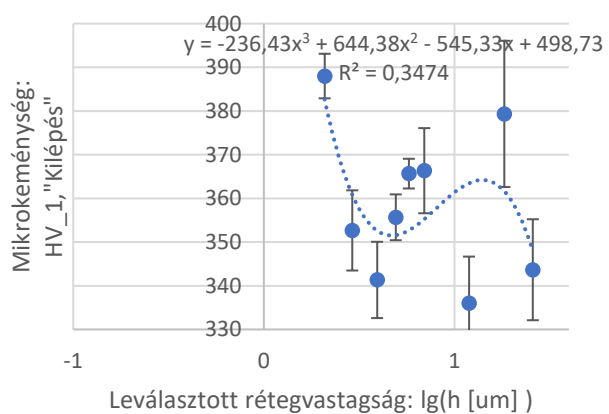
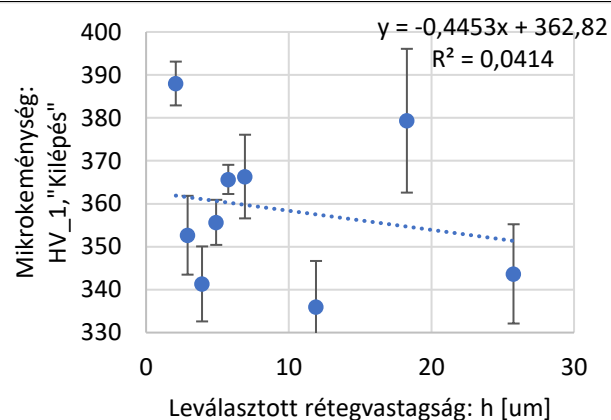
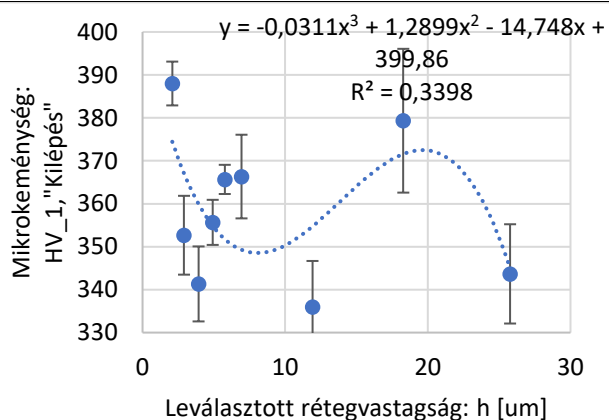
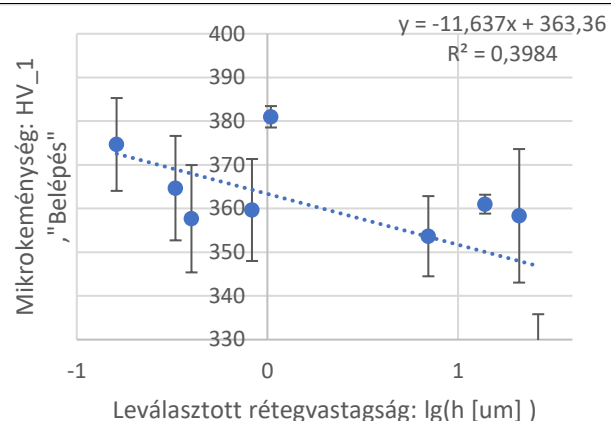
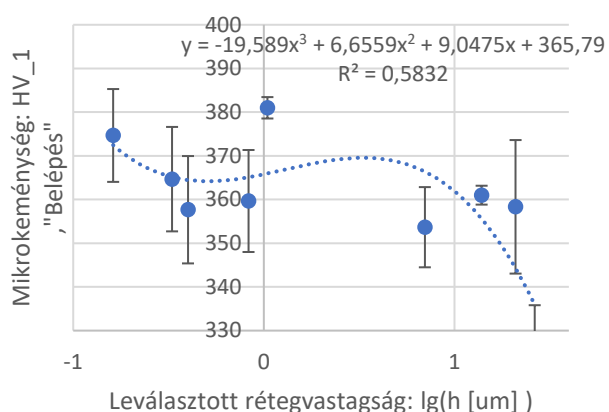
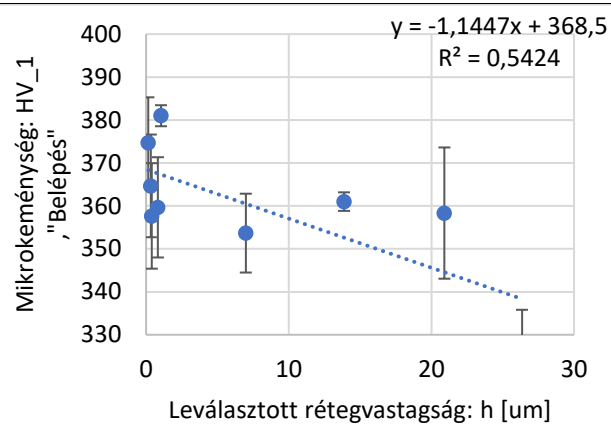
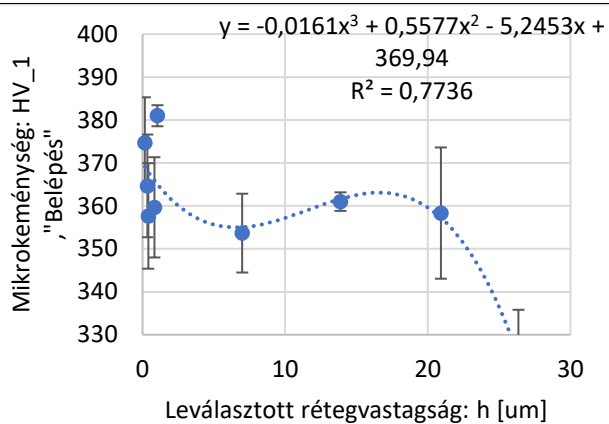
Az egyes hornyokra vonatkozó mikro-keménység diagrammok a következő táblázat szerint értelmezendők:

		Harmadfokú polinom illesztése	Egyenes illesztése
Belép	Forgácsvastagság lineáris skálán	Diagramm 1	Diagramm 5
	Forgácsvastagság logaritmikus skálán	Diagramm 2	Diagramm 6
Kilép	Forgácsvastagság lineáris skálán	Diagramm 3	Diagramm 7
	Forgácsvastagság logaritmikus skálán	Diagramm 4	Diagramm 8

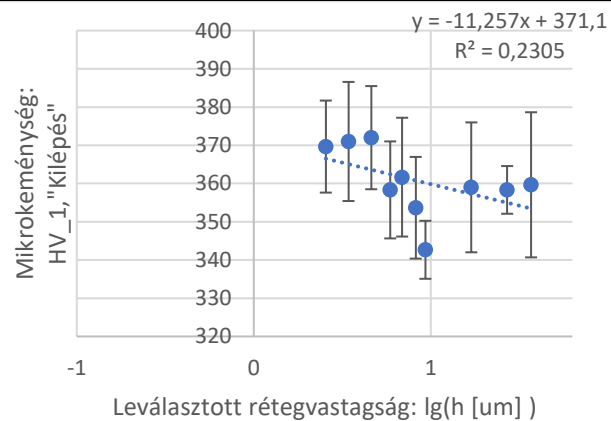
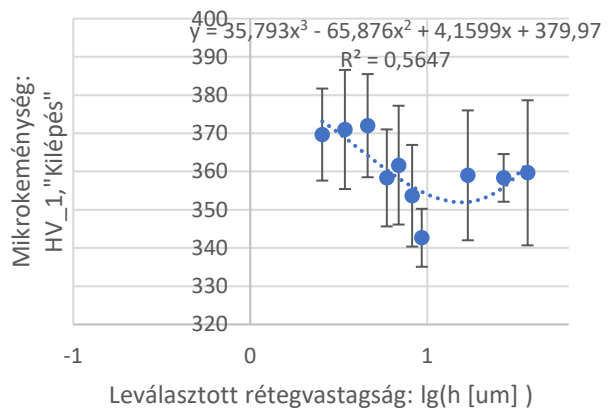
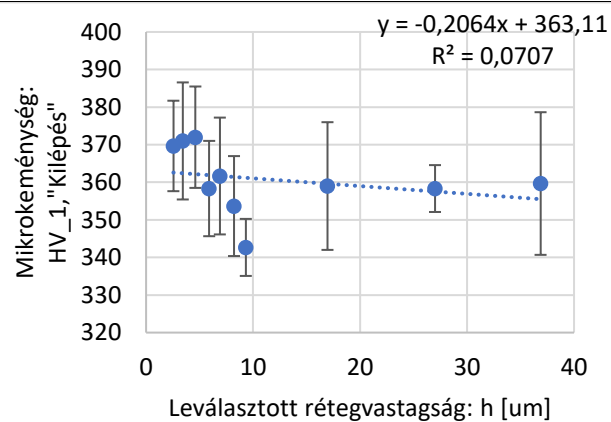
