



Neumann János Egyetem
Műszaki és Informatikai
Kar

Forgácsoló ék geometriai kialakításának vizsgálata forgácsolás során

Szabó Norbert
NMRSV6

Kónya Gábor, tanársegéd
és
Vaczkó Dániel, tanársegéd

2024

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	3
1. FORGÁCSOLÓSZERSZÁM ANYAGOK.....	4
1.1. HSS GYORSACÉL	4
1.2. KEMÉNYFÉM.....	5
1.3. KERÁMIA	6
2. A FORGÁCSOLÁST LEÍRÓ JELLEMZŐK	8
2.1. FORGÁCSOLÓ ERŐK.....	8
2.1.1. <i>Forgácsoló erők mérésének lehetőségei</i>	9
2.2. FORGÁCSOLÁSI HŐ ÉS HŐMÉRSÉKLET	10
2.2.1. <i>Forgácsolás során keletkező hő mérési lehetőségei</i>	11
3. FORGÁCSOLÓ SZERSZÁMOK ÉLGEOMETRIAI VIZSGÁLATAI	13
3.1. ÉLGEOMETRIA VIZSGÁLATA MARÁS SORÁN	13
3.2. ÉLGEOMETRIA VIZSGÁLATA ESZTERGÁLÁS SORÁN.....	14
3.3. ÉLGEOMETRIA VIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZETBEN	16
4. KÍSÉRLETTERVEZÉS.....	18
4.1. KÍSÉRLET SORÁN ALKALMAZOTT MEGMUNKÁLÁS	18
4.2. KÍSÉRLET SORÁN ALKALMAZOTT SZERSZÁMOK.....	19
4.2.1. <i>Felhasznált szerszámanyag</i>	19
4.2.2. <i>Vizsgált szerszámok geometriájának megtervezése</i>	20
4.2.3. <i>A megtervezett szerszámok gyártása</i>	21
4.2.4. <i>Szerszámgeometria visszamérése</i>	23
4.3. MEGMUNKÁLÁSHOZ FELHASZNÁLT SZERSZÁMGÉP	25
4.4. KÍSÉRLET SORÁN ALKALMAZOTT KÉSZÜLÉK	26
4.4.1. <i>A készülék megtervezése</i>	26
4.4.2. <i>A készülék gyártása</i>	28
4.5. A MÉRÉSHEZ HASZNÁLT MUNKADARAB	29
4.5.1. <i>Felhasznált alapanyag</i>	29
4.5.2. <i>A munkadarab geometriája</i>	30
4.6. A KÍSÉRLET SORÁN ALKALMAZOTT TECHNOLÓGIA.....	31
5. A MÉRÉSEK ELVÉGZÉSE	32
5.1. FORGÁCSOLÓ ERŐK MÉRÉSE.....	32
5.1.1. <i>Az erőmérés eredményei</i>	33
5.2. ÉRDESSÉGMÉRÉS	35
5.3. FORGÁCS MÉRETÉNEK VIZSGÁLATA.....	36
6. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	37
6.1. FORGÁCSOLÓ ERŐK KIÉRTÉKELÉSE	37
6.1.1. <i>F_c forgácsoló erő kiértékelése</i>	37
6.1.1. <i>F_{ny} nyomó erő kiértékelése</i>	37
6.1.2. <i>F eredő forgácsoló erő kiértékelése</i>	38
6.2. FELÜLETÉRDESSÉGEK KIÉRTÉKELÉSE	39
6.2.1. <i>R_a felületi érdesség kiértékelése</i>	39
6.2.2. <i>R_z felületi érdesség kiértékelése</i>	39
6.3. SZERSZÁM GEOMETRIA AJÁNLÁS A KAPOTT EREDMÉNYEK FÜGGVÉNYÉBEN	40
6.3.1. <i>Simítás</i>	40
6.3.2. <i>Nagyolás</i>	40
6.3.3. <i>Univerzális nagyolásra és simításra is alkalmas szerszám</i>	41

ÖSSZEFOGLALÁS	42
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	43
ÁBRAJEGYZÉK	44
IRODALOMJEGYZÉK	45

Bevezetés

A forgácsolási műveletek jelentős szerepet játszanak a fémmegmunkálás területén. A forgácsolószerszámok geometriai kialakítása kulcsfontosságú tényező a gyártási minőség és hatékonyság szempontjából.

A forgácsolószerszámok egyik legfontosabb geometriai jellemzője a forgácsoló ék, amely meghatározó szerepet játszik a forgácsleválasztás során. A forgácsoló ék kialakítása befolyásolja a forgácsolási erők nagyságát, a hőterhelést és a szerszám kopásának mértékét, így alapvetően meghatározza a szerszám teljesítőképességét. Az optimális geometria meghatározása kulcsfontosságú a hatékony és fenntartható gyártási folyamat kialakításához.

Jelen kutatás célja a forgácsoló ék különböző geometriai kialakításainak átfogó vizsgálata alumínium megmunkálása során.

A kutatást részletes irodalomkutatás előzi meg a forgácsoló erők mérési lehetőségeiről, forgácsolószerszám anyagokról, valamint a megmunkálandó anyag tulajdonságairól. A kutatás során a forgácsoló ék homlokszögének és hátszögének változtatásával fellépő változások kerülnek vizsgálat alá. A kísérlet során mérésre kerül a forgácsoló erő nagysága és iránya, és a megmunkált darab felületminősége.

A kísérlet során egy újfajta eddig még nem alkalmazott mérési környezetet építünk, amelyben a méréseket elvégezzük. A kiértékelés során célom egy ajánlás adása a megfelelő szerszám ék geometria kiválasztásához adott művelet esetében.

Dolgozatomban részletezni fogom a mérési környezet megtervezését a szerszámtól a készüléken át egészen a munkadarabig. Valamint ezen komponensek gyártását is részletezni fogom.

1. Forgácsolószerszám anyagok

A szerszámalapanyag alapjaiban határozza meg egy szerszám teljesítőképességét, ezért a szerszámanyagok alapos ismerete elengedhetetlen. A forgácsolószerszám anyagai az ipari fejlődés során jelentős átalakuláson mentek keresztül, hogy megfeleljenek a folyamatosan növekvő megmunkálási igényeknek. A kezdeti egyszerű szénacéloktól a gyorsacélok, keményfémek, kerámiák és szuperkemény anyagok, például a gyémánt és a CBN (kőbös bórnitrid) felé haladt a fejlődés [1] [2]. Az új szerszámanyagok kifejlesztése során a cél a nagyobb szilárdság, hőállóság és kopásállóság elérése volt, hogy a forgácsolási folyamatok hatékonyabbá és gazdaságosabbá váljanak, miközben a modern megmunkálási igényeknek is megfeleljenek [3].

1.1. HSS Gyorsacél

A gyorsacél (High-Speed Steel, HSS) egy erősen ötvözött szerszámacél, amelyet kifejezetten nagy sebességű forgácsolási műveletekhez fejlesztettek ki. Ezek az anyagok kiváló keménységgel, hőállósággal és kopásállósággal rendelkeznek, amely lehetővé teszi számukra, hogy magas hőmérsékleten is megőrizzék éltartóságukat [4].

Összetételében különböző ötvözők találhatók, amelyek jelentős mértékben javítják az anyag tulajdonságait, különösen a keménységet, a hőállóságot és a kopásállóságot. Az alábbiakban a legfontosabb ötvözőelemeket sorolom fel: [5]

1. **Szén (C):** 0,7–1,4%
 - Növeli a keménységet és a kopásállóságot.
2. **Wolfram (W):** 5–18%
 - Javítja a meleg keménységet és a hőállóságot.
3. **Molibdén (Mo):** 2–10%
 - Tovább növeli a hőállóságot és a szívósságot, gyakran a wolfram helyettesítésére vagy kiegészítésére használják.
4. **Króm (Cr):** 3–5%
 - Fokozza a keménységet, a kopásállóságot és a korrózióállóságot.
5. **Vanádium (V):** 1–5%
 - Javítja a kopásállóságot, a szemcsefinomságot, és növeli az éltartóságot.
6. **Kobalt (Co):** 5–10%

- Növeli a keménységet és a hőállóságot magas hőmérsékleten, különösen a kobalt-acélok esetében, amelyeket nagy igénybevételű alkalmazásokhoz használnak. [6]

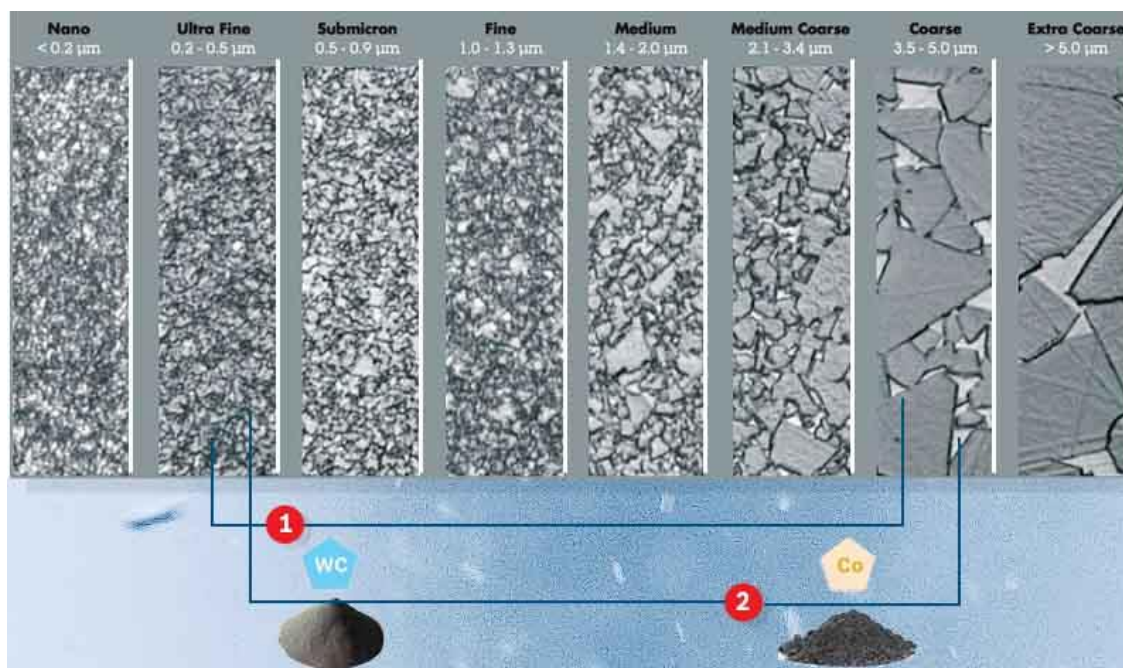
A gyorsacélokat ötvözőtartalom szerint több csoportba sorolhatjuk, amelyet az 1. táblázat foglal össze.

1. táblázat: Gyorsacél anyagminőségek

	DIN szabvány	AISI szabvány	C szén	Cr króm	Mo molibdén	W volfram	V vanádium	Co kobalt
HSS	S.6.5.2	M2	0,85-0,90	3,90-4,30	4,75-5,25	6,00-6,75	1,75-2,05	-
HSSE HSSE5	S.6.5.2.5	M35	0,89-0,94	4,25-4,50	4,75-5,20	6,00-6,50	1,75-1,80	4,50-5,00
HSSE8	S.2.9.1.8	M42	1,05-1,10	3,50-4,00	9,25-9,75	1,30-1,70	1,05-1,25	7,75-8,25
HSSEE HSS PM	ASP30	ASP30	1,30	4,20	5,00	6,40	3,10	8,50

1.2. Keményfém

A keményfém szerszámok fő alkotóelemei a kemény fázis és a kötőfázis. A fázisok arányát, és az azt alkotó szemcsék méretei az 1. ábra szemlélteti [6].

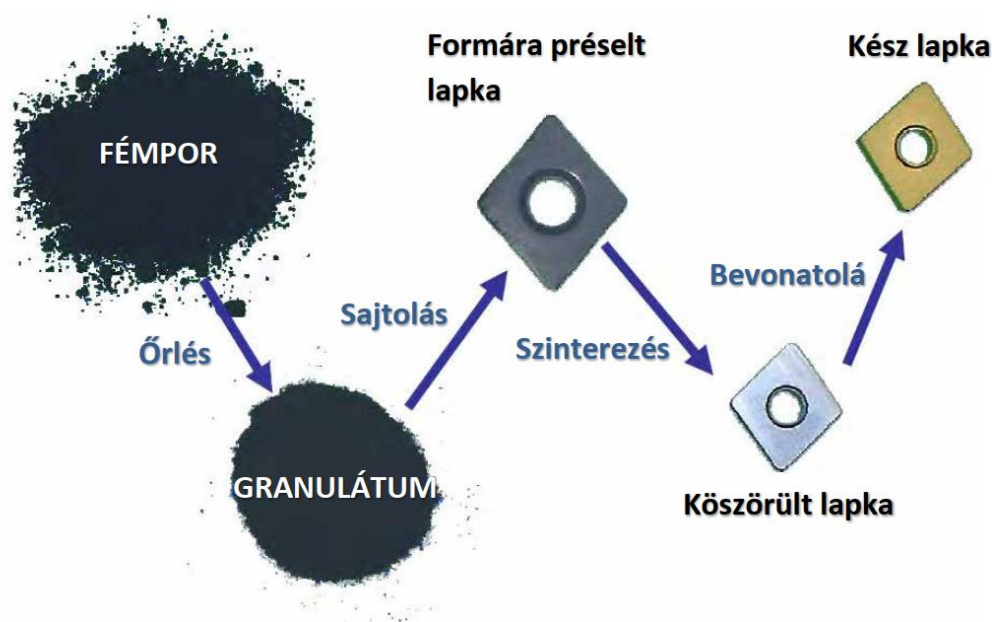


1. ábra: Keményfém fázisok és szemcse méretek [6]

A Kemény fázis általában volfrám-karbid (WC), titán-karbid (TiC), tantál-karbid (TaC), vagy ezek kombinációja. A kemény fázis felelős a szerszám nagy keménységéért és kopásállóságáért. A volfrám-karbid különösen elterjedt, mivel nagy keménységet és kiváló kopásállóságot biztosít [5].

A Kötőfázis tipikusan kobalt (Co), amely a szerszám szívósságát biztosítja. A kobalt a kemény fázisok szemcséit köti össze, így az anyag rugalmasabb lesz, és ellenáll a repedésképződésnek [5] [7].

A keményfém szerszámok gyártása során a fémkarbid szemcséket a kötőanyaggal keverik, majd nagy nyomáson és hőmérsékleten szinterezik. Ez a folyamat eredményeként egy rendkívül szilárd, de szívós anyag jön létre. A keményfémből készült szerszámok gyártását a 2. ábra mutatja be [8].



2. ábra Keményfém szerszám gyártásának lépései [8]

1.3. Kerámia

A kerámia forgácsolószerszámok kiváló kopásállósággal rendelkeznek, és nagy forgácsolási sebességet igényelnek. Különböző alkalmazásokhoz más-más kerámiaminőségeket alkalmaznak.

1. Oxidkerámiák

Alumínium-oxid alapúak (Al_2O_3), a hozzáadott cirkónium (ZrO_2) segít a repedések kialakulásának megakadályozásában. Így egy kémiaiilag nagyon stabil anyagot kapunk, azonban a hősokk elleni ellenálló képessége alacsony [9]. A kísérletek során ilyen kerámia lapkát használunk fel.

2. Vegyes kerámiák (a)

A vegyes kerámiák részecske erősítésűek a hozzáadott köbös karbidoknak vagy szén-nitrideknek köszönhetően (TiC, TiN). Ez a szívósságot és a hővezető képességet javítja [9].

3. Tűkristályos erősítésű kerámiák (b)

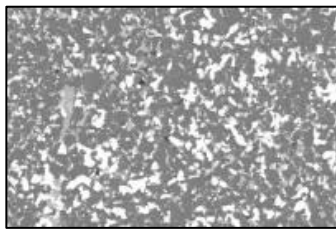
A tűkristályos erősítésű kerámiáknál szilícium-szén-tűkristályoknak (SiCw) köszönhetően drámaian növekszik a szívósság, és lehetővé válik a hűtőközeg használata. A tűkristályos erősítésű kerámiák ideálisak Ni-alapú ötvözetekhez [9].

