

Tézisfüzet

Soproni Egyetem

Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák
Doktori Iskola

**SZERSZÁMKOPÁS FELÜGYELETE ÉS
OPTIMALIZÁLÁSA KERÁMIÁK
MIKROMARÁSA SORÁN**

című PhD értekezés tézisfüzete

Készítette: **Móricz László**
Okleveles gépészmérnök

Témavezetők: **Dr. Viharos Zsolt János**

Dr. Csanády Etele

Sopron

2023

1. Kutatási téma ismertetése, célkitűzések

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. Az energiaigény növekvő tendenciája tükrözi, hogy a gázturbinák mind technológiai kidolgozottságban, mind piaci szerepüket tekintve is igen meghatározóak [1][2].

A trendekben megfigyelhető, hogy a világ folyamatosan növekvő energiafelhasználása megkerülhetetlenné teszi a turbinák folyamatos fejlesztését, ami állandó kihívást jelent a jelen kutatások számára is. A megfelelő határfok elérése érdekében a turbinák szélsőséges működési körülmények között kell, hogy működjenek, az egyik legnagyobb kihívást okozó problémakör a magas hőmérséklettel szembeni ellenállóság javítása. A gázturbinák jóval a turbinalapát öntvények olvadási hőmérséklete felett üzemelnek, ezért szükséges a folyamatos hűtés és hő elleni védelem. A lapátok belül üregesek, a bevezetett levegővel hűtik, mely a hűtőfuratokon keresztül távozik a lapát belsejéből. 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 felvitel után, 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 jelen doktori értekezés is ezen területen mutat be új tudományos eredményeket.

A kutatási tevékenységem részletes céljai a következők:

1. Az elsődleges cél a kerámia-marást befolyásoló hatások feltárása, amin belül a következő pontokat fogalmaztam meg:
 - a. Megállapítani, hogy ezek a jellemzők milyen mértékben hatnak a szerszám élettartam alakulására. A kísérletek során az elérhető felületi minőség alakulását nem vizsgálom.
 - b. Tovább cél, hogy a technológiai paramétereket olyan kombinációja kerüljön feltárásra, ahol a szerszám élettartam a legnagyobb és a gyártási idő a legkisebb.
2. A kísérletek számának optimalizálására egy teljes faktoros kísérletterv kidolgozása, és elvégzése a cél, ami alapján egy megbízható optimalizálás elkészítése lehetséges.
3. Mivel összetett geometria lett vizsgálva, így további cél volt 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 kutatás célja volt 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 vizsgálatán túl, cél az is, hogy az online rezgésmérés alapján megállapítsam a szerszám összetett geometriája egyes élszögeinek, felületeinek pillanatnyi állapotát is.

2. Irodalmi áttekintés

A kerámiák definíciója az American Ceramic Society szerint olyan nemfémek anyagok csoportja, melyek előállításuk vagy használatuk során hőnek vannak kitéve [5][6]. 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 leginkább 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 fizikai tulajdonságaik (nagy keménység, hősokkal szembeni érzékenység, jó hőszigetelése, dinamikus igénybevételekkel szembeni érzékenység, villamos szigetelés) miatt nehezen megmunkálható anyagok [7]. A megmunkálásukat alapvetően a nagy keménységük teszi nehezzé, mivel egyrészt a forgácsolás során keletkező erők hatására gyakran repedezik, törnek a felület, másrészt a szerszámkopás miatt nagyon intenzív.

Elemelve a hazai, és nemzetközi szakirodalmat arra következtetésre jutottam, hogy a kutatások irányvonala a következő pontokban foglalható össze:

- *Szerszámélettartam növelésének lehetőségei különböző kerámia alapanyagok megmunkálása során (szerszám kopási fázisainak feltárása, megmunkálás rugalmas- rideg tartományban, alapanyag előkészítése, szerszám bevonat, technológiai optimalizálás) [8][9]*
- *Felületi minőség javítási lehetőségek különböző kerámia alapanyagok megmunkálása során (repedésmentes felület előállítása a technológia optimalizálásával, kombinált technológiákkal) [9]*

Mikro forgácsolás

A méretet, ahonnan mikro-forgácsolásról beszélünk a szakirodalomban nincs egységesen elfogadott definíció [10]. 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 μm -es mérettartományba esik [11].