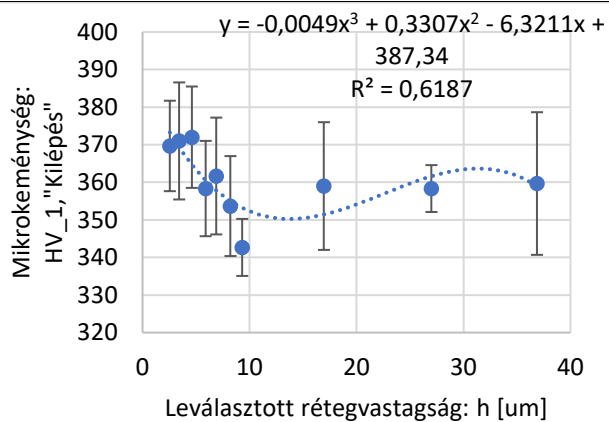
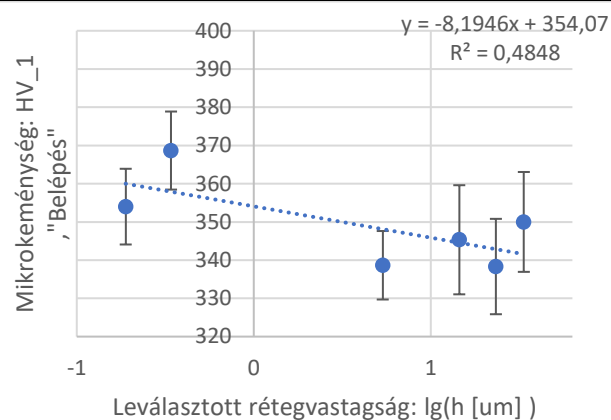
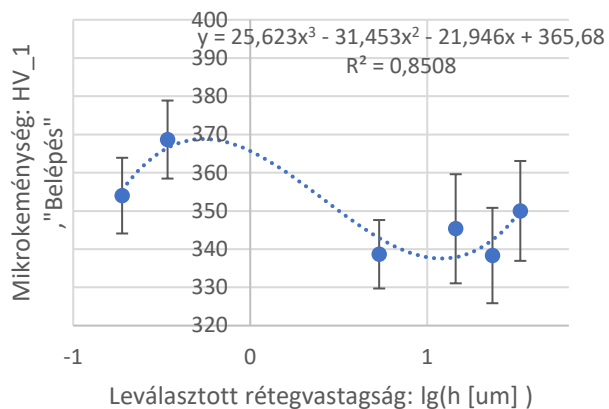
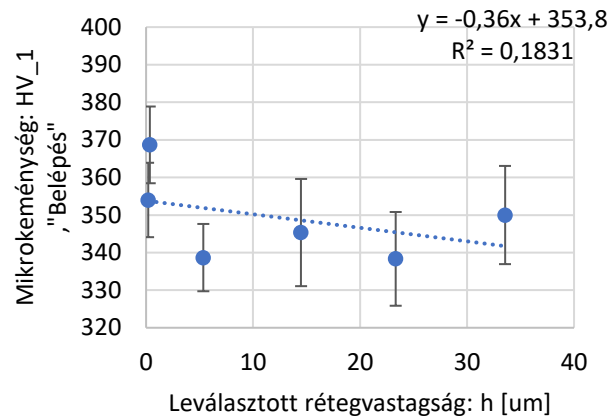
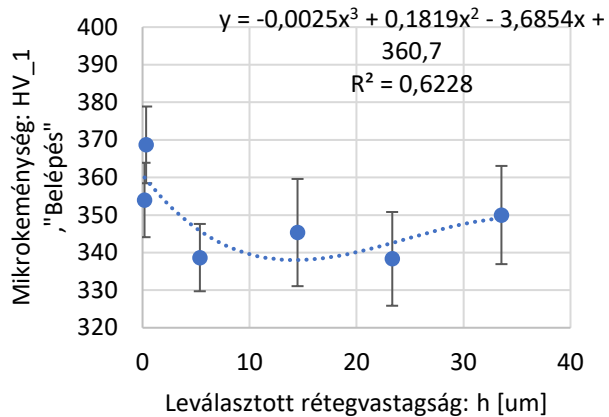
1.számú horony



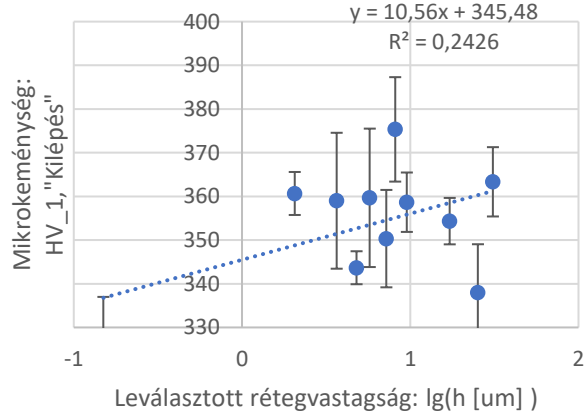
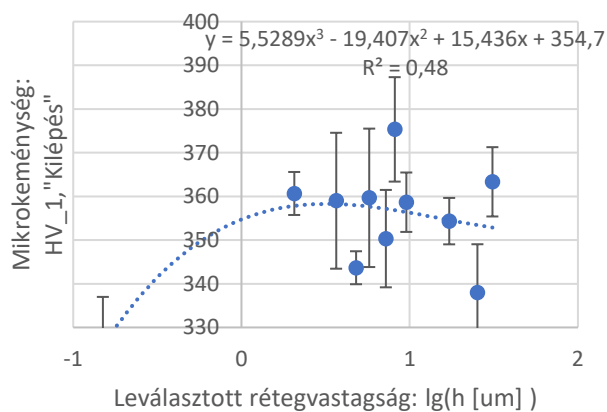
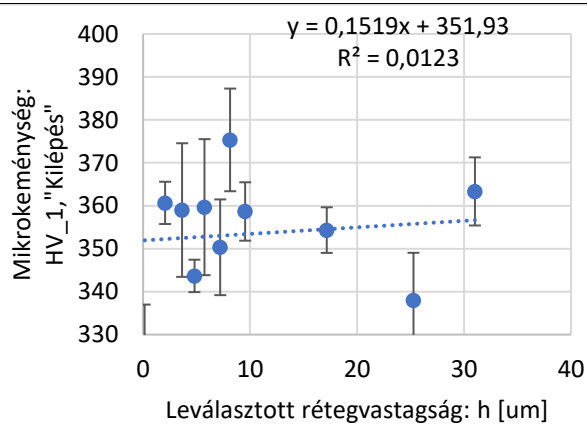
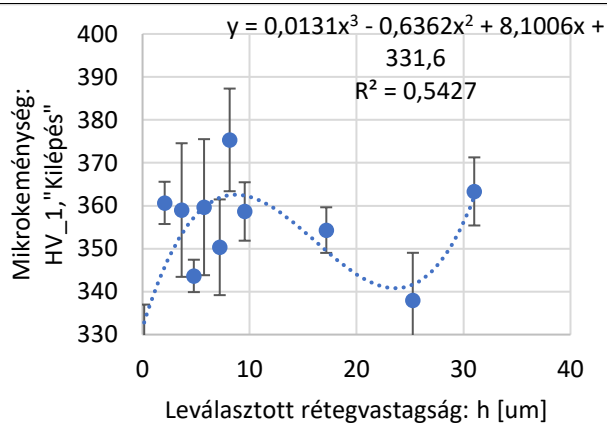