4. Szilícium-nitrid kerámiák (c)

(Si₃N₄) Önerősítő anyag a megnyúlt kristályai miatt. Nagy a szívóssága. A szilícium-nitrid-minőségek jól használhatók szürkeöntvényekhez, de a kerámia stabilitás hiánya miatt csak korlátozottan alkalmazhatók más alapanyagok megmunkálásához [9].

5. Sialon-minőségek

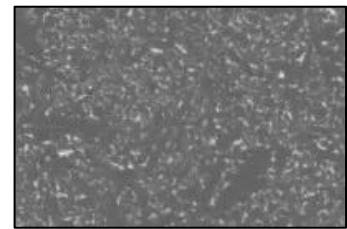
(SiAlON) kombinálják az önerősített szilícium-nitrid-hálót a jobb kémiai stabilitással. A Sialon-minőségek ideálisak hőálló szuperötvözetek (HRSA) megmunkálásához [9].



a)



b)



c)

3. ábra: Különböző mikroszerkezetű kerámiák [9]

2. A forgácsolást leíró jellemzők

A dolgozat a forgácsoló ék geometriai kialakításának változása során fellépő jelenségek vizsgálatáról szól. Ebből kifolyólag elengedhetetlen szót ejteni azokról a jellemzőkről melyek segítségével létrejön az anyagleválasztás.

2.1. Forgácsoló erők

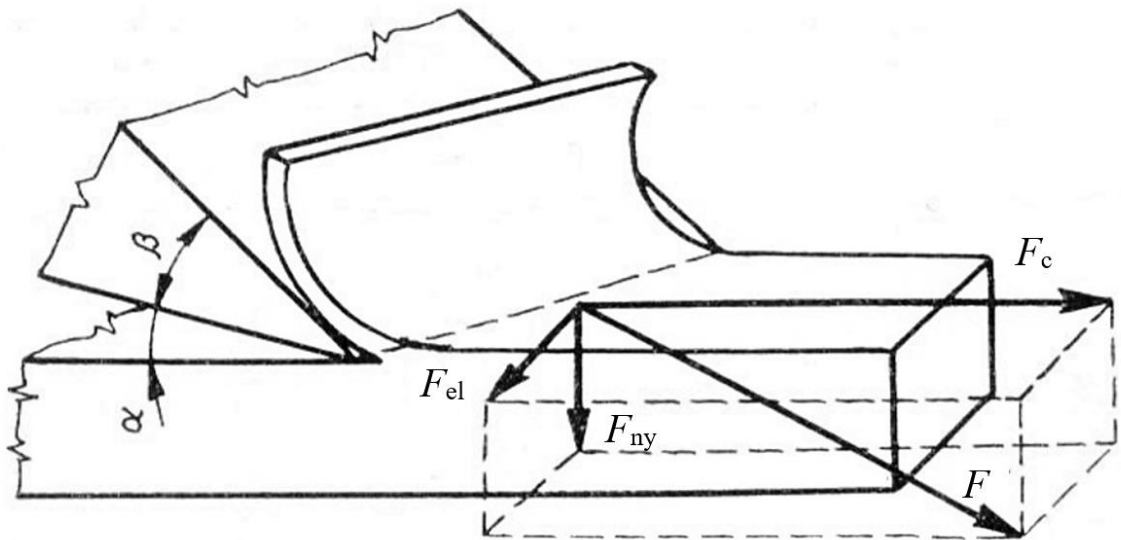
A szerszám és a munkadarab interakciója során forgácsleválasztás történik, a folyamat közben pedig erők lépnek fel, melyek nagysága függ a megmunkálandó alapanyagtól, a forgácsoló szerszám élgeometriájától, bevonatától és az alkalmazott hűtő-kenő közegtől (4. ábra).

Ilyen erők a következők:

- F_c – forgácsoló erő,
- F_{el} – eltérítő erő,
- F_{ny} – nyomó erő.

Az F eredő forgácsoló erő ezen három egymásra merőleges erőkomponensek eredője (1) [10].

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_{el}^2 + F_{ny}^2} \quad (N) \quad (1)$$



4. ábra: A megmunkálás során ébredő erők [11]

Az F forgácsoló erő az alábbi paraméterektől függ:

- a megmunkálni kívánt anyag nyírószilárdságától,
- a szerszám és a munkadarab közti súrlódástól,

- szerszám geometriától,
- a forgács hőmérsékletétől [10].

2.1.1. Forgácsoló erők mérésének lehetőségei

A kísérlet megtervezése során nagy hangsúlyt kell fektetni a forgácsoló erők mérésére, hiszen ez lesz az egyik alapvető jellemző mely összehasonlításra kerül a különböző geometriák esetében. Az erők mérésére több módszer is alkalmazható attól függően, hogy milyen gyártási eljárás során történik a mérés.

A mérőberendezések típusát tekintve kétfajta különböztetünk meg. Egyik a nyúlásmérő bélyegekkel felszerelt, a másik pedig a piezoelektromos elven működő.

A nyomaték mérőben nyúlásmérő bélyegek találhatók melyek működése Ohm törvényén alapul. A vezető megnyúlik, keresztmetszete és hossza megváltozik, így az ellenállása megnő [12].

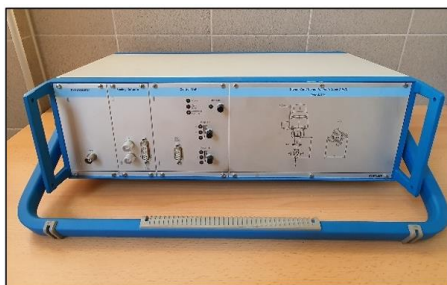
Forgácsolónyomaték mérésére egy másik módszert is szoktak alkalmazni mely sokkal költséghatékonyabb viszont jóval pontatlanabb mérést eredményez. A főorsó pillanatnyi teljesítményéből lehet visszaszámolni a nyomatékot.

A nyomaték méréséhez az alábbi, 5. ábrán látható eszközök használhatóak:

1. Kistler 9125A24 típusú forgó erőmérő,
2. Kistler 5237A típusú jelerősítő egység,
3. Kistler 5697 típusú jelfeldolgozó egység.



1.



2.



3.

5. ábra Nyomaték méréséhez használható eszközök

A lineáris erőmérő a megmunkálás során keletkező erőket méri. Ezek az erők a fentebb említett F_c – forgácsoló erő, F_{el} – eltérítő erő és az F_{ny} – nyomóerő, melyek egymásra merőlegesek. Az erőket egy jobbsodrású koordináta-rendszerben mérjük X, Y és Z irányban. Ezen erők eredője a F forgácsolóerő. Természetesen a nyomaték mérő segítségével is meghatározható a forgácsolóerő nagysága, viszont a hatásvonala nem. A lineáris erőmérő nagy előnye, hogy a forgácsoló erő hatásvonalának iránya ismert.

Az erőmérő piezoelektromos elven működik. A piezoelektromos mérőberendezések alkalmasabbak a statikus erők mérésére, mint a nyúlásmérőbéllyekkel felszerelt eszközök.

Mérés során a nyúlásmérőbéllyekhez hasonlóan az alakváltozás mértékéből lehet következtetni a terhelésre. A mérőelem egy piezoelektromos kerámia vagy kristály, melynek a felületén nyomás hatására töltésmennyiség keletkezik. A keletkező töltésmennyiség arányos a terheléssel. Előnyei még a széles mérési tartomány és az alacsony jel-zaj arányuk. Pontosságuk viszont rosszabb a nyúlás mérő béllyeges cellákhoz képest.

A lineáris erők méréséhez az alábbi, 6. ábrán látható eszközök használhatóak:

1. Kistler 9257B típusú lineáris erőmérő,
2. Kistler 5007 típusú analóg jelerősítő egység,
3. Kistler 5697 típusú jelfeldolgozó egység (5. ábra).



1.



2.

6. ábra Lineáris erőmérő eszközök

A bemutatott eszközök felhasználhatóak esztergálás vagy marás során a forgácsoló erő méréséhez. Viszont fontos megjegyezni, hogy ezen esetekben a mérési eredmények nem pusztán csak a forgácsoló erőket tartalmazzák. A megmunkálás dinamikus jellemzőiből adódóan a mérést nagy zaj kíséri, amely megjelenik a kiértékelés során is.

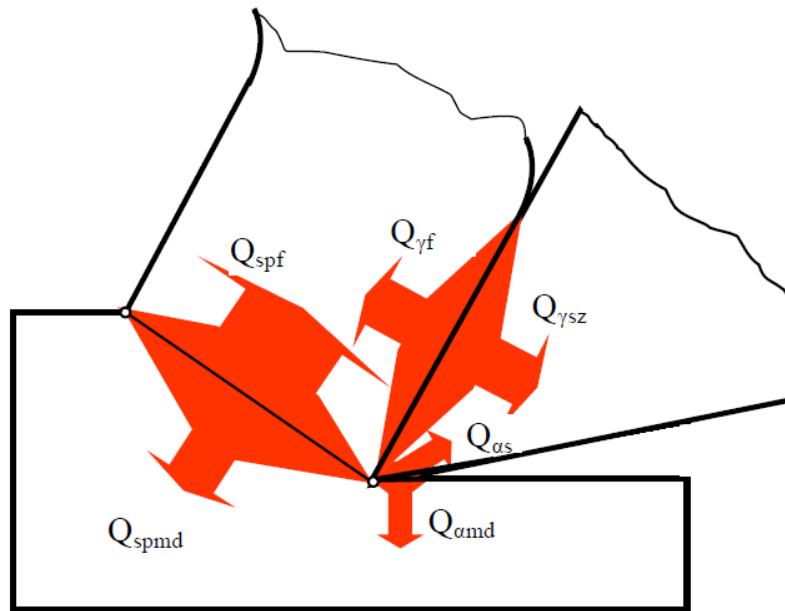
2.2. Forgácsolási hő és hőmérséklet

A megmunkálás során fellépő hőtermelés jelentős hatással van a forgácsolási folyamatokra és az elkészült munkadarab minőségére. Az előállított hő mennyisége befolyásolja a szerszám kopását, a megmunkált felület minőségét, valamint az anyagszerkezetben bekövetkező esetleges változásokat. Éppen ezért kiemelkedően fontos a forgácsolás során keletkező hő pontos mérése és elemzése.

A befektetett energia 98%-a hővé alakul át a forgácsolás során. A maradék 2% a munkadarab felületi rétegeiben és a forgácsban marad, mint maradó feszültség [10].

A forgácsolási hő a képlékeny alakításból keletkezik a forgácstőben és a súrlódásból a szerszám homlok- és a hátfelületén.

A keletkező hő a forgácsba, a szerszámba és a munkadarabba és annak közvetlen környezetébe távozik, mely a 7. ábrán látható.



7. ábra: A hőforrások és hőáram [12]

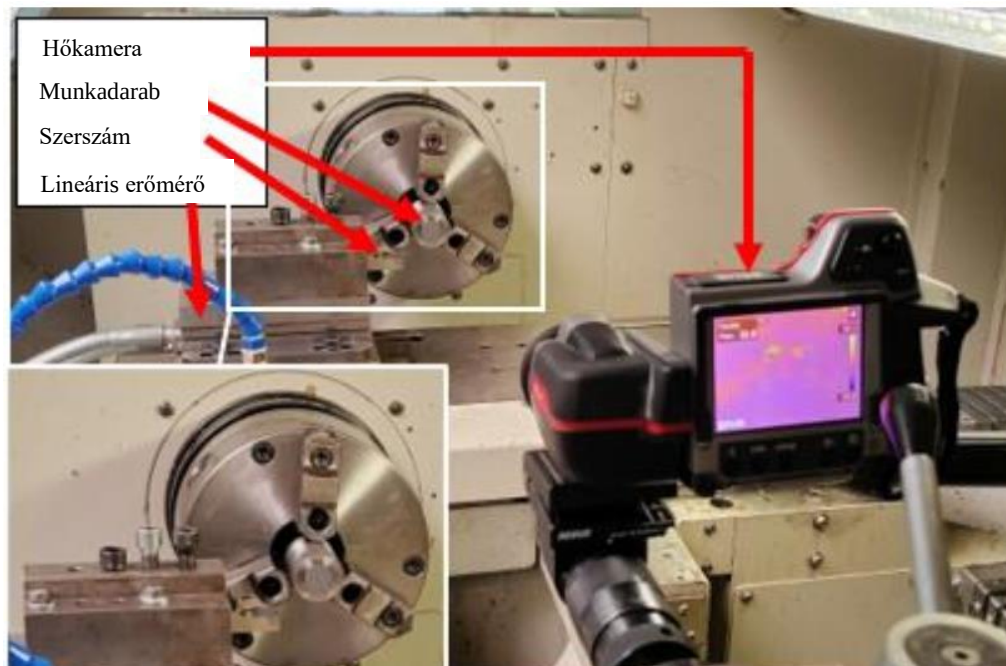
A Q_{sp} a képlékeny alakváltozásból keletkező hő, a Q_{γ} súrlódásból a homlokfelületen és a Q_a súrlódásból a hátfelületen keletkező hő [12].

Ezek eloszlása körülbelül a következő: 75%-a a forgács, 25%-a a szerszám, 4%-a a munkadarab és 1% a környezet hőmérsékletét emeli. Természetesen ezek az értékek változnak a technológiai beállítás függvényében. [12].

2.2.1. Forgácsolás során keletkező hő mérési lehetőségei

A forgácsolás során keletkező hő mérésére két eljárás terjed el a legjobban. Ezen mérések célja főként a forgácstőben ébredő hő, valamint a szerszámnak átadott hőmennyiség mérése.

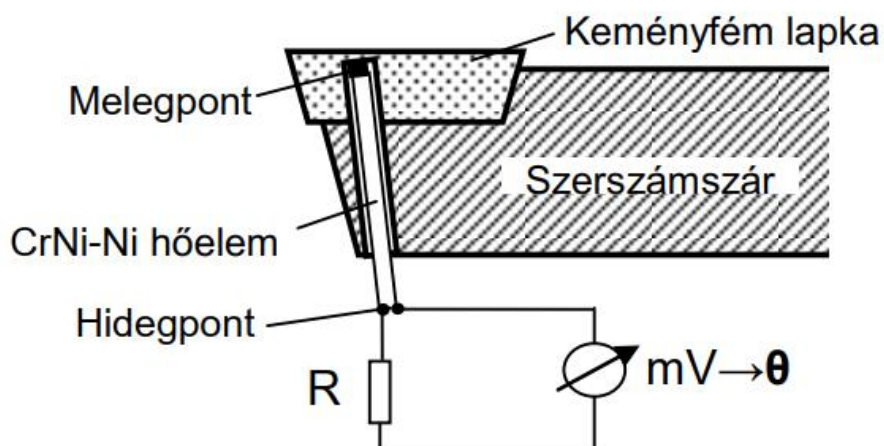
A legkézenfekvőbb mérési módszer a hőkamerás mérési eljárás, amely során kifejezetten a leválasztott anyagban keletkező hő mérhető. A 8. ábrán látható esztergálás során ausztenites rozsdamentes acél forgácsolása során fellépő erőket és hőmérsékletet mérték a készítő [14].



8. ábra Forgácsolás során keletkező hő hőkamerás mérése [14]

A gyakorlatban a másik elterjedt hőmérséklet mérési eljárás az ellenállás alapú mérés. Ezen mérési eljárások során a forgácsoló szerszámokba integrált hőmérők segítségével kerül meghatározásra a hőmérséklet. Forgó mozgást végző, tehát maró szerszámok esetében ez az eljárás nem megoldható. A szóban forgó eljárás eszterga szerszámok esetében széles körben alkalmazott [13].

A mérés során több hőelem kerül elhelyezésre a forgácsoló ék közelében, mint ahogy az a 9. ábrán látható. Azért van szükség több hőelem beépítésére, hogy mérhető legyen a hőáram [13].