A mikro-marás egy precíz és flexibilis technológia, amivel különféle anyagtipusok (polimerek, kerámiák, fémek, ötvözetek), és összetett 3D geometriák munkálhatók meg viszonylag nagy anyagleválasztási sebességgel [12]. A mikro-marás kinematikai viszonyai hasonló a hagyományos méretű marási eljáráshoz; van azonban néhány egyedi jelenség és kulcsfontosságú szempont [12]:

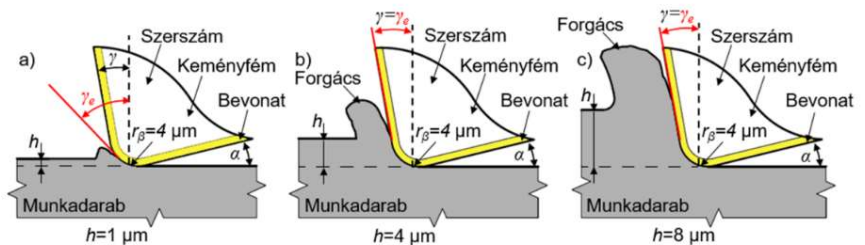
- *A forgácsolószerszám mérete rendkívül kicsi lehet, ezért a hossz/átmérő arány gyakran nagy. A szerszám kedvezőtlen mérete, valamint a rezgés és/vagy a viszonylag nagy szerszáműtés gyakran szerszámtöréshez vezet.*
- *A forgácsvastagság gyakran ugyanolyan nagyságrendű, mint a forgácsolóél sugara vagy a munkadarab anyagának szemcsemérete,*

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-sorzásási folyamatok költség- és időigénye nagyobb hatással van a termékek végső költségére
- 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.

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 1. ábrán is látható.



1. ábra: A különböző geometriai viszonyok mikromarásnál a különböző forgácsvastagságok esetében [12]

Forgácsolási erők a mikro-megmunkálásban

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.

3. Kutatási módszerek / kutatómunka összefoglalása

A kutatásom első lépésben fel lettek mérve azokat a hatások, amelyek a szakirodalom alapján befolyásolják a szerszám élettartamot, és a gyártási időt is. Ezek a tényezők, és optimális értékeik nemcsak a kerámia forgácsolási kutatások során fontosak, hanem ugyanilyen lényegesek az ipari gyakorlatban is [13][14]. Ezeket a hatásokat a 2. ábrán kerütek összefoglalásra.

A kutatás a következő cél köré épült: A lehető legtöbb zseb elkészítése 1 szerszámmal.



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

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. A szakirodalom nem vizsgálja, hogy a különböző szerszám pályák milyen befolyással vannak a szerszámra az oxid kerámia forgácsolása során, így több, az EdgeCam által felkínált és az ipari felhasználások során leggyakrabban alkalmazott szerszám pálya stratégiák is elemzésre kerültek. Az első, kiindulási stratégia (etalon pálya) a láncolt szerszám pálya volt (3. 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 elemezve volt

még a ciklois szerszám pálya köztes ciklois fogásokkal, valamint a hullámforma pálya is.

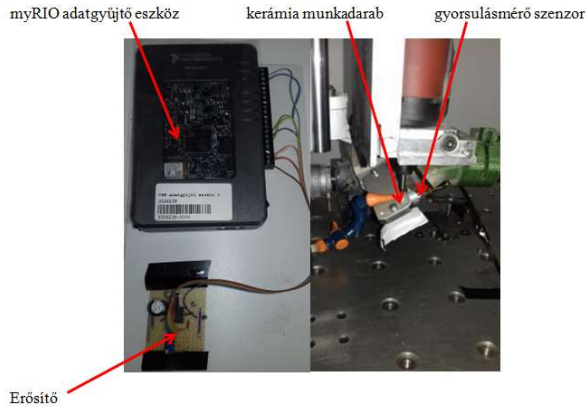
Szerszámkopás felügyelete a rezgésjelek alapján

A mikroforgácsolás során a szerszám elhasználódásának egyik oka a forgácsolás során keletkező rezgés. 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 [15][16][17].

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. Emiatt a folyamat esélyesen jól nyomon követhető rezgésdiagnosztikai módszerekkel.

Mérés, adatgyűjtés

A rezgésméréshez egy TE-CONNECTIVITY típusú gyorsulásmérő szenzort alkalmaztam. A mérőeszközzel a rezgésgyorsulás pillanatnyi amplitúdó értékének megfelelő villamos kimenőjelet mérjük mV-ban. Az erősítőtől érkező jelek egy myRIO-1900-as hordozható, újra konfigurálható I/O (RIO - Reconfigurable Input/Output) készülékkel lettek rögzítve.



