

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

MÓRICZ LÁSZLÓ

Soproni Egyetem

Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Sopron

2023

Doktori (PhD) értekezés

Soproni Egyetem

Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Dr. Németh Róbert egyetemi tanár

Doktori program:

Programvezető:

Tudományág: anyagtudomány és technológiák

**SZERSZÁMKOPÁS FELÜGYELETE ÉS OPTIMALIZÁLÁSA  
KERÁMIÁK MIKROMARÁSA SORÁN**

Készítette: Móricz László

Témavezetők: Dr. Viharos Zsolt János

Dr. Csanády Etele

Sopron

2023

**SZERSZÁMKOPÁS FELÜGYELETE ÉS OPTIMALIZÁLÁSA KERÁMIÁK  
MIKROMARÁSA SORÁN**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében  
a Soproni Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák  
Doktori Iskolája

.....programja

Írta:

.....

Készült a Soproni Egyetem Cziráki József Doktori Iskola

..... programja keretében

Témavezető: Dr. ....

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton ..... -ot ért el,

Sopron, .....

.....

a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr. ....) igen /nem

(aláírás)

Második bíráló (Dr. ....) igen /nem

(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr. ....) igen /nem

(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján..... - ot ért el

Sopron,

.....  
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....  
Az EDHT elnöke

## NYILATKOZAT

Alulírott Móricz László jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a(z) SZERSZÁMKOPÁS FELÜGYELETE ÉS OPTIMALIZÁLÁSA KERÁMIÁK MIKROMARÁSA SORÁN című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a Soproni Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.<sup>1</sup>

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezető(i)met, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy az értekezést nem magam készítettem, vagy az értekezéssel kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem megtagadja az értekezés befogadását.

Az értekezés befogadásának megtagadása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Sopron, 20.....

.....  
doktorandusz

---

<sup>1</sup> **1999. évi LXXVI. tv. 34. § (1)** A mű részletét – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.

**36. § (1)** Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára – a cél által indokolt terjedelemben – szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást – a szerző nevével együtt – fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

# Tartalomjegyzék

<b>Tartalomjegyzék .....</b>	<b>5</b>
<b>Alkalmazott főbb jelölések .....</b>	<b>8</b>
<b>Előszó .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Bevezetés .....</b>	<b>11</b>
1.1 Téma aktualitása .....	11
1.2 Kutatómunkám rövid bemutatása.....	12
<b>2 Irodalmi áttekintés.....</b>	<b>14</b>
2.1 Gázturbina lapátok hűtési-és gyártástechnológiai problémái.....	14
2.1.1 Konvencionális hűtés .....	16
2.1.2 Filmhűtés.....	17
2.2 Kerámia anyagok.....	19
2.2.1 Kerámia anyagok tulajdonságai .....	19
2.2.2 Kerámiák gyártástechnológiája .....	22
2.2.3 Felhasználási lehetőségek .....	23
2.2.4 Napjaink trendjei a kerámia alapanyagokkal kapcsolatban.....	25
2.3 Kerámia alapanyagok megmunkálási lehetőségei.....	26
2.3.1 Kerámia megmunkálás köszörüléssel .....	26
2.3.2 Kerámia megmunkálás lézerrel.....	26
2.3.3 Kerámia megmunkálás vízsugaras vágással .....	27
2.3.4 Kerámia megmunkálás EDM technológiával.....	27
2.4 Megmunkálás szabályos élgeometriával .....	28
2.4.1 Forgácsolási folyamatok alapjai .....	28
2.4.2 Marás .....	30
2.4.3 Mikro-megmunkálás .....	33
2.4.4 Szerszámélettartam .....	36
2.4.5 Kerámia megmunkálás szabályos élgeometriájú szerszámokkal.....	41
2.4.6 Forgácsolási jellemzők hatása a szerszámra kerámia megmunkálás során.....	42
2.4.6.1 Szerszámjellemzők kerámia megmunkálás során.....	43
2.4.6.2 Hűtőfolyadék hatása a szerszám élettartamra .....	45
2.4.6.3 Alakváltozás tartománya forgácsleválasztás során.....	45

<b>3</b>	<b>A kutatás kitűzött céljai.....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>Kísérletek előkészítése- berendezések összeállítása.....</b>	<b>50</b>
4.1	Gyártott zseb geometriai bemutatása .....	50
4.2	Alkalmazott szerszám gép.....	50
4.3	Alkalmazott forgácsoló szerszám bemutatása.....	51
4.4	Alkalmazott mérőeszközök bemutatása .....	52
<b>5</b>	<b>Elvégzett kísérletek bemutatása .....</b>	<b>54</b>
5.1	Szerszámhűtés .....	55
5.2	Kerámia alapanyag vizsgálata .....	58
5.3	Teljes faktoros kísérletterv .....	59
5.3.1	Beállítási paraméterek meghatározása.....	59
5.3.2	A kísérletterv kiértékelése analitikus módszerrel .....	65
5.3.2.1	Tiszta forgácsolási idő .....	65
5.3.2.2	A szerszám élettartama analitikus egyenletek alapján .....	67
5.3.2.3	Gyártható darabszám analitikus egyenlet alapján.....	70
5.4	A megmunkált zseb geometriák kiértékelése a függőleges szerszámmal történő megmunkálás esetén .....	71
5.5	Megmunkálás döntött munkadarab esetén .....	74
5.5.1	Döntött munkadarabos kísérlet felépítése .....	75
5.5.2	Zseb geometriájának összehasonlítása függőleges és döntött megmunkálás esetén	78
5.5.3	A beállítások reprodukálhatóságának vizsgálata .....	82
5.5.4	Szerszámok elhasználódásának folyamata különböző dőlésszögek mellett.....	83
5.6	Zsebek méretváltozása az alkalmazott pályastratégia függvényében.....	84
<b>6</b>	<b>Szerszámkopás felügyelet a három pálya stratégiánál ....</b>	<b>88</b>
6.1	Szerszámkopás fázisátmenetek definiálása a mikroszkópi felvételek alapján .....	88
6.1.1	Szerszám elhasználódás a hullámforma szerszámpálya esetén .....	91
6.1.2	Szerszám elhasználódás ciklois szerszámpálya esetén .....	93
6.1.3	Szerszám elhasználódása a láncolt szerszámpálya során .....	94
6.1.4	Szerszámkopás hatása a megmunkált zsebek méretváltozására .....	96
6.1.5	Szerszámütés vizsgálat .....	104

6.2	Szerszámkopás fázisátmenetek definiálása indirekt módszerrel..	107
6.2.1	Zsebek térfogatváltozása a gyártott darabszám függvényében .....	107
6.2.2	Zsebek szélének kipattogzódása a gyártott darabszám függvényében .....	108
6.2.2.1	Zseb szélek kipattogzása hullámforma szerszám pálya alkalmazása során...	109
6.2.2.2	Zseb szélek kipattogzása ciklois szerszám pálya alkalmazása során.....	110
6.2.2.3	Zseb szélek kipattogzása láncolt szerszám pálya alkalmazása során.....	111
6.2.3	Szerszámkopás határok definiálása a 2 módszer alapján .....	111
<b>7</b>	<b>Szerszámkopás felügyelet a rezgésjelek alapján.....</b>	<b>116</b>
7.1	Összetett gépszerkezetek rezgésjelei.....	117
7.2	Mérés és adatgyűjtés.....	118
7.3	Rezgés adatok feldolgozásának menete .....	120
7.3.1	Rezgés adatok kiértékelés nyers adatsor alapján .....	120
7.3.2	Etalon görbe keresése Adaptive Hybrid Feature Selection algoritmus segítségével.....	123
7.3.2.1	Szerszámkopás fázisátmenetek definiálása .....	125
7.3.2.2	Jellemző sorrend keresése .....	126
7.3.2.3	A rezgésjeleket leíró statisztikai jellemzők.....	127
7.4	Szerszám teljes kopásának fázisátmeneteit leíró jellemzők.....	128
<b>8</b>	<b>Összefoglalás.....</b>	<b>133</b>
<b>9</b>	<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>139</b>
<b>10</b>	<b>MELLÉKLET .....</b>	<b>152</b>

## Alkalmazott főbb jelölések

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
$n$	fordulatszám	[1/min]
$a_p$	axiális fogásmélység	[mm]
$a_e$	radiális fogásmélység	[mm]
$f$	előtolás	[mm/ford]
$f_z$	fogankénti előtolás	[mm/fog]
$v_f$	előtolási sebesség	[mm/min]
$d$	átmérő	[mm]
$v_c$	vágósebesség	[m/min]
$z$	fogszám	[-]
$E$	Young modulus	[GPa]
$H$	keménység (Vickers)	[kg/mm <sup>2</sup> ]
$K_{tc}$	Törési szilárdság	[MPa m <sup>1/2</sup> ]
$h_{max}$	maximális forgácsvastagság	[mm]
$r_e$	csúcssugár	[mm]
$N$	zsebek száma	[db]
$t$	gyártási idő	[min]
$D_{eff}$	effektív átmérő	[mm]
$\alpha$	szerszám bedöntési szög	[°]
$\Psi$	kapcsolási szög	[°]
$f_m$	mintavételezési frekvencia	[Hz]
$f_{max}$	maximális frekvencia	[Hz]
$H$	rendszeres hiba	[mm]
$s$	tapasztalati szórás	



C	bizonytalansági tényezők	[ $\mu\text{m}$ ]
$X_k$	diszkrét frekvencia- tartománybeli reprezentáció	
PSD	teljesítménysűrűség függvény	[ $\text{V}^2\text{s}$ ]
FS	(Feature Selection) jellemzőválogatás	[-]

## Előszó

A doktori értekezésem sokévnnyi kutatómunkát foglal magába, amely idő alatt volt szerencsém sok kiváló emberrel megismerkedni, akik segítségével, és támogatása nélkül nem tudtam volna véghez vinni a kutatásaim.

Legnagyobb köszönettel Dr. Viharos Zsoltnak tartozom, akinek a segítségével, iránymutatásai, feddései, és tanácsai nélkül soha nem sikerült volna elérni a kitűzött célokat. Továbbá köszönettel tartozom Dr. Csanády Etelének, akinek hasznos tanácsaival, a munkám színvonalát tovább emelhettem, valamint a doktori iskola elvégzése alatti támogatásáért is külön hálás köszönettel tartozom.

Szintén hálás köszönettel tartozom az AQ Anton Kft-nek, azon belül Dr. Németh Andrásnak és Szépligeti Andrásnak, akik eszközökkel, alpanyaggal, szerszámmal és remek tanácsokkal segítettek hozzá az adott feladatok megoldásához.

Köszönettel tartozom továbbá Decsi Péternek is, aki a rezgés mérőrendszer összeállításában és tesztelésében nélkülözhetetlen segítséget adott, és tanácsaival hozzájárult a kutatási irány itt kitűzött céljainak megvalósításában. Valamint köszönettel tartozom Büki Máténak is, aki az AHFS algoritmus futtatásánál és a rezgésadatok matematikai kiértékelésénél nyújtott nagyon nagy segítséget.

További köszönettel tartozom a BME MOGI Tanszéknek a műszeres segítségnyújtásban, valamint a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszéknek, akik nélkülözhetetlen tanácsokkal segítették pontosítani az elkészült anyagot. Valamint köszönettel tartozom nekik a lehetőségért, hogy használhattam a tanszéken található speciális berendezéseiket.

Köszönetemet szeretném még mindenki másnak is kifejezni, akik direkt vagy indirekt módon hozzájárultak a PhD. elkészítéséhez és végigviteléhez.

A kutatásokat még támogatták az Európai Közösség által támogatott H2020 EPIC projekt (<https://www.centre-epic.eu/>), No. 739592, valamint a "Kutatások az ipari digitalizáció által nyújtott potenciál minőségi kiaknázására" című ED\_18-2-2018-0006 projekt is.

# 1 Bevezetés

## 1.1 Téma aktualitása

Az emberiség jelenleg tapasztalható technológiai fejlődése közvetlenül magával vonja az energiafelhasználás rohamos növekedését is. A felhasznált energiaformák közül a villamos energia az egyik legmeghatározóbb társadalmunkban. A beruházási költségek 2000-ben 30 billió dollár értéket tettek ki, míg 2012-re ez az összeg 150 billió dollár körül mozgott, és 2019-ra elérte a 243 billió dollárt. A villamos energia előállításba befektetett egyre növekvő összeg is mutatja, hogy ez az energiaforma az egyik legszükségesebb a világon [1] [2].

A villamos energia előállításnak számos módja van, de alapvetően 2 fő csoportba sorolhatóak: megújuló, nem megújuló energiaforrásokból előállított energia. Az energiaigény növekvő tendenciája tükrözi, hogy a gázturbinák mind technológiai kidolgozottságban, mind piaci szerepüket tekintve is igen meghatározóak, így jelenleg ez tekinthető az egyik legfontosabb villamos energia előállítási eljárásnak. A technikai-, és gazdasági elemzések is tükrözik, hogy napjaink energiaiparának megkerülhetetlen szegmensét képezik a gázturbinák.

A trendekben megfigyelhető, hogy a világ folyamatosan növekvő energiafelhasználása megkerülhetlenné teszi a turbinák folyamatos fejlesztését, ami állandó kihívást jelent a jelen mérnökei számára. A megfelelő hatásfok elérése érdekében a turbinák szélsőséges működési körülmények között kell, hogy működjenek, emiatt a turbinák fejlesztése és gyártásuk technológiai kérdései is egyre nagyobb feladatot ad a mérnököknek. Az egyik legnagyobb kihívást okozó problémakör a magas hőmérséklettel szembeni ellenállóság javítása. A gázturbinák jóval a turbinalapát öntvények olvadási hőmérséklete felett üzemelnek [irodalom, pontos hőmérsékletek], ezért szükséges a folyamatos hűtés és hő elleni védelem. A lapátok belül üregesek, a kompresszorból bevezetett levegővel hűtik, mely a hűtőfuratokon keresztül távozik. A modern turbinák lapátjait továbbá az öntvények felületére felvitt hőszigetelő kerámia réteggel védik. [3] [4]. A bevonat előállításának technológiájából adódik, hogy a lapát kerámia bevonatát sok esetben utólag meg kell munkálni, ami a gyártási folyamat összköltségének egy jelentős hányadát teszi ki.

Mindezek jól tükrözik, hogy a kerámiák alkalmazása messzemenőleg aktuális témakör, ami miatt a kerámiák megmunkálása ugyancsak kiemelt figyelmet kap. A dolgozat ezen témakör egy fontos szegmensét, a kerámiák mikro marásának területén elvégzett kutatások eredményeit foglalja össze.

## 1.2 Kutatómunkám rövid bemutatása

A kapcsolódó gyakorlati problémát a zalaegerszegi AQ Anton Kft., vetette fel, majd az irodalom elemzése azt tükrözte, hogy tudományos téren a dolgozatban vizsgált terület még meglehetősen hiányos. A vállalatnál többek között a kerámia bevonattal ellátott gázturbina lapátok megmunkálása zajlik. A kerámia megmunkálásánál felmerült az a probléma, hogy a bevonat nagy keménysége miatt a szerszámok irreálisan rövid ideig bírták a forgácsolást. Az alapanyag nagy keménysége, illetve abrazív tulajdonságai miatt a szerszámok vagy törtek, vagy teljesen elkopnak néhány munkadarab megmunkálása után.

A kutatómunkám általános célja kerámia forgácsolás során feltárni melyek azok a változók, amelyek hatással vannak a szerszám élettartamára, illetve milyen súllyal befolyásolják az élettartam alakulását.

Továbbá célom, a változók kapcsolatrendszerének ismeretében egy olyan technológiát és eljárásrendet kidolgozni, amellyel kerámiát mikromarással megmunkáló vállalatoknál a termelés költséghatékonysága javítható. Ezeknek megfelelő, az ismertetett eredmények mind tudományos, mind gyakorlati szempontból is újak.

## **1.2. Brief presentation of my research work**

The problem to be investigated was raised at AQ Anton Kft. from Zalaegerszeg, Hungary. The literature analysis reflected that the topic, examined in the thesis is still quite incomplete in the scientific field. Among other things, the company processes ceramic-coated gas turbine blades. The problem with ceramic processing was that due to the high hardness of the coating, the tool life was an unrealistically short. Due to the high hardness and abrasive properties of the raw material, the tools are either broken or completely worn out after machining few holes.

The general goal of my research work is to explore ceramic micro-cutting: which are the variables that affect the lifetime of the tool, and how they influence the evolution of the lifetime.

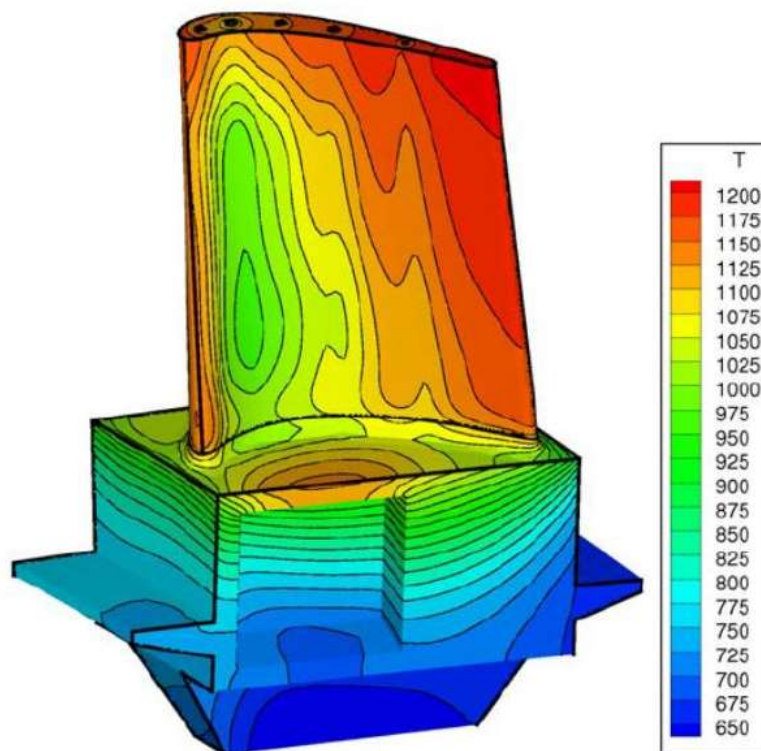
Furthermore, my goal is to develop a technology and procedure, based on the knowledge about the relationship among system variables, with which the cost-effectiveness of production can be improved in companies that process ceramics with micro-milling. Consequently, the presented results are new from both a scientific and a practical point of view.

## 2 Irodalmi áttekintés

Az aktuális tudományos irodalom a vizsgált témakör számos aspektusának vizsgálatát tükrözi. Az irodalmi áttekintés során képet kapunk a kerámia alapanyagok fizikai, illetve egyéb tulajdonságairól, valamint ezen anyagok megmunkálási lehetőségeiről-, trendjeiről.

### 2.1 Gázturbina lapátok hűtési-és gyártástechnológiai problémái

A turbinában a keresztüláramló levegő nagy nyomása és hőmérséklete miatt szélsőségesen nagy igénybevételnek vannak kitéve a lapátok (2.1-es ábra).



2.1. ábra: Hőeloszlás a turbinalapát felületén [1]

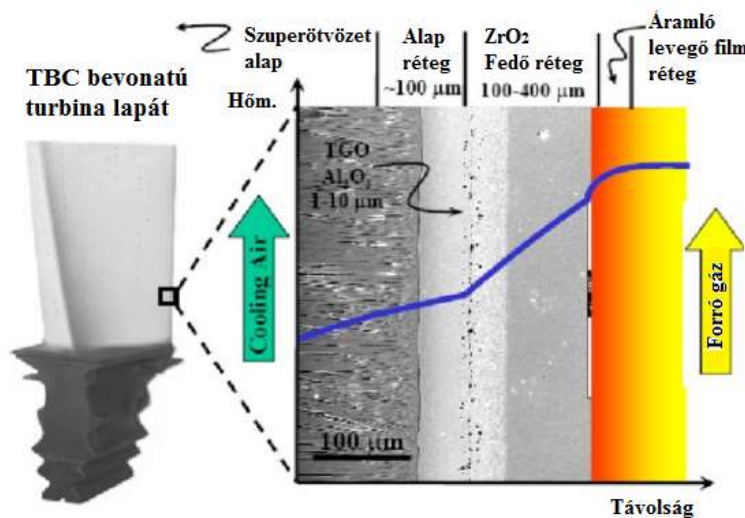
Az égéstér egyes részeiben a levegő hőmérséklete szélsőséges esetben akár az 1500-1600 C°-ot is elérheti [5]. Annak érdekében, hogy a lapát képes legyen ellenállni a rendszerben fellépő szélsőséges körülményeknek, elengedhetetlen az öntvény folyamatos hűtése, és ellátása megfelelő hőszigetelő, védőbevonattal. Erre a célra jelenleg a különböző kerámia alapanyagok a legmegfelelőbb megoldási lehetőségek.



2.2. ábra: Szerelt, kerámia bevonatos turbinalapátok

Ezek a bevonatok hőzáró réteget (TBC- „thermal barrier coating”) képeznek az öntvény körül, annak érdekében, hogy megvédjék az alapfémeket az oxidációtól, a korróziótól, és a mechanikai tulajdonságok romlásától [6].

A TBC rétegek fő jellemzői, hogy alacsony a hővezető képességük, amit általában Ittrium stabilizált cirkónium-oxid kerámia anyaggal (YSZ) valósítanak meg, valamint termodinamikai és kémiai szempontból is stabil feltételeket biztosítanak az oxidációval és korrózióval szemben. Általában a TBC bevonatok 2 rétegből épülnek fel (2.2-es ábra):



2.3. ábra: Turbinalapát bevonatának felépítése [6].

Az első egy ún. bond coat (alapréteg), ami a tapadást elősegítő réteg (2.3-as ábra). Ahogy a nevében is benne van, ez a réteg biztosítja a második réteg megfelelő rögzítését az alap réteghez. A következő réteg az ún. YSZ ( $ZrO_2$  fedő) réteg, ami a hőellenállóságot biztosítja. Mivel a YSZ egy porózus anyag, ezért lehetővé teszi, hogy az áramló forró gáz

áthatoljon rajta, így reakcióba lépjen az alap (bond coat) réteggel. Így a két réteg együtt vesz részt a hőterhelés elviselésében, amit együttesen TGO-nak (*thermally grown oxid layer*) neveznek.

A kerámia bevonat mellett a lapát élettartamának további növelése céljából további mérnöki megoldások állnak rendelkezésre. Ilyen lehetőség a turbinalapát belső hűtőrendszerének kialakítása. A lapát hűtésére szolgáló anyag lehet levegő vagy víz. A folyadék alapú hűtés hatványozottan eredményesebb hűtési eljárás, mint a levegő. Ennek oka, hogy a víznek egy nagyságrenddel nagyobb a hővezetési tényezője, a levegővel szemben.

*Hővezetési tényezők:*

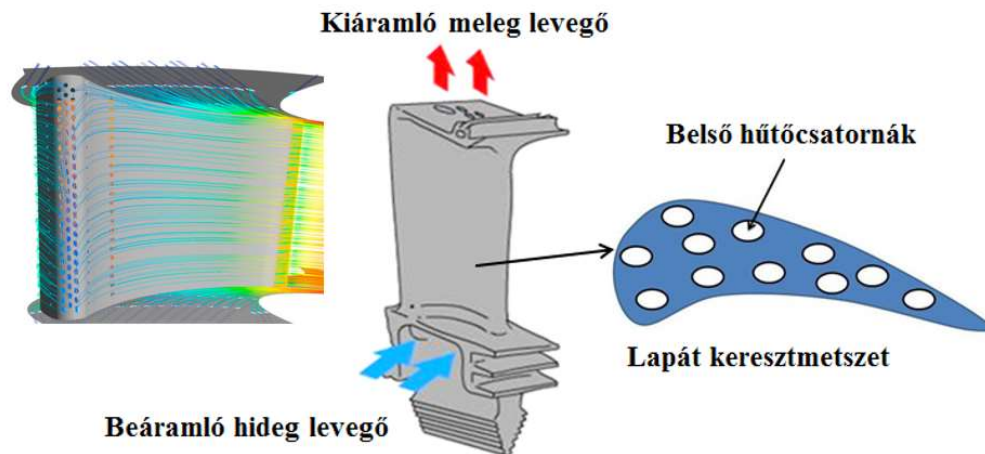
- Víz:  $\lambda \approx 0,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Levegő:  $\lambda \approx 0,024 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

Ezzel szemben viszont hátránya, hogy gondoskodni kell a megfelelő tömítettségről, korrózióállóságról, valamint meg kell oldani, hogy a szennyezőanyagok ne tömítsék el a furatokat. Itt mutatkozik meg a levegő használatának előnye, amellyel megoldható a víz által okozott néhány hátrány kiküszöbölése. A felsorolt okok miatt a gyakorlatban - vízzel szemben – a turbinalapátok hűtése során a levegő alapú hűtést részesítik előnyben. A léghűtéssel szemben támasztott elsődleges követelmény, hogy a lapát külső és a furatokban áramló hűtőközeg hőmérsékletének különbsége nem lépheti túl a 200-300 °C-ot. Gázturbinák hűtésére több megoldás született, ezek közül a legelterjedtebbeket jól bemutatja a [7]-as publikációm.

### **2.1.1 Konvencionális hűtés**

Ezen hűtési folyamat lényege, hogy levegőt áramoltatnak keresztül a lapát belsejében kialakított kamrákban. A levegő hővezetéssel átveszi a hőt az öntvénytől és a hűtőfuratokon keresztül távozik, majd a lapát felületén egy filmréteget alakít ki. Kialakítás a 2.4. ábrán látható.



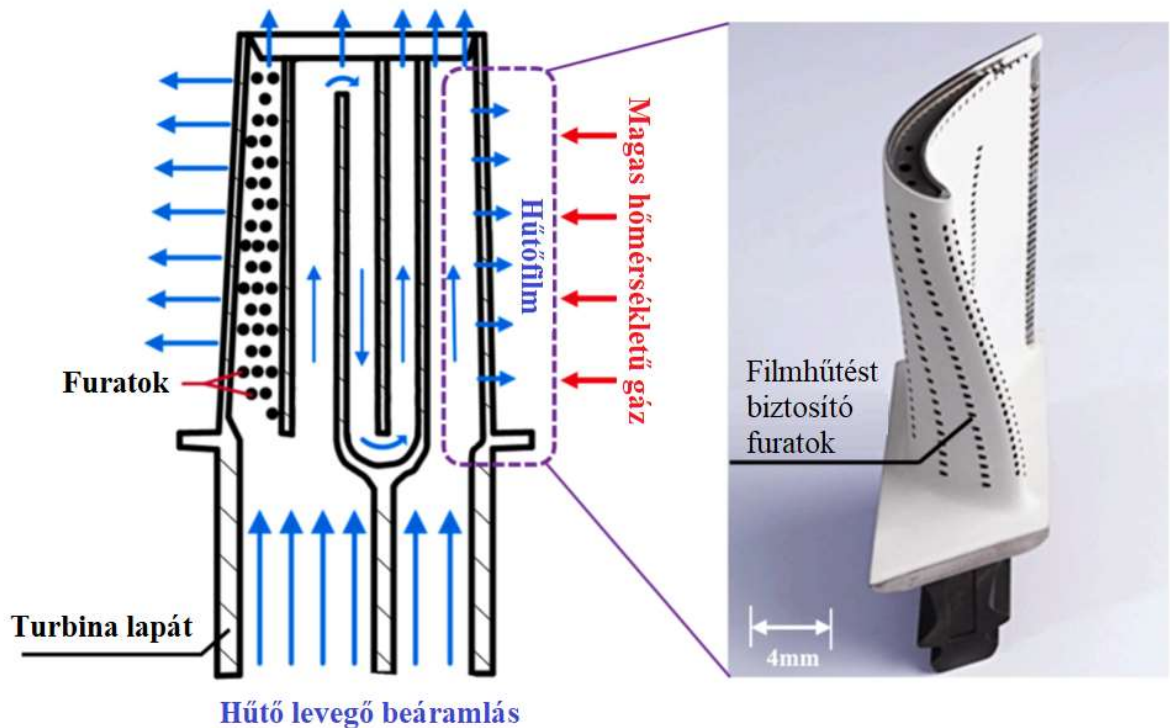


2.4. ábra: Konvencionális hűtés sematikus ábrája [5]

A hő a lapát belsejében terjed, és a hőátadási folyamaton keresztül ezt a hőenergiát az áramló levegő felveszi. A furatok kialakításánál fontos szempont, hogy a furatnak lehetőleg minél nagyobb felületűnek kell lennie, így ezen keresztül minél nagyobb hőmennyiség adódhasson át a hűtőközegnek. A hűtőfuratok kialakításukat tekintve lehetnek körkörösnek vagy ellipszis alaknak. A hűtési folyamat során a hőenergia a lapát külső felületén hővezetéssel átadódik a lapát körül áramló hűtőközegnek. Ezt követően az áramló közeg az átvett hőenergiát a lapáttőtől elviszi a lapát csúcsa irányába, ahol leadódik a környezetnek.

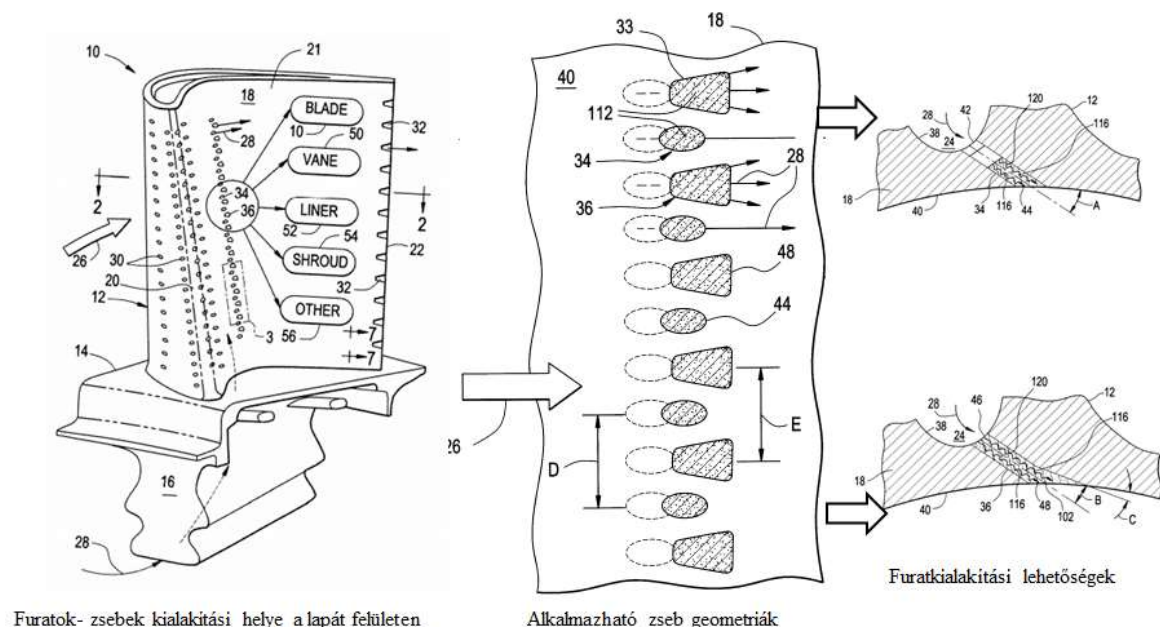
### 2.1.2 Filmhűtés

A filmhűtés lényege, hogy a lapát belső kamráiból a hűtőfuratokon keresztül távozó levegő a lapát teljes felülete mentén egy védőfilm réteget alakít ki (2.5 ábra). A lapátfalban lévő furatokon kiáramló levegő egy speciálisan kialakított mélyedésen (hornyon) áthaladva terül szét a lapát felületén, levegő-filmet képezve. Többféle kialakítás lehetséges, a 2.6. ábrán, a jobboldalon látható metszeti kép nem az általam gyártott hornyot mutatja, az csupán egy általános szemléltető kép. Az általam gyártott horony legmélyebb pontján helyezkedik el a légbefúvó furat, és a levegő a horony szögben emelkedő és szélesedő részén terül szét a lapát felületén. A hornyot a szakirodalommal összhangban és az egyszerűség érdekében a dolgozatomban „zseb”-nek nevezem. A zseb befoglaló geometriai méreteit a 4.1. fejezetben mutatom be.



2.5. ábra: Filmhűtés működési elve [8]

A filmhűtéses kialakítási lehetőségek a General Electric által az európai szabadalmi hivatalban jegyzett védett információk, ahol a szabadalom megadja a lapáton kialakítható furat geometriákat, valamint a furatból kiáramló közeg áramlástanai viszonyait meghatározó zseb geometriai jellemzőit is [9].



2.6. ábra: Turbinalapát filmhűtését biztosító geometriai elemek kialakítási lehetőségei [9]

A furatok, illetve a zsebek újabban a kerámia védőbevonat felvitele után vannak elkészítve. Ennek oka, hogy az alapfém maszkolása jelentősen növelné a lapát előállítását

költségét. A megmunkálás technológiája szikraforgácsolás, illetve nem vezető, vagy vezetővé nem tehető kerámia anyagok estében mikrofúrással, mikromarással alakítják ki a hűtőfuratokat.

## 2.2 Kerámia anyagok

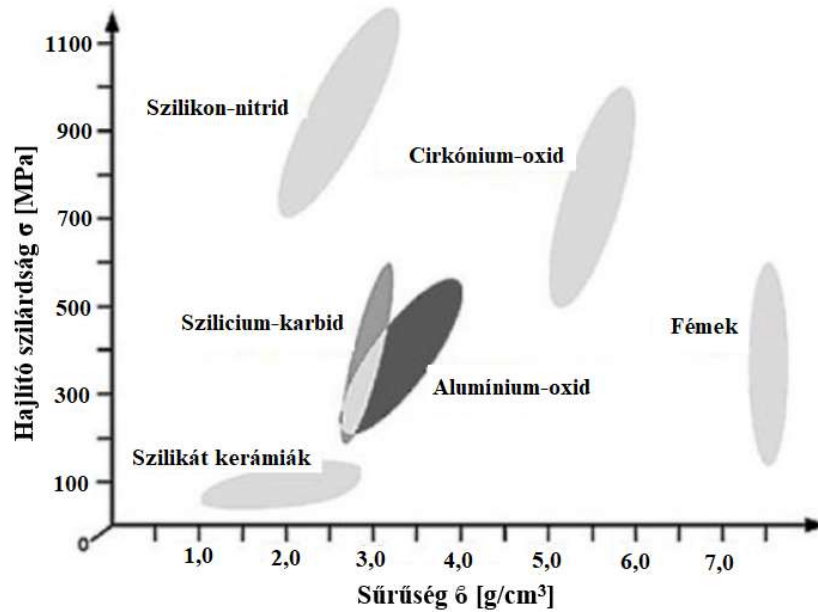
A gázturbinák működését követően, a következő fejezetben a lapátok hőszigetelését adó kerámia anyagokat mutatom be.

### 2.2.1 Kerámia anyagok tulajdonságai

A kerámiák definíciója az *American Ceramic Society* szerint olyan nemfémes anyagok csoportja, melyek előállításuk vagy használatuk során hőnek vannak kitéve [11] [12]. A kerámiák általános jellemzője, hogy kis sűrűségűek, magas olvadáspontúak, illetve hőállóak. Mechanikailag nagy keménység, nagy nyomó-ill. hajlító szilárdság, de kis szakítószilárdság jellemzi őket. Villamos szempontból rossz villamosvezetők, viszont kedvezőek a piezoelektromos, és dielektromos tulajdonságaik. A kerámiák felhasználhatósági területét az anyag fizikai és kémiai tulajdonságai határozzák meg. Ezen tulajdonságait az anyag összetétele, és előállításának paraméterei határozzák meg. Napjainkban számos műszaki kerámia típus létezik. A különböző műszaki kerámiák 3 fő csoportba sorolhatóak, melyek a következők:

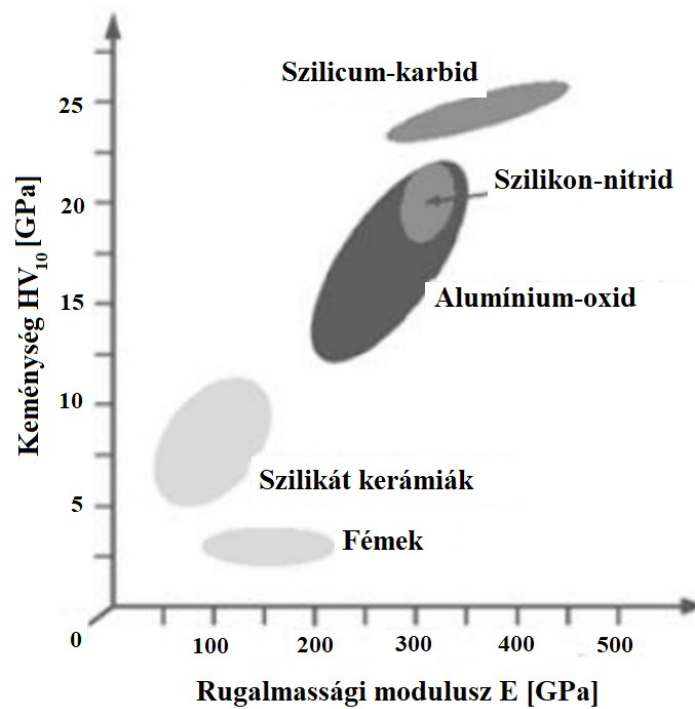
- *szilikát kerámiák*
- *oxidkerámiák ( $Al_2O_3$ ,  $BeO$ ,  $SiO_2$  stb.)*
- *nem oxid kerámiák (nitridek, karbidok, boridok stb.)*

A kerámiák mechanikai tulajdonságai közül az egyik legfontosabb jellemző a hajlítószilárdság. A 2.7. ábrán néhány kerámia hajlítószilárdságának összehasonlítása látható a sűrűség függvényében. Referenciaként ábrázolásra került a fémek csoportja is.

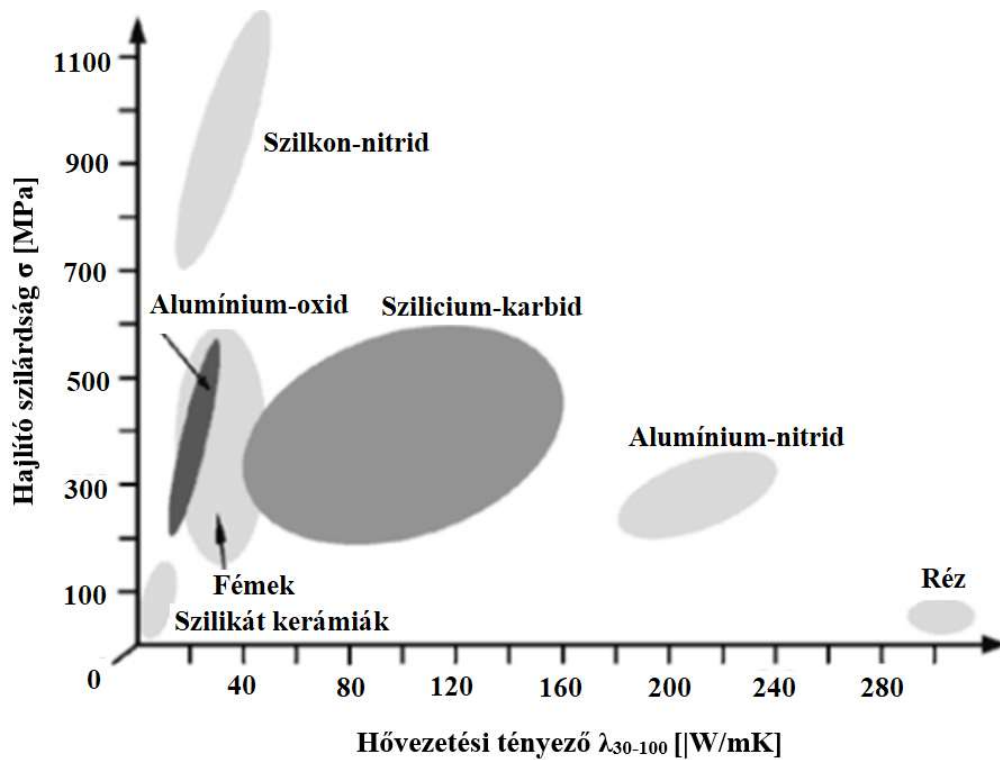


2.7. ábra: Fémek és kerámiák hajlítószilárdsága a sűrűség függvényében [12]

Látható, hogy bizonyos kerámiák a fémekkel szemben kisebb sűrűség mellett nagyobb hajlítószilárdsággal rendelkeznek. További fontos paraméterek a rugalmassági modulus, és keménység. Az erre vonatkozó összefoglaló látható 2.8 ábrán:

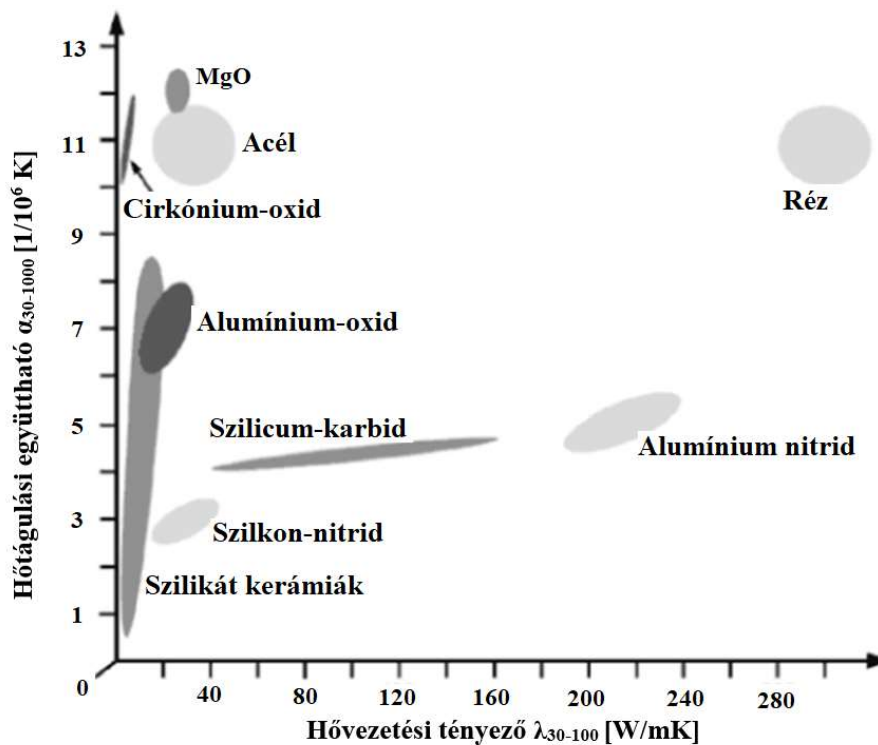


2.8. ábra: Fémek és kerámiák keménysége a rugalmassági modulus függvényében [12]



2.9. ábra: Fémek és kerámiák hajlítószilárdsága a hővezetés függvényében [12]

Hővezetés szempontjából a kerámiák változatos tulajdonságot mutatnak (2.9. ábra). Vannak, amelyek a fémeknél rosszabb hővezető, de akadnak sokkal jobb hővezető képességűek is. Ennek tükrében a műszaki életben találunk hőszigetelőként, és hővezetőként alkalmazott kerámiákat is.



2.10. ábra: Fémek, és kerámiák hőtágulási együtthatója a hővezetés függvényében [12]

A 2.10. ábrán látható, hogy a kerámiák hőtágulása majdnem minden esetben kisebb, mint a fémeké. Ez a tulajdonsága az, ami megnehezíti a szerkezeti anyagként történő alkalmazását.

## 2.2.2 Kerámiák gyártástechnológiája

A kerámia anyagok gyártása a következő lépések szerint történik:

- *porkészítés*
- *formázás*
- *égetés/szinterelés*

### ***Porkészítés***

A porkészítés alapvető követelménye az alapanyag tisztasága, az őrlési folyamat reprodukálhatósága, valamint az egyenletes szemcseméret. A szemcseméret elsősorban kerámia mechanikai tulajdonságaira lesz hatással [15] [16].

### ***Formázás***

A formázási folyamat során történik a porok tömörítése, amelynek eredményeként egy kis szilárdságú, de kompakt előgyártmányt kapunk. Az alkalmazott préselési folyamat során a port kötőanyaggal keverik, majd présszerszámban préselik. Az alkalmazott nyomás 50-100MPa körüli értéken van.

*Préselés fajtái:*

- *(hideg) izosztatiszikus préselés „rubber mold pressing”*
- *extrudálás „extrusion molding”*
- *öntőpépes öntés „slip casting”*
- *fröccsöntés „injection molding”*

### ***Égetés/ szinterelés***

Ezen technológiai lépés során a munkadarab hevítése a fő komponens olvadáspontja alatti hőmérsékletig zajlik. Ez általában minden esetben eléri, vagy meghaladja az 1000°C-ot. A szinterelés minősége nagyban befolyásolja a termék tulajdonságait [17] [18].

Hyun-Jin Choi és csapata [19] SiC alapú kerámiákkal végzett kísérleteket, és arra az eredményre jutottak, hogy 1450°C szinterelési hőmérséklet alatt a mechanikai tulajdonságuk összességükben nem megfelelőek. Ennek oka, hogy az alacsony hőmérséklet miatt nem alakultak ki a molekulák közötti megfelelő kötések, és gyengébb lett az alapszerkezet. A másik tapasztalat, hogy 1500°C felett viszont megint csak romlanak a szerkezet a mechanikai tulajdonságai, mivel a vizsgált esetekben a SiC

oxidálódott, és SiO keletkezett. Azonban vannak olyan kerámia fajták, amelyek 1500°C alatti hőmérsékleten el sem készíthetők. Ilyen például a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–ZrB<sub>2</sub> kerámia mátrix, amely szinterelési hőmérséklete 1500-1700°C-os tartományba esik [18].

### 2.2.3 Felhasználási lehetőségek

E fejezetben össze vannak foglalva a kerámiák azon a legfontosabb tulajdonságai, amelyek népszerűvé teszik ezt az anyagot az ipar számára (1. táblázat).

Tulajdonság	Kerámia	Alkalmazási példa
Elektromos	BaTiO <sub>3</sub>	ellenállásfűtések anyag
	SnO <sub>2</sub>	elektróda
Dielektromos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	gyújtógyertya szigetelő
	BaTiO <sub>3</sub>	kondenzátor
Optikai	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	halogén lámpák külső borítása
	Nd <sub>3x</sub> Y <sub>3-3x</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	YAG lézer
Mechanikai	TiN	kopásálló bevonat
	SiC	polírozó anyag
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Csípőprotézis
Termikus	SiO <sub>2</sub>	Hővédő bevonat
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	áramkör burkoló anyag

1. táblázat: Kerámiák tulajdonságai és alkalmazási területei [20]

#### ***Elektromos/dielektromos felhasználhatóság***

A kerámiák családjában, mint elektronikai alapanyagként egyik szóba jöhető kerámia, a BaTiO<sub>3</sub> alapú kerámiák. Ezen anyagok széles körben alkalmazhatók az elektronikai iparban piezoelektromos és dielektromos tulajdonságaik miatt. Fő hátrányuk azonban, hogy gyártásukhoz magas szinterelési hőmérséklet szükséges (>1500°C), valamint az előállítási folyamat egyik hátrányos eleme, hogy ha magas piezoelektromos állandót kívánunk elérni (d=400–650 pC/N), akkor alacsony lesz a Curie pont. Juhyun Yoo és szerzőtársai [21] erre a problémára keresték a megoldást. Végül olyan eljárást dolgoztak ki, amellyel a dielektromos állandó értéke d=462 pC/N, a Curie pont pedig T<sub>c</sub>=95°C, valamint a szinterelési hőmérséklet 1300°C alatt van. Zhiping Zheng és szerzőtársai [22] szintén BaTiO<sub>3</sub> alapú kerámiával dolgoztak. Ők a kerámiát, mint kondenzátor alapanyagot vizsgálták, és kutatásuk fő célja a feszültség-karakterisztika javítása a kerámia gyártástechnológiájának függvényében. A kísérleteik végén arra jutottak, hogy gelcasting technológiával finomabb szemcseszerkezetet kapnak, mint az egyéb előállítási technológiákkal, így javul a kondenzátor feszültségkarakterisztikája is.

### ***Optika területen történő alkalmazás***

Az első  $\text{Nd}_{3x}\text{Y}_3_{3x}\text{Al}_5\text{O}_{12}$  alapú optikai kerámia alap lézer (Nd: YAG) 1995-ös bemutatása óta a kerámiák optikai tulajdonságát kezdi kiaknázni a lézeripar [23]. Egy másik ígéretes alternatíva az optikai felhasználási szempontból a fluorid alapú kerámiák családja ( $\text{SrF}_2$ ), amelyek kiváló optikai tulajdonságokkal rendelkeznek, alacsony a törésmutatójuk, valamint az előállításuk is egyszerűbb [24] [25].

### ***Mechanikai tulajdonságok miatti alkalmazás***

A kerámiákat a mechanikai tulajdonságai alapján elsősorban a nagy keménysége teszi kedvelt alapanyaggá az ipar számára. Egyik erre a tulajdonságára épülő felhasználási területe a bevonatként történő alkalmazása, például a forgácsoló szerszámok bevonatanyagaként való felhasználása.

A bevonat hatására jelentősen növekszik a forgácsoló szerszám élettartalma a bevonatolatlan szerszámokéhoz képest. Valamint ugyanolyan éltartam mellett lényegesen nagyobb forgácsleválasztási teljesítmény érhető el a megmunkálás során, amellyel nagymértékben csökkenthető a gyártási idő [26]. További kiemelkedő alkalmazási terület a turbinalapátok bevonatanyagként történő felhasználása is [27] [28]. A mechanikai tulajdonságai közül az alacsony szívóssági érték adja a felhasználhatóságnak egyik korlátozó tényezőjét. Napjaink egyik fő kutatási területe a kerámiákkal kapcsolatban ennek a problémának a kiküszöbölése. Ilyen megoldási lehetőséget kínál a hibrid kerámiák családja.

### ***Hibrid kerámiák/kerámia mátrixok***

Ahhoz, hogy a kerámiák felhasználhatók legyenek, mint szerkezeti anyagok a fentebb említett egyik megoldandó feladat az alacsony szívóssági tulajdonságok kezelése. Yoshimura (1988) [29] szerint a korszerű kerámiáknál erre is sikerült megoldást találni. *Ennek kezelésére 2 alapvető módszer létezik:*

- *Az első a mikrorepedések számának csökkentése. Krauth [30] és Ichinose [31] finomra őrölt por alkalmazásával, valamint porózusmentes gyártástechnológiával értek el látványos eredményeket.*
- *A másik megoldás a mikro repedések terjedésének megállítása. Ilyen megoldás erősítő szálakat hozzáadni az alap kerámiához, amelyek megakadályozzák a kialakuló repedések terjedését [32] [33]. Ezek a szálerősítésű kerámiák nagyfokú ellenállást mutatnak a kialakult repedés következtében bekövetkező tönkremenettel szemben [34] [35].*



A jelen kutatások részét képezni, hogy különböző kerámia kombinációkkal javítsák a mátrix hősokkállóságát. Ilyen lehetőség például az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kerámia kombinálása SiC-al [36]. Kai Cui és szerzőtársa [37]  $\text{TiB}_2$  alapú rétegelt kerámia kompozittal végzett kísérleteket, és arra az eredményre jutottak, hogy a hősokknak kitett kompozit kerámiának magasabb volt a maradó nyomófeszültséggel szembeni ellenállása, mint a  $\text{TiB}_2$  alapkerámiának.

#### 2.2.4 Napjaink trendjei a kerámia alapanyagokkal kapcsolatban

A szakirodalom alapján napjaikban a kerámiákkal kapcsolatosan 3 fő trendet lehet megfogalmazni:

- *kerámia gyártás*
- *megmunkálásának*
- *felhasználásának trendjei*

Az egyik fő trend a gyártásával, és a formaadásával kapcsolatos. Ennek oka, hogy a gyártási folyamat hosszadalmas, és sokszor meglehetősen költséges, és bonyolult. Erre kínál egy megoldást a lézeres szinterelés technológiája, ami lényegesen felgyorsítja a gyártási időt, valamint más eljárással legyárthatatlan geometriák kialakítását teszi lehetővé. Yves-Christian és csapata  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  típusú kerámiák előállításánál elemezte az SLM (*Selective Laser Melting*) technológiát. Kutatásuk során arra jutottak, hogy a gyártás során kialakuló mikrorepedések elkerülhetők, valamint a hajlítószilárdság is növekedett (500MPa-t sikerült elérniük) [38]. Napjainkban már nem beszélhetünk kerámiagyártásról a hagyományos értelemben, mivel a tulajdonságaik javításához olyan összetett fizikai-kémiai ismeretek szükségesek, amelyek nagyon bonyolulttá teszik ezt a folyamatot. Inkább ma már összetett anyagtervezésről kell beszélnünk. Ezt a munkát segítheti az intelligens rendszerek alkalmazása, amelyek a különböző anyagok közti eddig nem ismert kapcsolatokat segíthet feltérképezni, továbbá segítséget nyújthatnak a gyártási paraméterek optimalizálásában, olyan esetekben is, amikor nem ismertek a paraméterek közti összefüggések [39].

A kerámiákkal kapcsolatos másik fontos trend a megmunkálhatóságuk vizsgálata. Bizonyos esetekben szükséges a gyártás utáni utómegmunkálás [10]. Az elmúlt időszakban számos alternatíva született, mint például a lézeres megmunkálás, köszörülés, és bizonyos esetekben a szabályos élgeometriával történő megmunkálás.

Felhasználásával kapcsolatos jelenlegi új irányvonal a szerkezeti anyagként történő alkalmazás is. Továbbá, az alacsony szívóssági tulajdonságainak javítása napjaink egyik fő kutatási területét képezi.

## 2.3 Kerámia alapanyagok megmunkálási lehetőségei

A kerámiák fizikai tulajdonságaik (nagy keménység, hősokkal szembeni érzékenység, jó hőszigetelése, dinamikus igénybevételekkel szembeni érzékenység, villamos szigetelés) miatt nehezen megmunkálható anyagok [40]. A megmunkálásukat alapvetően a nagy keménységük teszi nehezzé, mivel egyrészt a forgácsolás során keletkező erők hatására gyakran repedezik, törik a felület, másrészt a szerszámkopás emiatt nagyon intenzív. A szakirodalom áttekintése az tükrözte, hogy a következő technológiákkal lehetséges a kerámia anyag megmunkálása:

- *köszörülés*
- *lézeres*
- *vízugaras*
- *szikraforgácsolás - EDM (Electro Discharge Machining)*
- *szabályos élgeometria (marás, esztergálás)*
- *kombinált technológiák (vibrációstechnika)*

### 2.3.1 Kerámia megmunkálás köszörüléssel

A szinterelt kerámiák keményforgácsolását általában szabálytalan élű és gyémánt szerszámmal végzik [10]. A köszörüléssel egyrészt csökkenthető a felületi repedezettségének mértéke, másrészt jobb felületi minőség érhető el a szabályos élű megmunkáláshoz képest. Ennek oka, hogy a hagyományos szabályos élgeometriával történő megmunkálásnál nagyobbak a forgácsolási erők, valamint a forgácsolási hőmérséklet. A köszörülési technológia hátránya az egységnyi idő alatt leválasztott kis forgácstérfogat, ami jelentősen drágítja a gyártást. A szakirodalom alapján a köszörű szerszámmal történő megmunkálás során végzett kutatások alapvetően a repedésmentes felület gyártását [41] tűzték ki célul, valamint a minél jobb felületi érdesség biztosítását [42] [43].