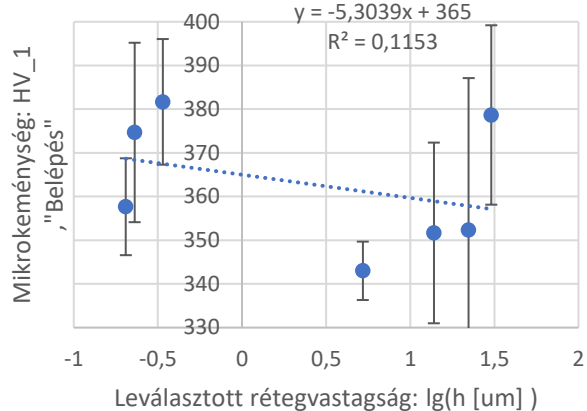
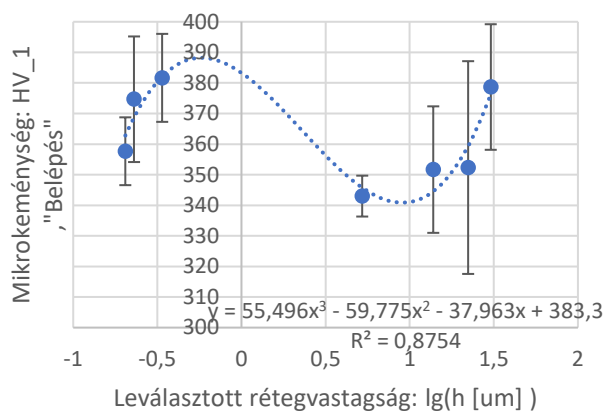
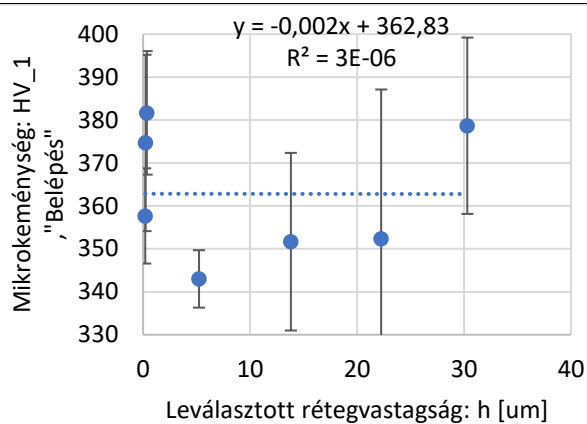
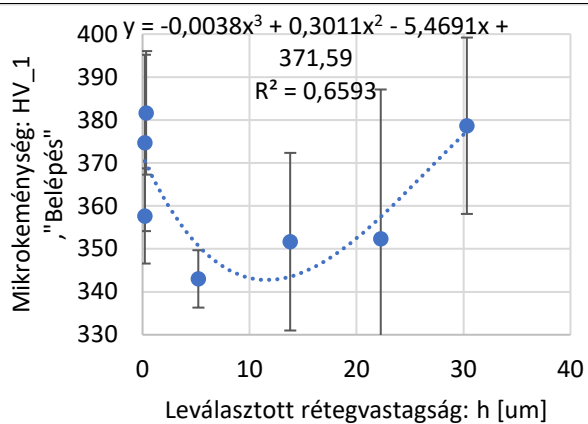
2.számú horony



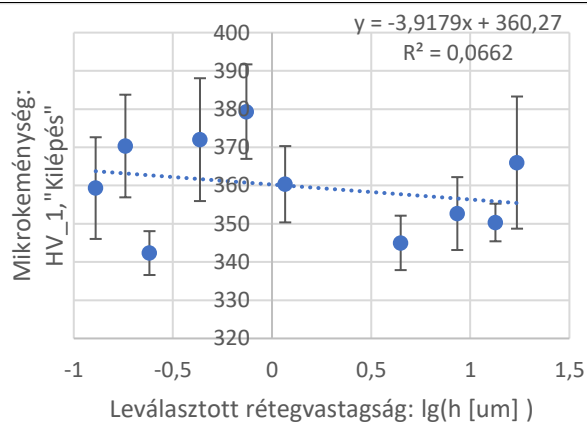
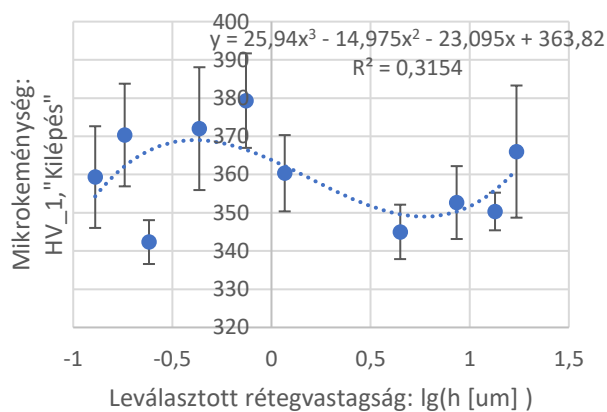
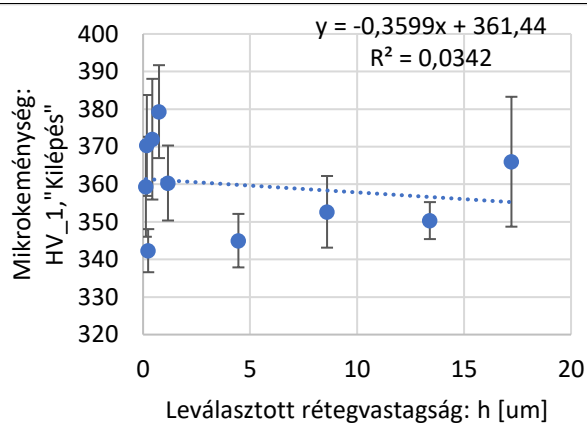
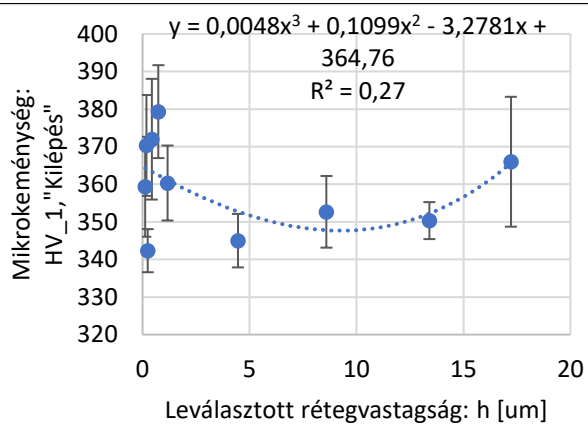
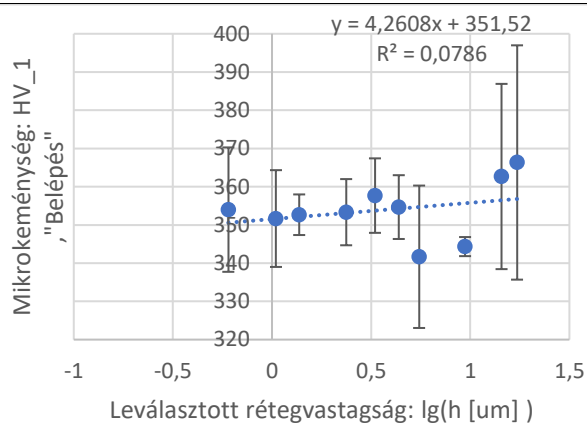
