



PALÁGYI IMRE
DIPLOMAMUNKA

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



DIPLOMAMUNKA

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

PALÁGYI IMRE
DIPLOMAMUNKA

A minimális elméleti forgácsvastagság becslése fémötvözetek
ellenirányú marása esetén

Konzulens:

Dr. Biró István
Adjunktus

Témavezető:

Dr. Biró István
Adjunktus

Budapest, 2022



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Gyártástudomány és -technológia Tanszék

<https://manuf.bme.hu/>

DIPLOMAMUNKA-FELADAT

NYILVÁNOS

AZONOSÍTÁS	Név: Palágyi Imre		Azonosító: 76362418694	
	Képzéskód:	2N-MG0	Specializáció kódja:	Feladatkiírás azonosítója:
	Szak:	Gépészmérnöki mesterképzési szak	2N-MG0-GF	EGGT:2023-1-2N-MG0:HOJP7C
	Diplomamunka-feladatot kiadó tanszék:		Zárávizsgát szervező tanszék:	
	Gyártástudomány és -technológia Tanszék		Gyártástudomány és -technológia Tanszék	
Témavezető: Biró István (75584290195), adjunktus				

FELADAT	Cím	A minimális elméleti forgácsvastagság becslése fémötvözetek ellenirányú marása esetén Determination of the minimum uncut chip thickness during conventional milling of alloys
	Részletes feladatok	1. Végezzen irodalomkutatást a következő témakörökben: minimális elméleti forgácsvastagság fogalma és jelentősége, vasalás fogalma és jelentősége, éllekerekítés hatása a minimális elméleti forgácsvastagságra és a vasalásra! 2. Mutassa be a címben nevezett jelenség vizsgálatára végrehajtott forgácsolási kísérletet! 3. Értékelje ki a kísérlet adatait! Dokumentálja a kiértékelés menetét és az alkalmazott módszereket! 4. Vonja le a következtetéseket a kiértékelés eredményei alapján!
	Hely	A diplomamunka készítés helye: Konzulens: ,

ZÁRÓVIZSGA	1. záróvizsga tantárgy(csoport)	2. záróvizsga tantárgy(csoport)	3. záróvizsga tantárgy(csoport)
	ZVEGEGTNGME Megmunkálási eljárások	ZVEGEGTNGGA Gyártástervezés automatizálása	

HITELESÍTÉS	Feladat kiadása: 2022. szeptember 5.		Beadási határidő: 2022. december 9.	
	Összeállította: Biró István (75584290195) témavezető		Ellenőrizte: Dr. Szalay Tibor s.k. tanszékvezető	Jóváhagyta: Dr. Györke Gábor s.k. dékánhelyettes
	Alulírott, a feladatkiírás átvételével egyúttal kijelentem, hogy a Diplomamunka-készítés c. tantárgy előkövetelményeit maradéktalanul teljesítettem. Tudomásul veszem, hogy jogosulatlan tantárgyfelvétel esetén a jelen feladatkiírás hatálytalan. Palágyi Imre			

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ezen diplomamunka a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E diplomamunkát a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2022.12.09.

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Palágyi Imre* (HOJP7C), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a diplomamunkát 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, 2022.12.09.

szigorló hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölések jegyzéke.....	viii
1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések	1
1.2. Áttekintés.....	1
2. Szakirodalmi áttekintés és Előzmények.....	2
2.1. A minimális rétegvastagság fogalma, összefüggése a mérethatással	2
2.2. Különböző forgácsolási paraméterek hatása	6
2.3. A szerszám merevségének hatása	15
3. A kiértékelési módszer	16
3.1. A kísérleti összeállítás	16
3.2. A számítás módszere.....	19
3.2.1. A négyszögjel vizsgálata	19
3.2.2. A szerszám kilépésének megtalálása az adatsorban.....	20
3.2.3. A szerszám belépése	22
3.2.4. A transzformáció.....	23
3.2.5. Az kilengések simítása az adatsoron.....	24
3.2.6. A rétegvastagság meghatározása	25
3.2.7. Az erők és erőarányok ábrázolása	27
3.2.8. Hibaszámítás	28
3.2.9. A pontos és közelítő képlet összehasonlítása	29
3.2.10. A program használata lépésekre bontva.....	29
4. A kiértékelés eredményei	32
4.1. A jellegzetes rétegvastagságok paraméterfüggései	32
4.2. A ciklois pálya és a közelítő képlet.....	36
4.3. A hibás adatsorok	37
4.4. Mérési hibák okai.....	38
4.5. A kiértékelés paraméterei és a rögzített jellegzetes értékek.....	39
5. Összefoglalás/Eredmények értékelése	41
5.1. Eredmények	41
5.2. Továbbfejlesztési javaslat	41
6. Felhasznált források.....	42
7. Summary.....	45

* * *

Köszönöm szépen Jacsó Ádám tanár úrnak a hasznos információkat a megmunkálásról, valamint, a mérés elvégzésekor a gépkezelést, Dr. Laczik Bálint tanár úrnak a hurkolt ciklois pálya pontos leírásával kapcsolatos különórát, valamint Dr. Biró István tanár úrnak a hasznos és tanulságos konzultációkat.

Budapest, 2022.12.09.

Hallgató Neve

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a_e	fogásmélység	mm
a_p	fogásszélesség	mm
A	rétegkeresztmetszet	mm ²
b	rétegszélesség	mm
f_z	élenkénti előtolás	mm/ford.
F_c	forgácsoló erő	N
F_n	normálerő	N
h	rétegvastagság	mm
k_c	fajlagos forgácsoló erő	N/mm ²
n	adatszám	db
r_β	csúcssugár	mm
T	periódusidő	s
v_c	forgácsoló sebesség	m/min
z	forgácsoló élek száma	1

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
λ	jellemző rétegvastagság	1
φ	szögelfordulás	rad
ω	szögsebesség	rad/s
ϑ	százalékos eltérés a pályák között	%
σ	folyáshatár	MPa
τ	vágószilárdság	MPa

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
1	az „1” értékű erőarányhoz tartozó rétegvastagság indexe

<i>1,ciklois</i>	az „1” értékű erőarányhoz tartozó rétegvastagság indexe a ciklois pályából számított rétegvastagság esetén
<i>a</i>	adhéziós, a munkadarab és szerszám között érvényes
<i>alsóhiba</i>	a hibasáv alsó részéhez tartozó rétegvastagság indexe
<i>felsőhiba</i>	a hibasáv felső részéhez tartozó rétegvastagság indexe
<i>i</i>	szerszámfordulat sorszáma
<i>j</i>	adat sorszáma az adott fordulaton belül
<i>jell_max</i>	jellegzetes rétegvastagság érték maximális értéke
<i>jell_min</i>	jellegzetes rétegvastagság érték minimális értéke
<i>minAl</i>	alumíniumra vonatkoztatott előzetes minimális rétegvastagság
<i>minAcél</i>	acélra vonatkoztatott előzetes minimális rétegvastagság
<i>n</i>	normalizált minimális forgácsvastagság indexe
<i>simítás</i>	diagramsimításhoz tartozó sáv adatszám
<i>x1</i>	„x” irányú, 1-es számú kimenő adat
<i>x2</i>	„x” irányú, 2-es számú kimenő adat
<i>y1</i>	„y” irányú, 1-es számú kimenő adat
<i>y2</i>	„y” irányú, 2-es számú kimenő adat

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkitűzések

A minimális leválasztható rétegvastagság vizsgálatával kapcsolatos kísérleteket és azok kiértékelését korábbi kutatómunkáim során kezdtem meg. Az elvégzett kísérlet-sorozat alkalmával ellenirányú marást alkalmazva végeztem a szerszámélre ható erők alakulásából, illetve az így rögzített erőértékek arányából vontam le következtetéseket.

Ezen kiértékelések statisztikai értékelése során összevetésre került a mérési módszer a kollégám által homlokbeszűrő esztergálással történő vizsgálatokkal. Az ellenirány-nyal végzett marási kísérletek során az eredmények szórása meglehetősen nagy ér-tékre adódott a minimális rétegvastagság nagyságrendjébe eső forgácsvastagságok esetén, ezért a jelen diplomamunka célja egy pontosabb kiértékelési módszer megal-kotása, majd az így kapott eredmények összevetése a korábbi kísérletekkel.

A korábbi kutatás főleg az ellenirányú marás alkalmazásakor adódó minimális le-választható rétegvastagság paraméterfüggését taglalta. Az eredmények szerint a mi-nimális rétegvastagság exponenciális jellegű növekedést mutat az előtolás növelésé-nek hatására, míg a forgácsolósebesség hatására konkrét tendencia nem mondható ki, az eredmények szóródása nagy volt, azonban növekmény tapasztalható.

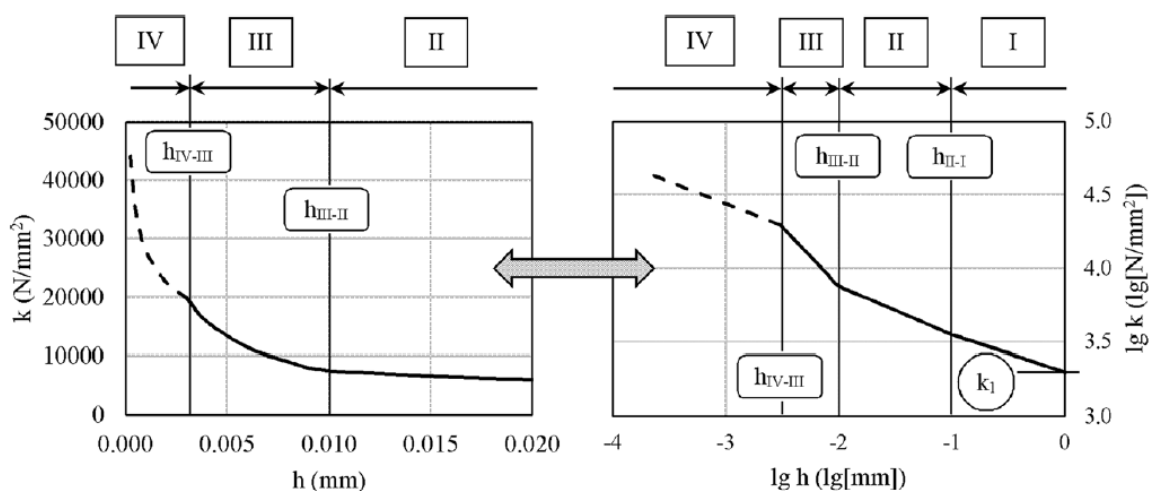
1.2. Áttekintés

A dokumentumban először egy szakirodalmi áttekintés után gyors ismertetésre kerül-nek a korábbi kutatások eredményei, majd a mérési környezet részletes bemutatása után az új kiértékelési módszer kerül levezetésre, végül az eredményeket ismertetem, az azokból levonható következtetéseket megteszem, s továbbfejlesztési javaslatokat te-szek a kiértékelést illetően.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS ÉS ELŐZMÉNYEK

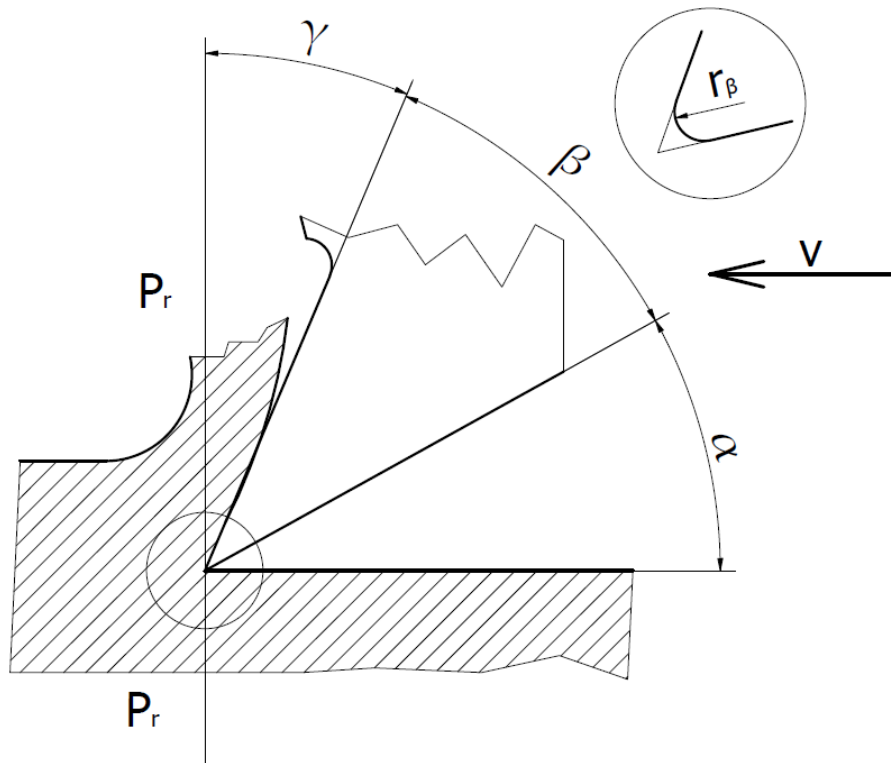
2.1. A minimális rétegvastagság fogalma, összefüggése a mérethatással

Vékony forgács leválasztása esetén a minimálisan leválasztható rétegvastagság (továbbiakban minimális rétegvastagság) problémát okozhat az általunk végzett megmunkálásban. Minimális rétegvastagság alatt azt az anyagréteget értjük, amely megmunkálása közben megkezdődik a forgács leválasztása a munkadarabról. Ha ennél a határértéknél kisebb a megmunkálás során a fogásvétel, akkor a szerszám csak hidegen alakítja (vasalja) a munkadarab külső rétegét, ezzel megnövelve a szerszámra ható erőket. Bíró István és mtsai. [1] forgácsolási kísérleteik során a leválasztandó rétegvastagság függvényében vizsgálták a fajlagos forgácsolóerő alakulását. Az 1. ábra szemlélteti az eredményeiket:



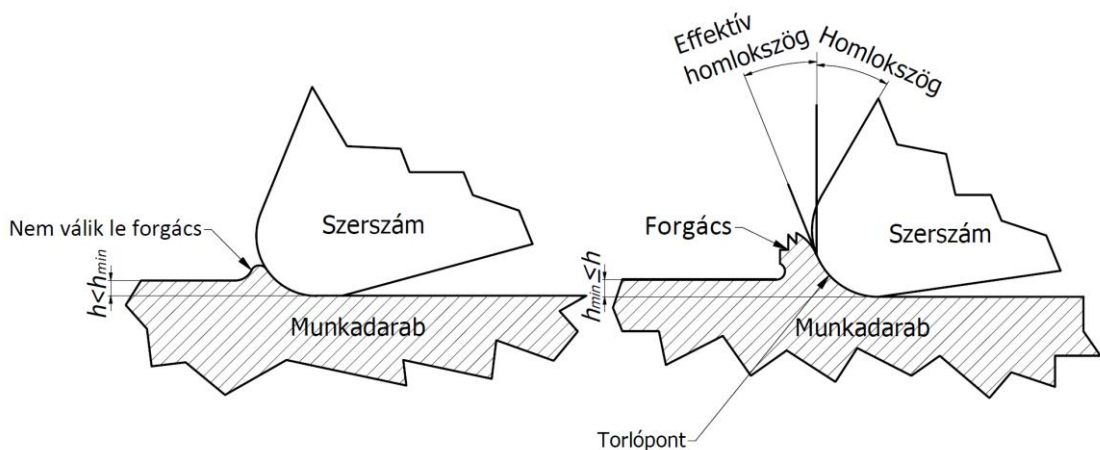
1. ábra: A fajlagos forgácsolóerő alakulása a leválasztandó rétegvastagság függvényében [1]

A rétegvastagság csökkenésével járó hirtelen fajlagos forgácsolóerő-növekményt mérethatás jelenségének nevezzük. Ez a jelenség összefüggésben áll a korábban említett hidegalakításba forduló energiaveszteséggel. Abeni és mtsai. [2] kísérleteik során a minimális rétegvastagságot kifejezetten egy ilyen jellegzetes ponthoz rendelték. Látható, hogy a logaritmikus tengelyen egy egyértelmű meredekségváltozás történik a IV. és III. zóna határán. Fontos megemlíteni a mérethatás vizsgálatokor továbbá a különbséget az ideálisnak tekintett, illetve a valós szerszámok közötti eltéréseket is. Bali János [3] Forgácsolás című tankönyvében említi az ideális forgácsolási körülményeket, valamint a valós körülményeket. A 2. ábrán az általános szerszám ortogonál-nézetbeli képét láthatjuk.



2. ábra: Az ideális esztergaszerszám jellegzetes szögei, ahol α az hátszög, β az élszög, γ pedig a homlokszög, r_β pedig az csúcssugar sugár Bali János – Forgácsolás c. könyve alapján[3]

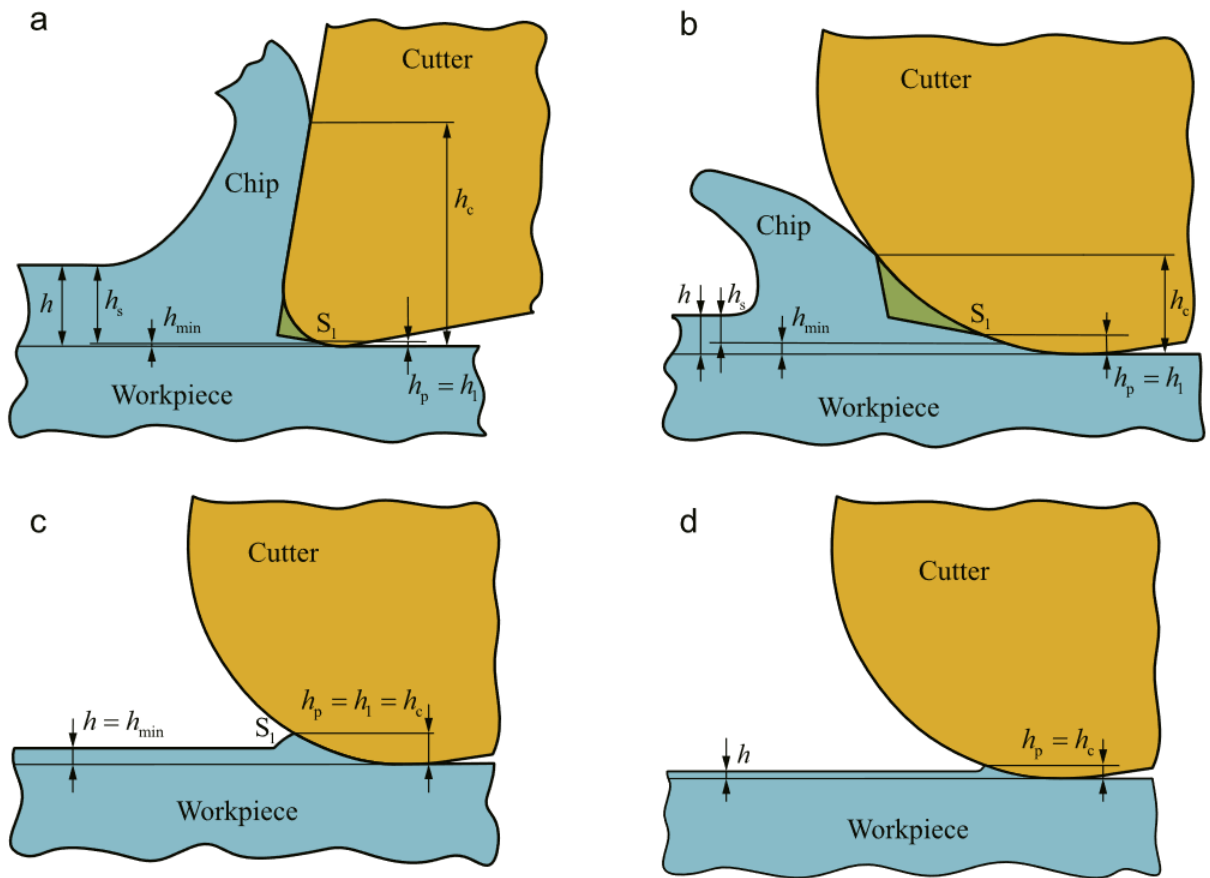
Az ideális szerszám esetében elhanyagoljuk a csúcssugarat sugarat. Ezt kellően nagy fogásvétel esetén megtehetjük, hiszen nem játszik szerepet a forgács leválasztásában (ellenben az erőkre, valamint a megmunkált felület minőségére hatással van). A minimális rétegvastagság mérettartományaiban azonban már előfordulhat, hogy a leválasztott rétegvastagság nagysága összemérhető lesz az élsugárral. Ebben az esetben már beszélhetünk effektív homlokszögről, ami a szerszám éle mentén látható. Ezt, valamint a hidegalakításból forgácsolásba történő átmenetet szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra: A vasalásból forgácsolásba történő átmenet, valamint az effektív homlokszög definíciója

A 3. ábrán látható torlópont az áramlástani folyamatoknál hasonló jelenségre utal, ebben a pontban az anyag nem mozdul el a szerszám éle mentén. Malekian és mtsai. [4] az ehhez tartozó kontaktszög vizsgálatával végzett kutatást a minimális rétegvastagsággal kapcsolatban, Wan és mtsai. [5] pedig ezt az anyagrészt holt fém zónaként hivatkozva, a mozdulatlan anyagrész alakját és a minimális rétegvastagságot összevetve vont le következtetéseket a minimális rétegvastagságra.