### 2.3.2 Kerámia megmunkálás lézerrel

A kerámia alapanyagok megmunkálásának egy másik nagy és eredményes kutatási területe a lézeres megmunkálás. A lézeres vágás tulajdonsága, hogy nagy energiasűrűségű, de „érintésmentes” megmunkálást lehet vele végezni, nagy előtolási sebesség alkalmazásával (nagy anyagleválasztási teljesítmény), és nagy pozicionálási, és ismétlési pontosság érhető el vele. A kerámia megmunkálása esetében a nagy energiasűrűség hátrány is, mivel a kerámia anyag érzékeny a hősokra, így a folyamat során bevitt energia, repedéseket hoz létre a megmunkált felületen [44]. A technológia

alkalmazási lehetőségeivel kapcsolatban a kutatások azt mutatják, hogy az elsődleges cél a repedésmentes felület előállítása. A szakirodalom alapján repedések / törések sokféle ok miatt jöhetnek létre, de a következő okok hatványozottan előidéznek:

- *kerámia vastagsága meghaladja a 2mm-t,*
- *az anyag sűrűsége a 99-körüli értéken van,*
- *vágás során a lézersugár nem egyenes pályát jár be, hanem kör- vagy valamilyen függvény szerint meghatározott úton mozog [45] [46]*

### **2.3.3 Kerámia megmunkálás vízsugaras vágással**

A megmunkálás okozta hőszokk ellen jó alternatívát jelent a vízsugaras vágás technológiája [47]. A többi technológiával ellentétben itt nem keletkezik a forgácsolás során hő, ebből adódóan a hőterhelése okozta repedés se veszélyezteti a megmunkált felületet. A technológia nehézségét a megfelelő abrazív szemcseméret meghatározása okozza [48], valamint a víz kiáramlási sebességének meghatározása. Alacsony kiáramlási sebességnél a függőleges vágási felület nem biztosítható, valamint a vágás másik oldalán abrazív kopás figyelhető meg [49]. Mind a nagy mind a kis kiáramlási sebességnél „V” alakú vágás figyelhető meg [50]. A megmunkálás további hátránya például, hogy felületek, zsebek nem munkálthatók meg így, az a technológia csak vágásra alkalmas.

### **2.3.4 Kerámia megmunkálás EDM technológiával**

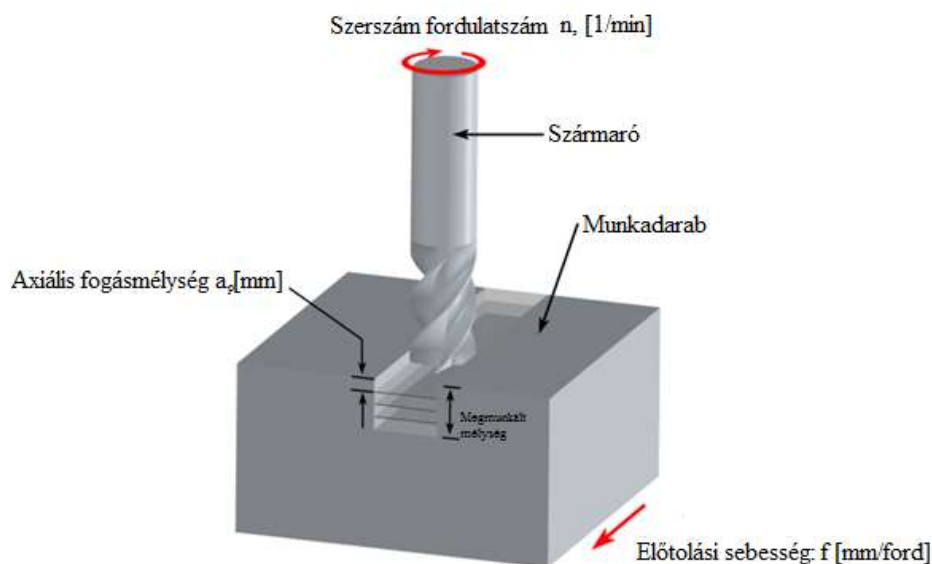
A kerámiák megmunkálhatóságának egy nagyobb kutatott területe, a szikraforgácsolhatóságuk vizsgálata. A szikraforgácsolás lényege, hogy egy elektromosan vezető szerszám és munkadarab közé dielektrikumot juttatnak. A dielektrikum villamosan szigetelő. Az anódra és a katódra feszültséget kapcsolva egy bizonyos határfeszültségnél vezetőcsatorna jön létre a dielektrikumban. Az így keletkező töltéssel rendelkező ionok felületbe a becsapódva a mozgási energiájuk hővé alakul, ami megolvasztja a felületet. A technológia egyik nagy előnye, hogy a megmunkálhatóság független az alapanyag keménységétől, a másik pedig, hogy nincs forgácsolási erő. A kerámiák villamos tulajdonságait tekintve alapvetően szigetelő anyagok, így a kutatások irányvonala ebben az esetben a kerámia anyagok villamos szempontból vezetővé tétele. A folyamat csak abban az esetben működik, ha az anyag vezetőképessége meghaladja a 100Ωcm-ert [51] [52]. Ez elérhető, ha az alapkerámia anyaghoz vezető anyagot tesznek (TiB<sub>2</sub>, TiN, TiC). A kutatások másik irányvonalát a hőszokk miatti repedések megszüntetése adja [53] [54].

## 2.4 Megmunkálás szabályos élgeometriával

A szabályos élgeometriájú megmunkálásnak több formája is létezik (esztergálás, fúrás, marás, gyalulás, vésés stb.), azonban az irodalmi áttekintésénél csak a marás technológiára korlátozom a bemutatást, mivel a kutatások során ez a technológia lett alkalmazva.

### 2.4.1 Forgácsolási folyamatok alapjai

A forgácsolás során a munkadarabról a szerszám élének/éleinek segítségével anyagrészecskéket, azaz forgácsokat választunk le mechanikai megmunkálás útján, a munkadarab méretének, alakjának, felületének megváltoztatása céljából. A marási folyamat legfontosabb jellemzőit a 2.11. ábra foglalja össze:



2.11. ábra: Mozcásviszonyok marás esetén

A forgácsleválasztáshoz minden esetben valamilyen szerszámot használunk. Esztergálás esetén egy élű esztergakést, míg marás esetén 2 vagy több élű marószerszámot. A forgácsleválasztás az ék hatásán alapul, vagyis a vágóél behatol a munkadarabba, és onnan anyagot távolít el [57]. A forgács leválasztást biztosító mozgást forgácsoló főmozgásnak nevezzük. A főmozgást végezheti a szerszám és a munkadarab is. A főmozgás általában forgó mozgás (kivéve a gyalulás, vésés esetében). A főmozgásból származtatjuk a vágósebességet is, amely a következő összefüggés alapján adható meg (2.1-es egyenlet):

$$v_c = \frac{D\pi n}{1000} \quad (2.1)$$

Ahol:

- $v_c$ : vágósebesség [m/min]

- $D$ : szerszám átmérő [mm]
- $n$ : főorsó fordulatszáma [1/min]

A következő fontos mozgás az előtoló mozgás. Itt a szerszám a meghatározott pálya mentén haladva választja le a forgácsolt. Az előtoló mozgás többféleképpen adható meg. Marásnál ezek a következők:

- $f_z$ : fogankénti előtolás [mm/fog]
- $f$ : fordulatonkénti előtolás [mm/ford]
- $v_f$ : előtolási sebesség [mm/min]

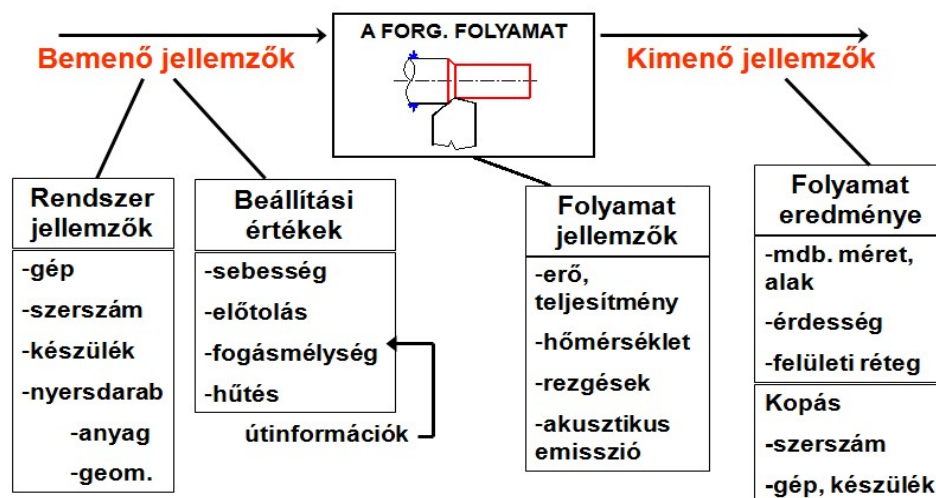
A paraméterek között a következő összefüggés teremti meg a kapcsolatot (2.2-es egyenlet):

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (2.2)$$

Ahol:

- $v_f$ : előtolási sebesség [mm/min]
- $z$ : szerszám fogszáma [db]
- $n$ : főorsó fordulatszáma [1/min]

A forgácsolási folyamatok során anyag-, információ és energiaáramlás történik. A forgácsolási folyamat és jellemzői láthatók az 2.12. ábrán.



2.12. ábra: Forgácsolási folyamat és jellemzői [55]

A folyamat bemenő jellemzőit egyrészt a gép, a szerszám, a készülék és a munkadarab adják – a rendszerjellemzők –, másrészt a beállítási értékek, vagyis a technológiai adatok adják. A forgácsolás során a kísérőjelenségek alakulását – folyamatjellemzőket- érzékelve tudunk a folyamat lefolyására következtetni. A forgácsolási folyamatok kimenő jellemzőit, a létrehozott eredmény, a munkadarab méret,

alak, érdesség jelentik [58], de kimenő jellemző a folyamat során létrejött szerszámkopás, elhasználódás.

#### 2.4.2 Marás

A marás a forgácsoló megmunkálások főcsoportján belül, olyan szabályos élgeometriájú megmunkálások, ahol a főmozgást a szerszám végzi. A megmunkálásban egyidejűleg több fog vesz részt, de az egyes fogakon, illetve élszakaszokon eltérőek a forgácsolási körülmények.

##### *Mozgásviszonyok marásnál*

Ahogy fentebb is utaltam rá, a főmozgást minden esetben a forgó szerszám végzi. A mellékmozgás lehet egyenes vonalú, körmozgás vagy síkban és térben pályamenti mozgás. A pályamenti mozgás azt jelenti, hogy a szerszám által megtett út vagy egy harmad- negyedfokú függvényvel, vagy polinomokkal írható le. A mellékmozgásokat végezheti a szerszám, a munkadarab, vagy mindkettő egyszerre.

A megmunkált felület és a maró forgástengelyének viszonya alapján két alapesetet kell megkülönböztetni:

- *palástmarás- a maró forgástengelye párhuzamos a megmunkált felülettel*
- *homlokmarás- a maró forgástengelye merőleges a megmunkált felületre*

E két alapeset közötti jellegzetes átmenet a sarokmarás (palást-homlokmarás) amikor a munkadarabon a forgástengelyre merőleges és azzal párhuzamos felület is előáll. Minden marási technológiánál értelmezhető az előtolás sebességvektorának és a szerszám kerületi sebességvektorának viszonya alapján az egyenirányú és az ellenirányú marás.

##### **Szerszám-pálya stratégiák**

Az összetett felületek megmunkálása során, sok esetben a ráhagyás leválasztására alkalmas szerszám-pálya-út manuális úton nem hozható létre az ISO szabványos G kódok használatával (hosszadalmas, sok hibalehetőség). Erre a problémára nyújtanak segítséget a szerszám-pálya generáló szoftverek. Ezeknél a programoknál a szerszám-pálya generálás a következőképpen zajlik, a teljesség igénye nélkül:

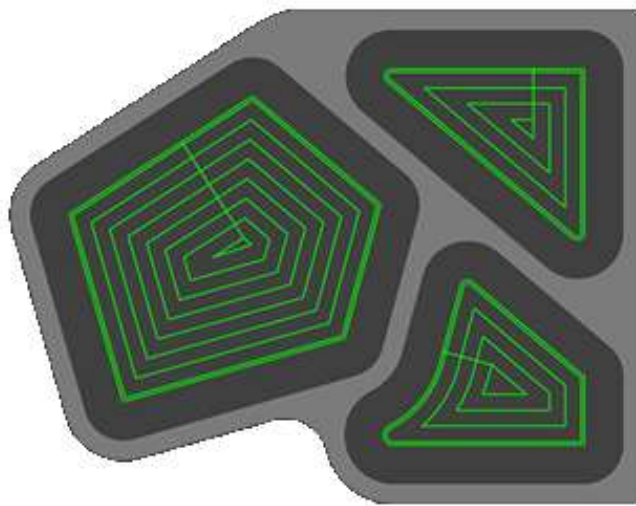
- *Megfelelő előgyártmány megadása, az elkészítendő geometria rögzítése, a szerszám-pálya alakjának a definiálása, technológiai paraméterek (szerszám fordulatszám, fogásmélység, előtolási sebesség) meghatározása.*
- *Ezt követően a program elkészíti a kívánt célfelület megmunkálására szolgáló pályafelhőt.*

- *Az utolsó lépés a pályafelhő lefordítása az adott célgépre kifejlesztett posztprocesszor segítségével, aminek eredményeként a vezérlő képes feldolgozni az útinformációkat.*

A szerszám-pálya-felhő generáló szoftverekben a következő pályastratégiák választhatók:

### ***Kontúrpárhuzamos szerszám-pályák***

A kontúrpárhuzamos szerszám-pálya a megmunkálandó kontúr offset pályáiból áll, amelyek egymástól lépésköznyi távolságot tartanak. A lépésköz az XY síkban értelmezett érték. A megmunkálás kontúrja Z szintenként változhat. Az egyes offset pályák között a maró összekötő pályán lép át, ami lehet egyenes vagy erőhatások szempontjából kedvezőbb, köríven történő mozgás is. A 2.13. ábrán egy hagyományos kontúrpárhuzamos stratégiával zsebmarási feladathoz generált szerszám-pálya látható.



2.13. ábra: Kontúrpárhuzamos szerszám-pálya zsebmarásnál [63]

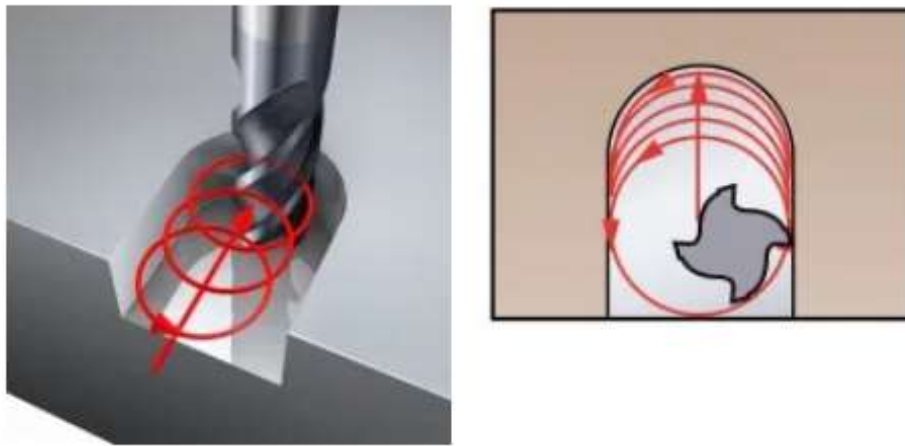
Egy kiforrott stratégiáról van szó, ami hosszú múltra tekint vissza. Optimalizált, továbbfejlesztett változataival is találkozhatunk CAM szoftverekben. A legtöbb CAM rendszer is ezt a szerszám-pályát kínálja fel alapértelmezett nagyolási stratégiaként. Alkalmazásával esztétikus és egyenletesen megmunkált felületet kaphatunk. Legnagyobb hátránya, hogy a sarkokban fellépő megnövekedett szerszámterhelés következtében, a teljes pálya mentén a maximális szerszámterheléshez kell illesztenünk az előtolás értékét, ami jelentősen behatárolja az elérhető leválasztott forgácstérfogat értékét [63].

### ***Trochoid (EdgeCam: ciklois) szerszám-pályák***

Egy összetett munkadarab készre munkálása során a szerszám-pálya mentén folyamatosan változó forgácsolási erőkkel számolhatunk. Számos kutatás tárgyát képezi ezen változó erők kiegyenlítése, a marási folyamat optimalizálása [64] [65] [66].

Különösen a HSM (*High Speed Milling*) megmunkálások terén van nagy jelentősége a forgácsolási erők csökkentésének és állandó értéken tartásának, mivel csak így tudjuk a technológia által nyújtott nagy fordulatszámokat és előtolásokat kihasználni.

A nagysebességű marási (HSM) technológia bevezetésével kifejlődött tipikus nagysebességű stratégia a trochoid/ ciklois szerszám pálya. A stratégia lényege, hogy a szerszámot a lehető legnagyobb sugarú körön mozgatják a 2.14. ábrán látható módon, ezzel csökkentve a kinematikai kapcsolási méretet. A lépésköz körültekintő kiosztásával a kontaktszöveget egy megadott szinten tarthatjuk.



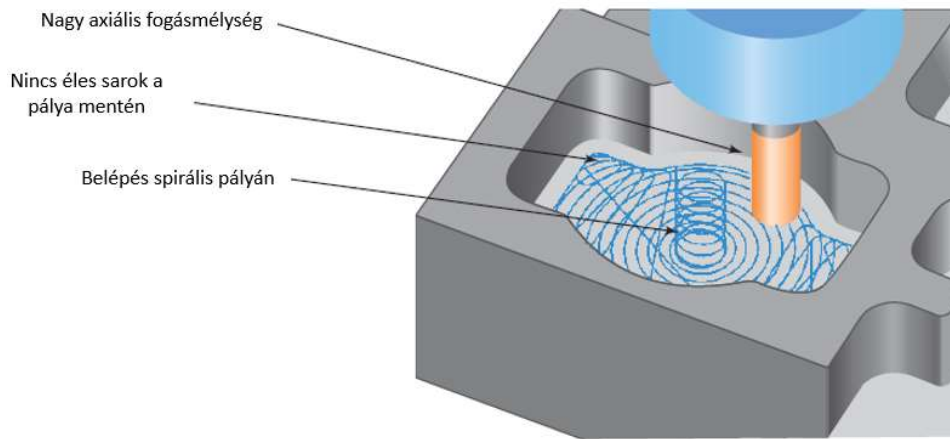
2.14. ábra: Trochoid szerszám pálya [60]

Alkalmazható zsebek megmunkálására is, de fő alkalmazási területe a hornyok marása. Viszonylag könnyen programozható stratégia. A stratégia fő hátránya, hogy a körök mentén való mozgás miatt, viszonylag sokat mozog a szerszám a levegőben. A kontúrparhuzamos stratégiával ellentétben, itt folyamatosan ki-be lépünk az anyagból.

### ***Hullámforma szerszám pálya***

A HSM technológia egy másik nagysebességű szerszám pálya stratégiája a hullámforma szerszám pálya (2.15. ábra). A trochoid szerszám pályától eltérően, a hullámforma pályastratégiánál, a szerszám visszatérő mozgása során törekednek a bejárési idő szerint optimális úthossz elérésére.





2.15. ábra: Hullámforma szerszámpálya [68]

A szerszámpálya állandó kapcsolási számmal dolgozik, tehát a szerszámterhelés nem változik az irányváltások során. A pálya előnye, hogy bár kis radiális fogásmélységgel dolgozik, ellenben nagy előtolás értékkel kompenzál így összességében csökkenthető a megmunkálási idő a hagyományos technológiával szemben, azonos élettartam mellett. Másik lehetőség a kisebb előtolás érték alkalmazása. A hagyományos technológiával párhuzamba állítva ugyanannyi idő alatt, de lényegesen kisebb szerszámkopás mellett végezhető el a megmunkálás [67].

### 2.4.3 Mikro-megmunkálás

A méretet, ahonnan mikro-forgácsolásról beszélünk a szakirodalomban nincs egységesen elfogadott definíció [69]. Sokszor kapcsolódik össze egymással az átlagosnál jobb megmunkálási minőségnek és a méretcsökkentésnek a fogalma, de az irodalomban a mikro-megmunkálás kifejezése inkább az előállított struktúra, és/vagy a megmunkálási tartomány rendkívül kicsi fizikai méretére utal [69].

Általánosan megközelítve a kérdést, technológiai szempontból a mikro-megmunkálás körébe célszerű sorolni minden olyan eljárást, amellyel a hagyományos méretű gyártástechnológiában elfogadott megmunkálási módszereknél kisebb struktúraméretet állíthatók elő [70] [71]. Ha számszerűsíteni akarjuk a fogalmat, akkor azt vehetjük alapul, hogy a mikro-megmunkálási eljárásokkal kialakított struktúraméret, és/vagy a megmunkálás tartománya a mikrométeres, vagyis az 1–999  $\mu\text{m}$ -es mérettartományba esik [72].

A mikro-marás egy precíz és flexibilis technológia, amivel különféle anyagtipusok (polimerek, kerámiák, fémek, ötvözetek), és összetett 3D geometriák munkálthatók meg viszonylag nagy anyagleválasztási sebességgel [71]. A mikro-marás kinematikai

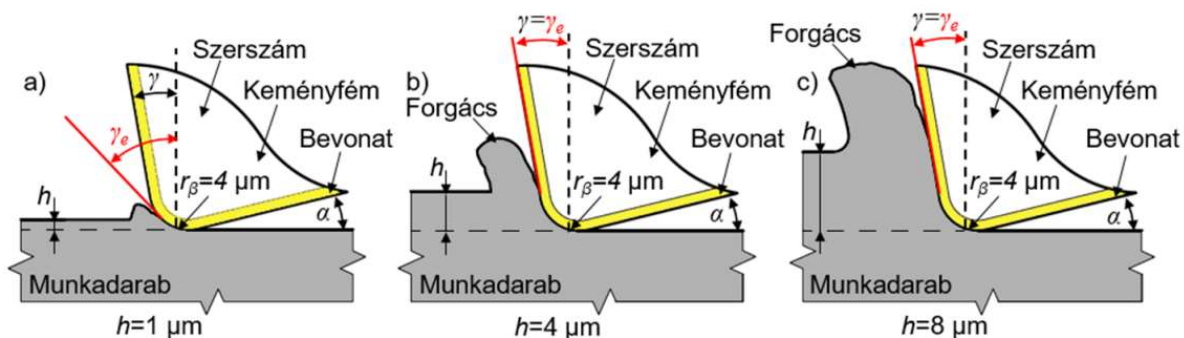
viszonyai hasonló a hagyományos méretű marási eljáráshoz; van azonban néhány egyedi jelenség és kulcsfontosságú szempont:

- *A forgácsolószerszám mérete rendkívül kicsi lehet, ezért a hossz/átmérő arány gyakran nagy. A szerszám kedvezőtlen mérete, valamint a rezgés és/vagy a viszonylag nagy szerszámütés gyakran szerszámtöréshez vezet [73] [74].*
- *A forgácsvastagság gyakran ugyanolyan nagyságrendű, mint a forgácsolóél sugara vagy a munkadarab anyagának szemcsemérete [75] [76]. Ezért a munkadarab anizotrópiája, szemcsemérete, és kristálytani hibái is előtérbe kerülnek.*
- *A sorjaméret és a megmunkált jellemzők méretének aránya magasabb, mint a hagyományos megmunkálási műveletek esetében megszokott, ezért a mikro-sorzási folyamatok költség- és időigénye nagyobb hatással van a termékek végső költségére [77] [78].*
- *A mikro-marási folyamatok felügyeletének és diagnosztikájának jelentősége kellően nagy, mivel a forgácsolószerszám könnyen károsíthatja az anyag felületét (nem megfelelő felületi érdesség, sorjaképződés, mikrorepedés-képződés stb.) és könnyen eltörhet.*

Hagyományos forgácsolásnál az anyag először rugalmasan, majd képlékenyen alakváltozik. Ezt követően a forgács elem a nyírási sík mentén elnyíródik. Ahogy csökken a méret a mikrométeres tartomány felé haladva a vasalási effektus (ploughing) dominál a forgácsképződés során. A vasalási effektus azt jelenti, hogy a minimális forgácsvastagság alatt jellemző anyag deformációs folyamatok részaránya – a szerszám egy körülfordulásán belül – jelentősen megnő. Ezért mikro-megmunkálási folyamatok esetén erősen ajánlott a szerszám állapotának ellenőrzése.

#### ***Működő élszögek a mikromegmunkálás során***

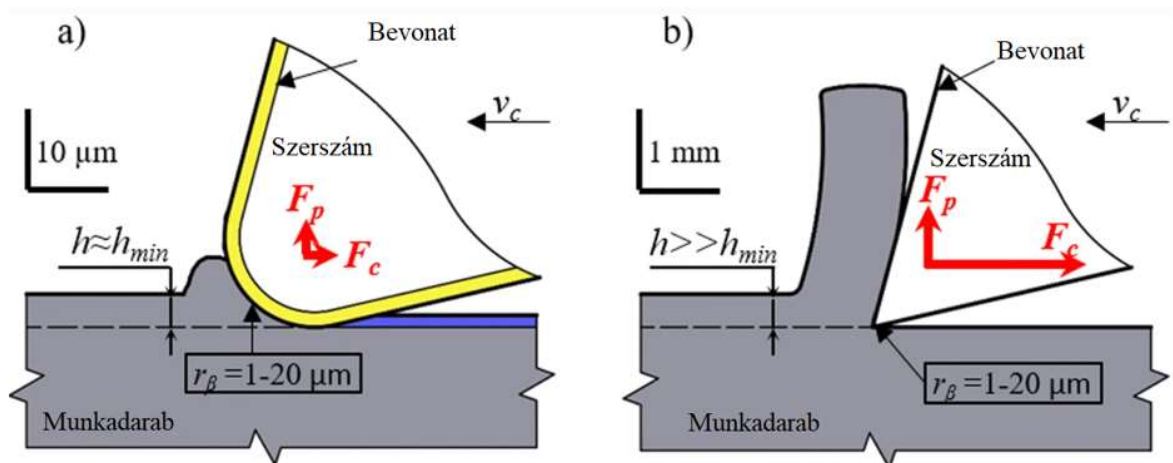
Mikro-marásnál a működő élszögek jelentősen megváltoznak, mivel a forgácsvastagság összehasonlítható méretű a szerszám éllekerekítés sugarával, vagy az anyag szemcseméretével, emiatt erősen negatív homlokszöggel forgácsolunk, ahogy a 2.16-os ábrán is látható.



2.16. ábra: A különböző geometriai viszonyok mikromarásnál a különböző forgácsvastagságok esetében [71]

### ***Forgácsolási erők a mikro-megmunkálásban***

A forgácsoló erők tekintetében a makro-, és mikro-megmunkálások között a fő különbség a 2.17. ábrán látható:



2.17. ábra: Domináns forgácsoló erő hatások a, mikro-marás esetén b, makro-marás esetén,  $F_c$ - forgácsolási erő;  $F_p$ - passzív erő [71]

Makro megmunkálás esetén a forgácsolási erő jóval nagyobb, mint a passzív erő. Mikro-megmunkálás esetében a passzív erőt is figyelembe kell venni, mert jelentős hatással van a forgácsleválasztási folyamatra. Fontos a forgácsoló erők ismerete és figyelemmel kísérése, mivel ezek számos jelenségről nyújtanak információt, például a forgácsképződésről, az anyageltávolítás mechanizmusáról, a rezgésről és a szerszám állapotáról. Mivel karcsú (*nagy hossz/ átmérő arány*) szerszámokat használunk így kis erőhatás is nagy szerszám deformációt okozhat. Továbbá a szerszám élgeometriája is folyamatosan változik a szerszám kopásával, így az erők mellett az élgeometria is minden folyamatjellemzőre kihat.

### ***Rezgések a mikro-megmunkálásban***

A szerszám rezgés csökkentése az egyik legnagyobb kihívás a hagyományos forgácsolásban, mivel gyorsítja a szerszámkopást, valamint rontja az előállított felület minőségét. A kis mérettartományú megmunkálásoknál kis átmérőjű szerszámokra van szükség, ezért merevségük egy nagyságrenddel kisebb, mint a hagyományos forgácsoló szerszámoké. A szerszámok kis merevsége miatt, valamint a relatív nagy fajlagos forgácsoló erők következtében a mikro-megmunkálási folyamat optimalizálása nehézkes, ezen technológia esetén a rezgések még kiemeltebb figyelmet igényelnek [71].

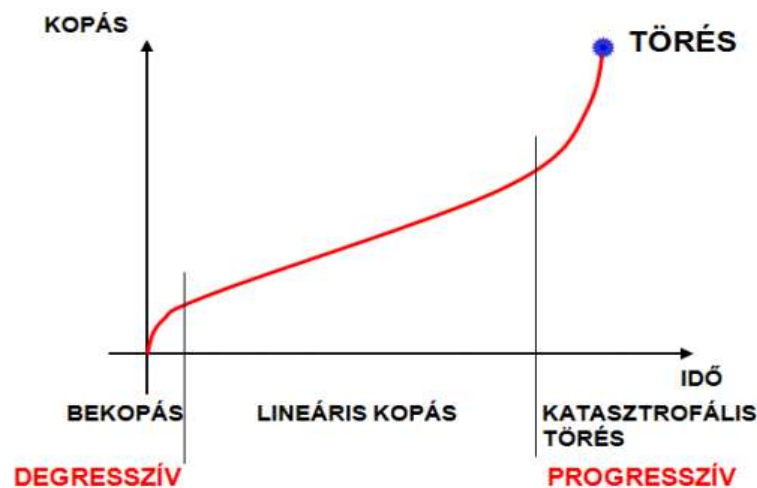
### ***Nagysebességű pályastratégiák alkalmazása mikro-megmunkálásoknál*** [79]

A dinamikus marási stratégiákat – amiknek jellemzője a nagy fogásmélység és kis radiális fogásvétel – előszeretettel alkalmazzák makroméretekből, köszönhetően az olyan előnyös tulajdonságaiknak, mint a kedvezőbb termikus viszonyok, élettartam és termelékenység. Felvetődik a kérdés, hogy mikroméretekből alkalmazható-e a stratégia a méretcsökkenésből adódó nehézségek mellett. A kis kontaktszögek esetén fokozott problémát jelenthet többek között a szerszámdeformáció, az axiális megtámasztás „hiánya”, illetve előtérbe kerül a minimálisan leválasztható anyagréteg vastagságának problémaköre is, mivel az elméleti forgácsvastagság a kis kontaktszögek esetén lényegesen kisebb, mint a beállított élenkénti előtolás értéke. A problémás területeket összeszedve kijelenthetjük, hogy a mikro-megmunkálás kutatási területén rengeteg a nyitott kérdés [71].

#### **2.4.4 Szerszámélettartam**

##### ***Szerszámkopás általános esetében***

A kimeneti jellemzők közül az egyik legfontosabb a szerszám élettartam. A szerszám élettartamának azt tekintjük, ameddig az adott anyaghoz meghatározott élszögek megléte biztosítja a megfelelő forgácsleválasztási körülményeket. A szerszám a használat során elkerülhetetlenül kopik. A kopás az idő függvényében a 2.18. ábrán látható grafikonnal, a Taylor görbével szemléltethető:

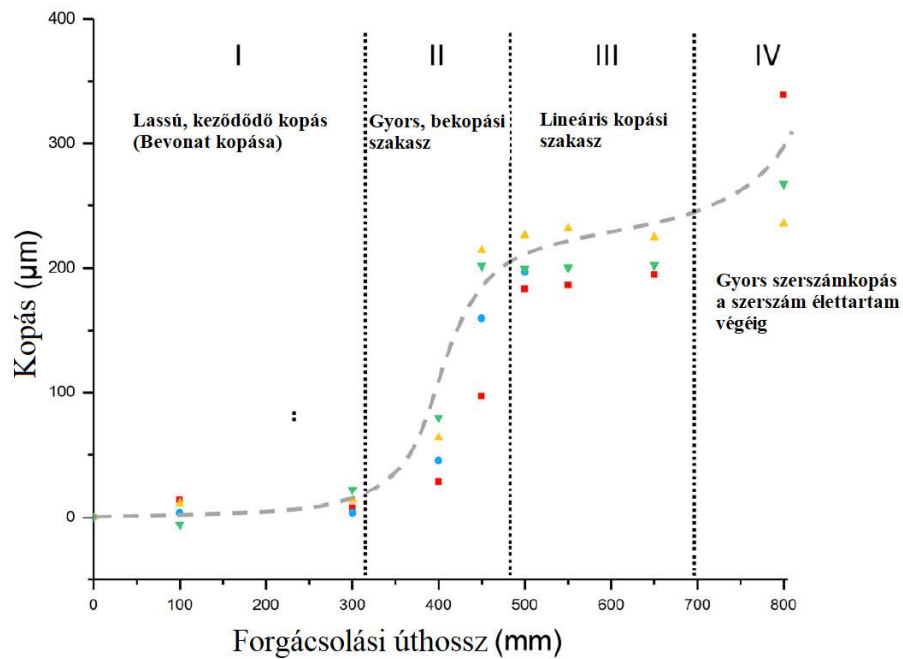


2.18. ábra: Szerszám élettartam fázisai [55]

Az első szakasz a gyors kopás fázisa. Ezt követi egy egyenletes kopási zóna. Ebben a szakaszban beszélünk a szerszám tényleges élettartamáról. A túlkopási fázisban a szerszám élettartama a végénél van.

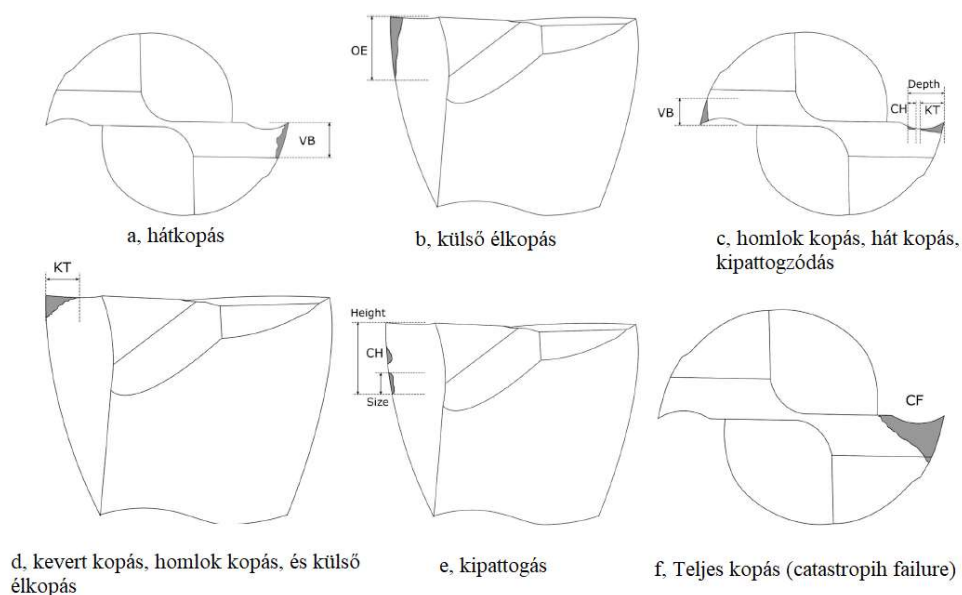
### ***Szerszámkopás maró szerszámok estén***

A marási folyamat során fellépő kopásfajták elemzésére általában az ISO8688-1 [80], és az ISO8688-2-es [81] szabványokat alkalmazzák. Ezek a szabványok foglalják magunkban azok a technológiai paraméterek, anyagjellemzők, és egyéb változókat, amik hatással vannak az egyes szerszámkopási fajtákra. Ezeket a szabványokat általában szerszámok minősítésére és tesztelésére használják a gyártók. Azonban mikromegmunkálásoknál az itt bemutatott alapelvek már nem használhatóak egy az egyben, viszont átvehető bizonyos elvek, mint például a szerszám elhasználódás menetének a vizsgálata, amely a 2.19. ábrán látható [82] [83].



2.19. ábra: Szerszám elhasználódás fázisai mikro- megmunkálás során, mikro- szármaró alkalmazása estén [83]

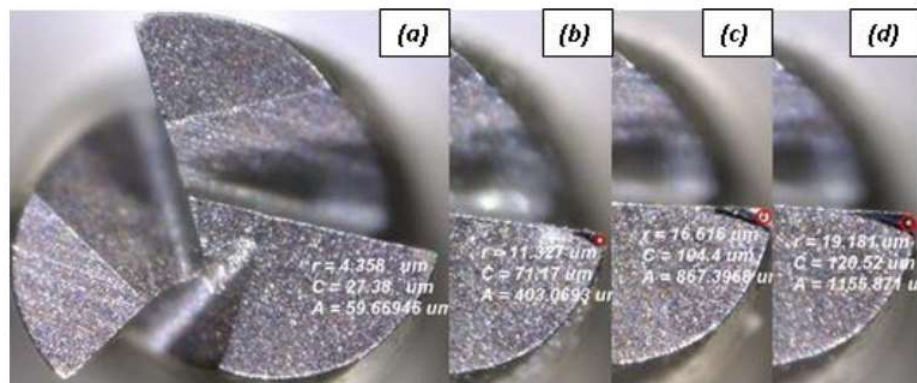
Az I. szakasz (2.19. ábra), a lassú kopási fázis. Itt csak a szerszám bevonatának kopása jelentkezik. A szerszám bevonat kopása után következik a Taylor féle tényleges bekopási szakasz (II. fázis), ahol gyors szerszám elhasználódás figyelhető meg. Ezt követi a lineáris kopási szakasz, ahol egyenletesen kopik tovább a szerszám (III. szakasz). A IV. szakasz a túlkopás tartománya, ahol a szerszám elhasználódása ismét nagy sebességgel zajlik, egészen a szerszám élettartam végéig. A 2.20. ábra összefoglalja azokat a kopásokat, amik felléphetnek a szerszám felületén.



2.20. ábra: Szerszámkopás lehetséges formái mikro szármarónál [83]

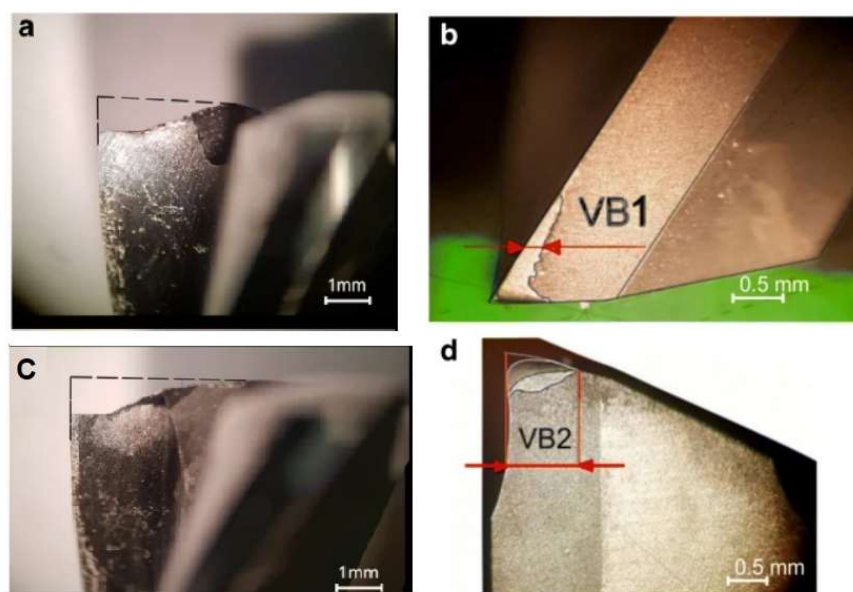
A kopásformák egyszerre, de különböző mértékben fordulnak elő a forgácsolás során, ezért a domináns kopást meg kell határozni. A kopásfajták közül a szerszám hátkopásának a mértékéhez szokták a Taylor élettartam görbe egyes szakaszait rendelni. Azonban ez csak akkor megoldható, ha a hátkopás a domináns kopás fajta, ami mikro-marás során közel sem biztos [86] [87]. A 2.19-es kopási fajták alapján a szakirodalom a következő szerszámkopás mérési lehetőséget mutatja be:

Ahmed és munkatársai [84] a 2.19. ábra „f” kopási formáját tapasztalták. Ők egy Dino-capture nevű szoftverrel mérték a kopott felület területét a 2.21-es ábrán látható módon, és a mért kopási felületeket hasonlították össze a vizsgálatuk során.



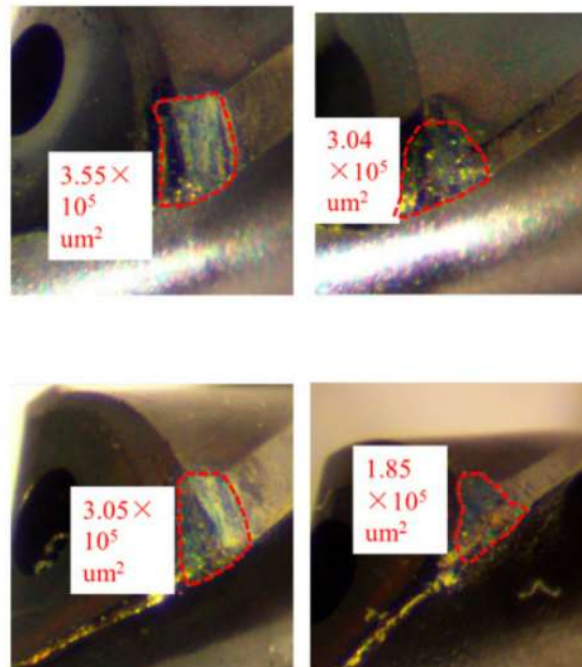
2.21. ábra: Kopott homlok- hátfelület területének mérése szoftver segítségével [84]

Kepezak és munkatársai [85] különböző polimerek marása során mérték szerszámkopást. A 2.21. ábra alapján, ők az „a” és „d” típusú kopásokkal találkoztak. Az ő esetükben a szerszám elhasználódás vegyesen következett be, de a hátkopás volt a domináns, így az volt a mérvadó kopás (2.22. ábra). Ettől függetlenül vizsgálták a szerszámél felület elhasználódását is.



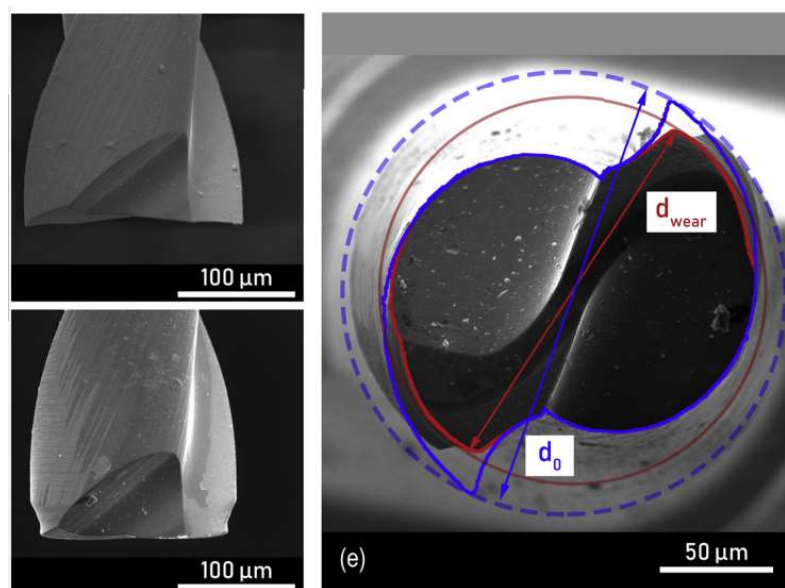
2.22. ábra: Maró szerszám összetett kopásának vizsgálata [85]

Olyan eset is előfordulhat, ahol bár a hátkopás a domináns, de az elemzés szempontjából nem a kopás hossz vagy mélység irányú mérete fontos, hanem a kopott felület nagysága. Erre példa Yuang Li [86] munkája is, ahol grafit anyagba készítettek zsebeket és furatokat. A szerszám vizsgálata során vizsgálták a hátkopás hosszát és felületét a 2.23. ábrán látható módon:



2.23. ábra: Kopott él felületének meghatározása szoftveres úton [86]

A szerszámkopás elemzésekor olyan eset is előfordulhat, ahol a kopás nem él vagy felület mentén jelentik meg dominánsan, hanem a szerszám teljes geometriája egyszerre használódik el, aminek eredményeként az átmérője csökken.



2.24. ábra: Szerszám teljes térfogatának csökkenése [87]



Erre a jelensége jó példa Marco és munkatársainak [87] kutatása is, akik réz megmunkálása során vizsgálták a szerszám elhasználódásának a menetét, és a felületi érdesség változását. A 2.24. ábrán látható módon, ők nem a szerszám egyes éleinek, felületeinek kopását vizsgálták, hanem a szerszám átmérő csökkenését vették alapul a szerszám elhasználódás mérőszámaként.

A fenti példákából is látható, hogy a szerszám elhasználódás menetének vizsgálata sokszor összetett. Az irodalom által bemutatott vizsgálati módszereket kiértékelve, a saját kísérleteim során tapasztalt kopások a Yuang Li [86] kísérletei során tapasztalt kopási formákhoz voltak leginkább hasonlóak.

A szerszám kopottságának a mérésén kívül vannak egyéb, alternatív szerszámélettartam megadási lehetőségek:

- *a munkadarab oldaláról meghatározva: méret, alak, érdesség változás, sorjaképződés*
- *folyamatjellemzők oldaláról meghatározva: forgácsolási erő, teljesítmény, hőmérséklet, rezgés, hang (akusztikus emisszió) mérése*

A szerszám élettartam tehát az a forgácsolásban megadott feltételek között ( $v$ ,  $f$ ,  $a$ ...) eltöltött idő mely alatt a kopás az előre rögzített értéket – élettartam kritériumot – eléri [55] [79]. Az élettartam idő kifejezhető más jellemző mértékben is, pl. *élettartam-út, megmunkált-gyártott darabszám*.

#### 2.4.5 Kerámia megmunkálás szabályos élgeometriájú szerszámokkal

A 2.3 fejezetben bemutatott technológiák alapvető hátránya a bonyolult kivitelezhetőség (*kerámia vezetővé tétele az EDM megmunkáláshoz* [54]), drága kialakításuk (*lézeres megmunkálás* [23], [44]), vagy az alacsony leválasztott forgács térfogat (*köszörülés* [41]). Alternatívaként szóba jöhető megoldás a szabályos élgeometriával történő megmunkálás. Előnynek mondható az olcsó, elterjedt technológia, viszont hátránya, hogy a rideg anyagok forgácsolása során gyors szerszámkopás figyelhető meg. Emiatt a technológia paraméterek nem megfelelő megválasztása gazdaságtalan megmunkálást eredményez. A megmunkálási folyamat legfontosabb kimeneti paraméterei a következők: szerszám élettartam, gyártási idő, megmunkált felületi minőség. Míg a szerszám élettartam esetében a maximalizálásra törekszünk, addig a gyártási időt nézve a minimalizálásra, a felületnél a lehető legkisebb felületi egyenetlenségekre. Elemezve a hazai, és nemzetközi szakirodalmat arra következtetésre jutottam, hogy a kutatások irányvonala a következő pontokban foglalhatóak össze:

- *szerszámélettartam növelésének lehetőségek különböző kerámia alapanyagok megmunkálása során (szerszám kopási fázisainak feltárása, megmunkálás rugalmas- rideg tartományban, alapanyag előkészítése, szerszám bevonat, technológiai optimalizálás) [88] [89] [90] [91]*
- *Felületi minőség javítási lehetőségek különböző kerámia alapanyagok megmunkálása során (repedésmentes felület előállítása a technológia optimalizálásával, kombinált technológiákkal) [89] [90] [92]*

*Mivel szerszám élettartam optimalizálás, illetve az egyes faktorok élettartamra gyakorolt hatásáról alapos irodalomkutatás után sem találtam adatokat, így én ennek a tématerületnek a mélyebb feltárását tűztem ki célkitűzésül.*

#### **2.4.6 Forgácsolási jellemzők hatása a szerszámra kerámia megmunkálás során**

A technológiai paraméterek optimalizálásának fontos része, hogy megértsük a szerszám elhasználódásának menetét kerámia anyagok forgácsolása során. A szerszám elhasználódás menetével több cikk is foglalkozott többféle kerámia alapanyagot is tesztelve. Bian és munkatársai [89] miniatűr gyémántszerszámot használtak cirkónium oxid kerámia megmunkálásához. A szerszámkopást 3 lépcsőben határozták meg:

1. *a bevonat kezdeti, rétegenkénti leválása*
2. *bevonat felerősödő leválása, és a vágóél megkezdődő kopása*
3. *szerszám felgyorsult kopása.*

H. Romanus és kollégái [90] szintén cirkónium oxid kerámia forgácsolása során vizsgálták a szerszámkopás folyamatát, valamint a különböző technológiai paraméterekkel elérhető felületi minőséget. Az alkalmazott szerszámok gyémánt és CBN bevonatú szármarók voltak. Kísérleteikben a Bian által ismertetett három stádiumot figyelték meg. Bian és munkatársai [91] egy másik cikkükben az előző kutatásukat folytatva, különböző nagyságú gyémántszemcsével ellátott wolframkarbid szármaróval végeztek kísérleteket. Vizsgálataik során a gyémántbevonat leválási mechanizmusát vizsgálták. Megállapították, hogy az “X-Y” irányú megmunkálásnál a forgácsolási erő jóval kisebb volt, mint “Z” irányban. Ennek oka, hogy az x-y irányú forgácsolásnál a képlékeny forgácsleválasztás tartományban sikerült a folyamatot tartani, míg “Z” irányban a rideg tartományban történő megmunkálás dominált. Megállapították továbbá, hogy a fogankénti előtolás, valamint az axiális fogásmélység növelésével a forgácsolási erő is jelentős növekedést mutat.

### 2.4.6.1 Szerszámjellemzők kerámia megmunkálás során

H. Romanus és munkatársai [88] arra keresték a választ, hogy a szerszám bevonatát alkotó gyémántszemcsék mérete, milyen módon befolyásolja a szerszámélettartamot. A kísérletek alapanyaga cirkónium oxid kerámia volt. A kutatás értékes információt hordozott az alkalmazott szerszámgeometriát illetően is.

*Szerszám technológiai adatai:*

- Homlokszög:  $-1,2^\circ$  -től  $-2,2^\circ$ -ig
- Hátszög:  $14,7^\circ$
- Csavaremelkedési szög:  $30^\circ$

*Forgácsolás technológiai adatai:*

- Fogankénti előtolás:  $2-3-6-10 \mu\text{m}/\text{fog}$
- Fogásmélység:  $4-10 \mu\text{m}$

A vizsgálat során minden esetben negatív homlokszögű szerszámokat alkalmaztak. A kutatásaik során arra a megállapításra jutottak, hogy a nanoszemeses gyémántbevonattal a szerszám élettartam  $66 \text{ mm}$ -ről  $1980 \text{ mm}$ -re emelkedett. A szerszám élettartam növelési lehetőségeket vizsgálták Toru Kizaki és kollégái [93], akik a szerszám hevítésével próbálták javítani a forgácsolási körülményeket. A kísérletek során arra jutottak, hogy  $500 \text{ C}^\circ$  hőmérsékletre előhevített szerszámnál a forgácsolási erő értéke  $50\%$ -al csökkent, mint annál a szerszámnál, amivel szobahőmérsékleten kezdtek forgácsolni. Kizaki [94] egy másik cikkében publikált egy hasonló kísérletet, azonban itt nem a szerszámot melegítette, hanem a szerszám vágóéle előtti területet hevítette lézerrel. A kísérlete során javult a felületi minőség, nőtt a szerszámélettartam, és csökkent a szükséges vágóerő. A publikált kísérletben  $35\%$ -os vágóerő csökkenést tudott elérni.

Marzellus H. és munkatársai [92] cirkónium oxid kerámia megmunkálásával kísérleteztek, a kerámia alapanyag lépcsős szinterelésével próbálták javítani a megmunkálás körülményeit. A szerzők célja volt, hogy a kerámia alapanyag gyártási folyamatának egy köztes lépésében munkálják meg az anyagot, ahol még nem érte el a végső keménységét. A forgácsoló megmunkálást követte az anyag végső szinterelése. A cikkben bemutatták az alkalmazott technológiai paramétereket a következők voltak:

- Előtolási sebesség:  $v_f=125-250 \text{ mm}/\text{min}$
- Fordulatszám:  $n=40000 \text{ 1}/\text{min}$
- Fogásmélység  $a_p=5 \mu\text{m}$

Megállapították, hogy többlépcsős szintereléssel növelhető a szerszám élettartama, és a végső szinterelési folyamat során az elért felületi minőség nem változik jelentősen.

E. Uhlmann [95]  $\text{AlSi}_{17}\text{Cu}_4\text{Mg}$  alapanyagú kerámia fúrásával/menetfúrásával kísérletezett gyémánt bevonatú szerszámmal. A kutatásaiban a bevonat összetételének hatását vizsgálta a szerszám élettartamra. Arra jutott, hogy a bevonat tulajdonságait (szívósság, kifáradás, tribológiai tulajdonságok) döntően befolyásolja a bevonat kobalttartalma, a gyémánt szemcsemérete, valamint az alapanyag előkezelése.

Ravikumar Dumpala és munkatársai [96] különböző bevonat típusok (változó gyémánt szemcse nagyság, változó bevonat rétegszám, TiN bevonat, bevonat nélküli) szerszámélettartamra gyakorolt hatását vizsgálták Al-SiC kompozit alapanyag esztergálása során. A szerzők szerint a legjobb szerszám élettartamot a kétrétegű, átmeneti réteggel elkészített gyémánt bevonat biztosította. Itt a szerszám élettartam 14,7 perc volt. Az egyrétegű gyémántbevonatú szerszám 13,5 perces élettartammal követte a kétrétegű bevonatot. A bevonat nélküli, illetve TiN-el bevonat szerszám élettartama csekély <1 perc alatti érték volt.

W.M. Zenga és munkatársai [97] a szerszám élettartam növelésének lehetőségét egy másik aspektusból közelítették meg. Kutatásaik során azt vizsgálták, hogy a szerszám rezgetése milyen irányban befolyásolja a szerszám élettartamot. A megmunkált alapanyag SiC alapú kerámia volt. A kísérlet végén megállapították, hogy a szerszámrezgés hatására a palást felületen a kopás mértéke elhanyagolható, a homlokkopás azonban jelentős értéket mutatott. A kopási folyamat két részben ment végbe. Az első fázisban a laza szemcsék kifordulnak (bekopási szakasz), a második szakaszban a kötőanyag törése következtében a szerszámkopás gyorsuló ütemben zajlott le. A forgácsolási erő az első kopási fázisban folyamatosan növekedett, míg a második szakaszban a forgácsolási erő értéke csökkent.

H. Hocheng és munkatársai [98] szintén a szerszám rezgetés területén végzett kutatásokat. Ők C/SiC kompozitok fúrása során vizsgálták a rezgések élettartamra gyakorolt hatását. Kutatás célja, hogy ultrahang frekvencián rezgetett fúrószerszámoknál vizsgálják az általuk meghatározott technológiai paraméterek (*forgácsolási teljesítmény, bevonat szemcseméret, megmunkált anyag*) és a szerszámkopás közötti kapcsolatokat. Céljuk az volt, hogy a szerszám mesterséges rezgetésével milyen irányba tolódik el az élettartama. Megállapították, hogy a rezgetett szerszám esetében a bevonat szemcseméretének növelésével csak bizonyos mértékig növekszik az anyagleválasztási teljesítmény, utána rohamosan csökken.

### 2.4.6.2 Hűtőfolyadék hatása a szerszám élettartamra

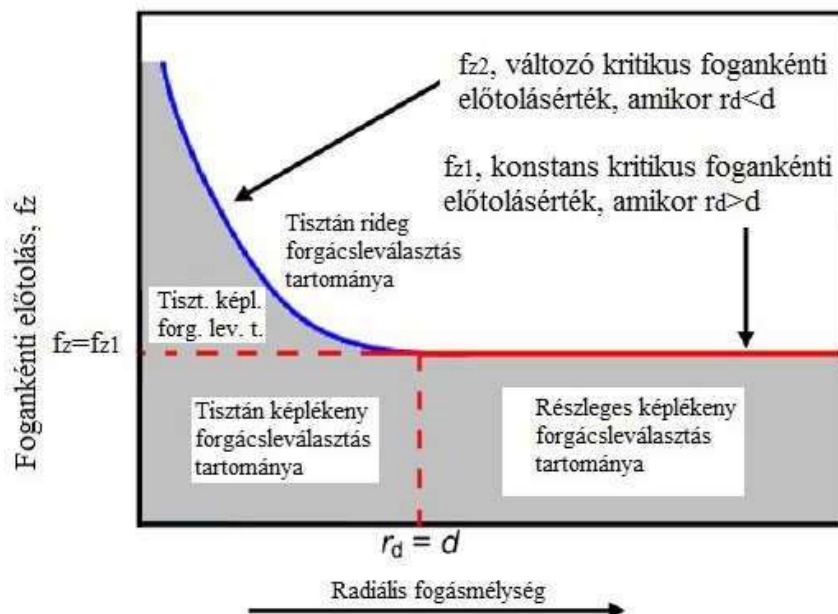
Z.Y. Wang és munkatársai [99] a hűtőfolyadék hatását vizsgálták a felületi minőségre, és szerszámélettartamra. A megmunkált kerámia anyaga  $\text{Si}_3\text{N}_4$  volt. Az alkalmazott szerszám polikristályos CBN szerszám volt. Arra a megállapításra jutottak, hogy a folyékony nitrogénnel történő szerszámhűtés javítja a felületi minőséget, kevesebb a repedés a felületen, valamint csökken a szerszámkopás mértéke is.