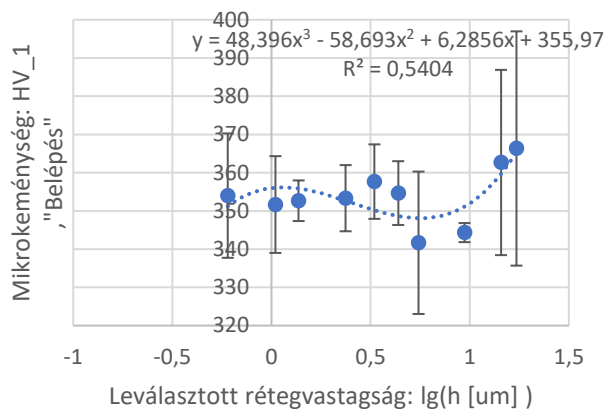
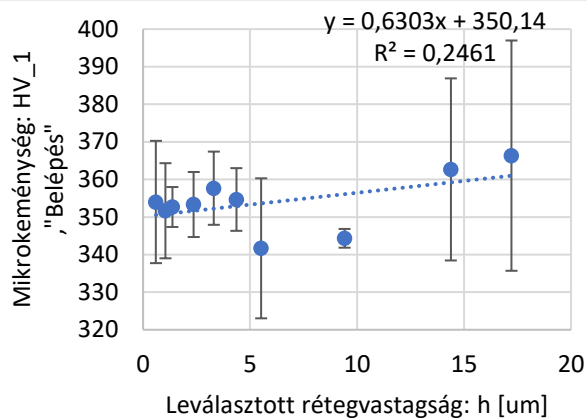
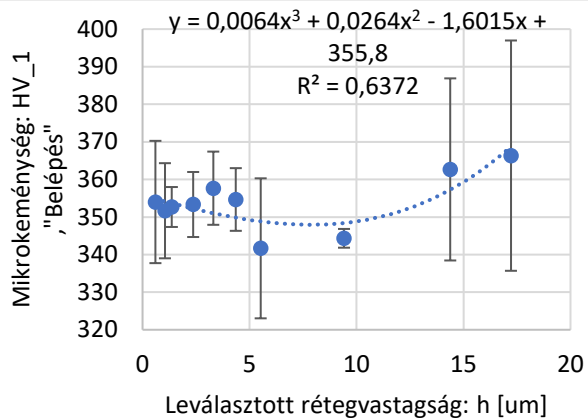
3.számú horony



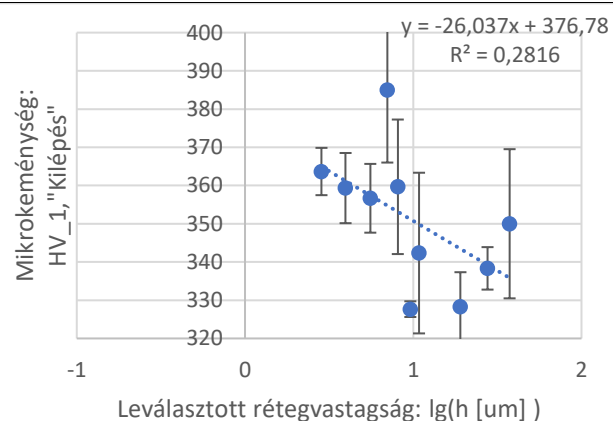
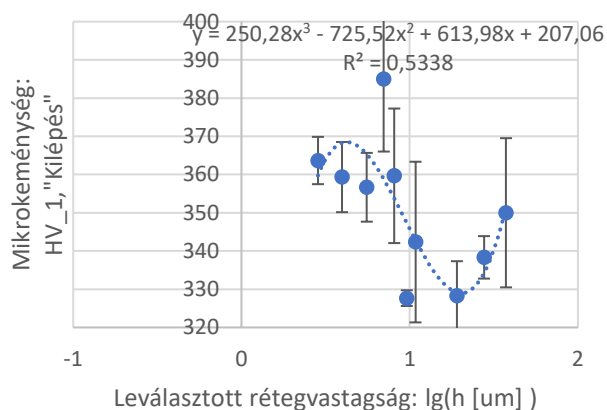
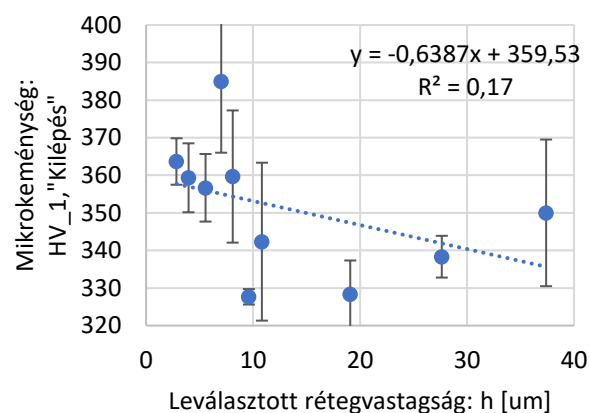
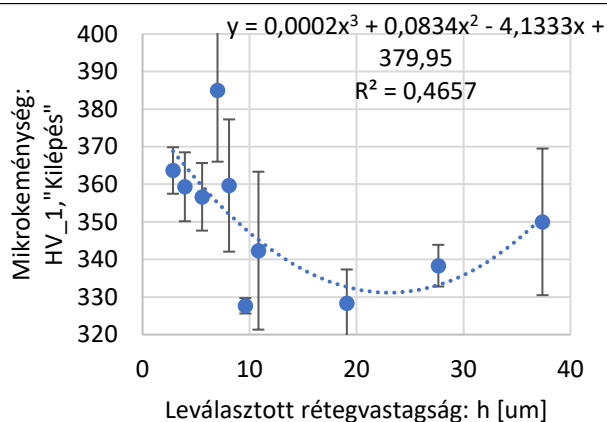
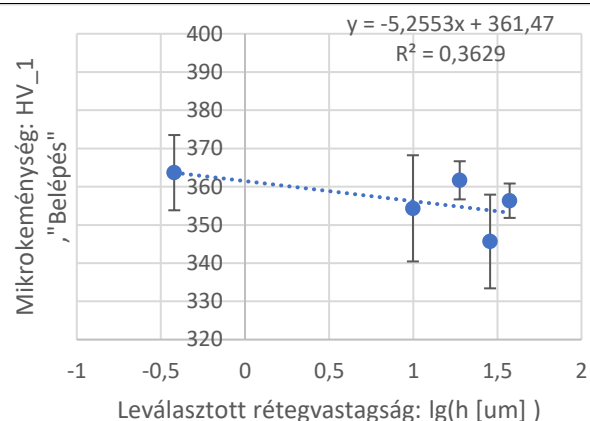
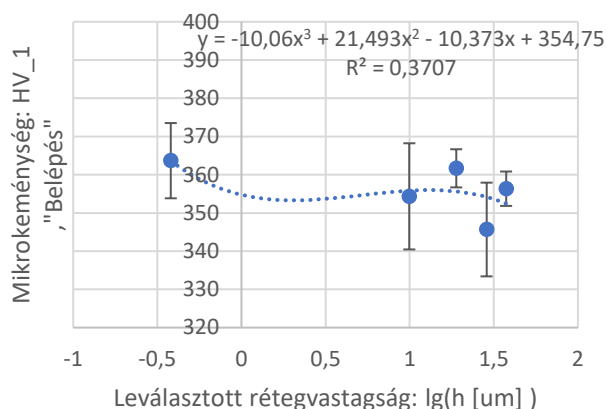