Wan és mtsai. [5] kutatásában a holt fém zónát geometriai összefüggésekre építik, ezt szemlélteti a 4. ábra:

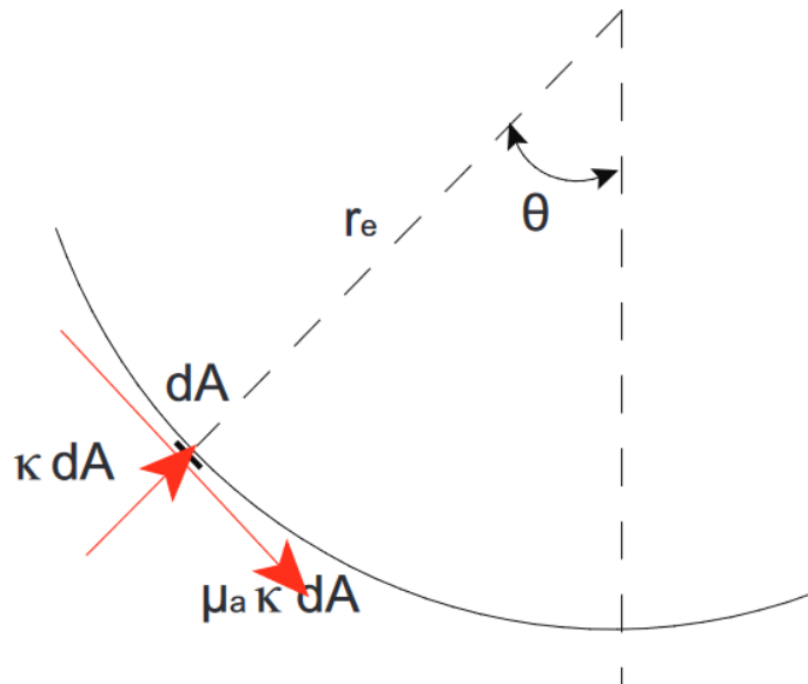


4. ábra: A forgácsleválasztás 4 külön esete: a) a leválasztott forgács vastagsága meghaladja a csúcssugár nagyságát, b) a forgácsleválasztás megtörténik, de a vastagsága kisebb a csúcssugárnál, c) a forgácsleválasztás éppen megkezdődik d) vasalás által dominált megmunkálás [5]

A 4. ábra jelölései szerint S_1 a holt fém zóna szélső pontja a szerszám éle mentén, h_l az ezen ponthoz tartozó rétegvastagság, h_p a vasalt anyagrész vastagsága, h_c a kontaktpont végéhez tartozó távolság, h_s a leválasztott anyagrész vastagság. Ezen cikkben a minimális rétegvastagság kifejezésére az 1. egyenletet használták:

$$h_1 = r_\beta - r_\beta \cdot \left[90^\circ - \arcsin \left(\frac{h_{min}}{r_\beta} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

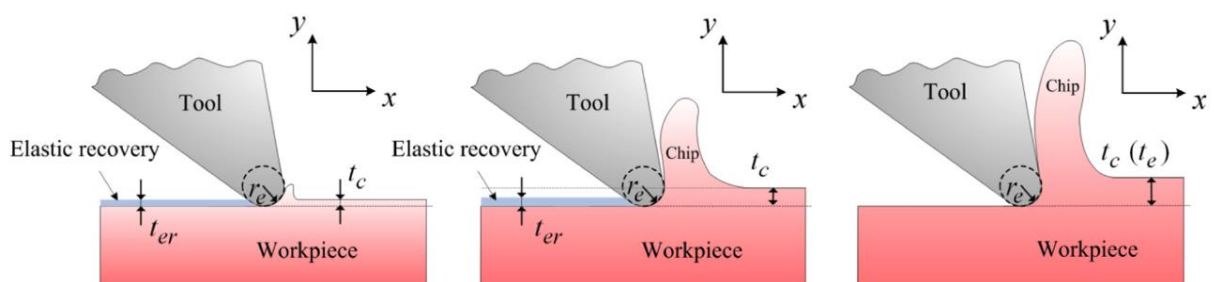
Malekian és mtsai. [4] a torlóponthoz a szerszámmra ható súrlódási erővel hozták összefüggésbe, ennek értelmezését segíti az 5. ábra:



5. ábra: A torlópont (dA) torlóponthi szög (θ), a csúcsgörbe (r_e), a vasalási erő (κdA) és a súrlódási erő értelmezése Malekian és mtsai. [4] kutatása alapján

Malekian a vasalás és forgácsleválasztás közötti átmenetet elsősorban a súrlódási viszonyok megváltozásának tulajdonította, kísérleteik szerint egy igen sokak által igazolt, $0,23r_\beta$ nagyságrendű minimális rétegvastagság értéket találtak.

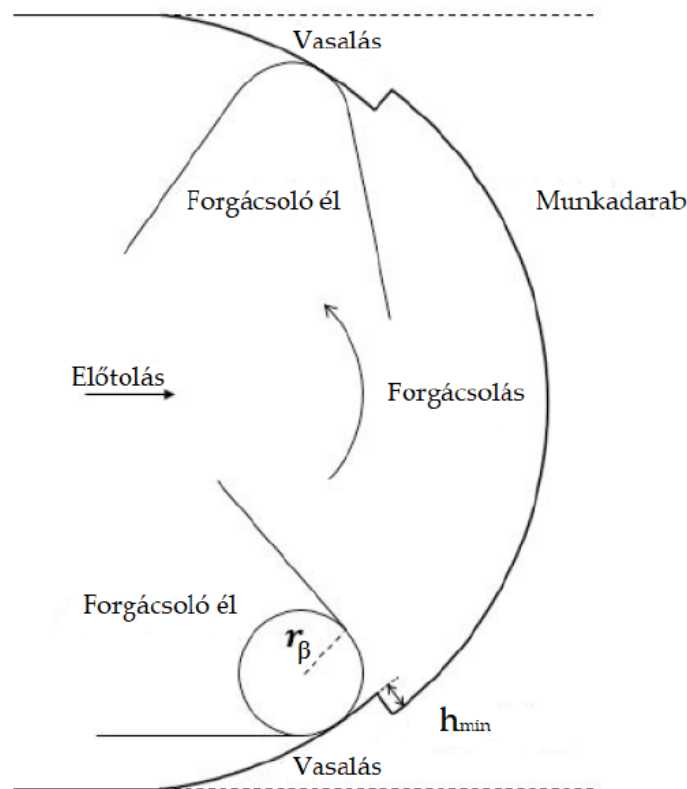
Zhang és mtsai. [6] a saját kutatásuk során nem két, hanem három fő folyamatra bontják a vékony rétegű anyag forgácsként történő leválasztását, egy tisztán vasaló, egy félig vasaló és félig forgácsoló szegmensre és egy tisztán forgácsoló szegmensre (6. ábra):



6. ábra: Zhang és mtsai. [6] forgácsolási folyamatot érintő elmélete

A vasalás és forgácsolás közötti átmenetet tanszékünkön korábbi kutatásokban két-féle kísérlettel hozták létre, homlokbeszűrő esztergálás közben, valamint ellenirányú marást alkalmazva. A homlokbeszűrő esztergálás előnye a visszamérhető horony, míg ellenirányú marás során a sokszorosan megismételt mérést tekinthetjük előnyös tulajdonságnak. A 7. ábrán egy teljes átmérővel végzett marási kísérletben kerül szemléltetésre a megmunkált réteg vastagsága.

Ezen elmélet más szakirodalomban nem található, és magam is azon gondolat mellett foglaltok állást, hogy bizonyos mértékű rugalmas alakváltozás minden körülmény között jelen van a vasalt anyagréteg mentén, ahogyan ezt a 4. ábrán is az szemlélteti, hogy a „h”-val jelölt leválasztandó anyagréteg és a „h_s”-sel jelölt leválasztott anyagréteg között eltérés van.



7. ábra: [7] Jue-Hyun Lee és mtsai. által kiadott publikáció alapján teljes átmérővel történő marás esetén a rétegvastagság

Jue-Hyun Lee és mtsai. egy geometriai szimuláció segítségével próbálták megbecsülni a minimális rétegvastagság hatását a leválasztott forgács mennyiségére, azonban ez a kísérlet nem vette figyelembe sem a szerszámkopást (amelyet a szerszámmal történő hidegalakítás számottevően megnövel), valamint a marás során fellépő erők-ből keletkező rezgéseket sem, így pontos következtetés nem vonható le.

2.2. Különböző forgácsolási paraméterek hatása

Irodalomkutatásom során több anyagban végzett kísérletről olvastam, ezek mikroméretű forgácsolási kísérletek voltak, főleg marási, de előfordult esztergálás is. Alumínium ötvözeteket vizsgált Jeyaprakash és mtsai. [8], összehasonlította a mikroesztergálás után a felületi érdességet és a minimális rétegvastagságot galvanizált és nem galvanizált anyagok esetén, tapasztalataik szerint a galvanizált esetben kisebb volt

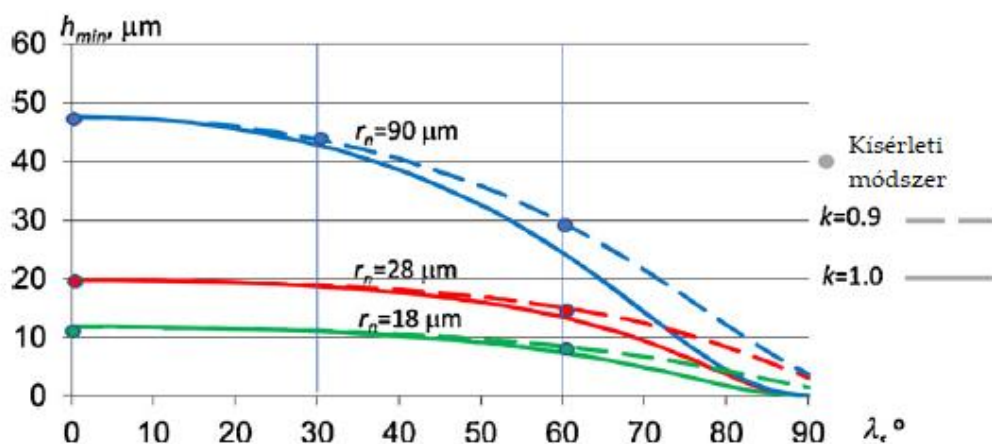
mind a minimális rétegvastagság, mind pedig a felületi érdesség. Oliaei és mtsai. [9] Titán ötvözetek mikrométerű ortogonális forgácsolása során az élrátétképződés hatását vizsgálták, ők is összefüggést találtak a minimális rétegvastagság és a felületi érdesség és a minimális rétegvastagság között, élrátét esetén a szerszám csúcssugarának 10%-ával vélték egyenértékűnek a h_{min} értékét. Dong és mtsai. [10] szintén a csúcssugárral vett arányt vizsgálták volfrám ötvözeteken végzett mikroforgácsolással, ahogyan Büttner cikkében [11] ezt megteszik réz- és volframmal erősített rézötvözetek esetén. Utóbbi kutatásban egy összefoglaló látható, hogy több, iparban gyakran használatos anyagra milyen arányúak a minimális rétegvastagság és a csúcssugár. Abeni [12] és kollégái nikkel alapú szuperötvözetekből additív technológiával készült előgyártmányok befejező marási műveletei során vizsgálták a fellépő erőket, s mesterséges intelligencia segítségével megbecsülték a fellépő erőket.

A minimális rétegvastagságot Büttner és mtsai. [11] cikke alapján a következő összefüggés alapján számították (2. egyenlet):

$$\lambda_n = \frac{h_{min}}{r_\beta} = 0,5 - \frac{\tau_a}{\sigma} \quad (2)$$

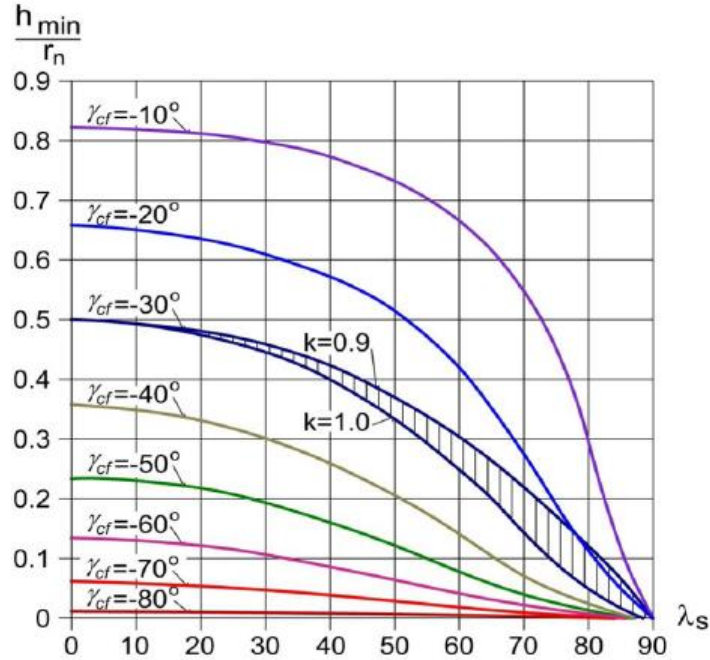
A λ_n normalizált minimális rétegvastagság értékét több anyagra Liu és mtsai. [13] ezt az anyagok termomechanikai tulajdonságai alapján becsülte, a későbbiekben az alumínium munkadarab névleges minimális rétegvastagság értékéhez a normalizált minimális rétegvastagság értékét 0,23-nak, az acél munkadarab esetén pedig 0,3-nak vettem.

A minimális rétegvastagság a szakirodalomban olvasható vélemények többsége szerint erősen függ a megmunkálás paramétereitől, például a szerszámgeometriától, a munkadarab anyagától, a megmunkálás mozgásviszonyától, azaz a forgácsolósebességtől és az előtolástól. Tadeusz M. és mtsai. [14] a szerszám terelőszögének és csúcssugár sugarának hatását vizsgálták a minimális rétegvastagságra, eredményeik a 8. ábrán láthatók. (De Oliveira és mtsai. [15] cikke alapján mindössze a szerszámgeometria függvénye a minimális rétegvastagság)



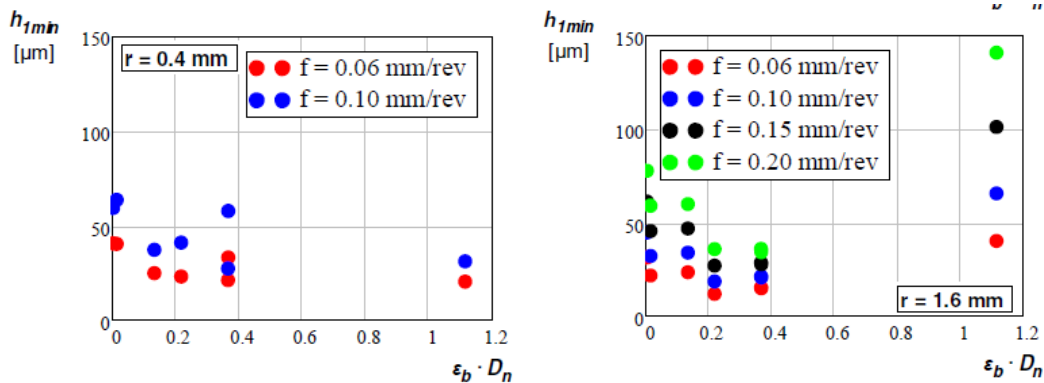
8. ábra: Tadeusz M. és mtsai. [14] kutatása, a terelőszög hatása a minimális rétegvastagságra, k-val a forgácsáramlás irányát különböztetik meg

Ezen kívül képezték még a minimális rétegvastagság és a szerszám csúcssugar sugárának arányát, melyet szintén ábrázolva a terelőszög függvényében látható a 9. ábrán:



9. ábra: Tadeusz M. és mtsai. [14] kutatása, a terelőszög hatása a minimális rétegvastagság és a szerszám élsugarának arányára különböző homlokszögeértékekre

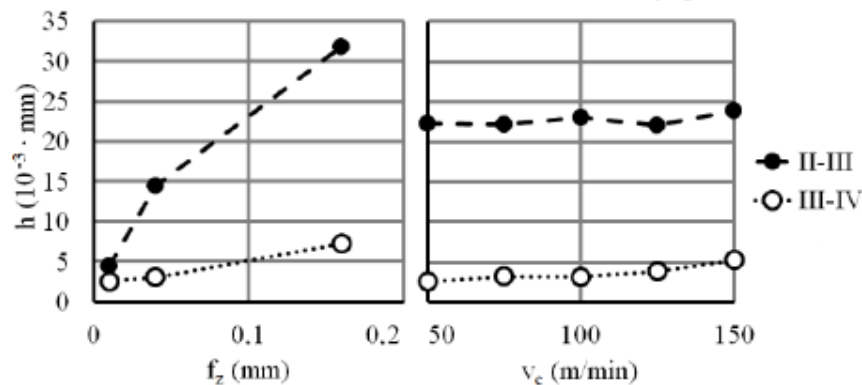
Ezen kívül Fredrik Schulteiss és mtsai. [16] minimális rétegvastagság megmunkált felületi minőségre gyakorolt hatásával kapcsolatos kutatásukban találtak összefüggést az alakítási felkeményedés és a minimális rétegvastagság közötti kapcsolatra, ezek láthatók a 10. ábrán:



10. ábra: Az alakítási felkeményedés hatása ($\epsilon_b \cdot D_n$) a minimális rétegvastagságra különböző előtolás-értékeken [16]

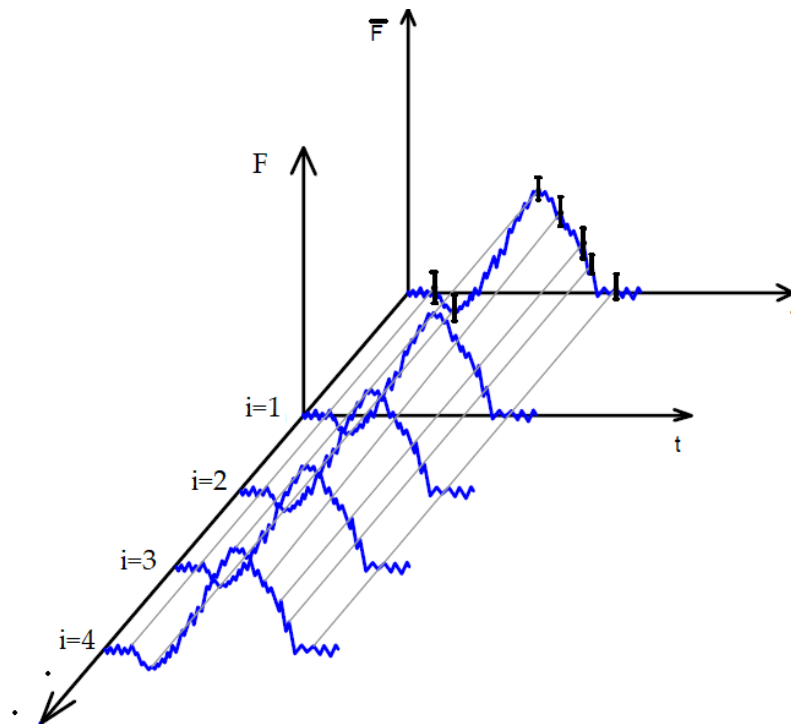
Az előtolás hatásának jellege némileg látható a jobb oldali ábrán, ahol 4 különböző előtolás értéken vizsgálták meg a minimális rétegvastagság értékét, miszerint nem lineáris a növekmény, sokkal inkább valamilyen hatványfüggvény szerint növekszik.