### 2.4.6.3 Alakváltozás tartománya forgácsleválasztás során

Szívós anyagok esetében (különböző acélok stb.) a forgácsleválasztás folyamata a következő fázisokon megy át: *forgácselem rugalmas alakváltozása a deformációs zónában, forgácselem képlékeny alakváltozása a deformációs zónában, forgácselem elnyíródása a nyírási sík mentén*. Rideg anyagok estén az anyag nem képes rugalmasan követni a forgácsoló erő változását, így a forgácselem lepattan a felületről. Ez a folyamat a szerszámra nézve is káros hatást fejt ki. A kerámia, illetve egyéb rideg anyagok megmunkálása során a szerszámkopás szempontjából kulcskérdés, hogy a munkapont helyzete mozgatható-e a rideg- képlékeny forgácsleválasztás tartományai között. A témában sok publikált kutatás van, ahol a szerzők erre a kérdésre keresik a választ [91] [100]. Ezt a témát vizsgálták W. S. Blackley és munkatársai [101], akik egy forgácsolási modell felállításán dolgoztak, hogy rideg anyag gyémánttal történő esztergálása során, milyen módon lehet a képlékeny tartományba vinni a folyamatot. A cikkben a hagyományos forgácsolási modellekben használt változókhoz képest, plusz két új változó vezettek be: a kritikus forgácsolási mélység ( $d_c$ ), repedések átlagos mélysége ( $y_c$ ). Arra a megállapításra jutnak, hogy a homlokszög negatív irányba történő növelésével javul a termelékenység, azáltal, hogy növekszik az a kritikus fogásmélység, amin belül még képlékeny forgácsleválasztási tartományban dolgozik a szerszám.

Muhammad Arif és munkatársai [102] WC-TaC-TiC kompozit megmunkálása során vizsgálták a rideg-képlékeny forgácsleválasztás tartományának alakulását. Analitikus modellt mutatnak be arra, hogy rideg anyagok esetében miként lehet marással repedésmentes felületet kialakítani. A modellben meghatározták a megmunkálás kritikus feltételeit, tekintettel a radiális fogásmélységére, és a megmunkált felület alatti roncsolódásokra, amik a forgácsolás során keletkeznek a forgácselemek rideg törése miatt. Amennyiben a radiális fogásmélység nagyobb, mint a megmunkált anyag felület alatti roncsolódásának mélysége, lehetséges a repedésmentes megmunkálása a rugalmas és rideg forgácsleválasztás tartomány határán. Ha a radiális fogásmélység kisebb, mint a

megmunkált felület alatti repedések mélysége, akkor a rideg forgácstörést a képlékeny tartományban történő marással lehet megelőzni, így repedésmentes felületet előállítani. Továbbá arra a megállapításra jutottak, hogy a fogankénti előtolás a fogásmélység együtt határozza meg a céltartományt. Megállapították, hogy a fogásmélység-előtolás értékekhez tartozik egy olyan kritikus érték, amely hatással van a kialakuló forgácsleválasztási folyamatra.



2.25. ábra: Kritikus előtolás-fogásmélység a képlékeny alakváltozás tartomány eléréséhez [102]

Egy bizonyos fogásmélység alatt az előtolás értéke nagyban növelhető anélkül, hogy a rideg tartományba mozdult volna el a forgácsképződés (2.25. ábra).

A szakirodalom ajánlást ad egy közelítő képlet formájában egy optimális fogásmélység meghatározásához, hogy a képlékeny forgácsleválasztás tartományában dolgozzon a szerszám [88] [89] [90]. Az összefüggés a következő alakban van megadva (2.3-as összefüggés [88]):

$$d_{\text{crit}} = 0.15 \left( \frac{E}{H} \right) \left( \frac{K_{Ic}}{H} \right)^2 \quad (2.3)$$

Ahol:

- $E$ : Young modulus (GPa)
- $H$ : keménység
- $K_{Ic}$ : törési szilárdság

Az empirikus formulát Bifano és munkatársai dolgozták ki rideg anyag köszörülésénél, de kerámia marásánál is alkalmazzák ezt az összefüggést. A szakirodalom [88] [89] [90] egy másik célfüggvényt is javasol a képlékeny forgácsleválasztás biztosításához, amivel egy ajánlott maximális forgácsvastagság értékét

határozható meg a technológiai paraméterek függvényében. Az összefüggés a következő formában van megadva (2.4-es összefüggés):

$$h_{\max} = r_{\varepsilon} \cdot \sqrt{r_{\varepsilon}^2 + f_z^2 - 2f_z \sqrt{2r_{\varepsilon} a_p - a_p^2}} \quad (2.4)$$

Ahol:

- $h_{\max}$ : maximális forgácsvastagság (mm)
- $r_{\varepsilon}$ : szerszám csúcssugár (mm)
- $a_p$ : axiális fogásmélység (mm)
- $f_z$ : fogankénti előtolás (mm/fog)

Ueda és munkatársai [103] szintén modellezni próbálták a forgácsleválasztási zónában történő folyamatokat, és számszerűsíteni azokat a paramétereket, amelyek alapján eldönthető, hogy adott technológia mellett adott anyagnál milyen tartományban várható a megmunkálási folyamat. Az alapmodell, amivel dolgoztak a J-integrál módszer, amit Rice [104] dolgozott ki (*A repedések a törésmechanikai mérőszámok segítségével minősíthetők*)

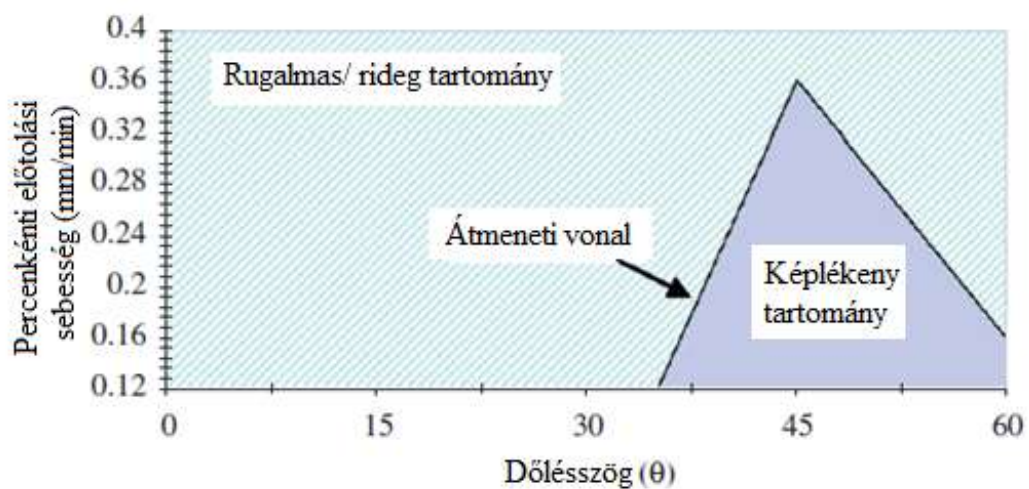
*J integrál módszere lényege:*

- Mérések alapján egy  $J_{kr}$  kritikus határérték meghatározása (hőmérsékletváltozás, deformációs zóna változás alapján számított paraméter)
- Az alkalmazott technológia paramétereiből egy  $J$  érték paraméter számítása. Ha ez az érték nagyobb a  $J_{kr}$  paraméternél, akkor rideg forgácsleválasztásról beszélünk, ha  $J$  érték kisebb a határértéknél, akkor rugalmas-képlékeny alakváltozásról van szó
- Abban az esetben, ha a „ $J$ ” érték kisebb, mint  $J_{kr}$ , egy másik paraméter is bevezetésre került („ $S$ ” a képlékeny deformációs zóna területe) ami szintén szükséges annak eldöntésére, hogy valóban képlékeny forgácsleválasztásról van szó
- Az „ $S$ ” érték kritikus értéke, ahol az elsődleges nyírási zóna teljes területe képlékenyen alakváltozást szenved el
- Ha mindkét feltétel teljesül, akkor beszélünk képlékeny alakváltozásról.

A cikkükben számos alapanyagot megvizsgáltak (cirkónium oxid, WC-Co,  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ , SiC), ami alapján a szerzők arra jutottak, hogy azok az anyagok, amelyeknek

magas a törési szilárdsága könnyen megmunkálhatók a képlékeny forgácsleválasztás tartományában "kis fogásmélység, és nagy forgácsolási sebesség mellett". Alacsony törési szilárdság érték estén a kísérletben alkalmazott kis fogásmélység mellett sem sikerült a képlékeny leválasztási tartományt elérni. Alacsony törési szilárdság mellett nem találtak olyan paraméterkombinációt, amellyel sikerült volna elmozdítani a folyamatot a képlékeny anyagleválasztás tartományába.

Az eddig kutatásokból leszűrhető, hogy az anyag törési szilárdsága, az alkalmazott előtolási sebesség, és a fogásmélység döntően befolyásolják a megmunkálás tartományát. Ezekon túlmenően azonban a szerszám és a munkadarab egymáshoz képesti szöghelyzete is meghatározó (2.26. ábra) [105].



2.26. ábra: Forgácsleválasztás tartományai az előtolási sebesség, és szerszámbedöntési szög függvényében [105]

A szerszámbedöntés elsősorban a gömbmaróval és tóruszmaróval történő megmunkálás során fontos, mivel itt beszélhetünk effektív forgácsolási sebességről (*axiális fogásmélységtől függő forgácsolási sebesség érték*). Az irodalmi áttekintés azt mutatja, hogy a szerszám dőlésszögének optimális értéke 40-60° között keresendő a vizsgált rideg anyagnál [105].



### 3 A kutatás kitűzött céljai

A szakirodalmi kutatás alapján kijelenthető, hogy a kerámia anyagok forgácsolása számos olyan részt tartalmaz, ami még napjainkban nincs kellőképpen feltárva. Az irodalom vizsgálja a technológiai paraméterek befolyásoló hatását ( $a_p$ ,  $a_e$ , szerszám dőlési szög stb.) a szerszám élettartamra nézve, azonban nem tér ki arra, hogy ezek a paraméterek összetett geometriai elemek (zsebek, illetve különböző kontúrok) megmunkálása során milyen módon befolyásolják a szerszám élettartamot. Továbbá nem tárgyalja az összetett szerszám-pályák élettartamra gyakorolt hatását sem, így ez egy aktuálisan releváns kutatási terület. Így a kutatási célom az, hogy összetett geometriai elemek megmunkálása során kövessem nyomon a szerszám elhasználódásának menetét.

A kutatási tevékenységem részletes céljai a következők:

1. Az elsődleges célom a kerámia-marást befolyásoló hatások feltárása, valamint megállapítani, hogy ezek a jellemzők milyen mértékben hatnak a szerszám élettartam alakulására. A kísérletek során az elérhető felületi minőség alakulását nem vizsgálom.
2. A kísérletek számának optimalizálására egy teljes faktoros kísérletterv kidolgozása, és elvégzése a célom, ami alapján egy megbízható optimalizálás elkészítése lehetséges.
3. Mivel összetett geometriát vizsgáltam, így célom feltárni különböző pályastratégiák szerszámélettartamra gyakorolt hatását.
4. A forgácsolás során minden esetben keletkeznek rezgések. A rezgések jellegére a szerszám kopottsági állapota komoly hatással van. A célom egy olyan online monitorozási eljárás megvalósítása, amivel nyomon követhető a szerszám pillanatnyi kopottsági állapota a rezgések alapján, úgy, hogy a gyártási folyamatot közben nem kell felfüggeszteni.
5. A gyártmány online pontossági vizsgálata mellett, célom, hogy a rezgés összetevők alapján, az adatokból megállapítsam a szerszám összetett geometriájának egyes szegmenseinek pillanatnyi állapotát is.

## 4 Kísérletek előkészítése- berendezések összeállítása

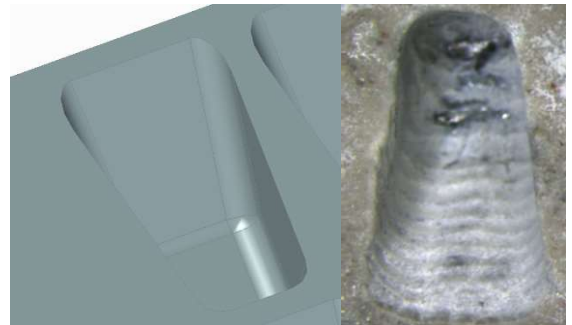
A vizsgálatok előtt a folyamat megtervezése, illetve az alkalmazandó berendezések listájának összeállítása volt a feladat. A kísérletekhez szükségem volt egy minimum 3 tengelyes marógépre, ami a forgácsolást el tudtam végezni. Ezen felül megfelelő alapanyagra, mikroszkópra, illetve keménységmérő berendezésre is.

### 4.1 Gyártott zseb geometriai bemutatása

Ahogy a szakirodalmi áttekintésben bemutattam, a bevonatolt turbinalapáton utólag ki kell alakítani a filmhűtéshez szükséges furatokat, és zsebeket (2.1-es fejezet). A lapát kerámia bevonatába mart zseb geometriai kialakításánál a legfontosabb, hogy a kiáramló közeg minél jobban ki tudja fejteni a hőszigetelő, illetve hűtő hatását. A turbinalapáton többféle zseb geometria is készülhet (2.5 ábra) függően attól, hogy a lapát adott részén milyen áramlástanai viszonyok vannak megkövetelve. Az általam vizsgált geometria az egyik leggyakrabban alkalmazott zsebialakítási forma a lapáton (4.1-es ábra).

*Felülnézetből a zsebek alakja trapézformát mutat, a két rövidebb oldal nem egyenes, hanem enyhén ívelt, lekerekített sarkokkal. A folyamat során 3 leíró geometriai paramétert vizsgáltam:*

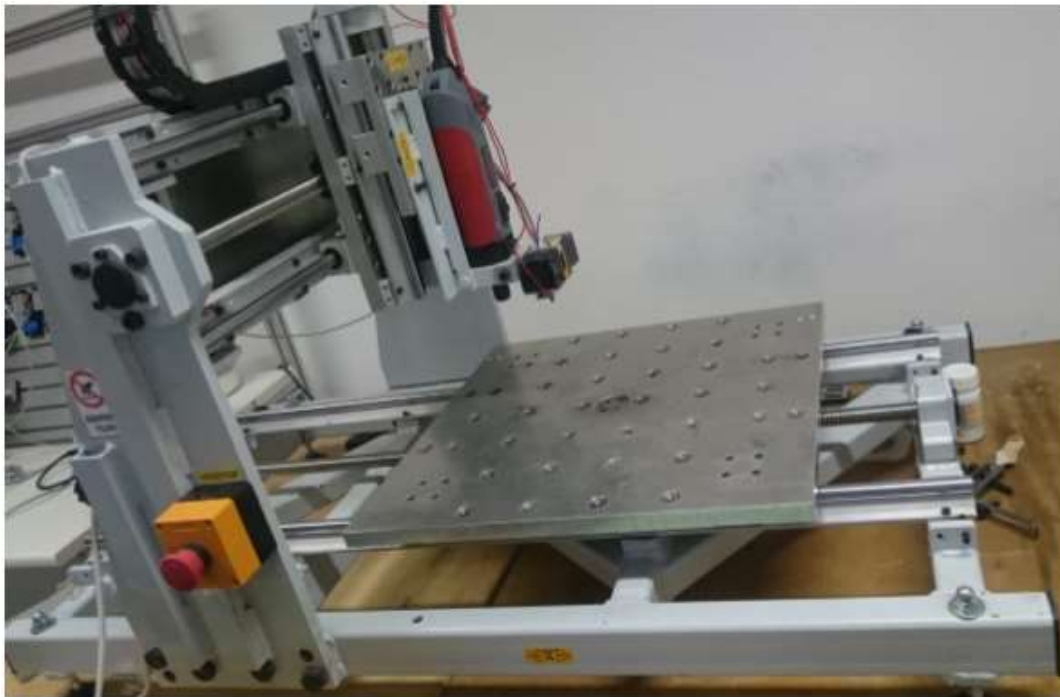
- zseb mélysége (legmélyebb ponton)
- zseb hossza (a legnagyobb érték)
- zseb szélessége (a legnagyobb érték)



4.1. ábra: Gyártott zsebek geometriai kialakítása

### 4.2 Alkalmazott szerszámgép

A forgácsoló kísérletek elvégzéséhez szükséges szerszámgépet a CncTeamZeg csapat tagjaként többedmagammal terveztem, illetve építettem meg. (4.2. ábra).



4.2. ábra: Alkalmazott CNC vezérlésű megmunkálógép

*Berendezés műszaki paramétereit:*

- *Maximális fordulatszám: 25000 [1/min]*
- *Motor teljesítménye: 1kW*
- *Maximális tengely előtolási sebesség: 1000 [mm/min]*
- *Gép ismétlési pontossága:  $\pm 15\mu\text{m}$*

### 4.3 Alkalmazott forgácsoló szerszám bemutatása

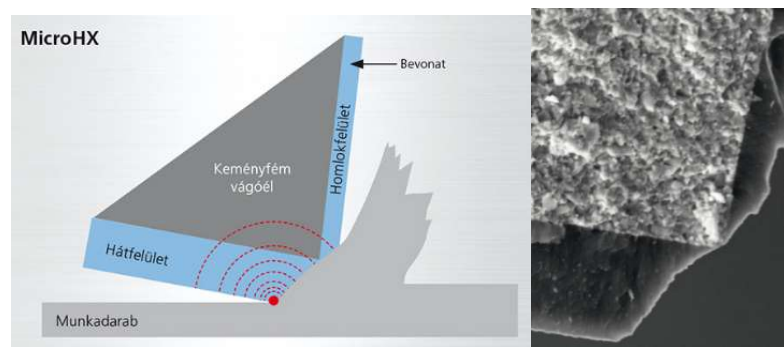
A kísérletek során egy Fraisa típusú és TiAlN bevonatú gömbmaró szerszámot alkalmaztam (4.3. ábra), amely kellően általános felhasználást jelent, tekintve, hogy egy könnyen beszerezhető, katalógus szerszámról van szó [106]. A szerszám alak elsősorban a zseb sarkain előírt lekerekítések megmunkálása miatt fontos. A zseb minden sarkában 0,5 mm-es rádiusz található, így a teljes geometria egyetlen ilyen szerszámmal készre kialakítható, nincs szükség szerszámcsereére, ez a gazdaságossági szempont határozta meg a szerszámválasztást.

*Alkalmazott szerszám legfontosabb jellemzői:*

- Szerszám típusa: Gömbmaró
- Átmérő: 1mm
- Dolgozó hossz: 6mm
- Alapfém: Keményfém
- Bevonat: TiAlN
- Gyártó: Fraisa
- Termékszám: X6564100



4.3. ábra: Fraisa gömbmaró



4.4. ábra: Fraisa gömbmaró vágóél felépítése [106]

A vágóél homlokszöge negatív értékű a nagyobb terhelhetőség miatt (4.4-es ábra). A MicroHX marószerszámok különleges tulajdonsága a vágási pont vágóél mögötti elhelyezése. A vágóél extrém éles és stabil, így az anyag deformálódása és a hőterhelés minimalizálható. A gyártó leírása szerint a FRAISA MicroHX gömbvégű marókkal a 60 HRC-nél keményebb alapanyagok is nagyon gazdaságosan, hatékonyan és pontosan megmunkálhatók.

A szerszám bevonata TiAlN [106]

#### 4.4 Alkalmazott mérőeszközök bemutatása

A szerszámok és a munkadarab mikroszkópos elemzéséhez a Pannon Egyetem zalaegerszegi telephelyén található Zeiss Discovery V8 típusú mikroszkóp került felhasználásra (4.5-ös ábra). A gyártás során minden 5. zseb megmunkálása után lett beiktatva egy mérési ellenőrzési pontot. Ezt azt jelentette, hogy a szerszámot ki kellett venni a főorsóból, megvizsgálni a mikroszkópon, majd a lehető legpontosabban visszahelyezni a főorsóba.



4.5. ábra: Vizsgálathoz használt Zeiss mikroszkópi

*Berendezés műszaki paramétereit:*

- *Gép típus: Zeiss Discovery V8*
- *Maximális nagyítás: 8.0x*
- *Optikai zoom: 12.5:1*
- *Szobahőmérséklet vizsgálat során: 24 °C*

A keménység mérésekhez használt Vickers keménységmérő (4.6-os ábra) berendezés a Pannon Egyetem Veszprémi telephelyén található. A berendezéssel a kerámia alapanyagok keménységét vizsgáltam.



4.6. ábra: Méréshez használt Vickers keménységmérő

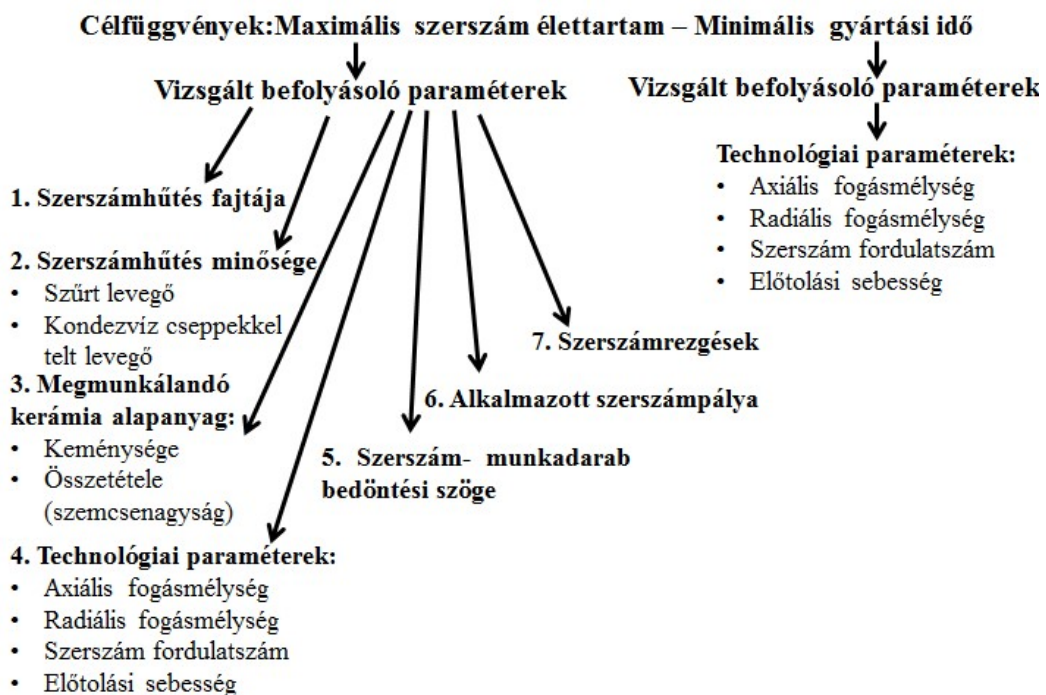
*Berendezés műszaki paramétereit:*

- *Gép típus: Buehler Wilson 432 SVD*
- *Terhelési tartomány: 0.3kgf-30kgf*
- *Szobahőmérséklet vizsgálat során: 24 °C*

## 5 Elvégzett kísérletek bemutatása

Ahhoz, hogy teljes képet lehessen kapni a szerszám élettartamát, és a gyártási időt befolyásoló tényezőkről, valamint azok hatásairól, a kísérleteket úgy kellett felépíteni, hogy a sok változó lehető legtöbb kombinációja figyelembe vehető legyen úgy, hogy a szükséges kísérletek száma ne legyen irreálisan nagy, ismerve hogy vannak további kísérlettervezési technikák is, amelyek viszont lényegesen nagyobb mérésszámot igényelnek [107].

Első lépésben felmértem azokat a hatásokat, amelyek a szakirodalom alapján befolyásolják a szerszám élettartamot, és a gyártási időt is (5.1-es ábra). Ezek a hatások, és optimális értékeik nemcsak a kutatásaim során fontosak, hanem ugyanilyen lényegesek az ipari gyakorlatban is [108] [109] [110]. Ezeket a hatásokat az 5.1. ábrán összefoglaltam össze. A kutatás a következő célok köré épült: A lehető legtöbb zseb elkészítése 1 szerszámmal. A másik fontos cél, az 1 zseb lehető leggyorsabb megmunkálásának megvalósítása.



5.1. ábra: Szerszám élettartamot, és gyártási időt befolyásoló tényezők

A következő fejezetek az irodalomban feltárt forgácsolási paramétereket és választásukat ismertetik.

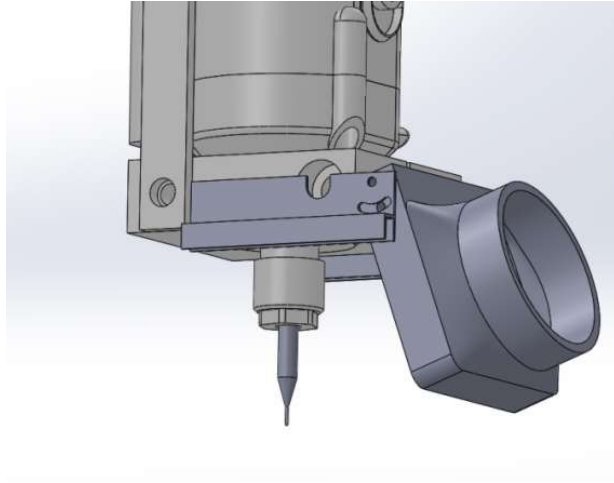
## 5.1 Szerszámhűtés

A tesztek kezdeti fázisában tapasztalható volt, hogy a kerámia megmunkálása során keletkező (kerámia)por komoly gondokat okoz a kísérletek kimenetelénél és a megmunkálási folyamatban. A keletkezett por a munkatérből, és a levegőből való eltávolítása több szempontból is fontos része a folyamatnak. Egyrészt minimalizálni kell a levegőbe jutó por mennyiségét, amit belélegezve az egészségre káros lehet. Technológiai szempontból az apró szemcsék abrazív hatása miatt felgyorsul a szerszámkopás, így célszerűbb minél gyorsabban elszívni a munkatérből. Az elszívás hatékonysága az elszívófej áramlástanai vizsgálatával a jövőben még tovább optimalizálható. Ezzel kapcsolatban végeztek kutatásokat Csanády és munkatársai [111], akik a kísérleteik alapján arra jutottak, hogy a magasabb szabadságfokkal rendelkező gépeken épp a szerszám bonyolultabb mozgási lehetősége miatt nagyobb elszívófej légteret kell kialakítani.

A szakirodalmi kutatások alapján az első verziós elszívó az 5.2-5.3-as ábrákon látható módon alakítottam ki. Az oldalán keféket lettek rögzítve a munkatér minél jobb elszigetelése miatt. Az elszívás mellett fontos a szerszám megfelelő hűtése is [112]. A szerszámhűtés egy Einhell TE-AC 270/50/10 típusú légbefúvó kompresszorral lett megoldva.

*Berendezés műszaki paraméterei:*

- *Tartály térfogata: 50l*
- *Maximális levegőnyomás: 10 bar*
- *Maximális teljesítmény: 1800W*



5.2. ábra: Első verziós por elszívó egység



5.3. ábra: Kiepipített hűtő/ elszívó egység

A kísérletek során tapasztalható volt, hogy ezzel a módszerrel nem elég hatékony a hűtés - elszívási folyamat, mert a szerszám 3-4 zseb gyártása után használhatatlanná vált. A gyors szerszám elhasználódás oka, hogy a munkatérben jelentős mennyiségű por alakú



forgács gyűlt össze. Az keletkező por összetapadva a kompresszorban lecsapódott kondenzvízzel, ragacsos elegyet képezett. Ez az elegy eltömítve a szerszám forgácskihordó hornyait, rontotta a megmunkálási körülményeket, aminek eredményeként szerszámtörés következett be (5.4. ábra).



5.4. ábra: Szerszámon tapadt forgács

A tapasztalt hibák miatt újra kellett gondolnom az egész hűtési módszer. A kompresszor, és a hűtőcső közé egy kondenzvíz leválasztó egységet építettem be, továbbá az elszívófej bemeneti nyílásának átmérőjét kisebbre vettem a por elszívás jobb hatékonysága érdekében.



5.5. ábra: Módosított elszívó-hűtő egység

A módosított konstrukcióval (5.5-ös ábra) a kerámia por szerszámra történő feltapadását sikerült minimalizálnom, aminek eredményeként a forgácskihordó horony nem tömődött el, így az idő előtti szerszámkopást, és szerszám-törést sikerült megszüntetnem. A szerszám élettartam csak az elszívó rendszer módosításával négy-öttszörösére nőtt.

## 5.2 Kerámia alapanyag vizsgálata

A kísérletekhez az adott ipari alkalmazásban bevonat anyagával megegyező kerámia anyag lett használva, ez végig azonos volt. A bevonat egy speciális oxidkerámia, ami több rétegből épül fel [113]. A hordozófém egy 140x40x8 mm-es keményfém lap. A kísérletek ismételhetőségének biztosítása érdekében fontos megbizonyosodni arról, hogy a keménység érték minden esetben egy bizonyos határon belül mozog. Így egy Vickers keménységmérővel ellenőriztem az egyes teszt-darabok.

### Keménységmérés eredményeinek kiértékelése

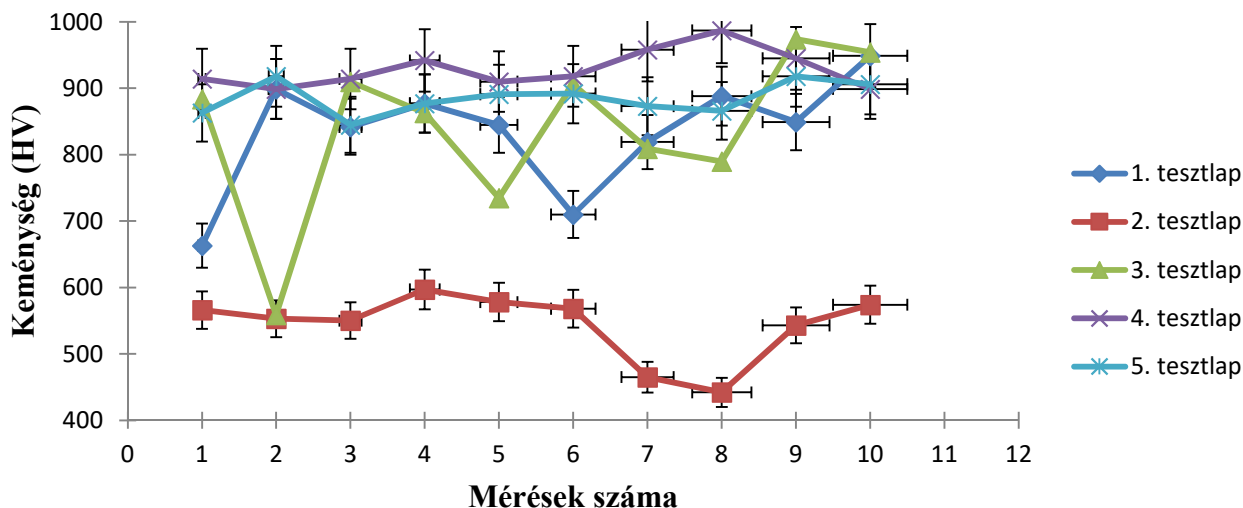
A vizsgálat során, egy teszt-lapon 10 mérési pontban lettek a keménységi adatok rögzítve. Ahhoz, hogy a teszt-darabok keménységét a méréstechnikában szokásos módon lehessen megadni, ki lett számolva a mérési pontokban kapott keménység értékek alapján az adott mintadarabra átlagos keménysége, valamint a mérési eredmények tapasztalati szórása (2-3. táblázat).

1. tesztlap	2. tesztlap	3. tesztlap	4. tesztlap	5. tesztlap
834 HV	543 HV	838 HV	928 HV	884 HV

2. táblázat: Mérési eredmények átlaga az egyes kerámia lapokon

1. tesztlap	2. tesztlap	3. tesztlap	4. tesztlap	5. tesztlap
86 HV	50 HV	122 HV	28 HV	24 HV

3. táblázat: Mérési eredmények korigált tapasztalati szórás értékei az egyes kerámia lapokon



5.6. ábra: Keménység terjedelemei az egyes kerámia lapokon

A mérési adatok feldolgozása (5.6. ábra) azt mutatta, hogy a vizsgált 5 lap átlagos keménysége 871HV. Ettől átlagban kb. 20-30 HV eltérést tapasztaltam az egyes lapok esetén. A kísérletek a 1, 4. és 5. lapokon kerültek elvégzésre.

Az átlagtól kiugró eltérést a 2. mintalap keménysége mutatott, ami közel 38 százalékkal tér el az átlagos keménységtől.

### 5.3 Teljes faktoros kísérletterv

A szakirodalmi áttekintésből látható, hogy a kerámia megmunkálása egy igen összetett folyamat, és még számos megválaszolatlan kérdés áll nyitva e területen. A szerszám élettartam és a gyártási idő mellett fontos még a gyártott zsebek minősége (repedések a kerámia anyagon, kipattogzás) is, ez jól tükrözi a folyamat bonyolultságát. A megoldandó feladat ezek alapján a folyamatra hatást gyakorló mechanizmusok feltárása, valamint annak mértékének meghatározása, hogy a változók milyen mértékben befolyásolják a kimeneti paramétereket (gyártási idő, szerszám élettartam).

#### 5.3.1 Beállítási paraméterek meghatározása

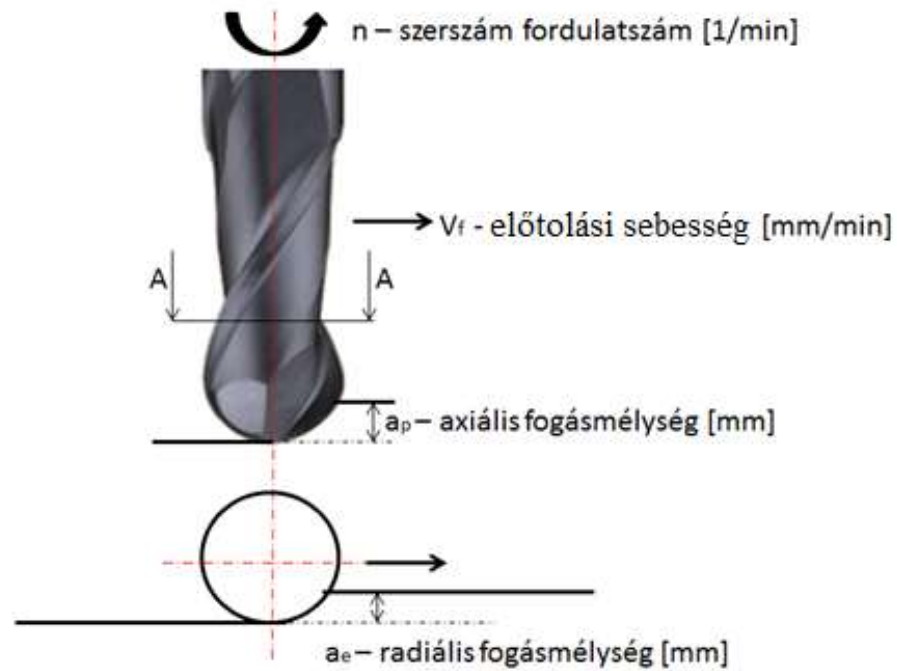
A kísérlettervezésben az optimalizálni kívánt folyamatot befolyásoló tényezőket, paramétereket **faktoroknak**, míg a hozzájuk kapcsolható beállítási értékeket **szinteknek** nevezzük. A forgácsolási folyamatot befolyásoló változók (mind a marás technológiai oldaláról, mind a szerszám gép oldaláról) közül 4 változót (*axiális fogásmélység, radiális fogásmélység, előtolási sebesség, fordulatszám*) jelöltem ki, a kísérlettervvel történő vizsgálat céljára. Ez a 4 változó a kísérletterv 4 faktora. Az irodalmi áttekintés alátámasztja, hogy ezek a faktorok befolyásolják döntő módon mind a szerszám élettartamot, mind a gyártási időt [10] [114] és egyúttal ezek a gyakorlati szempontból

beállítható gépi paraméterek. A szintek azon faktorértékek, amiket kipróbálunk a kísérlet során. Minél nagyobb ez a szám, annál pontosabb a faktorok közötti kapcsolat leírása, viszont a kísérletek költsége is emelkedik. Saját kísérleteimnél a költség egy nagyon fontos behatároló tényező (szerszám költség, alapanyag költség), így feltételezve a változók közötti lineáris kapcsolatot 2 szinten határoztam meg a kísérletet, így  $2^4$ , tehát 16 összefüggést lehet elemezni. Továbbá a centrum értékeknél, a beállítások középértékeinél is elvégeztem 3 kísérletet.

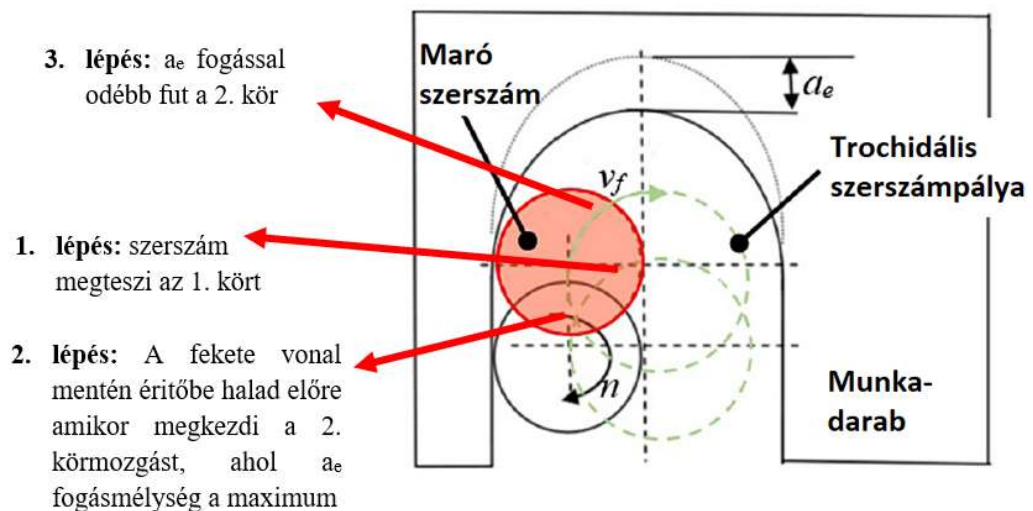
Ezen vizsgálat során szerszám és a munkadarab dőlési szöge  $90^\circ$ -os, vagyis a szerszám szimmetriatengelye merőleges a megmunkált munkadarab síkjára (5.7-es ábra). A lineáris kísérletterv megvalósítása során ciklois szerszám-pálya stratégiát alkalmaztam (5.8-as ábra), mivel az alkalmazott szerszám-gép mechanikáját figyelembe véve, ez volt a legstabilabb szerszám-pálya a rendelkezésre álló nagy sebességű marási stratégiák (HSM) [115] közül. A szerszám-pálya generáló programok közül az EDGE CAM szoftverre esett a választás a könnyű kezelhetősége, és a sokféle alkalmazható pályastratégia miatt [68]. A szoftver forgalmazója, az Enterprise Group az innovatív informatikai és infokommunikációs szolgáltatások és megoldások egyik vezető hazai rendszerintegrátora.

*Beállított jellemzők:*

- *Axiális fogásmélység*  $(a_p)$   $[mm]$
- *Radiális fogásmélység*  $(a_e)$   $[mm]$
- *Fordulatszám*  $(n)$   $[1/min]$
- *Előtolási sebesség*  $(v_f)$   $[mm/min]$ , valamint az *abból* származtatható  $f_z$   $[mm/fog]$  - fogankénti előtolás



5.7. ábra: Vizsgált technológiai paraméterek- Standard változók



5.8. ábra: Vizsgált technológiai paraméterek- Trochidális (ciklois) szerszám-pálya működése

A beállított paraméterek határait a 4-es táblázat tartalmazza. A határok alsó korlátozó tényezője egyrészt a gyártási idő volt (nagy gyártási idő= gazdaságtalan megmunkálás), másrészt a megmunkálás kivitelezhetősége. A felső korlátozó paraméterek megválasztásánál részben a gyakorlati tapasztalatok, részben az irodalmi ajánlások lettek figyelembe véve (2.4.7. fejezet). Az axiális és radiális fogásmélység 0,05 és 0,3 [mm] között lett meghatározva. Itt a szakirodalmat (lásd: 2.4.7 fejezet), valamint az ipari tapasztalatokat vettem alapul. A fordulatszámot 10000 és 25000 [1/min], az előtolási sebességet 300-650 [mm/min] értékre lett állítva. Itt szintén a szakirodalmat,

valamint a gépünk irányváltási sebesség korlátait vettem figyelembe. A szerszám élettartam felső korlátjának a szerszám végső elhasználódását választottam (túlkopás esetén = szerszám rezgésekből adódó u.n. „síró” hangja, vagy szerszám törés).

	<b>a<sub>p</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>a<sub>e</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>n</b> <b>[1/min]</b>	<b>v<sub>f</sub></b> <b>[mm/min]</b>
<b>Alsó szint (-)</b>	0.05	0.05	10000	300
<b>Felső szint (+)</b>	0.3	0.3	25000	650
<b>Középérték</b>	0.175	0.175	17500	475

4. táblázat: Kísérlettervezés során beállított paraméterek

A teljes faktoros kísérlettervénél alkalmazott faktorokból a következő, a gyártástechnológiában használandó paraméterek számolhatók ki:

- A 2.1-es összefüggés alapján az effektív forgácsolási sebesség minimális értéke 31.4 [m/min], míg a maximális értéke maximális értéke: 78.5 [m/min]
- A 2.2-es összefüggés alapján a minimális fogankénti előtolás 6 [μm/fog], és a maximális fogankénti előtolás 30 [μm/fog].

A mikrométer nagyságrendű fogankénti előtolás miatt itt már befolyásoló hatása van az olyan nem figyelembe vehető jelenségeknek is mint például a kerámia anyag szemcsenagysága (AlO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> átlagos szemcseméret 1-1.5μm [116] [117]), illetve a szemcsék orientációja. Ez a hatás **főleg** azoknál a beállításoknál érvényesül, ahol az alkalmazott foganként előtolás értéke 6 [μm/fog], de egyben a teljes technológiai paramétertartományra is érvényes (6-30 [μm/fog]).

A kísérlettervben definiált tartományok első közelítésben meghatározzák azt az paraméterteret, ami megbízható megközelítésben leírja a paraméterek és a gyártható zsebek számát (későbbiekben szerszám élettartamként hivatkozok rá), valamint a gyártási idő közötti kapcsolatot. A kísérletterv a széles körűen elterjedt teljes faktoros kísérlettervezési módszer alapján készült el. A kísérleti paramétereit és az eredményeket az 5. táblázat foglalja össze.

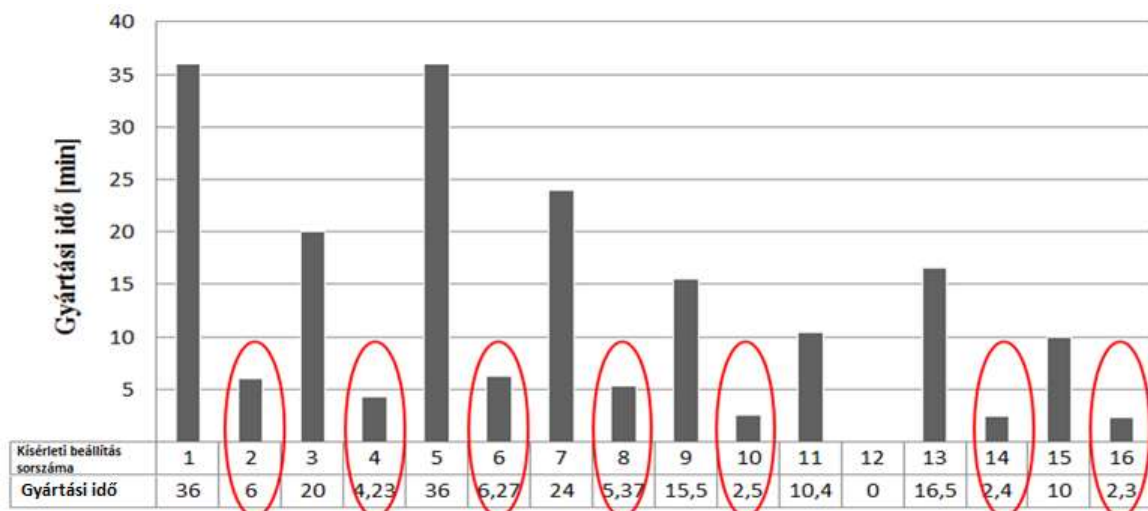
Sorszám	Axiális fogásmélység: $a_p$ (mm)	Radiális fogásmélység: $a_e$ (mm)	Fordulatszám: $n$ (1/min)	Előtolási sebesség: $v_f$ (mm/min)	1 zseb gyártási ideje (min)	Szerszám élettartam (db)
1	0,05	0,05	10000	300	36	15
2	0,3	0,05	10000	300	6	6
3	0,05	0,3	10000	300	20	8
4	0,3	0,3	10000	300	4,23	2
5	0,05	0,05	25000	300	36	10
6	0,3	0,05	25000	300	6,27	24
7	0,05	0,3	25000	300	24	16
8	0,3	0,3	25000	300	5,37	26
9	0,05	0,05	10000	650	15,5	8
10	0,3	0,05	10000	650	2,5	4
11	0,05	0,3	10000	650	10,4	4
12	0,3	0,3	10000	650	0	0
13	0,05	0,05	25000	650	16,5	10
14	0,3	0,05	25000	650	2,4	20
15	0,05	0,3	25000	650	10	10
16	0,3	0,3	25000	650	2,3	3
(Centrum1)	0,18	0,18	19000	450	6	7
(Centrum2)	0,18	0,18	19000	450	6	7
(Centrum3)	0,18	0,18	19000	450	6	6

5. táblázat: Tervezett beállítások és eredményei

A szerszám elhasználódását a laboratóriumi lehetőségekhez képest viszonylag szerényebb módszerekkel lehet követni ipari körülmények között. Vizsgálati megoldás lehet a forgácsolás során fellépő zajspektrum változásának vizsgálata, a munkadarabok méretcsökkenése, a gép teljesítményfelvételének változása stb. Figyelembe véve az ipari lehetőségeket, valamint a rendelkezésemre álló eszközparkot, a szerszám túlkopási fázisba történő átlépését, és ezzel egyúttal az adott kísérlet végét, a szerszám elhasználódását a forgácsolás során fellépő ún. „síró hang” fellépésének alapján határoztam meg. A szerszám erős elhasználódása során ugyanis az élgeometria teljes mértékben elkopik, így már a hagyományos értelemben vett forgácsleválasztás nem áll fent. Helyette abrazív anyagleválasztás történik, ahol jellegzetes hangot ad ki a szerszám. Így a szerszám élettartam meghatározásához itt elegendő volt a szubjektív megfigyelés [119] [120]. A szerszám élettartamot a legyártható zsebek darabszámában adom meg.

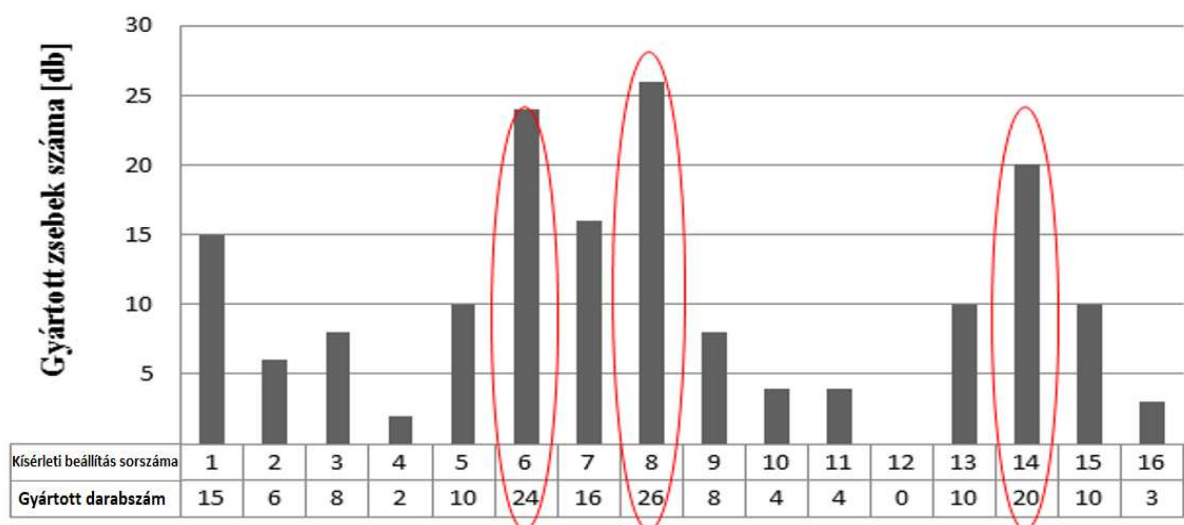
A másik vizsgált jellemző a gyártási idő volt. A szerszámki költség csökkentése mellett ugyanolyan fontos a minél rövidebb gyártási ciklusidő biztosítása is. Az 1 zseb gyártási ideje tartalmazza a mellékidőket is (nem forgácsolással töltött mozgások). A mellékidők részletes vizsgálata, és annak optimalizálása nem része a dolgozatnak.

A kiértékelések az 5.8-as. és az 5.9-es ábrákon kerültek összefoglalásra. Az 5.8-as. ábra a lehető legrövidebb gyártási idők, míg az 5.9-es ábra a legtöbb zseb legyártásához tartozó beállítás lett kiemelve.



5.9. ábra: Gyártási idő az adott beállítás mellett

Az 5.9-es ábrán a vízszintes tengelyen a kísérletterv adott sorszáma szerepel, valamint a hozzá tartozó számszerűsített gyártási idő, míg a függőleges tengelyen az adott kísérlethez tartozó időszükséglet oszlop-szerűen megjelenítve. A gyártási idő szempontjából a 2,4,6,8,10,14,16-os beállítások adták a legjobb eredményeket, a 12-es beállítás adta a legrosszabb eredményt. Itt a szerszámnál az első zseb gyártásának a végén törés következett be.



5.10. ábra: Szerszám élettartam darabszámban definiálva

Az 5.10-es ábrán a vízszintes tengelyen a beállítási sorrend van jelölve, valamint a beállításhoz tartozó konkrét gyártott zsebszám, míg a függőleges tengelyen az adott beállítással legyártott zsebek számát tüntettem fel oszlopdiagramon. A szerszám élettartam szempontjából 6,8,14-es beállítások adták a legjobb eredményeket.

*Látható, hogy a két jó halmazban a 6, 8, 14-es beállítások jelentik a közös metszetet.*



### 5.3.2 A kísérletterv kiértékelése analitikus módszerrel

A kiértékelésnél az összetett változókat, mint az előtolási sebességet, felbontom elméleti összetevőkre, és úgy vizsgálom a szerszám élettartamra gyakorolt hatását.

A termelés szempontjából a forgácsolási folyamat 3 fő kimenetre bontható:

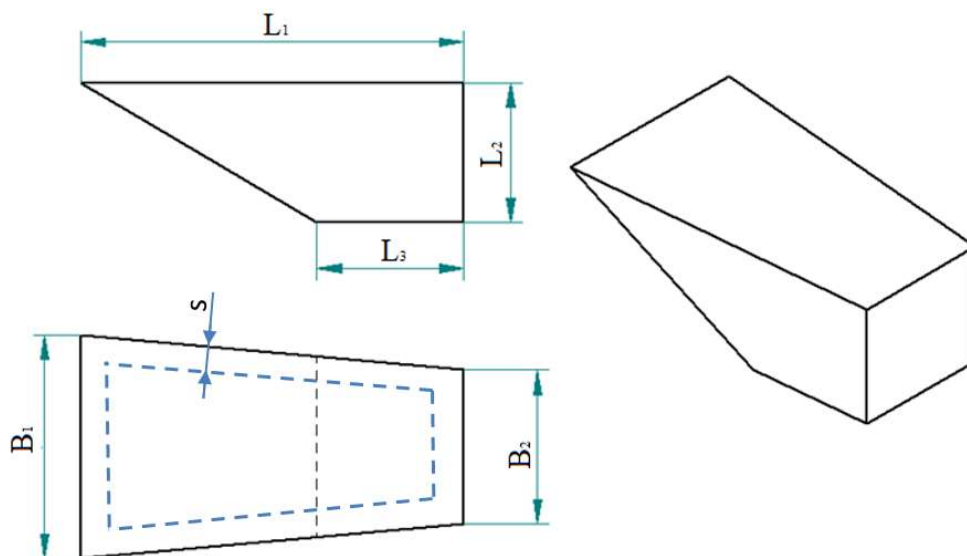
- *tiszta forgácsolási időre,*
- *szerszám élettartam (percben kifejezett értékére)*
- *elérhető felületi minőség*

A forgácsolási idő a forgácsolás úthosszától, és az előtolási sebességtől függ. A forgácsolási út hossza az alkalmazott szerszám pálya alakjától, a radiális fogásmélységtől, és az axiális fogásmélységtől függ.

A szerszám élettartamát a fordulatszám, a fogankénti előtolás nagysága befolyásolja dominánsan. *Az elérhető felületi minőséggel és a felületi érdességet befolyásoló hatásokkal a dolgozatban nem foglalkozom, mivel a kutatásomnál a szerszám élettartamra fókuszáltam. A felületi érdesség kérdése további kutatásokban vizsgálható.*

#### 5.3.2.1 Tiszta forgácsolási idő

A számítások során az összetett szerszám pálya mozgások egyenes vonalú függőleges és vízszintes mozgásokkal lettek egyszerűsítve. A zseb keresztmetszete egy egyenlő szárú trapéz. A lejtős fenék miatt az egyes marási régiók hossza rövidül.



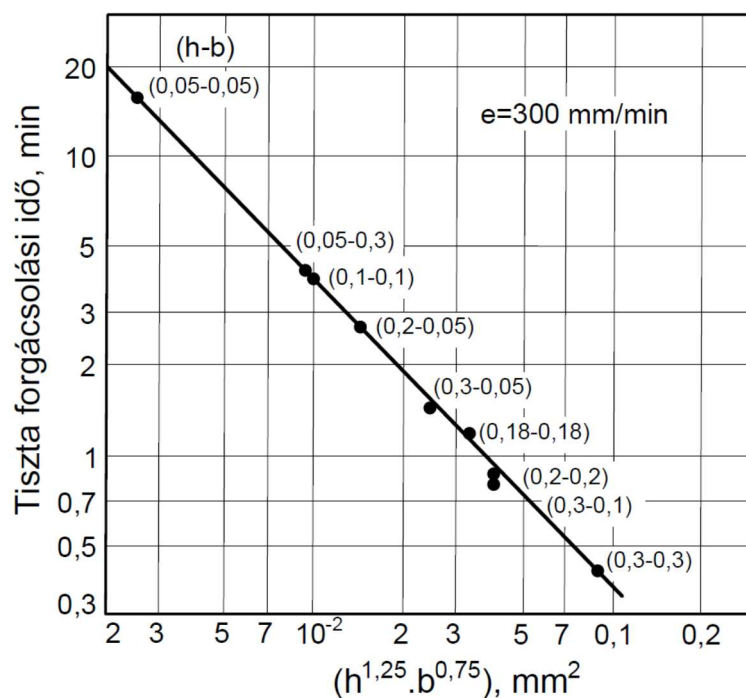
5.11. ábra: A gyártási idő számítása során figyelembe vett elméleti zsebméret, a szerszámsugár okozta rádiusz elhanyagolásával

$$T_1 = \frac{2 \cdot (L_1 - s) + (B_K - s) + [(B_K - 2s) / [b \cdot (L_1 - s)]]}{v_f} \quad (5.2)$$

Ahol:

- $T_1$ : Egy zseb megmunkálási ideje a zseb geometria alapján
- $B_K$ : közepes szélességet jelöli az első marási rétegben ( $B_1$ - legnagyobb szélesség,  $B_2$ - legkisebb szélesség (5.11-es ábra)). Az első marási rétegre 2,7mm
- $L_1$ : Zseb hossza
- $s$ : a szerszám effektív átmérője az  $a_p$  axiális fogásmélység függvényében
- $b$ : radiális fogásmélység „ $a_e$ ”

A kiértékeléskor célszerű a fogásmélységek hatását a forgácskeresztmetszet alakjában figyelembe venni. A forgácskeresztmetszet egy folyamatosan változó érték, de a számítások során elegendő a  $(b \cdot h)(b \cdot h)$  szorzat alakjában közelíteni. Ahol a „ $b$ ” a radiális fogásmélység, a „ $h$ ” az axiális fogásmélység. A számítások, illetve a kísérleti eredmények is azt mutatták, hogy a  $(a_p:0.3-a_e:0.05)$  kombináció nem azonos az  $(a_p:0.05-a_e:0.3)$  kombinációval, bár a szorzatuk azonos. Ezért traszformációra van szükség. Emiatt a  $(b \cdot h)$  szorzat helyett  $(h^{n+1} \cdot b^{n-1})$  szorzatot használjuk, ahol az  $n$  kitevő 0 és 1 között változhat. Az  $n$  kitevő függhet a zseb méretétől, és alakjától. Itt fontos megjegyezni, hogy  $h=b$  esetén az  $n$  kitevő kiesik, tehát nem módosít. Ezért először az  $(a_p:0.3- a_e:0.3)$ ,  $(a_p:0.2- a_e:0.2)$ ,  $(a_p:0.05- a_e:0.05)$  kombinációkat számolom ki, és ezek az egyenes helyét a forgácsolási időre vonatkozó diagramban már meghatározzák. A  $h \neq b$  kombinációk azonban már nem a görbére esnek, csak akkor, ha a megfelelő „ $n$ ” kitevőt választjuk. Bármilyen „ $n$ ” kitevő a  $h=b$  eseteket nem módosítja!