3. ábra: Mérőkör felépítése

A kísérletek során gyűjtött adatok MATLAB szoftverben lettek feldolgozva, valamint a jellemzőválogatási módszer kiértékelésre használt Adaptív, Hibrid Jellemzőválogatási Módszer (Adaptive, Hybrid Feature Selection) algoritmus [18] is MATLAB környezetben futott.

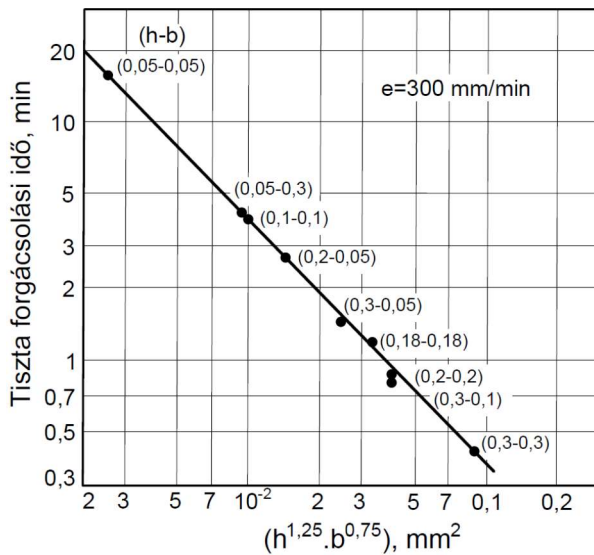
4. Tézisek bemutatása

A technológiai paraméterek hatása a szerszám élettartamra vonatkozóan faktoriális kísérlettervvel lett vizsgálva, az alábbi paraméterértékek mellett:

	1.	táblázat: Kísérletterv
Axiális fogásmélység (a_p) [mm]		0.05, 0.3
Radiális fogásmélység (a_e) [mm]		0.05, 0.3
Fordulatszám (n) [1/min]		10000, 25000
Előtolási sebesség (v_f) [mm/min]		300, 600
Marási stratégia		Egyenirányú marás / ciklois szerszám pálya

Forgácsolásnál, a faktoriális kísérlet kiértékeléskor célszerű és szokásos a fogásmélységek hatását a forgácskeresztmetszet függvényében 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 $(a_p:0.3-a_c:0.05)$ (axiális fogásmélység-radiális fogásmélység) kombináció nem azonos az $(a_p:0.05-a_c:0.3)$ kombinációval, bár a szorzatuk azonos. Ezért transzformációra 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. A forgácskeresztmetszet gyártási időre gyakorolt - a kutatások során feltárt - hatását az 4. ábra mutatja be.



4. ábra: A tiszta forgácsolási idő az elméleti forgácskeresztmetszet függvényében, előtolási sebesség: $v_f=300 \text{ [mm/min]}$ esetén

A görbe iránytangense -1.06, vagyis nem sokban tér el a fordított arányosságtól. A kísérlet kiértékeléséből kapott összefüggés az 1. tézis alapjául szolgált.

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_{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 kimunkálására megadható tiszta forgácsolási idő összefüggést írtam fel általános alakban:

Az egyenletet a következő alakban adtam meg:

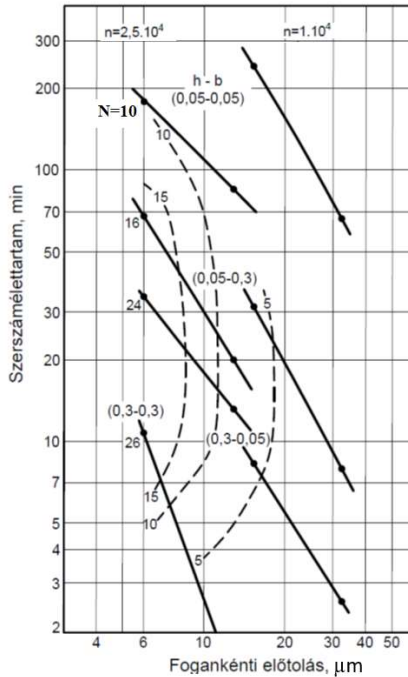
$$T_1 = \frac{2 \cdot (L_1 - s + B_K - s) + [(B_K - 2s)/[b \cdot (L_1 - s)]]}{v_f}$$

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 ”

A tézist alátámasztó publikációim: [19][21][23]

A kiértékelés következő lépése volt meghatározni, hogy a forgácsolási folyamatot leíró változók további szegmensre nem bontható komponensei milyen hatással vannak a szerszám élettartamra. Így percenkénti előtolás átszámításra került fogankénti előtolásra. A paraméterek ilyen irányú hatása az 5. ábrán került ábrázolásra:



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

Egy egyenes két pontja az adott axiális-radiális fogásmélység kombináció mellett a két különböző fogankénti előtolás hatásváltozását mutatja.