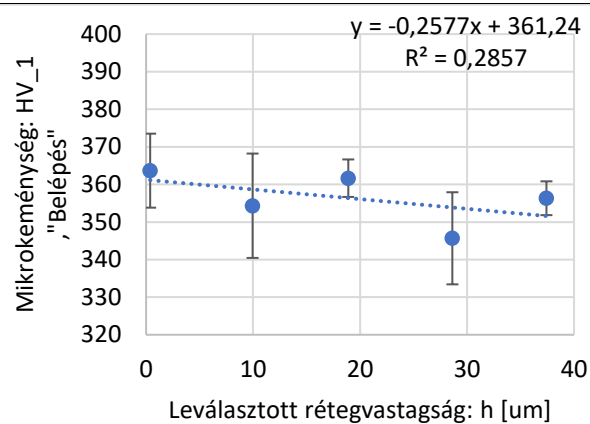
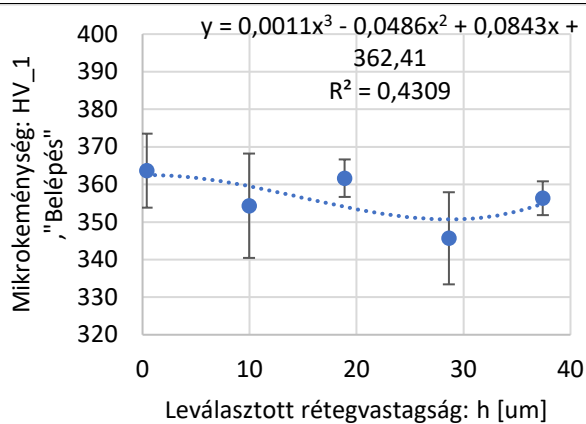
4.számú horony



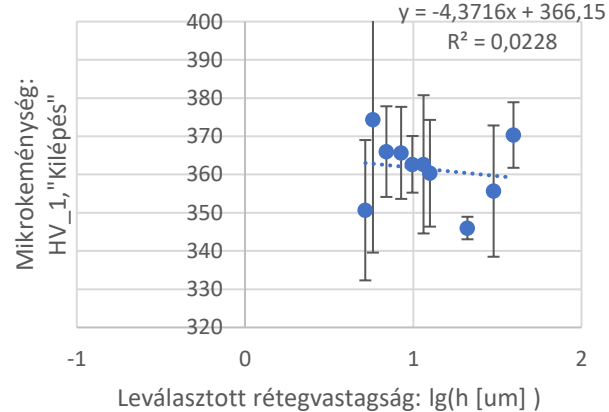
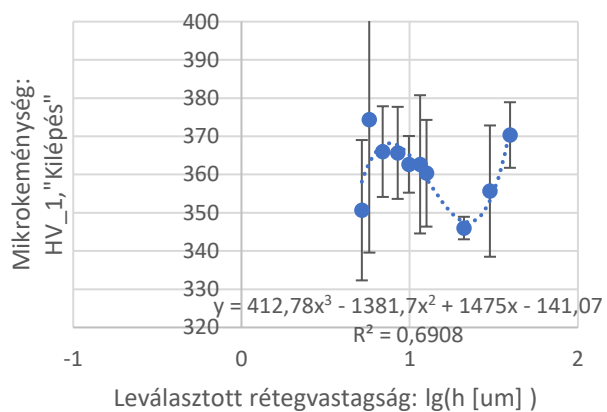
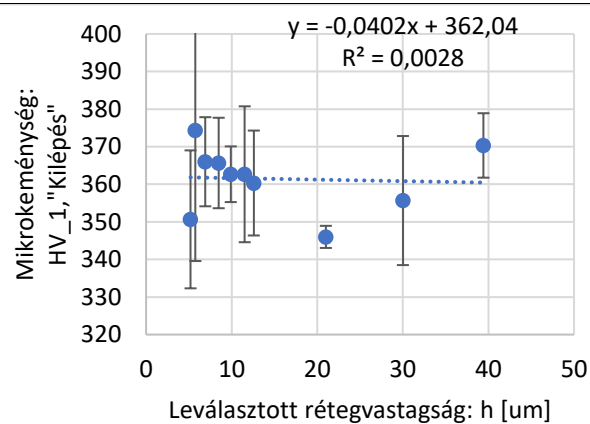
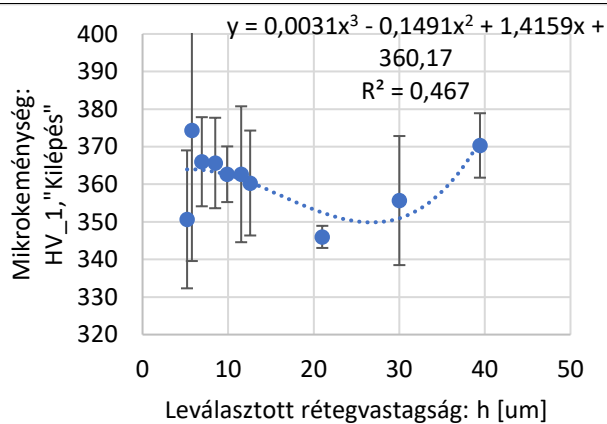
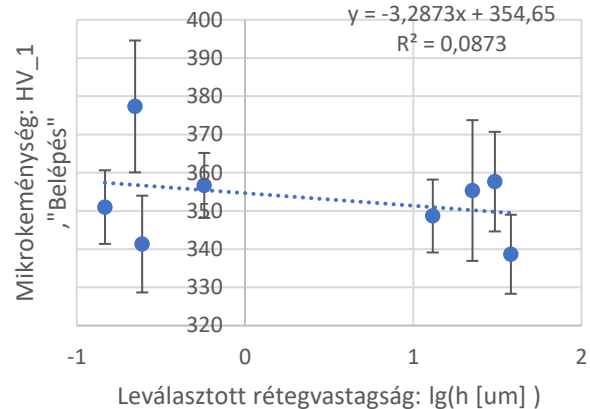
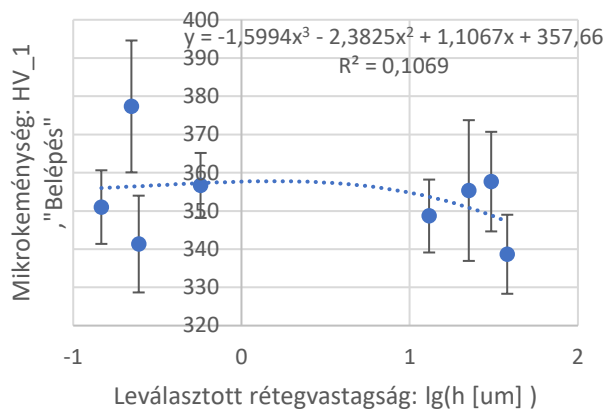
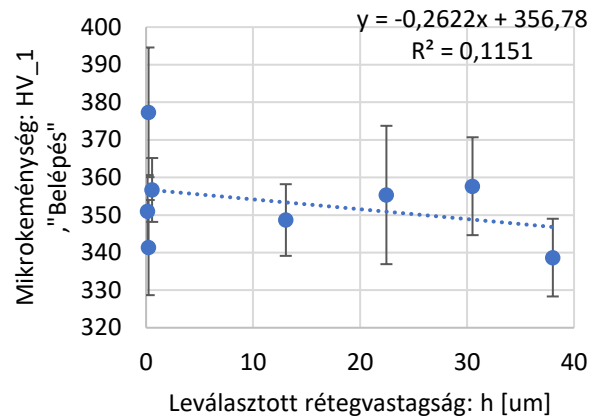