5.12. ábra: A tiszta forgácsolási idő számított értékei az elméleti forgácskeresztmetszet függvényében,  $v_f=300$  [mm/min] esetén

A görbe (5.12-es ábra) iránytangense -1.06, vagyis nem sokban tér el a fordított arányosságtól, ezért az összefüggés egyenlete az alábbi formában adható meg (5.3-as összefüggés):

$$T_{\text{forg}} = \frac{8.3}{v_f} \cdot (h^{1.25} \cdot b^{0.75})^{-1.06} \quad (5.3)$$

Ahol:

- $T_{\text{forg}}$  - tiszta forgácsolási idő egy darab elkészítéséhez, a forgácsolási paraméterek függvényében
- $h$ - forgács vastagság
- $b$ - forgács szélesség
- $v_f$ - előtolási sebesség

Az egyenlet tetszőleges előtolási sebességre alkalmazható, így a 650 [mm/min]-re is.

### 5.3.2.2 A szerszám élettartama analitikus egyenletek alapján

Mivel kísérleti úton a maximális darabszám lett meghatározva a paraméterek függvényében, ezért a tiszta forgácsolási idő ismeretében a szerszám élettartam percben megadott értéke számítással határozható meg (6-7. táblázatok). Ez a pontosságot nem rontja, ugyanis kopás- elhasználódás csak forgácsolás közben történik. Az élettartamot ezek után a gyártott darabszám és a hozzá tartozó forgácsolási idő szorzata adja meg.

	n=10000 [1/min]			n=25000 [1/min]		
Axiális- Radiális fogásmélység ( $a_p$ - $a_e$ )-[mm]	Forgácsolási idő percben ( $T_{\text{forg}}$ )-[min]	Gyártott zseb darabszám (db)	Szerszám élettartam percben ( $T_{\text{él}}$ )-[min]	Forgácsolási idő perben ( $T_{\text{forg}}$ )	Gyártott zseb darabszám	Szerszám élettartam percben ( $T_{\text{él}}$ )
0.05-0.05	16	15	240	16	10	160
0.3-0.05	1.41	6	8.46	1.41	24	33.84
0.05-0.3	4.2	8	33.6	4.2	16	67.2
0.3-0.3	0.4	2	0.8	0.4	26	10.4
	$f_z=15\mu\text{m}$			$f_z=6\mu\text{m}$		

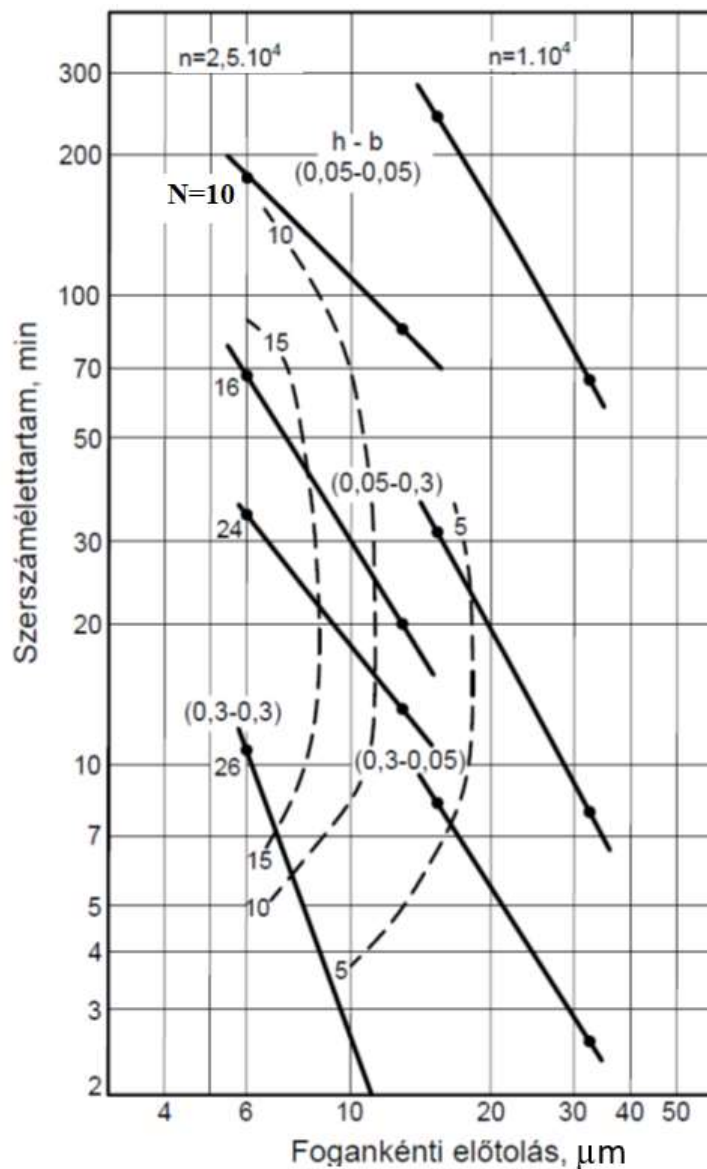
6. táblázat: Szerszámélettartam percben kifejezve  $v_f=300$ [mm/min] előtolás esetén

	n=10000 [1/min]			n=25000 [1/min]		
Axiális- Radiális fogásmélység ( $a_p$ - $a_e$ )-[mm]	Forgácsolási idő percben ( $T_{forg}$ )-[min]	Gyártott zseb darabszám (db)	Szerszám élettartam percben ( $T_{ét}$ )-[min]	Forgácsolási idő perben ( $T_{forg}$ )	Gyártott zseb darabszám	Szerszám élettartam percben ( $T_{ét}$ )
0.05-0.05	7.32	8	58.5	7.32	10	73.1
0.3-0.05	0,68	4	2.72	0.68	20	13.6
0.05-0.3	1.76	4	7	1.76	10	17.6
0.3-0.3	0.16	0	0	0.16	3	0.5
	$f_z=32.5\mu\text{m}$			$f_z=13\mu\text{m}$		

7. táblázat: Szerszámélettartam percben kifejezve  $v_f=650$ [mm/min] előtolás esetén

A következő lépés a szerszám élettartam időbeni értékének ábrázolás a fogankénti előtolás függvényében.

A 6. és 7. táblázatban összefoglalt értékek ábrázolásával az 5.13-as ábrán látható hatásdiagramot kapjuk, ami a kiszámított élettartamot különböző kombinációkra mutatja:



5.13. ábra: Szerszámélettartam görbéi az egy fogra jutó előtolás függvényében

Az 5.13-as ábrán a szerszám élettartam percben számított értékét ábrázoltam a hozzá tartozó fogankénti előtolás függvényében. Egy egyenes két pontja az adott axiális-radiális fogásmélység kombináció mellett a két különböző fogankénti előtolás hatásváltozását mutatja. Az 5.13-as ábrán jelöltem továbbá piros szaggatott vonalakkal a gyártható darabszámok állandó vonalait (kagylódiagram) tájékoztatás céljából. A mező függőlegesen nyújtott.

Kis fogásmélységnél (0.05-0.05) a fordulatszám csökkenése növeli az élettartamot, pl. 15 $\mu$ m fogankénti előtolás esetén:

$$T_{\text{él}} = \frac{90,4 \cdot 10^6}{v_c^{1,27}} \quad (5.4)$$

vagyis nagyjából a Taylor- egyenes szerint viselkedik.

Az 5.13-as ábra alapján a nagyobb fogásmélység kombinációkra a fordulatszám hatása csökken, és a használható kombinációkra, 0.3-0.3 és 0.3-0.05, hatása elhanyagolható (mivel a hatásvonalak párhuzamosak egymással). Az élettartam egyenlete ezekre a kombinációkra:

$$T_{\text{él}} = \frac{13.1}{(h^{1.25} \cdot b^{0.75})} \cdot f_z^{-1.53} \quad (5.5)$$

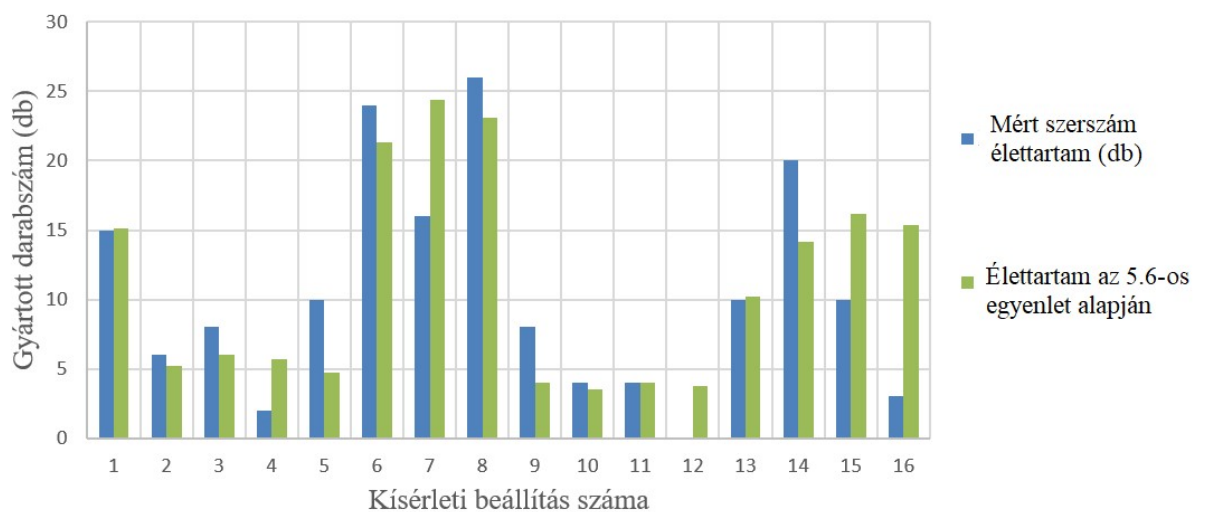
A fő változó az egy fogra jutó előtolás értéke. A mélység kombinációs szám a nevezőben biztosítja az egyenlet érvényességét a kombinációkra.

Az 5.13-as ábráról egyértelműen megállapítható, hogy a maximális darabszámot az  $f_z=6\mu\text{m}$ -es érték korlátozza. Mint mindig, ez is egy korlátozott maximum.

### 5.3.2.3 Gyártható darabszám analitikus egyenlet alapján

A gyártható darabszám az 5.6-os összefüggéssel adható meg:

$$N = \frac{T_{\text{él}}}{T_{\text{forg}}} = \frac{1.58 \cdot v_f \cdot (h^{1.25} \cdot b^{0.75})^{0.06}}{f_z^{1.53}} \quad (5.6)$$



5.14. ábra: Gyártható darabszámok kísérleti eredményeinek összehasonlításai az analitikus elemzés során kapott egyenletek eredményeivel

Az 5.14-es ábrán látható, hogy az 5.6-os egyenlettel elvégzett számításokkal kapott darabszámok jó közelítéssel lefedik a kísérletek során kapott értékeket. Pár esetben tapasztalható ugyan kisebb- nagyobb eltérés, de a kísérletek számának növelésével ez a különbség tovább csökkenthető.

## 5.4 A megmunkált zseb geometriák kiértékelése a függőleges szerszámmal történő megmunkálás esetén

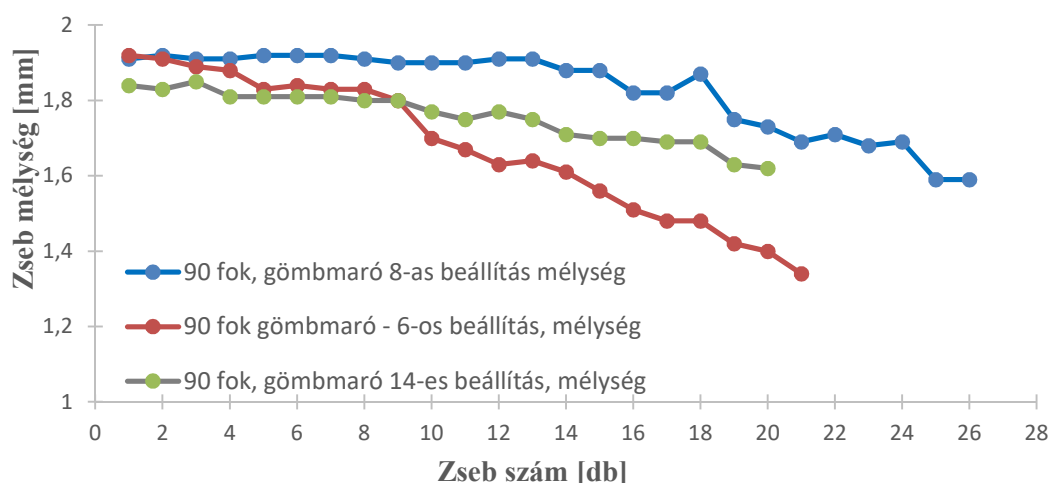
Ebben a fejezetben a kísérletterv során gyártott zsebek méretváltozását elemeztem ki. A vizsgálat célja, hogy indirekt módszerrel megvizsgáljam a zsebek méretváltozását, illetve, hogy ebből képet alkothassak a szerszám elhasználódásának menetére. A gyártott zsebek geometriai elemzését azoknál a beállításoknál elemeztem, ahol a legtöbb legyártott zseb darabszám volt, valamint az adott beállításnál a gyártási idő alacsony volt. Ezen kritériumoknak a 6-8-14-es számú paramétersorok feleltek meg (8. táblázat). A kiértékelés során a zsebek legnagyobb hossz, szélességi, és mélységi méreteit mértem.

A zseb névleges befoglaló méretei a következők voltak:

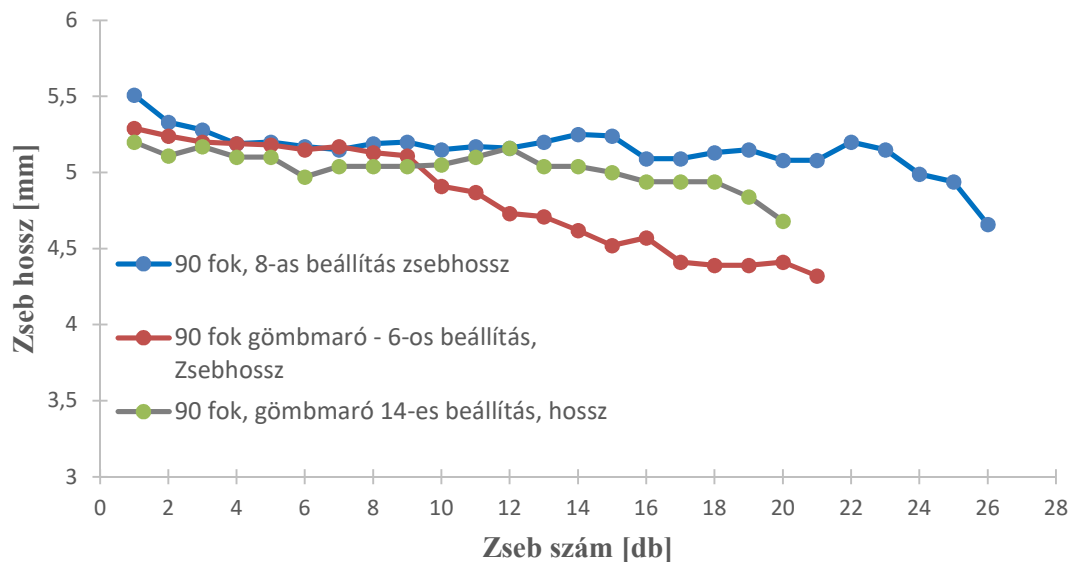
- Zseb legnagyobb szélessége: 3.2 mm
- Zseb teljes hossza: 5.5 mm
- Zseb mélysége: 2 mm

Kísérlet száma	Axiális fogásmélység [mm]	Radiális fogásmélység [mm]	Fordulatszám [1/min]	Előtolás érték [mm/min]
6-os beállítás	0.3	0.05	25000	300
8-as beállítás	0.3	0.3	25000	300
14-es beállítás	0.3	0.05	25000	600

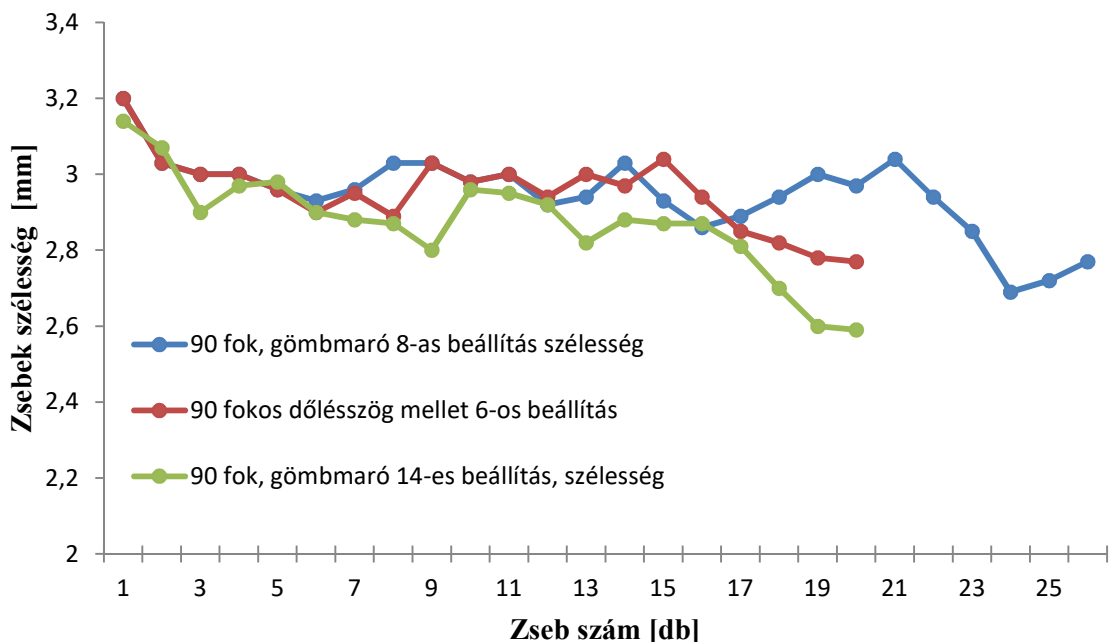
8. táblázat: A lineáris kísérletterv optimum értékei



5.15. ábra: Zsebek mélységének változása a legyártott darabszám függvényében



5.16. ábra: Zsebek hosszának változása a legyártott darabszám függvényében



5.17. ábra: Zsebek szélességének változása a legyártott darabszám függvényében

Az 5.15-5.17-es ábrákon látható, hogy a 8-as technológiai beállítás mellett tudtam a legtöbb zsebet gyártani. A 15. zsebig közel konstans a mélység értéke, majd onnantól kezdődően fokozatosan csökken. Ez a jelenség figyelhető meg az 5.16-os ábrán is. A zsebek szélessége már nagyobb szórást mutatott (5.17-es ábra). Itt a töréspont a 21. zsebnél figyelhető meg.

A 6-os beállításnál a zseb mélysége a 9. zsebig mutat minimális csökkenést (5.15-ös ábra), majd onnantól egy meredekebb csökkenés figyelhető meg. Ugyan ez figyelhető meg a zseb hosszánál is (5.16-os ábra). A szélesség változás itt is nagyobb szórást mutat, és a görbe töréspontja a 15. zsebnél figyelhető meg. A kis radiális fogásmélység miatt



kisebb a szerszám fogásvételi stabilitása, így a kis átmérő, és az ehhez tartozó nagy hossz miatt a szerszám rezgésbe jön, ami gyorsítja a szerszámkopást. Ez a jelenség gyorsítja a zsebek méretcsökkenését is.

A 14-es beállításnál a kapott eredmények a 6 és a 8-as beállításnál kapott görbék között szóródnak. A nagy sebesség nagy irányváltási gyorsulásokkal jár, ami miatt a léptetőmotorok lépést vesztek. Egy ilyen lépésvesztés miatt szerszámtörés következett be, így 20 zsebet sikerült legyártani. A 14-es beállításnál szükséges gyorsítási tartományban a léptetőmotor működése bizonytalanra vált, ezért ezt a beállítás kivettem.

*Az 5.15-5.17-es ábrákon bemutatott eredmények alapján a függőleges szerszámmal történő megmunkálás konklúziói a következők:*

- *A zsebek számát, hossz-mélység méretüket tekintve is a **8. beállítás mellett kaptam a legjobb eredményeket.***
- *A 14-es beállítás szintén ígéretes eredményt mutat, de a szerszámgép lépésvesztése miatt idő előtt törött a szerszám.*
- *A 3 beállítás közül a 6-os beállítás adta a legrosszabb eredményt*

A befoglaló méretek változása mellett azt is vizsgáltam, hogy az első zseb gyártása során kapott méretek mennyire térnek el a zseb névleges méreteitől. Erre azért van szükség, mert ahogy a mikro-megmunkálás fejezetben is bemutattam a kis szerszámátmérő és a relatíve hosszú dolgozó szár miatt a szerszám karcsú ( $l/d=6$ ), így a forgácsolási erők eredményeként a szerszám deformálódhat, tehát torzulhat a zsebek mérete.

A vizsgált beállításoknál a szerszám sértetlen volt az első zseb gyártása után, így biztosítva van, hogy a zsebek méretváltozását nem a szerszám kopása okozta. A szerszám bemérést 0,1 mm-es pontosságon belül tudtam elvégezni, így az ebből fakadó pontatlanság is 0,1mm-nél kisebb. A mérési eredményeket a 9. táblázat foglalja össze:

	Hosszúság (mm)	Hosszúság Eltérés (%)	Szélesség (mm)	Szélesség Eltérés (%)	Mélység (mm)	Mélység Eltérés (%)
<b>Elméleti érték:</b>	<b>5.5</b>		<b>3.2</b>		<b>2</b>	
<b>6-os beállítás</b>	5.29	4 (-)	3.2	0	1.92	4 (-)
<b>8-as beállítás</b>	5.51	0.18 (+)	3.2	0	1.91	4,5 (-)
<b>14-es beállítás</b>	5.2	5 (-)	3.14	1.9 (-)	1.84	8 (-)

9. táblázat: Zsebek mért geometriai jellemzőinek eltérése a várt értékektől- függőleges megmunkálás esetén

A 9. táblázat alapján látható, hogy a zsebek méret eltérései az elméleti paraméterektől maximum 4-4.5%-ban térnek el (6-8-as beállítások). Az eltérés oka lehet mérési bizonytalanság, a bemérés bizonytalansága (0.1mm-nél kisebb), illetve egyéb tényezők összessége. Mivel a folyamatra ható tényezők nem zárhatók ki teljesen, így az 5-os eltérést felső hibahatárnak határoztam meg.

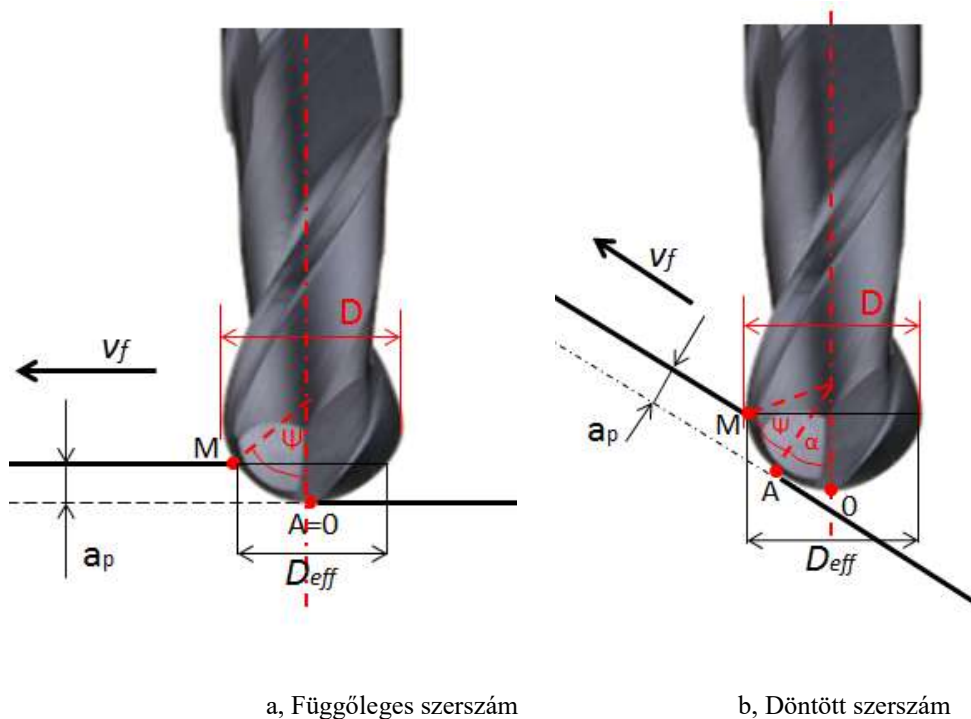
A legnagyobb eltérést a 14-es beállításnál tapasztaltam, ahol az elméleti mélységtől 8-ban tért el az elkészült zseb mélysége. A kis radiális fogás mélység miatt (0.05 mm) kisebb a szerszám stabilitása a 8-as beállításhoz képest, ahol 0.3mm ez az érték. Továbbá a 14-es beállításnál az előtolási sebesség duplája a másik 2 vizsgált beállításnak, így itt az előtoló erő is legalább a duplájára növekedett.

**Az adatok kiértékelése után a 14-es beállítást kivettem a vizsgált paraméterek közül. A döntött munkadarabbal végzett kísérleteknél, így a 6-os, 8-as technológiai beállításokat vizsgáltam tovább.**

## 5.5 Megmunkálás döntött munkadarab esetén

A merőleges szerszámmal történt megmunkálás azt az eredményt hozta, hogy a 6-8-as beállítások a legjobb kiinduló pontok a további kísérletekhez. Ezeknél a szerszám a munkadarabhoz képest 90°-ot zárt be. Mivel a megmunkálás gömbmaróval történik, így a technológiai paraméterek mellett egy másik fontos változó a szerszám dőlési szöge. (2.4.7. fejezet) Ennek oka, hogy gömbmaró esetén változik a forgácsolási sebesség a szerszám szimmetriatengely és a munkadarab síkja között bezárt szög függvényében.

Az 5.18-as ábrán látható, hogy a szerszám átmérőjéhez beállított forgácsolási sebesség az axiális fogásmélység nagyságának függvényében ugyan, de mindig csökkenő értéket mutat. A valós dolgozó átmérőhöz tartozó forgácsolási sebességet effektív forgácsolási sebességnek nevezzük. Adott fogásvétel esetén az effektív dolgozó átmérő növelhető a szerszám és munkadarab közti szög változtatásával.



a, Függőleges szerszám

b, Döntött szerszám

5.18. ábra: Effektív átmérő változása függőleges és döntött szerszámátmérő esetén

Az 5.18-as ábrán a gömbmaróval történő kinematikai viszonyokat ábrázoltam függőleges, és döntött szerszámos megmunkálás esetén. Ahol a paraméterek a következők:

- $a_p$ : axiális fogásmélység [mm]
- $D_{eff}$ : dolgozó átmérő [mm]
- $O$  pont: szerszám csúcsa, vágóél kezdőpontja
- $A$  pont: forgácsolásban részt vevő él kezdőpontja
- $M$  pont: forgácsolásban részt vevő él végpontja
- $V_f$ : előtolási sebesség [mm/min]
- $\alpha$ : szerszám bedöntési szög [°]
- $\Psi$  kapcsolási szög [°]

A bedöntés mértékének az alkalmazásoknál egyik korlátozó tényezője a megmunkálható geometriához történő hozzáférhetőség is.

### 5.5.1 Döntött munkadarabos kísérlet felépítése

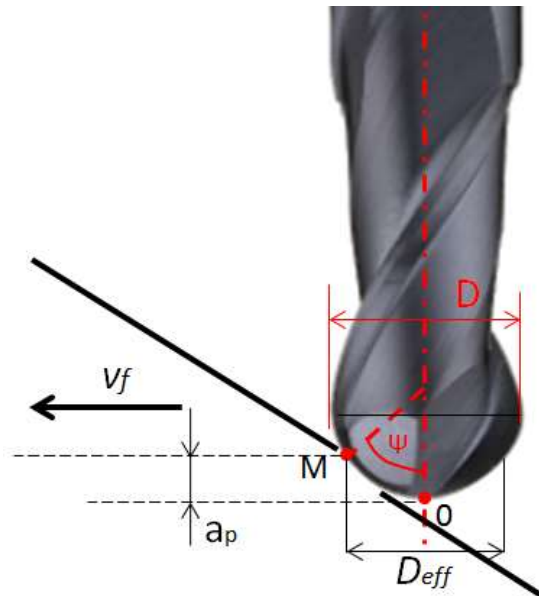
A munkadarab bedöntési megoldásának kidolgozás során legfontosabb szempont volt, hogy többféle bedöntési lehetőséget is biztosítson a készülék. Ehhez egy rendelkezésre álló forgó asztalt használtam fel, amihez egy munkadarab rögzítő készüléket terveztem, amelyet az AQ Anton Kft. gyártott le számomra.



5.19. ábra: Munkadarab bedöntésre alkalmas készülék modell, és ebben a környezetben futtatandó szerszám pálya

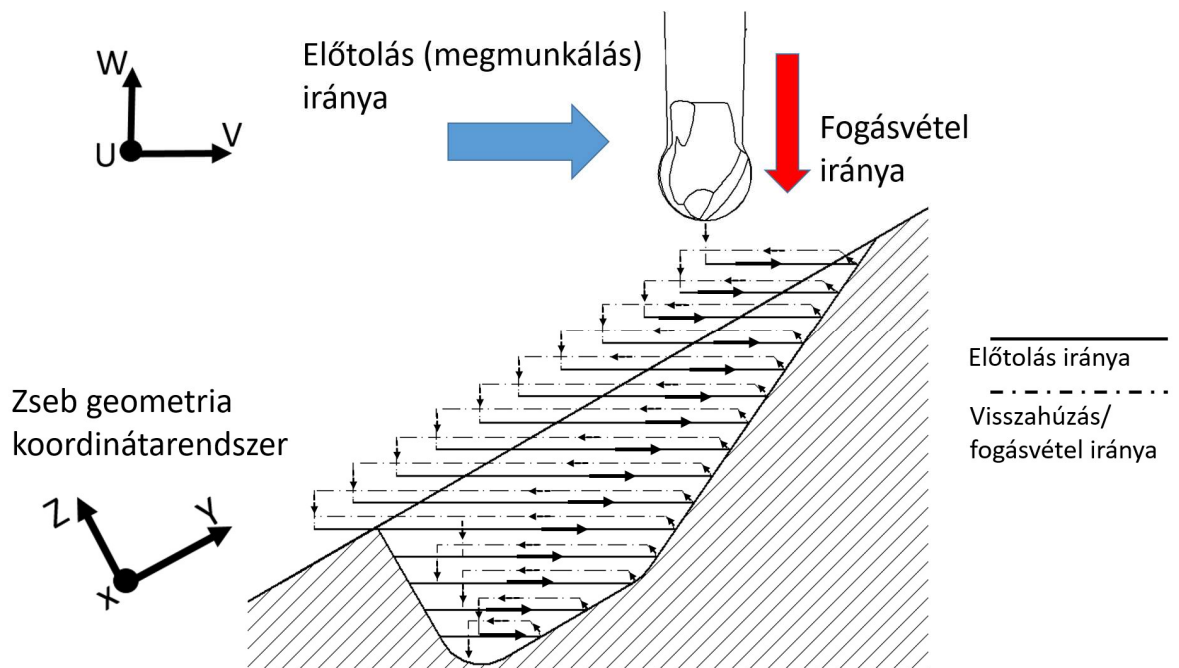
*A pályagenerálás során a következő feladatokat kellett megoldani:*

- *A generált pályáknak párhuzamosan kell futni a munkadarab irányával*
- *Megfelelő számú zseb pályájának generálása, nullponteltolások beállítása*
- *A kapott pályakódot alkalmassá tenni a Mach3 vezérlő számára*



5.20. ábra: Programmal generálható pálya iránya a munkadarabhoz képest

A pályagenerálás során felmerült az a probléma, hogy a CAM szoftver kontúrral párhuzamos zseb kibontási lehetőséget nem tartalmaz úgy, hogy egyidejűleg a ciklois pályakibontás is működjön. Emiatt a megnövekedett effektív átmérő nem biztosítható a teljes megmunkálás során (5.20-as ábra). A forgácsolási sebesség szempontjából ez hátrány, mivel változik a megmunkálás során, de így is előnyösebb a teljes függőleges megmunkáláshoz képest, mert a függőleges szerszámmal történő megmunkáláshoz képest sikerült azt az előnyt elérni, hogy nem kell minden fogásvételnél „Z” irányú anyagkibontást végezni, mivel a bedöntés eredményeképpen a zseb anyagának egy része kibontható „Z” irányú forgácsleválasztás nélkül is.



5.21. ábra: Szerszámpálya a megmunkálás során

Az 5.21-es ábra a zseb megmunkálásának metszetét mutatja. A zseb mért jellemzői ezek alapján a következők:

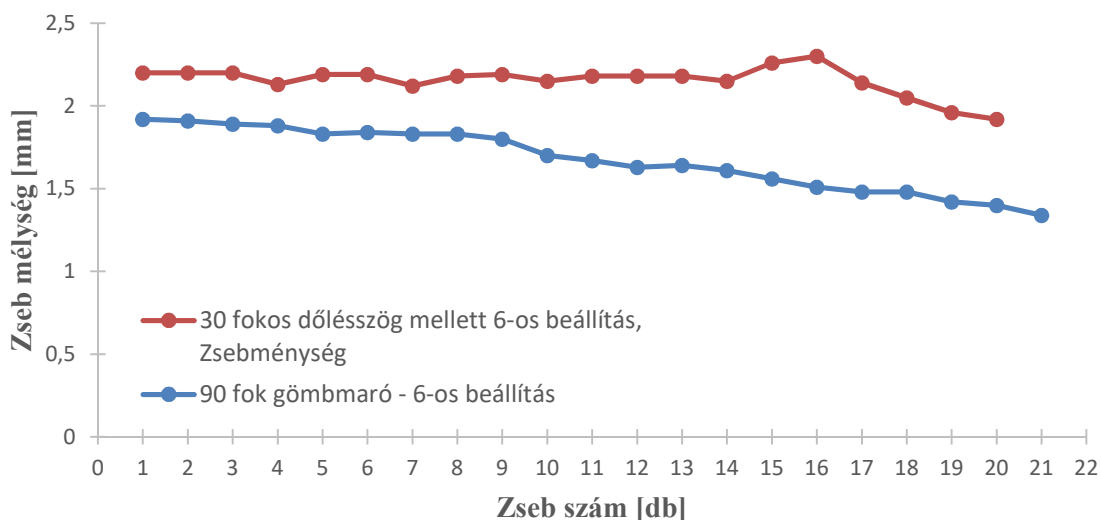
- *X tengely menti érték: Zseb szélessége*
- *Y tengely menti érték: Zseb hossza*
- *Z tengely menti érték: Zseb mélysége*

Az alkalmazott szerszám pálya 2.5D-s mozgást végez. A beállított axiális fogásmélység „W irányú mozgás” elérése után, az adott szintet (layert) „U”, és „V” tengely menti mozgásokkal bontja ki. A keresztél a zseb alsó negyedéig nincs fogásvétel irányú terhelésnek kitéve. Onnantól viszont a zseb geometriája miatt U-V-W mentén spirális pályát követve éri el a szerszám az adott mélységet.

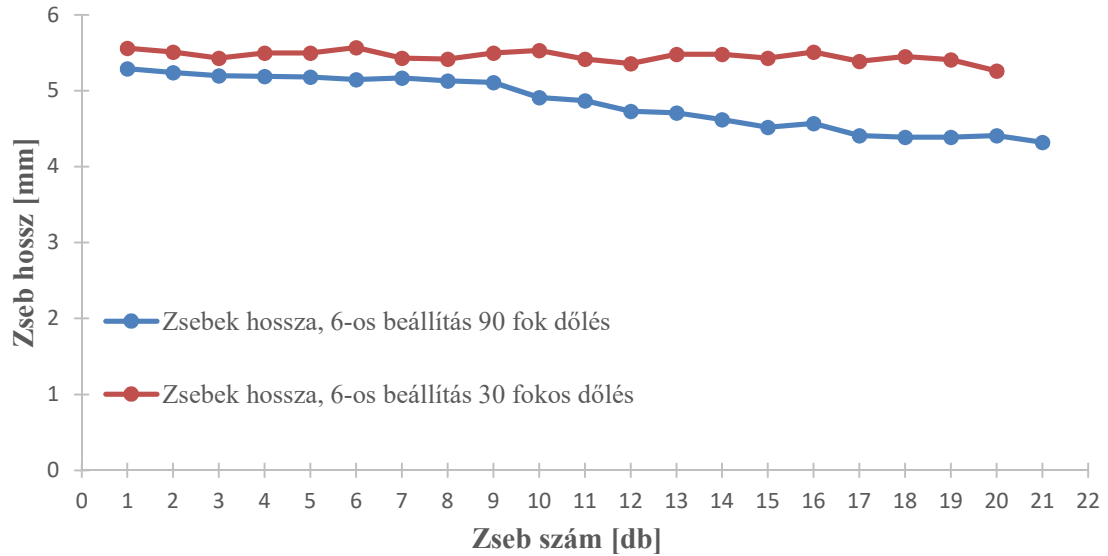
### 5.5.2 Zseb geometriájának összehasonlítása függőleges és döntött megmunkálás esetén

A kiértékelést 2 részre bontottam. Egyrészt kiértékeltem került a függőleges és döntött szerszámok közötti különbséget, majd egymással is összehasonlítottam a 3 döntött szerszám által készített zsebek geometriáit (5.22-5.27-es ábrák). Minden esetben a munkadarab 30°-os bedöntését alkalmaztam.

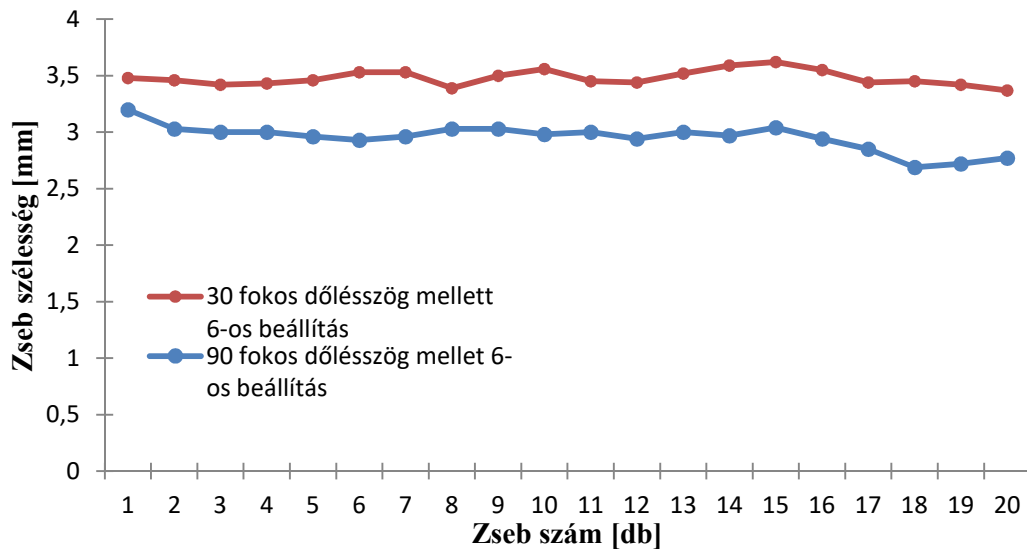
#### Zseb geometriájának változása 6-os technológiai beállítás mellett



5.22. ábra: Zseb mélységének változása 6-os technológiai beállítás mellett függőleges-döntött megmunkálás esetén



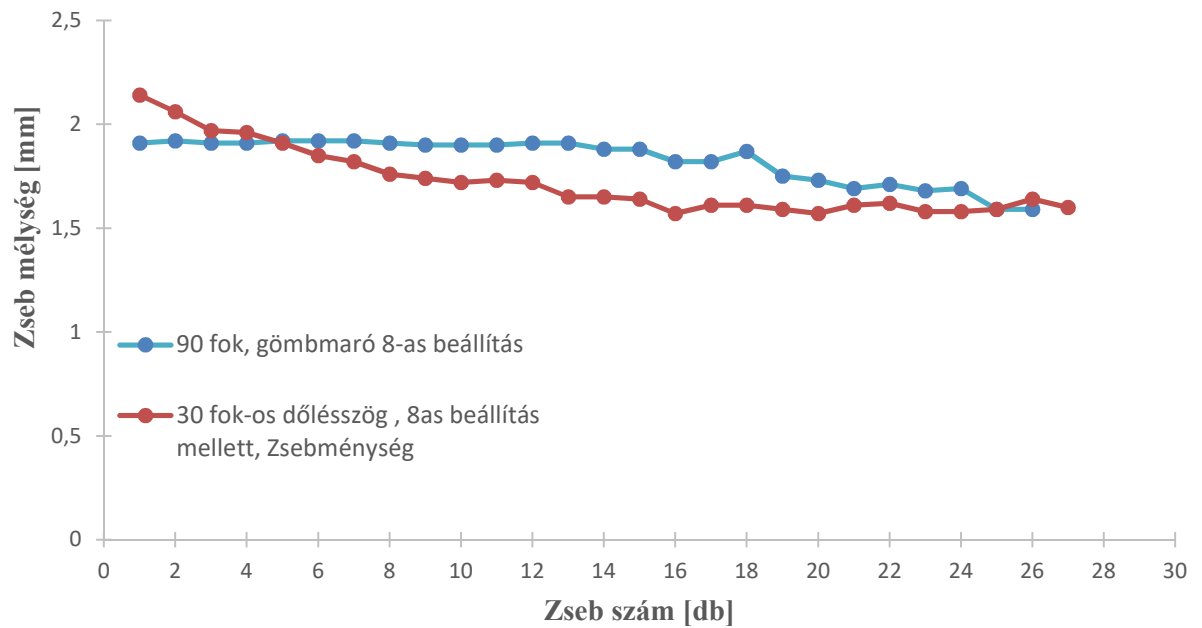
5.23. ábra: Zsebek hosszának változása 6-os technológiai beállítás mellett függőleges-döntött megmunkálás esetén



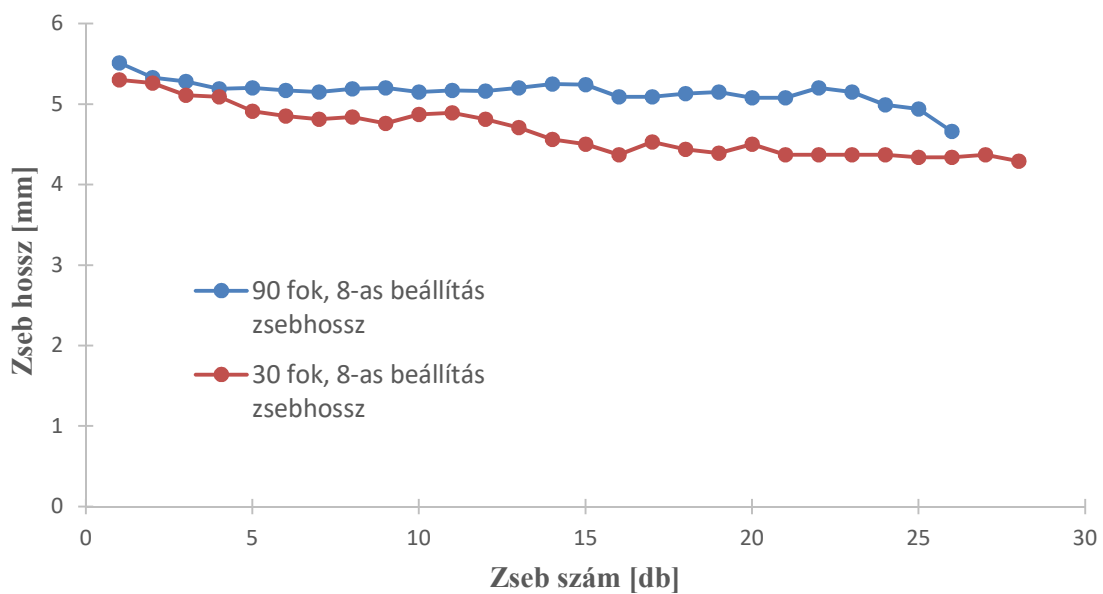
5.24. ábra: Zsebek szélességének változása 6-os technológiai beállítás mellett függőleges-döntött megmunkálás esetén

A 6-os technológiai beállításnál a döntött megmunkálásnál a zseb mind a három vizsgált geometriai paraméterénél az tapasztalható, hogy a zsebek méretcsökkenésének meredeksége kisebb, mint függőleges beállítás mellett. Továbbá összevetve a szerszám elhasználódást, a döntött szerszámok kísérletnél alkalmazott szerszám kopása jóval kisebb volt a függőleges megmunkálásnál alkalmazott szerszámhoz képest (5.5.4-es fejezet).

### Zseb geometriájának változása 8-as technológiai beállítás mellett

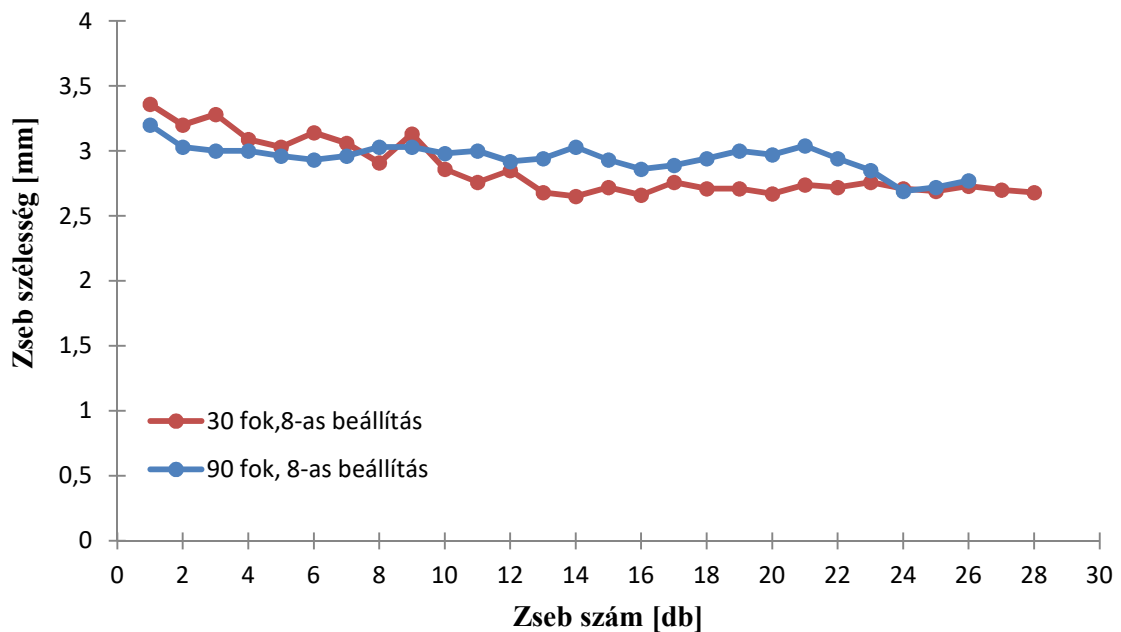


5.25. ábra: Zsebek mélységének változása 8-as technológiai beállítás mellett függőleges-döntött megmunkálás esetén



5.26. ábra: Zseb hosszának változása 8-as technológiai beállítás mellett függőleges-döntött megmunkálás esetén





5.27. ábra: Zseb szélességének változása a 8-as technológiai beállítás mellett függőleges-döntött megmunkálás esetén

A 8-es technológiai beállításnál jelentős eltérést nem tapasztaltam a függőleges és döntött elrendezéssel elkészített zsebek paramétereinek között. A 6-os beállításhoz hasonlóan összevetve a két kísérletben alkalmazott szerszámot, a döntött kísérletnél alkalmazott szerszám kopása jóval kisebb mértékű volt a függőleges beállítás során tapasztalt kopáshoz képest (5.5.4-es fejezet).

A 8-as beállítást összevetve a 6-os technológiai beállítással mind függőleges mind döntött szerszám esetén közel 23-al több zseb készíthető el a 8-as beállítás alkalmazásával.

A méretek változása, és a gyártott darabszám mellett itt is megvizsgáltam, hogy az első elkészült zseb után mekkora a különbség az elméleti, és a valós méretek között. Ezt a 10. táblázat foglalja össze:

	Hosszúság (mm)	Hosszúság Eltérés ( )	Szélesség (mm)	Szélesség Eltérés ( )	Mélység (mm)	Mélység Eltérés ( )
<b>Elméleti érték:</b>	<b>5.5</b>		<b>3,2</b>		<b>2</b>	
<b>6-os beállítás</b>	5.56	1.08 (+)	3,48	8.05 (+)	2,2	9.09 (+)
<b>8-as beállítás</b>	5.3	3.64 (-)	3,36	4.76 (+)	2,1	4.76 (+)

10. táblázat: Zseb mért geometriai jellemzőinek eltérése a várt értékektől- döntött megmunkálás esetén az első zseb megmunkálása után

A 6-os beállításnál látható, hogy az első gyártott zseb jellemző méretei 8-9-al eltérnek az elméleti értéktől pozitív irányba. Függőleges szerszám esetén ez az eltérés 4 körül mozgott. A pozitív irányú eltérés oka, hogy a kisebb szerszámstabilitás miatt

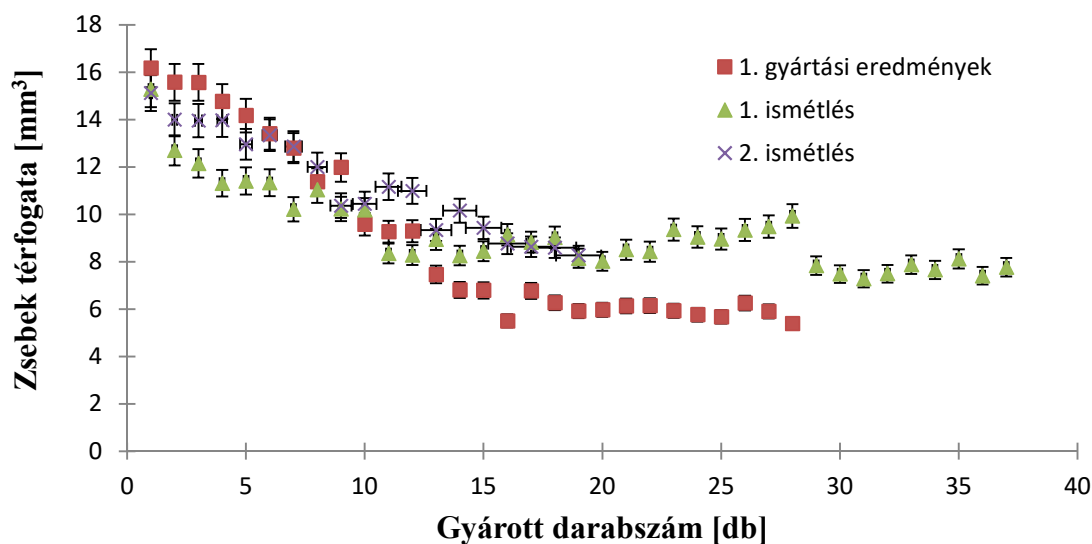
nagyobb volt a szerszámrezgés, aminek következtében nagyobbat harapott a szerszám. Így deformálódik a szerszám pálya is.

A 8-as beállításnál 3-4.5-os eltérés volt megfigyelhető. Független szerszám esetén ez az eltérés maximális értéke 4 körül mozgott.

**A döntött munkadarabbal végzett kísérleteknél a 8-as beállításnál 23-al több zsebet tudtam elkészíteni a 6-os beállítással szemben. Valamint a szerszám kopása is jóval lassabb ütemben következik be, mint a független beállításnál alkalmazott szerszámé. Így a szerszám pálya hatások vizsgálatánál a 8-as beállítást alkalmaztam a további kísérleteknél.**

### 5.5.3 A beállítások reprodukálhatóságának vizsgálata

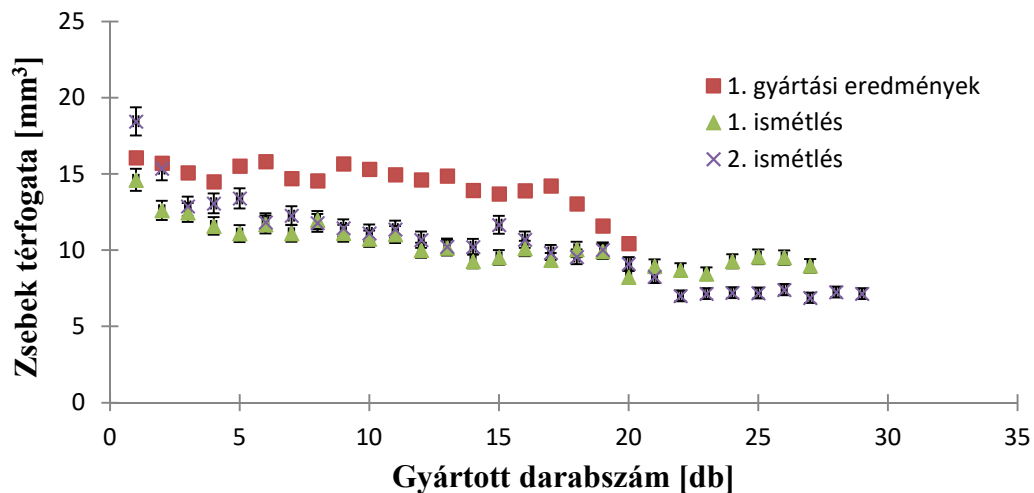
A zsebek geometriai paramétereinek kiértékelése után ellenőrizve lett, hogy a beállítások többszöri ismétlés után is azonos eredményeket hoznak-e? Az ellenőrzés során a zsebek térfogatváltozása került összehasonlításra. A X-Y-Z irányú elemzéssel ellentétben a térfogatváltozás alapú elemzésnél az volt a cél, hogy a leválasztott forgács köbtérfogat alapján legyen vizsgálva a reprodukálhatóság. A leválasztott anyagmennyiség az elkészült zsebek geometriai jellemzőinek megmérése alapján kiszámolt térfogatból lett meghatározva, minden zseb esetén. A 30°-os munkadarab bedöntése mellett a 6-os (5.27-es ábra) és a 8-as (5.28-as ábra) technológiai beállítást kétszer lett megismételve.