Ehhez hasonló jelenséget tapasztaltak Biró István és mtsai. [17], akik a forgácsolási az előtolás és forgácsolósebesség hatását vizsgálták. Hasonló eredményre jutottak Kountanya és mtsai. [18] is. A kutatás során a fő mutatójuk a fajlagos forgácsolóerő volt, melynek értékeit tartományokra bontották, ezek határait vizsgálva. Tapasztalataik szerint az előtolás növekedésével a tartományok határa exponenciális növekményt mutat, míg a forgácsolósebesség hatására pontos tendencia ugyan nem állapítható meg, de növekmény jellegű összefüggés látható. (11. ábra)



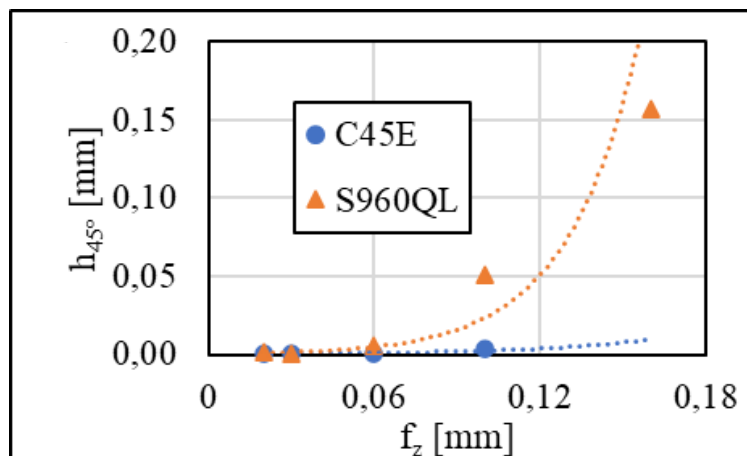
11. ábra: A fajlagos forgácsolóerő tartományhatárának változása a paraméterek függvényében[17]

Hasonló mérést végeztem egy korábbi kutatás alkalmával [19], ahol a minimális rétegvastagságot konvencionális méretű szerszámmal, ellenirányú marással. Ebben a kutatásban ellenirányú marást végeztem C45E és S960QL anyagokon. A mérés során az erőmérő rendszer 50 fordulat adatait rögzítette. A szakirodalom szerint Jing és mtsai. [20] egy becslőmodellt alkottak a mikromarás során fellépő forgácsolóerőkről, amelyben szintén figyelembe kellett venniük a minimális rétegvastagságot. Ezen erőkből a 12. ábrán látható módon képeztem egy átlagos fordulatot, melyet transzformáltam a munkadarabra ható erőkből a szerszám élére ható erőkké.

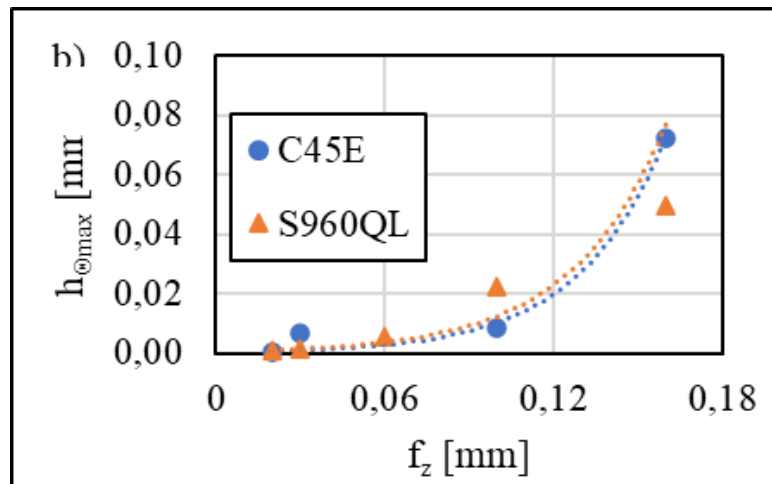


12. ábra: Az átlagos fordulat képzését szemléltető ábra [19]

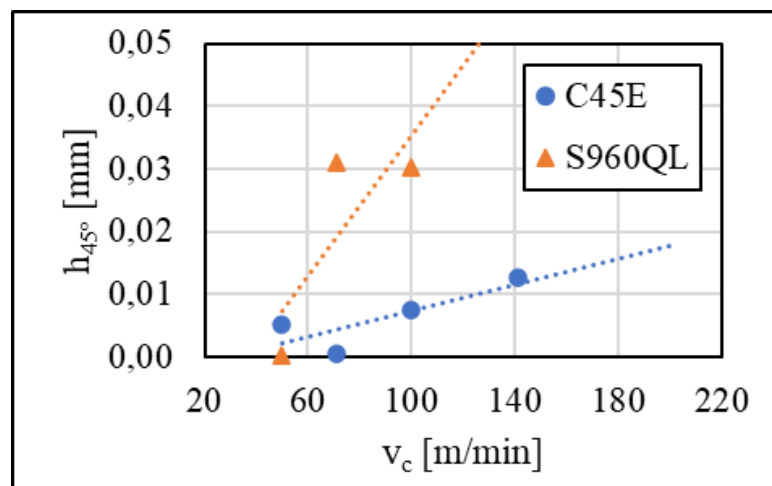
Ezek után a szerszám élére ható erőkre egy görbét illesztettem, majd az erők arányát kiszámítottam a csak transzformált, valamint az illesztett erőgörbékre. Az illesztett erőgörbéken jellemzően található volt egy olyan pont, ahol a normálerő és a forgácsolóerő értéke megegyezett, a „nyers” transzformált erőadatok arányában pedig található volt egy lokális maximum a mérések során, ezeket kigyűjtve láthatóvá vált, hogy az előtolás növelése valóban exponenciális növekményt okoz ezen jellegzetes rétegvastagságok tekintetében (13. és 14. ábra).



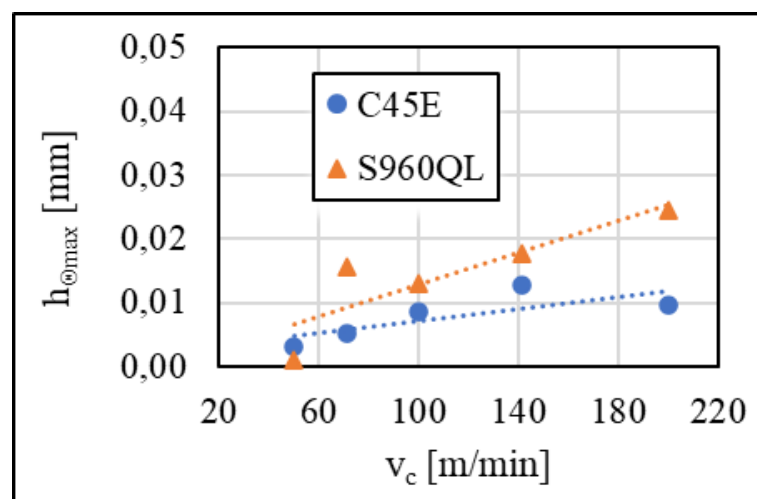
13. ábra Az erők metszéspontjához tartozó rétegvastagság (h_{45°) az előtolás függvényében [19]



14. ábra: Az erőarány lokális maximumához tartozó rétegvastagság ($h_{\Theta \max}$) függése az előtolás függvényében [19]



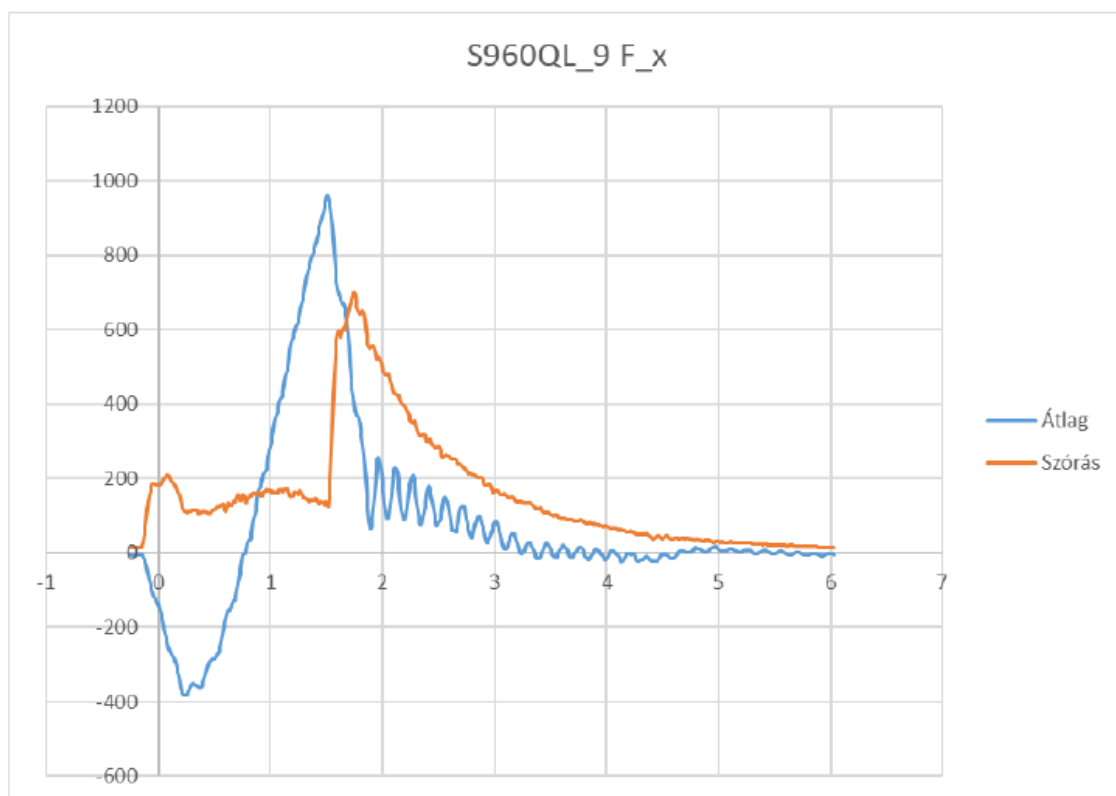
15. ábra A Az erőarány lokális maximumához tartozó rétegvastagság ($h_{\Theta \max}$) függése a forgácsolósebesség függvényében [19]



16. ábra: Az erők metszéspontjához tartozó rétegvastagság (h_{45°) a forgácsolósebesség függvényében [19]

A forgácsolósebesség-függés vizsgálata során az adatok nagy szóródása miatt pontos tendencia nem mutatható ki, azonban valamilyen növekmény jellegű változás tapasztalható. (15. és 16. ábra)

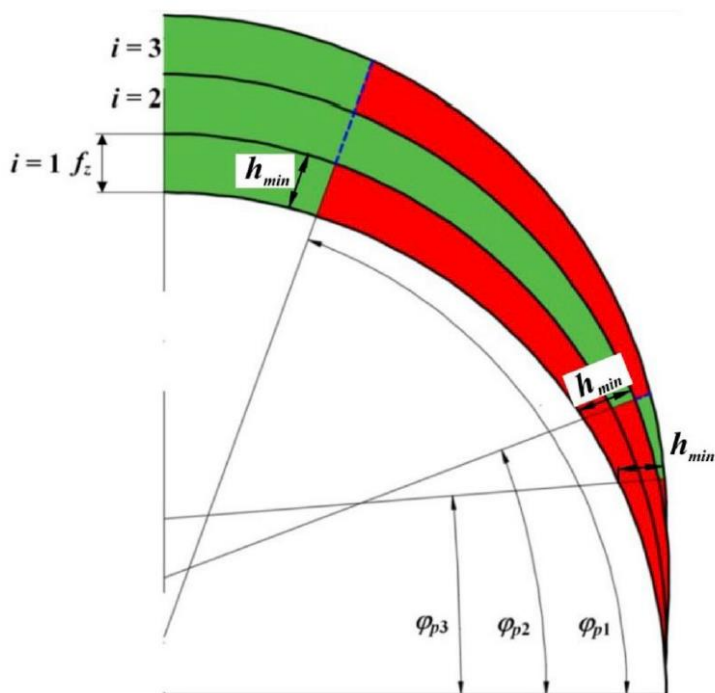
Ezután statisztikai vizsgálatoknak vetettem alá az itt kidolgozott mérési adatsorokat, valamint a korábban használt közelítőképlet helyett a rétegvastagság vizsgálatára pontos cikloispálya egyenletébe helyettesítettem be. A cikloispályába való behelyettesítés nem adott más eredményt, a jellegzetes rétegvastagságok paraméterfüggése azonos volt a közelítő képlethez képest, értékük különbözött. Az átlagos fordulat számításakor azonban a szerszám szögelfordulásának függvényében ábrázoltam mind az erőt, mint az átlagos erőadatok szórását (17. ábra). Hasonló vizsgálatok végezett Dib [21] és mtsai., akik a forgácsolóerő ingadozását vizsgálták mikromarás során.



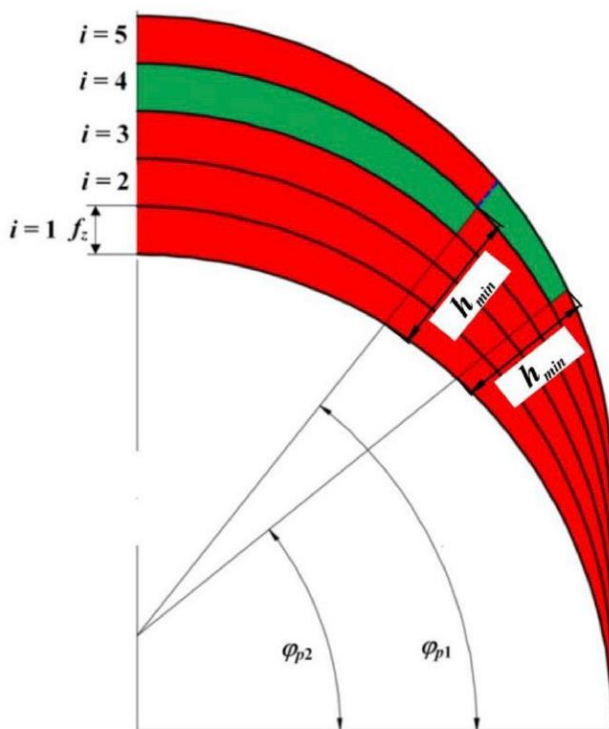
17. ábra: Az átlagos fordulat erőértékei és szórásuk

A szerszám kilépésekor látható szórásnövekedés a szerszám ellenirányú marásból adódó kilengésének következménye. Ellenben a szerszám belépése után tapasztalható lokális maximum a minimális rétegvastagsággal kell, hogy összefüggésben legyen. Ezzel kapcsolatban S. Wojciechowski és mtsai. [22] cikkében található a magyarázat, mely a jelenségnek az anyagfelhalmozódás nevet adta. A jelenség lényege, hogy a szerszám a forgácsleválasztást mindig egy adott rétegvastagság felett kezdődik el, mely azt eredményezi, hogy a maradékanyag miatt korábban kezdődik meg a forgácsleválasztás a következő fordulatban. Két esetet különböztetnek meg, amikor az élenkénti

előtolás meghaladja a minimális rétegvastagságot, valamint amikor az előtolás kisebb, mint a minimális rétegvastagság. Szemléltesse ezt a 18. ábra és a 19. ábra:

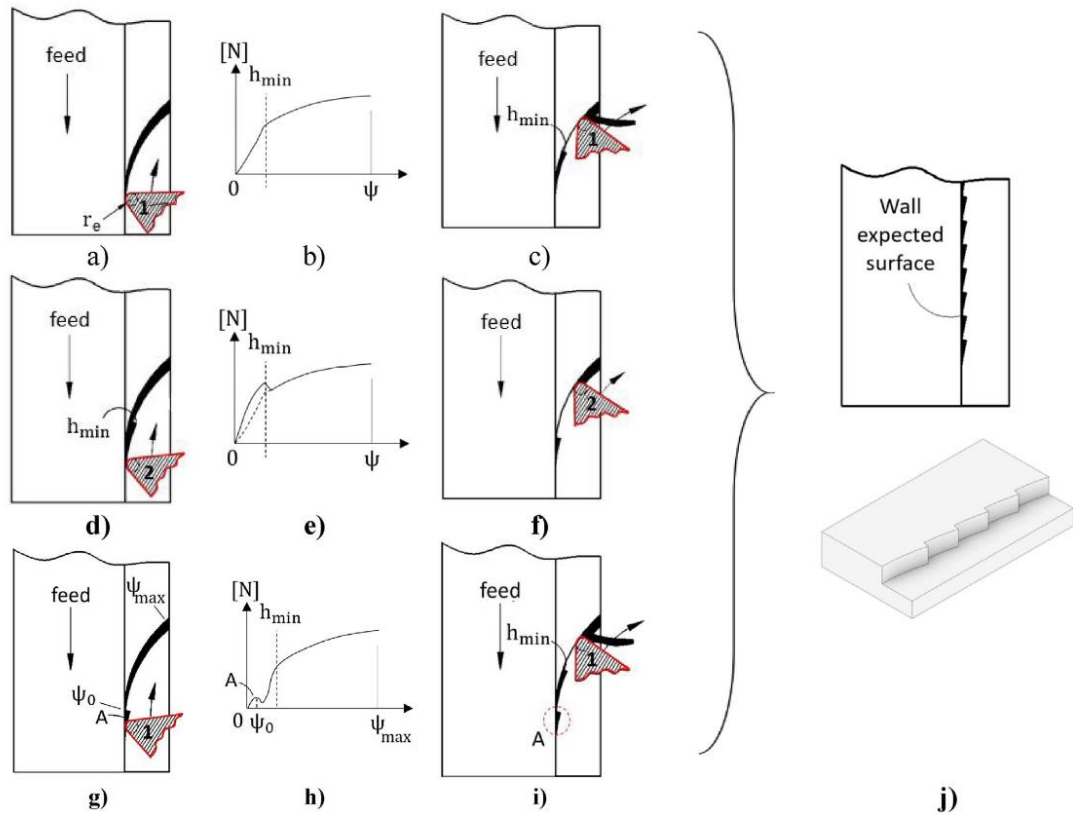


18. ábra: Az anyagfelhalmozódás jelensége minimális rétegvastagságnál nagyobb élenkénti előtolás esetén [22]



19. ábra: Az anyagfelhalmozódás jelensége minimális rétegvastagságnál kisebb élenkénti előtolás esetén [22]

Ugyanezt a jelenséget Dib és mtsai. [21] szintén részletezték, mikromarás esetén az erők alakulását vizsgálták különböző esetben, ez látható a 20. ábrán:

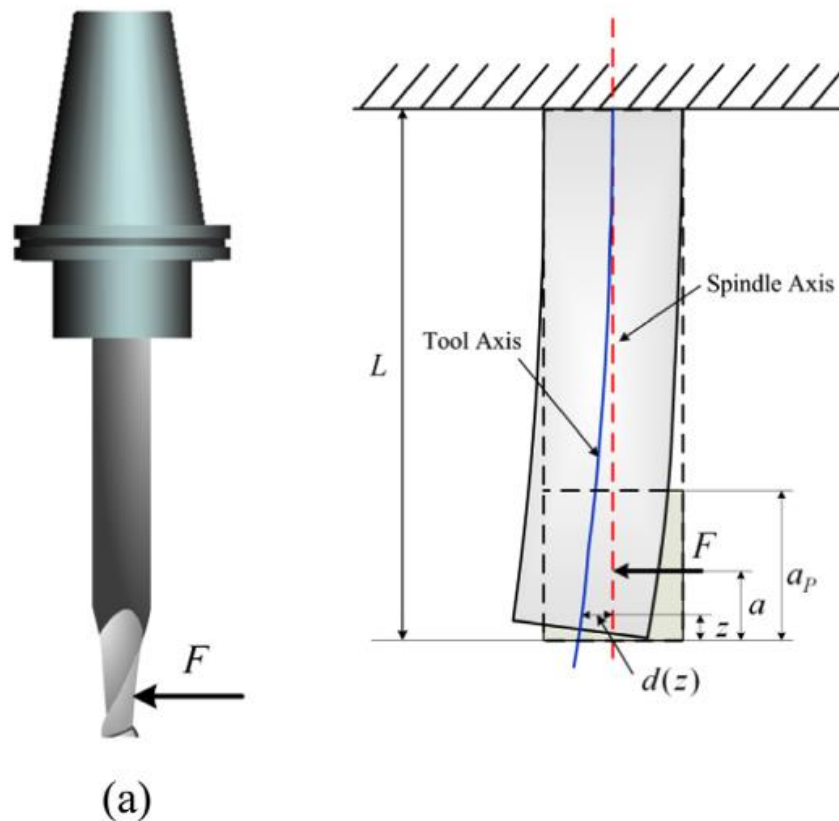


20. ábra: Dib és mtsai. [21] kutatása alapján az anyagfelhalmozódás jelenségével koherens erőkarakterisztika

A 20. ábra a) részén a megmunkáló szerszám belépése látható abban az esetben, ha nincs maradékanyag, a b) részen az ehhez tartozó erőkarakterisztika, ahol az erőfelfutás jellegében látható egy törés a forgácsolás kezdetekor, a c) ábrán látható a maradékanyag. A d) részen az előző fordulatból maradt anyagrég látható abban a fordulatban, amikor a maradékanyaggal együtt eléri a minimális rétegvastagságot, majd mikor levált a maradékanyag egy része, az e) ábrán látható, hogy csökken a szerszámmra ható erő. A g) esetben a maradékanyag nem haladja meg a minimális rétegvastagságot, így amíg a szerszám azt tisztán vasalja, addig nagyobb erő hat a szerszámmra a h) görbe szerint, majd folytatódik az első esethez hasonló mechanizmus a forgácsolás kezdetéig, az i) ábrán látható, hogy a maradékanyag továbbra is a munkadarabon marad. Az utolsó, j) ábrán pedig látható, hogy a korábban feltüntetett megmunkálási körülmények után a várt felület mi módon fog kinézni megmunkálás után.