9. ábra Forgácsolás során keletkező hő hőelemes mérése [13]

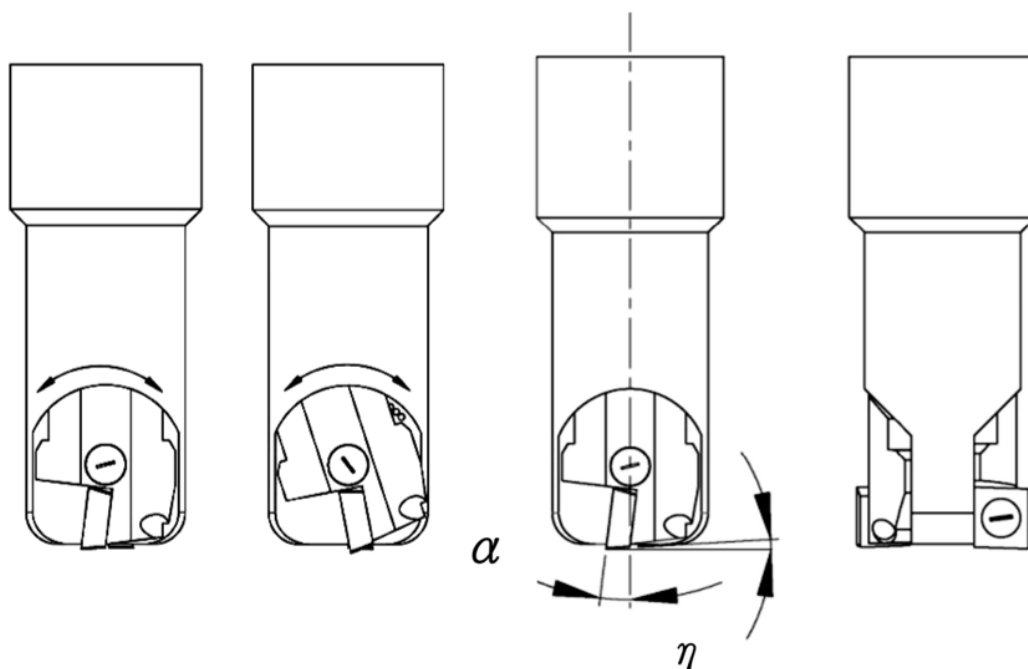
3. Forgácsoló szerszámok élgeometriai vizsgálatai

A célom egy olyan mérési környezet létrehozása, ahol nagy pontossággal tudom vizsgálni a különböző élgeometriák hatását a forgácsképződés során, ahol a megmunkálásból származó dinamikus hatások minimalizálhatók. Az előző pontban bemutatott lineáris erőmérési módszertant kívánom alkalmazni, a forgácsoló erő mérésének céljából.

A mérés megtervezése előtt részletes irodalomkutatót folytattam a témában. Olyan kutatásokat kerestem, amelyeknél a szerszám homlok és hátlap geometriájának kialakítását vizsgálták.

3.1. Élgeometria vizsgálata marás során

A kutatás során egy innovatív, állítható szögű szerszámtartót használtak (10. ábra), amely lehetővé tette a homlokszög és a hátlapszögének precíz beállítását [15].



10. ábra Állítható lapkafészekkel felszerelt szerszámtest [15]

Az állítható szerszámtartóval végzett kísérletek célja az élszög változtatás hatásának vizsgálata volt a forgácsolási folyamat különböző jellemzőire, mint például a forgácsolási erőkre, a forgács morfológiájára és a megmunkált felület minőségére. A kísérleti folyamat első lépéseként a szerszámtartó forgatási mechanizmusának segítségével különböző élszögeket állítottak be, miközben figyelembe vették a hátlap változását is. Az élszögek és hátszögek pontos beállítása lehetővé tette, hogy a vizsgálatok során különböző

megmunkálási paraméterekkel dolgozzanak, például változó forgácsoló sebességgel és előtolási sebességekkel [15].

A munkadarabok felületminőségét érdességmérő segítségével vizsgálták, hogy megállapítsák az élszög és az alkalmazott paraméterek hatását a megmunkált felületekre. A keletkezett forgácsokat szintén elemezték, hogy feltárják a forgács morfológiai jellemzőinek változásait különböző élszögeknél. Az összegyűjtött adatokat matematikai modellek segítségével értékelték ki, így meghatározhatóvá váltak az élszög, a forgácsolási paraméterek és a forgácsolási folyamat jellemzői közötti összefüggések.

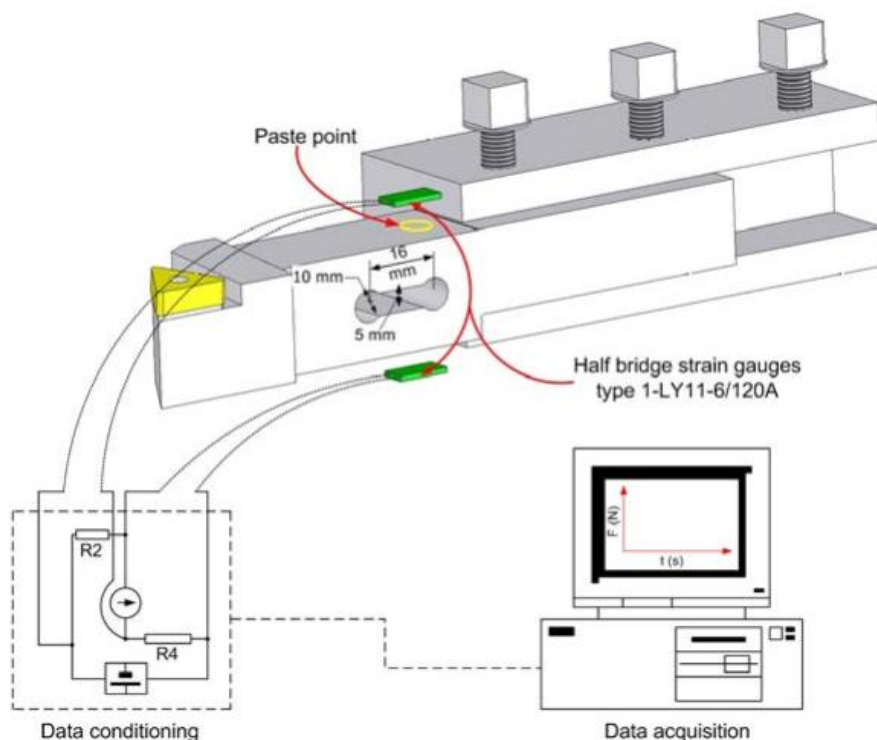
Az erőmérések és a forgácsok vizsgálata alapján egyértelművé vált, hogy az élszög kulcsszerepet játszik a forgácsolási folyamat hatékonyságában. A kisebb homlokszög előnyösebb, mivel kisebb forgácsolási erőt igényelnek, jobb forgácsminőséget és kisebb szerszámkopást eredményeznek. A nagyobb élszögek növelték a forgácsolási erőket és a szerszám terhelését, ami rövidebb szerszámélettartamot eredményezett. Ezek az eredmények fontos iránymutatást adhatnak a szerszámgeometria optimalizálásához különböző megmunkálási folyamatok során [15].

3.2. Élgeometria vizsgálata esztergálás során

A következő cikk esztergálás során mutatja be az élszögek változtatásával fellépő változásokat. A cikkben bemutatott kísérletek során a forgácsolási folyamat vizsgálatához szigorúan ellenőrzött mérési körülményeket és speciális szerszámokat alkalmaztak.

A forgácsoló homloklapot (rake angle) négy különböző szögben, 0° , 6° , 12° és 20° között változtatták. A kísérletek száraz körülmények között zajlottak, azaz hűtőfolyadékot nem alkalmaztak.

Az erőmérést egy egykomponensű analóg forgácsoló erőmérő segítségével végezték, amely egy kereskedelembe kapható szerszámtartóval volt ellátva. A nyúlásmérő bélyegekkel felszerelt erőmérőhöz egy Wheatstone-híd áramkört használt, amelynek jeleit egy HBM Spider-8 adatgyűjtő rendszerrel digitalizálták (11. ábra), és a HBM Catman szoftverrel rögzítették [16].



11. ábra Forgácsoló erő kísérleti mérési elrendezése [16]

Ez a gondosan kialakított mérési elrendezés biztosította a kísérleti eredmények megbízhatóságát és pontosságát, lehetővé téve a forgácsolási erőkre és a forgácsképződésre vonatkozó részletes elemzést.

A kísérlet során a forgácsképződést is vizsgálták, és azt találták, hogy a fogásmélység kevésbé befolyásolta a forgács morfológiáját, mint az ékszög és a munkadarab anyaga. Az optimális ékszögek meghatározása során figyelembe vették a forgácsoló erő minimalizálását és a kedvező forgácsképződési jellemzőket.

A szerszám homlokszögének hatása anyagfüggőnek bizonyult. Az AISI 1020 acélnál az F_c csökkent a növekvő homlokszöggel, mivel a nagyobb homlokszög megkönnyítette a szerszám behatolását az anyagba. Az UNS C23000 rézötvözet esetében az F_c gyakorlatilag nem változott a homlokszög növelésével. Az alumínium 2014 anyagnál az F_c kisebb fogásmélységek esetén növekedett a homlokszöggel, de nagyobb mélységeknél normalizálódott és változatlan maradt. Az optimális homlokszögeket is meghatározták: az AISI 1020 esetében 12° , az UNS C23000 anyagnál 0° , míg az alumínium 2014 anyagnál 20° bizonyult a legmegfelelőbbnek [16].

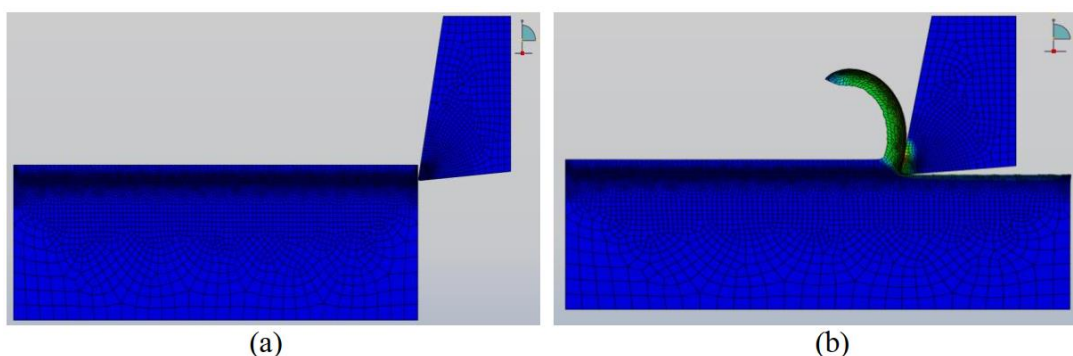
3.3. Élgeometria vizsgálata szimulációs környezetben

A végeselemes szimulációk (Finite Element Method, FEM) kiemelt jelentőséggel bírnak a forgácsolási folyamatok elemzésében és optimalizálásában. Ezek az eljárások lehetővé teszik a komplex termikus és mechanikai folyamatok modellezését, amelyek a forgácsolás során alakulnak ki, például a szerszám és a munkadarab közötti kölcsönhatások, valamint a deformáció és a hővezetés vizsgálatát.

A cikk a szerszám homlokszögének hatását vizsgálja a szerszám hőmérsékletére és a forgácsolási erőkre nagysebességű megmunkálás során AISI 4340 acélon. Az elemzést végeselemes modellezéssel (Finite Element Method, FEM) végezték az ABAQUS szoftver segítségével, a Johnson-Cook anyagmodell alkalmazásával. A tanulmány célja az optimális ékszög meghatározása volt, amelynél a legkisebb forgácsolási erő és a legalacsonyabb szerszámhőmérséklet érhető el [17].

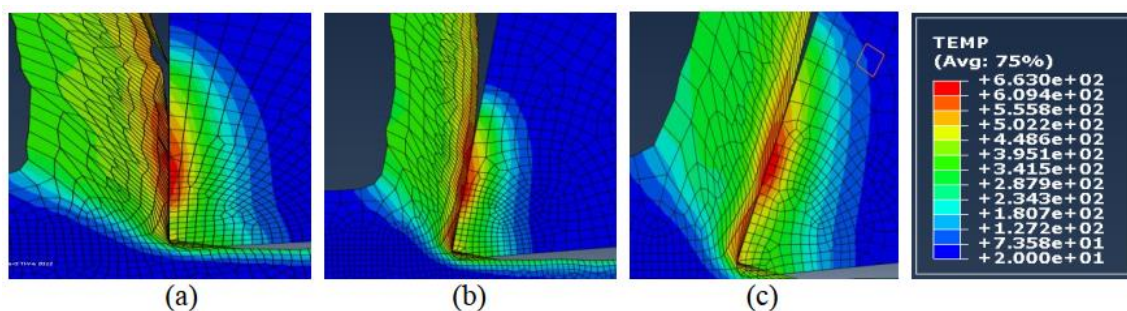
A munkadarab anyagát elasztó-plasztikus, míg a szerszámot rugalmas anyagként definiálták. Az anyag viselkedésének és a forgácsolás dinamikájának pontos szimulációjához adaptív hálóosztást használtak, amely lehetővé teszi a gyorsan változó geometriájú forgácsolási folyamatok követését. A forgácsolási folyamat kétdimenziós ortogonális modelljét alkalmazták, amely 1287 csomópontot és 1365 elemet tartalmazott a szerszámhoz, valamint 3536 csomópontot és 3380 elemet a munkadarabhoz.

A szimulációban a Coulomb-súrlódási modellt használták a szerszám és a forgács érintkezési felületén. A forgácsolási paraméterek között szerepelt 0,2 mm/fordulatos előtolás, 2,5 mm-es forgácsolási mélység és 3 mm szélesség, valamint a vágási sebességet 300 és 550 m/perc között változtatták. A szerszám homlokszögét 0° és 20° közötti tartományban vizsgálták, míg a házszög 5° volt. A forgács leválását a Johnson-Cook törési modellt alkalmazva szimulálták, amely a nagy sebességű, nagy alakváltozási rátájú anyagdeformációra alkalmas [17]. A 12. ábrán látható a) forgácsolás előtt a szerszám és munkadarab, b) forgácsolás közben a szerszám és munkadarab.



12. ábra 2D végeselemes szimuláció a fémforgácsolásról [17]

A szimuláció eredményei rámutattak, hogy a szerszám homlokszöge jelentős hatással van mind a szerszám hőmérsékletére, mind a forgácsolási erőkre. A homlokszög növelése 0° -tól 20° -ig csökkentette a forgácsolási erőt, különösen 10° és 18° között, ahol az erő csökkenése akár 20%-ot is elérhetett. Ez a pozitív ékszög kedvezőbb nyírási szöget eredményezett, csökkentve a képlékeny deformációhoz szükséges energiát, így javítva a forgácsolási folyamat hatékonyságát. Az optimális ékszöget 10° és 18° között határozták meg, ahol a hőmérséklet is a legalacsonyabb volt, különösen 433 m/perc forgácsoló sebességnél [17]. A 13. ábrán az a) 0° , b) 10° és c) 20° -os homlokszögek láthatóak.



13. ábra Hőmérsékleteloszlás a szerszám és a forgács között [17]

Ezzel szemben a túlzottan nagy homlokszög negatívan befolyásolta a szerszám teljesítményét, mivel a hőmérséklet jelentős emelkedéséhez vezetett. A szerszám hőmérséklete a forgácsoló sebesség növekedésével szintén emelkedett, elérve a $620\text{--}655^\circ\text{C}$ -ot 550 m/perc sebességnél. Az eredmények szerint a homlokszög és a forgácsoló sebesség optimális kombinációjának kiválasztása kulcsfontosságú a hatékony és fenntartható forgácsolási folyamatok szempontjából [17]. Ezek az eredmények hozzájárulnak a szerszámtervezés fejlesztéséhez és a nagysebességű megmunkálási folyamatok optimalizálásához.