5.28. ábra: Ismételt kísérletek 8-as technológiai beállítás mellett: Axiális fogásmélység: 0,3mm, Radiális fogásmélység :0,3mm, Fordulatszám : 25000 [1/min], Előtolási sebesség : 300 [mm/min], 30°-os munkadarab bedöntés

Az 5.28-as ábrán látható, hogy az ismétlések során a görbék lefutása azonos tendencia mentén megy végbe. A kapott görbék változása hasonló, viszont elértés a

gyártott darabszámokban figyelhető meg. Az első gyártás során 28 db zseb készült el. Ezt követően 37 („1. ismétlés”), majd 19 db zseb („2. ismétlés”). A „2. ismétlés” elnevezésű kísérletnél a kis gyártott darabszám oka, hogy ez a kísérlet az 1-es jelű kerámia darabon lett elvégezve, ahol a munkadarab keménységének a szórása a legnagyobb. Emiatt a szerszám folyamatosan változó terhelésnek volt kitéve, ami ilyen drasztikus hatással volt a szerszám élettartamra. Tehát, megállapítható, hogy a megismételhetőség szempontjából teljesen azonos jelleget írnak le a kopási görbék, azaz, az elemzések kellően szilárd alapokon nyugszanak.



5.29. ábra: Ismételt kísérletek 6-os technológiai beállítás mellett, : Axiális fogásmélység: 0,3mm, Radiális fogásmélység :0,05mm, Fordulatszám : 25000 [1/min], Előtolási sebesség : 300 [mm/min], 30°-os munkadarab bedöntés

A 6-os beállításnál (5.29-es ábra) az első gyártáshoz képest az ismétlések során gyorsabb ütemben csökkent a gyártott zsebek térfogata. A darabszám esetében viszont 30-os javulás volt megfigyelhető.

#### 5.5.4 Szerszámok elhasználódásának folyamata különböző dőlésszögek mellett

A zsebek méretváltozása mellett vizsgálat tárgyát képezte az utolsó leggyártott zseb után a szerszámok kopottsági állapota is. Az oxidkerámia alapanyag forgácsolása során a szerszám elhasználódásának a menete 30° -45° -90°-os asztal bedöntés mellett lett vizsgálva (5.30-5.31-es ábrák). A beállítási értékek meghatározásánál Kevin F. és munkatársai kutatásait vettem alapul, amit a 2.4.6-os fejezetben mutattam be. A döntési érték meghatározásánál korlátozó tényező volt a zseb aljához való hozzáférhetőség, mivel 30 °-nál kisebb szög esetén a szerszám nem tudja megmunkálni a teljes geometriát, így ezt is figyelembe kellett vennem az értékek megállapításánál.



5.30. ábra: 6-os technológiai beállítás: Axiális fogásmélység: 0,3mm, Radiális fogásmélység:0,05mm, Fordulatszám : 25000 [1/min], Előtolási sebesség : 300 [mm/min]



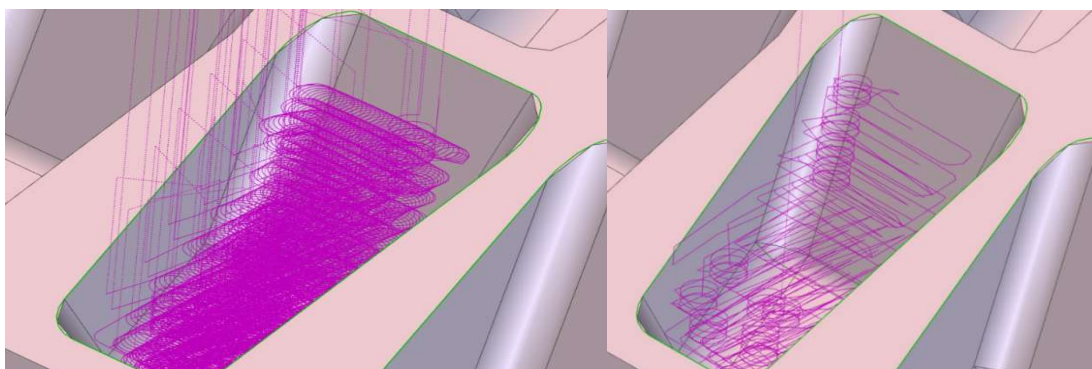
5.31. ábra: 8-as technológiai beállítás: Axiális fogásmélység: 0.3mm, Radiális fogásmélység: 0.3mm, Fordulatszám: 25000 [1/min], Előtolási sebesség: 300 [mm/min]

A munkadarab 30°-os bedöntése eredményezte a legjobb szerszámélettartamot a vizsgált dőlésszögek közül. Akkor születtek a legrosszabb eredmények, ha a szerszám és a munkadarab közötti szög 90°. A 45°-os értéknél szintén gyors szerszámkopás következett be. Ennek megfelelően a szerszám a továbbiakban 30°-os dőlés mellett került alkalmazásra.

## 5.6 Zsebek méretváltozása az alkalmazott pályastratégia függvényében

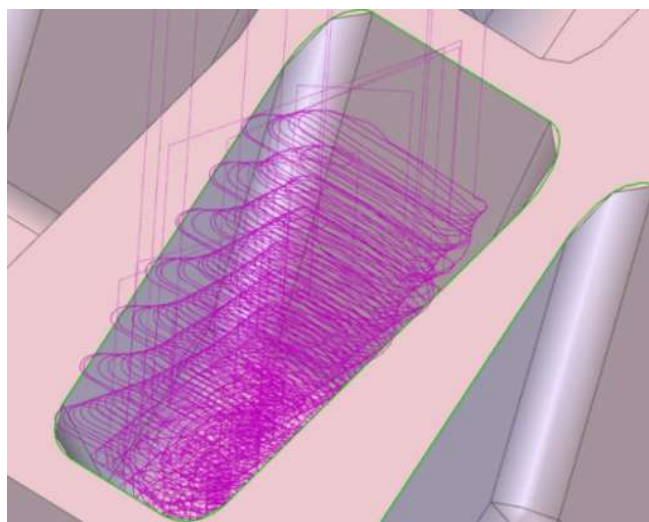
A forgácsolási paraméter beállítások mellett egy másik technológiai jellemzőt is fontos elemezni a kísérletek során, mégpedig a CAM szoftverek által generálható különböző szerszám-pálya stratégiákat. Eddigiekben csak a ciklois szerszám-pálya stratégia lett vizsgálva. Mivel a szakirodalom nem vizsgálja, hogy a különböző szerszám-pályák milyen befolyással vannak a szerszámra az oxid kerámia forgácsolása során, így a többi EdgeCam által felkínál és az ipari felhasználások során leggyakrabban alkalmazott szerszám-pálya stratégiákat is kielemeztem. Az első, kiindulási stratégia

(*etalon pálya*) a láncolt szerszám-pálya volt (5.31-es ábra). Ez a stratégia tisztán egyenes vonalú szakaszokból összeállított egyenirányú marási stratégia, ívelt szakaszok csak ott vannak benne, ahol a gyártott geometria ezt feltétlenül indokolja. Ezen kívül vizsgáltam még a ciklois szerszám-pályát köztes ciklois fogásokkal, valamint a hullámforma pályát is (5.31-es ábra). Ez a két stratégia már ívelt szakaszokból áll (részletesen a 2.4.2-es fejezetben bemutatva), és csak ott tartalmaz egyenes vonalú mozgást ahol nem lehetett íves szakaszt illeszteni a megmunkált geometria miatt



*Ciklois szerszám-pálya stratégia*

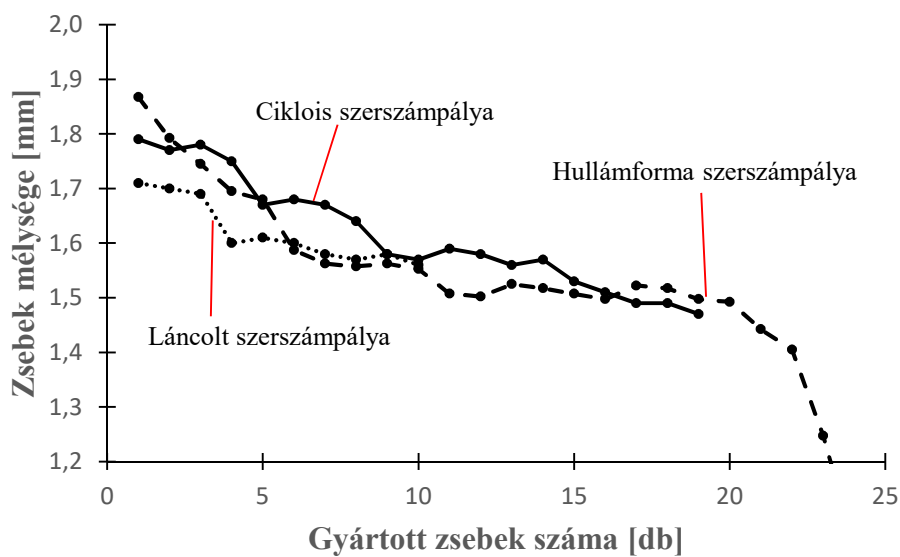
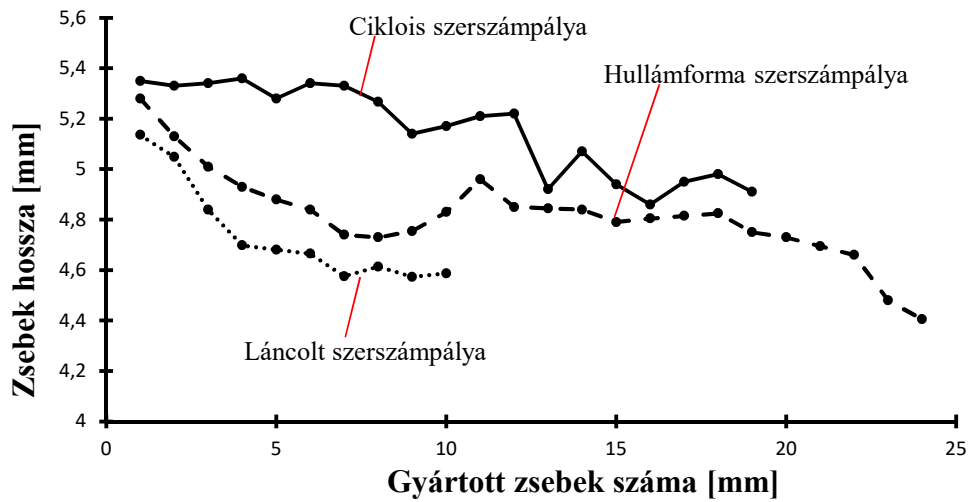
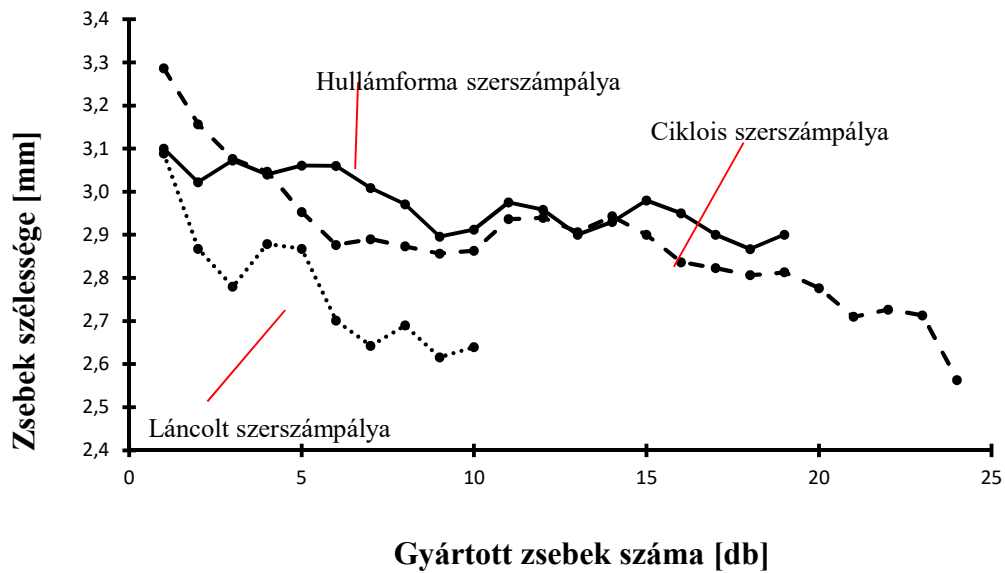
*Láncolt szerszám-pálya stratégia*



*Hullámforma szerszám-pálya stratégia*

5.32. ábra: Generált szerszám-pályák

**Mind a három stratégiánál a 8-as technológia beállítást használtam**, mivel az 5. fejezetben bemutatott eredmények alapján ez bizonyult a leggyorsabb és dinamikai szempontból a legstabilabb beállításnak: az **axiális fogásmélység 0.3 [mm]**, a **radiális fogásmélység szintén 0.3 [mm]**, az **előtolási sebesség 300 [mm/min]**, míg a **fordulatszám 25000 [1/min]**. A kísérletek elvégzése után a gyártott zsebek geometriai paramétereinek (*szélesség, hossz, mélység*) változását az 5.33-as ábrán foglaltam össze:



5.33. ábra: Zsebek geometriai jellemzőinek változása a szerszám típusa függvényében

A három pályastratégia kiértékelése alapján megállapítottam, hogy a szerszámkopás szempontjából a láncolt szerszám pálya a legkevésbé alkalmas a gazdaságos gyártásra a vizsgált pályastratégiák közül. Itt a szerszám a 11. zseb gyártása közben eltört. A gyors szerszám törésen túlmenően, a többi stratégiához képest itt csökkentek leggyorsabb ütemben az elkészült zseb jellemző méretei is.

A hullámforma, és a ciklois szerszám pálya a szélesség és a mélység paraméterek esetén a 20. zsebig közel azonos kopásgörbét írt le. A gyártott darabszám alapján a két pályastratégia között lényegi különbség nem volt kimutatható.

Az előző fejezetekhez hasonlóan itt is vizsgáltam az első zseb esetén a névleges mérettől való eltérést. A százalékos eltérés értékeit a 11. táblázatban foglaltam össze.

	Hosszúság (mm)	Hosszúság Eltérés (%)	Szélesség (mm)	Szélesség Eltérés (%)	Mélység (mm)	Mélység Eltérés (%)
<b>Elméleti érték:</b>	<b>5.5</b>		<b>3.2</b>		<b>2</b>	
<b>Hullámforma</b>	5.35	<b>2,7 (-)</b>	3.29	<b>2.7 (-)</b>	1.87	<b>6.5 (-)</b>
<b>Ciklois pálya</b>	5.28	<b>4,0 (-)</b>	3.1	<b>3.1 (-)</b>	1.89	<b>5.5 (-)</b>
<b>Láncolt pálya</b>	5.14	<b>6,5 (-)</b>	3.1	<b>3.1 (-)</b>	1.71	<b>14.5 (-)</b>

11. táblázat: Zsebek mért geometriai jellemzőinek eltérése a várt értékektől- különböző pályastratégiáknál

Az eltérés hullámforma szerszám pálya esetén 3-6% körül mozgott, éles szerszám mellett. A mélység paraméter a megengedett 5%-os tartománytól 1,5%-al eltér. A másik két paraméter a megadott %-on belül van.

Ciklois szerszám pályánál a kapott eltérés 3-5% között mozgott. Az 5.5.2-es fejezetben (10. táblázat) vizsgált ciklois pálya kísérleteknél (*8-as technológiai beállítás*) szintén 4-5% eltérést tapasztaltam, így a ciklois stratégia stabil, reprodukálható eredményeket ad.

A legkirívóbb torzulást láncolt szerszám pályánál tapasztaltam, ahol a legnagyobb eltérés a zseb mélységénél volt. Itt az eltérés 14%. Ez jelentősen több a megengedett eltérésnél.

**Az eredményekből az látszik, hogy láncolt szerszám pálya esetén a pálya pontosságát torzító hatások már az első zseb után is megfigyelhetők.**

## 6 Szerszámkopás felügyelet a három pálya stratégiánál

A szerszám-pálya stratégiák elemzését nem hagytam abba a zsebek méretváltozásának vizsgálatánál. Mivel ahogy fentebb is utaltam rá, a szakirodalomban nem találtam kutatást a szerszám élettartam, és a szerszám-pálya stratégiák közötti kapcsolatra kerámia alapanyagok esetében, így ezt a hatást mélyebb vizsgálatnak vettem alá.

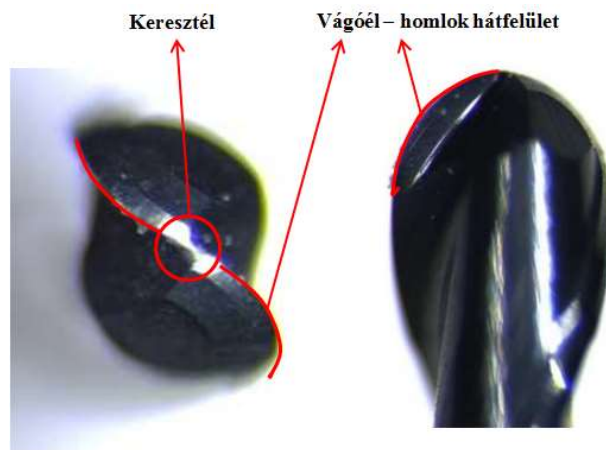
Az elemzés első lépése a szerszámkopás folyamatának feltárása volt. Ennek legkézenfekvőbb módja a szerszám mikroszkópi vizsgálata (**Direkt módszer**). A kísérleti körülmények miatt nem volt lehetőségem minden gyártott zseb után megvizsgálni a szerszám pillanatnyi kopottsági állapotát, így a tapasztalatok alapján egy köztes megoldást választottam, és minden 5. zseb után elemeztem a szerszám adott időbeli állapotát. Ez önmagában nem biztosítja a szerszám élettartam egyes fázisainak pontos definiálását. Így a szerszám elhasználódás fázisátmeneteinek határait további 2 módszerrel is alátámasztottam (**Indirekt módszer**) (*megmunkált zsebek méretváltozásának, illetve a zsebek széleinek kipattogzásának vizsgálata*) [123].

### 6.1 Szerszámkopás fázisátmenetek definiálása a mikroszkópi felvételek alapján

A szerszám élettartam vizsgálatát a direkt módszerrel indítottam, vagyis a szerszámok kopási mechanizmusának mikroszkópi elemzésével. A vizsgálat célja egyrészt a szerszám komplex elhasználódási folyamatának feltárására, másrészt az egyes vágóélek számszerű kopottsági állapotának meghatározására, harmadrészt az esetleges kopottsági határok- átmenetek megállapítása.

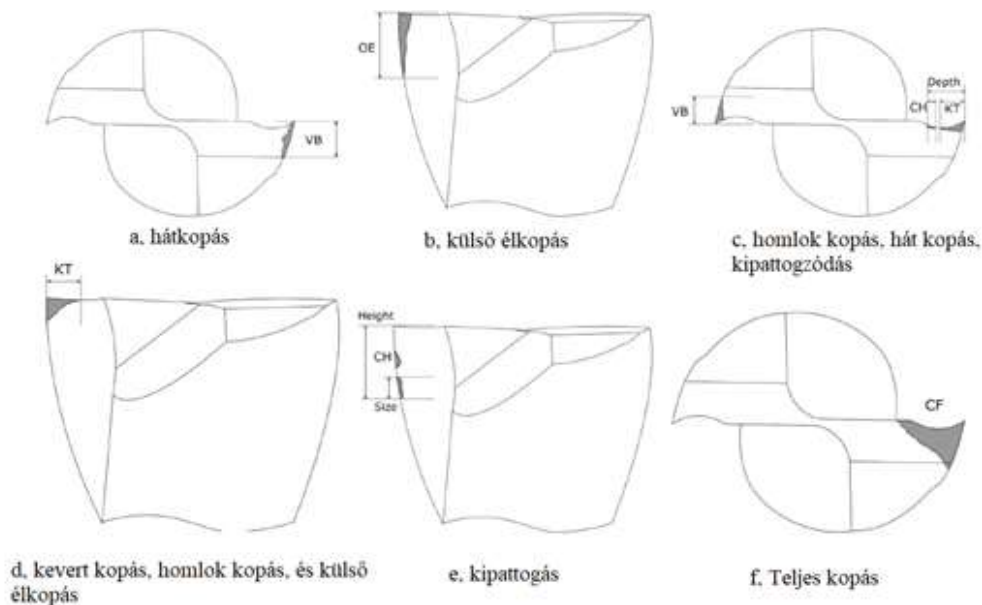
A mikroszkópi felvételek a Zeiss Discovery V8 mikroszkóppal készültek. A képek kiértékelésére egy **IC MEASURE** nevű [124] program lett használva. A szerszámon elemezve lett a keresztél elhasználódásának menete, valamint a vágóél, a hozzá tartozó homlok és hátfelület kopása is (6.1-es ábra).





6.1. ábra: Szerszám vizsgált jellemzői

A megelőző kísérletek alatt azt tapasztaltam, hogy a 6.2-es ábrán bemutatott kopási alakok közül a homlok felület kopása (6.2-b kopásforma) a domináns forma a szerszám elhasználódása során. Ezt követi az élkopás (6.2-c kopásforma), valamint a keresztél kopása. A homlokfelület kopási sebességével a hátfelület kopása nem volt egy nagyságrendben, így azt nem vizsgáltam. **Mivel a homlokfelület kopása egy nagyságrenddel nagyobb volt a hátfelület kopásához képest, így azt vizsgáltam.**

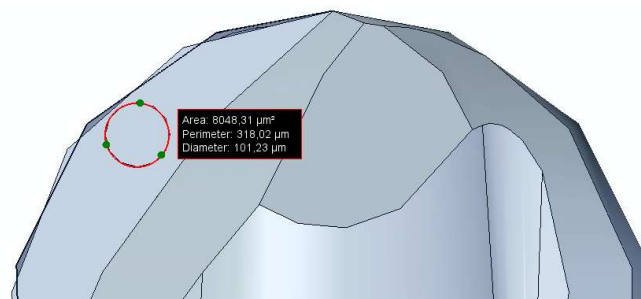


6.2. ábra: Szerszámkopás lehetséges formái mikro szármarónál [83]

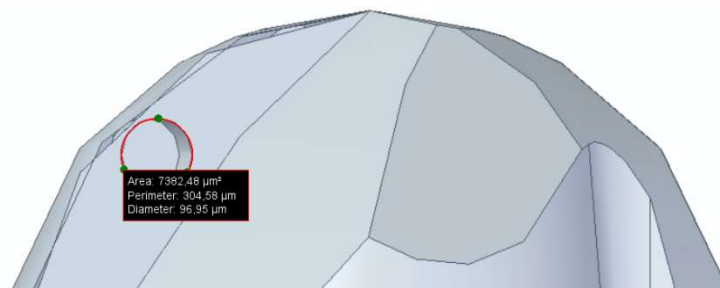
Esetemben a gömbmaró mérése nehéz feladat, mivel a gömbfelületen elhelyezkedő ívelt vágóélnak, illetve felületeknek nincs egy kitüntetett helyzete. Ahogy a 2.4.7-es fejezetben is bemutattam a szerszám kopás mérésére többféle jó megoldás is létezik. Az irodalom kutatási fejezetben bemutatott mérési módszerek közül a Yuang Li [86] által bemutatott módszert alkalmaztam., mivel a homlokfelületen megkezdődött kopás

gyorsan eljutott abba a fázisba, hogy a szerszám geometriája torzult, így a kopott felület mérése biztosította számomra a legtöbb információt a szerszám pillanatnyi állapotáról.

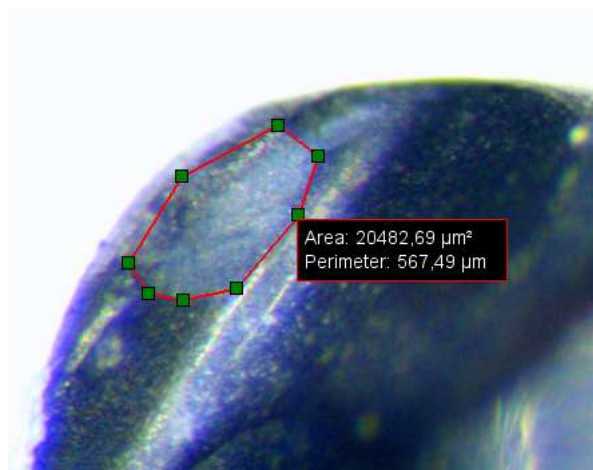
A mérés során az alkalmazott szoftverben görbét illesztettem a vágóél kopott hossza mentén, ezzel megállapítva az él hosszirányú kopását, valamint a homloklap területét is meghatároztam a program segítségével. Az egyes ellenőrzési pontoknál a szerszámot nem sikerült minden esetben ugyan abba a helyzetbe pozicionálni. A felvételek alapján megállapítottam, hogy a maximális eltérés  $20^\circ$  volt. Így ezt a hibát korrigálnom kellett, amihez a következő módszert használtam: 3D szoftver segítségével meghatároztam, hogy a fényképek készítésénél bekövetkező pozicionálási hiba mekkora eltérést eredményez a kopott felszín meghatározásánál. A kopás területi értékére a szerszám 3D modellje alapján következtettem a következő módon:



6.3. ábra: Homloklapra kör kopás mérése  $-0^\circ$ -os forgatás mellett



6.4. ábra: Homloklapra kör kopás mérése  $-20^\circ$ -os forgatás mellett



6.5. ábra: Kopott homloklap területének mérése a szerszám mikroszkópi képekről

A szerszám 3D modelljének segítségével, valamint a mikroszkópi képek alapján megállapítottam, hogy a vízszintes ( $0^\circ$ -os szöghelyzet) szerszámhelyzethez képest (6.3-as ábra) a szerszám maximálisan  $15\text{-}20^\circ$  közötti eltérést mutat (6.4-es ábra).

Ezt úgy állapítottam meg, hogy a modellen egy  $0,1$  mm átmérőjű kör alakú kopott részt hoztam létre (6.12-es ábra). Az ICMEASURE segítségével a kopott rész átmérője és területe is meghatározható. Ezt követően a  $20^\circ$ -os szerszámforgatásnál is le lett mérve a kopott rész területe (6.3-as ábra).

**A két terület között 8-9 eltérés tapasztalható, így a mikroszkópi képek mérése során is az egyes képek között ekkora a maximális leolvasási hiba.** Az elemzés során csak a homloklfelületeket, és keresztélet vizsgáltam részletesen (6.14-es ábra). Ennek oka, hogy a szerszám kopása minden esetben vagy a homloklfelület, vagy a vágóél és homloklfelület találkozásánál indult meg. A hátfelületek kopása később kezdte követni a többi él kopását. Így azzal külön nem foglalkoztam.

### 6.1.1 Szerszám elhasználódás a hullámforma szerszám-pálya esetén

A 12. táblázat a hullámforma szerszám-pálya alkalmazása során készült szerszám kopottsági állapotokat foglalja össze: A táblázat oszlopai az egyes ellenőrzési pontnál készített ábrákat jelöli, míg a sorok a vizsgált geometriai elemeket jelölik (1. vágóél, 2. vágóél, keresztél)

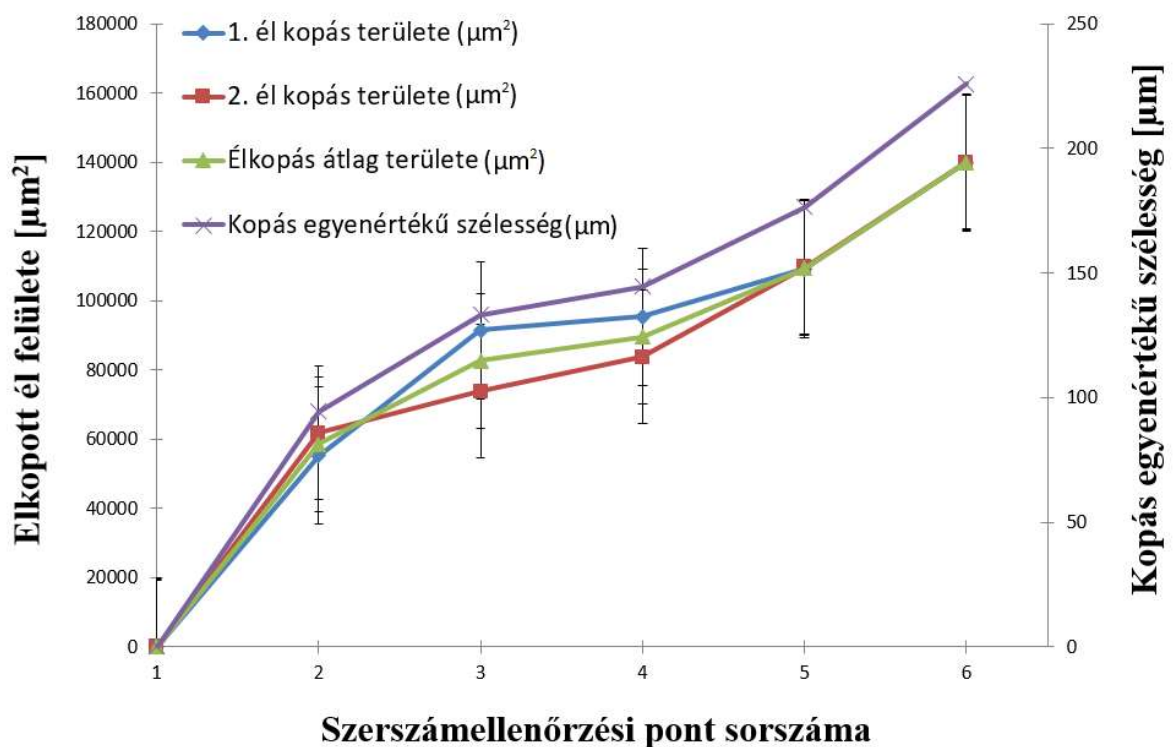
				1. vágóélkopása
				2. vágóélkopása
				Keresztélkopása
5. zseb	10. zseb	15. zseb	20. zseb	

12. táblázat: Szerszámkopás menete hullámforma szerszám-pálya esetén

A hullámforma szerszám-pálya alkalmazásával 24 zseb készült el. A vizsgálat során 6 ellenőrzési pont lett definiálva. Az első ellenőrzési pont az éles szerszámhoz tartozik.

A második pont az 5. zseb után, a harmadik. pont a 10. zseb után, a negyedik ellenőrzési pont a 15 zseb után, az ötödik ellenőrzési pont a 20 zseb után következett. A hat pontból csak a 20. zsebig tudtam értékelhető eredményeket rögzíteni, mivel a 24. zsebnél a szerszám forgácsoló része teljes mértékben elkopott. Itt a kopott felület számítása során a szerszám homlok felületének teljes felszíne lett meghatározva.

A szerszám 1. vágóélén az 5. zseb után apró kitöredezések figyelhetők meg a vágóél mentén, valamint a homloklfelületen kisméretű kráteres kopások találhatók rajta. A homloklfelület mellett a hátfelület is kopásnak indult. A 2. vágóél esetén a homloklfelület indult erőteljes kopásnak, valamint a vágóél is, míg a hátfelületen minimális kopás volt tapasztalható.



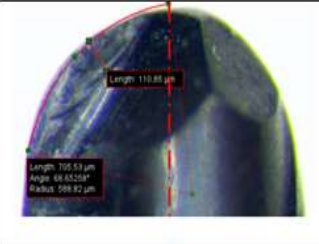
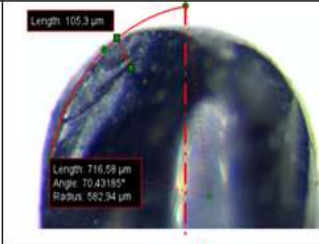
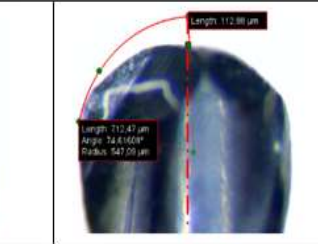
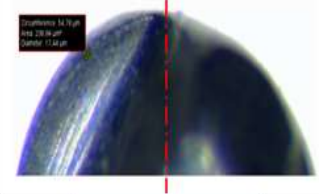
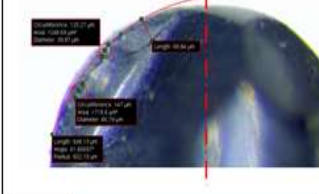

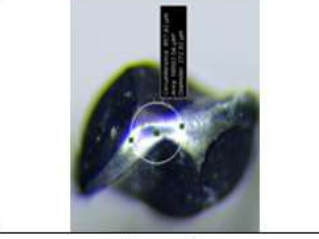
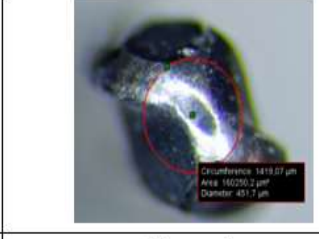
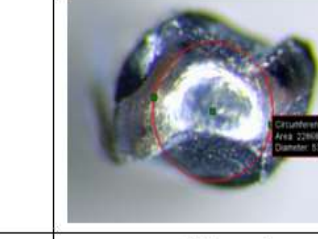
6.6. ábra: Homloklapok felületi elhasználódás hullámforma esetén

A szerszám vágóéleihez tartozó kopott felületek nagyságát a 6.6-os ábra mutatja be. Az éles szerszámhoz képest az 5. zseb megmunkálása után nagymértékű ugrás figyelhető meg. A 15. zsebig a kopási sebesség mérséklődött, majd a 20. zsebtől a szerszám teljes kopása- elégeése következett be (a 20. zsebtől a szerszám piros izzása volt tapasztalható) Megfigyelhető volt továbbá, hogy a szerszám homloklfelületei a 15. zsebig egyenlőtlenül koptak el. Azonban a 20. zsebtől ez a különbség fokozatosan megszűnt, és egységesen a túlkopás szakaszába léptek a vágóélek, majd az élszögrendszer teljes elégeése volt tapasztalható.

A 6.6-os ábrán feltüntettem továbbá kopás egyenérték szélességét is. Az egyenérték szélességet a szerszám maximális fogásmélységéhez tartozó élhosszúság ( $620\mu\text{m}$ ), és az adott vizsgálati pont átlagos kopott felületének hányadosából számítottam ki. Ezzel megadtam, hogy adott hosszon mekkora az elhasználódás mértéke, ami könnyebbé teszi az elhasználódás megértését. **Ezzel megadtam, hogy adott hosszon mekkora az elhasználódás mértéke, ami könnyebbé teszi az elhasználódás megértését.**

### 6.1.2 Szerszám elhasználódás ciklois szerszám pálya esetén

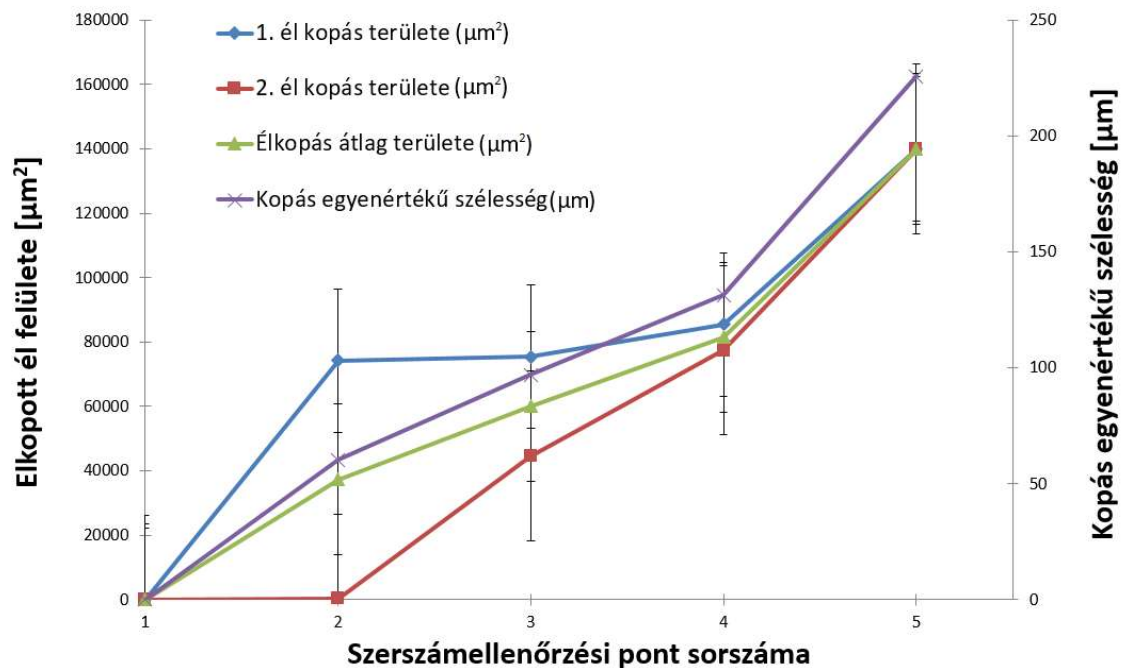
A 13. táblázat a ciklois szerszám pálya alkalmazása során készült szerszám kopottsági állapotokat foglalja össze:

			<b>1. vágóél kopása</b>	
				<b>2. vágóél kopása</b>
				
<b>5. zseb</b>	<b>10. zseb</b>	<b>15. zseb</b>		

13. táblázat: Szerszámkopás menete ciklois szerszám pálya esetén

A hullámforma szerszám pályához hasonlóan az első ellenőrzési pont a teljesen sértetlen szerszámhoz tartozik, ahol nincs szerszámkopás. A második ellenőrzési pont az 5. zseb után, a harmadik ellenőrzési pont a 10. zseb után a negyedik ellenőrzési pont a 15. zseb után lett beiktatva. A második ellenőrzési pontnál az 1-es homloklap felület erős kopása volt megfigyelhető, továbbá a hátlap felületén is megindult az elhasználódás. A 2-es homloklap felület szinte sértetlen volt. A 10. zsebnél a 2-es homloklap felületen is megindult a szerszám kopása, valamint a szerszám hosszirányú csökkenése is tapasztalható volt. A 3. vizsgálati pontnál a szerszám geometriai torzulása indult meg. Itt már nem volt nagyságrendi különbség a 2 él kopottsági állapota között. A 19. zsebnél a szerszám teljes elhasználódása következett be, így már mérhetetlen volt a szerszámgeometria. A

hullámforma pályához hasonlóan itt is aszimmetrikus vágóél kopás következett be. A mikroszkópi felvételek alapján becsült homloklapfelületi kopásokat a 6.6-os ábra foglalja össze.



6.7. ábra: Homloklapok felületi elhasználódás ciklois szerszámhálya esetén

Az 5. zseb után a hullámforma pályával ellentétben itt jelentős különbség észlelhető a két él között. Így elmondható, hogy az 5. zsebig ebben az esetben is gyors szerszám elhasználódás következett be. A 15. zsebig a kopási sebesség mérséklődött, majd újra gyorsult és a szerszám teljes elkopásáig ment. A 16. zsebtől is megfigyelhető volt a szerszám piros izzása.

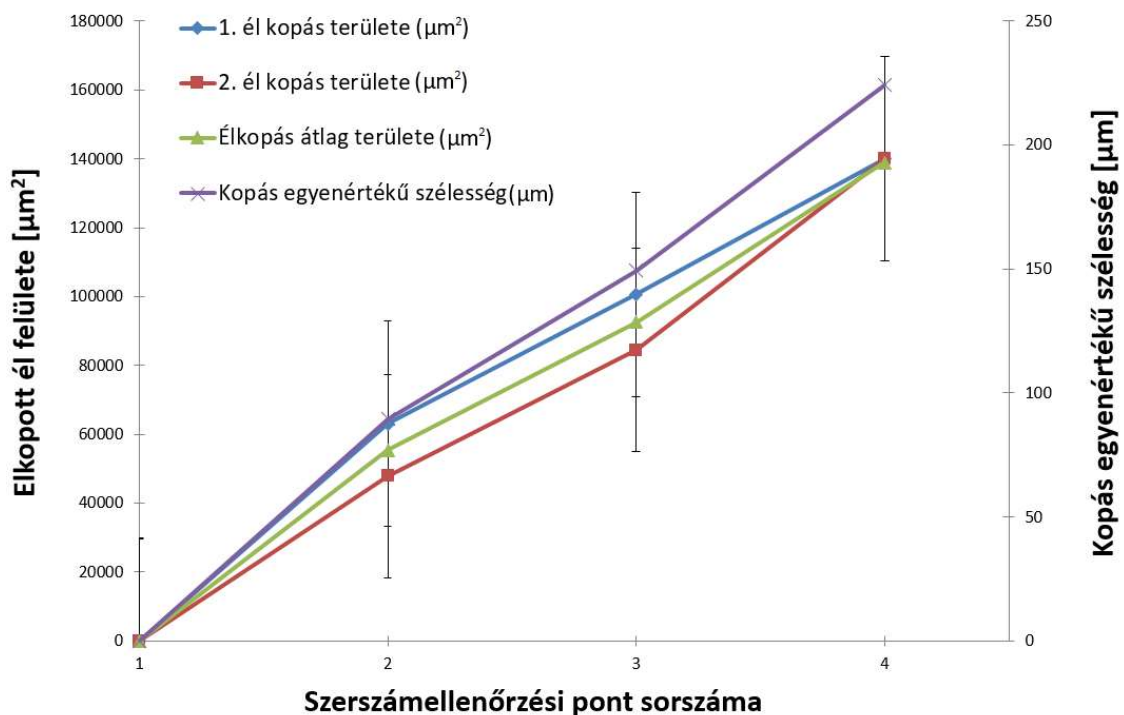
### 6.1.3 Szerszám elhasználódása a láncolt szerszámhálya során

A 14-es táblázat a láncolt szerszámhálya alkalmazása során készült szerszám kopottsági állapotokat foglalja össze:

		1. vágóél kopása
		2. vágóél kopása
		Keresztél kopása
5. mérési pont	10. mérési pont	

14. táblázat: Szerszámkopás menete láncolt szerszám-pálya esetén

A láncolt szerszám-pályánál nem tapasztalható jelentős különbség a két vágóél elhasználódási folyamata között (6.7-es ábra). Az előző technológiáktól eltérően itt a vágóélek kopása sokkal gyorsabb ütemben zajlott le. A 11. zsebnél szerszám-törés következett be.

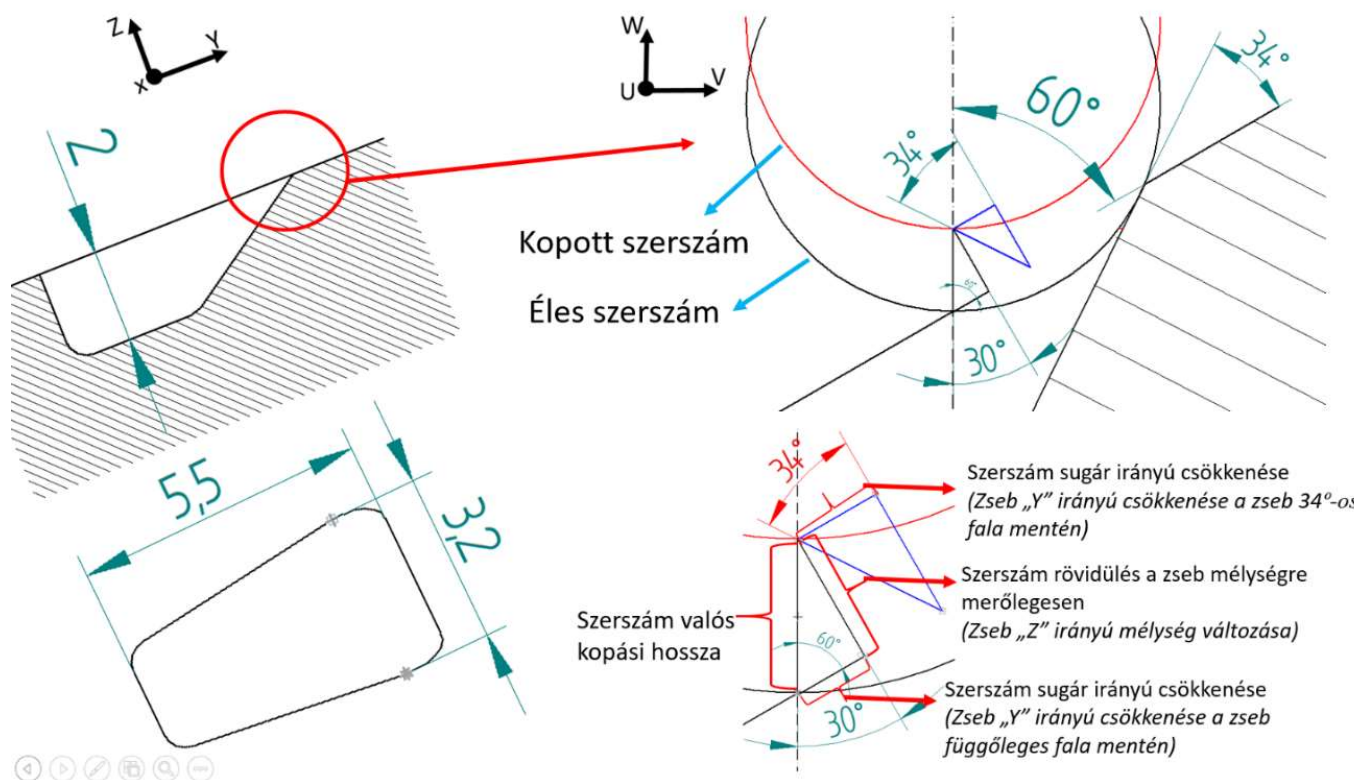


6.8. ábra: Homloklapok felületi elhasználódás láncolt szerszám-pálya esetén

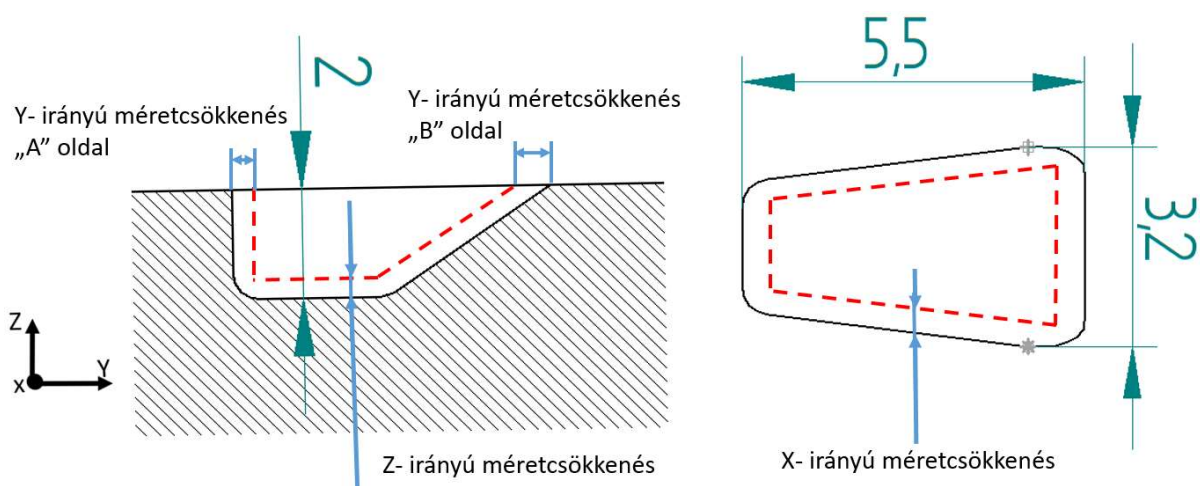
A láncolt szerszám-pályánál a szerszám mikroszkópi felvételei alapján lineáris elhasználódás figyelhető meg, valamint a kevés adat miatt, nem tudtam kopás-fázishatárokat hozzárendelni a görbéhez.

### 6.1.4 Szerszámkopás hatása a megmunkált zsebek méretváltozására

Megmérve a szerszám hosszirányú kopását, megállapítható, hogy az egyes vizsgálati pontoknál milyen súllyal befolyásolja a mért zseb eltérését a névleges mérettől a szerszám kopás, valamint a forgácsolási erők okozta pályahiba. Az elméleti megfontolást a 6.9-es ábrán foglaltam össze:



6.9. ábra: Szerszámkopás hatása a zsebek méretcsökkenésére



6.10. ábra: Szerszámkopás hatása a zsebek méretcsökkenésére

A zseb belsejét határoló 4 falból 3 függőleges, így a zseb „X” illetve „Y<sub>A</sub>” irányú méretcsökkenése a 6.9-es ábrán látható fekete háromszög alapján számolható szerszámrövidüléssel közelíthető a következő összefüggéssel:



$$\Delta X = \Delta w \cdot \cos(60^\circ)$$

$$\Delta Y_A = \Delta w \cdot \cos(60^\circ)$$

*Ahol:*

- $\Delta X$ : Zseb X irányú egy oldali rövidülése a szerszám hosszirányú kopása alapján
- $\Delta Y_A$ : Zseb Y irányú rövidülése a zseb „A” oldalánál
- $\Delta w$ : Szerszám mért hosszirányú kopása

Mivel a szerszám geometria tényleges kopása nem ismert, így a szerszámot egy nulla sugarú szerszámmal közelítettem.

Az „Y” tengely mentén a 4. határoló fal 34°-ot zár be az „Y” tengellyel (Y irány „B” oldala- 6.10-es ábra). A „B” oldalon a zseb méretcsökkenése a kék háromszög alapján számítható (6.9-es ábra).

$$\Delta y_B = 2 \cdot \Delta w \cdot \cos(60^\circ)$$

*Ahol:*

- $\Delta y_B$ : Zseb Y irányú rövidülése a zseb „B” oldalánál
- $\Delta w$ : Szerszám mért hosszirányú kopása

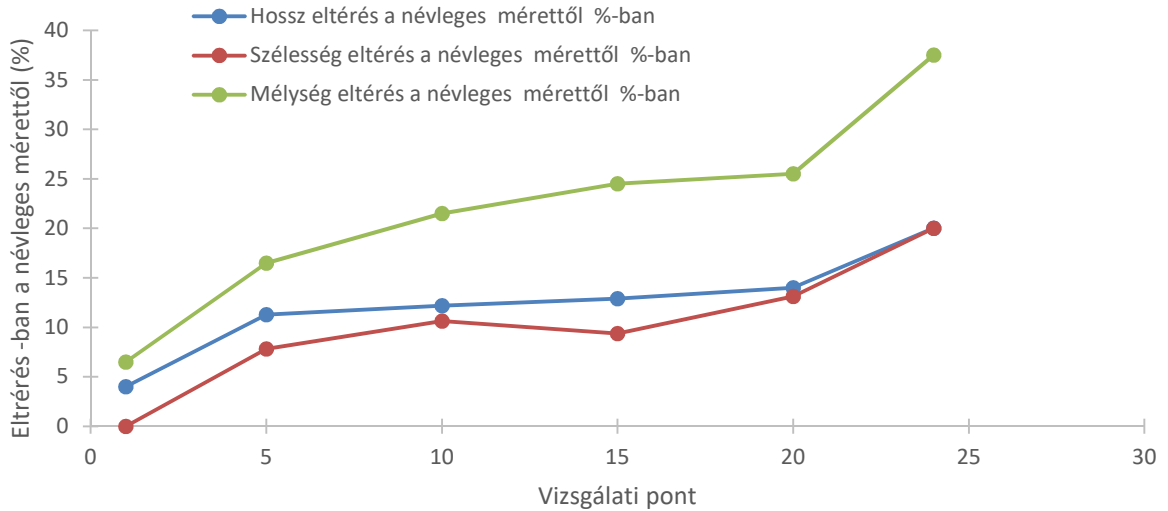
A zseb Y tengely menti csökkenése az  $Y_A$  és  $Y_B$  csökkenések összegéből számolható. Az X irányú rövidülés az egy oldalon számolt X rövidülés kétszerese alapján határozható meg.

A zseb mélységének csökkenése a 6.9-es ábra alapján a fekete háromszög segítségével számolható ki a következő módon:

$$\Delta Z = \Delta w \cdot \sin(60^\circ)$$

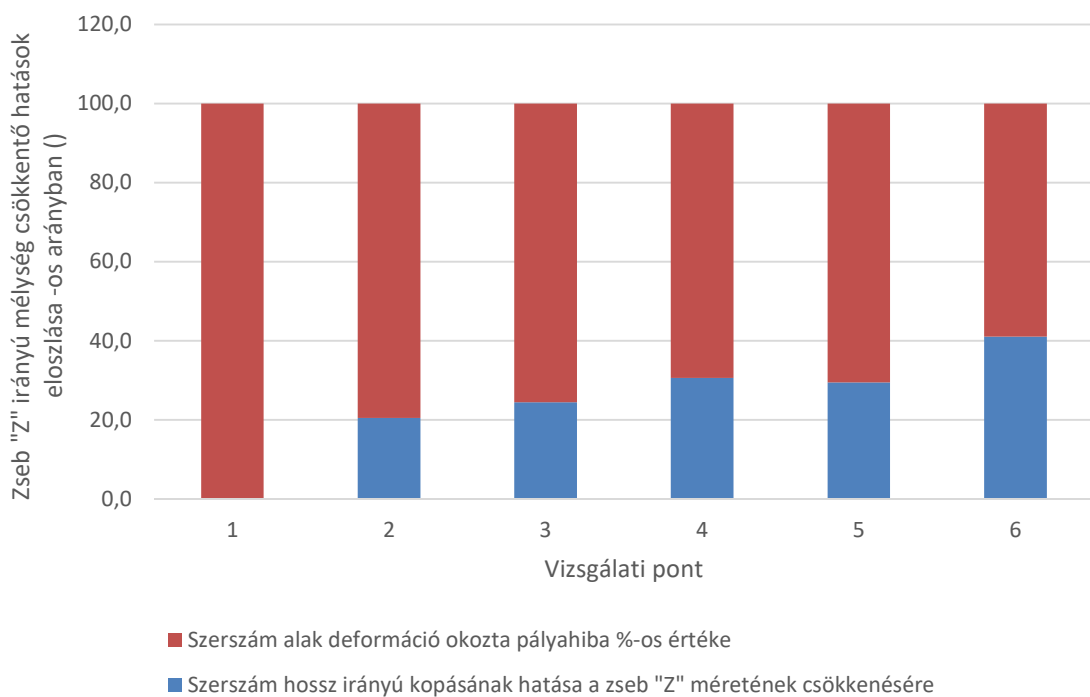
A szerszámkopás miatti elméleti zseb méret csökkenés meghatározása után megvizsgáltam, hogy a valós mért zseb paraméterek milyen mértékben térnek el az elméleti zseb méretekhez képest. Ezzel az eltéréssel megkaptam, hogy a méretcsökkenés milyen ütemben következik be a gyártás során. A szerszám hosszirányú kopásából számolt várható zsebméretek összehasonlítva a tényleges méretcsökkenéssel, megállapítható, hogy a szerszámkopás, illetve a forgácsolási erők és egyéb tényezők által bekövetkezett deformáció milyen arányban felelős a kész zsebek méretéért.