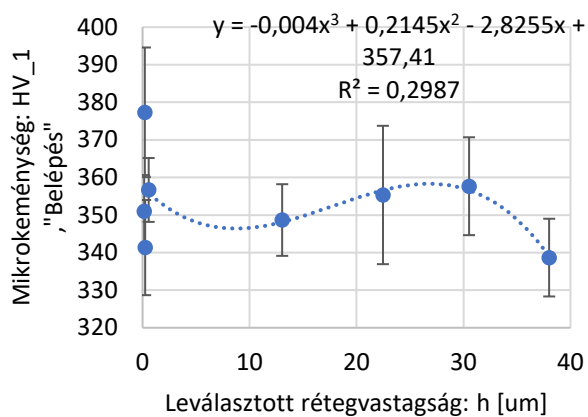
5.számú horony



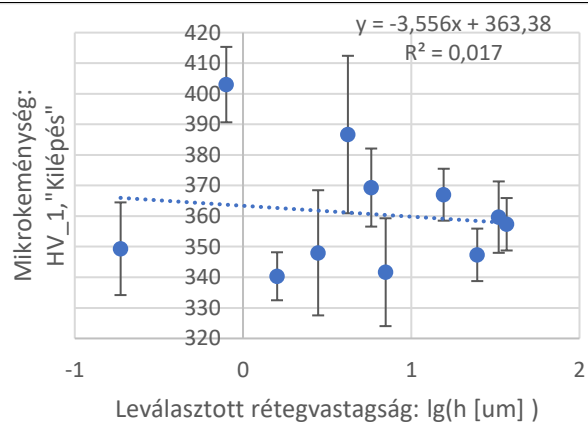
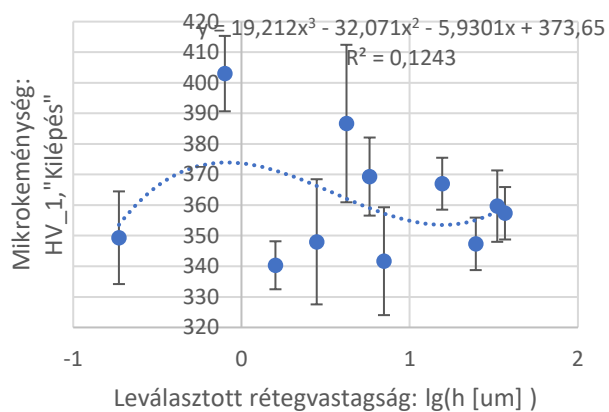
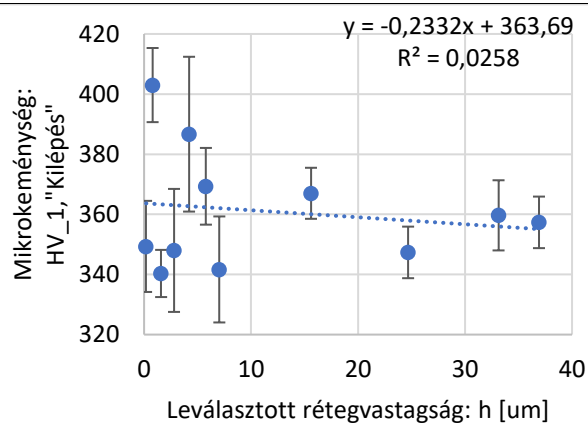
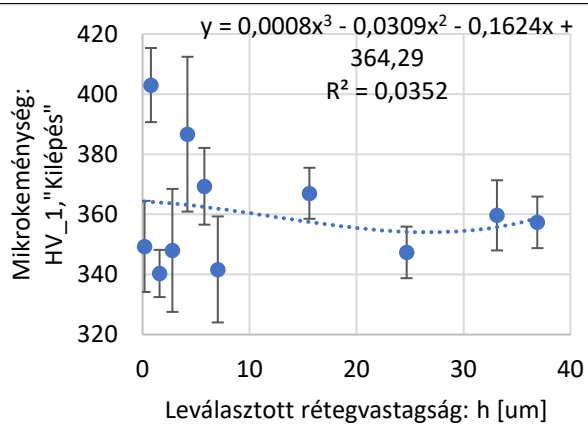
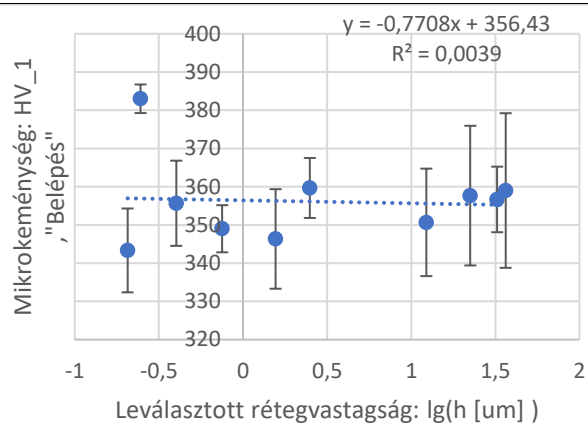
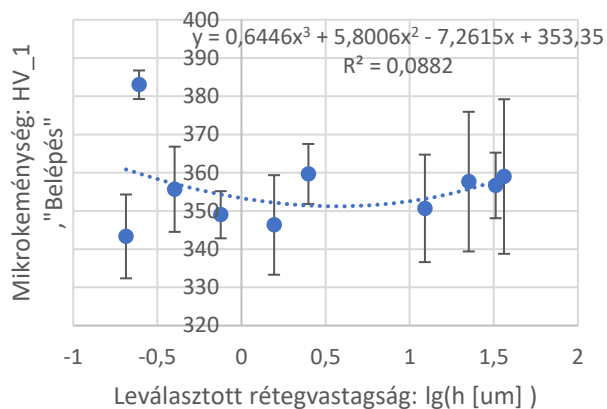
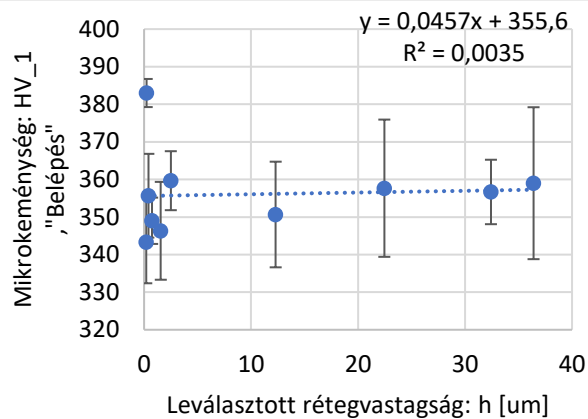
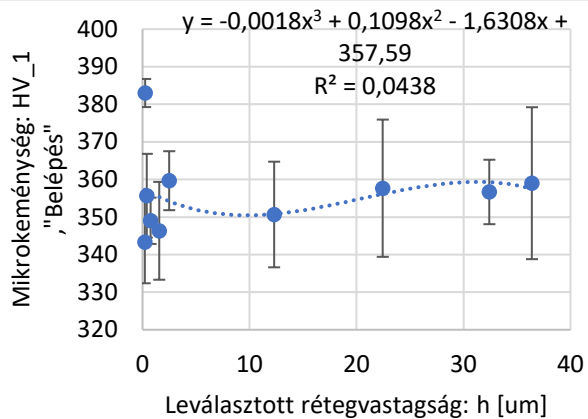
6.számú horony