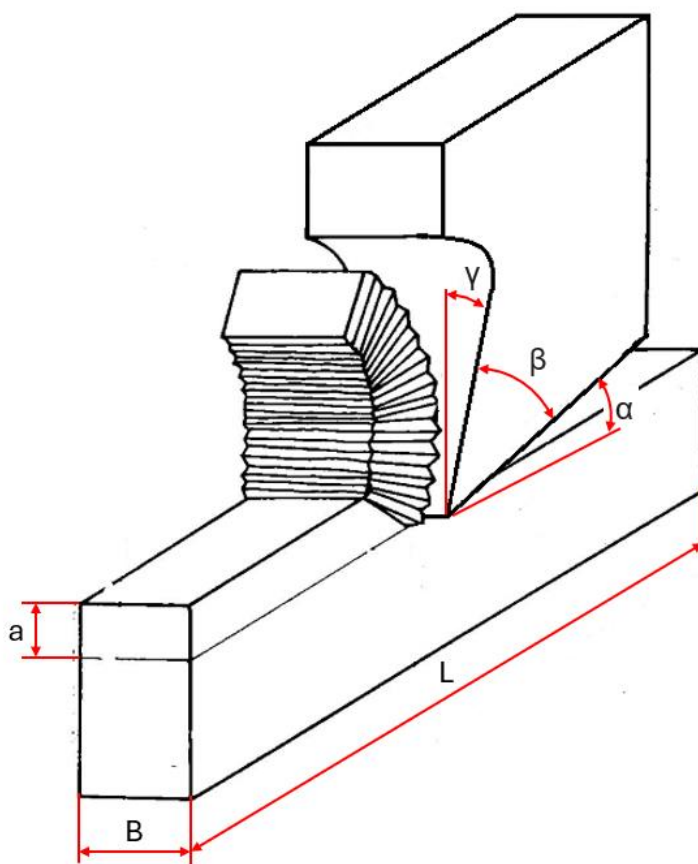
4. Kísérlettervezés

Az irodalomkutatást követően elkezdődhet a kísérlettervezés. Ebben a fejezetben megtervezem és felépítem a mérési környezetet. Meghatározom azon szerszámgeometriákat, amelyek mérést elvégzem, valamint bemutatásra kerül a mérés során felhasználandó munkadarab. Bemutatásra kerül a szerszámok és készülékek gyártási lépései.

4.1. Kísérlet során alkalmazott megmunkálás

Az irodalomkutatás során említésre került, hogy az erőmérések során a megmunkálások dinamikai jellege jelentkezik a mérési eredményekben is. Célom kizárólag a forgácsoló ék geometriájából adódó erők mérése. Ebből kifolyólag egy olyan forgácsoló eljárást választottam, ahol az erőmérésben minimalizálhatóak a dinamikus mozgásokból adódó zajok.

A gyalulást véltem a legmegfelelőbb megmunkálásnak az általam állított kritériumok alapján. Fontosnak tartottam azt is, hogy szabadforgácsolás történjen a mérés során. Szabadforgácsolásról akkor beszélünk, ha a szerszám csúcsa nem vesz részt az anyagleválasztásban [13]. A 14. ábrán látható a kísérlet során a megmunkálás elvi vázlata.



14. ábra A kísérlet során alkalmazott megmunkálás elvi vázlata

Az ábrán látható jelölések jelentései a következők:

- L – megmunkált hossz
- B – fogásszélesség
- a – fogásmélység
- γ – homlokszög
- β – csúcsház
- α – hátszög

Gyalulás esetében a főmozgás, amely a forgácsolást biztosítja egy lineáris mozgás. Ezt a mozgást végezheti a szerszám vagy a munkadarab. A mellékmozgás a fogásmélység beállítását hivatott szolgálni. Ebben az esetben is ezen mozgást végezheti a szerszám vagy a munkadarab.

4.2. Kísérlet során alkalmazott szerszámok

A kísérlet megtervezésének egyik sarkalatos pontja a szerszám anyagának kiválasztása. A választást sok tényező befolyásolta. A legmeghatározóbb tényező az a gyalulás során elérhető maximális forgácsoló sebesség. Esetemben a forgácsoló sebesség v_c : 15 m/perc. Ekkora sebességnél a dolgozat elején felsorolt szerszámanyagok közül a gyorsacél használható optimálisan.

4.2.1. Felhasznált szerszámanyag

A dolgozat eleje tartalmazza korunk legelterjedtebb szerszámanyagait forgácsoláshoz. Mint azt a bevezetőben is írtam a választott szerszámanyag HSS gyorsacél. A forgácsoló sebesség mellett a másik ok, ami magyarázatot ad a választásra az a megmunkálhatóság.

A három fő anyagtípus közül a gyorsacél megmunkálására volt csak lehetőség, ebből az anyagból tudtam kialakítani a szükséges forgácsoló ék geometriát. A felhasznált szerszámanyag kémiai összetételét a 2. táblázat tartalmazza [4].

2. táblázat M35 gyorsacél kémiai összetétele

	DIN szabvány	AISI szabvány	C szén	Cr króm	Mo molibdén	W volfram	V vanádium	Co kobalt
HSSE HSSE5	S.6.5.2.5	M35	0,89- 0,94	4,25- 4,50	4,75-5,20	6,00- 6,50	1,75-1,80	4,50- 5,00

Az M35 gyorsacél egy kobalttal ötvözött, molibdén-alapú szerszámacél, amelyet nagy teljesítményű forgácsolószerszámok gyártására használnak [19].

A legfontosabb fizikai tulajdonságai az M35 ös anyagnak a 3. táblázatban találhatók.

3. táblázat M35 gyorsacél fizikai tulajdonságai

	Fajlagos tömeg ρ , (kg/m ³)	Hővezetőképesség 20C°-on λ , (W/m°K)	Fajhő 20 C°-on c , (J/kg°K)
M35	8150	24	$0,420 \times 103$

A mechanikai tulajdonságokat pedig a 4. táblázat tartalmazza. A táblázatban található adatok hőkezelés és megeresztés utáni állapotot mutatják be [6].

4. táblázat M35 gyorsacél mechanikai tulajdonságai

	Szakítószilárdság (MPa)	Folyáshatár (MPa)	Nyúlás (A5 %)	Kontrakció (Z %)	Keménység (HRC)
M35	1770-1980	1475-1665	5	10	64

4.2.2. Vizsgált szerszámok geometriájának megtervezése

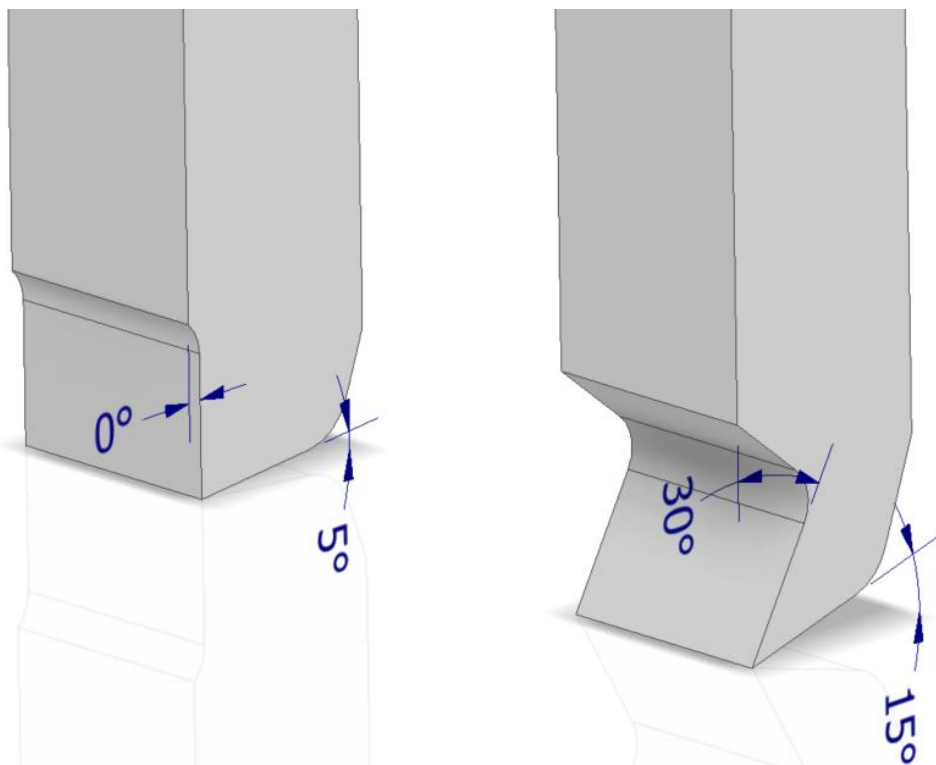
Az előzetes irodalomkutatás során sikerült meghatározni egy intervallumot, amelyen belül érdemes változtatni a homlokszög és a hátszög dőlésszögét. A homlokszög (γ) 0° - 30°-ig a hátszög (α) 5° - 15°-ig kerül kialakításra.

A szerszámok szögértékei 3 szinten lesznek módosítva. A vizsgálat során lineáris kísérletet alkalmazok, tehát minden paramétert minden szintem vizsgállok. A szerszámok részletes paramétereit az 5. táblázat foglalja össze.

5. táblázat A vizsgált szerszámok geometriája

Szerszám megnevezése	Tervezett geometria		
	Homlokszög γ (°)	Hátszög α (°)	Csúcsház β (°)
G00A05	0	5	85
G00A10	0	10	80
G00A15	0	15	75
G15A05	15	5	70
G15A10	15	10	65
G15A15	15	15	60
G30A05	30	5	55
G30A10	30	10	50
G30A15	30	15	45

A szerszámok geometriai kialakítását a 15. ábra szemlélteti. Az első képen a G00A05-ös, míg mellette a G30A15-ös szerszám látható.



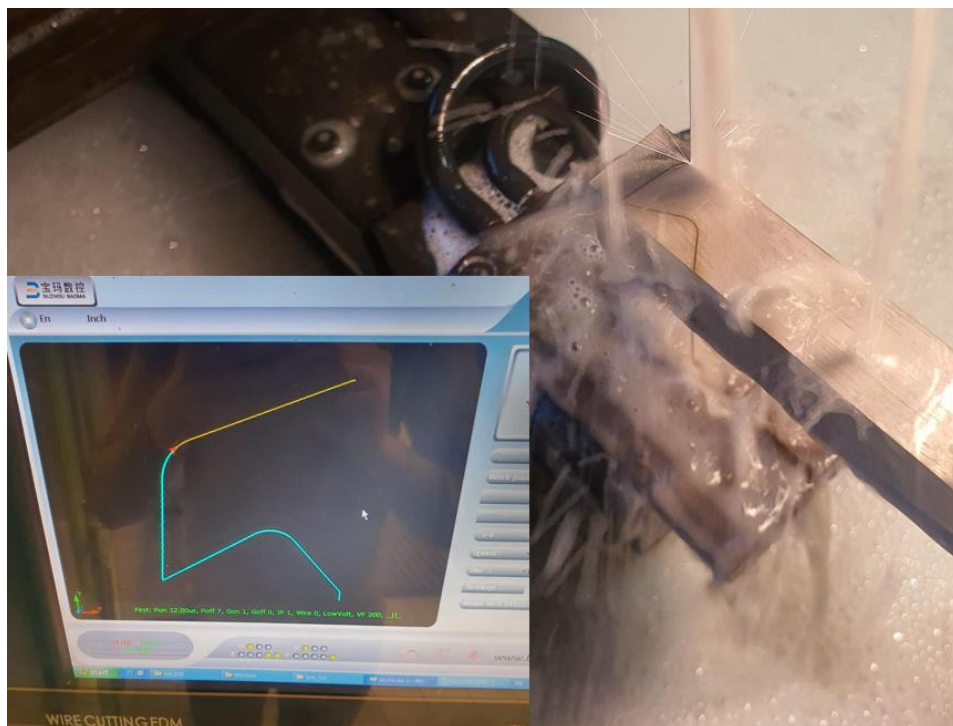
15. ábra A vizsgált szerszámok modellei

4.2.3. A megtervezett szerszámok gyártása

Az M35-ös gyorsacél előgyártmány szabványos 16x16 mm-es négyzet alapú hasábként állt rendelkezésemre. Mivel az előgyártmány már túlesett a hőkezelésen és megeresztésen, így keménysége 64 HRC volt. Ekkora keménység esetén nem, vagy csak nagyon nehezen, speciális körülmények között lett volna lehetőség marással való megmunkálására.

Mivel a szerszám geometriája kettő dimenziós így kézenfekvő megoldásnak bizonyult a huzalszikkával való megmunkálás. A technológia nagy előnye, hogy bármilyen anyag könnyedén megmunkálható vele. Kizárólag egy feltételnek kell teljesülnie, ami a jó villamosvezető-képesség.

A megmunkáláshoz a szerszám kettő dimenziós geometriáját kellett kiexportálni DXF formátumba, mert ezt a formátumot tudja kezelni a vezérlő. A szerszám asztalhoz való felfogatása során fontos volt ügyelni arra, hogy az előgyártmány oldala párhuzamos legyen a gép koordináta rendszerével. A 16. ábrán a G15A05-ös szerszám megmunkálása látható.



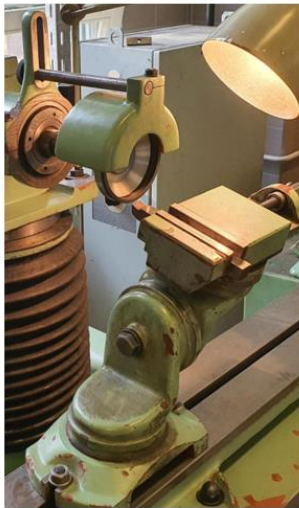
16. ábra Szerszám megmunkálása huzalszikkával

A technológia sajátossága, hogy egy nagy feszültségű ív kisülésének hatására kavitáció keletkezik és gyakorlatilag elég a megmunkálandó darab anyaga. Ez a folyamat rendkívül gyorsan következik be, illetve egyszerre több ívkisülés történik az anyag vastagságában. Kisülés során az ív hőmérséklete akár 3000 °C is lehet.

Ilyen magas hőmérséklet hatására az anyag a vágás mentén elszíneződik, illetve egy nagyon vékony, pár mikronos mélységben beedződik. Ennek hatására a felület viszonylag érdes, rossz minőségű lesz. Egy forgácsoló szerszám esetében törekedni kell a lehető legjobb felületminőségre.

Ezen okokból kifolyólag elengedhetetlen lépés az előnagyolt szerszámok köszörülése. A köszörülés segítségével könnyedén eltávolítható a változott szövetszerkezetű réteg, illetve a felület minősége a lehető legjobb lehet.

Köszörülés során a legfontosabb tényező a megfelelő korong kiválasztása. A nagyszilárdságú szerszámacélok esetében a legjobb felületi minőséget CBN szemcsékkel rendelkező köszörűkövel lehet elérni. Köszörülés során fontos a munkadarab (a,) rögzítése, hiszen ezen folyamat során kerül véglegesítésre a szerszám szögei. A 17.ábrán a szerszámok (b,) hátlapjának és (c,) homloklapjának köszörülése látható.



a,



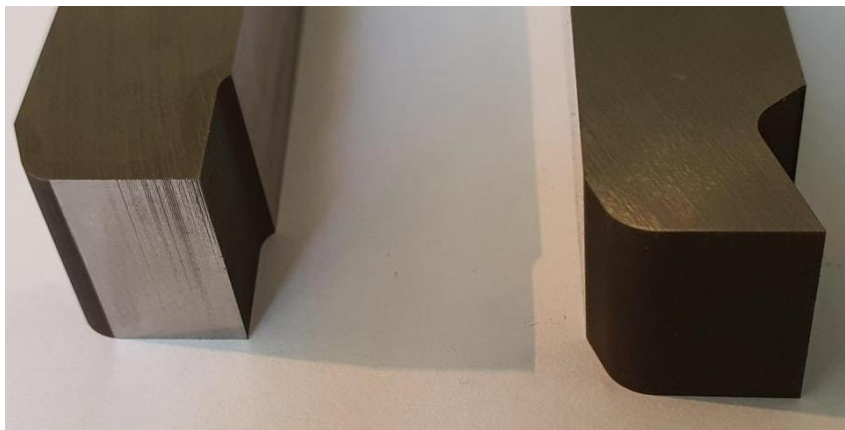
b,



c,

17. ábra Szerszám köszörülése

A köszörülés utáni eredményt jól szemlélteti a 18. ábra, ahol bal oldalon a köszörült hátlap, míg jobb oldalon a köszörülés előtti hátlap látható.