2.3. A szerszám merevségének hatása

A forgácsoló szerszámra ható nagy erők miatt feltételezhető, hogy a szerszám kihajlik megmunkálás közben, így marási folyamatok során a leválasztott rétegvastagság értéke eltérhet attól, mint amit ideális esetben gondolunk. Zhang és mtsai. [6] vizsgálták ezt a jelenséget mikromaró esetén, szemléltesse modelljüket a 21. ábra:



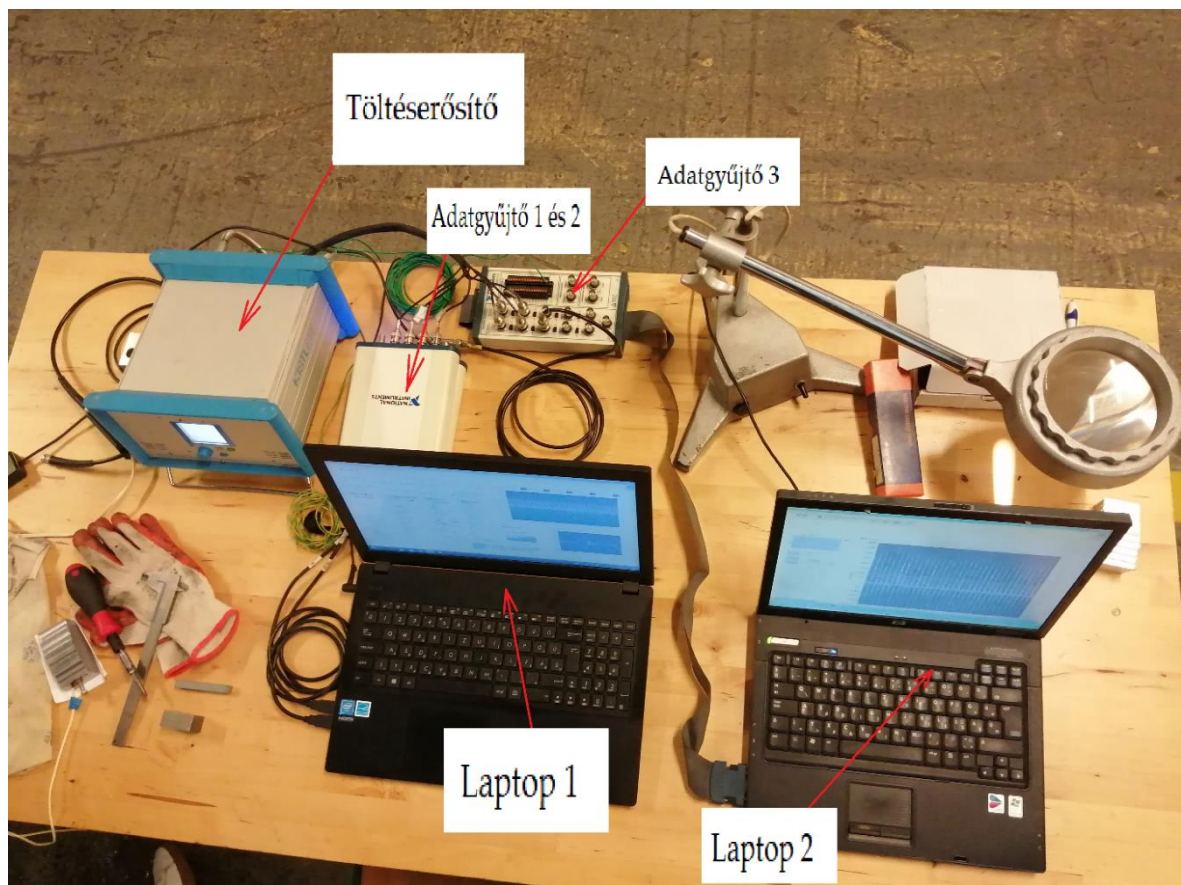
21. ábra: A marószerszám kihajlása mikromarás esetén

Látható, hogy modelljünkben figyelembe vették a szerszám kihajlása miatt történő szerszámtengellyel párhuzamos irányú elmozdulást is. Az általam kiértékelt kísérlet során mivel makroméretű szerszámmal dolgoztam, ezért ezt elhanyagolhatónak tekintettem a szerszám merevsége miatt, a radiális irányú elmozdulás méréséhez pedig egy új kísérletsorozat szükséges, melyhez a Zhang és mtsai. [6] által összeállított kísérlet szenzorozását alapul véve és az általam ismertetett hurkolt ciklois pálya leírásának módosítását alapul véve egy pontos képet kaphatunk a leválasztott rétegvastagságokról.

3. A KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZER

3.1. A kísérleti összeállítás

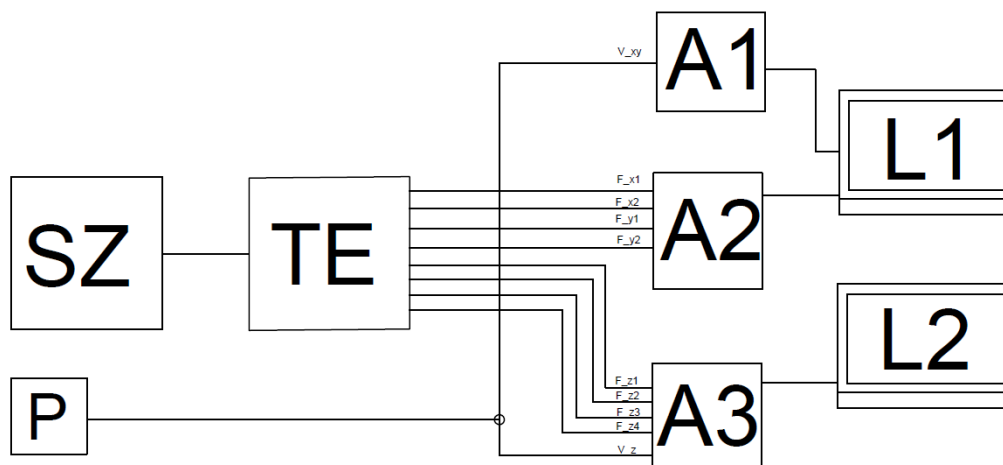
Ebben a dolgozatban is a korábbi kutatás során mért erőkre készült a kiértékelő program. A mérés során egy Kondia B640 3-tengelyes CNC megmunkáló központon végeztünk ellenirányú marást egy 16 (mm) átmérőjű szerszámmal, 8 (mm) fogászélességgel, 2 (mm) fogásmélységgel. A megmunkálás paramétereinek megválasztásakor a Sumitomo WEX2016E szerszámtestbe befogott Sumitomo AXMT123504PE-ERG típusú váltólapkához ajánlott paramétereket osztottuk fel úgy, hogy a forgácsolósebesség lineáris növekménnyel változzon, az előtolás pedig exponenciálisan növekedjen, hiszen irodalomkutatásaim során azt láttam, hogy a minimális rétegvastagság is hasonló növekményt kell, hogy mutasson. A 22. ábrán láthatók az adatgyűjtők, töltéserősítő és adatfeldolgozó laptopok:



22. ábra: A mérési elrendezés adatgyűjtőiről mérési elrendezés

Az ábrán látható, hogy két laptopot alkalmaztunk az adatgyűjtésre. Ez az erőmérő kimeneteinek száma miatt volt szükséges, mert egy adatgyűjtőben nem tudtuk az összes mért erőkomponenst rögzíteni. A „Laptop 1” néven szereplő lappal került rögzítésre az x és y irányú, a „Laptop 2” pedig a z irányú komponenst rögzítette. Mivel ezeket nem lehetett teljesen szimultán rögzíteni, ezért a z irányú komponens a korábbi

mérések során csak tájékoztató jelleggel szerepeltek a mért adatok sorokon, azonban az új kiértékelésben már további információ tartalommal nem bírtak, ezért az új mérésben elhanyagoltam ezeket. A 23. ábrán látható kapcsolási rajz a mérési elrendezés sematikus ábrája:

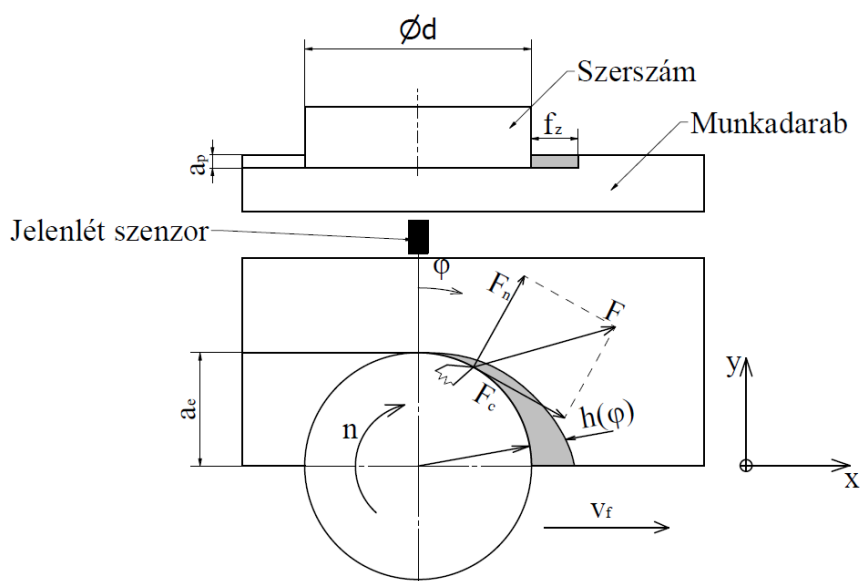


23. ábra: A mérési elrendezés blokkdiagramja

A jelölések:

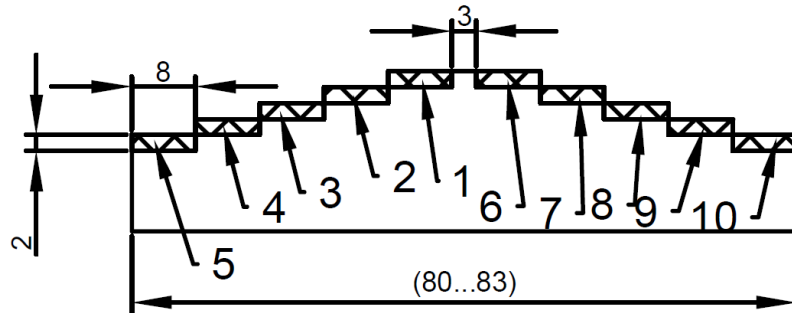
- SZ – Erőmérő szenzor (KISTLER 9257B)
- TE – Töltéserősítő (KISTLER 5070A)
- P – Jelenlétszenzor (Proximity) (OMRON E3FDS10B4)
- A1, A2, A3 – Adatgyűjtők (A1-A2: NI USB-4431, A3: NI BNC-2110)
- L1, L2 – Laptopok

A mérési elrendezésről és a felhasznált mennyiségek jelölését szemléltető ábra a 24. ábra:



24. ábra: A mérési elrendezés és jelölésrendszere [19] alapján

A mérés során 3 anyagú munkadarabon végeztünk forgácsolást, ezek anyaga AlMgSi1 alumíniumötvözet, C45E általános rendeltetésű acél és S960QL finomszemcsés nagyszilárdságú szerkezeti acél. A munkadarabok a 25. ábrán látható lépcsőzetes kialakításúak, hogy a későbbiekben felületi minőség vizsgálatára is alkalmasak legyenek.



25. ábra: A próbatest kialakítása

A mérések során a paraméterek változtatásának metodikája a következő volt: Az első 5 mérés során állandó előtolás mellett változtattuk a forgácsolósebességet (közvetten a megmunkálóközponton megadható fordulatszámmal), a 6-10. mérésen pedig állandó forgácsolósebesség (fordulatszám) mellett változtattuk az előtolás értékeit. A mérések sorszámát a nyilak végén levő számok jelölik. Ezeket a paramétereket a 1. táblázat foglalja magába:

Mérés sorszáma	Előtolás f_z	Forgácsoló sebesség v_c
1	0,057	50
2	0,057	71
3	0,057	100
4	0,057	141
5	0,057	200
6	0,02	100
7	0,034	100
8	0,057	100
9	0,095	100
10	0,16	100

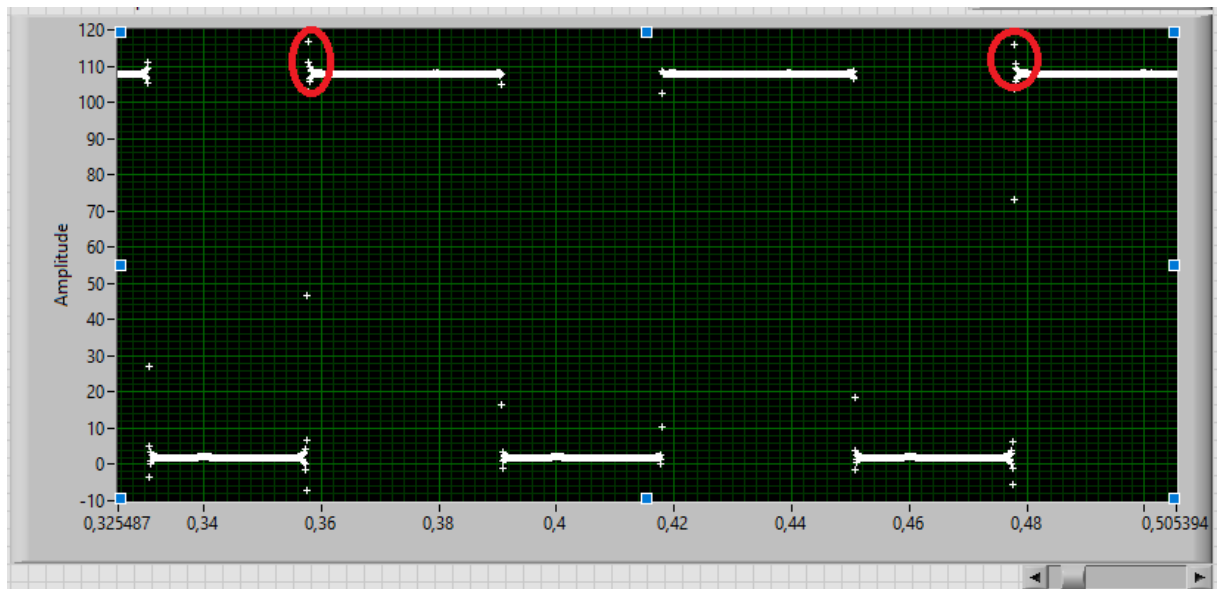
1. táblázat: A kísérletek sorszámaához tartozó paraméterek

3.2. A számítás módszere

Jelen dolgozatban a korábbi kísérlet eredményeire terveztem egy pontosabb kiértékelési módszert, melynek alapja, hogy az átlagos, egy fordulat alatt mérhető forgácsolóerők meghatározásának lépése helyett külön-külön vizsgálja meg mindegyik fordulatban a fellépő erőket.

3.2.1. A NÉGYSZÖGJEL VIZSGÁLATA

A kiértékelés első lépéseként a mérés során alkalmazott jelenlétszenzor négyszögjellel foglalkoztam. A LABView beépített függvényei segítségével meghatároztam a periódusidőt és a négyszögjel túlfutását jellemző Overshoot értéket. Az erre alkalmazott függvény a Timing and Transition Measurements néven található meg. Az Overshoot jelenség értelmezését segítő ábra a 26. ábra:

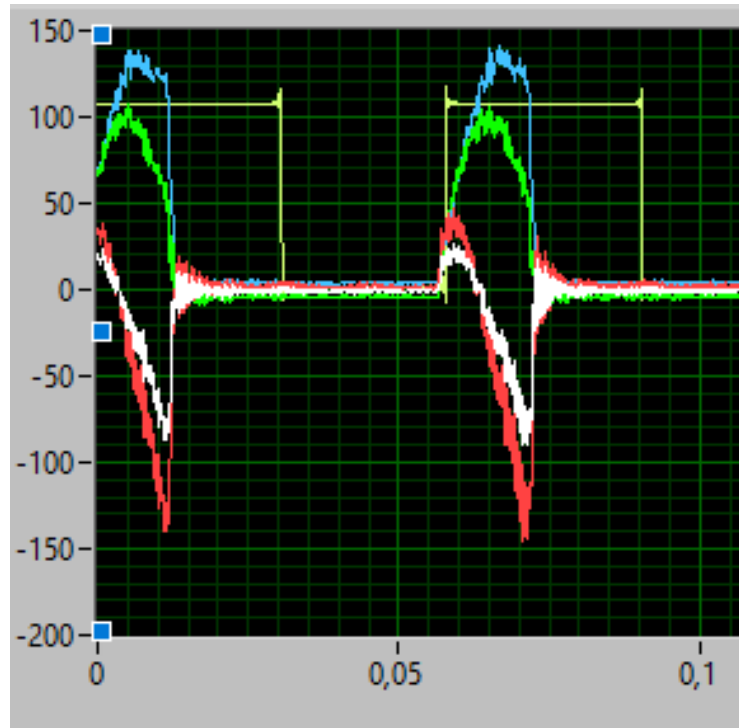


26. ábra: Az overshoot a jel felső értékén történő „túllendülés”

Az overshoot értékének kiszámítása ahhoz volt szükséges, hogy a szerszám belépéseinek időpontját meg tudjam határozni. A belépések számításához szükséges volt még a jelközépszint meghatározására, ehhez a LABView Amplitude and Levels függvényét alkalmaztam, ahol is a „high state level” és a „low state level” kimenetek, vagyis a jel felső- és alsó értékeinek számtani közepét vettem. Az adatsorból kigyűjtöttem azokat az adatokat, amelyek értéke nagyobb az előzőnél, valamint meghaladják a jelközépszint értékét. Ezen adatoknak az adatsorban vett sorszáma a szerszám belépésének jelenlétszenzor által meghatározott helye. Ezen táblázaton visszafelé végighaladva kivonva egymásból az értékeket, megkaptam, hogy melyik fordulatban hány adat került rögzítésre. Ezek átlagát és szórását kiszámítottam a LABView Deviation and Variance függvényének segítségével, amely korrigált tapasztalati szórást számol.