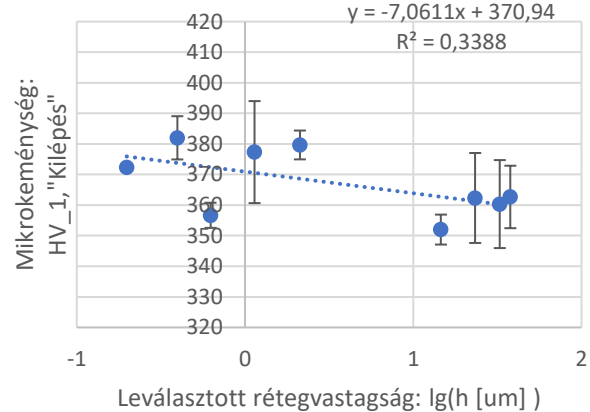
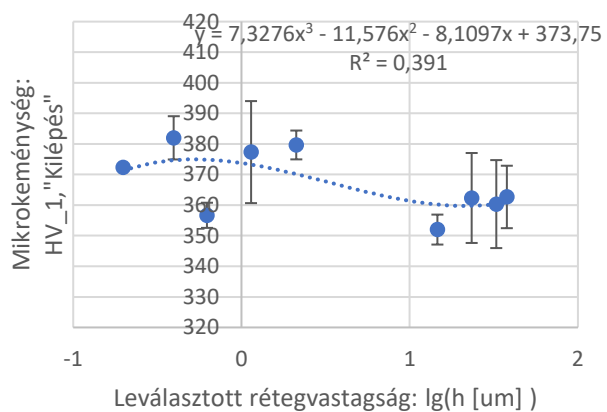
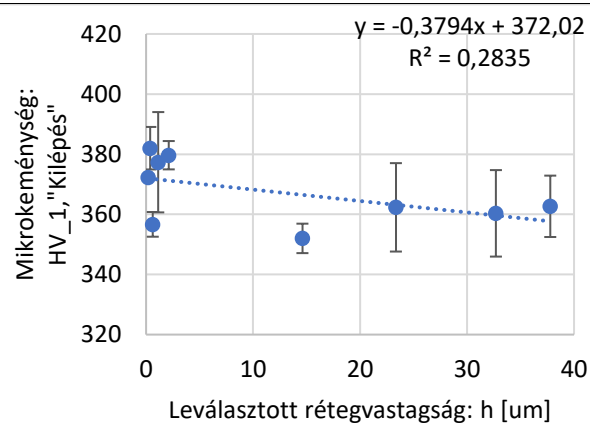
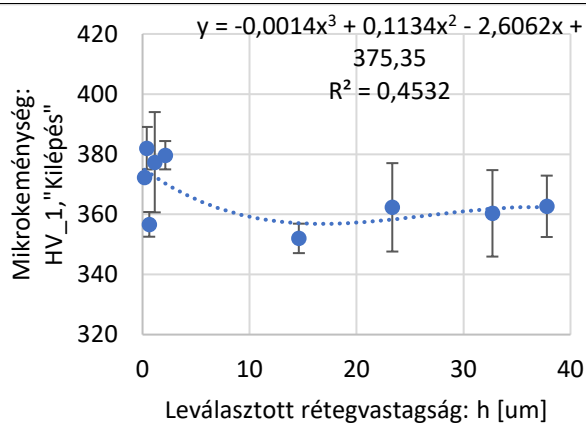
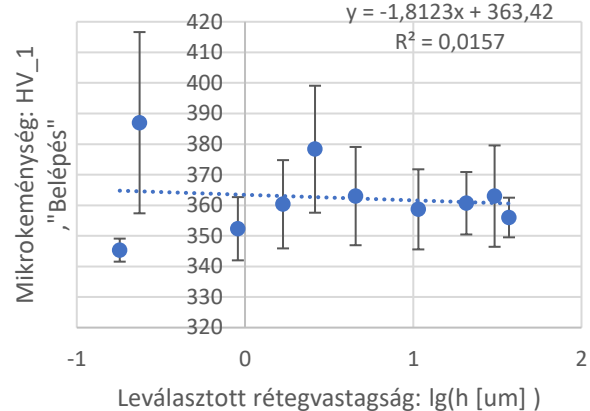
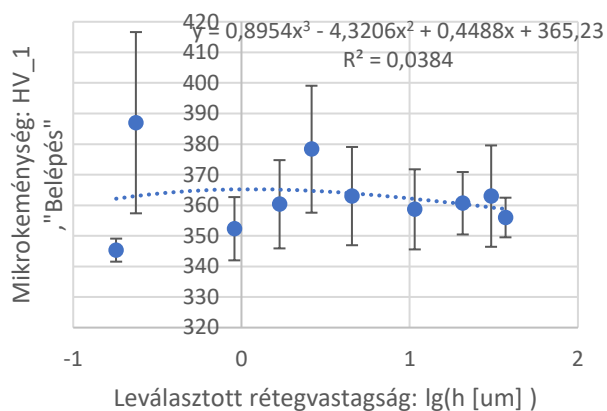
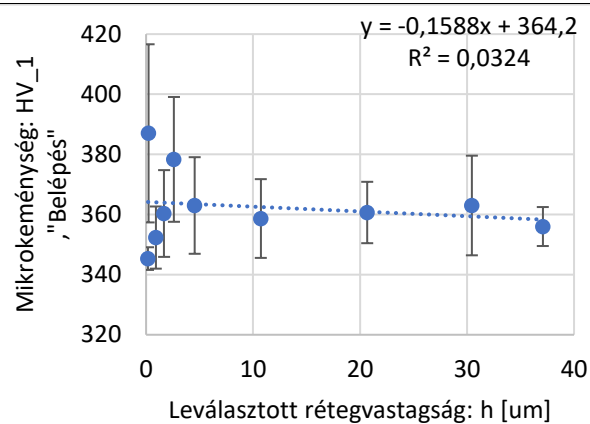
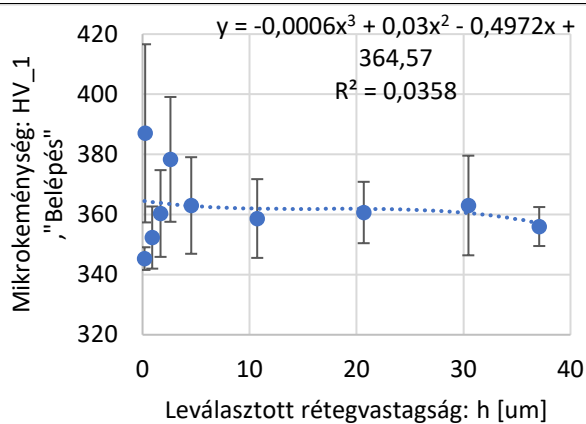
7.számú horony



8.számú horony



9.számú horony



10.számú horony