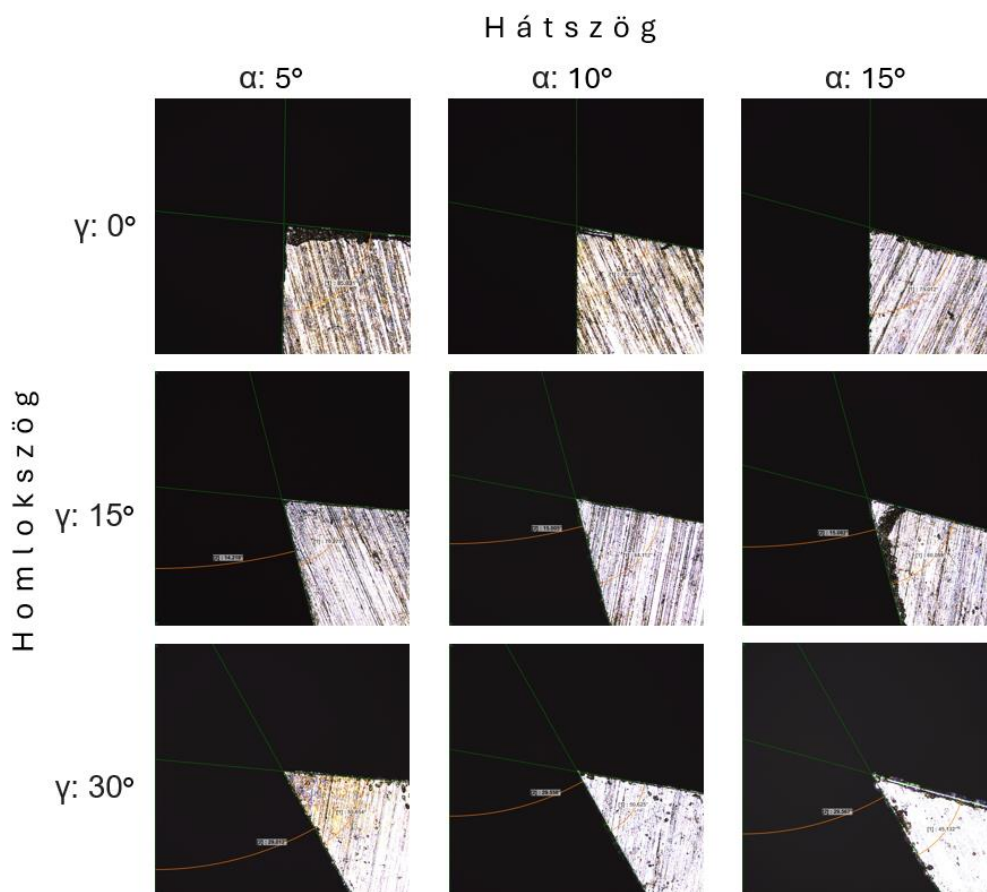
18. ábra Hátlap köszörülés előtt és után

4.2.4. Szerszámgeometria visszamérése

A szerszámok elkészítése után elengedhetetlen lépés volt azok visszamérése. Két fontos tényezőt kellett megállapítani. Az egyik a homlok és hátlap szöge mennyire tér el a tervezettől. A másik fontos kritérium az éllekerekítés mérése. A megmunkálás során törekedtem az éllekerekítés mellőzésére, tehát a cél a minél élesebb szerszám létrehozása volt.

A méréseket egy Olympus LEXT OLS5000 típusú konfokális mikroszkóp segítségével végeztem el. Ezen mikroszkóp segítségével meg tudtam vizsgálni a szerszám felületminőségét is.

A mérésekről készült felvételek a 19. ábrán láthatóak.



19. ábra Konfokális mikroszkóppal visszamért geometriák

A képeken látható, hogy az éleken nem található lekerekítés. A képek mérete mindegyik esetében 2573x2573 mikron. A visszamért szögek táblázatos formában a 6. táblázatban találhatóak.

6. táblázat Visszamért geometria

Szerszám megnevezése	Tervezett geometria			Valódi geometria		
	Homlokszög γ (°)	Hátszög α (°)	Csúcsszög β (°)	Homlokszög γ' (°)	Hátszög α' (°)	Csúcsszög β' (°)
G00A05	0	5	85	0	4,969	85,031
G00A10	0	10	80	0	10,861	79,139
G00A15	0	15	75	0	14,988	75,012
G15A05	15	5	70	14,218	5,507	70,275
G15A10	15	10	65	15,005	10,883	64,112
G15A15	15	15	60	15,082	14,859	60,059
G30A05	30	5	55	29,012	5,334	55,654
G30A10	30	10	50	29,558	9,817	50,625
G30A15	30	15	45	29,567	15,301	45,132

Az adatok jól mutatják, hogy a szerszámok legyártása pontos lett. A legnagyobb szögeltérés is kisebb mint 1° .

4.3. Megmunkáláshoz felhasznált szerszámgép

Kifejezetten gyalugép nem állt rendelkezésemre az egyetem falain belül, amin a mérést el tudtam volna végezni. Így más megoldást kellett keresnem céloom megvalósítása érdekében.

A választás során fontos szempont volt, hogy az adott gép nagy előtolásra legyen képes, azaz 15 m/perces előtolást tudjon. Fontos volt az is, hogy megfelelően merev legyen, ne keletkezzenek benne rezgések a megmunkálás során, amik az erőmérés során bezavarhatnak. Nem mellesleg pedig szem előtt kellett tartani azt is, hogy az erőmérőt milyen módon fogom rögzíteni, valamint a szerszám rögzítését is meg kellett oldani.

A választott gép egy NCT BNC-446-os CNC esztergagép. Ez egy rendkívül masszív síkágys eszterga. A 20. ábrán bal oldalon látható a gép burkolattal jobb oldalon pedig a csupasz gépváz és a vezetékek.



20. ábra NCT BNC-446 esztergagép [18]

A mérési környezet felépítése erre a gépre készül el. Az erőmérő a keresztcsánnon került rögzítésre. A szerszám pedig egy készülék segítségével a szegnyeregben helyezkedett el. A főorsóban a rögzítés nem megoldható, mivel a főorsót nem lehet stabilan lerögzíteni elfordulás ellen.

4.4. Kísérlet során alkalmazott készülék

A megmunkálás során vizsgált szerszám az esztergagép szegnyergében volt rögzítve, amelyet az előző pontban indokoltam. Fentebb az is nyilvánvalóvá válik, hogy a főmozgást a munkadarab és az erőmérő, míg a mellékmozgást gyalulás során a szerszám végzi.

Ezért egy olyan készüléket kellett terveznem, amely mereven összeköti a szerszámot a szegnyereggel és a fogásmélység beállítására is alkalmas.

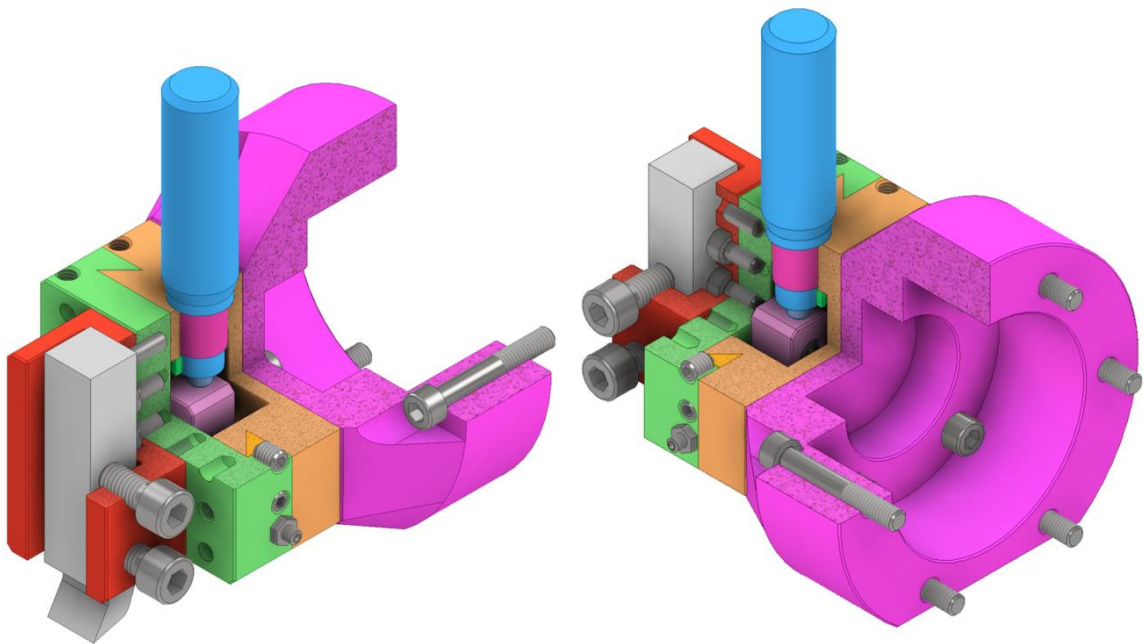
4.4.1. A készülék megtervezése

A készülék tervezése során a kiinduló peremfeltételek egyike a mozgathatóság. Százados pontossággal szükséges mozgatni a szerszámot a megfelelő fogásmélység elérése érdekében.

Ezt a nagy pontosságú mozgatót egy beépíthető mikrométer segítségével akarom elérni. Fontos azt is kiemelni, hogy ezen megoldás esetében holtjáték mentesen lehet állítani a szerszámot. Köszönhetően a mikrométer kialakításának.

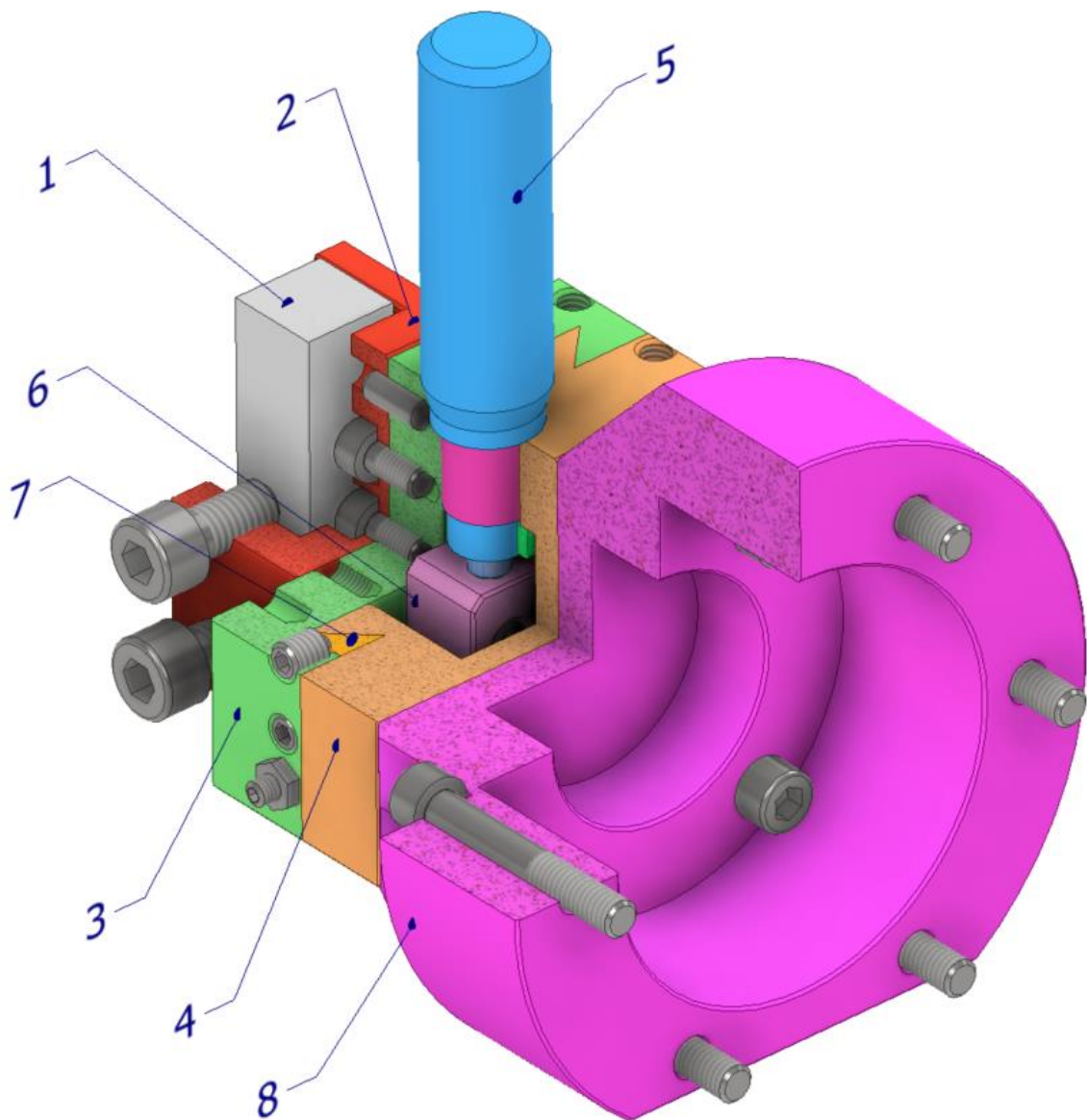
Abból az okból kifolyólag, hogy mozgatható a készülék ügyelni kell annak rögzítésére, hogy megmunkálás során ne tudjon elmozdulni.

A megtervezett készülék több nézetből a 21. ábrán látható.



21. ábra A szerszám befogásához szükséges készülék

A 22. ábrán és alatta láthatóak a készülék alkatrészei és elnevezéseik.



22. ábra A készülék alkatrészei számmal megjelölve

A készülék elemei sorrendben:

1. Gyalukés
2. Szerszámtartó
3. Készülék mozgó oldal
4. Készülék álló oldal
5. Beépíthető mikrométer
6. Ütköző
7. Hézagoló ék
8. Összekötő közdarab

A mozgás miatt egy fecskefarkas megvezetést terveztem a készülékhez. A holtjátékmentes működés érdekében elhelyezésre került egy hézagoló ék, amelyet csavarok segítségével lehet előfeszíteni.

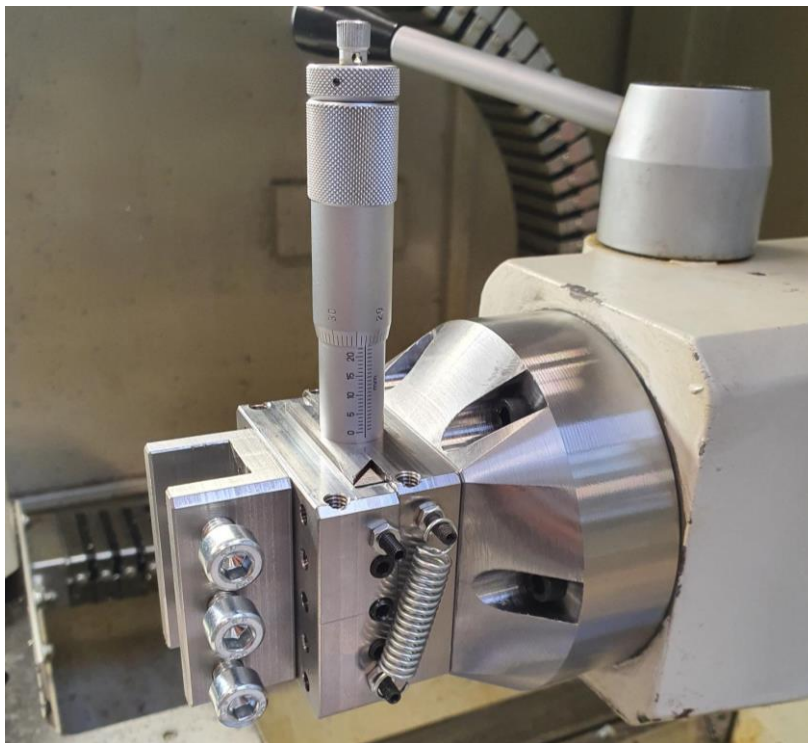
A mozgás rögzítését három darab M6-os hernyócsavar biztosítja. Ezek segítségével a hézagoló éket hozzá tudjuk szorítani az álló oldalhoz, így egy nagyon stabil rögzítést kapunk.

A készülékbe beépítésre kerülnek további kötőelem és illesztőszegek.

4.4.2. A készülék gyártása

A készülék gyártása során több fajta megmunkálást is alkalmazni kellett. Az alkatrészek acélból készültek el. Az alkalmazott megmunkálások közé tartozik, esztergálás, marás, szikraforgácsolás.

A legyártott és összeszerelt készülék a 23. ábrán látható. A készülék a szegnyeregére már rögzítésre került.



23. ábra A legyártott és összeszerelt készülék

A készüléken rugó biztosítja, hogy a mozgó oldal hozzá legyen feszítve a mikrométer végéhez. A készülék szegnyeregére felszerelése során fontos lépés volt a készülék beállítása szögtapintós mérőórával. Így biztosítható csak a szerszám pontos pozíciója megmunkálás során.

4.5. A méréshez használt munkadarab

A megmunkálni kívánt darab anyaga alumínium EN AW 6082. Azért az alumíniumra esett a választás mert egy könnyen megmunkálható anyag esetében akartam kipróbálni ezt a fajta mérési eljárást.