3.2.2. A SZERSZÁM KILÉPÉSÉNEK MEGTALÁLÁSA AZ ADATSORBAN

Mint azt a mérési elrendezés ismertettem, az egyik főirányhoz tartozó erőértékeket több kimenetből származtathatóak, a nyers adatok tehát a következőképpen néznek ki (27. ábra):



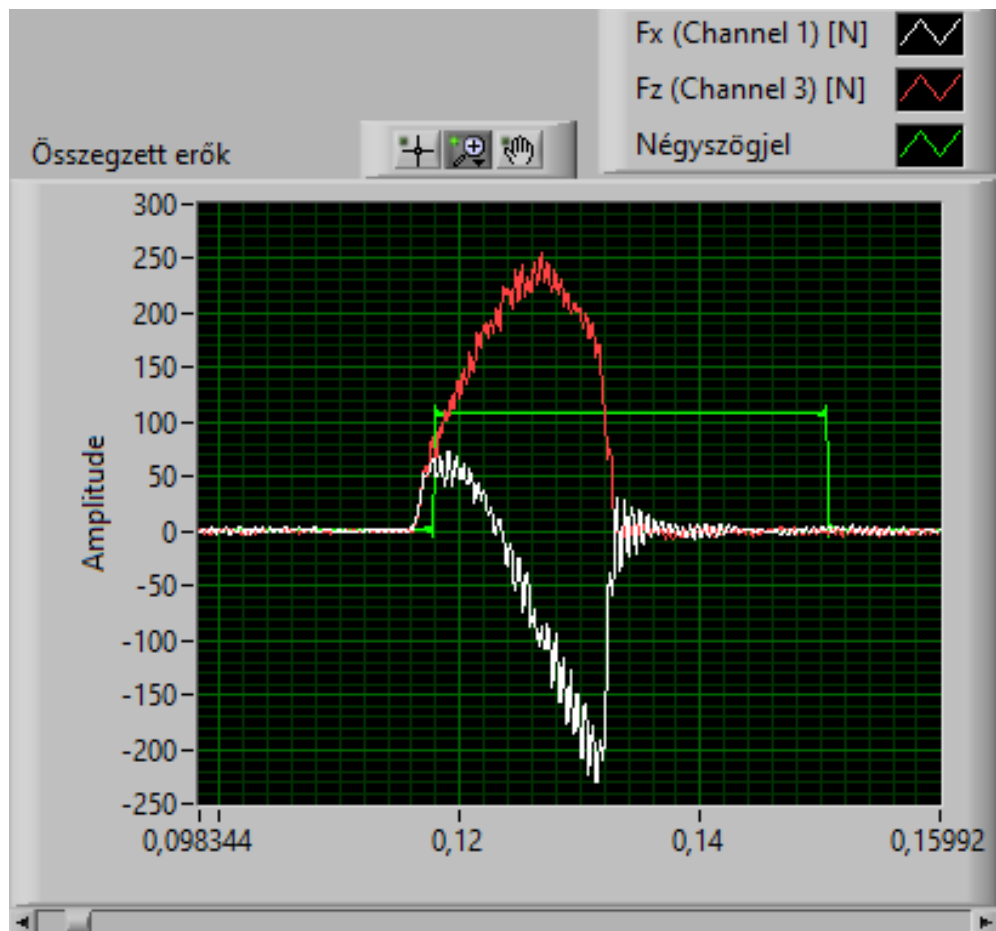
27. ábra: A nyers bemenő adatok a mérésből

Látható, hogy azonos jellegű erőket rögzített a rendszer, így ezeket összeadva képeztem a nyers bemenő erőadatokat (3. és 4. egyenlet)

$$F_x = F_{x1} + F_{y2} \quad (3)$$

$$F_y = F_{y1} + F_{y2} \quad (4)$$

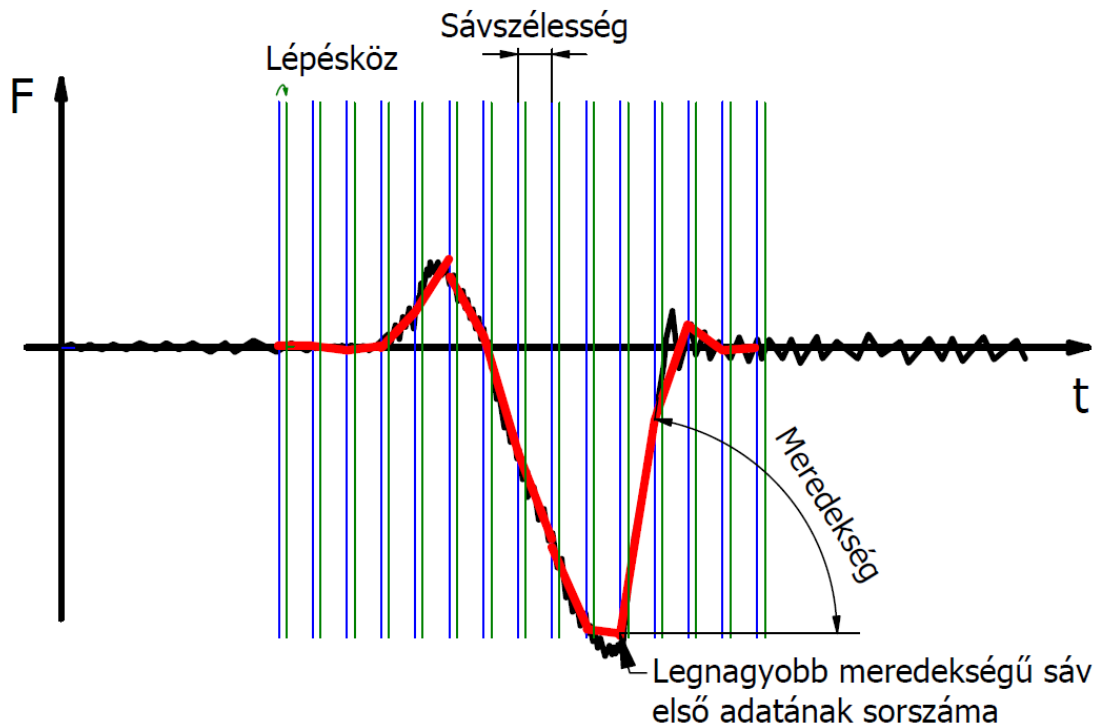
A rögzített erőértékek között a szerszám kilépése az ellenirányú marás jellege miatt jobban észrevehető, mint a szerszám belépése, mivel a szerszám belépésekor a fogás, amit a szerszám vesz, 0 értékről változik az élenkénti előtolás értékévé (félátmérős megmunkálás esetén). A 28. ábrán láthatók az adott irányba (x és y) összegzett rögzített erőértékek egy fordulatban:



28. ábra: Egy fordulaton belül rögzített erőértékek

Az összegzett adatokon látható, hogy a négyszögjel és a szerszám vélhető belépése között bizonyos mértékű eltolódás található. A négyszögjel azonban ettől eltekintve összerendelhető az erőadatokkal, hiszen a fordulatonként rögzített adatok megegyeznek mindkét jelben, a kiértékelés további részében ezt használtam ki.

A kiértékelés során a szerszámkilépés meghatározásához egy kézzel megadható szélességű sávot alkalmaztam, amely egyesével végigmegy az adatsor adatain, a sávszélességét megőrizve. Ezen a sávon belül a LABView Linear Fit nevű függvényét használva egyenest illesztettem az adatsorra, majd kigyűjtöttem az illesztett egyenesek meredekségét. A 29. ábra segít ezt szemléltetni:



29. ábra: A merekségmeghatározó sávszélesség. Rózsaszín jelöli az illesztett egyenest, ezen egyenesek mereksége került kigyűjtésre

Az erőadatsort a négyszögjelből meghatározott fordulatonként rögzített adatszámokat tartalmazó táblázat alapján szétbontottam egy-egy fordulatra, majd ezen belül a legnagyobb merekségű sáv sorszámát tekintettem a szerszám kilépésének.

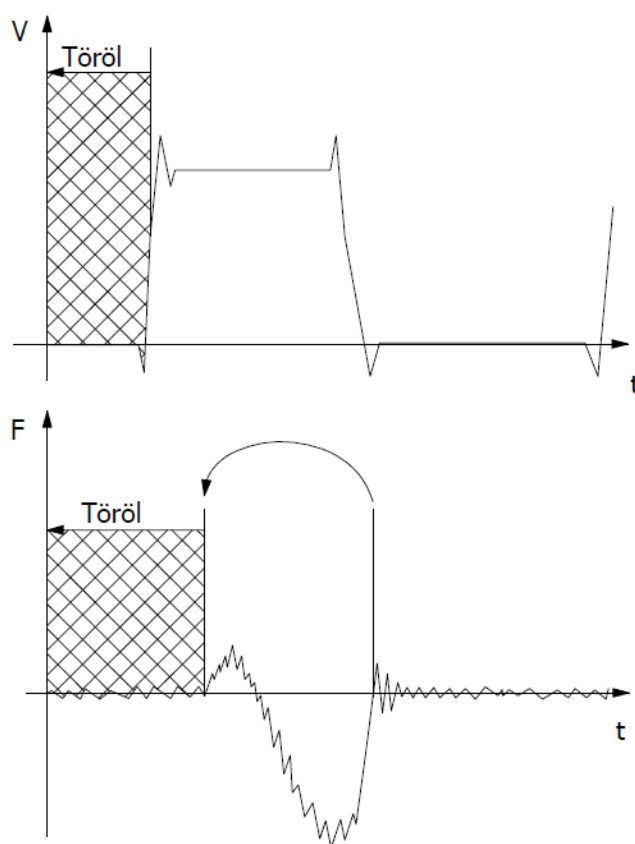
3.2.3. A SZERSZÁM BELÉPÉSE

A mérés során az erőmérő szenzorok és a jelenlétszenzor szimultán végezték a mérést, azonban a kettő jel között némi időbeli eltolódás tapasztalható, mely nem nagyobb, mint egy fordulat periódusideje. Az adatsorok összerendelésénél azt használtam ki, hogy ezek alapján elegendő az első kiértékelendő fordulatot pontosan összeilleszteni, a többi fordulathoz tartozó mérési adatok emiatt megfeleltethetők egymásnak.

Az erődiagramon látható belépést a szerszám kilépéséből közvetett módon számítottam ki, a korábban kiszámított fordulatonként rögzített adatszámok segítségével. A négyszögjel és az erők összeillesztése a következőképpen történt:

A négyszögjelek esetén az első teljes fordulathoz tartozó négyszögjel felfutása előtt kitöröltem az adatsorból az összes azelőtt elhelyezkedő adatot.

Az erődiagramon a belépés meghatározásakor az első teljes fordulatban korábban kiszámított kilépési helyből az első teljes fordulathoz tartozó adatszám negyedét kivontam, majd ezen névleges belépési hely előtt kitöröltem minden adatot az adatsorból, ezzel azonos kezdőpontról indítva a négyszögjel felfutását és a szerszám belépését. Később a transzformációnál azonban látszott, hogy a pontos belépést az erődiagramban nem mindig találta el ez a módszer, ezért kézzel korrigálhatóvá tettem, a programban egy numerikus kontrollként szerepel. A korrekció szükségességének lehetséges okaira az eredmények ismertetésekor visszatérek. A folyamat megértését könnyíti a 30. ábra:



30. ábra: A szerszámbelépés helyének megtalálása az adatsorban

3.2.4. A TRANSZFORMÁCIÓ

A kísérlet során a szerszám belépését tekintettem 0° -os szöghelyzetnek. A rögzített adatsorba beillesztettem egy szögértékeket tartalmazó oszlopot. A szöghelyzetek számításakor fontos volt, hogy minden szerszámbelépéskor a szögelfordulás 0° -ról induljon. A szöginkremens megválasztásához az adott fordulatban rögzített adatszámmal arányosan osztottam fel a teljes fordulatot (5. egyenlet)

$$\varphi_{i,j} = j * \frac{2\pi}{n_i} \quad (5)$$

A transzformáció során a rögzített erőértékek a 6. és 7. egyenletbe kerültek behelyettesítésre, ezzel a munkadarabra ható erők helyett megkaptam a szerszám élére ható erőket:

$$F_c = -\sin\varphi \cdot F_x + \cos\varphi \cdot F_y \quad (6)$$

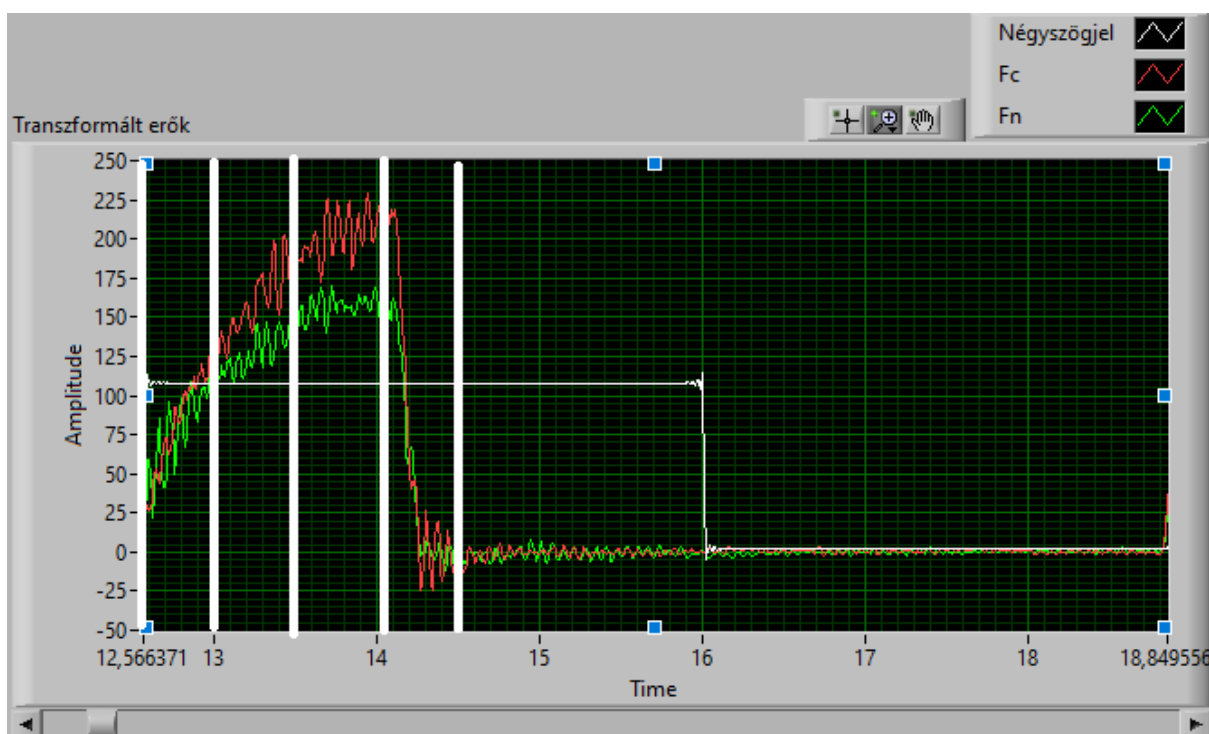
$$F_n = \cos\varphi \cdot F_x + \sin\varphi \cdot F_y \quad (7)$$

Ahol az erők a 17. ábrán látható erőkomponensek.

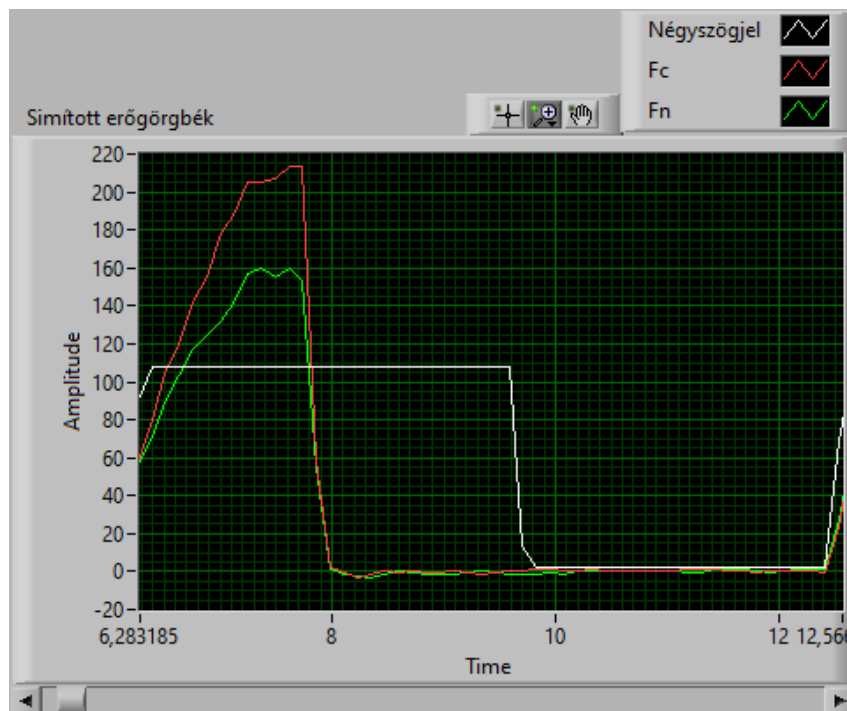
3.2.5. AZ KILENGÉSEK SIMÍTÁSA AZ ADATSORON

Mivel a megmunkálás során jelentős ingadozások tapasztalhatók a rögzített adatokban, ezért szükségesnek ítélttem, hogy ezeket a diagramokat „kisimítsam”, így a transzformált erőket ismét sávokra bontottam, azonban a meredekségmérő algoritmustól eltérő módon:

Jelen esetben az adatsor egyszerű részekre bontásáról van szó, melyeken belül a rögzített erők átlagát vettem a LABView Mean függvényét alkalmazva. A szétbontást szemlélteti a 31. ábra, a simított ábrát pedig a 32. ábra:



31. ábra: Az adatsor részekre bontását (túlzóan) szemléltető ábra



32. ábra: A simított erőgörbék a részekre bontás után

3.2.6. A RÉTEGVASTAGSÁG MEGHATÁROZÁSA

A rétegvastagságok meghatározását két módszer segítségével végeztem el. Egyik esetben a körívvel történő közelítést alkalmaztam, másik esetben a pontos, hurkolt ciklois pályát. Póka György és mtsai. [23] egy kutatásban a közelítés és a pontos pálya közötti eltéréseket vizsgálták, tapasztalataik szerint lényeges eltérés akkor észlelhető a körívvel való közelítéshez képest, ha a szerszámsugara lényegesen nagyobb az élenkénti előtolásnál. Mérésem során a szerszám sugara 8(mm), az élenkénti előtolás legnagyobb értéke pedig 0,16(mm). A kiértékelési módszer továbbfejlesztései közé tartozik a szerszámrezgés és kihajlás hatásainak vizsgálata is, melyhez szükséges a pontos pálya kiszámítása, ezt előkészítendő végeztem el a pontos pálya leírását.