Kis fogásmélységnél (0,05-0,05) a fordulatszám csökkenése növeli az élettartamot, közelítőleg a Taylor- egyenes szerint viselkedik. A nagyobb fogásmélység kombinációkra a fordulatszáma hatása csökken, és a használható kombinációkra, 0,3-0,3 és 0,3-0,05, hatása elhanyagolható (*mivel a hatásvonalak párhuzamosak egymással*). A fő változó az egy fogra jutó

előtolás értéke. A mélység kombinációs szám a nevezőben biztosítja az egyenlet érvényességét. Az eredmények a 2. tézis alapjául szolgálnak.

2. Tézis:

Oxid kerámia alapanyag „ciklois szerszámpálya 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[μ 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:

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

A gyártható zsebszámbra megadott szerszámélettartamot a következő alakban adtam meg:

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

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.

A tézist alátámasztó publikációim: [19][21][23]

A hagyományostól eltérő szerszámgeometria (*nagy ékszög, kis hátszög*) miatt szerszám hosszirányú kopásával megváltoznak a forgácsolási körülmények (*az élek közötti felület is súrlódni kezd*), amely eredményeképpen a tiszta forgácsleválasztási folyamat romlik, valamint a tengely irányú súrlódási erő megnő. A kopás okozta súrlódási veszteségek a rezgés amplitúdó észrevehető csökkenését eredményezik. Az eredmények a 3. tézis alapjául szolgálnak.

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: fogankénti előtolás=6-30[μ 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.

A tézist alátámasztó publikációim: [19][31]

A szerszám hosszirányú kopásának mérésével 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 eredmények a 4. tézis alapjául szolgálnak.

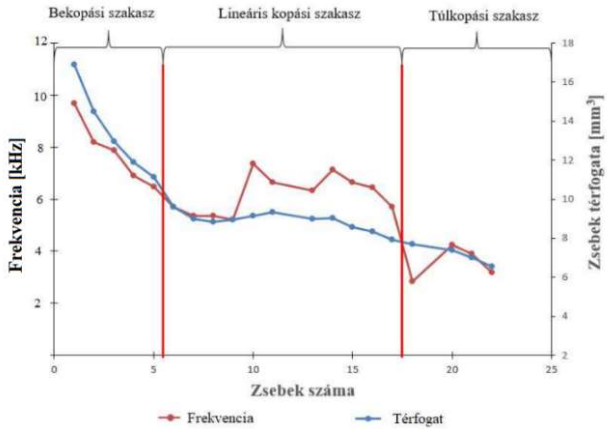
4.Tézis:

Oxidkerámia alapanyag 1[mm] átmérőjű, TiAlN bevonatú gömbmaró szerszámmal történő megmunkálása során „vizsgált tartomány: (*f*: fogankénti előtolás=6-30[μ 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.

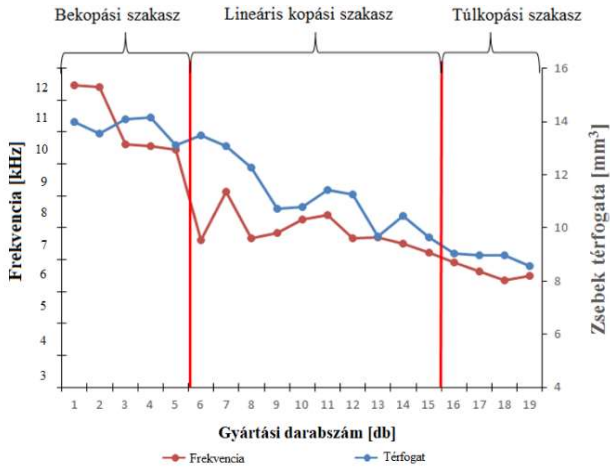
A pontosságot nem csak a közvetlen kopás befolyásolja, hanem a pályahibák is hozzájárulnak, amelyek a megnövekedett előtoló erőre (axiális és radiális irányba) vezethetők vissza. Megadtam az utóbbiak hozzájárulását az eredő pontatlansághoz. A vizsgált pályastratégiáknál (hullámforma, ciklois, láncolt) 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.