4.5.1. Felhasznált alapanyag

Az EN AW-6082 egy kiválóan alakítható, polírozható és korrózióálló szerkezeti anyag, amely elektrolízissel jól oxidálható és hegeszthető. Lágýított állapotban kitűnő rugalmas tulajdonságokkal rendelkezik, míg keményített állapotban is megfelelő mechanikai tulajdonságokat nyújt. Alakíthatósága különösen jó 450–500 °C hőmérsékleten. Korrózióállósága kiemelkedő, és feszültség hatására sem alakul ki korróziós pattogzás.

alkalmas olyan közepes igénybevételű, -70 és +50 °C közötti hőmérsékleten működő alkatrészek gyártására, ahol a jó technológiai feldolgozhatóság, a korrózióállóság és a dekoratív megjelenés fontos szempont. Az anyag széles körben alkalmazható az építőiparban, finommechanikai eszközökben, valamint repülőgépek és járművek gyártásában.

Tipikus felhasználási területei közé tartoznak a repülőgép- és helikopterabinok, burkolatok, ajtókeretek, válaszfalak, mozgólépcsők, bútorok, szegecselt hidak, portáldaruk és zászlórudak.

A felhasznált alapanyag kémiai összetételét a 7. táblázat tartalmazza [21].

7. táblázat EN AW-6082 kémiai összetétele

	Si szilícium	Fe vas	Cu réz	Mn mangán	Mg magnézium	Cr króm	Zn cink	Ti titán
EN AW-6082	0,7 - 1,3	max 0,50	max 0,10	0,40 - 1,0	0,60 - 1,20	max 0,25	max 0,20	max 0,10

A legfontosabb fizikai tulajdonságai az EN AW-6082-es anyagnak a 8. táblázatban találhatók [21].

8. táblázat EN AW-6082 fizikai tulajdonságai

	Fajlagos tömeg ρ , (kg/m ³)	Hővezetőképesség 20C°-on λ , (W/m°K)	Fajhő 20 C°-on c , (J/kg°K)
EN AW-6082	2700	210	$0,91 \times 10^3$

A mechanikai tulajdonságokat pedig a 9. táblázat tartalmazza. A táblázatban található adatok a hőkezelt állapotot mutatják be [21].

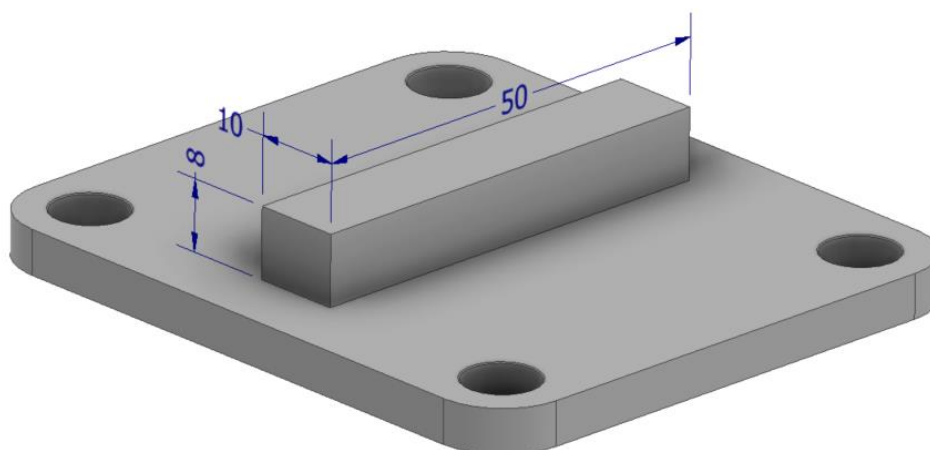
9. táblázat EN AW-6082 mechanikai tulajdonságai

	Szakítószilárdság (MPa)	Folyáshatár (MPa)	Nyúlás (A ₅ %)	Kontrakció (Z %)	Keménység (HB)
EN AW-6082	310	260	8	10	95

4.5.2. A munkadarab geometriája

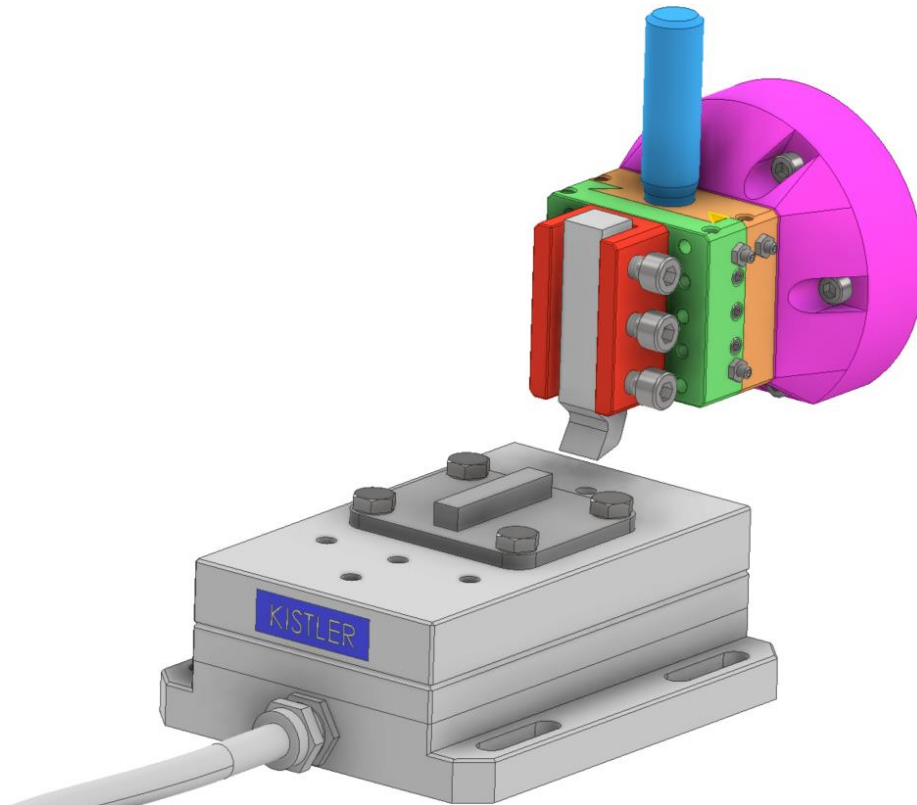
A megmunkálás során a főmozgást a munkadarab végzi. A darab közvetlenül 4 db. csavar segítségével rögzítésre kerül az erőmérőn.

A munkadarab geometriája fogja meghatározni a megmunkálás hosszát és szélességét. Mivel szabadforgácsolást akarok végezni, így a szerszám vastagságánál (16 mm) vékonyabb munkadarabot kell tervezni. A munkadarab méreteit a 24. ábra mutatja be.



24. ábra A munkadarab méretei

A munkadarab rögzítését az erőmérőhöz és a teljes kísérleti környezetet a 25. ábra szemlélteti.



25. ábra A mérési környezet modellje

4.6. A kísérlet során alkalmazott technológia

A megmunkálás sajátosságából kifolyólag a fogácsolás során csak néhány fontos technológiai paramétert lehet beállítani.

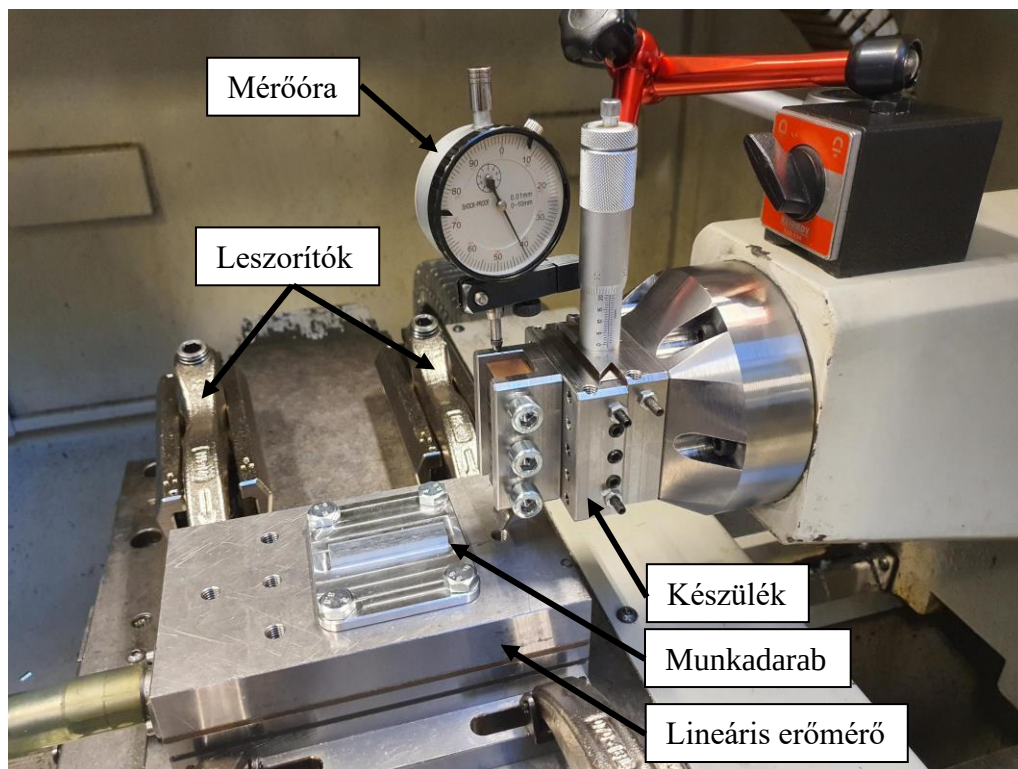
A kísérlet során alkalmazott forgácsoló technológia a következő:

- forgácsoló sebesség, $v_c = 15$ m/perc
- fogásmélység, $a = 0.04$ mm
- fogásszélesség, $B = 10$ mm
- megmunkálási hossz, $L = 50$ mm

A beállított technológia tapasztalati úton került meghatározásra.

5. A mérések elvégzése

A méréseket a fent említett eszközökkel és összeállítással végeztem. A teljes összeállítás a 26. ábrán látható.



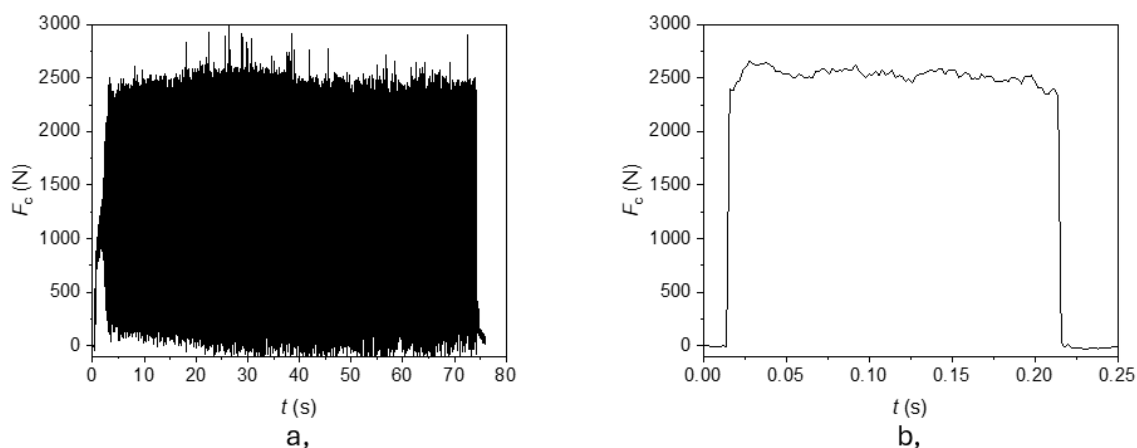
26. ábra A mérési környezet teljes összeállítása

A mérőóra segítségével mindig vissza tudtam ellenőrizni a szerszám elmozdulását. Erre azért volt szükség mivel a készülék rögzítése során 0.01 mm-t el tudott mozdulni. A mérőóra segítségével ezt az elmozdulást mindig vissza tudtam ellenőrizni és korrigálni amikor szükség volt rá.

5.1. Forgácsoló erők mérése

Az erők mérést a már bemutatásra került lineáris erőmérő segítségével végeztem el. A felhasznált mérőszoftver a Kistler által forgalmazott DynoWare. A mérési frekvencia 500 Hz volt. Ezen beállítás a mérések időbeni gyakoriságát mutatja meg. Tehát másodpercenként 500 mintavétel történt a megmunkálás során.

A dolgozat során többször hangsúlyozva volt, hogy más megmunkálás esetében (marás vagy esztergálás) az erőmérés eredménye rendkívül zajos. Ezen megmunkálás esetében viszont ez a zaj nem jelentkezik. Ezt nagyon jól szemlélteti a 27. ábra.



27. ábra Nyers erőmérési eredmények

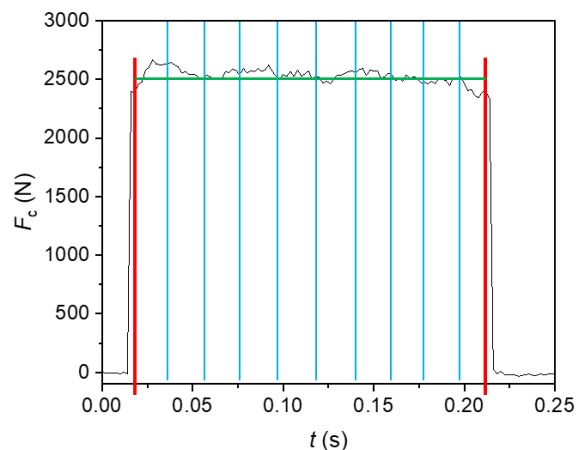
Az (a) diagramm egy régebbi mérés során keletkezett, ahol esztergálás során rozsdamentes tengely beszúrását vizsgáltuk. Az itt alkalmazott technológia v_c : 50 m/perc f: 0.05 mm/ford. Látható a diagrammon, hogy rendkívül zajos a mérés. Ilyen esetekben Az FFT (Fast Fourier Transform) transzformációt alkalmazzuk a zaj csökkentése érdekében. Viszont ezen formula használata rendkívül szubjektív. Ugyanis minél nagyobb frekvenciára szűrünk rá annál laposabb, simább függvényt kapunk, így akár fontos részleteket is elveszítünk.

A (b) diagram a jelenlegi gyalulás során keletkező nyers erőmérési eredmény tartalmazza a G30A10-es elnevezésű szerszám esetében. Céлом ilyen mérési eredmény elérése volt, ahol egyáltalán nem keletkezik zaj és így nincs szükség FFT transzformációra.

5.1.1. Az erőmérés eredményei

Annak köszönhetően, hogy szabadforgácsolást végeztem nem ébredt eltérítő erő (F_{el}). Tehát kizárólag kettő erőkomponenst vizsgáltam, illetve azok eredőjét az (1) képlet alapján. Így a kiértékelésben a nyomó erő, fogácsoló erő és a fő forgácsoló erő lesz látható. Az erők kiértékelés az Origin szoftverben történt meg.

A kiértékelés folyamatának szemléltetését a 28. ábra segíti.



28. ábra A kiértékelés folyamata grafikusán ábrázolva

A mért adatok kiértékeléséhez első lépésként ki kellett szűrni a felesleges adatokat. A két piros vonal által határolt szakasz kerül kiértékelésre, tehát az erőfelfutását és lefutását nem vesszük bele.

Az így kapott intervallumot felosztjuk 10 egyenlő nagyságú részre, ezeket a kék vonalak határolják be. Majd ezen szakaszokon belül vesszük az értékek mediánját. Ez 10 darab medián értéket jelent.

A kapott medián értékeket pedig átlagoljuk és megkapjuk az általunk keresett értéket, amelyet jelen esetben a zöld vonal mutat meg.

Természetes ez a folyamat nem a függvényen történt meg hanem az adatok között. A függvény kizárólag a jó szemléltethetőséget hivatott szolgálni.

A kiértékelt erő eredményeket a 10. táblázat foglalja össze.