A körívvel való közelítés képlete a 8. egyenletben látható:

$$h = f_z \cdot \sin(\varphi) \quad (8)$$

A hurkolt cikloissal leírható szerszámpálya programozásához a Maple matematikai szoftvert alkalmaztam. Ehhez először a korábban meghatározott szögértékeket exportáltam egy fájlba, amelyet beolvastattam a Maple-be. Ezután felírtam egy „balra” haladó szerszám egyenletét (9. egyenlet).

$$w = I \cdot R \cdot e^{I \cdot \varphi} - r \cdot \varphi \quad (9)$$

Ahol R a megmunkáló szerszám sugara (D=16 mm esetén 8 mm), r a szerszám gördülőkörének sugara, φ pedig a szerszám szögelfordulása, I pedig a komplex szám.

A szerszám gördülőkörének kerülete a megmunkálás során alkalmazott fordulatonkénti előtolás (amely egyélű megmunkálás esetén megegyezik az élenkénti előtolással) értékével, innen számítható a gördülőkör sugara (10. egyenlet).

$$r = \frac{f_z}{2 \cdot \pi} \quad (10)$$

A leválasztott rétegvastagság meghatározásához fel kell írni egy olyan egyenes egyenletét, amely a 11. egyenletben megadott ciklois pályával azonos fázisban forog, mindössze egy fordulatnyi perióduskülönbséggel.

$$W = I \cdot u \cdot e^{i \cdot \psi} - r \cdot \psi - 2 \cdot r \cdot \pi \quad (11)$$

Ahol u az origóból kiinduló egyenes paramétere, ψ az egyenes forgásszöge, i a komplex szám.

A rétegvastagság értékét a hurkolt ciklois, valamint a hurkolt cikloishoz képest egy fázissal eltolt, de azonosan „forgó és haladó mozgást végző” egyenes metszéspontja fogja adni. Ehhez először a „ w ” és a „ W ” komplex függvények képzetes részét egyenlővé téve, majd meghatározva az így kapott egyenlet gyökét kaptam a 12. egyenletet.

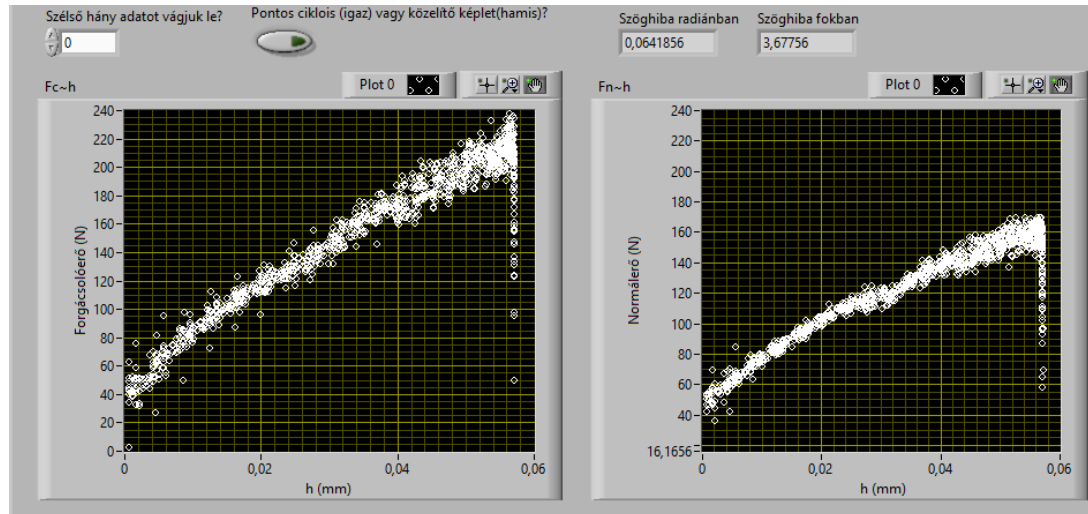
$$\Phi = \arccos\left(\frac{1}{8} u \cdot \cos(\psi)\right) \quad (12)$$

Ezt a „ Φ ” értéket behelyettesítve a „ w ” és „ W ” függvények valós részének különbségébe, majd kapunk egy bonyolult egyenletet, amelyet nem lehet implicit módon megoldani, csak numerikus módszerekkel. Ezért a már korábban Excel segítségével kiszámolt szöghelyzetek értékét a Maple szoftverrel beolvastattam, majd azok segítségével kiszámoltattam a rétegvastagságot. A ciklois pálya és az egyenes metszéspontja azonban azt az értéket adja meg, amely az egyenesből „marad”, ha az egyenes végét lemetszi a ciklois pálya, ezért a megmunkált rétegvastagság értéke a szerszám sugarának és ennek a „maradék” u értéknek a különbsége (13. egyenlet).

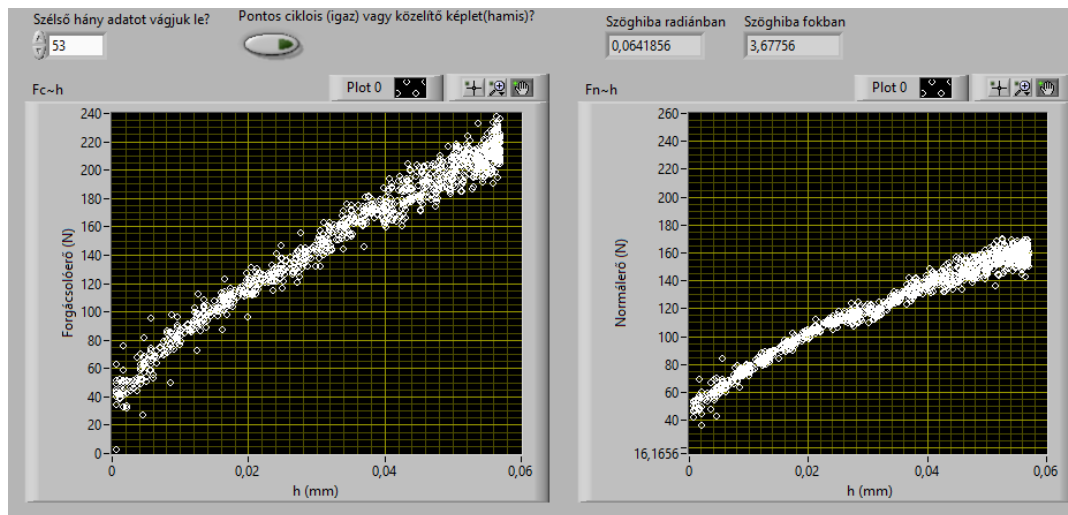
$$h(\varphi) = R - u(\varphi) \quad (13)$$

3.2.7. AZ ERŐK ÉS ERŐÁRÁNYOK ÁBRÁZOLÁSA

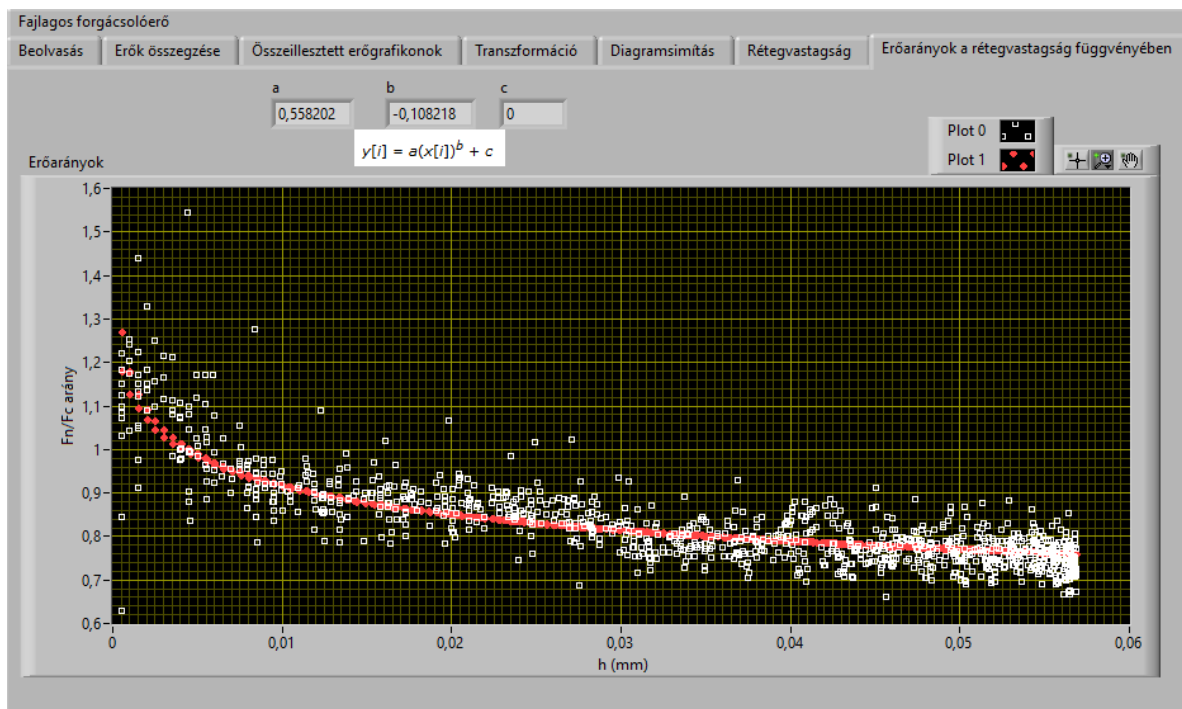
A rétegvastagságok függvényében ábrázoltam a szerszámmra ható erők értékeit (33. ábra). Ezek jobb oldalán látható, hogy a kilépés utáni alacsonyabb értékek benne maradtak az adatsorban. Ezek kiszűrése után a hányadosát képeztem a normál irányú és a forgácsolósebesség-irányú erőkomponenseknek, majd ezt is ábrázoltam a rétegvastagság függvényében. (34. és 35. ábra)



33. ábra: A forgácsolósebesség-irányú, valamint a normálirányú erők a rétegvastagság függvényében



34. ábra: Az erődiagramok szűrés utáni állapota



35. ábra: Az F_t/F_n erőarány a rétegvastagság függvényében

Az erődiagramok szűrése után képzett erőarány-diagramon látható értékekre illeszttem egy regressziós görbét a LABView „Power fit” beépített függvényének segítségével. Az élre ható erők vizsgálatakor az élre normális irányban ható erők viszonyát már Dib és mtsai. [21] is vizsgálták. Feltételezésem szerint a minimális rétegvastagsággal szoros összefüggésben állhat az a pillanat, amikor a normális irányú és a tangenciális irányú erőkomponensek azonos értéket vesznek fel. Továbbá több cikkben is találkoztam azzal a feltételezéssel, miszerint a minimális rétegvastagság értéke a szerszám-csúcssugarának valamely konstansszorosával egyezik meg. A Büttner és mtsai. [11] kutatásában összeszedett adatok alapján ez a konstans acélok esetén 0,22 és 0,36 között lehet, alumínium ötvözetek esetén pedig 0,23-ra becsülhető. Így az ezen rétegvastagságokhoz tartozó feltételezett minimális rétegvastagságértékeket is kiszámítottam (a kísérlethez használt szerszám csúcssugara $r_\beta=25(\mu\text{m})$). (14-15. egyenlet):

$$h_{\min Al} = 0,23 \cdot 25 = 5,75(\mu\text{m}) \quad (14)$$

$$h_{\min Acél} = 0,3 \cdot 25 = 7,5(\mu\text{m}) \quad (15)$$

3.2.8. HIBASZÁMÍTÁS

A rögzített rétegvastagság értékek hibaforrásának az adatsor simítását tekintettem. Ez a hiba közvetlenül a rögzített szögértékekre van hatással, ezért a rögzített rétegvastagságok kigyűjtése során a szerszám szöghelyzetét is rögzítettem, majd az eredő hiba felét kivontam és hozzáadtam a szögértékhez, hogy a hibaszáv két szélét meghatározzam. Az eredő szöghibát a 16. egyenlet szerint számítottam:

$$\sigma = \frac{n_{simítás}}{2} \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot dt \quad (16)$$

Mivel ezt a programban adatszámokként kell megadni, ezért ezt a sáv szélességet megszoroztam a szögsebességgel, majd az időléptékkel. Végül a σ hibasávval kiszámoltam a szögek szélsőértékeit (17. és 18. egyenlet):

$$\varphi_{hjell_max} = \varphi_{hjell} + \frac{\sigma}{2} \quad (17)$$

$$\varphi_{hjell_min} = \varphi_{hjell} - \frac{\sigma}{2} \quad (18)$$

Végül az így kapott szög szélsőértékeket együtt kezeltem a rögzített jellegzetes réteg vastagság értékekkel és ezeket ábrázoltam az eredmények diagramjain.

Az Excel a hibasávok kijelzésekor a hibák abszolútértékét kéri be, ezek kiszámítása a 19. és 20. egyenlet szerint történtek:

$$h_{felsőhiba} = |f_z \cdot \sin(\varphi_{hjell_max}) - h_1| \quad (19)$$

$$h_{alsóhiba} = |f_z \cdot \sin(\varphi_{hjell_min}) - h_1| \quad (20)$$

3.2.9. A PONTOS ÉS KÖZELÍTŐ KÉPLET ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A réteg vastagság meghatározásának közelítő képlettel történő számítását is elvégeztem, azt vizsgálándó, hogy a jelen kísérlet esetén tapasztalható-e valamilyen növekmény a két számítási mód közötti eltérésben az előtolás növelése mellett. Ezt az összehasonlítást a legpontosabb mérési sorozat adatain megtéve a következő képletbe helyettesítettem be (21. egyenlet):

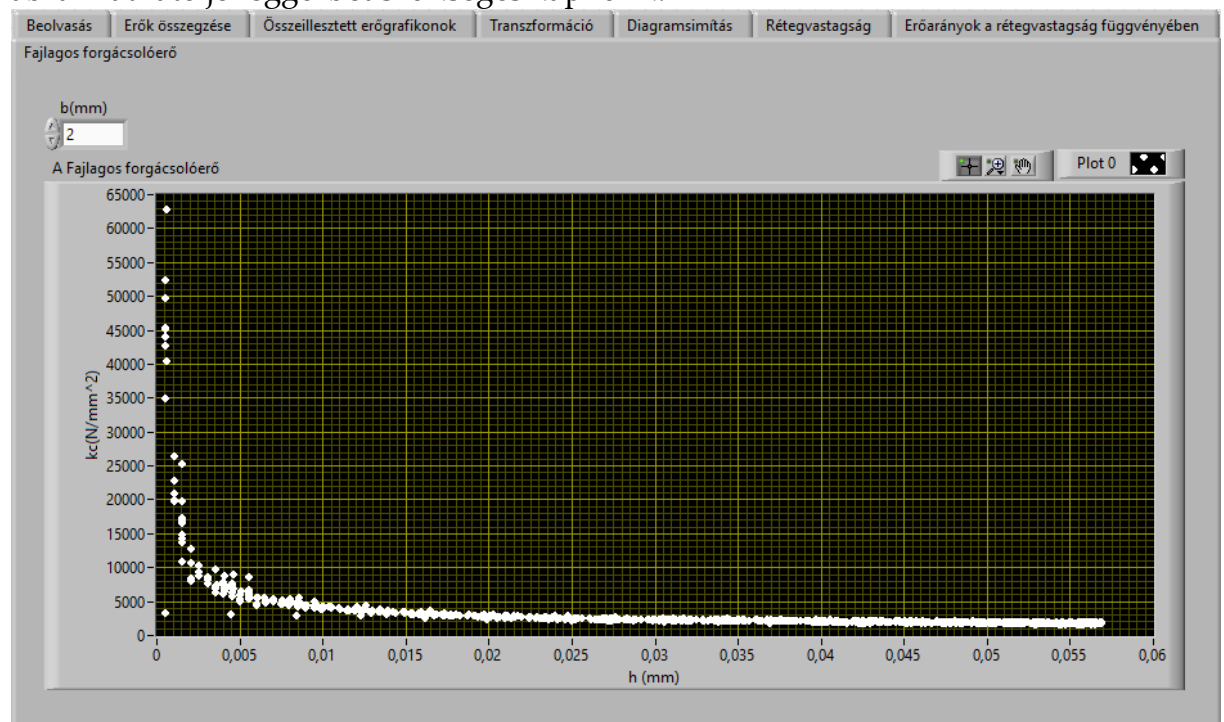
$$\vartheta = \frac{h_{1,ciklois} - h_1}{h_{1,ciklois}} \cdot 100\% \quad (21)$$

3.2.10. A PROGRAM HASZNÁLATA LÉPÉSEKRE BONTVA

A kiértékelő program használatát tehát 10 lépésre lehet lebontani:

1. A mérési adatok beolvasása után megadjuk az adott mérés során érvényes élenkénti előtolást, valamint ellenőrizzük, hogy a mérés sorszáma 1 és 5, valamint 6 és 10 közé esik-e, ugyanis az erő irányja a munkadarab kialakítása miatt különböző ezen két esetben, az erre vonatkozó gombot a program paneljén benyomjuk.
2. Az „erők összegzése” fülön a meredekségellenőrzőnek megadjuk a sáv szélességet, amellyel szeretnénk, hogy a szerszám kilépését vizsgáljuk. Ha nem teljes az első fordulat erőkaraktisztikája, a két megfelelő gomb segítségével levághatjuk az első (csonka) fordulatot az adatsorból. Ugyanezt megtehetjük a négyszögjellel is. Az „Összeillesztett erőgrafikonok” fülön ellenőrizzük, hogy a négyszögjel és az erődiagramok összeillesztésre kerültek-e.

3. A „Transzformáció” fülön megadhatók a transzformáció egyenletei, valamint elvégezhető a belépés adatsorhoz illesztésének korrekciója.
4. A „Diagramsimítás” fülön megadható a rezgésszűrés sáv szélessége.
5. A „Rétegvastagság” fülön a kilépéskor rögzített erőértékek levágása, valamint a módszertan megválasztása történik. (Pontos ciklois pálya vagy közelítő képlet alkalmazása).
6. Az „Erőarányok a rétegvastagság függvényében” fülön a diagramon látható az illesztett görbe, fölötte pedig annak egyenlete. Itt megtörténik a névleges rétegvastagsághoz tartozó erőarány és az $F_n/F_c=1$ -hez tartozó rétegvastagság leolvasása.
7. A „Fajlagos forgácsolóerő” fül egy utólagos ellenőrzésként szolgál, hogy pontosnak mondható-e a kiértékelés. Itt a mérőhatás jelenségének igazolásaként a 36. ábrán látható jellegzőgörbét szükséges kapnunk:



36. ábra: A fajlagos forgácsolóerő a rétegvastagság függvényében

A fajlagos forgácsolóerő ábrázolásakor a forgácsolósebesség irányú erőkomponens kerül elosztásra a forgáskeresztszettel. Ennek képlete a 22. egyenlet:

$$k_c = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{h \cdot b} \quad (22)$$

8. A 6. pontban kiértékelt adatokat egy táblázatba gyűjtve, majd a forgácsolási paraméterek függvényében diagramként ábrázolva (hibákkal együtt) megkapjuk a paraméterfüggéssel kapcsolatos diagramokat.

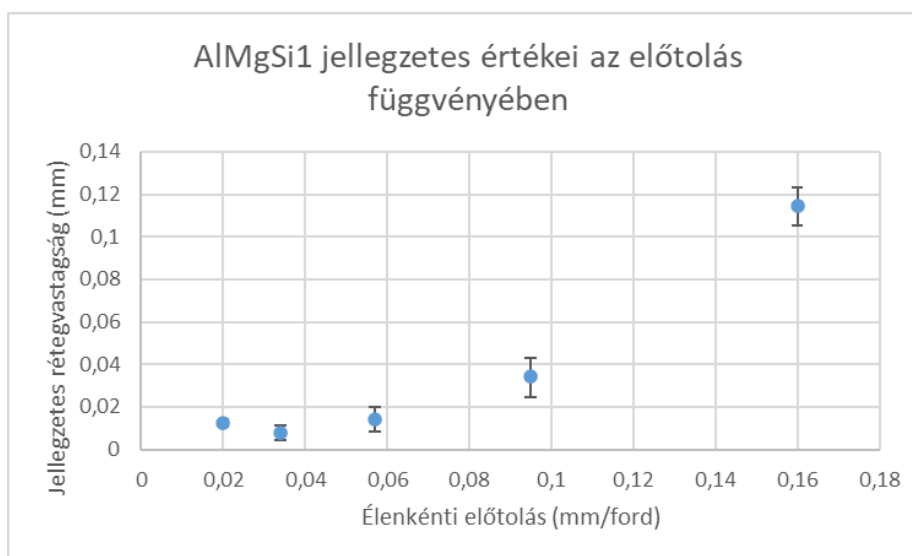
9. A közelítő képlet és a ciklois pálya összehasonlítását az előtolás függvényében lehet elvégezni, ez esetekben a kiértékeléseket azonos paraméterekkel szükséges elvégezni mindkét rétegvastagság-számítási módszerrel.
10. Az értékek legpontosabb leolvasásához alkalmazható egy táblázat, amely az „Erőarányok a rétegvastagság függvényében” fülön látható diagram adatait tartalmazza, itt az általunk jellegzetesnek ítélt rétegvastagsághoz legközelebb eső értékeket találhatók.
11. Az így gyűjtött értékeket egy Excel-táblázatba gyűjtve, majd diagramként ábrázolva kaphatók a 4. fejezetben taglalt eredmények.