A tézist alátámasztó publikációim: [22],[23],[26]

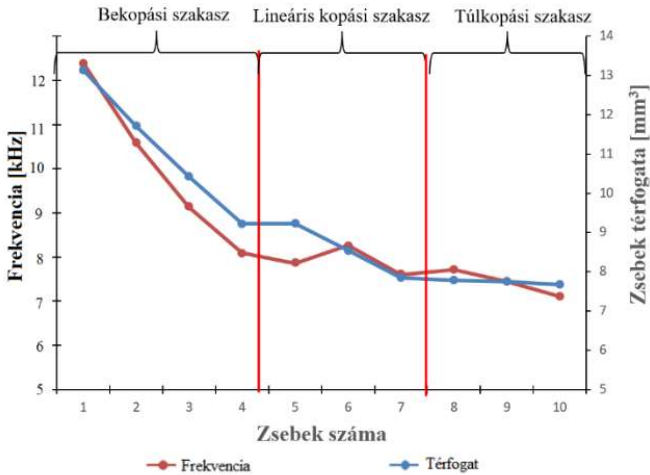
A forgácsolás során keletkező rezgések vizsgálata során meghatározásra került minden gyártott zseb esetén az adott zsebre vonatkozó átlagos frekvencia. Ez a frekvenciaváltozás nagy pontossággal egybeesik a zsebek térfogatának változásával az ábrákon látható módon.



6. ábra: Zsebek térfogatváltozása, és az Adaptív Hibrid Jellemzőválogatási módszerrel kapott statisztikai függvény kiértékelése hullámforma szerszám pályánál



7. ábra: Zsebek térfogatváltozása, és az Adaptív Hibrid Jellemzőválogatási módszerrel kapott statisztikai függvény kiértékelése ciklois szerszám pályánál



8. ábra: Zsebek térfogatváltozása, és az Adaptív Hibrid Jellemzőválogatási módszerrel kapott statisztikai függvény kiértékelése láncolt szerszám pályánál

A gyártott geometriai méretváltozáshoz, illetve rezgésváltozáshoz kapcsolódó új tudományos eredmények az 5. tézisben kerültek összefoglalásra.

5. Tézis:

Oxidkerámia alapanyag 1[mm] átmérőjű, TiAlN bevonatú gömbmaró szerszámmal történő megmunkálása során „vizsgált tartomány: (f_z : fogankénti eltolás=6-30[μ 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 forma- 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.

A tézist alátámasztó publikációim: [25],[27],[28],[29]

Felhasznált irodalom

- [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] P. Kun, „Új szerkezetű funkcionális kerámia nanokompozitok előállítására, és vizsgálata,” BME, BME Mérnök-fizikus Szak, 2012.
- [6] 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. [Hozzáférés dátuma: 05 04 2020].
- [7] R. Heleen, F. Eleonora, B. Jan, R. Dominiek és L. Bert, „Micromilling of sintered ZrO₂ ceramic via cBN and diamond coated tools,” *Procedia CIRPs*, 1. kötet14, p. 371 – 376, 2014.
- [8] R. Heleen, F. Eleonora, B. Jan, R. Dominiek és L. Bert, „Micromilling of sintered ZrO₂ ceramic via cBN and diamond coated tools,” *Procedia CIRP*, 1. kötet14, p. 371 – 376, 2014.
- [9] B. Rong, F. Eleonora, . Q. Jun, R. Dominiek, . L. Liang és H. Ning, „Tool Wear Characters in Micro-milling of Fully Sintered ZrO₂ Ceramics by Diamond Coated End Mills,” *Materials Science Forum*, 1. kötet723, pp. 365-370, 2012.
- [10] M. Takács, Sokkritályos ötvözetek mikroforgácsolása keményfém származóval, Doktori (PHD) értekezés: BME, 2006.

- [11] T. Masuzawa és H. K. Tönshoff, „Three-dimensional Micromachining by Machine tools,” *Annals of the CIRP*, 1. kötet46, 1. szám2, pp. 627-628, 1997.
- [12] 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.
- [13] 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. pp. 353-356., 2001.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] A. Huba és G. Lipovszki, *Méréselmélet*, Budapest: BME MOGI, 2014.
- [18] J. Z. Viharos, B. K. Kis, Á. Fodor és M. I. Büki , „Adaptive, Hybrid Feature Selection (AHFS),” *Pattern Recognition*, 1. kötet 116, p. 107932, 2021.

Dolgozat témájához kapcsolódó publikációk

- [19] 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.
- [20] L. Móricz és Z. J. Viharos, „A Kerámiák felhasználásával és tulajdonságaik javításával kapcsolatos trendek,” in *Gyártás 2015 Konferencia*, GÉPGYÁRTÁS szaklap különszám, 2015.
- [21] 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.

- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] L. Móricz, Z. J. Viharos „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.
- [29] 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.
- [30] L. Móricz, L. és Zs. 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
- [31] 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