### Elemzés hullámforma esetén

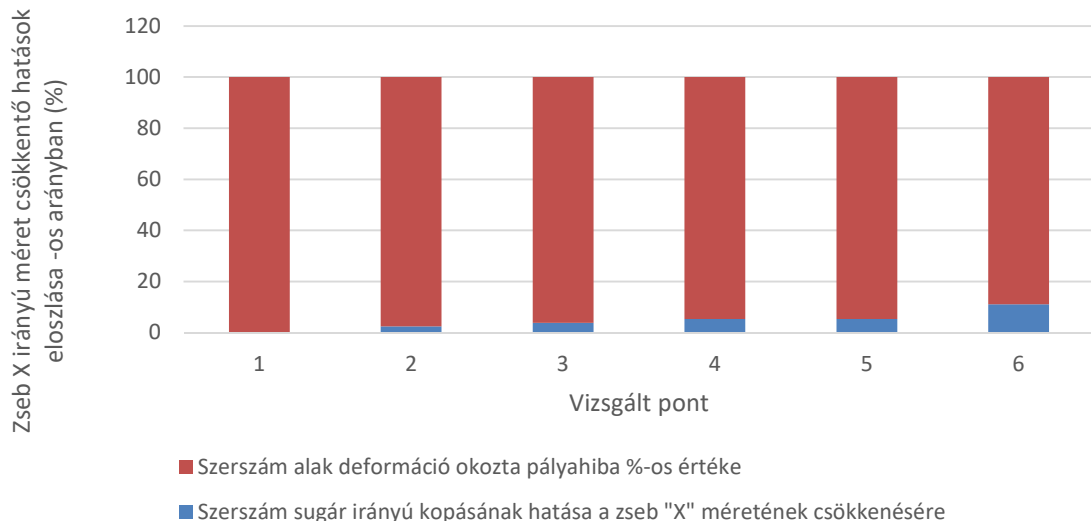


6.11. ábra: Zsebek százalékos méretváltozása a névleges mérethez képest

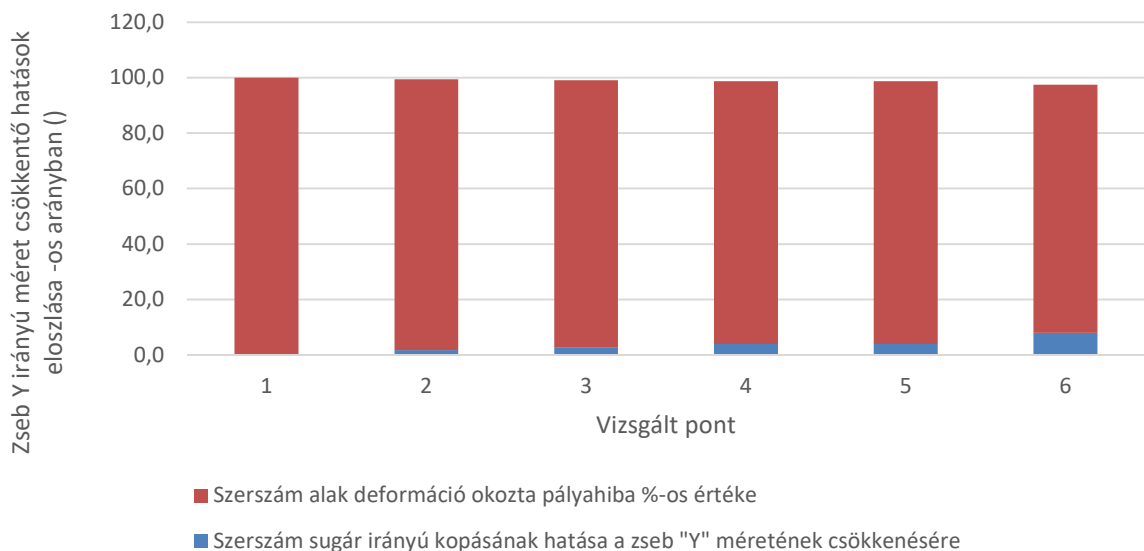
Hullámforma esetén a zsebek mért értékeinek százalékos eltérését a névleges méretekéntől a 6.11-es ábrán foglaltam össze. A gyártás előrehaladtával a névleges mérettől való eltérés növekedése tapasztalható mind a három vizsgált irányba. Az ábrán látható, hogy a zsebek mélységének eltérése közel duplája a hossz-szélesség irányú eltéréseknek. Ezt követően megvizsgáltam, hogy az egyes eltérésekért hány százalékban felelős a szerszám alak deformáció, illetve a szerszámkopás.



6.12. ábra: Gyártott zsebek mélységét befolyásoló hatások százalékos eloszlása



6.13. ábra: Gyártott zsebek szélességét befolyásoló hatások százalékos eloszlása



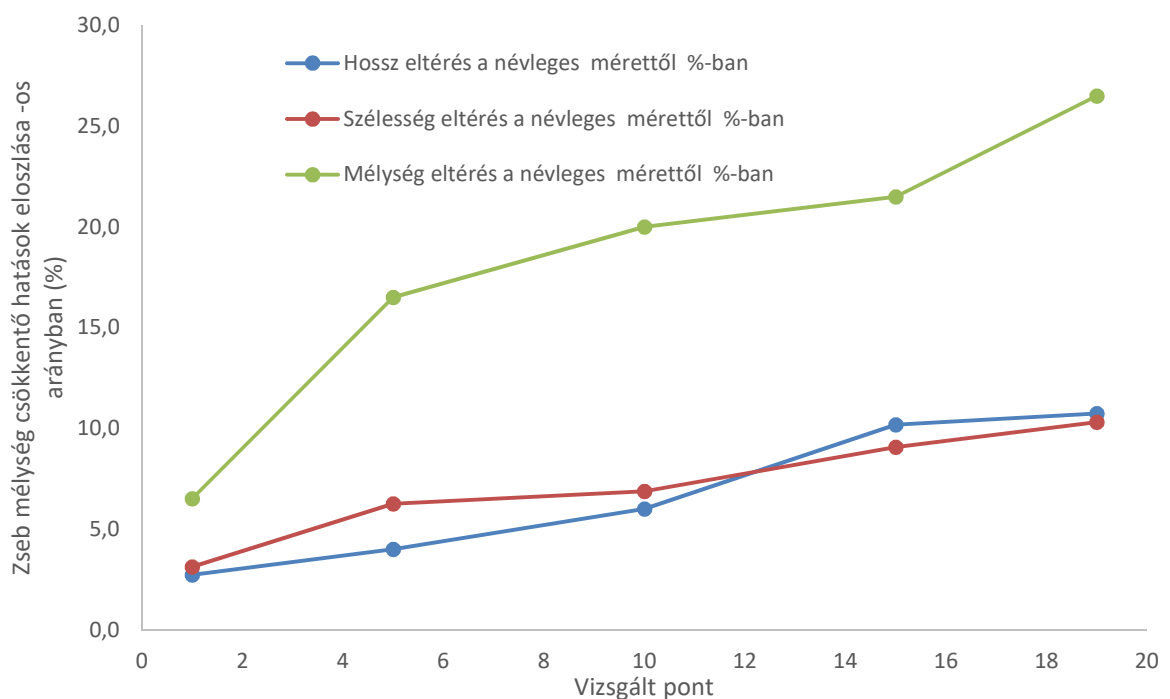
6.14. ábra: Gyártott zsebek hosszúságát befolyásoló hatások százalékos eloszlása

A 6.13, 6.14-es ábrákon látható, hogy a méretek csökkenésért szinte teljes egészében a szerszám alak deformáció a felelős mind „X” mind „Y” irányba. A 6.11-es ábrán látható, hogy a lineáris kopási szakaszban a szerszám hosszirányú kopása egyértelműen hatással van a „Z” érték csökkenésére, de nem magyarázza a mélység érték ekkora mértékű eltérését. A hosszirányú kopás miatt a gömbfelületen torzult a szerszám élgeometria, aminek eredményeként a súrlódási erő tengelyirányú komponense a szerszámot a főorsó felé tolta.

**Összevetve a 6.11-6.14-es ábrákat a következő konklúziók szűrhetők le:**

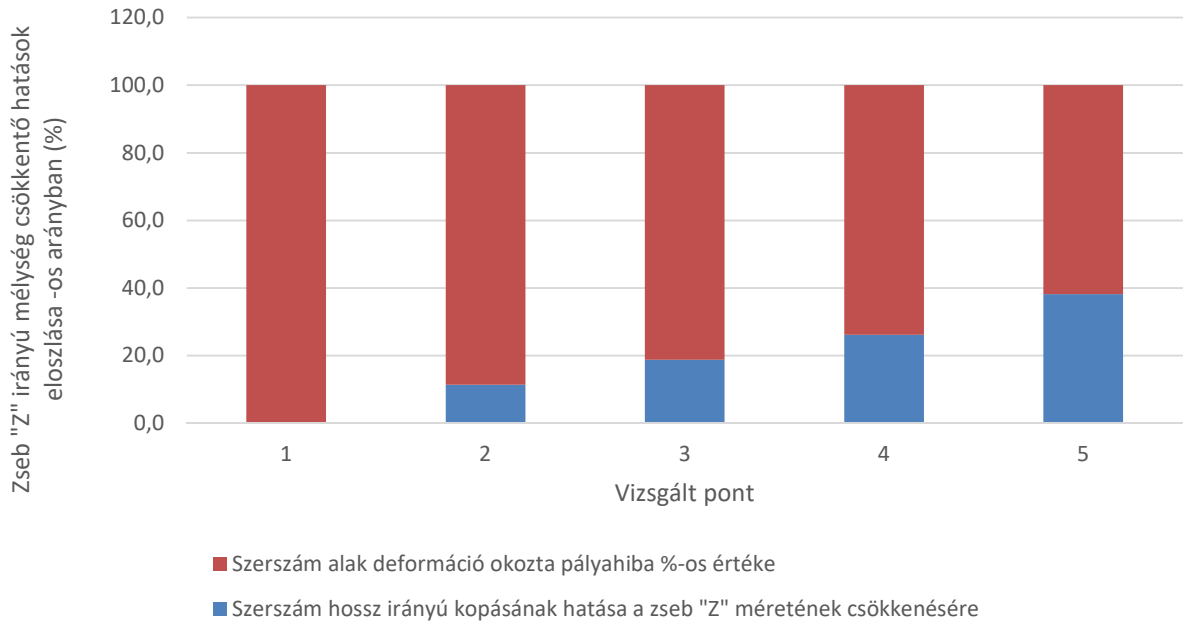
- „X”-„Y” irányba a méretcsökkenés 90-95-ban a szerszám alak deformáció miatt következett be. Ez a deformáció a középső szakaszban közel 10-al csökkentette a zseb méretét (6.11-es ábra).
- „Z” irányba a szerszám hossz kopás egyértelmű hatással volt a zseb mélység csökkenésre (6.12-es ábra). A hosszirányú kopás miatti a felületek között ébredő súrlódási erő tengely irányú komponense a szerszámot „Z” irányba elnyomta. Ezzel magyarázható, hogy bár a mélység csökkenés duplája az „X”-„Y” irányú méretcsökkenésnek, a szerszám kopás közel 20-ban felelős ezért (6.12 ábra).

### *Elemzés ciklois szerszám pálya esetén*

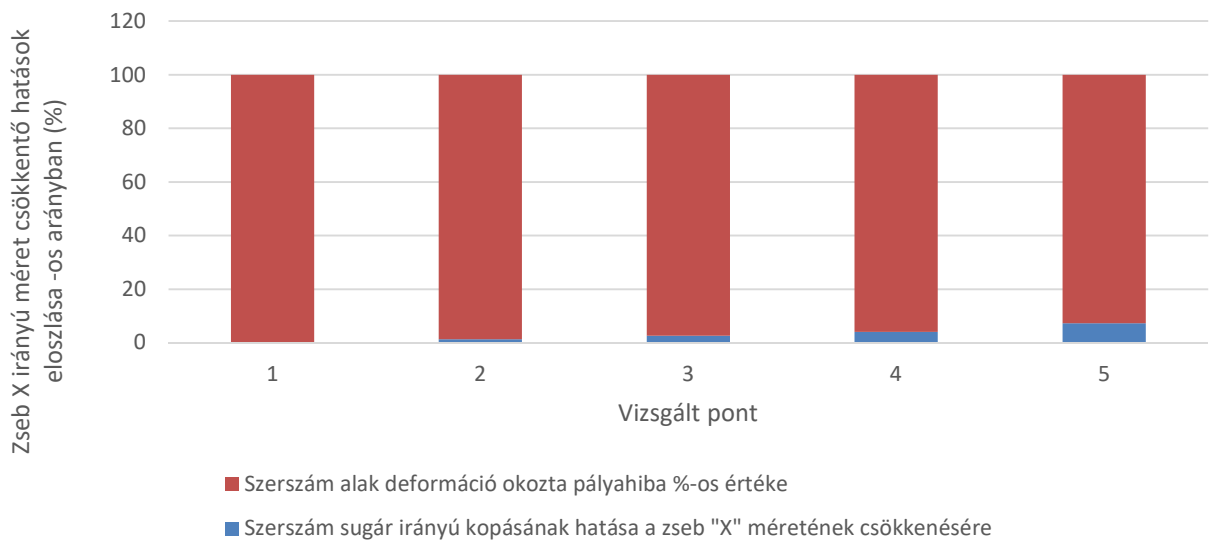


6.15. ábra: Zsebek százalékos méretváltozása a névleges mérethez képest

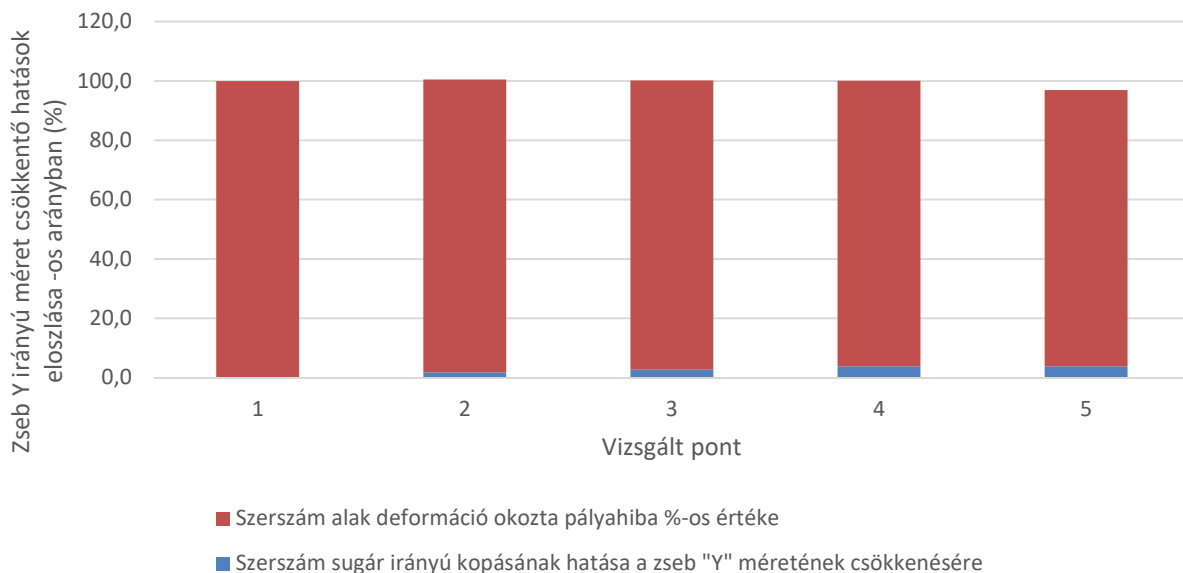
Ciklois szerszám pályánál a hullámformához hasonló eredményeket kaptam. A 6.15-ös ábrán látható, hogy a zsebek mélységének eltérése közel négyszerese a hossz-szélesség irányú eltéréseknek.



6.16. ábra: Gyártott zsebek mélységét befolyásoló hatások százalékos eloszlása



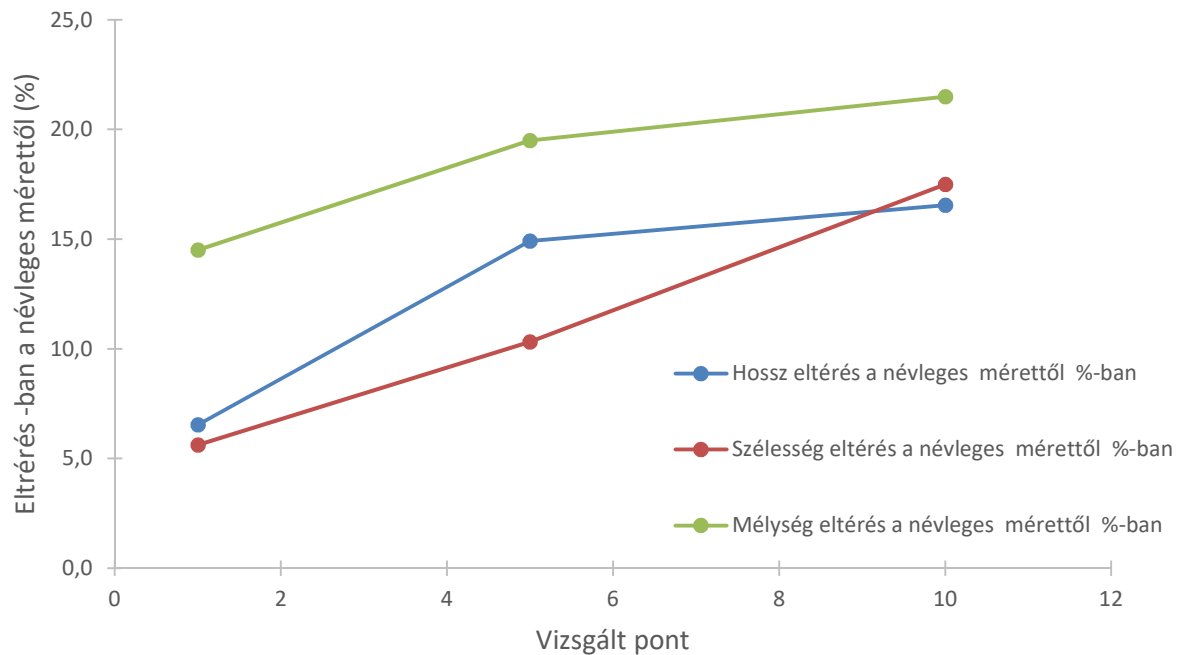
6.17. ábra: Gyártott zsebek szélességét befolyásoló hatások százalékos eloszlása



6.18. ábra: Gyártott zsebek hosszúságát befolyásoló hatások százalékos eloszlása

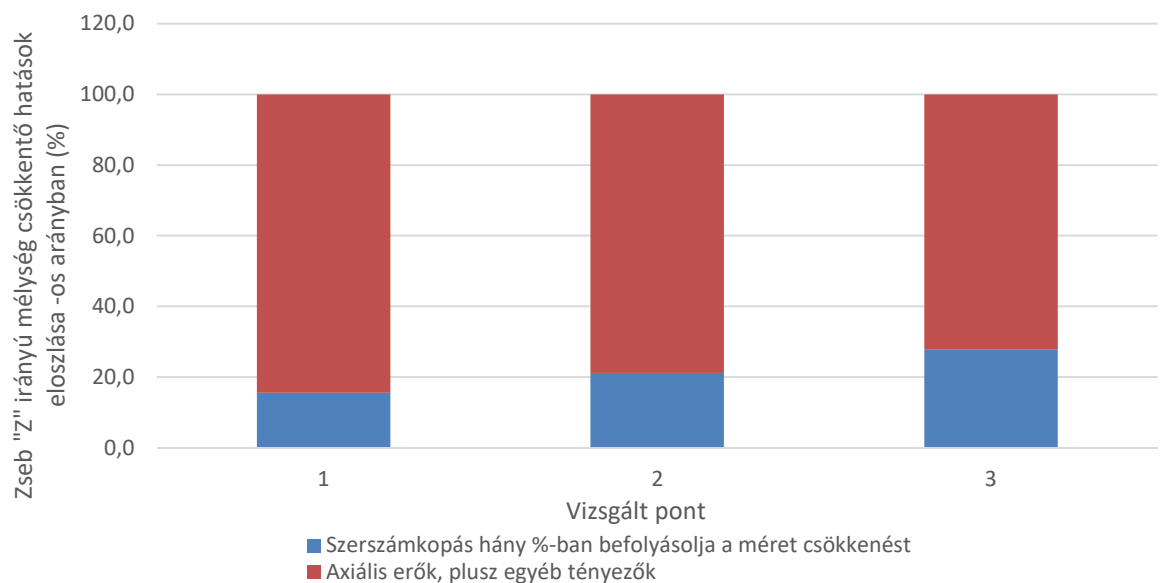
A hullámformához hasonlóan a ciklois szerszám pályánál se magyarázható a zsebek ilyen irányú mélységtorzulása csak a szerszám kopásával. A 6.16 ábrán látható, hogy a zseb mélységért felelős okok közül a lineáris kopás csak 10-20-ban felelős a zsebek mélységcsökkenéséért. A fennmaradó részt a szerszámkopás miatti súrlódási erő tengelyirányú komponense okozza. A 6.15 ábra alapján a lineáris tartományban a zsebek 5-ban térnek el a névleges mérettől. Megvizsgálva a hatások arányát itt is azt kaptam, hogy a szerszám kopás 1-2-ban felelős a hatásért. A maradék a súrlódási erők okozta szerszám deformációval magyarázható.

### Elemzés láncolt szerszám-pálya esetén

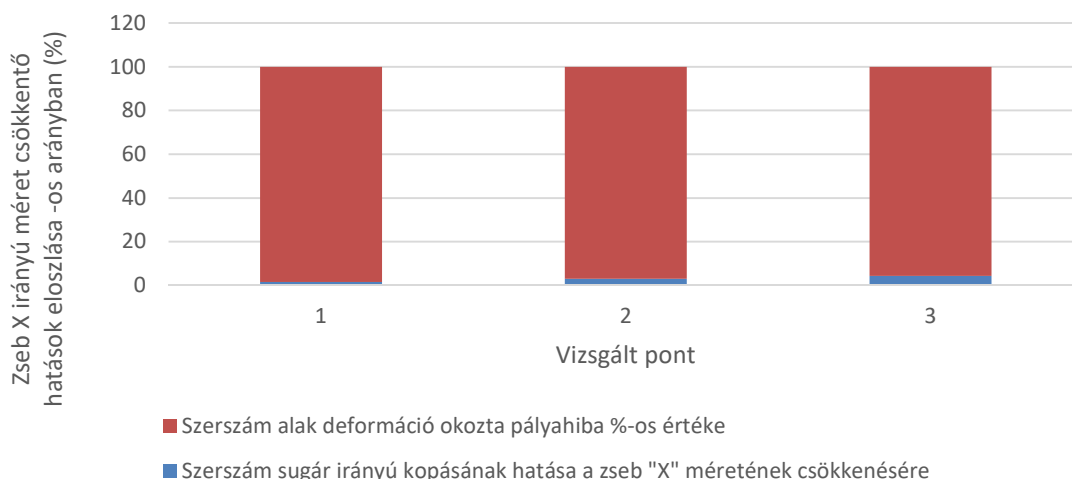


6.19. ábra: Zsebek százalékos méretváltozása a névleges mérethez képest

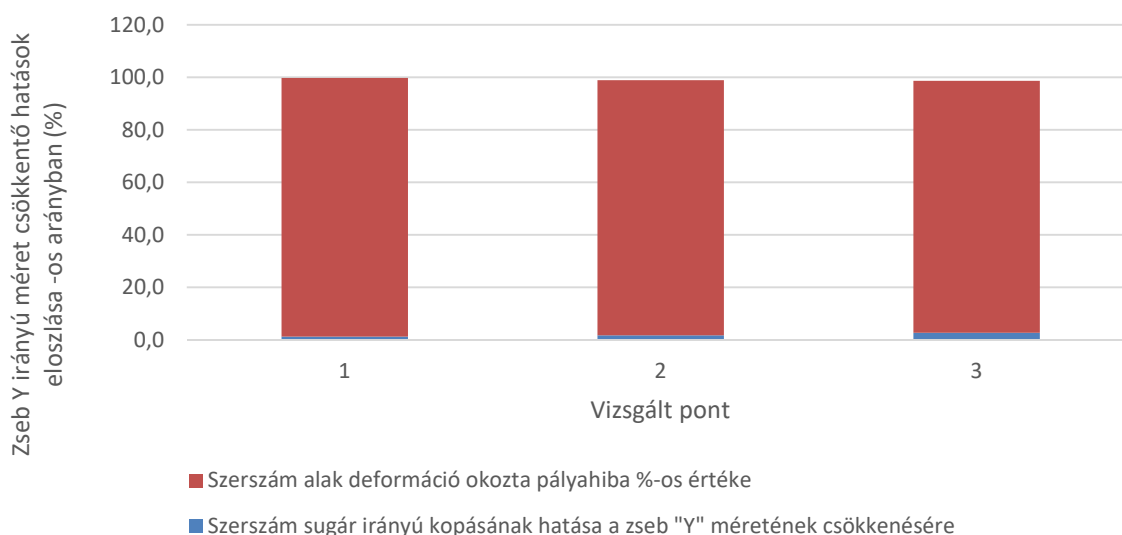
A nagysebességű szerszám-pályáktól eltérően láncolt szerszám-pályánál nem tapasztaltam nagy eltérést a zsebek vizsgált jellemzőinek csökkenésében, de itt is egyértelműen elkülönül a mélység változás a szélesség hosszúsági változásoktól (6.19 ábra).



6.20. ábra: Gyártott zsebek mélységét befolyásoló hatások százalékos eloszlása



6.21. ábra: Gyártott zsebek szélességét befolyásoló hatások százalékos eloszlása



6.22. ábra: Gyártott zsebek hosszúságát befolyásoló hatások százalékos eloszlása

Megvizsgálva a három diagramot (6.20-6.22 ábra) látható, hogy az X-Y irányú méretcsökkenés több mint 90-ban a szerszám deformációra vezethető vissza. A zseb „Z” irányú méretcsökkenésénél már megjelent a szerszám hosszirányú elhasználódása is.

### 6.1.5 Szerszámütés vizsgálat

Ahogy az előző fejezetben is látható volt, a vizsgált szerszám pályák (hullámforma pálya, ciklois pálya, láncolt pálya) mindegyikénél a vágóélek aszimmetrikus elkopása volt tapasztalható. A jelenségre több lehetséges magyarázat is van (szerszám pálya irányváltásaiból adódó egyenlőtlen szerszámterhelés „deformáció”, kerámia alapanyag szemcseméreteinek változása, összetevőinek inhomogenitása, szerszámütés) [122]. A



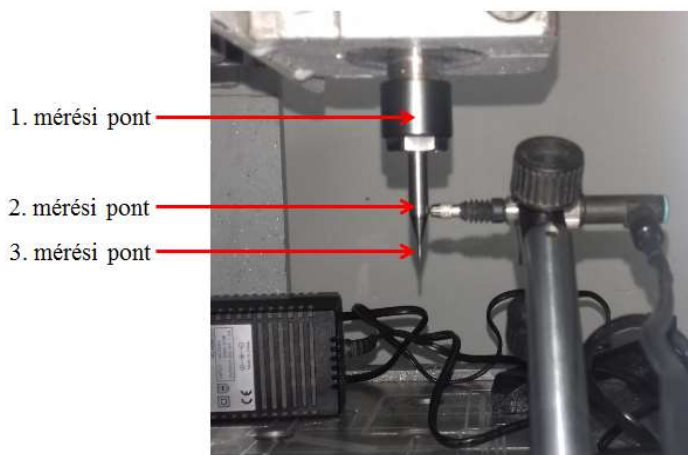
szóba jöhető magyarázatok közül a dolgozat keretein belül a szerszámütés mérésére volt lehetőség. Itt egy Mitutoyo 542-246 típusú finomtapintó lett használva. A mérőrendszer felépítése a 6.23 ábrán látható.



6.23. ábra: Mérőrendszer felépítése

*Mérőkör paramétereit:*

- *Finomtapintó: Mitutoyo 542-246 típus*
- *Felbontás 0.1  $\mu\text{m}$*
- *Mérési bizonytalanság (20  $^{\circ}\text{C}$ ): 0.9  $\mu\text{m}$*
- *Kijelző: Mitutoyo EF-PH*



6.24. ábra: Mérési pontok a szerszámon

A mérés során az ütés három helyen lett mérve (6.24 ábra). és minden mérési pontban 10 ismételt mérés lett elvégezve. Az első mérési pont a befogó patron szintjénél volt. Ezt követően a szerszám hengeres szár rész és a kúpos átmenet határánál, majd végül a szerszám hegyénél. Az adatlapon 0.6 N tapintóerő szerepel, de tartva attól, hogy a tapintófej elnyomja a szerszám hegyét ellenőriztem, hogy valóban bekövetkezik-e a

jelenség. Terheletlen állapotban megvilágítottam a szerszámot, és az árnyékának a helyét megjelöltem a falon. Majd beállítottam a tapintófejet, és ismét megvizsgáltam a szerszám hegyet. Azt tapasztaltam, hogy a hegy nem mozdult el, így az itt végzett mérések elfogadhatónak tekinthető.

A három mérést követően a szerszám eltávolítása és ismételt befogása mellett is vizsgálva lett az eltérés mértéke. Az ismételt befogások során már csak a szerszám hegyénél fellépő ütés volt vizsgálva. Ez háromszor lett megismételve, minden esetben 120°-al elforgatva az előző befogáshoz képest. Az eredményeket a 13-as táblázat foglalja össze. Bár a mérőrendszer felbontása 0.1  $\mu\text{m}$  volt, de a műszer bizonytalansága 0.9  $\mu\text{m}$ , így minden mérési adatot 1  $\mu\text{m}$ -re kell kerekíteni. A kiértékeléskor számolva lett a mérési eredmények átlaga, szórása, valamint készült egymintás t próba próbastatisztika is, arra vonatkozólag, hogy megállapítsam, hogy a várható értéktől való eltérés az a véletlen ingadozásoknak tulajdonítható-e vagy egyéb okok állnak mögötte.

Sorszám	Patron ütése	Szerszámszár ütése [mm]	Szerszámhegy ütése - 1. mérés [mm]	Szerszámhegy ütése -2. mérés [mm]	Szerszámhegy ütése - 3. mérés [mm]
1	0,015	0,020	0,052	0,056	0,057
2	0,017	0,023	0,054	0,057	0,056
3	0,020	0,025	0,054	0,057	0,057
4	0,018	0,026	0,055	0,055	0,059
5	0,020	0,026	0,054	0,059	0,055
6	0,019	0,026	0,054	0,056	0,059
7	0,020	0,027	0,053	0,058	0,055
8	0,018	0,027	0,054	0,059	0,057
9	0,018	0,028	0,054	0,059	0,059
10	0,018	0,028	0,055	0,057	0,058
Átlag	0,018	0,026	0,054	0,057	0,057
Szórás	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002
t próba	-1,68	-1,99	-8,69	2,47	2,45
Nullhipotézis	0,019	0,027	0,056	0,056	0,056

15. táblázat: Mérési eredmények, és számítások

A kiértékelésnél elsősorban a szerszám hegyének ütése a mérvadó, mivel itt helyezkednek el a forgácsoló élek. A mérési eredmények alapján az ütés maximális értéke 0,056 [mm] volt. A három mérésből két mérésnél a t értéke 2,45 körül mozgott (13-as táblázat). Így  $p=0,01$ -es szignifikancia szint mellett  $t_{0,01}=2,821$ , tehát  $t < t_{0,01}$  vagyis az eltérés nem szignifikáns.

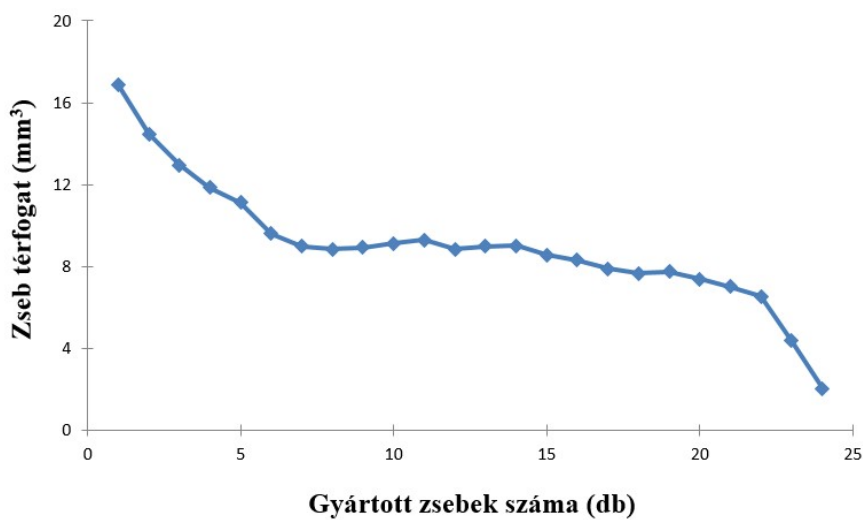
Ez a hatás akkor fejt ki legnagyobb hatását, a gömbmaró 2 vágóéle által meghatározott sík pontosan párhuzamos az ütés irányával. Abban az esetben, ha a sík merőleges az ütés irányára, akkor az ütés elhanyagolható a fogankénti előtolásra gyakorolt hatás szempontjából. Ez a hatás az esetben sztochasztikus jellegű, mivel a szerszámkopás vizsgálata miatt folyamatosan ki-be lett helyezve a szerszám főorsóból. Továbbá a szerszám előtoló mozgása folyamatosan egy kör mentén történ, így a hatás fogankénti előtolásra nézve erősen sztochasztikus jellegű.

## 6.2 Szerszámkopás fázisátmenetek definiálása indirekt módszerrel

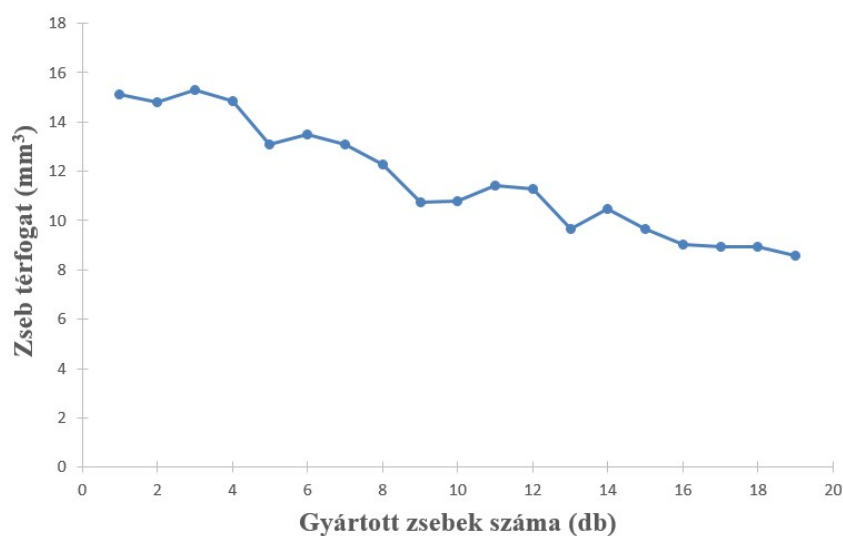
### 6.2.1 Zsebek térfogatváltozása a gyártott darabszám függvényében

A szerszám mikroszkópi elemzését, a szerszám elhasználódás indirekt módszere követte.

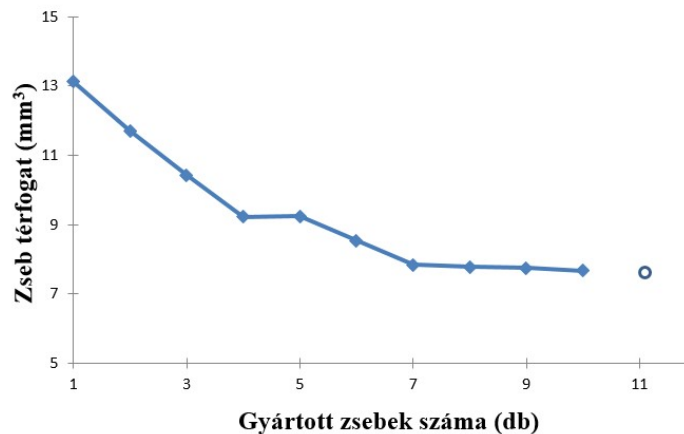
Az egyes pálya stratégiáknál mért geometriai jellemzők (*szélesség, hosszúság, mélység*) alapján kiszámítottam a zsebek, azaz az anyagleválasztás össztérfogatát, majd ezeket az értékeket grafikonon ábrázoltam az egyes megmunkálási stratégiáknál (6.25-6.27 ábrák). Az egyes kopási határok megállapításánál figyelembe vettem a megmunkált zsebek szélének repedezettségét- kipattogzódási állapotát is.



6.25. ábra: Zsebek térfogatának változása hullámforma esetén



6.26. ábra: Zsebek térfogata ciklois szerszám pálya esetén



6.27. ábra: Zsebek térfogatának változása láncolt szerszám pálya esetén

A 6.25-6.27 ábrákon látható, hogy a zsebek térfogatcsökkenésének jellege a szerszámkopáshoz hasonlóan a Taylor féle élettartam görbe jellegét követi, a bekopási szakaszokat illetően mindhárom esetben. Azonban nem minden esetben állapíthatók meg a lineáris kopási tartományok végei a térfogatváltozás alapján, így itt már figyelembe vettem a zsebek széleinek repedezettségi állapotát is.

### 6.2.2 Zsebek szélének kipattogzódása a gyártott darabszám függvényében

Ahogy a 6.2.1-es fejezetben is utaltam rá, a szerszám kopottsági határainak meghatározásánál fontos, hogy több módszerrel is igazolva legyen a Taylor féle élettartam görbe határainak helyessége.

A szerszám kopásával természetesen megváltoznak a forgácsolási körülmények. Ahogy az irodalmi összefoglalóban részletesen is be van mutatva, rideg anyag forgácsolása során két forgácsolási fázis között mozog a munkafolyamat: rugalmas – és rideg forgácsleválasztási tartomány. Az irodalmi kutatások alapján 3 fontos tényező van, amelyek meghatározzák a forgácsleválasztás célszerű tartományát: maximális forgács vastagság rideg anyagoknál ( $h_{\max}$ ), kritikus fogásmélység ( $d_{\text{krit}}$ ) és a szerszám és munkadarab közötti kontaktfelület nagysága (2.4.7 fejezet).

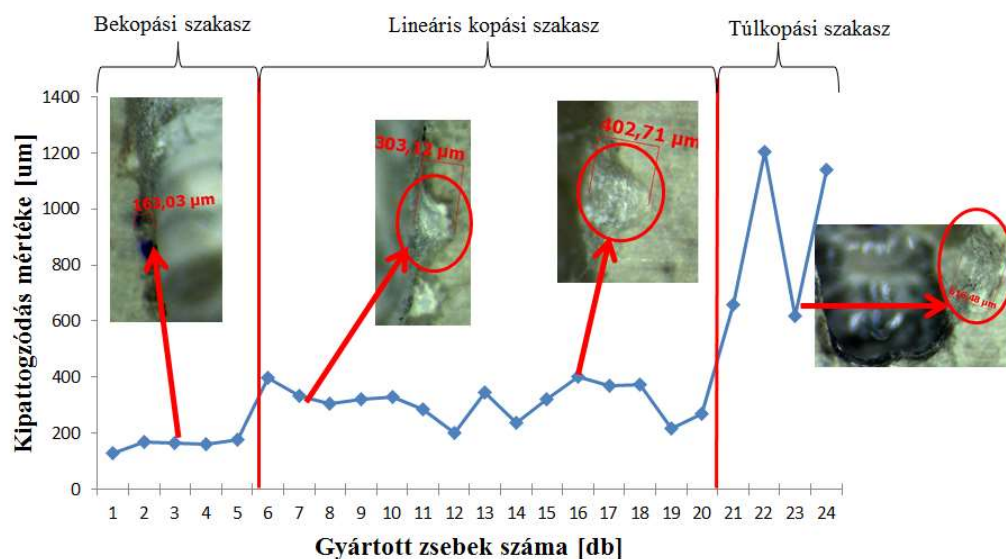
Ha forgácsleválasztás során a szerszám és a munkadarab közötti kontaktfelület megfelelő, akkor, a forgácsleválasztás a rugalmas tartományban megy végbe. A szerszám kopásával ez a felület megváltozik, és a forgácsolási erő oszcillálni kezd, majd a munkafolyamat belép a tranziens zónába. Itt megkezdődik a felület kipattogzása. A rideg forgácsleválasztás tartományában a forgácsolási erő oszcillációja tovább növekszik, és a felület megjelennek a durva- kráteres kipattogzások. Ezt a jelenséget kihasználva a gyártott zsebek széleinek mérésével a forgácsleválasztás tartományára lehet következtetni.



6.28. ábra: Gyártott zseb vizsgálati szempontja

A mikroszkópi felvételek készítése során a zseb peremére fókuszáltam az optikát, így a kép csak azon részes éles, ami a vizsgálat szempontjából fontos információkat tartalmaz. A kiértékelés során a zseb külső pereme lett vizsgálva (6.28 ábra). Egyrészt vizsgálva volt az alapanyag repedezettsége, anyagszemcsék kipattogzódásának nagysága, másrészt ezen hibák előfordulási darabszáma a gyártott zsebek kerülte mentén. A kiértékelés során a 10 legnagyobb kipattogzást átlagoltam. Abban az esetben, ha 5 alatti volt a hiba értéke, akkor a legnagyobb hibát vettem alapul. Továbbá figyelembe vettem a kipattogzás hosszát és függőleges irányú mélységét is. Ha a kipattogzás hossz, és függőleges mélység értéke megközelítőleg a duplája volt a hiba vízszintes mélységének (sík irányú terjedésének), akkor a hiba 3 iránya közül a legnagyobbba értéket vettem figyelembe.

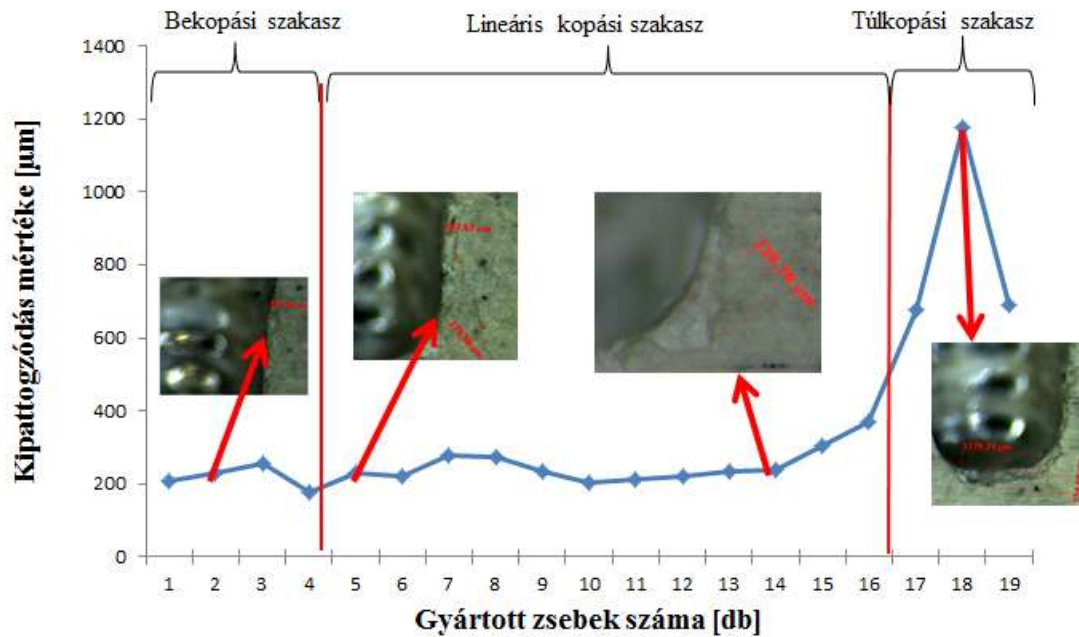
### 6.2.2.1 Zseb szélek kipattogzása hullámforma szerszámpálya alkalmazása során



6.29. ábra: Anyag kipattogzás hullámforma szerszámpályánál

Hullámforma szerszámpanyánál 3 szakasz különböztethető meg (6.29 ábra). Az első 5 zsebnél a zsebek szélén elvétve, 180-190 $\mu\text{m}$  nagyságú kipattogzásokat figyeltem meg. A 6. zsebtől a kipattogások mérete ugrásszerű növekedést mutatott. Az átlagos méretük 300-400  $\mu\text{m}$  között mozgott. Ez a folyamat a 20. zsebig volt megfigyelhető. A 21. zsebtől a széle mentén folytonos kipattogzás, kráteres kipattogzás volt megfigyelhető, aminek mérete átlagosan 600-1000 $\mu\text{m}$ .

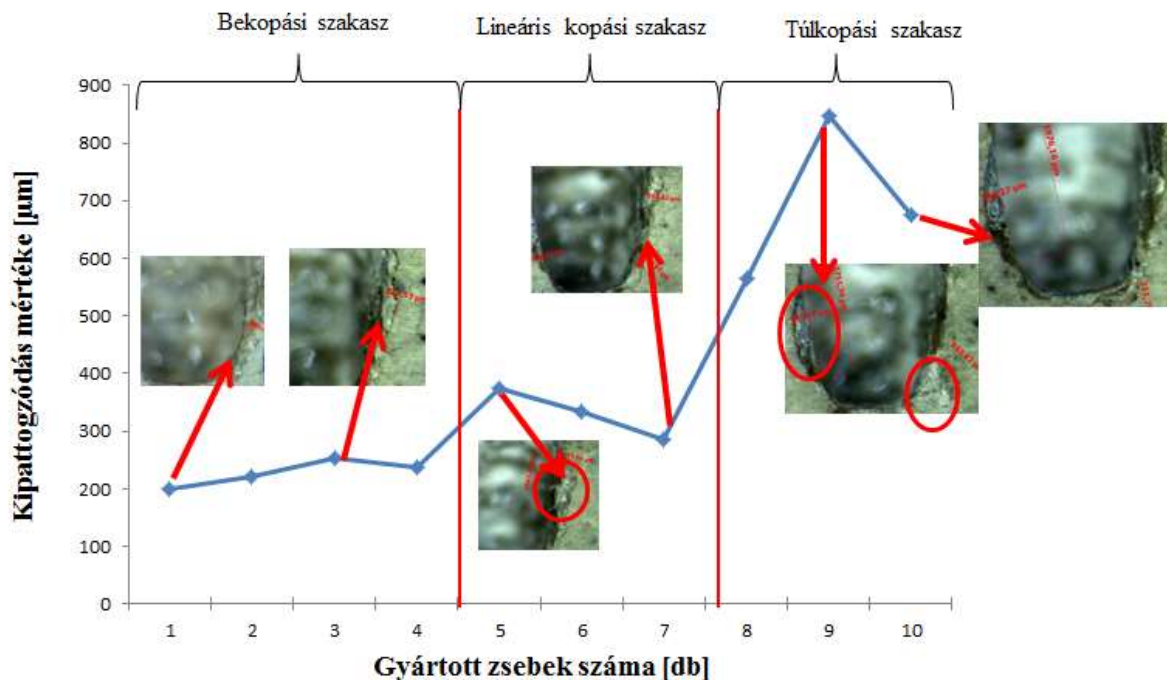
### 6.2.2.2 Zseb szélek kipattogása ciklois szerszámpanya alkalmazása során



6.30. ábra: Anyag kipattogás ciklois szerszámpanyánál

A ciklois szerszámpanyánál az anyagkipattogzás az első 15 zsebig csaknem változatlan értéket mutatott (180-200  $\mu\text{m}$ ) (6.30 ábra). Az első 4 zsebig a kerület mentén 1-2 ilyen hely volt megfigyelhető, azonban az 5. zsebtől a vizsgált kontúr majdnem teljes hosszán megfigyelhető ez a jelenség. Ezért a bekopás szakaszát a 4. zsebnél húztam meg. A 16. zsebnél volt megfigyelhető a kráteres kipattogzás. Innentől a kárterek méretei gyors növekedésnek indultak végig a kerület mentén.

### 6.2.2.3 Zseb szélek kipattogzása láncolt szerszám pálya alkalmazása során



6.31. ábra: Anyag kipattogzás láncolt szerszám pályánál

A láncolt szerszám pályán a többi stratégiához hasonlóan az első szakaszban itt is 180-200 µm között volt a kipattogzások átlagos szélessége (6.31 ábra). Azonban a többivel ellentétben itt nem elszórva jelentek meg, hanem összefüggően 1-1.5 mm hossz mentén volt megfigyelhető a jelenség. Az első szakasz a 4. zsebig közel változatlan volt. Az 5 zsebtől a kráterek szélességi méretei 280-300 µm-es értékek között mozogtak. Az utolsó fázis a 8. zsebtől következett, ahol szinte a teljes gyártott geometria szélén kipattogások és kráteres kopások voltak megfigyelhetők.

### 6.2.3 Szerszámkopás határok definiálása a 2 módszer alapján

A gyártott zseb jellemző méretei (hosszúság, szélesség, mélység) a szerszám kopásával csökkennek, és ezek a változások együtt futnak a szerszám pillanatnyi kopottsági állapotával. Hagyományos "makro" megmunkálásoknál az előállított méret közvetlenül áll összefüggésben a szerszám kopottsági állapotával. Mikro-marásnál a szerszám kis átmérője, és a hozzávetőleges nagy hossza miatt a szerszám nagyobb mértékben deformálódhat, mint makro mérettartománybeli társai mind fém mind kerámia megmunkálás során. Ezért az előállított geometriai méret csökkenés a szerszámkopásból, a forgácsolási erők torzításából, valamint a rezgések deformáló hatásának, és egyéb összetevők (*szemcseorientáció hatás stb.*) összegéből adódik ki. Emiatt mikro-geometriai megmunkálásnál egy jó mérőszám az előállított geometriai méret mérése, mivel ott a végeredményt mérjük [2].

A zseb méretek csökkenése jól nyomon követhető módon mutatta a jelenség lefutását. Rideg anyag megmunkálásra miatt az előállított zseb repedezettsége, törése is információval szolgál a szerszám pillanatnyi állapotáról. A két hatást elemezve egyértelműen meghatározható a Taylor féle lefutási görbe 3 tartománya. A szerszám élgeometria elhasználódása is egyértelműen Taylor féle élettartam változást mutat. A két mérési rendszerben a váltópontok nagyságrendileg egybe esnek. A teljes bizonyosság azért nem jelenthető ki, mivel minden 5.zsebnél mértünk csak, így a köztes szerszámállapotról nincs információ, de így is megállapítható hogy a váltópontok jól egybe esnek.

### ***Taylor féle élettartam görbe határainak meghatározása az egyes szerszám pályánál***

A hullámforma szerszám pályánál a térfogatváltozás alapján a bekopási szakasz vége a 5. zsebnél következik be. A zsebek szélének kipattogzottsági állapota alapján a bekopási szakasz vége szintén az 5. zseb végére esik.

A lineáris kopási szakasz vége a 21. zsebnél következik be a térfogatváltozás alapján. A kipattogzódás alapján már a 20. zseb széle is erősen roncsolódott, így a lineáris kopási szakasz végét a 20. zsebnél határoztam meg.

Ciklois szerszám pályánál a bekopási szakasz a 4. zseb után ér véget a térfogatváltozás alapján. A 4. zsebig a perem roncsolódása minimálisan jelentkezik csak. Az 5. zsebtől azonban a teljes területen megjelenik a zseb szélek letöredezése. A lineáris kopási szakasz egyértelműen nem volt eldönthető a zsebek térfogatcsökkenése alapján. Azonban a zsebek szélének kipattogzódásának erősödése mutatta, hogy a 16. zsebnél már a túlkopási tartományba lépett a szerszám.

Láncolt szerszám pályánál estében mind a térfogatváltozás mind a kipattogzódás alapján a 4. zsebnél lépett a szerszám a lineáris kopási tartományba. A túlkopási szakasz a térfogatváltozás alapján itt sem dönthető el egyértelműen. A kipattogzódás azonban a 8. zsebtől gyorsult, így ott lépett a szerszám a túlkopási tartományba.

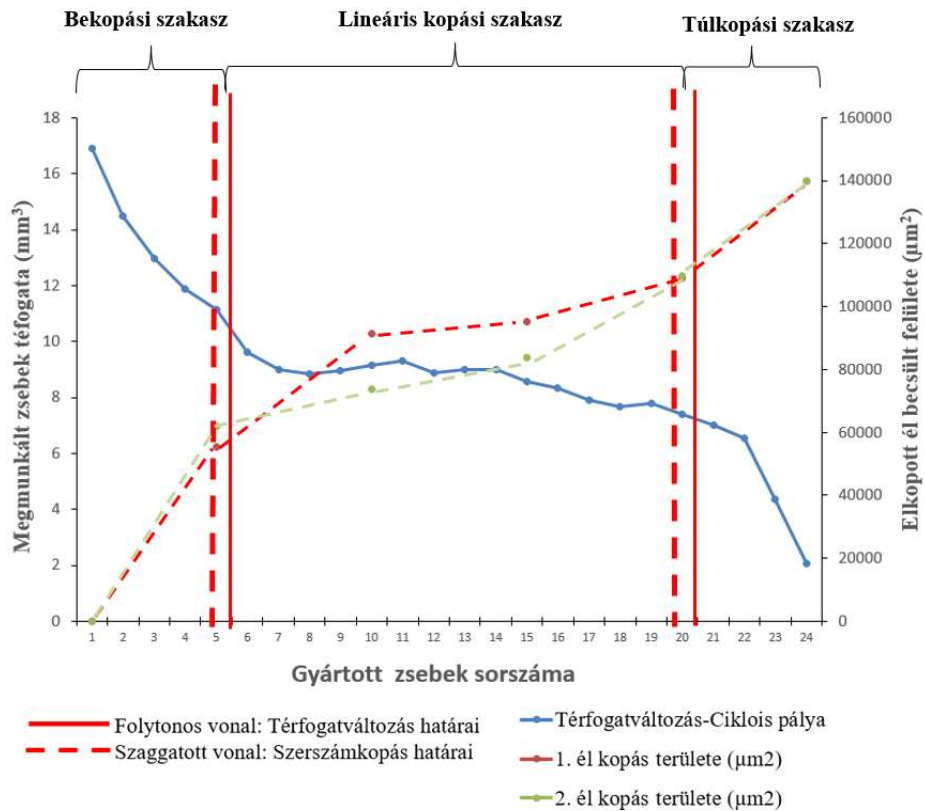
A határokat a 14. táblázatban foglaltam össze. Ezek alapján a jellemzőválogató módszer „Feature Selection” (innenről: FS módszernél alkalmazott, kimeneti) kimeneti tartományait is meg tudtam határozni (15. táblázat). A kétszintű vizsgálat célja volt, hogy meg legyen határozva az a pont, ahol a szerszám teljes mértékben elkopott. A másodikként vizsgált, háromszintű felosztásnál már finomabb közelítés van, mivel itt a bekopási-normál kopási, és túlkopási átmenetek is külön monitorozva vannak.