4. A KIÉRTÉKELÉS EREDMÉNYEI

4.1. A jellegzetes rétegvastagságok paraméterfüggései

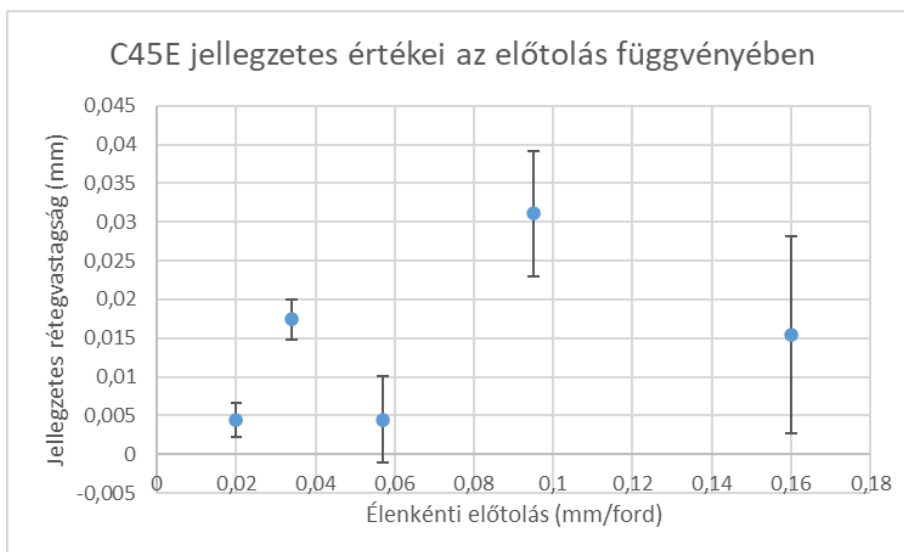
A kiértékelés sikeresen elvégezhető az AlMgSi1 és a C45E anyagokra, melyekre a következő eredményeket kaptam:

A minimális rétegvastagság paraméterfüggésével kapcsolatban a korábbi eredmények, melyek szerint az előtolás függvényében exponenciális növekmény tapasztalható a vasalt anyaghányad és az előtolás között, az AlMgSi1 kísérletsorozatában alátámasztásra került. Ezt szemlélteti a 37. ábra:



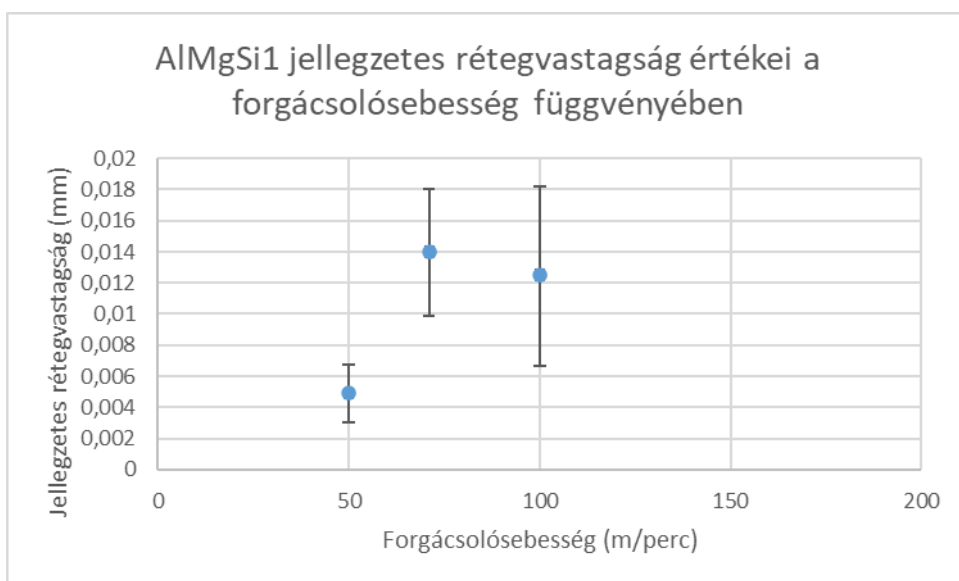
37. ábra: A jellegzetes rétegvastagság értéke az előtolás függvényében (AlMgSi1)

Ugyanez az eredmény a C45E esetében nem mondható ki ilyen biztosan, azonban növekmény tapasztalható az ottani adatokban is (38. ábra):

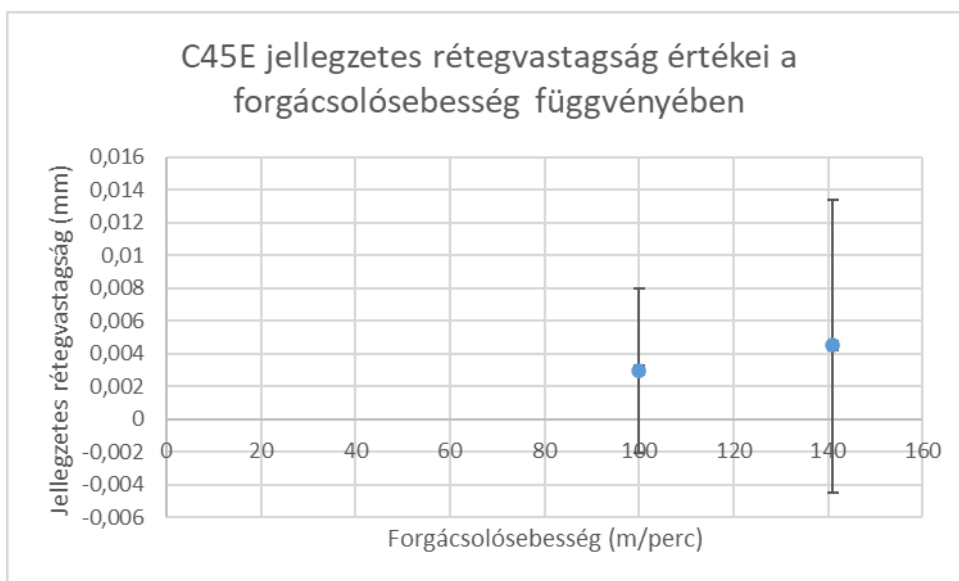


38. ábra: A jellegzetes rétegvastagság értéke az előtolás függvényében (C45E)

A forgácsolósebesség függvényében főleg a kevés rendelkezésre álló adat miatt pontos tendencia szintén nem említhető, de a korábbi eredményekhez hasonlóan egy növekmény tapasztalható a paraméter függvényében (39-40. ábra):



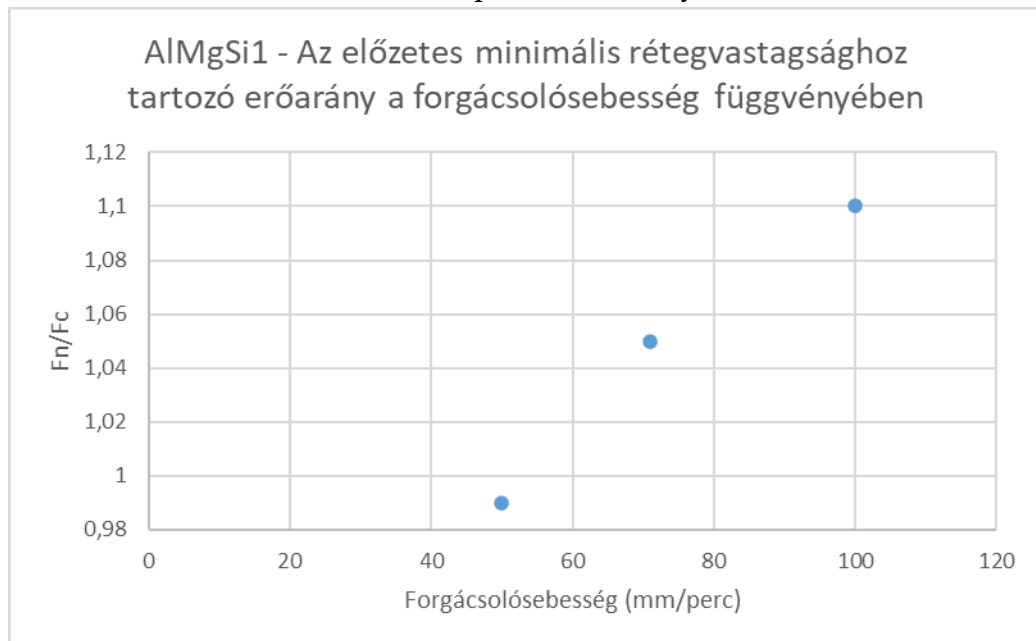
39. ábra: A jellegzetes rétegvastagság értéke a forgácsolósebesség függvényében (AlMgSi1)



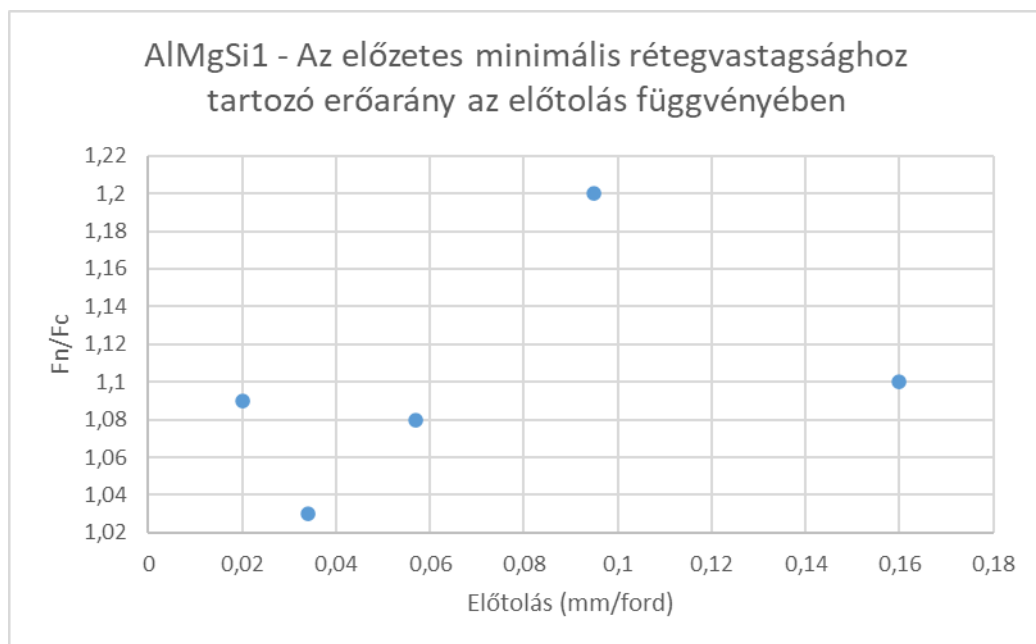
40. ábra: A jellegzetes rétegvastagság értéke a forgácsolósebesség függvényében (C45E)

Látható ezeken 37, 38 és 39. ábrákon, hogy a paraméterek növelésével nemcsak a jellegzetes rétegvastagságok, de az adatok tartománya is lényegesen megnő. Ezek szerint a kiértékelés hibája meglehetősen nagy ezen esetekben, mely okozhatja azt, hogy a tendenciára pontos megállapítást nem tehetünk. A hibasávok negatív értékre történő „átnyúlása” a simítási módszer miatt képződő szöghiba nagysága okozza, ezért egy új kísérlet során egy másik módszert szükséges alkalmazni az adatsorban levő rezgések szűrésére. Jelen kísérlet során a LABView FFT-gráfja nem mutatta ki a számomra megfelelő frekvenciájú rezgést, emiatt alkottam meg ezt a módszert, mely sajnos nem reális eredményeket is produkált.

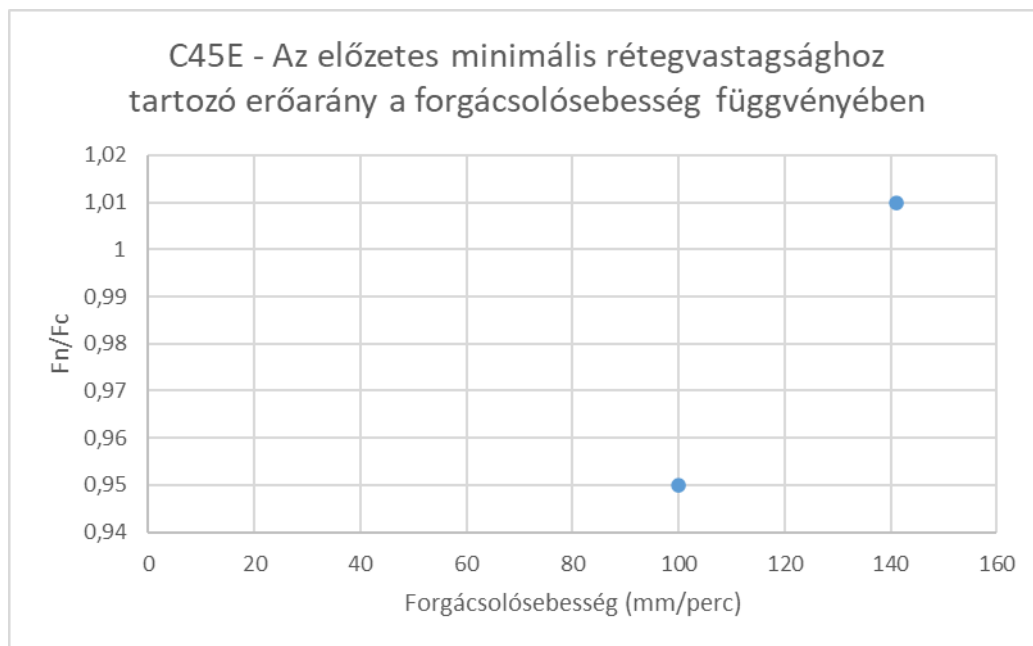
Az előzetesen meghatározott minimális rétegvastagsághoz tartozó erőarány értékek gyűjtésekor a 41, 42, 43 és 44. ábrákat kaptam eredményül:



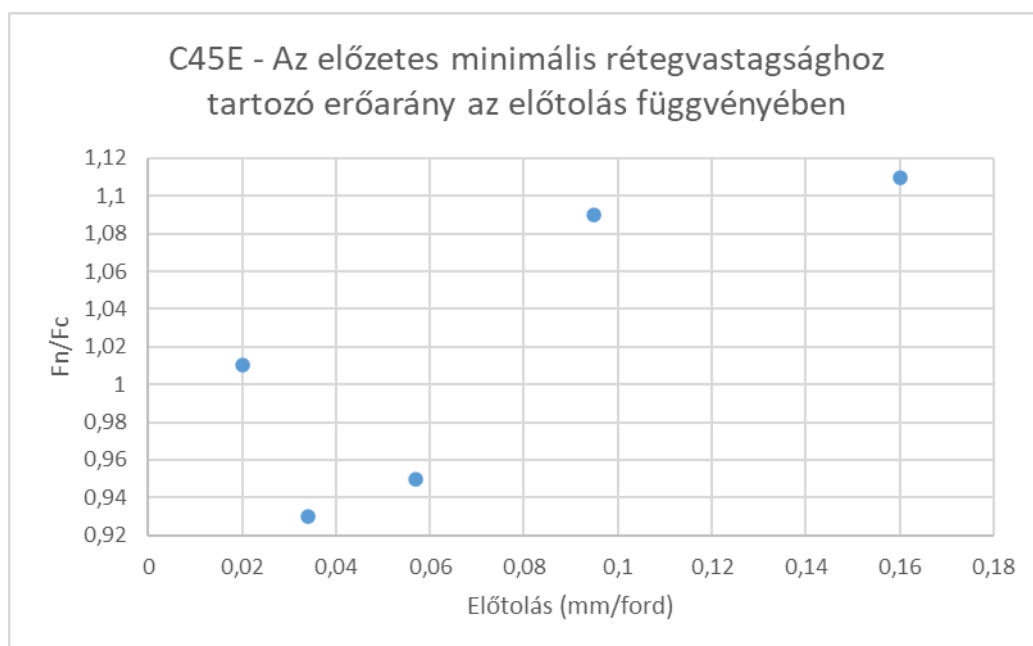
41. ábra: Az előzetes minimális rétegvastagsághoz tartozó erőarány a forgácsolósebesség függvényében (AlMgSi1)



42. ábra: Az előzetes minimális rétegvastagsághoz tartozó erőarány az előtolás függvényében (AlMgSi1)



43. ábra: Az előzetes minimális rétegvastagsághoz tartozó erőarány a forgácsolósebesség függvényében (C45E)

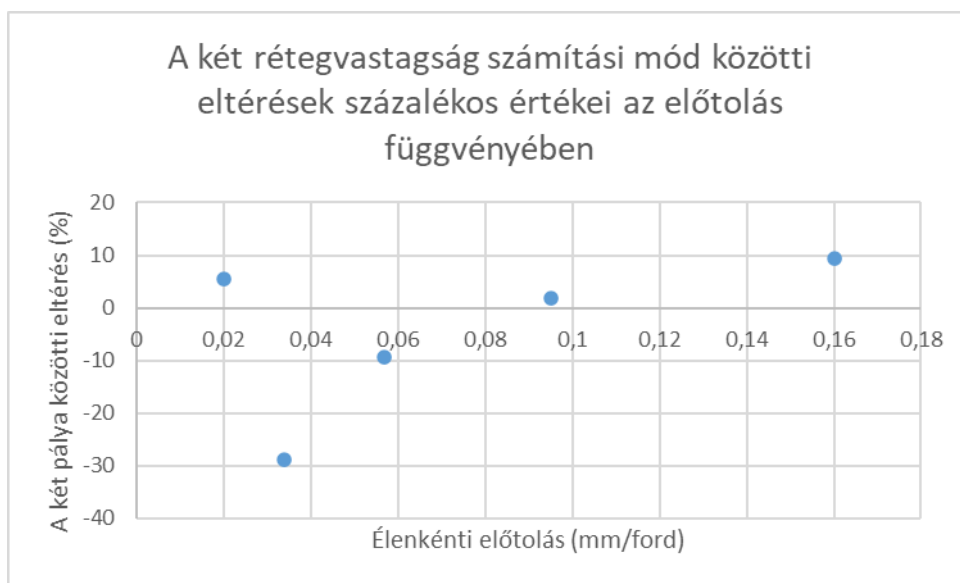


44. ábra Az előzetes minimális rétegvastagsághoz tartozó erőarány az előtolás függvényében (C45E)

Az előzetes minimális rétegvastagság esetén jelen lévő forgácsolóerők arányát tekintve konkrét tendencia nem írható le, azonban annyi bizonyosan elmondható, hogy ezen tartományokban ezek az értékek valóban 1 körül mozognak, mely szerint valóban ilyen erőviszonyok között haladja meg a megmunkálás a minimális rétegvastagságot.