10. táblázat Kiértékelt erőmérési eredmények

Szerszám megnevezése	Erőmérés eredményei		
	Forgácsoló erő F_c (N)	Nyomó erő F_{ny} (N)	Eredő forgácsoló erő F (N)
G00A05	2370,3	1176,5	2646,2
G00A10	2770,1	1302,6	3061,1
G00A15	3393,5	1683,0	3787,9
G15A05	2501,0	742,6	2608,9
G15A10	2572,8	704,3	2667,5
G15A15	2839,1	811,1	2952,7
G30A05	2226,3	199,2	2235,2
G30A10	2529,9	273,4	2544,7
G30A15	2725,3	318,2	2743,8

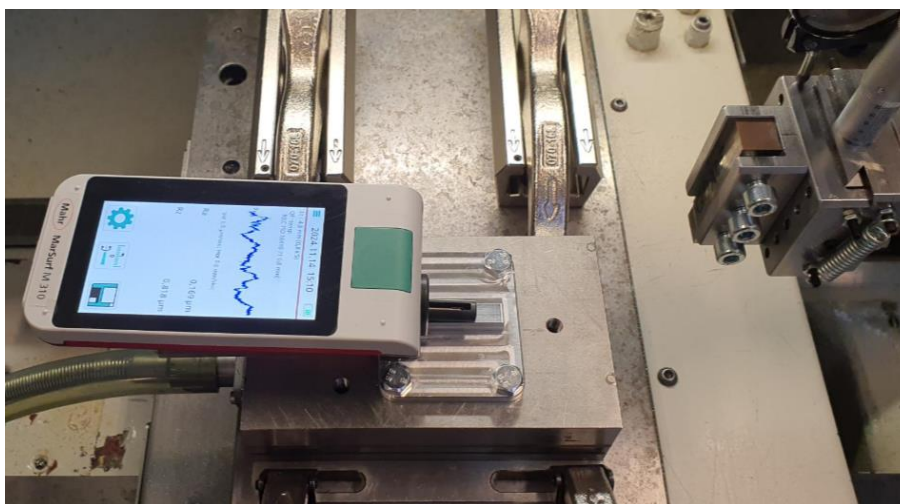
5.2. Érdességmérés

A simító, finiselő forgácsoló megmunkálások egyik fontos tényezője a megmunkált darab felületi minősége. Ezt a leggyakrabban érdességméréssel szoktuk ellenőrizni [2].

Az iparban legelterjedtebb mutatószámok egy felület minőségére az R_a átlagos felületi érdesség és az R_z az egyenetlenség magasság. Ezen mutatószámokon kívül még sok más az iparban használatos szabványos érdesség jelölés használatos [13].

A megmunkálás után mérésre került a munkadarab felületi érdessége. A mérést egy MahrSurf M 310-es hordozható érdességmérő segítségével végeztem el.

A méréseket a hitelesség érdekében mindig háromszor végeztem el majd ezek átlagát vettem. A 29. ábrán az érdességmérés látható megmunkálás után.



29. ábra Érdességmérés a megmunkálás után

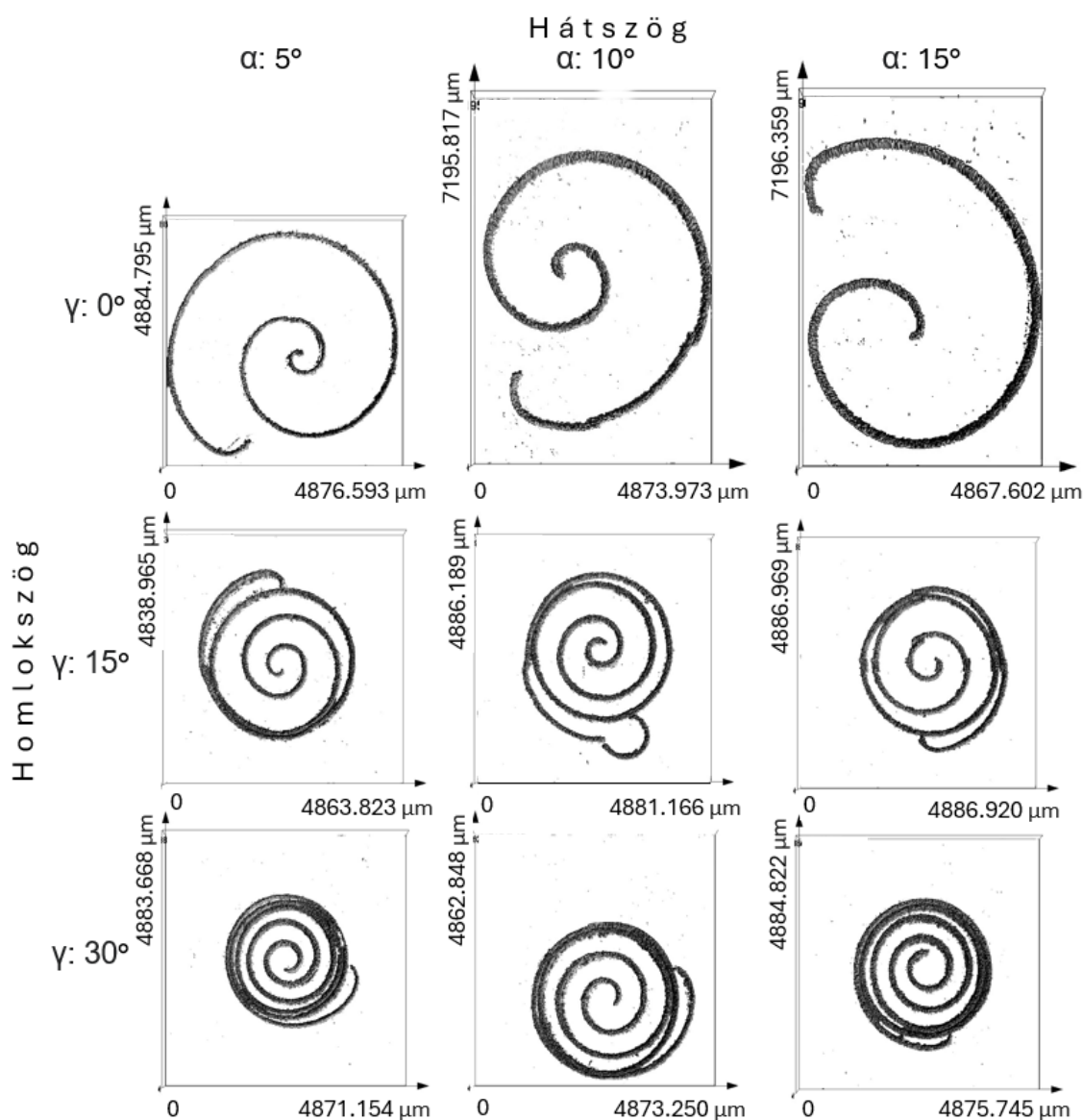
Az érdességi eredményeket a 11. táblázat foglalja össze.

11. táblázat Az érdességmérés eredményei

Szerszám megnevezése	Érdességmérés eredményei							
	R_a 1 (μm)	R_a 2 (μm)	R_a 3 (μm)	R_a átl. (μm)	R_z 1 (μm)	R_z 2 (μm)	R_z 3 (μm)	R_z átl. (μm)
G00A05	0,088	0,065	0,089	0,081	0,666	0,525	0,548	0,580
G00A10	0,081	0,077	0,087	0,082	0,516	0,830	0,864	0,737
G00A15	0,099	0,103	0,133	0,112	0,726	0,960	0,990	0,892
G15A05	0,130	0,091	0,108	0,110	0,757	0,887	0,660	0,768
G15A10	0,073	0,098	0,076	0,082	0,544	0,785	0,569	0,633
G15A15	0,137	0,138	0,100	0,125	1,230	0,870	0,733	0,944
G30A05	0,096	0,091	0,090	0,092	0,685	0,690	0,642	0,672
G30A10	0,120	0,120	0,144	0,128	0,768	0,766	0,885	0,806
G30A15	0,121	0,143	0,113	0,126	0,855	1,010	0,775	0,880

5.3. Forgács méretének vizsgálata

A megmunkálás során keletkező forgácsról a már fentiekben említett konfokális mikroszkóp segítségével felvételeket készítettem. A forgácsról készült felvételek a 30. ábrán láthatóak a hátszög és homlokszög változásának hatására.



30. ábra Forgácsok mikroszkópi képe

A forgács vizsgálata során jól látható, hogy a homlokszög növekedésével a forgács zömölése nagyobb mértékű. A hátlap szögének módosításának hatására nem tapasztalható jelentős mértékű változás.

A homloklap dőlésszögének növelésével nő a nyírási sík dőlésszöge a forgácstőben [13]. Ez a jelenség eredményezi a forgács nagyobb alakváltozását nagyobb homlokszög esetében.

6. Eredmények kiértékelése

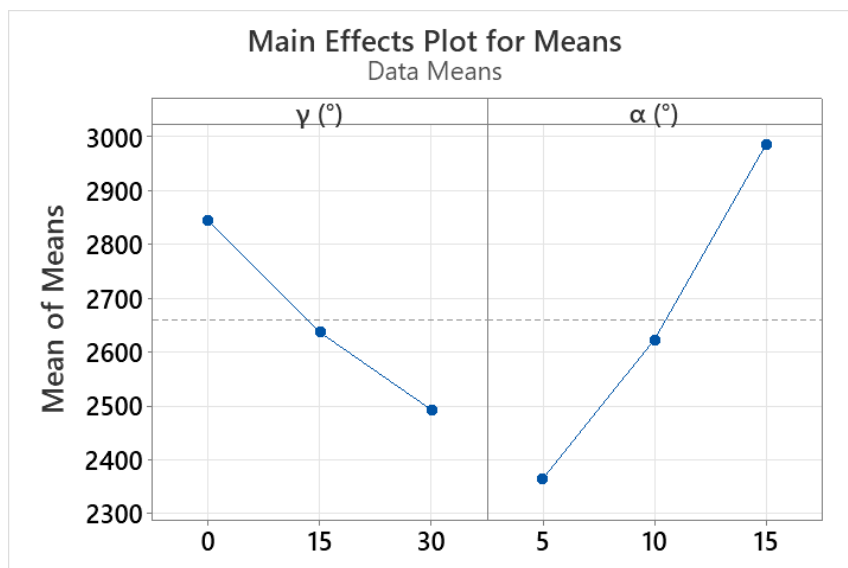
A kísérlet során lineáris kísérlettervet alkalmaztam melyet már fentebb részleteztem. A kiértékelés során a megmunkálás során mért erők és érdességek kerülnek kiértékelésre.

A kiértékelést Taguchi főhatás vizsgálattal végeztem el. Ez a módszer lehetővé teszi, hogy az egyes tényezők hatását elkülönítve vizsgáljam [19]. A főhatás elemzés során azt vizsgálom, hogy a tényezők különböző szintjei hogyan befolyásolják a válaszváltozót (erő, érdesség). Ez segít az optimális geometria megállapításában.

6.1. Forgácsoló erők kiértékelése

6.1.1. F_c forgácsoló erő kiértékelése

A 10. táblázatban található F_c forgácsoló erő értékek főhatás diagramját a 31. ábra tartalmazza.



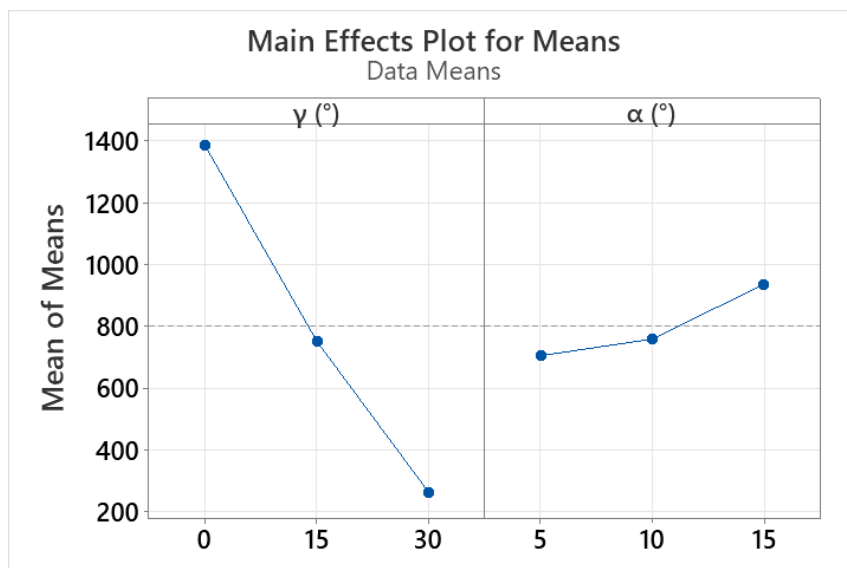
31. ábra F_c forgácsoló erő főhatás diagrammja

A diagrammról jól látható, hogy az F_c erő értékét a hátszög befolyásolja a legjobban. Minél meredekebb egy faktor a diagrammja annál nagyobb annak hatása a vizsgált tényezőre. Jelen esetben a forgácsoló erőre.

Tehát elmondható az, hogy ha növeljük a homlokszögét a szerszámnak csökkenni fog az F_c forgácsoló erő. Viszont, ha a hátszöget növeljük, úgy nőni fog az F_c fogácsoló erő.

6.1.1. F_{ny} nyomó erő kiértékelése

A 10. táblázatban található F_{ny} nyomó erő értékek főhatás diagramját a 32. ábra tartalmazza.

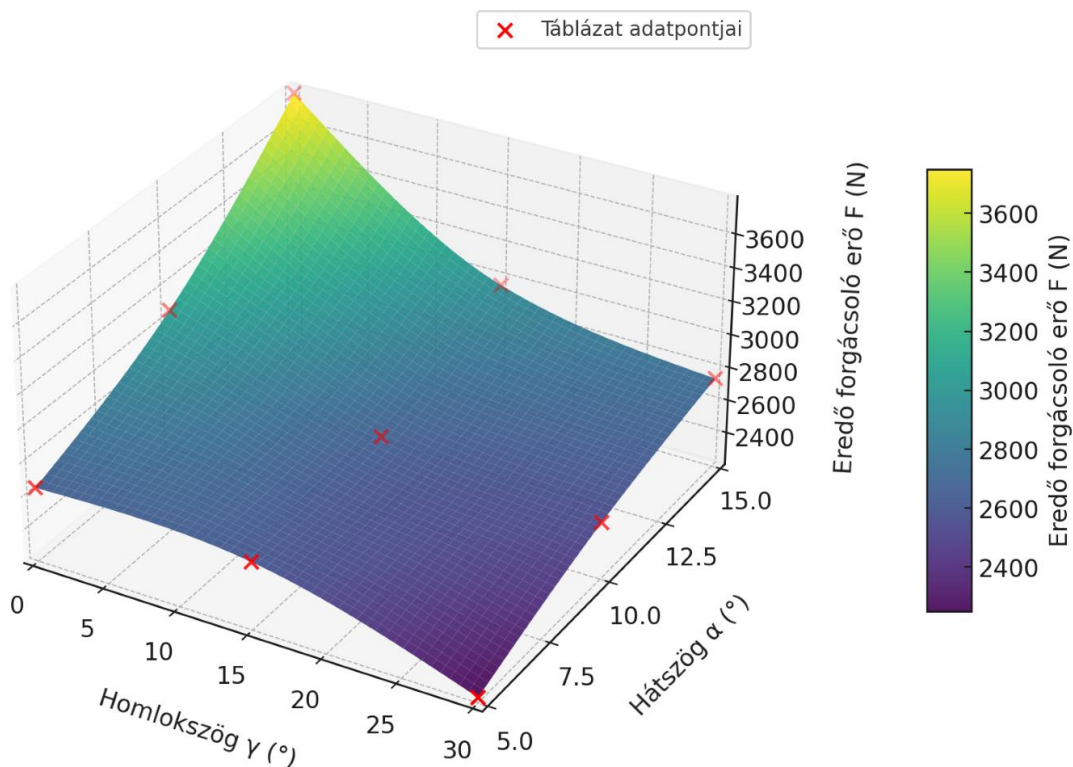


32. ábra F_{ny} nyomó erő főhatás diagrammja

Az ábráról jól látható, hogy az F_{ny} erőt legjobban a szerszám homlokszöge befolyásolja. Ha csökkentjük a szerszám homlokszögét, úgy csökkeni fog a nyomó erő is. A diagrammból az is jól látható, hogy a hátszög csak csekély mértékben befolyásolja az erőt.

6.1.2. F eredő forgácsoló erő kiértékelése

Az eredő fogácsoló erő forgácsoló erőt egy térkép diagramm segítségével ábrázolom a homlokszög és hátszög függvényében. A diagramm a 33. ábrán található.