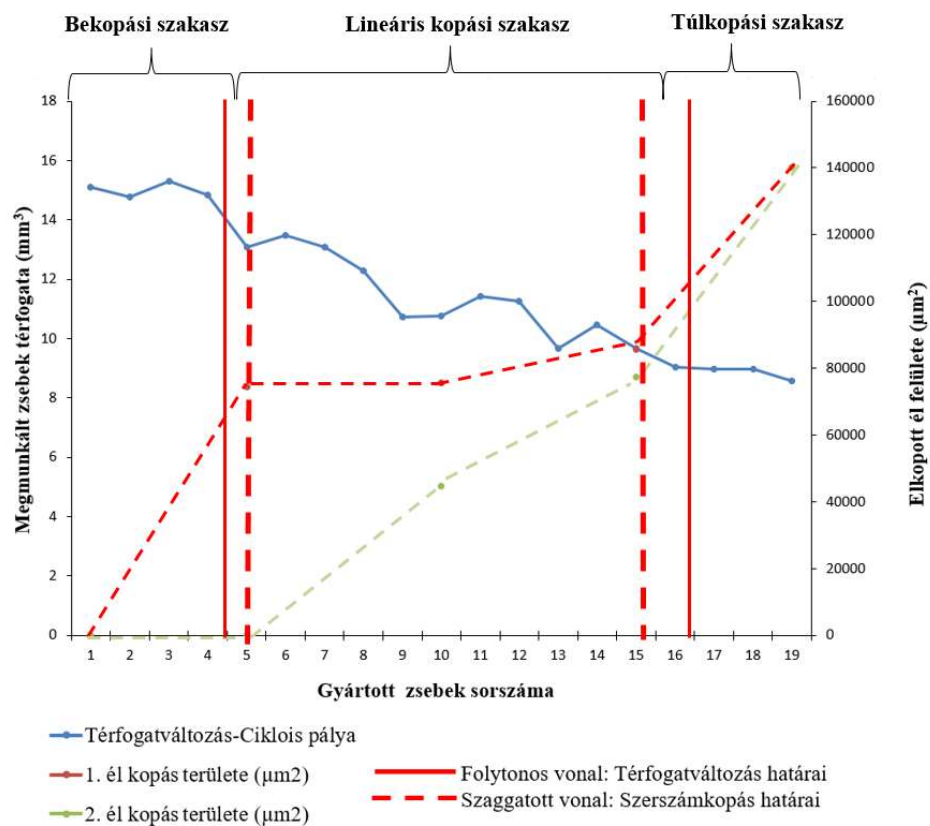
<b>Térfogatváltozás alapján 2 szintű kopásfelosztása Hullámforma esetén</b>			
-	<i>Éles szerszám (0)</i>	<i>Kopott szerszám (1)</i>	
<i>Szerszám állapot</i>	1-20	21-24	
<b>Térfogatváltozás alapján 3 szintű kopásfelosztása Hullámforma esetén</b>			
-	<i>Bekopás (0)</i>	<i>Normál kopás (1)</i>	<i>Túlkopás (2)</i>
<i>Szerszám állapot</i>	1-5	6-20	21-24
<b>Térfogatváltozás alapján 2 szintű kopásfelosztása Ciklois forma esetén</b>			
-	<i>Éles szerszám (0)</i>	<i>Kopott szerszám (1)</i>	
<i>Szerszám állapot</i>	1-16	17-19	
<b>Térfogatváltozás alapján 3 szintű kopásfelosztása Ciklois forma esetén</b>			
-	<i>Bekopás (0)</i>	<i>Normál kopás (1)</i>	<i>Túlkopás (2)</i>
<i>Szerszám állapot</i>	1-4	5-16	17-19
<b>Térfogatváltozás alapján 2 szintű kopásfelosztása Láncolt forma esetén</b>			
-	<i>Éles szerszám (0)</i>	<i>Kopott szerszám (1)</i>	
<i>Szerszám állapot</i>	1-7	8-10	
<b>Térfogatváltozás alapján 3 szintű kopásfelosztása Láncolt forma esetén</b>			
-	<i>Bekopás (0)</i>	<i>Normál kopás (1)</i>	<i>Túlkopás (2)</i>
<i>Szerszám állapot</i>	1-4	5-7	8-10

16. táblázat: Kopás határok a zsebek térfogatváltozása alapján

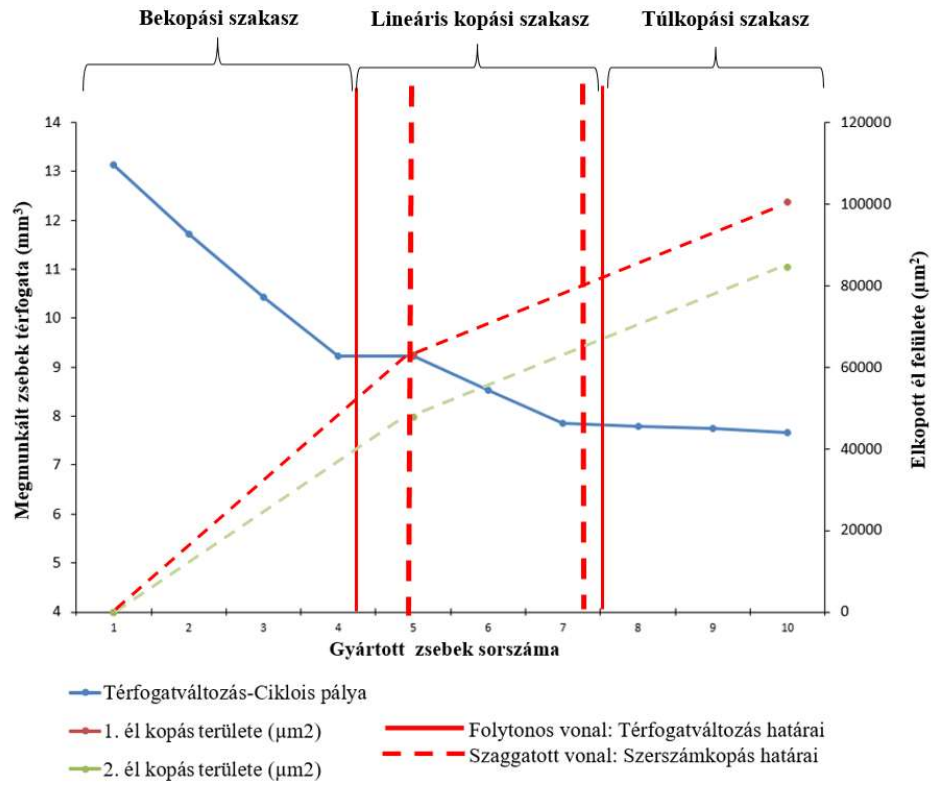
Összehasonlítva a szerszámkopási határokat a zsebek térfogatváltozásával, jól látható a kapcsolat, hogy a zsebek geometriai jellemzőinek mérésével a szerszámkopás nyomon követhető (6.32-6.34 ábrák). A hullámforma, és ciklois szerszám-pálya esetén ezek a határok könnyen meghatározhatóak. A láncolt szerszám-pályánál a szerszám kevés mintavételezési pontja miatt, a határok kevésbé egyértelműek az előző két pályához képest. Így ebben az esetben a határokat a zsebek szélének kipattogzás vizsgálatával tovább finomítottam.



6.32. ábra: Taylor féle élettartam görbe átmenetek szerszámkopás – zseb térfogatváltozás függvényében, hullámforma szerszámpanyánál



6.33. ábra: Taylor féle élettartam görbe átmenetek szerszámkopás – zseb térfogatváltozás függvényében, ciklois szerszámpanyánál



6.34. ábra: Taylor féle élettartam görbe átmenetek szerszámkopás – zseb térfogatváltozás függvényében, láncolt szerszám pályánál

## 7 Szerszámkopás felügyelet a rezgésjelek alapján

A mikroforgácsolás során a szerszám elhasználódásának egyik oka a forgácsolás során keletkező rezgés. A rezgések elsősorban a nyírási síkban a rugalmasan deformálódó anyag miatt jönnek létre. De visszavezethető a szerszám hátkopásra, a forgácselem szerszám súrlódására is [125]. Dornfeld [126] [127] akusztikus emissziós (AE) jelekkel követték nyomon a szerszám elhasználódását. Jemielniak és Otman kidolgoztak egy módszert a szerszám kopottsági állapotának meghatározására, ami az AE jelek statisztikai elemzésén alapul [128]. Kakade [129] a szerszám kopottsági állapotát tudta előre meghatározni csak a rezgésjelek alapján.

A szakirodalmi kutatás alapján is kijelentető, hogy az eddigi elemzéseken túlmenően fontos, hogy a forgácsolás során keletkező rezgések is a vizsgálat tárgyát képezzék, mivel a kerámia megmunkálás kutatásánál ez egy kevésbé feltárt terület. Ugyanakkor ismert, hogy a szerszámkopás monitorozásánál ez egy gyakori diagnosztikai módszer [130] [131] [125] [132].

A szerszám elhasználódása során változik a szerszám élgeometriája. Ennek eredményeképpen változik a munkadarab és a szerszám közötti kontaktfelület mérete, aminek következtében a fellépő rezgések amplitúdója folyamatosan változik. Ezt támasztják alá többek között Bhuiyan és szerzőtársai kutatásai is [133], akik a szerszám elhasználódása és a rezgés amplitúdó növekedése közötti korrelációt állapítottak meg esztergálás során. Mustafa és munkatársai [134] azonban ettől eltérő eredményre jutottak. Ők azt tapasztalták, hogy bizonyos körülmények között a forgácsoló szerszám kontaktfelületének csökkenésével a rezgés amplitúdó értéke is csökkenő tendenciát mutat. Ahmad és szerzőtársai [135] esztergálási kísérletei során szintén hasonló eredményeket kaptak, ők is arról számoltak be, hogy a hátkopás növekedésével a rezgés amplitúdó csökkenése volt megfigyelhető.

Az irodalomban talált kutatások alátámasztják, hogy a rezgések monitorozásával következtethetünk a szerszám elhasználódásának alakulására. Azonban, hogy melyik tartomány irányába tolnak a rezgésösszetevő értékek, erősen függ a megmunkálási körülményektől. Továbbá ahogy fentebb is utaltam rá, kerámia alapanyagra vonatkozóan ilyen irányú kutatást nem találtam az irodalomban, így ez egy feltáratlan területet a tudomány berkeiben. Valamint ezen kísérleteim már az Ipar 4.0 –ás megmunkálási eljárások irányvonalába is jól beleillenek, mivel a modern gyártás folyamatokba egyre több szenzoros megfigyelési épül be. [136] [137] [138].

A fejezet célja, hogy a kerámia alapanyag mikroforgácsolása során keletkező rezgések és azok összetevőit különböző szerszám pályák alkalmazása mellett detektáljam, valamint a rezgések és a szerszám elhasználódás folyamata közötti kapcsolatok feltárjam. Ehhez a szerszám pályák vizsgálata során gyűjtött rezgés adatokat használtam fel. A rezgések vizsgálatát a hullámforma szerszám pályánál, láncolt szerszám pályánál és a ciklois szerszám pályánál is elvégeztem. A többi technológiai ( $v_f$ ,  $n$ ,  $a_p$ ,  $a_e$ , dőlésszög) paraméter rezgésekre gyakorolt hatását nem vizsgáltam, viszont a további kutatásaimban célolok, hogy ezeket hatását is megvizsgáljam.

## 7.1 Összetett gépszerkezetek rezgésjelei

A forgó gépek működése közben ébredő alternáló erők periodikus rezgéseket keltenek. Minden egyes szerkezeti elem más-más mechanikai (fizikai) tulajdonsággal – különböző merevséggel, csillapítással, sajátfrekvenciával – bír, maga a gépszerkezet egésze pedig a fellépő dinamikus erők szempontjából csillapított, több szabadságfokú rendszerként modellezhető. Az elemi lengőrendszer rugóból és tömegeből áll, és a lengések sajátkörfrekvenciája a következő módon hadható meg:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \left[ \frac{1}{s} \right]$$

Ahol:

- $k$  – a rugóállandó,  $N/m$
- $m$  – tömeg,  $kg$

Ebben az esetben a lengéskép tiszta szinuszhullámot követ. Egy összetett géprendszer mint pl. egy megmunkáló szerszám gép, sok elemi lengőrendszerből tevődik össze, más és más sajátfrekvenciákkal. Az elemi részek egymáshoz csatolódnak, ún. többtömegű rezgőrendszert képezve egymásra hatnak. Ennek az a következménye, hogy egy gépszal frekvenciája  $10^4$  Hz nagyságrendű, a főorsóé  $10^3$  Hz. A különböző frekvenciák egymásra hatása, szuperpozíciója következtében az eredő lengéskép torzított szinuszhullám, amelynek összetevőit Fourier analízissel lehet meghatározni. Itt fontos követelmény, hogy a torzított hullámok egymás utáni ciklusokban nagyjából azonosak legyenek, azaz a vizsgált sztochasztikus folyamat legyen stacionárius.

Forgácsoláskor a forgácsoló erő gerjesztő erőként hat, és tovább bonyolítja a képet. Legalább 100 éves ismert a szerszámok lehetséges rezonanciája (chatter, washbording), de csak 1950 körül tisztázták, hogy ez a folyamat az öngerjesztéses rezonancia. A dinamikus és változó forgácsoló erő az egymás utáni ciklusokat változtatni tudja. Ez a

körülmény megnehezíti a helyes értékelést, mert nem mindegy hogy melyik ciklus Fourier analízisét vesszük alapul.

Közismert, hogy a csillapítás csökkenti a frekvenciát. A különböző csillapítási módok, sebességgel arányos, vagy súrlódásos hatása külön és együtt is jelen lehetnek. Mivel a csillapítási tényezőt szinte soha nem tudjuk pontosan, hatásuk számítással nem nyomon követhető, de a mérési eredmények korrekt értékelését is megnehezítik. Például régóta ismert az öntöttvas jobb csillapítása, ezért a gépágyat régen jobbára abból készítették. A súrlódásos csillapítás legtöbbször a súrlódási munka következménye, pl. gömbmaróknál kopott állapotban.

A mi esetünkben a súrlódásos munka a kopással növekszik, és ki lehet használni a kopási folyamat monitorozására.

Egy gép általános elhasználódása során a szerkezetben minden mozgó alkatrész rezgési tulajdonsága változik. A forgácsoló szerszámok elhasználódása nagyságrendben gyorsabb, mint a gép többi alkatrészének kopása. Ezért egy rövidebb időciklust figyelve a szerszámkopás határozza meg a mérhető változásokat. De a gép teljes élettartama alatt egy-egy szerszámkopási ciklusban már változások lehetnek.

A fentiekből következik, hogy egy összetett szerkezetű gép rezgésviszonyai elméleti úton nem követhetők, nem tudjuk a szükséges bemenő adatokat, mint pl. a rugóállandók, rész-tömegek, és csillapítási tényezők.

## 7.2 Mérés és adatgyűjtés

A rezgésméréshez egy TE-CONNECTIVITY típusú gyorsulásmérő szenzort alkalmaztam. A mérőeszközzel a rezgés gyorsulás pillanatnyi amplitúdó értékének megfelelő villamos kimenőjelet mérjük mV-ban. A továbbiakban ezt a folyamatot értjük rezgésmérés alatt. A rezgés gyorsulás pillanatnyi amplitúdó érték fogalmát pedig a rezgésjel kifejezéssel helyettesítem.

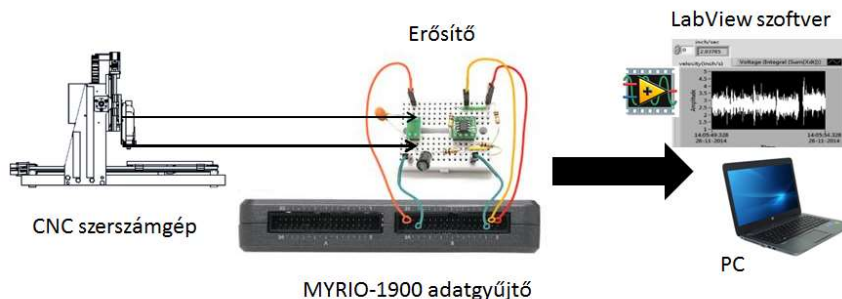
### ***Szenzor adatai:***

- *Gyártó: TE-CONNECTIVITY*
- *Gyártási cikkszám: 805M1-0020-01*
- *Érzékenység: 100mV/g*

A szenzor a mérőkör összeállítása során a kerámia lap oldalára lett rögzítve. A szenzorból érkező jel egy egyedi építésű erősítőn keresztül és egy adatgyűjtő egységen át egy National Instruments (LabView) program segítségével került rögzítésre. A mérőlánc felépítése a 7.1-7.2-es ábrán látható módon lett kialakítva.

### Alkalmazott adatgyűjtő egység

Az erősítőtől érkező jeleket egy myRIO-1900-as hordozható, újra konfigurálható I/O (RIO - Reconfigurable Input/Output) készülékkel lettek rögzítve [139]. Ezt az eszközt a gyártó mérési feladatok elvégzésére; vezérlések, robotok és egyéb mechatronikai rendszerekre optimalizálta, így jól illeszkedett a megoldandó feladathoz is.



7.1. ábra: Mérőrendszer sematikus vázlata

A mérés során a beállított mintavételezési frekvencia 100kHz volt.

Ajánlott:  $f_m > 10f_{max}$  [140] Ajánlott:  $f_m > 10f_{max}$  [140]

Ahol:

- $f_m$  mintavételezési frekvencia
- $f_{max}$ : vizsgált jel maximális frekvenciájú összetevőjének megfelelő frekvencia



7.2. ábra: Mérőkör felépítése

A kísérletek során gyűjtött adatok MATLAB szoftverben lettek feldolgozva, valamint a FS kiértékelésre használt AHFS algoritmus is MATLAB környezetben futott.

## 7.3 Rezgés adatok feldolgozásának menete

### 7.3.1 Rezgés adatok kiértékelés nyers adatsor alapján

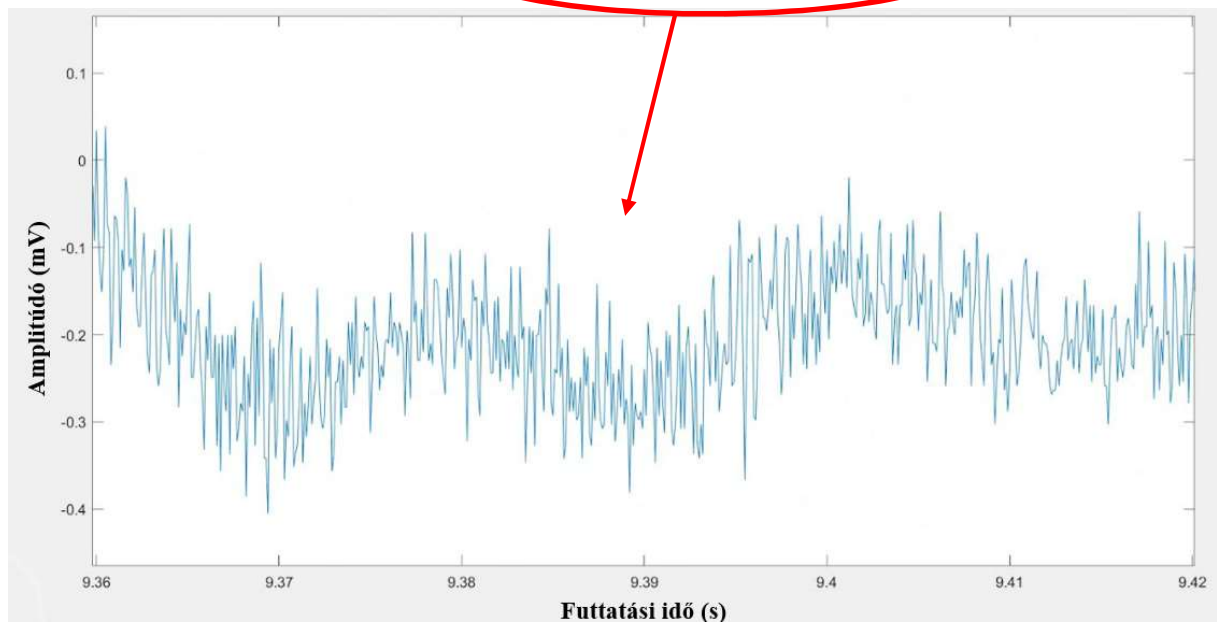
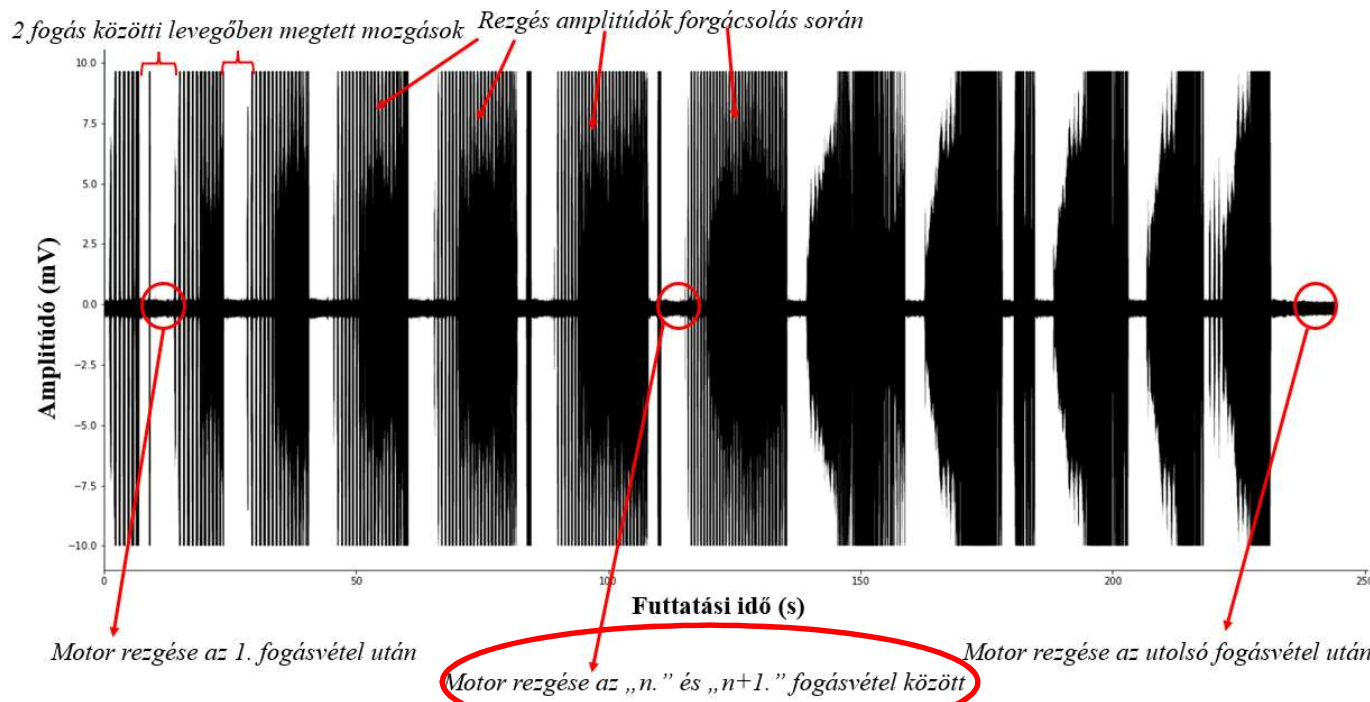
A mérések célja etalon frekvencia vagy amplitúdó görbék összeállítása a szerszám teljes élettartam alatt, amelyek lehetővé teszik a szerszám gyártásközbéli pillanatnyi állapotának meghatározását és a tervszerű szerszámcsere megvalósítását. Ez lehetőséget ad arra is, hogy közvetett módon a gyártási pontosság becsülhető legyen. Egyben képet ad arról, hogy az egyes marási pálya stratégiák okozta kopásmechanizmus hogyan változtatja az elkészíthető zsebek számát. Az etalon karakterisztika azt is mutatja, hogy a szerszám elhasználódás mikor lép a túlkopás fázisába, ahonnan kezdve a szerszám tönkremenetele felgyorsul, a marási energia növekszik, a felületi minőség romlik.

Lényeges kérdés az is, hogy az etalon karakterisztikák mennyire hasonlók egymáshoz a különböző marási pálya stratégiák esetén és egymásba tolhatók-e az időtengely vagy a gyártott zsebszám mentén?

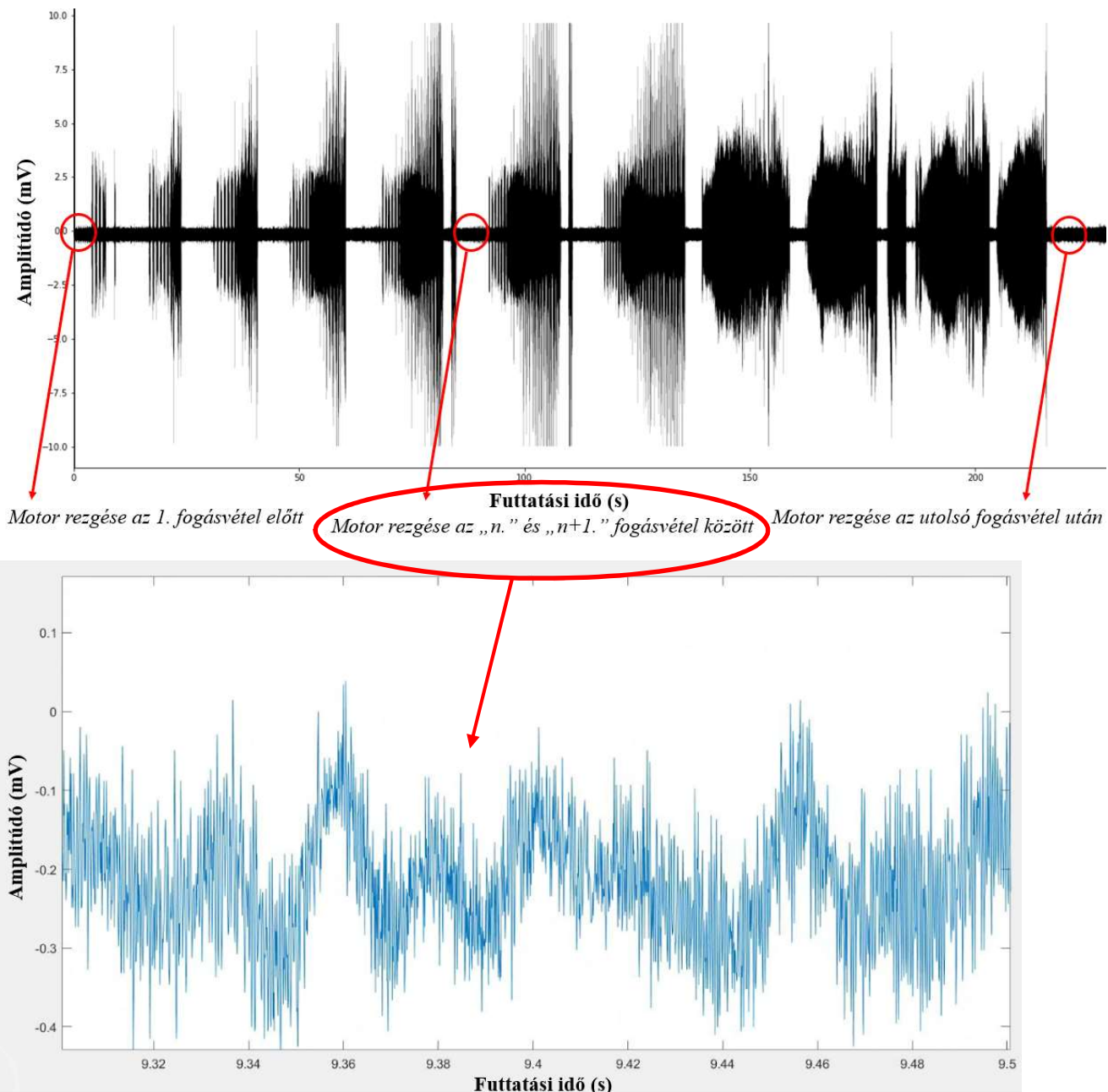
A kiértékelés szempontjából még egy fontos körülmény van. A mért egymás utáni gyorsulási ciklusok erősen torzítottak a rendszer kölcsönhatásainak következtében, és ráadásul nem azonos módon. Az utóbbiból egyenesen következik, hogy a Fourier felharmónikusok frekvenciája és amplitúdója erősen függ attól, hogy épp melyik alapciklust dolgozzuk fel. Ugyanakkor az alapprofrekvenciát a zavaró tényezők kevésbé módosítják. Ezért az alapprofrekvencia változása megbízhatóbb bemenő adat az etalon karakterisztika felvételéhez. Mint később látni fogjuk a hálózati 50Hz-es zaj is megjelenhet, de ez az alapprofrekvenciára nincs hatással.

A gyorsulás mérhető a főorsón és az asztalhoz rögzített munkadarabon. A mérhető alapprofrekvenciák nagyjából tízszeres szorzóban különböznek egymástól. Célszerű a főorsón mérni több szempontból. Itt a frekvencia ezres nagyságrendű ( $10^3\text{Hz}$ ) tehát regisztrálása pontosabb az adott mintavételezés mellett. A munkadarab cseréjekor nem kell a gyorsulásmérőt levenni, és a másik darabra feltenni. Sőt, nagyobb frekvenciák mérésekor az erősítő frekvencia karakterisztikája is limitálhatja a pontosságot. Esetemben a marómotor kialakítása miatt a szenzort nem tudtam megfelelő módon rögzíteni a főorsón, így a munkadarab oldalán helyeztem el.





7.3. ábra: A motor rezgés mérésre gyakorolt hatásának vizsgálata az 1. zsebnél.



7.4. ábra: A motor rezgés mérésre gyakorolt hatásának vizsgálata az utolsó zsebnél.

Az első zseb (új szerszám) készítésekor felvett gyorsulás jeleket a 7.3-as ábra szemlélteti. Az ábra alsó része a főorsó lengéseit mutatja be üresjáratban, két fogás között. A főorsó alap lengés-száma üres menetben hozzávetőlegesen 1400Hz. Az első 7 ciklusban a lengés amplitúdók állandók, míg a későbbi ciklusokban a ciklus elején kisebb amplitúdók, majd a ciklus végéig nagyobb amplitúdók adódnak.

A szerszám elhasználódása végén (7.4-es ábra) a lengéskép gyökeresen megváltozik. A marási ciklusok egyenlőtlensége a lengés amplitúdót illetően erősen változó egy cikluson belül, és az egymás utáni ciklusokban is. Itt is jellemző az amplitúdó növekedése a ciklus végén. A kopás okozta súrlódási veszteségek az amplitúdót észrevehetően csökkentik. A

főorsó üresjárat frekvenciája nem változik, de a hálózat 50Hz-es zaja modulálja a frekvencia menetét.

A fenti két ábra értékelése alapján megállapítható, hogy a lengés amplitúdó nem követi a kopást arányosan és így etalon karakterisztika gyanánt nem használható.

### 7.3.2 Etalon görbe keresése Adaptive Hybrid Feature Selection algoritmus segítségével

A rezgésadatok kiértékeléséhez a témavezetőm által definiált és tanítványaival együtt fejlesztett és publikált, ún. Adaptive Hybrid Feature Selection (AHFS) jellemzőválogatási módszert alkalmaztam [141]. Az egyszerűség kedvéért később FS (Feature Selection) és AHFS rövidítéssel hivatkozom rá. A módszer lényege abban áll, hogy kapcsolatot keresünk a megmunkálási folyamat kimenetei jellemzői (zseb méretének változása „jelen esetben méretcsökkenésük jellegében”, szerszám elhasználódás folyamata stb.) és a kísérlet során rögzített rezgésjelek összetevői (frekvencia, amplitúdó) között, illetve meghatározzuk a kapcsolatot leginkább befolyásoló (input) változókat. Ezt a kapcsolatkeresést a FS módszer alkalmazásával valósítjuk meg, amely kedvező működést mutatott változatos gyártási és nem gyártási körülmények között is [141].

Az AHFS módszer lényege, hogy sok lehetséges (input) befolyásoló paraméter közül, sorba rendezve meghatározza, hogy mely paraméterek a befolyásolók leginkább az adott kimentet. A módszer jelen alkalmazásban két fő kimenetet ad:

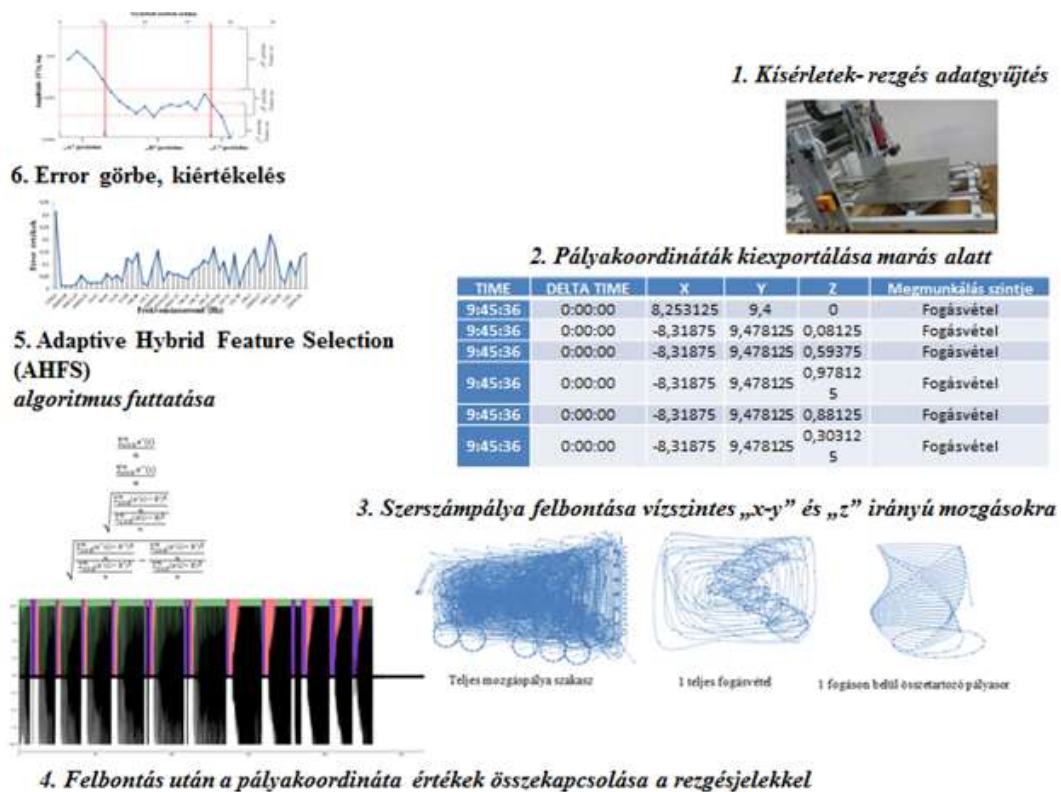
1. *A sorba rendezett bemeneti változók sorrendje (neve)*
2. *A sorba rendezett változókból felépített mesterséges neurális hálók átlagos négyzetes modell-hibája, illetve ennek lefutása (ún. error vagy hiba görbe).*

Az AHFS alkalmazásához olyan vektorpárokat kell biztosítani, ahol az ún. input vektorok a (nagy számú) bementi (akár folytonos, akár diszkrét) adatokat tartalmazzák, míg az ún. output vektorok diszkrét osztályokat írnak le (pl. két osztály esetén 0/1 adatértékkel). Ilyen vektorpárokból álló adathalmaz alapján az AHFS meghatározza, hogy mely bementi paraméterek terében válaszhatóak szét leginkább a kimeneti osztályok, ezt az algoritmus a state-of-the-art információelméleti és statisztikai mértékek versengő alkalmazásával keresi meg [141]. Az algoritmus már számos kutatási és ipari esetben is sikeresen került alkalmazásra az elmúlt években, a működését leíró cikk és az algoritmus forráskódja is szabadon elérhető és letölthető az interneten:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320321001199>
- <https://github.com/viharoszsolt/AHFS>

A módszer a futása közben mesterséges neurális hálózatokat (Multilayer Perceptron, MLP) használ a potenciális jellemzők kiértékelésére [141]. Tekintve, hogy a jelen kutatás kifejezetten kis, messze nem szokásos mérésszámmal zajlik (11-22 adatvektor), ezért az eredményeket meghatározóan befolyásolni tudja ezen modellek közbelső rétegeinek neuron száma. A kísérletek során vizsgálatok történtek változó neuron számmal (tipikusan 2, 4, 8 neuronnal), a bemutatott eredmények az általunk legjobbnak ítélt eseteket ismertetik.

A módszer alkalmazásának lényegét a 7.5 ábra foglalja össze, a jelen technológiai cél a szerszámkopási szakaszok megváltozását leginkább leíró rezgésjellemzők beazonosítása, ehhez első lépésként diszkrét szerszám kopottsági osztályokat kell definiálni, majd második lépésként a mérési adatokból származtatott (nagy számú) bementi (akár folytonos, akár diszkrét) adatokat kell kiszámítani:



7.5. ábra: Rezgés adatfeldolgozás AHFS módszerrel

A folyamat első lépése az adatgyűjtés az egyes beállítások során. Az adatgyűjtés során használt mintavételezési frekvencia 100kHz volt, mert a Shannon tételre alapozott gyakorlat azt mutatja, hogy ilyen mintavételezés mellett a 10 - 20 kHz körüli rezgések még kellő pontossággal reprodukálhatóak. A rezgésadatokkal együtt folyamatosan mentettem a szerszám pillanatnyi helyzetének koordinátáit is (2). A mintavételezés során minden másodpercben 5 pont térbeli (x-y-z) koordináta érték lett rögzítve (3). A 4. lépés

a rezgés adatok és az adatfeldolgozóba továbbított pályaadatok kezdőpontjának összekapcsolása volt, így lehetővé vált, hogy a megmunkálási folyamat mintavételezett időpillanataiban a rezgésjelek kiértékelhetők legyenek a szerszámhálya függvényében. Az 5. lépés a FS algoritmus futtatása. A futtatás során 2 kiértékelési mód került alkalmazásra:

1. Az első részbe azok a futtatások tartoznak, ahol a szerszámkopási fázisokat a rezgésjelek alapján leginkább leíró matematikai jellemzők kerültek meghatározásra. Itt az algoritmus lényegében azt keresi, hogy a szoftverben előre definiált matematikai jellemző közül (a jelen esetben ez 22db matematikai jellemző) melyik írja le legjobban a rezgés adatok változása, illetve a definiált szerszámkopási fázisváltások közötti kapcsolatot. Ehhez a kimenet definiálásánál meg kellett határozni az éles és a kopott szerszám közötti határvonalat.
2. A vizsgálat másik részében szintén a definiált kimenet és a rezgésjelek között keresi az algoritmus a kapcsolatot, de itt nem a kettő közötti függvénykapcsolat érdekelt, hanem azok a frekvenciaértékek, ahol egyértelműen elkülöníthetők az egyes zsebekhez tartozó amplitúdó értékek annak megfelelően, hogy az éles szerszámhoz tartozik-e az adott zsebnél rögzített amplitúdó érték, vagy már a kopott szerszámhoz.

A futtatást követően mindkét esetben egy ún. hiba görbét kaptam. Ez a hiba görbe megmutatja, hogy ezen jellemzők (*statisztikai jellemzők*) sorrendje milyen módon jellemzi a szerszámkopási fázisok váltását [141].

Az elemzések célja, hogy a valós /ipari felhasználás során a rezgések segítségével nyomon követhető legyen a szerszám élettartama anélkül, hogy meg kellene állítani a megmunkálást.

### 7.3.2.1 Szerszámkopás fázisátmenetek definiálása

A kopásgörbék ismerete alapján a következő lépésben a kimeneti paramétereket definiáltam a szoftver által feldolgozható formába. A „0”- s érték jelöli a bekopási szakaszt („A” tartomány „12-es táblázat”), „1”-es érték jelöli a normál kopási szakaszt („B” tartomány „12-es táblázat”), és „2”-es érték a túlkopási szakaszt („C” tartomány „12-es táblázat”). A cél, hogy a FS módszer kapcsolatot találjon ezen osztályok elkülönülése, és a rezgés adatok változása között.

### 7.3.2.2 Jellemző sorrend keresése

A jellemzőválogató algoritmus futtatása előtt, a rögzített nyers rezgés adatsorokat elő kellett készítenem. Az előkészítés során a mozgáspálya felhőt 2 nagy csoportra osztottam.

Az első halmazba tartoznak azok a pályaszakaszok, ahol a szerszám az X-Y síkban dolgozik. Itt a vágóél szerszámaláston futó szakasza van dominánsan terhelve.

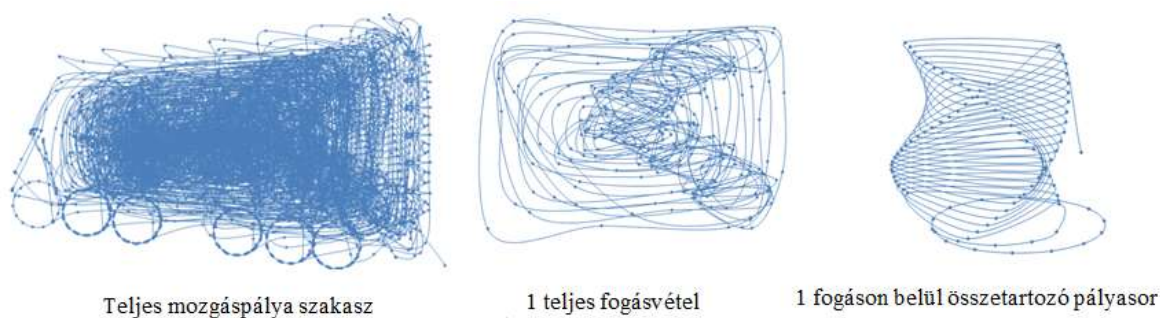
A másik halmazba tartoznak a fogásvételi mozgások, ahol a vágóél mellett a keresztél is jelentős terhelésnek van kitéve.

Erre azért van szükség, mivel fogásvételkor térbeni mozgást végez a szerszám, a zseb kibontáskor pedig síkbeli mozgást, így a két műveletelem halmaz teljesen más dinamikai feltételek között zajlik, tehát a rezgések tükrében a két halmaz nem összehasonlítható. Ahhoz, hogy elkülöníthető legyen a fogásvételi (3D-Z irányú) mozgás a síkbeli 2D-s mozgástól a marógép által lejárta szerszám utat ki kellett exportálni X-Y-Z koordináták listájában. A kiexportáláshoz egy makro programot készítettem, ami az NC program futtatása során adott mintavételi frekvenciával mentette el a pillanatnyi koordináta értékeket.

TIME	DELTA TIME	X	Y	Z	Megmunkálási szint
10:05:32	0:00:00	0	0	0	Fogásvétel
10:05:33	0:00:01	0.390625	0.440625	0	Fogásvétel
10:05:33	0:00:01	1.203125	1.353125	0	Fogásvétel
10:05:36	0:00:04	-12,15	13	-6,9125	1
10:05:37	0:00:05	-11,7375	12,76563	-6,9125	1
10:05:37	0:00:05	-11,7219	13,27188	-6,9125	1

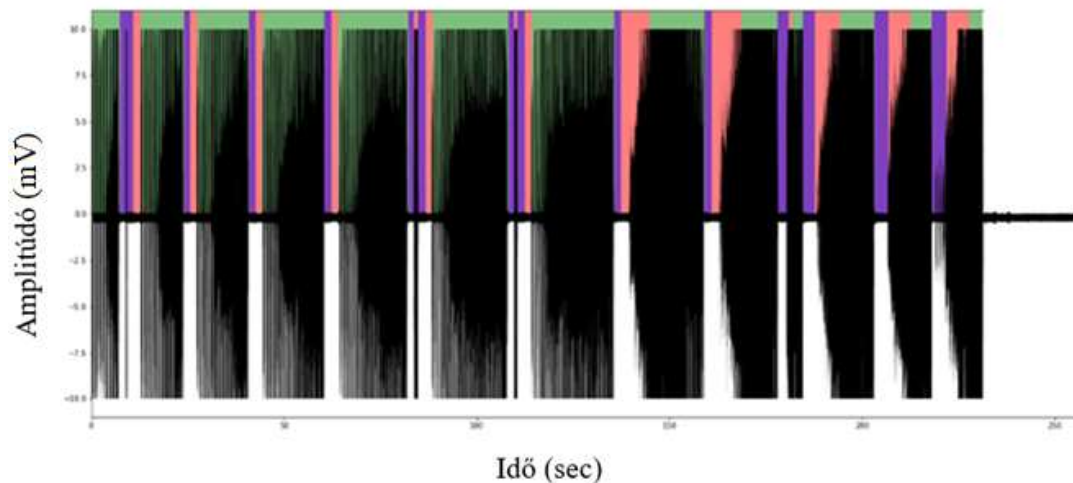
17. táblázat: Részlet a kiexportált szerszám pályáról

A kiexportálást követően egy időcellát kellett hozzárendelni a pályaszakaszokhoz, illetve a rezgésadatokhoz. Erre azért van szükség, hogy a két adathalmaz közös nulla kiindulópontonról induljon.



7.6. ábra: Kiexportált szerszám pályája felbontása

A két adatsor kiindulópontjának szinkronizálása után, a rögzített rezgésjelek hozzárendelhetővé váltak a megmunkálás pillanatnyi szerszámhelyzetéhez. Ennek az összepárosításnak az eredményeként minden mozdulatelemnél külön elemezhető az ott fellépő rezgés amplitúdó (és frekvencia). Ezzel az eljárással képet kaphatunk a teljes mozgástartomány minden egyes jellegzetes megmunkálási szakaszáról. A két idősor egymással való összepárosítás utáni állapota a 7.7 ábrán látható.



7.7. ábra: Időtartományban rögzített adatok megfeleltetése a kiexportált szerszám-pálya időskálájával

A pirossal jelzett területek a 3D-s mozgásokhoz tartozó adatsorok, a lilával jelölt területek az üresjáratú mozgások, míg a zölddel jelölt tartományok az „X-Y” (2D-s) mozgásokhoz tartoznak. A fekete vonalak jelölik a forgácsolás során keletkező rezgés gyorsulás-amplitúdóknak megfelelő villamos kimenőjel amplitúdó értékét mV-ban.

### 7.3.2.3 A rezgésjeleket leíró statisztikai jellemzők

Az adatok előkészítése után, valamint a kimeneti értékek (*Taylor élettartam görbe határai: lásd. 6. fejezet*) számszerűsítését követően, a következő lépés az algoritmus futtatása volt. Ehhez az igen nagyszámú rezgésadatokból származtatott jellemzők kerültek kiszámításra, amelyek egy-egy nagyobb időbeli ciklust (*pl. egy teljes zseb megmunkálása*) írtak le. Itt megjegyzendő, hogy ezzel a lépéssel lényeges információsűrítés és egyben számottevő információvesztés is megvalósult, a jövőben még további nagy kutatási potenciál van a részletesebb rezgésadatok kiértékelésében, lényegesen kisebb szakaszokra bontva a megmunkálást, ez a jövőbeli kutatásunk tárgya lesz.

A felhasznált matematikai leíró paraméterek számításának képletei az 1. mellékletben láthatók. A FS célja pontosan az, hogy ezek közül a statisztikai jellemzők közül meghatározza, hogy melyek jellemzik leginkább a szerszámpálya változást.

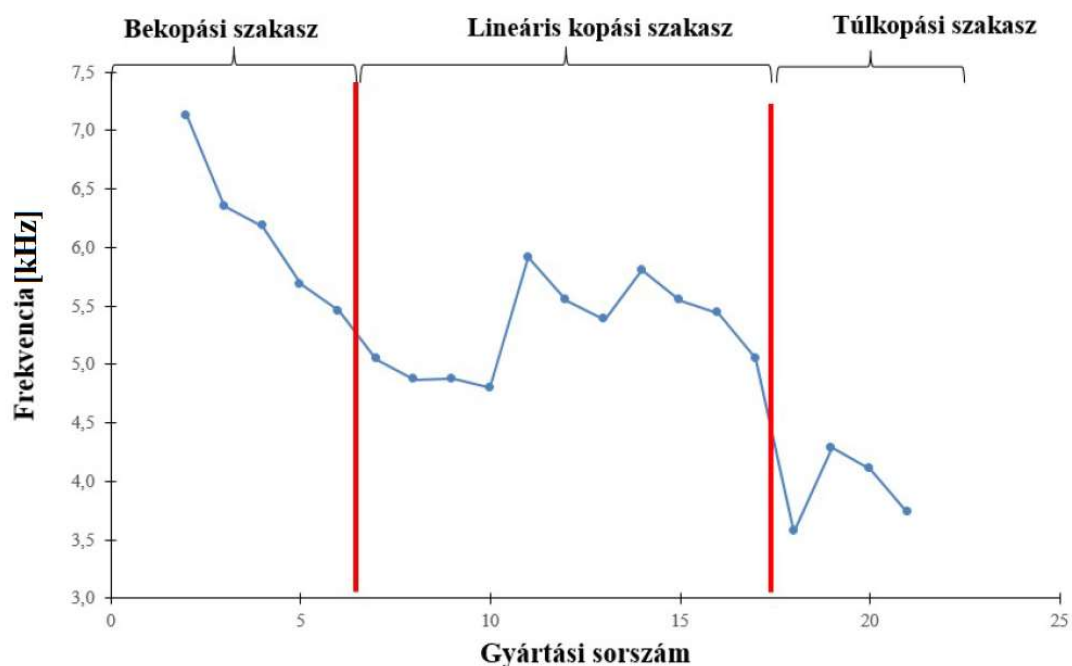
## 7.4 Szerszám teljes kopásának fázisátmeneteit leíró jellemzők

### *Hullámforma szerszámpálya*

A három szerszámpálya stratégia közül elsőként a hullámforma szerszámpálya adatait értékeltem ki a 6. fejezetben definiált határok alkalmazásával.

A rögzített adatsorokból a 12,19,23-as zsebek mérései sérültek, így azokat nem tudtam felhasználni. A hibagörbe alapján a következő jellemzők bizonyultak a kimentet legjobban leíró jellemzőknek:

1. *Zseb gyártása során mért átlagos frekvenciaérték (hányszor lépi át a jel az átlagértéke)*
2. *Szórás*
3. *Negyedik momentum, azaz lapultság*



7.8. ábra: Zsebenként mért frekvencia a gyártott zsebek számának függvényében

A statisztikai jellemző vizsgálat alapján azt az eredményt kaptam, hogy a 3 tartományt a zsebek gyártása során mért átlagos frekvenciaértékek határozzák meg legjobban.



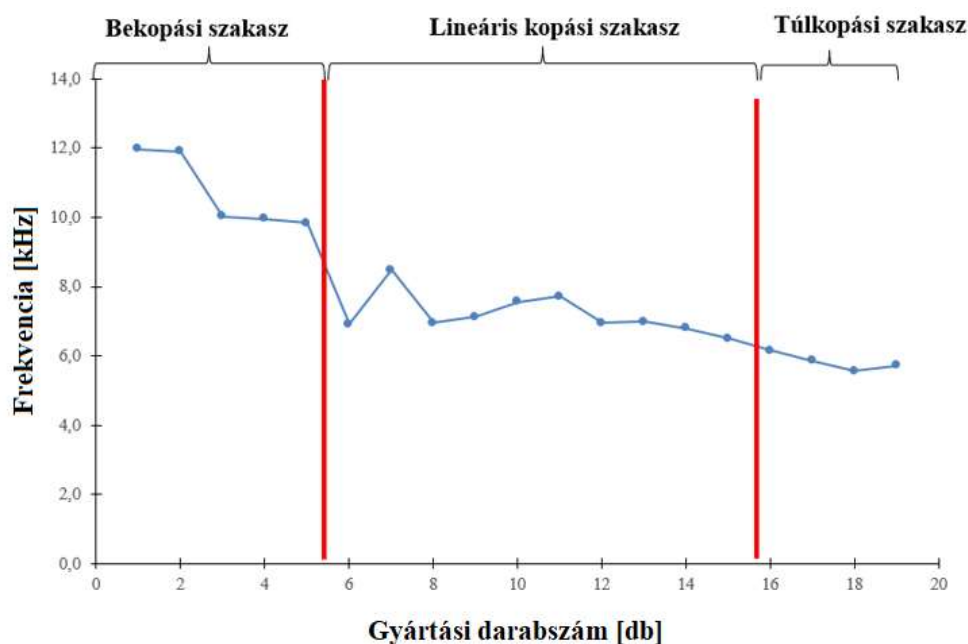
A bekopási szakaszban a frekvencia erős csökkenése tapasztalható (7 kHz-ről 5.5 kHz-re). A bekopási szakaszban 5.5 kHz körül szóródik a frekvencia. Majd a túlkopási szakaszban 4kHz-es értékre csökken. A bekopási szakaszban a szerszám gyors ütemű kopása miatt gyors ütemben növekszik a súrlódási erő, mivel deformálódik az optimális szerszámgeometria. A súrlódási erő növekedésével növekszik a súrlódási munka is. A súrlódási munka növekedésével a csillapított lengő rendszer csillapítása is növekszik, aminek eredményeképpen a rezgés frekvenciája is csökken. A bekopási szakaszban a kopás mértéke csökken, így a rezgés frekvenciájának csökkenése is mérséklődik. A túlkopási szakaszban a szerszám kopása ismét felgyorsul, így a rezgés frekvenciája is csökken.

### ***Ciklois szerszám-pálya***

A három szerszám-pálya stratégia közül másodikként a ciklois szerszám-pálya adatait értékeltem ki a 6. fejezetben definiált határok alkalmazásával.

A hibagörbe alapján a következő jellemzők bizonyultak a kimentet legjobban leíró jellemzőknek: [144]:

- ***Zseb gyártása során mért átlagos frekvenciaérték (hányszor lépi át a jel az átlagértéke)***
- ***Átlag érték***
- ***Második momentum***



7.9. ábra: Zsebenként mért frekvencia a gyártott zsebek számának függvényében

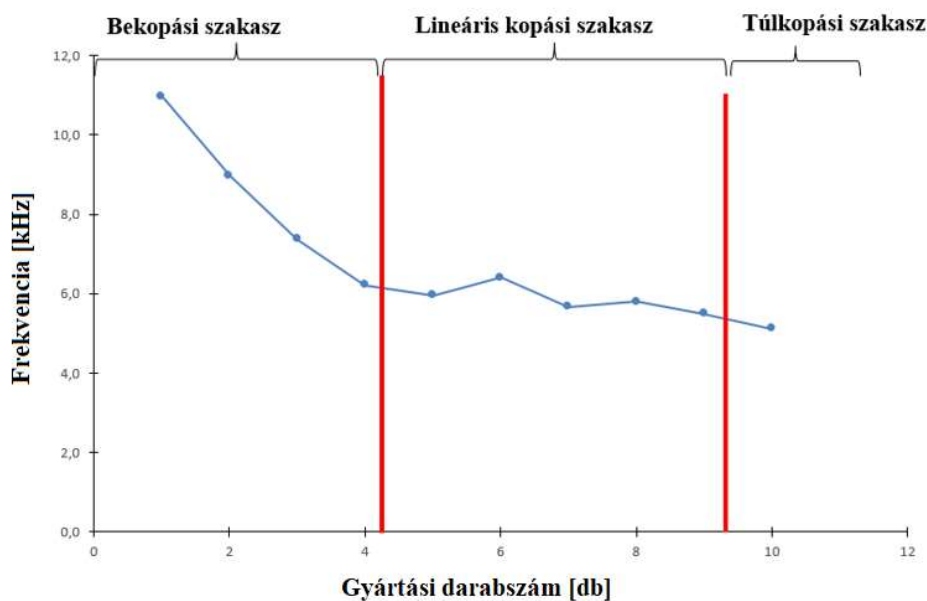
A hullámformához hasonlóan, itt is az adott zsebnél rögzített jelek frekvenciája adja meg Taylor határokat a legjobban (7.9 ábra). A bekopási szakaszban a frekvencia hirtelen esése majd az 5. zsebig minimális csökkenése figyelhető meg. A lineáris szakasz ismét egy hirtelen frekvencia eséssel kezdődik, de innentől a túlkopási szakasz végéig a frekvencia közel egyenletesen csökken.

### Láncolt szerszám pálya

A három szerszám pálya stratégia közül utolsóként a láncolt szerszám pálya adatait értékeltem ki a 6. fejezetben definiált határok alkalmazásával.

Láncolt szerszám pálya esetében az algoritmus futtatását követően, a következő jellemzők bizonyultak a kimentet legjobban leíró jellemzőnek:

- *Átlag érték*
- *Negyedik momentum*
- *Zseb gyártása során mért átlagos frekvenciaérték (hányszor lépi át a jel az átlagértéke)*



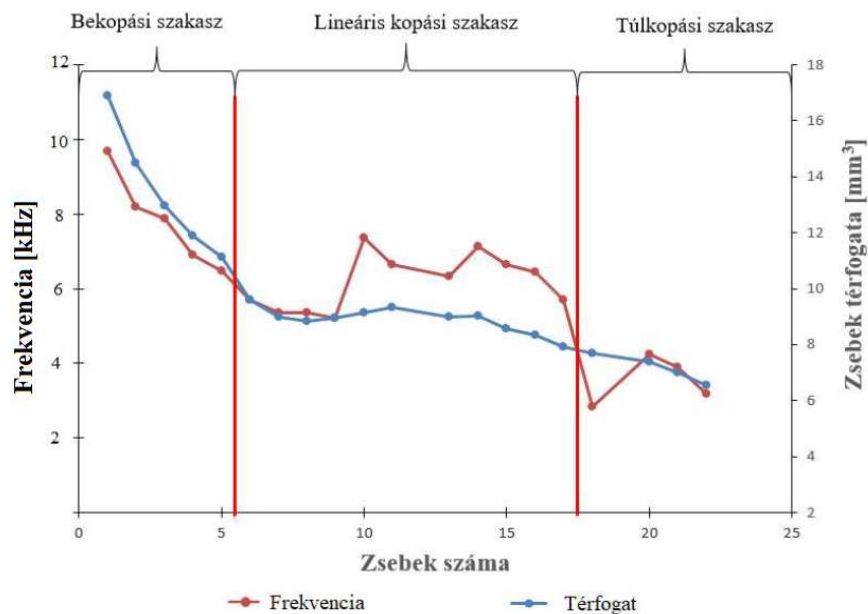
7.10. ábra: Jellemzők láncolt szerszám pálya esetén (átlagértékek átlépésének száma)

A láncolt szerszám pálya esetén is a 3 jellemző között szerepelt a zsebképnél mért átlagos frekvenciaérték. A frekvenciaérték itt is folyamatosan csökkenő tendenciát mutat a gyártás során. A bekopási szakasz vége a 4. zsebnél figyelhető meg. A lineáris szakaszban a frekvenciaértékek váltakozása figyelhető meg, majd a 7. zseb után, ahol a szerszám túlkopási tartománya van, a frekvenciaérték folyamatosan csökken.