4.2. A ciklois pálya és a közelítő képlet

A ciklois pálya és a közelítő képlet összehasonlítását az alumínium megmunkálása során végeztem el, ugyanis ezen értékek tűntek a legpontosabbnak. Az összevetés során a közelítő képlettel leolvasott jellegzetes rétegvastagság értékeinek százalékos eltérését ábrázoltam a pontos pályával számolt jellegzetes rétegvastagságokhoz képest. Ezt szemlélteti a 45. ábra:

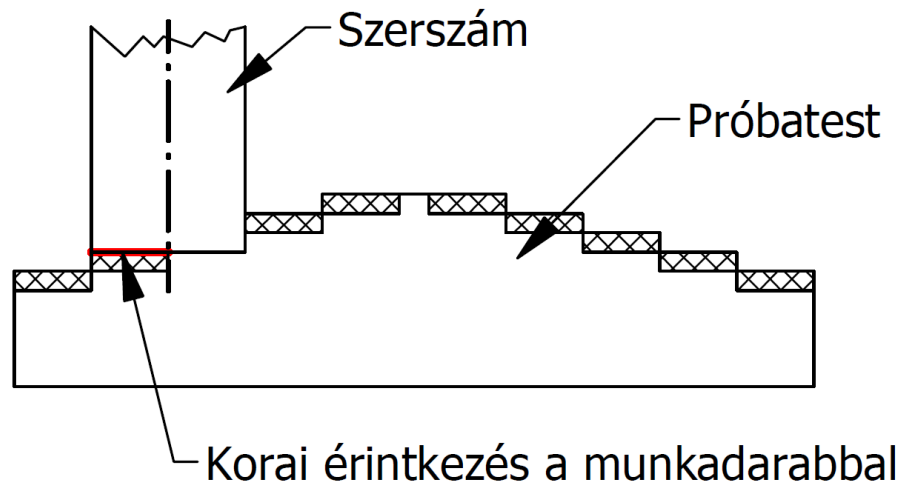


45. ábra: A pontos és a közelítő képlet közötti százalékos eltérés

A pályák közötti eltérések vizsgálatakor a második pont egy kiugró értéknek számít, melyet a mérés hibája okozhat, ugyanis a szakirodalmak alapján a minimális rétegvastagság értéke nem csökkenhet az előtolás függvényében, ahogy ezt a 28. ábrán is láthatunk, így ezt a következtetések levonása során elhanyagolom. Látható tehát az ábrán, hogy ilyen nagy szerszámsugár-előtolás viszonyok esetén az eltérés minimális, 10% alatt van, amely mikronos nagyságrendű forgács esetén elhanyagolható, ha makroméretű megmunkálást tekintünk. Mikromarás esetén ez az eltérés már nagynak mondható.

4.3. A hibás adatsorok

A kiértékelés során több adatsornál tapasztaltam azt, hogy vélhetően a szerszám ütése miatt a forgácsolás megkezdése előtt már karcolja a szerszám az anyagot, melynek következtében a jelenlétszenzor a szerszám 0° -os szöghelyzete előtt már jelet ad, így a négyszögjel bezavar a mérésbe. A jelenség fizikai megvalósulását szemlélteti a 46. ábra:



46. ábra: A korai forgácsolás fizikai megvalósulását szemléltető ábra

Az erőkarakterisztika ez esetekben a 47. ábrán látható:



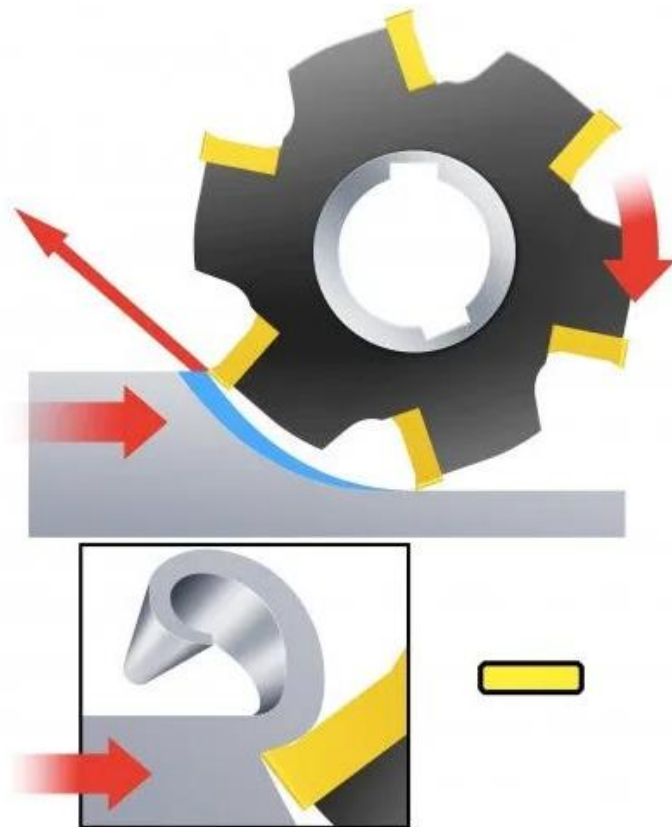
47. ábra: A megmunkálás korai bekezdése miatt adódó hiba

Bizonyos esetekben a program le sem futott, vélhetően akkor is ez a jelenség játszott közre, mely esetekben a LABView nem tudta kezelni a négyszögjelet. Az S960QL anyagú próbatest esetén ez a probléma ellehetetlenítette a kiértékelést, 2 esetben nem futott le a program, 6 esetben értelmetlen eredményre vezetett, egy esetben az

erőértékek nagymértékű ingadozása miatt nem a szerszámbelépés meghatározása sikertelen volt, és mindössze egy esetben sikerült elvégezni a meghatározott módszerrel a kiértékelést.

4.4. Mérési hibák okai

A mérés során a szerszámbelépés korrekciójának szükségességét az okozhatta, hogy a szerszám kilépésekor nem az erő abszolútértékben vett maximumáról változott hirtelen a mért erő, hanem először némileg csökkenésnek indult ez az érték. Ennek kiváltó oka az lehet, hogy amikor a kilépéshez közelít a forgácsolóél, már nagyon vékony anyagréteg tart ellen az élnek, amelyet kihajt maga előtt a szerszám. Ezt a jelenséget Sandvik ellenirányú marással kapcsolatos oktatóanyaga jól szemlélteti (48. ábra):



48. ábra: A kilépéskor kihajló forgács jelensége [24]

[<https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>]

Ezen jelenség okozhatja azt, hogy elmosódik a szerszám kilépésének határa az erődiagramban, ami megnehezíti a szerszámbelépés automatizált meghatározását ellenirányú marás esetén, ha nincs teljesen szinkronban a jelenlétszenzor és az erőmérő rendszer.

4.5. A kiértékelés paramétereit és a rögzített jellegzetes értékek

A mérési sorozat kiértékelését rögzítő táblázatokat ebben a fejezetben ismertetem. Ezen táblázatok tartalmazzák az adott táblázat leírásában ismertetett próbatesthez tartozó mérésekben alkalmazott forgácsolósebességet, fogankénti előtolást, a meredekségellenőrző sávszélességet, a diagram simításához alkalmazott sávszélességet, az első négyszögjelen látható belépést és az első erőjelen látható kilépés levágását „igaz” vagy „hamis” jelként, valamint az F-h diagramok (25-26. ábra) végéről levágott adatok számát oszloponként. (2. táblázat)

No.	v_c (m/min)	f_z (mm)	Meredekségellenőrző sávszél.	Simítás sáv- szél.	Belépés korrekci- ója	Négyszögjel vágás	Erőadat vágás	Levágott adatok száma
1	50	0,057	8	8	-2	hamis	igaz	53
2	71	0,057	8	13	-2	hamis	igaz	30
3	100	0,057	8	13	-9	hamis	igaz	40
4	141	0,057	-	-	-	-	-	-
5	200	0,057	-	-	-	-	-	-
6	100	0,02	13	14	-6	hamis	igaz	30
7	100	0,034	13	13	-3	hamis	igaz	40
8	100	0,057	10	13	-8	hamis	igaz	40
9	100	0,095	10	13	-5	hamis	igaz	20
10	100	0,16	7	10	-3	hamis	igaz	30

2. táblázat: Az AlMgSi1 anyagú próbatesthez tartozó kísérlet paramétereit

No.	v_c (m/min)	f_z (mm)	Meredekségellenőrző sávszél.	Simítás sáv- szél.	Belépés korrekci- ója	Négyszögjel vágás	Erőadat vágás	Levágott adatok száma
1	50	0,057	-	-	-	-	-	-
2	71	0,057	-	-	-	-	-	-
3	100	0,057	9	11	2	hamis	hamis	50
4	141	0,057	7	14	0	hamis	hamis	45
5	200	0,057	-	-	-	-	-	-
6	100	0,02	9	13	0	hamis	igaz	35
7	100	0,034	11	11	0	igaz	hamis	45
8	100	0,057	3	12	-5	hamis	igaz	50
9	100	0,095	8	11	-8	hamis	igaz	45
10	100	0,16	9	10	0	hamis	hamis	60

3. táblázat: A C45E anyagú próbatesthez tartozó kísérlet paramétereit

A 4. és 5. táblázat tartalmazza a mérési eredményeket foglalja össze, melyeket korábban diagramok formájában ismertettem, valamint itt láthatók a hibasávok számszerűsített értékei.

No.	h_1 (mm)	$F_n/F_c(h_{min})$ (-)	Felső hiba (mm)	Alsó hiba (mm)
1	0,0049	0,99	0,001819682	0,001824728
2	0,014	1,05	0,004072428	0,004150043
3	0,0125	1,1	0,005701743	0,005836629
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	0,0126	1,09	0,001664005	0,001823306
7	0,00775	1,03	0,00336038	0,003442412
8	0,0143	1,08	0,005593536	0,005744897
9	0,0342	1,2	0,009049716	0,00942211
10	0,114723	1,1	0,008537391	0,009269706

4. táblázat: Az AlMgSi1 anyagú próbatest kiértékelésének eredményei

No.	h_1 (mm)	$F_n/F_c(h_{min})$ (-)	Felső hiba (mm)	Alsó hiba (mm)
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	0,003	0,95	0,005007033	0,0050304
4	0,0045	1,01	0,008874363	0,008986208
5	-	-	-	-
6	0,0045	1,01	0,002148017	0,002204311
7	0,017408	0,93	0,002519317	0,002656257
8	0,0045	0,95	0,005547687	0,005591021
9	0,0312	1,09	0,007973799	0,008228636
10	0,0155	1,11	0,012717193	0,012816979

5. táblázat: Az AlMgSi1 anyagú próbatest kiértékelésének eredményei

A pontos és a közelítő képlettel számított rétegvastagság értékek közötti eltéréseket az 6. táblázat foglalja magába:

h_1 (mm)	$h_{1,ciklois}$ (mm)	ϑ (%)
0,0126	0,0133229	5,425995842
0,00775	0,006019	-28,75893005
0,0143	0,0130883	-9,257886815
0,0342	0,0348377	1,830488235
0,114723	0,126684	9,441602728

6. táblázat: Az AlMgSi1 6.-10. mérése szerinti eltérés a pontos és közelítő képletek között

5. ÖSSZEFOGLALÁS/EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

5.1. Eredmények

Jelen diplomadolgozat során egy korábbi mérési módszer továbbfejlesztése történt meg, mely során makroméretű ellenirányú marási kísérletek kiértékelésének újragondolását végeztem el. A szerszám fogásban léte alatt levő forgácsolóerők arányának segítségével következtetéseket vontam le a minimális rétegvastagság paraméterfüggését tekintve. A korábbi eredmény, melyek szerint az előtolás függvényében a minimális rétegvastagság növekszik az anyag hidegalakító vasalása által történt felkeményedésnek következtében igazolásra került az alumínium ötvözet alapanyagú munkadarabon végzett kísérlet kiértékelése során. Továbbá összehasonlításra került a rétegvastagság pontos pályával történő meghatározása a körívvel való közelítéssel. A jelenlegi eredmények szerint ez a különbség makroméretű megmunkálás esetén nem függ egyértelműen a forgácsolási paraméterektől.

5.2. Továbbfejlesztési javaslat

A kísérletsorozat során problémát okozott a munkadarab kialakításából adódó négy-szögjelhiba, melyet a próbatestek konstrukciós újratervezése megoldhat egy új kísérlet során. Egy új kísérleti összeállításban a szerszámkihajlás illetve szerszámrezgések gyorsulásmérővel történő vizsgálatával a szerszámhelyzet pontos meghatározása egy még pontosabb rétegvastagság számítási módra kínálhat lehetőséget. A kiértékelésen továbbá könnyíthet, ha az ellenirányú kísérlet előtt elvégzésre kerül egy kalibráló, egyenirányú megmunkálás is, amely során a négyyszögjel és az erők közötti eltolódás pontos meghatározása megtörténik.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] I. Biró és T. Szalay, „Extension of empirical specific cutting force model for the process of fine chip-removing milling”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 88, sz. 9, Art. sz. 9, febr. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8957-x.
- [2] A. Abeni, C. Cappellini, P. Serena Ginestra, és A. Attanasio, „Analytical modeling of micro-milling operations on biocompatible Ti6Al4V titanium alloy”, *Procedia CIRP*, köt. 110, o. 8–13, jan. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.06.004.
- [3] J. Bali, *Forgácsolás*. Budapest: Tankönyvkiadó Vállalat, 1985.
- [4] M. Malekian, M. G. Mostofa, S. S. Park, és M. B. G. Jun, „Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum”, *Journal of Materials Processing Technology*, köt. 212, sz. 3, Art. sz. 3, márc. 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.022.
- [5] M. Wan, D.-Y. Wen, Y.-C. Ma, és W.-H. Zhang, „On material separation and cutting force prediction in micro milling through involving the effect of dead metal zone”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 146, o. 103452, nov. 2019, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.103452.
- [6] X. Zhang, K. F. Ehmann, T. Yu, és W. Wang, „Cutting forces in micro-end-milling processes”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 107, o. 21–40, aug. 2016, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2016.04.012.
- [7] J.-H. Lee és A. A. Sodemann, „Geometrical Simulation of Chip Production Rate in Micro-EndMilling”, *Procedia Manufacturing*, köt. 26, o. 209–216, jan. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.029.
- [8] N. Jeyaparakash, C.-H. Yang, és D. R. Kumar, „Minimum cutting thickness and surface roughness achieving during micromachining of aluminium 19000 using CNC machine”, *Materials Today: Proceedings*, köt. 21, o. 755–761, jan. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.753.
- [9] S. N. B. Oliaei és Y. Karpát, „Investigating the influence of built-up edge on forces and surface roughness in micro scale orthogonal machining of titanium alloy Ti6Al4V”, *Journal of Materials Processing Technology*, köt. 235, o. 28–40, szept. 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.010.
- [10] Z. Dong, H. Wang, Y. Qi, X. Guo, R. Kang, és Y. Bao, „Effects of minimum uncut chip thickness on tungsten nano-cutting mechanism”, *International Journal of Mechanical Sciences*, o. 107790, szept. 2022, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107790.
- [11] H. Büttner és mtsai., „A comparison between micro milling pure copper and tungsten reinforced copper for electrodes in EDM applications”, *Precision Engineering*, köt. 60, o. 326–339, nov. 2019, doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.08.018.
- [12] A. Abeni, D. Loda, T. Özel, és A. Attanasio, „Modeling of cutting force in micro-end-milling process with experimental validation on additive manufactured Nickel-based superalloy”, *Procedia CIRP*, köt. 102, o. 222–227, jan. 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.09.038.

- [13] X. Liu, R. E. DeVor, és S. G. Kapoor, „An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, köt. 128, sz. 2, o. 474–481, máj. 2006, doi: 10.1115/1.2162905.
- [14] T. Mikołajczyk, H. Latos, D. Yu. Pimenov, T. Paczkowski, M. K. Gupta, és G. Królczyk, „Influence of the main cutting edge angle value on minimum uncut chip thickness during turning of C45 steel”, *Journal of Manufacturing Processes*, köt. 57, o. 354–362, szept. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.06.040.
- [15] F. B. de Oliveira, A. R. Rodrigues, R. T. Coelho, és A. F. de Souza, „Size effect and minimum chip thickness in micromilling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 89, o. 39–54, 0 2015, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001.
- [16] F. Schultheiss, S. Hägglund, V. Bushlya, J. Zhou, és J.-E. Ståhl, „Influence of the Minimum Chip Thickness on the Obtained Surface Roughness During Turning Operations”, *Procedia CIRP*, köt. 13, o. 67–71, jan. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.04.012.
- [17] I. Biró, T. Szalay, és N. Geier, „Effect of cutting parameters on section borders of the empirical specific cutting force model for cutting with micro-sized uncut chip thickness”, *Procedia CIRP*, köt. 77, o. 279–282, 0 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.09.015.
- [18] R. Kountanya és C. Guo, „An Uncut Chip Thickness and Surface Finish Model for Contour Turning with a Corner and Edge Radiused Insert”, *Manufacturing Letters*, köt. 33, o. 489–494, szept. 2022, doi: 10.1016/j.mfglet.2022.07.061.
- [19] P. Imre és B. István, „Minimálisan leválasztható rétegvastagság vizsgálata S960QL és C45E acélok ellenirányú marással történő megmunkálása során: Determination of minimum uncut chip thickness by means of conventional milling of S960QL, and C45E steels”, *Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT*, o. 187–190, ápr. 2021.
- [20] X. Jing, R. Lv, Y. Chen, Y. Tian, és H. Li, „Modelling and experimental analysis of the effects of run out, minimum chip thickness and elastic recovery on the cutting force in micro-end-milling”, *International Journal of Mechanical Sciences*, köt. 176, o. 105540, jún. 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105540.
- [21] M. H. M. Dib, J. G. Duduch, és R. G. Jasinevicius, „Minimum chip thickness determination by means of cutting force signal in micro endmilling”, *Precision Engineering*, köt. 51, o. 244–262, 0 2018, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.08.016.
- [22] S. Wojciechowski, M. Matuszak, B. Powalka, M. Madajewski, R. W. Maruda, és G. M. Królczyk, „Prediction of cutting forces during micro end milling considering chip thickness accumulation”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 147, o. 103466, dec. 2019, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.103466.
- [23] N. Póka, „MTMT2: Póka György et al. Ciklois szerszám pálya körrel történő közelítésének hibája a forgácsvastagság meghatározásánál. (2015) GÉPGYÁRTÁS 1587-4648 55 2 109-114”. <https://m2.mtmt.hu/api/publication/3091254> (elérés 2022. november 25.).

- [24] „Egyenirányú és ellenirányú marás összehasonlítása”, *Sandvik Coromant*.
<https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling> (elérés 2022. december 15.).

7. SUMMARY

Keywords: *minimum uncut chip thickness, size effect, conventional milling, specific cutting force, precision machining*

In today's modern economic competition, one of the biggest challenges is creating miniature parts for products with acceptable accuracy and high productivity. Since the most productive and most accurate production method is machining, the challenge is to utilize micromachining as much as possible for this use. The problems of micromachining occur when the size effect comes into play, which is when the cutting edge does not separate material from the part. During this process the lifecycle of the tools is compromised. In order to choose the optimal parameters for these conditions, we must investigate the machining process in such conditions, where the uncut chip thickness is comparable to the cutting edge radius of the tool. In these conditions the rake angle is determined by the contact point of the material on the cutting edge, which causes the material to harden up on the surface, resulting in poor cutting conditions. This effect relates to the cutting parameters such as tool geometry, feed rate, cutting speed, and cutting temperatures. In a previous research, I have already assembled a series of experiments, where I examined the cutting forces during conventional milling of steel parts. The results were that with the increased feed rate the minimum uncut chip thickness increases in an exponential way, and the cutting speed shows also growth, but the tendencies cannot be observed accurately. In this paper, I am proposing a new method of evaluating of the last experiments data, by leaving out the averaging of measured cutting forces on each rotation of the tool, instead placing the measured force components side by side and evaluating specific chip thickness values based on the new results. The new method uses three different metals, an aluminum alloy, an everyday-use structure steel and a fine-grain high-solidity structure steel. The measurements on the aluminum alloy confirm the findings of the previous research regarding the dependency of specific uncut chip thickness values of the feed rate. The new research aims to compare the approximating and an accurate method of calculating the chip thickness values. The results show that on this tool radius to feed rate ratio the approximating method deviates around 10% from the accurate method. Further researches can include the tool run out and vibration calculations in the uncut chip thickness determination processes.