33. ábra F eredő forgácsoló erő a homlokszög és hátszög függvényében

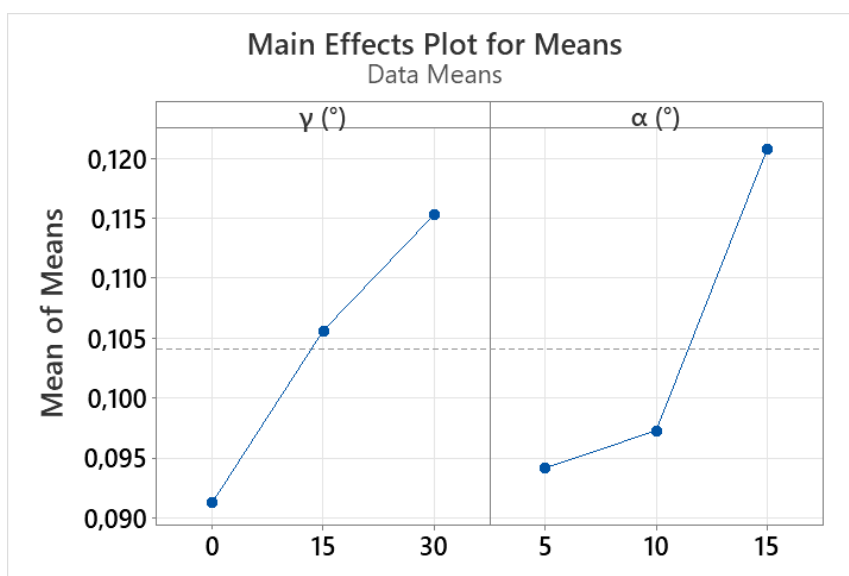
A diagrammról nagyon jól leolvashatóak a szélsőértékek. A G30A05-ös szerszám esetében a lekisebb, míg a G00A15-ös szerszám esetében a legnagyobb az F erő.

6.2. Felületérdességek kiértékelése

A felületi érdességek is a Taguchi főhatás diagramm alapján kerül kiértékelésre, csak úgy, mint az előző pontokban.

6.2.1. R_a felületi érdesség kiértékelése

A 10. táblázatban található R_a átl. felületérdességi értékek főhatás diagramját a 34. ábra tartalmazza.

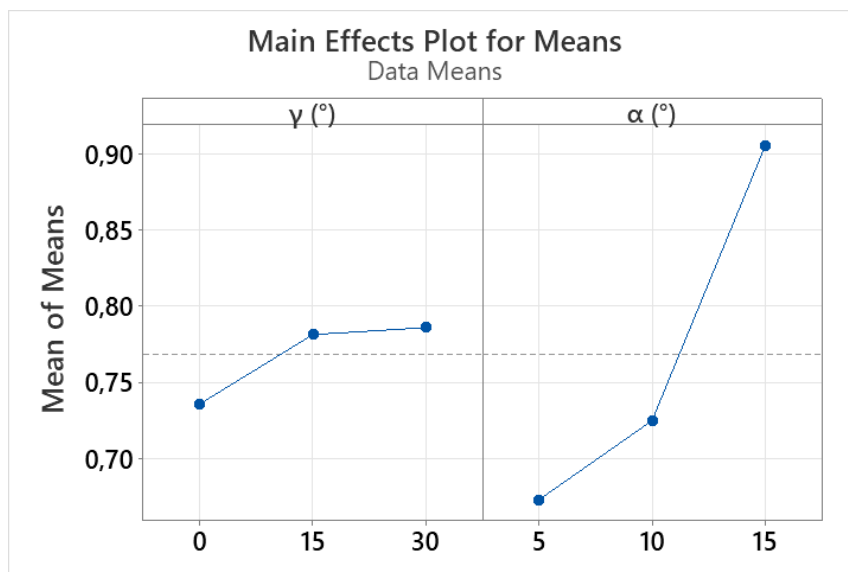


34. ábra R_a felületi érdesség főhatás diagrammja

A fő hatás diagramm alapján a homlokszög növelésével romlik az átlagos felületi érdesség. A hátszög esetében 5° és 10° között csak csekély mértékben fedezhető fel a felület romlása, viszont 15°-os hátszög esetében rendkívül megnő a felület átlagos érdessége.

6.2.2. R_z felületi érdesség kiértékelése

A 10. táblázatban található R_z átl. felületérdességi értékek főhatás diagramját a 35. ábra tartalmazza.



35. ábra R_z felületi érdesség főhatás diagrammja

Az átlagos felületérdességgel (R_a) ellentétben itt a homlokszög nincs akkora hatással az egyenetlenség magasságra. Viszont a homlokszög növelésével itt is tapasztalható a felület minimális romlása. A hátszög esetében itt is ugyanaz a tendencia mutatkozik meg, mint az R_a esetében. Tehát 10° és 15° -os hátlapszögnél a felület romlása jelentős.

6.3. Szerszám geometria ajánlás a kapott eredmények függvényében

A kapott eredmények értelmében célszerűnek látom, hogy egyfajta ajánlást tegyek. Három esetben szeretnék kiemelni három opcionális forgácsoló ék élgeometriát.

6.3.1. Simítás

Simítás során nagyon csekély fogásmélységgel dolgozunk. Így a forgácsolás során keletkező forgácsoló erő alacsony lesz. Mivel ezen művelet során hozzuk létre az alkatrész kész felületét, így kulcsfontosságú a kiváló felületi érdesség.

Simítás során az általam javasolt szerszám ék geometriája a G00A05, tehát a 0° -os homloklap és az 5° -os hátlap mivel ezen geometria esetében lehet elérni a lehető legjobb felületi érdességet.

6.3.2. Nagyolás

Nagyolás esetében jelentősen más a helyzet, mint simításnál. Ebben az esetben a lehető legrövidebb idő alatt a legtöbb anyagot kell lemunkálni egy alkatrészből. Tehát itt a forgácsoló erő nagysága kulcsfontosságú, míg a felületi érdesség nem játszik szerepet, mivel a nagyolás után a simítással állítjuk be az alkatrész felületi minőségét.

Nagyolás során az általam javasolt szerszám ék geometriája a G30A15, tehát a 30°-os homloklap és a 15°-os hátlap mivel ezen homlokszög geometria esetében lehet elérni a lehető legkisebb forgácsoló erőt.

Viszont, a 15°-os hátszög esetében minimálisan, de nagyobb erő ébred, mint az 5°-os esetében. A választásom mégis azért esik a 15°-os hátlapra mivel nagyolás során nagy előtolással történik a megmunkálás és egy szerszám esetében a hátszög az, ami egyfajta felső maximális limitet ad az előtolás nagyságának. Ez főleg fűrók esetében szokott felmerülni. Valamint fontos megemlíteni, hogy ennél a geometriánál az egyik legkisebb a keletkező forgács nagysága. Ez is egy nagyon fontos dolog hiszen a megmunkálás esetében oda kell figyelni a forgács kezelése is.

6.3.3. Univerzális nagyolásra és simításra is alkalmas szerszám

Talán itt a legnehezebb egyfajta ajánlást tenni mivel itt minden lehetséges szempontot figyelembe kell venni. Tehát a szerszámnak termelékenynek kell lennie, de mégis jó felületi minőséget kell produkálnia.

Az általam javasolt szerszám ék geometriája a G15A10, tehát a 15°-os homloklap és a 10°-os hátlap mivel ezen geometria esetében a forgácsoló erők viszonylag alacsonyok.

A 10°-os hátlapra azért esett a választás, mert ennél az értéknél még lehet nagyobb előtolással dolgozni a szerszámmal és még jó felületi minőséget is lehet vele gyártani.

A 15°-os homlokszögre pedig azért esett a választás, mert a forgács ebben az esetben már sokkal kisebb, mint a 0°-os esetében és a felületi érdesség nem romlik olyan jelentősen.

Összefoglalás

Dolgozatom elején irodalomkutatót végeztem a korszerű forgácsoló szerszámok anyagairól, a forgácsolást leíró jellemzőkről és azok mérési lehetőségeiről. Mivel dolgozatom témája a forgácsoló ék geometriájának vizsgálata, így ebben a témában egy részletes irodalomkutatót végeztem.

Az irodalomkutató után megfogalmaztam azt a környezetet, megmunkálást, amely során a kísérletet elvégeztem. A kísérlettervezésben részletesen bemutattam a szerszámok tervezésének és gyártásának lépéseit. A szerszámok gyártását követően elengedhetetlen volt azok minőségellenőrzése, amelyet egy korszerű konfokális mikroszkóp segítségével végeztem el. Továbbá részleteztem a méréshez szükséges készülék megtervezését és gyártását. Bemutatásra került az összeállított mérési környezet és a megmunkálás során alkalmazott technológia.

Részletesen bemutattam a kísérlet során rögzített adatokat és azok kiértékelését. Vizsgáltam a forgácsolás során keletkezett forgácsokat, amelyeket szintén a konfokális mikroszkóp segítségével tudtam megtenni.

A mérési eredményeket részletesen kiértékeltem azokból következtetéseket vontam le. A kiértékelésnél a Taguchi főhatás diagrammot alkalmaztam.

Az eredmények ismeretében ajánlást tettem egy simító egy nagyoló és egy univerzális, simításra és nagyolásra is alkalmas szerszám geometriájára.

Kutatásom során a fő célokat elértem, a várakozásokat teljes mértékben felülmúlták az eredmények. Ezt az irányt, azaz ezt a fajta forgácsoló ék geometria vizsgálati metodikát szeretném tovább bővíteni és más anyagok acélok, színesfémek esetében is elvégezni. Valamint más szerszám anyagok esetében is szeretnék méréseket végezni, például keményfém szerszám esetében. Nagyon nagy lehetőséget látok még abban is, hogy a dolgozatban bemutatott mérést végelelemes szimulációkörnyezetben is lehetne tovább vizsgálni. Illetve ezen megmunkálásokat különböző hűtő kenő folyadékok segítségével is el lehet végezni, amelyek valószínűsíthetőleg tovább javítanák az eredményeket.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Kónya Gábornak és Vaczkó Dánielnek, amiért segítettek dolgozatom elkészülését és gyakorlatban is biztosították, hogy elmélyülhessek a forgácsoló ék geometriájának vizsgálata terén.

Valamint Dr. Kovács Zsoltnak, hogy motivált és segített a dolgozatom megírásában.

Ábrajegyzék

1. ábra: Keményfém fázisok és szemcse méretek [6].....	5
2. ábra Keményfém szerszám gyártásának lépései [8]	6
3. ábra: Különböző mikroszerkezetű kerámiák [9]	7
4. ábra: A megmunkálás során ébredő erők [11].....	8
5. ábra Nyomaték méréséhez használható eszközök	9
6. ábra Lineáris erőmérő eszközök	10
7. ábra: A hőforrások és hőáram [12]	11
8. ábra Forgácsolás során keletkező hő hőkamerás mérése [14]	12
9. ábra Forgácsolás során keletkező hő hőelemes mérése [13]	12
10. ábra Állítható lapkafészekkel felszerelt szerszámtest [15].....	13
11. ábra Forgácsoló erő kísérleti mérési elrendezése [16].....	15
12. ábra 2D végeelemes szimuláció a fémforgácsolásról [17].....	16
13. ábra Hőmérsékleteloszlás a szerszám és a forgács között [17]	17
14. ábra A kísérlet során alkalmazott megmunkálás elvi vázlata.....	18
15. ábra A vizsgált szerszámok modellei	21
16. ábra Szerszám megmunkálása huzalszikkával	22
17. ábra Szerszám köszörülése	23
18. ábra Hátlap köszörülés előtt és után	23
19. ábra Konfokális mikroszkóppal visszamért geometriák.....	24
20. ábra NCT BNC-446 esztergagép [18]	25
21. ábra A szerszám befogásához szükséges készülék.....	26
22. ábra A készülék alkatrészei számmal megjelölve	27
23. ábra A legyártott és összeszerelt készülék.....	28
24. ábra A munkadarab méretei.....	30
25. ábra A mérési környezet modellje	31
26. ábra A mérési környezet teljes összeállítása.....	32
27. ábra Nyers erőmérési eredmények	33
28. ábra A kiértékelés folyamata grafikusan ábrázolva.....	34
29. ábra Érdességmérés a megmunkálás után	35
30. ábra Forgácsok mikroszkópi képe	36
31. ábra F_c forgácsoló erő főhatás diagrammja	37
32. ábra F_{ny} nyomó erő főhatás diagrammja.....	38
33. ábra F eredő forgácsoló erő a homlokszög és hátszög függvényében.....	38
34. ábra R_a felületi érdesség főhatás diagrammja.....	39
35. ábra R_z felületi érdesség főhatás diagrammja.....	40

Irodalomjegyzék

- [1] J. R. & B. K. Smith, „Tool Materials and Their Properties,,” *Manufacturing Engineering Journal*, 2010, pp. 45-48.
- [2] P. & Z. Y. Kumar, „Advancements in Cutting Tool Technology,,” *Journal of Materials Science*, 2015, pp. 101-116.
- [3] J. P. Davim, „Machining: Fundamentals and Recent Advances,,” Springer, p. 2008.
- [4] „Szerszámacélok,,” Széchenyi Egyetem, [Online]. Available: https://rs1.sze.hu/~hargitai/2015%20Mernoki%20anyagok_Jarmuszerkezeti%20anyagok/Eloadasok/9%20EA%20Szerszamacelok.pdf. [Hozzáférés dátuma: 08 11 2024].
- [5] „Forgácsolószerszám-anyagok,,” Sandvik Coromant, [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge-old/materials/cutting-tool-materials>. [Hozzáférés dátuma: 08 11 2024].
- [6] P. Novotny, *Tool and Die Steels*, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001.
- [7] BOSCH, „Keménység minőségek,,” [Online]. Available: https://ac-elearning.bosch-pt.com/mlearning/bcarbide/pageone_hu.html.
- [8] Kennametal, „Carbide Grades and Applications,,” [Online]. Available: <https://www.kennametal.com/us/en/products/carbide-wear-parts/fluid-handling-and-flow-control/separation-solutions-for-centrifuge-machines/tungsten-carbide-materials.html>. [Hozzáférés dátuma: 08 11 2024].
- [9] BOHLERIT, „Hartmetall werkzeuge című Power Point előadás,,” p. 7.
- [10] S. Coromant, „Kerámia forgácsolószerzám anyagok,,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>. [Hozzáférés dátuma: 08 11 2024].
- [11] I. Dudás, *Gépgyártástechnológia II.*, Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó, 2001.
- [12] G. Gyula, „A forgácsolóerő nagyságának meghatározásáról,,” [Online]. Available: <https://galgoczi.net/anyagok/A%20forgacsoloero%20nagysaganak%20meghatarozasarol.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 05 11 2024].
- [13] R. T. é. mtsa, *Advanced monitoring of machining operations*, CIRP Ann Manuf, 2010.
- [14] J. Kodácsy, *Gépgyártás*, Kecskemét: NJE-GAMFK, 2009.
- [15] J. T. ., I. M. Z. F. K. Gábor Kónya, „Investigation of the effects of machining parameters on cutting conditions during orthogonal turning of austenite stainless steel,,” *PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES*, pp. 86-93, 2024.
- [16] S.-H. C. C.-H. Pan, „Influence of Rake Angles of Multi-Position Tool on,,” *MDPI*, 2018.
- [17] A. L. G. D. Filippou Soukatzidis, „EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUTTING DEPTH, TOOL,,” *ResearchGate*, 2008.
- [18] A. R. M. K. A. A. S Sulaiman, „Finite Element Modeling of the effect of tool rake angle on tool temperature and cutting force during high speed machining of AISI 4340 steel,,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2013.
- [19] „Total Materia,,” [Online]. Available: <https://www.totalmateria.com/en-us/articles/high-speed-steels/>. [Hozzáférés dátuma: 08 11 2024].
- [20] „NCT® honlapja,,” [Online]. Available: <https://www.nct.hu/indexcs.php>. [Hozzáférés dátuma: 08 11 2024].
- [21] „ALLOY DATA SHEET,,” Nedal aluminium, [Online]. Available: <https://xometry.eu/wp-content/uploads/2020/09/Datasheet-EN-AW-6082.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 08 11 2024].
- [22] R. ROY, *A Primer on the Taguchi Method*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.