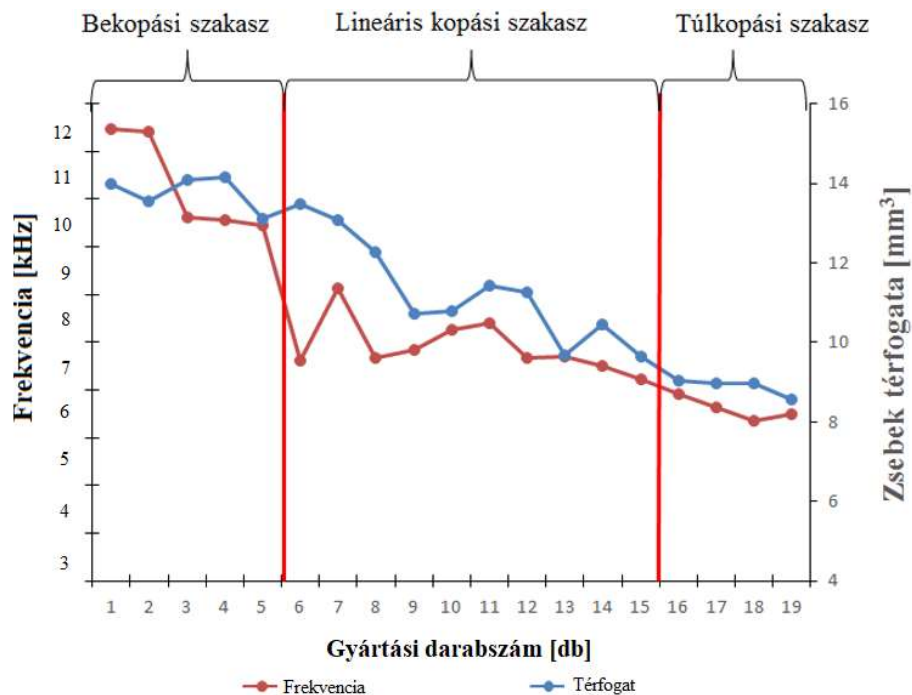
A mérnöki jellemzők közül, az adott zsebhez tartozó átlagos frekvenciaérték minden szerszám pálya esetén a folyamatot legjobban leíró változója. Az eredmények

egyértelműen leírják, hogy a szerszám elhasználódással arányosan a súrlódási erő is növekszik. Ennek az erő növekedésnek az eredményeként a csillapított lengések száma is csökken, annak megfelelően, ahogy a szerszám kopási fázisai alapján a csillapítás mértéke növekszik.

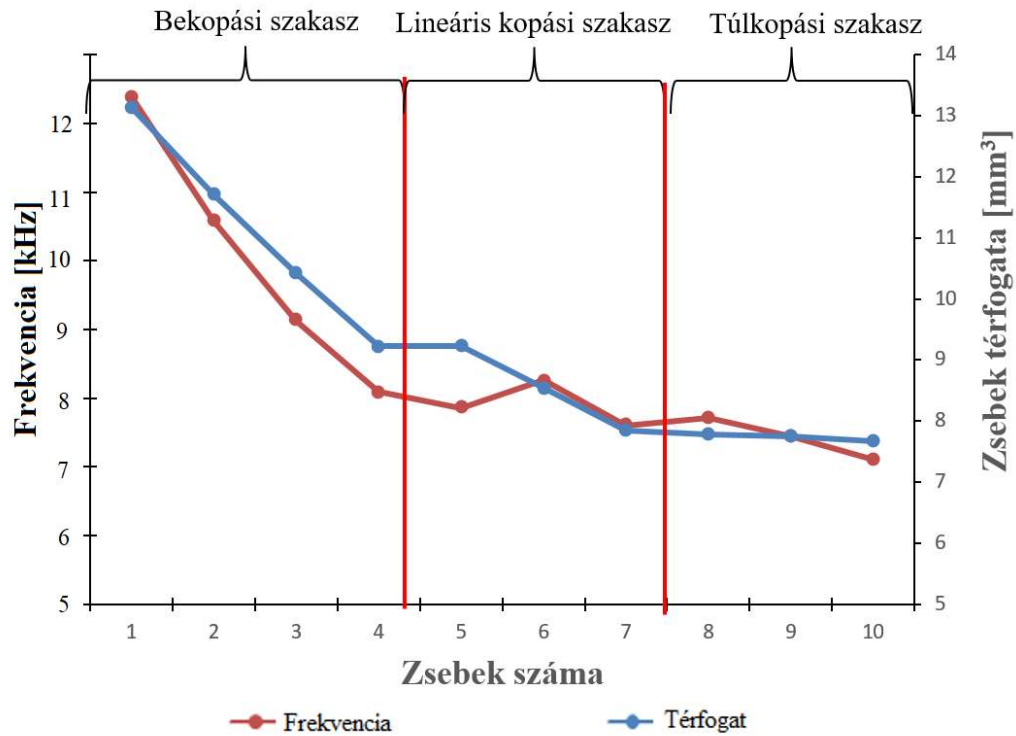
**Tehát a gyártás során a zsebenkénti átlagos frekvencia jó etalon görbét ad, amivel összevehető a zsebek méretváltozása, illetve a szerszám élettartam változása is (7.8-7.10 ábrák).**



7.11. ábra: Zsebek térfogatváltozása, és a AHFS módszerrel kapott statisztikai függvény kiértékelése hullámforma szerszám pályánál



7.12. ábra: Zsebek térfogatváltozása, és a AHFS módszerrel kapott statisztikai függvény kiértékelése hullámforma szerszám pályánál



7.13. ábra: Zsebek térfogatváltozása, és a AHFS módszerrel kapott statisztikai függvény kiértékelése hullámforma szerszám pályánál

A 7.11-7.13 ábrák alapján megállapítható, hogy a zsebek megmunkálása során mért átlagos frekvenciaérték csökkenése pontosan megfeleltethető a zsebek méretcsökkenéséből számolt térfogatváltozásnak [143] [144].

**Tehát a zsebek gyártása során mért rezgések átlagos frekvenciái alapján kapott etalon görbe megbízható módon adja vissza szerszám pillanatnyi kopottsági állapotát.**

## 8 Összefoglalás

A dolgozat kerámia anyag gömbvégű szerszámmal történő megmunkálásával foglalkozik, amely több szempontból különbözik a szokásos gépipari megmunkálásoktól.

Az elvégzett munka főbb lépései a következők voltak:

- *A kerámia alapanyag keménység vizsgálata*
- *Hűtési rendszer megtervezése és megvalósítása*
- *A kísérletek megtervezése az ipari körülmények figyelembevételével*
- *A kísérletek elvégzése*
- *A kísérleti adatok kiértékelése, következtetések levonása*

Elméleti úton meghatároztam a marási idő változását a paraméterek függvényében, így a szerszám élettartam meghatározható volt mind az idő mind a gyártott zsebek számának függvényében. Ezután megvizsgáltam a szerszám kopási folyamatát, különböző marási pálya stratégiák esetén, majd ezek hatását a marási pontosságra. Külön probléma volt a kopás okozta előtoló erő lényeges változása és ennek hozzájárulása a marási pontatlanságokhoz. Végül etalon görbét határoztam meg a szerszám kopási állapotának gyártás közbeni monitorozására.

Érdekes eredménynek tekinthető a fordulatszám hatása a szerszám élettartamra, különböző fogásmélység beállítások mellett. Kis fogásmélységeknél (0.05-0.05) a fordulatszám növelése csökkentette az élettartamot az ismert Taylor-egyenlet szerint, viszont nagyobb fogásmélységeknél a fordulatszám hatása megszűnt, amit ki lehetett használni az egy fogra jutó előtolás csökkentésére, és ezzel az élettartam növelésére. A gyártható maximális darabszámok egyértelműen mutatták, hogy az egy fogra jutó előtolás a legfontosabb paraméter. Ezek az összefüggések részleteiben nagyon összetettek, és bonyolultak. Szerepet játszik a kis átmérőjű szerszám, kis kerületi sebessége. A kis méret, és negatív homlokszög miatt a fogüreg viszonylag kicsi, a forgács ugyanakkor szemcsés, amelynek viselkedése a fogüregben különböző, és az egy fogra jutó előtolások esetében pontosan nem ismert. A forgács mennyiségét a fogüregben természetesen a fogásmélység is befolyásolja és ezzel is összefüggésben lehet a fordulatszám hatásának fenti változása.

A kopás mechanizmusa sem a megszokott. A szerszám mérete nem teszi lehetővé a szokásos élkialakítást, ezért a szerszám nem is élezhető újra. A nagy élszög és kis hátszög következtében viszonylag kisebb élkopás után az élek közötti felület lokálisan súrlódik, megnövelve az előtoló erőt. Ez a kopási mechanizmus, mint következmény kihat a marási pontosságra is.

A különböző pályastratégiák kinematikája és dinamikája is eltér egymástól és észrevehető különbséget okozott a gyártási darabszámban. A közvetlen okok itt sincsenek még részletekben feltárva, nem ismertek. Az azonban belátható, hogy a különböző pályák estén a fogásmélységek és az előtoló erő lokálisan változhat, amelyek az élettartamot már közvetlenül befolyásolják. Ezek vizsgálata nem egyszerű, az irodalomban sem található érdemi válasz, de még a probléma felvetése is hiányzik.

Állapotfigyelésre a frekvencia változása itt is jól használható, és a túlkopási szakasz kezdete, amely a gyakorlat számára is fontos, egyértelmű és kellő pontossággal megállapítható.

## Tézisek

### 1.Tézis:

A gázturbina lapát oxid kerámia bevonatán kialakítandó trapéz keresztmetszetű hűtőcsatorna megmunkálási ideje adott geometria esetén, de tetszőleges megmunkálási paraméterekre vonatkozó általános összefüggése a következő alakban írható fel, amelyben fontos szerepet játszik a radiális, és axiális fogásmélységek pontos számbavétele egy speciális függvény transzformációval:

$$T_{\text{forg}} = \frac{8.3}{v_f} \cdot (h^{1.25} \cdot b^{0.75})^{-1.06}$$

Ahol:

- $T_{\text{forg}}$  - tiszta forgácsolási idő egy darab elkészítéséhez, a forgácsolási paraméterek függvényében (min)
- $h$ - forgács vastagság (mm)
- $b$ - forgács szélesség (mm)
- $v_f$ - előtolási sebesség (mm/min)

A hűtőcsatorna kibontására megadható tiszta forgácsolási idő összefüggést írtam fel általános alakban:

Az egyenletet a következő alakban adtam meg:

$$T_1 = \frac{2 \cdot (L_1 - s + B_K - s) + [(B_K - 2s)/[b \cdot (L_1 - s)]]}{v_f}$$

Ahol:

- $T_1$ : Egy zseb megmunkálási ideje a zseb geometriai paramétereinek alapján  $B_K$ - közepes szélességet jelöli az első marási rétegben ( $B_1$ - legnagyobb szélesség,  $B_2$ -legkisebb szélesség)
- $L_1$ : Zseb hossza
- $s$ : a szerszám effektív átmérője az  $a_p$  axiális fogásmélység függvényében
- $b$ : radiális fogásmélység „ $a_e$ ”

Kapcsolódó publikációk:[7][66][121]

## 2. Tézis:

Oxid kerámia alapanyag „ciklois szerszám-pálya stratégián alapuló, speciális élkiképzésű –TiAlN bevonatú 1[mm] átmérőjű szerszámmal történő” megmunkálása során meghatároztam a szerszám élettartamát leíró összefüggést a technológiai változók függvényében. Az összefüggés érvényességi tartománya: ( $f_z$ : fogankénti előtolás=6-30[ $\mu\text{m}$ ],  $n$ : fordulatszám=10000-25000[1/min],  $a_p$ : axiális fogásmélység=0.05-0.3[mm],  $a_e$ : radiális fogásmélység=0.05-0.3[mm]), amely szerint a döntő változó az egy fogra jutó előtolás.

A szerszám élettartam percben megadott összefüggését a következő alakban adtam meg:

$$T_{\text{él}} = \frac{13.1}{(h^{1.25} \cdot b^{0.75})} \cdot f_z^{-1.53} \quad (\text{min})$$

A gyártható zsebszámra megadott szerszámélettartamot a következő alakban adtam meg:

$$N = \frac{T_{\text{él}}}{T_{\text{forg}}} = \frac{1.58 \cdot v_f \cdot (h^{1.25} \cdot b^{0.75})^{0.06}}{f_z^{1.53}} \quad (\text{db})$$

Ahol:

- $f_z$  - fogankénti előtolás (mm/fog)
- $h$  – forgács vastagság (mm)
- $b$  - forgács szélesség (mm)
- $v_f$  - előtolási sebesség (mm/min)

A fordulatszám hatása változó, de a racionálisan használható paraméterek mellett hatása elhanyagolható. Ez kihasználható az egy fogra jutó előtolás csökkentése céljából.

Kapcsolódó publikációk:[7][66][121]



### 3. Tézis:

A vizsgált oxidkerámia alapanyag megmunkálása során a TiAlN bevonatú 1[mm] átmérőjű gömbmaró szerszám kopása a speciális (kisméretű) kialakítása miatt (pl. kis fogüreg stb.) nem a szokványos eseteket követi. Az eredmények érvényességi tartománya: ( $f_z$ : fogankénti előtolás=6-30[ $\mu$ m],  $n$ : fordulatszám=10000-25000[1/min],  $a_p$ : axiális fogásmélység=0.05-0.3[mm],  $a_e$ : radiális fogásmélység=0.05-0.3[mm])

A nagy ékszög és kis hátszög következtében az él egy adott kopása után az élek közötti felület is súrlódik, megnövelve az előtoló erőt, a súrlódási munkát, és a súrlódási csillapítást.

Kapcsolódó publikációk:[13][178]

### 4.Tézis:

Oxidkerámia alapanyag 1[mm] átmérőjű, TiAlN bevonatú gömbmaró szerszámmal történő megmunkálása során „vizsgált tartomány: ( $f_z$ : fogankénti előtolás=6-30[ $\mu$ m],  $n$ : fordulatszám=10000-25000[1/min],  $a_p$ : axiális fogásmélység=0.05-0.3[mm],  $a_e$ : radiális fogásmélység=0.05-0.3[mm])” a szerszámkopás, és a mart zsebek méretének pontossága között összefüggést állapítottam meg.

A pontosságot nem csak a közvetlen kopás befolyásolja, hanem a pályahibák is hozzájárulnak, amelyek a megnövekedett előtoló erőre (axiális és radiális irányba) vezethetők vissza. Megadtam az utóbbiak hozzájárulását az eredő pontatlansághoz. A vizsgált pályastratégiáknál (hullámforma, ciklois, láncolt) minden esetben a zseb „X” irányú (zseb szélesség), „Y” irányú (zseb hosszúság) méretcsökkenés 90-95%-áért a szerszám deformáció a felelős. A zseb „Z” irányú (zseb mélység) méretcsökkenéséért 20-30%-ban a szerszámkopás, míg 70-80%-ban az előtoló erő okozta deformáció felelős.

Kapcsolódó publikációk:[115][121][142]

## 5. Tézis:

Oxidkerámia alapanyag 1[mm] átmérőjű, TiAlN bevonatú gömbmaró szerszámmal történő megmunkálása során „vizsgált tartomány: ( $f_z$ : fogankénti előtolás=6-30[ $\mu$ m],  $n$ : fordulatszám=10000-25000[1/min],  $a_p$ : axiális fogásmélység=0.05-0.3[mm],  $a_e$ : radiális fogásmélység=0.05-0.3[mm])” a szerszámkopás gyakorlatban történő monitorozásához etalon frekvencia karakterisztikákat határoztam meg. Megállapítottam, hogy a különböző marási pálya stratégiákhoz (*Hullám formakopás, Ciklois pálya, Láncolt pálya*) az etalon függvények hasonlóak, ezért azok a gyártható zsebek számának függvényében egymásba transzformálhatók. Ez azt jelenti, hogy a kopási folyamat egyes szakaszait tekintve egymáshoz hasonló függetlenül a pálya stratégiától.

Kapcsolódó publikációk:[123][143][144][145]

## 9 Irodalomjegyzék

- [1] G. V. Research, „Distributed Energy Generation Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Residential, Commercial & Industrial), By Technology (Fuel Cells, Solar PV), By Region, And Segment Forecasts, 2020 - 2027,” Grand View Research, 2020.
- [2] B. Owens, „The rise of distributed power,” General Electric, Online, 2014.
- [3] A.-H. M. Luai, S. M. S. és A. A.-M. Ali , „Jet Impingement Cooling in Gas Turbines for Improving Thermal Efficiency and Power Density,” *Advances in Gas Turbine Technology*, pp. 191-210, 2011.
- [4] L. L. Dong, W. C. Leung és C. S. Cheung, „Heat transfer characteristics of premixed butane/air flame jet impinging on an inclined flat surface,” *Heat and Mass Transfer*, 1. kötet39, 1. szám1, pp. 19-206, 2002.
- [5] I. Gács , „Energetika II,” EDUTUS Főiskola, TÁMOP-4.1.2 A1 és a TÁMOP-4.1.2 A2, 2012.
- [6] N. Govindarajan, „Life Prediction of Functionally Graded Thermal Barrier Coatings,” in *Tata Consultancy Services*, 2017.
- [7] L. Móricz és Z. J. Viharos, „Kerámia marás optimalizálása és a megmunkálás aktuális trendjei,” in *Sapientia EMTE;Magyar Energetikai Társaság, Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia - XXVI. Nemzetközi Számítástechnika és*, 2016.
- [8] G. Zixu , S. Ziyua , F. Jun , Y. Xiaojun és H. Dawiel , „Experimental and analytical investigation on service life of film cooling structure for single crystal turbine blade,” *International Journal of Fatigue*, 1. szám150, p. 106318, 2021.
- [9] G. E. Company, „Method of using and reconstructing a film-cooling augmentation device for a turbine airfoil”. Szabadalom száma: EP 2 230 381 A2, 11 03 2010.
- [10] G. Fledrich, „CIRKÓNIUM-DIOXID KERÁMIÁK ESZTERGÁLÁSA,” Szent István Egyetem, Doktori (Ph.D) értekezés, 2011.
- [11] P. Kun, „Új szerkezetű funkcionális kerámia nanokompozitok előállítása, és vizsgálata,” BME, BME Mérnök-fizikus Szak, 2012.
- [12] I. Zsoldos, „<https://www.uni.sze.hu/>,” 2014. [Online]. Available: [http://www.sze.hu/~zsoldos/valogatott\\_fejezetek\\_az\\_anyagtudomanybol\\_MSc\\_leckek/keramia\\_1\\_lecke.pdf](http://www.sze.hu/~zsoldos/valogatott_fejezetek_az_anyagtudomanybol_MSc_leckek/keramia_1_lecke.pdf). [Hozzáférés dátuma: 05 04 2020].
- [13] L. Móricz és Z. J. Viharos, „A Kerámia felhasználásával és tulajdonságaik javításával kapcsolatos trendek,” in *Gyártás 2015 Konferencia, GÉPGYÁRTÁS* szaklap különszám, 2015.

- [14] Á. Németh és I. Artinger, *Fémek és kerámiák technológiája*, Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2004.
- [15] A. Krauth és H. Meyer, „Über Abschreck-modifikationen und ihr Kristallwachstum in Systemen mit Zirkondioxid,” *Keram. Ges.*, 1. kötet42, pp. 61-72, 1965.
- [16] N. Ichinose, „Introduction to Fine Ceramics,” in *Academic Press*, Boston, 1989.
- [17] A. Menyhárd és J. Szépvölgyi, „Kerámia porok szinterelése. Egyetemi jegyzet,” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, BME Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék.
- [18] M. G. Wei, X. W. Li, M. Ti, X. Shang és Y. Yang, „Chemical reactivity of hot-pressed Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–ZrB<sub>2</sub>ceramics at 1500–1700C,” *Journal of the European Ceramic Society*, 1. kötet35, p. 2973–2979, 2015.
- [19] C. J. Hyun, U. Jeong, S. K. Hyun és H. Sung, „Effect of sintering temperature in preparation of granular ceramic filter,” *Ceramics International*, p. 10030–10037, 2015.
- [20] A. Menyhárd és J. Szépvölgyi, „Korszerű műszaki kerámiák. Egyetemi jegyzet,” BME Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- [21] Y. Juhyun, H. Sang és D. H. Jong, „Piezoelectric and dielectric properties of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-added (Ba<sub>0.85</sub>Ca<sub>0.15</sub>) ceramics sintered at low temperature.,” *Materials Letters*, 1. kötet154, p. 120–123, 2015.
- [22] Z. Zhiping, G. Shuping és H. Guohua, „The influence of shaping process on microstructure and properties of BaTiO<sub>3</sub>-based chip thermistors,” *Ceramics International*, 1. kötet32, p. 839–842, 2006.
- [23] A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Kamata és K. J. Yoshida, „Fabric-ation and optical properties of high performance polycrystalline Nd: YAG ceramics for solid-state lasers,” *J.Am.Ceram.Soc.*, 1. kötet78, p. 1033–1040, 1995.
- [24] P. Camy, J. L. Doualan és A. Benayad, „Comparatives pectroscopic and laser properties of Yb<sup>3+</sup> doped CaF<sub>2</sub>, SrF<sub>2</sub> and BaF<sub>2</sub> single crystal,” *Appl.Phys.*, 1. kötetB89, p. 539–542., 2007.
- [25] G. Lu, B. C. Mei, J. H. Song, W. W. Li és R. Z. Xing, „Fabri-cation and propertiesof highly transparent Nd-doped CaF<sub>2</sub> ceramics,” *Materials Letters*, 1. kötet115, p. 162–164., 2014.
- [26] T. Cselle, O. Coddet, C. Galamand, P. Holubar, M. Jilek, A. Luemkemann és M. Morstein, „Another step to universal all round coating,” *EPE Swiss Quality Production*, 2008.
- [27] H. Mingyue, Y. Jinglei, D. Fei és C. Seng, „Fabrication and characterization of mini alumina ceramic turbine rotor using a tailored gelcasting process,” *Ceramics International*, 1. kötet40, p. 7711–7722, 2014.

- [28] K. Hiroshi, „The application of ceramic-matrix composites to the automotive ceramic gas turbine,” *Composites Science and Technology*, 1. kötet59, pp. 861-872, 1999.
- [29] M. Yoshimura, „Phase Stability of Zirconia,” *Ceram. Bull.*, 1. kötet67, pp. 1950-1955, 1988.
- [30] A. Krauth és H. Meyer, „Über Abschreck-modifikationen und ihr Kristallwachstum in Systemen mit Zirkondioxid,” *Ber. Dtsch. Keram. Ges.*, 1. kötet42, pp. 61-72., 1965.
- [31] N. Ichinose, „Introduction to Fine Ceramics,” in *Academic Press*, Boston, 1989.
- [32] A. G. Evans, *Am. Ceram. Soc.*, 1. kötet73, p. 187, 1990.
- [33] R. O. Ritchie, *Int. J. Fracture*, 1. kötet100, p. 55., 1999.
- [34] W. C. Tu, F. E. Lange és A. G. Evans, *Ceram. Soc.*, 1. kötet79, p. 417, 1996.
- [35] D. S. Beyerle, S. M. Spearing, F. W. Zok és A. G. Evans, *Ceram. Soc.*, 1. kötet75, p. 2719, 1992.
- [36] T. Zake, „Thermal shock resistance of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-mullite ceramics,” *Ceramics International*, 1. kötet41, 1. szám9, p. 11504–11509, 2015.
- [37] C. Kai és L. Yongkui, „Fabrication, mechanical properties and thermal shock resistance of laminated TiB<sub>2</sub>-based ceramic,” *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, p. 148–153, 2015.
- [38] Y. C. Hagedorn, J. Wilkes és K. Wissenbach, „Net Shaped High Performance Oxide Ceramic Parts by Selective Laser Melting,” *Physics Procedia*, 1. kötet5, p. 587–594, 2010.
- [39] L. Monostori és Z. J. Viharos, „Satisfying various requirements in different levels and stages of machining using one general ANN-based process model,” *Journal of Materials Processing Technology*, 1. kötet107, pp. 228-235.
- [40] R. Heleen, F. Eleonora, B. Jan, R. Dominiek és L. Bert, „Micromilling of sintered ZrO<sub>2</sub> ceramic via cBN and diamond coated tools,” *Procedia CIRPs*, 1. kötet14, p. 371 – 376, 2014s.
- [41] L. Yao, L. Beizhi, W. Chongjun, K. Lingfei és . Z. Yihao, „Smoothed particle hydrodynamics simulation and experimental analysis of SiC ceramic grinding mechanism,” *Ceramics International*, 1. kötet44, p. 12194–12203, 2018.
- [42] D. Jinguang, M. Wuyi, M. Jun, H. Wenbin, C. Yang, L. Xiaoke és L. Kun, „New observations of the fiber orientations effect on machinability in grinding of C/SiC ceramic matrix composite,” *Ceramics International*, 1. kötet44, p. 13916–13928, 2018.
- [43] Z. Wenbo, S. Honghua, . D. Jianbo, Y. Tengfei és . Z. Yihao, „Numerical investigation on the influence of cutting-edge radius and grinding wheel speed on chip formation in SiC grinding,” *Ceramics International*, 1. kötet44, p. 21451–21460, 2018.

- [44] J. Lingfei , Y. Yinzhou , B. Yong és J. Yijian, „Crack-free cutting of thick and dense ceramics with CO2 laser by single-pass process,” *Optics and Lasers in Engineering*, 1. kötet46, p. 785– 790, 2008.
- [45] S. Pereles, M. Washington , P. Brugan, G. Cai, R. Akarapu és S. Pulford, „Faster and damage-reduced laser cutting of thick ceramics using a simultaneous prescore approach,” *J Laser Appl*, 1. kötet17, p. 219–224, 2005.
- [46] H. T. Chwan és L. Chi-Sheng, „Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture,” *J Manuf Sci Eng*, 1. kötet125, p. 519–528, 2003.
- [47] Z. Maros, „Machining of different materials with abrasive waterjet cutting,” *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 1. kötet448, p. Paper: 012009, 2018.
- [48] A. Karpinski, H. Louis, M. Moon, D. Peter, C. Ravasio, C. Scheer és U. Sudmersen, „Effects of pressure fluctuations and vibration phenomenon on striation formation in AWJ cutting,” in *International Conference on Water Jetting*, Mainz, Germany, 2004.
- [49] Z. Jiyue és K. J. Thomas , „An erosion model for abrasive waterjet milling of polycrystalline ceramics,” *Wear*, pp. 275-282, 1996.
- [50] K. Daniel , B. Damian és . M. Piotr , „The effect of traverse speed on kerf width in AWJ cutting of ceramic tiles,” *Procedia Engineering*, 1. kötet192, p. 469 – 473, 2017.
- [51] W. Koenig, D. Dauw, G. Levy és U. Panten, „EDM-Future Steps Towards the Machining of Ceramics,” *Annals of the CIRP*, 1. kötet37, 1. szám2, p. 623–631, 1988.
- [52] Z. J. Viharos, K. B. Kiss, I. Paniti, B. Farkas, L. Csorba, T. Szalay és M. Czampa, „Method For Micro-Electro-Discharge Machining ( $\mu$ -Edm) Of Ceramic Workpieces”. European Patent Szabadalom száma: Nr.: 17462001, 2017.
- [53] E. Ferraris, K. Liu , J. Peirs , B. Lauwers és D. Reynaerts , „Free Form Microprocessing of Ceramic Materials by Electrical Discharge Machining,” *Ceramic Processing in Microtechnology*, p. 254–274, 2009.
- [54] F. Eleonora, D. Reynaerts és B. Lauwers, „Micro-EDM process investigation and comparison performance of Al<sub>3</sub>O<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> based ceramic composites,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1. kötet60, pp. 235-238, 2011.
- [55] A. Szejmál és P. Ozsváth, *Járműszerkezeti anyagok és technológiák II*, Digitális tankönyvtár : BME, 2011.
- [56] G. Lipovszky és K. Sólyomvári, *Szerkezeti anyagok technológiája*, Budapest: Műegyetemi kiadó , 1998.

- [57] Z. J. Viharos , S. Markos és C. Szekeres, „ANN-based chip-form classification in turning,” in *XVII IMEKO World Congress - Metrology in the 3rd Millennium*, Dubrovnik, Croatia, June 22-27, 2003.
- [58] J. Farkas, E. Csanády és L. Csóka , „Optimisation of the Bauer Equation Using the Least Squares Method for Thermoplastics Turning,” *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 1. kötet8, pp. 21-36, 2018.
- [59] S. Coromant, „Metalcutting Technical Guide: Turning, Milling, Drilling, Boring, Toolholding; Handbook,” Sandvik Coromant , Online kézikönyv, 2005.
- [60] S. Coromant, „<https://www.sandvik.coromant.com/>,” Sandvik Coromant, 2010. [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/milling/pages/default.aspx>. [Hozzáférés dátuma: 08 06 2020].
- [61] G. Póka és I. Németh, „The effect of radial rake angle on chip thickness in the case of face milling,” *Journal of Engineering Manufacture*, 1. kötet234, pp. pp. 40-51, 2020.
- [62] A. Debreczeni, „Modern szerszám mozgáspályák tervezése belső sarkok megmunkálásához,” Diplomadolgozat , Budapest, 2017.
- [63] W.Bob , „cnccookbook,” 2017. [Online]. Available: <https://www.cnccookbook.com/complete-guide-to-cam-toolpaths-and-operations-for-milling/>. [Hozzáférés dátuma: 26 06 2020].
- [64] L. Dongsheng , Z. Ying , L. Ming és Z. Dinghua , „Investigation of Tool Wear and Chip Morphology in Dry Trochoidal Milling of Titanium Alloy Ti–6Al–4V,” *Materials*, 1. kötet12, p. 1937, 2019.
- [65] Š. Michal , K. Milena , H. Marta , V. Jan és C. Andrej , „Analysis and Prediction of the Machining Force Depending on the Parameters of Trochoidal Milling of Hardened Steel,” *Applied Scences*, 1. kötet10, p. 1788 , 2020.
- [66] L. Móricz, Z. J. Viharos, A. Németh és A. Szépligeti, „Efficient Ceramics Manufacturing through Tool Path and Machining Parameter Optimisation,” in *IMEKTO TC10*, Budapest, 2017.
- [67] F. Michael , *Machining and CNC Technology*, New York: The McGraw-Hill Companies, 2014.
- [68] EdgeCam,„[edgecam.com](http://edgecam.com/),”[Online].Available: <https://hu.edgecam.com/edgecamhullamforma>. [Hozzáférés dátuma: 10 08 2016].
- [69] M. Takács, *Sokkritályos ötvözetek mikroforgácsolása keményfém szármaróval*, Doktori (PHD) értekezés: BME, 2006.
- [70] M. J. Vasile, C. R. Friedrich, B. Kikkeri és R. Elhannon, „Micrometerscale Machining: Tool fabrication and Initial results,” *Precision Engineering*, 1. kötet19, pp. 180-186, 1996.

- [71] B. Z. Balázs, N. Geier és M. Takács , „A review on micro-milling: recent advances and future trends,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1. kötet112, p. pp. 655–684 , 2021.
- [72] T. Masuzawa és H. K. Tönshoff, „Three-dimensional Micromachining by Machine tools,” *Annals of the CIRP*, 1. kötet46, 1. szám2, pp. 627-628, 1997.
- [73] X. Jin és Y. Altintas , „ Prediction of micro-milling forces with finite element method,” *J Mater Process Technol*, 1. kötet212, p. 542–552, 2012.
- [74] J. Aurich, M. Bohley, I. Reichenbach és B. Kirsch, „ Surface quality in micro milling: influences of spindle and cutting parameters,” *CIRP Ann*, 1. kötet66, p. 101–104, 2017.
- [75] B. Balázs és M. Takács, „Experimental investigation and optimisation of the micro milling process of hardened hot-work tool steel,” *Int J Adv Manuf Technol*, 2020.
- [76] S. Gao, S. Pang és L. Jiao, „Research on specific cutting energy and parameter optimization in micro-milling of heat-resistant stainless steel,” *Int J Adv Manuf Technol*, 1. kötet89, p. 191–205, 2017.
- [77] S. Hajiahmadi, „Burr size investigation in micro milling of stainless steel 316,” *L. Int J Lightweight Mater Manuf*, 1. kötet2, p. 296–304, 2019.
- [78] Y. Yang, J. Han és X. Hao, „Investigation on micro-milling of micro-grooves with high aspect ratio and laser deburring.,” *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf* , 1. kötet234, p. 871–880, 2020.
- [79] J. Pintér, „Szerszámkopás, szerszámélettartam, rezgések, a forgácsolt felület minősége,” 2018. [Online]. Available: [http://rs1.sze.hu/~pinter/LGB\\_AJ012\\_120FORG20MEGM/ELC590ADC381SOK20pdf202018/05\\_AJ012\\_1\\_Szerszamkopas\\_elettartam\\_rezgesek\\_2018\\_PJ.pdf](http://rs1.sze.hu/~pinter/LGB_AJ012_120FORG20MEGM/ELC590ADC381SOK20pdf202018/05_AJ012_1_Szerszamkopas_elettartam_rezgesek_2018_PJ.pdf). [Hozzáférés dátuma: 18 06 2020].
- [80] *International Standards Organisation, Iso 8688-1: Tool Life Testing in Milling- part 1: Face Milling*, 1989.
- [81] *International Standards Organisation, Iso 8688-2: Tool Life Testing in Milling - Part 2: End Milling*, 1989.
- [82] B. Baharudin, N. Dimou és K. Hon, „Tool wear behaviour of micro-tools in high speed cnc machining,” in *Proceedings of the 34th International MATADOR Conference*, 2004.
- [83] L. L. Alhadeff, M. B. Marshall, D. T. Curtis és T. Slatter, „Protocol for tool wear measurement in micro-milling,” *Wear*, 1. kötet420, 1. szám421, pp. 54-67, 2019.
- [84] E. Ahmed , D. Stefan , B. P. Krastimir és M. Roussi , „Tool Wear in Micro-Endmilling: Material Microstructure Effects, Modeling and Experimental Validation,” *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 1. kötet2, 1. szám4, 2014.



- [85] K. Norbert, Z. Piotr , L. Paweł, R. Radosław és S. Malgorzata, „Influence of machining parameters on the polymer concrete milling process,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1. kötet106, p. 3017–3032, 2020.
- [86] L. Yang és W. Wenwu , „Investigation of Drilling Machinability of Compacted Graphite Iron under Dry and Minimum Quantity Lubrication (MQL),” *Metals*, 1. kötet9, 1. szám10, p. 1095, 2019.
- [87] S. Marco, B. Rachele és B. Stefania, „On the correlation between surface quality and tool wear in micro–milling of pure copper,” *Journal of Manufacturing Processes*, 1. kötet50, pp. 547-560, 2020.
- [88] R. Heleen, F. Eleonora, B. Jan, R. Dominiek és L. Bert, „Micromilling of sintered ZrO<sub>2</sub> ceramic via cBN and diamond coated tools,” *Procedia CIRP*, 1. kötet14, p. 371 – 376, 2014.
- [89] B. Rong , F. Eleonora , Q. Jun , R. Dominiek, L. Liang és H. Ning , „Tool Wear Characters in Micro-milling of Fully Sintered ZrO<sub>2</sub> Ceramics by Diamond Coated End Mills,” *Materials Science Forum*, 1. kötet723, pp. 365-370, 2012.
- [90] B. Rong, F. Eleonora és H. Ning, „Process investigation on meso-scale hard milling of ZrO<sub>2</sub> by diamond coated tools,” *Precision Engineering*, 1. kötet38, pp. 82-91, 2013.
- [91] B. Rong, F. Eleonora , Y. Yinfei és Q. Jun , „Experimental Investigation on Ductile Mode Micro-Milling of ZrO<sub>2</sub> Ceramics with Diamond-Coated End Mills,” *Micromachines*, 1. kötet9, p. 127, 2018.
- [92] H. Marzellus, T. Sven, S. Julia, R. Oltmann, T. Laura és B. Ekkard, „Micromachining of ceramic surfaces: Hydroxyapatite and zirconia,” *Journal of Materials Processing Technology*, 1. kötet212, 1. szám3, pp. 614-624, 2012.
- [93] K. Toru, H. Kanako és M. Mamoru, „Efficient and precise cutting of zirconia ceramics using heated cutting tool,” *CIRP Annals*, 1. kötet63, pp. 105-108, 2014.
- [94] K. Toru, O. Toshihiro, S. Naohiko és M. Mamoru, „Ultraviolet-laser-assisted precision cutting of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal,” *Journal of Materials Processing Technology*, 1. kötet214, 1. szám2, pp. 267-275, 2014.
- [95] E. Uhlmann és J. Koenig „CVD diamond coatings on geometrically complex cutting tools,” *CIRP Annals*, 1. kötet58, 1. szám1, pp. 65-68, 2009.
- [96] D. Ravikumar, C. Maneesh, M. S., R. B. és R. R. S. M., „High wear performance of the dual-layer graded composite diamond coated cutting tools,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 1. kötet48, pp. 24-30, 2015.
- [97] M. Zeng, C. Li., J. Pei, „Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1. kötet45, pp. 1468-1473, 2005.

- [98] H. Hocheng, H. Tai és S. Liu, „Assessment of ultrasonic drilling of C/SiC composite material,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1. kötet31, 1. szám2, pp. 133-142, 2000.
- [99] Z. Y. Wang, K. P. Rajurkar és M. Murugappan, „Cryogenic PCBN turning of ceramic (Si 3N 4),” *Wear*, 1. kötet195, 1. szám1-2, pp. 1-6, 1996.
- [100] A. Muhammad, X. Zhang, R. Mustafizur és I. Senthil, „A predictive model of the critical undeformed chip thickness for ductile–brittle transition in nano-machining of brittle materials,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1. kötet64, pp. 114-122, 2013.
- [101] S. Blackley és O. Scattergood, „Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials,” *Precision Engineering*, 1. kötet13, 1. szám2, pp. 95-103, 1991.
- [102] A. Muhammad, R. Mustafizur és Y. S. Wong, „Analytical model to determine the critical conditions for the modes of material removal in the milling process of brittle material,” *Journal of Materials Processing Technology*, 1. kötet212, 1. szám9, pp. 1925-1933, 2012.
- [103] K. Ueda, T. Sugita és H. Hiraga, „A J-integral Approach to Material Removal Mechanisms in Microcutting of Ceramics,” *Annals of the CIRP*, 1. kötet40, pp. 61-64, 1991.
- [104] J. R. Rice, „A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Crack,” *J. Appl. Mechanics*, 1. kötet6, pp. 379-386, 1968.
- [105] F. Kevin, W. Zhi, M. Takashi és H. Yong, „Effect of tilt angle on cutting regime transition in glass micromilling,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1. kötet49, p. 315–324, 2009.
- [106] F. szerszámgépjártó, „<https://www.fraisa.com/>,” Fraisa, [Online]. Available: [https://www.fraisa.com/en/assets/media/pdf/prospekte/en/Prosp\\_MikroX\\_EN.pdf](https://www.fraisa.com/en/assets/media/pdf/prospekte/en/Prosp_MikroX_EN.pdf). [Hozzáférés dátuma: 18 09 2020].
- [107] Z. Viharos és K. B. Kiss, „Integrated Experimental design and parameter optimization under uncertain process circumstances,” in *XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry*, Prague, Czech Republic, 2015.
- [108] L. Monostori és Z. J. Viharos, „Hybrid, AI- and simulation-supported optimisation of process chains and production plants,” *Annals of the CIRP*, 1. kötet1, pp. 353-356., 2001.
- [109] Z. J. Viharos és K. B. Kiss, „Integrated Experimental design and parameter optimization under uncertain process circumstances,” in *XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”*, Prague, Czech Republic, August 30 - September 4, 2015.
- [110] Z. F. Kovács, Z. J. Viharos és J. Kodácsy, „Determination of the working gap and optimal machining parameters for magnetic assisted ball burnishing,” *Measurement*, 1. kötet118, pp. 172-180., 2018.

- [111] M. Varga , E. Csanády és . Z. Kocsis , „CNC marógép elszívófejeinek aerodinamikai vizsgálata az elszívási hatékonyság növelése céljából I.,” *Faipar*, 1. kötet56, pp. 3-8, 2008.
- [112] J. Farkas, E. Csanády és L. Csóka , „A forgácsolóerőt és a felületi érdességet befolyásoló tényezők hőre lágyuló műanyagok esztergálásakor II.: A szerszámgeometria és a hűtő/kenőfolyadék hatása,” *MŰANYAGIPARI SZEMLE*, 1. kötet14, pp. 92-104, 2017.
- [113] wikipedia. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_barrier\\_coating](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_barrier_coating). [Hozzáférés dátuma: 09 06 2021].
- [114] Z. J. Viharos, *Intelligent methods in modelling and optimisation of manufacturing processes*, Budapest: Dissertation for the Ph.D. Degree of the Technical University of Budapest, 1999.
- [115] L. Móricz és Z. J. Viharos, „Investigation of ductile/brittle chip formation zone in the context of manufactured geometry with different CAM paths strategies,” *IFAC*, 2022.
- [116] P. A. Iga, N. Nazriati és G. S. Dani, „Synthesis of NTC thermistors with screen printing method from natural yarosite minerals,” in *International Conference on Chemical and Material Engineering*, 2021.
- [117] S. Lea, H. Mathias és A. Christos G., „Grain-Size Effects on Multi-Wire Slurry Sawing of Translucent Alumina Ceramics,” *Ceramics*, 1. kötet3, 1. szám4, pp. 428-439, 2020.
- [118] Minitab, „<https://www.minitab.com/>,” Minitab, 2022. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/>. [Hozzáférés dátuma: 10 08 2021].
- [119] F. J. Alonso és D. R. Salgado, „Application of singular spectrum analysis to tool wear detection using sound singals,” *Proceedings of the IMechE Journal of Engineering Manufacture*, 1. kötet219, 1. szám9, p. 703–710, 2005.
- [120] F. A. Ahmad és P. A. Avita , „Online Monitoring Cutting Tool Wear Using Audio Signal,” in *Proceedings of the International Mechanical Engineering and Engineering Education Conferences*, 2016.
- [121] L. Móricz, Z. Viharos, A. Németh és A. Szépligeti, „Indirect measurement and diagnostics of the tool wear for ceramics micro-milling optimisation,” in *XXII IMEKO World Congress “Knowledge through measurement”*, Belfast, United Kingdom, September 3-6, 2018.
- [122] L. Móricz, Z. J. Viharos, A. Németh és A. Szépligeti, „Product quality and cutting tool analysis for micro-milling of ceramics,” *16th IMEKO TC10 Conference*, pp. 95-100, 2019.
- [123] L. Móricz, Z. J. Viharos, M. Büki, A. Szépligeti és A. Németh, „Off-line geometrical and microscopic & on-line vibration based cutting tool wear analysis for micro-milling of ceramics,” *Measurement*, 1. kötet163, 2020.

- [124] I.S.E.GmbH, „www.theimagingsource.com,” [Online]. Available: <https://www.theimagingsource.com/support/downloads-for-windows/end-user-software/icmeasure/>. [Hozzáférés dátuma: 01 06 2021].
- [125] Y. L. Chia, L. C. Ming és C. L. Jau, „Applying the self-organization feature map (SOM) algorithm to AE-based tool wear monitoring in micro-cutting,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1. kötet34, p. 353–366, 2013.
- [126] D. A. Dornfeld, „Application of acoustic emission techniques in manufacturing,” *NDT E. Int.*, 1. kötet25, p. 259–269, 1992.
- [127] D. A. Dornfeld, „In process recognition of cutting states,” *JSME Int. J.*, 1. kötet37, p. 638–650, 1994.
- [128] K. Jemielniak és O. Otman, „Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals,” *J.Mater.Process.Technol.*, 1. kötet76, p. 192–197., 1998.
- [129] S. Kakade, L. Vijayaraghavan és R. Krishnamurthy, „In-process tool wear and chip-form monitoring in face milling operation using acoustic emission,” *J.Mater. Process.Technol* , 1. kötet44, p. 207–214, 1994.
- [130] J. Seongkyul, K. Christopher , Z. A. Abolfazl és . L. ChaBum , „Knife-edge interferometry for cutting tool wear monitoring,” *Precision Engineering*, 1. kötet50, pp. 354-360, 2017.
- [131] B. PULAK, . G. M. EVERS és H. REN , „FEASIBILITY STUDY OF ON-LINE DRILL WEAR MONITORING BY DDS METHODOLOGY,” *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 1. kötet26, pp. 245-257, 1985.
- [132] B. Z. Balázs, N. Geier, C. Pereszlai, D. I. Poór és M. Takács, „Analysis of cutting force and vibration at micro-milling of a hardened steel,” *PROCEDIA CIRP*, 1. kötet6, pp. pp. 177-182., 2021.
- [133] M. H. Bhuiyan, I. A. Choudhury, M. Dahari, Y. Nukman és Z. S. Dawal, „Application of acoustic emission sensor to investigate the Frequency of Tool Wear and Plastic Deformation in Tool Condition Monitoring,” *Measurement*, 1. kötet92, p. 208–217, 2016.
- [134] K. Mustafa és S. H., „Investigation of Progressive Tool Wear for Determining of Optimized Machining Parameters in Turning,” *Measurement*, 1. kötet140, p. 427–436, 2019.
- [135] F. M. Ahmed, Z. M. Nuawi, S. Abdullah, Z. Wahid, Z. Karim és M. Dirhamsyah, „Development of tool wear machining monitoring using novel statistical analysis method,” *Procedia Eng.*, 1. kötet101, p. 355–362, 2015.
- [136] R. Galawar, F. Ansari és Z. J. Viharos , „Integrating maintenance strategies in autonomous production control using a cost-based model,” *ACTA IMEKO*, 1. kötet10, p. pp. 156–166, 2021.

- [137] Z. J. Viharos, S. Soós, G. Nick és R. Beregi, „Non-comparative, Industry 4.0 Readiness Evaluation for Manufacturing Enterprises,” in *15th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics: “Technical Diagnostics in Cyber-Physical Era”*, Budapest, Hungary, June 6-7., 2017.
- [138] S. Mezei, B. Mikó és S. i. Mezei, „Csoporttechnológia tervezésének számítógépes támogatása,” in *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka IV.*, Kolozsvár, Románia, 1999.
- [139] N. I. Corp, „www.ni.com,” National Instruments Corp, [Online]. Available: <https://www.ni.com/hu-hu/shop/engineering-education/portable-student-devices/myrio-student-embedded-device/what-is-myrio.html>. [Hozzáférés dátuma: 18 08 2021].
- [140] A. Huba és G. Lipovszki, *Méréselmélet*, Budapest: BME MOGI, 2014.
- [141] J. Z. Viharos, B. K. Kis, Á. Fodor és M. I. Büki, „Adaptive, Hybrid Feature Selection (AHFS),” *Pattern Recognition*, 1. kötet116, p. 107932, 2021.
- [142] L. Móricz, Z. J. Viharos és M. Büki, „Effect of CAM Path Strategies on Tool Life in Ceramics Micro-Cutting,” in *17th IMEKO TC 10 and EUROLAB Virtual Conference*, 2020.
- [143] L. Móricz, Z. J. Viharos és M. Büki, „Vibration Based Tool Life Monitoring for Ceramics Micro-Cutting under various Toolpath Strategies,” in *ACTA IMEKO*, 2020.
- [144] L. Móricz, Z. J. Viharos és M. Büki, „Vibration Based Characterization of Tool Wearing in Micro-Milling of Ceramics,” in *XXIII IMEKO World Congress “Measurement: sparking tomorrow’s smart revolution*, Yokohama, Japan, 2021.
- [145] L. Móricz és Z. J. Viharos, „Vibration based characterization of tool wearing in micro-milling of ceramics during waveform toolpath,” *GRADUS*, 1. kötet9, 1. szám1, 2022.
- [146] . A. Muhammad , . R. Mustafizur és . Y. . S. Wong , „Analytical model to determine the critical conditions for the modes of material,” *Journal of Materials Processing Technology*, 1. kötet212, p. 1925– 1933, 2012.
- [147] L. Huzsvai és Vincze Szilvia, *SPSS- statisztika*, Seneca Books, 2012.
- [148] Minitab, „support.minitab.com,” [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/20/>. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2021].
- [149] Z. A. Derek , *Elementary Biostatistics*. Department of Biology and Geology, University of South Carolina Aiken .
- [150] Z. C. Johanyák, *Bevezetés a kísérletmódszertanba (egyetemi jegyzet)*, Kecskemét : Kecskeméti Főiskola , 2002.
- [151] N. Tamás, „A gépi tanulás módszereinek alkalmazása R-ben,” *Statisztikai szemle*, 1. kötet99, 1. szám2, pp. 173-198, 2021.

- [152] Y. Zhang, L. Renjing, A. Heidari, W. Xin, Y. Chen és M. Wang, „Towards augmented kernel extreme learning models for bankruptcy prediction: Algorithmic behavior and comprehensive analysis,” *Neurocomputing*, 1. kötet430, pp. 185-212, 2021.
- [153] J. D. Evan, *Straightforward statistics for the behavioral sciences.*, English: Pacific Grove : Brooks/Cole Pub. Co., ©1996., 1996.
- [154] B. D. Lovász, F. Ádám, K. Zsobrák, M. Szalai és J. Dujtor, „Mesterséges intelligencia alkalmazásának lehetőségei a gasztroenterológiában és az endoszkópiában,” in *Central European Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2020.
- [155] Z. J. Viharos , L. Monostori és S. Markos, „Selection of input and output variables of ANN based modeling of cutting processes.,” in *Proceedings. X. Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems.*, Karpacz, Poland, 21-26 March 1999.
- [156] Z. Viharos, K. Novák, G. Tóth és S. Markos, „Modelling of different aspect of the cutting process by using ANNs,,” in *XIII Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems - Open and global manufacturing design (CIRP)*, Karpacz, Poland, 2002.
- [157] L. Monostori, Z. J. Viharos és S. Markos , „Satisfying various requirements in different levels and stages of machining using one general ANN-based process model,” *Journal of Materials Processing Technology, ELSEVIER SCIENCE SA, LAUSANNE, 107: (1-3)*, pp. pp. 228-235, NOV 22 2000 .
- [158] R. Schmitt, L. Monostori, H. Glöckner és Z. J. Viharos, „ Design and assessment of quality control loops for stable business processes,” *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1. kötet61, pp. pp. 439-444., 2012.
- [159] S. M. Najm, I. Paniti, T. Trzepieciński, S. A. Nama, Z. J. Viharos és Á. Jacsó, „Parametric Effects of Single Point Incremental Forming on Hardness of AA1100 Aluminium Alloy Sheets,” *Materials*, 1. kötet14, 2021.
- [160] L. Reisz, Z. Molnár, S. Tatai és E. Magoss, „Correlation between the wood cutting parameters and the size distribution of the wood particles,” in *The 8th International Science Conference : Chip and Chipless Woodworking Processes 2012*, Zvolen, Szlovákia : Technical University Zvolen (2012), 2012.
- [161] E. Csanády, Z. Kovács, E. Magoss és G. Sitkei, *Optimum Design and Manufacture of Wood Products*, Springer, 2019.
- [162] S. Moshat, S. Datta, A. Bandyopadhyay és P. Kumar Pal, „Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method,” *International Journal of Engineering, Science and Technology* , 1. kötet2, 1. szám1, pp. 92-102 , 2010.
- [163] E. Hazir, E. Seda Erdinler és K. Hüseyin Koc, „Optimization of CNC cutting parameters using design of experiment (DOE) and desirability function,” *Springer*, p. 1423–1434 , 2017.

- [164] T. Wang, K. Xie, X. Wang, L. Jiao, J. Shen és H. Xu, „Surface integrity of high speed milling of Al/SiC/65aluminum matrix composites,” *Procedia CIRP*, p. 475 – 480, 2013.
- [165] B. S. Ishan és R. G. Kishore, „Optimization of Cutting Tool Life on CNC Milling Machine Through Design Of Experiments-A Suitable Approach – An overview,” *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 1. kötet1, 1. szám4, 2012.
- [166] L. D. Jay, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, USA: California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- [167] C. M. Douglas, C. R. George és F. H. Norma, *Engineering Statistics*, USA, 2011.
- [168] N. William, *Statistics for Engineers and Scientists*, USA: McGraw Hill Higher Education.
- [169] Minitab, „<https://support.minitab.com/>,” [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/effects-plots/>. [Hozzáférés dátuma: 10 07 2022].
- [170] Minitab, „Minitab, főhatás vizsgálat,” [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/supporting-topics/basics/what-is-a-main-effects-plot/>.
- [171] Minitab, „minitab kereszthatás vizsgálat,” [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/using-fitted-models/how-to/factorial-plots/interpret-the-results/key-results/>.
- [172] G. Mátyási és R. Horváth, „Alumínium alkatrészek forgácsolhatóságának vizsgálata kísérletterv segítségével,” in *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XVIII.*, Kolozsvár, 2013.
- [173] R. Horváth, A. Fazekas és G. Mátyási, „NYOMÁSOSAN ÖNTÖTT ALUMÍNIUM ÖTVÖZETEK FORGÁCSOLHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA,” in *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XIX.*, Kolozsvár, 2014.
- [174] I. 6983-1:2009, „<https://www.iso.org/standard/34608.html>,” 12 2009. [Online]. [Hozzáférés dátuma: 10 07 2022].
- [175] HelmanCNC, „<http://www.helmancnc.com/din-66025-nc-programming-codes/>,” [Online].
- [176] G. Wang, X. Liu, W. Gao, B. Yan és T. Chen, „Study on the Design and Cutting Performance of a Revolving Cycloid Milling Cutter,” *Applied Sciences*, 1. kötet9, 1. szám14, p. 2915, 2019.
- [177] Z. J. Viharos, K. B. Kiss, I. Paniti, B. Farkas, L. Csorba, T. Szalay és M. Czampa, „Method For Micro-Electro-Discharge Machining ( $\mu$ -Edm) Of Ceramic Workpieces”. European Patent Szabadalom száma: Nr.: 17462001, 2017.
- [178] L. Móricz, Z. J. Viharos, „Vibration Based Cutting Tool Path Differentiation by Feature Selection” The 18th IMEKO TC10 Conference on Measurement for Diagnostics, Optimisation and Control to Support Sustainability and Resilience, Warsaw, Poland, September 26–27, 2022, ISBN 978-92-990090-0-0, pp. 129-136

## 10 MELLÉKLET

### 1. Melléklet: Az AHFS futtatás során vizsgált matematikai jellemzők

1. Momentum – átlag:	$\frac{\sum_{i=0}^n x(i)}{n}$
2. Momentum – szórásnégyzet:	$\frac{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})^2}{n}$
3. Momentum – ferdeség:	$\frac{\frac{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})^3}{n}}{\left(\frac{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})^2}{n}\right)^{\frac{3}{2}}}$
4. Momentum – lapultság:	$\frac{\frac{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})^4}{n}}{\left(\frac{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})^2}{n}\right)^2} - 3$
5. Első derivált átlaga:	$\frac{\sum_{i=0}^n x'(i)}{n}$
6. Második derivált átlaga:	$\frac{\sum_{i=0}^n x''(i)}{n}$
7. Mobilitás:	$\sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=0}^n (x'(i) - \bar{x}')^2}{n}}{\frac{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})^2}{n}}}$
8. Komplexitás:	$\sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=0}^n (x''(i) - \bar{x}'')^2}{n}}{\frac{\sum_{i=0}^n (x'(i) - \bar{x}')^2}{n}} - \frac{\frac{\sum_{i=0}^n (x'(i) - \bar{x}')^2}{n}}{\frac{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})^2}{n}}}$
9. Autókorrelációs függvény karakterisztikája:	$\frac{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})(x(i+\tau) - \bar{x})}{\sum_{i=0}^n (x(i) - \bar{x})^2}$
10. Minimum:	$\min x$
11. Maximum:	$\max x$
12. Maximum és Minimum aránya:	$\frac{\max x}{\min x}$
13. Maximum és Minimum különbsége:	$\max x - \min x$
14. A jel hányszor lépi át saját átlag értékét valamelyik irányból:	$\sum_{\text{sgn}(x(i)-\bar{x}) \neq \text{sgn}(x(i+1)-\bar{x})} 1$
15. A legkorábbi pont, ahol a jel átlépi a saját átlagát:	$\arg \min_{x(i) > \bar{x}} x$
16. A legkésőbbi pont, ahol a jel átlépi a saját átlagát:	$\arg \max_{x(i) > \bar{x}} x$
17. A jel hány esetben nagyobb a saját átlagánál:	$\sum_{x(i) > \bar{x}} 1$
18. A jel hány esetben kisebb a saját átlagánál:	$\sum_{x(i) < \bar{x}} 1$
19. Az első jel értéke:	$x(0)$
20. Az utolsó jel értéke:	$x(n)$
21. Az utolsó és első jel különbsége:	$x(n) - x(0)$
22. Az utolsó és első jel aránya:	$\frac{x(n)}{x(0)}$