

Szent István Egyetem

**CIRKÓNIUM-DIOXID KERÁMIÁK
ESZTERGÁLÁSA**

Doktori (Ph.D) értekezés

Fledrich Gellért

Gödöllő
2011

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrár Műszaki Tudomány

vezetője: Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar

Témavezető: Dr. Pálincás István,
főiskolai tanár, CSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet

Társ-Témavezető: Dr. habil. Jánosi László,
egyetemi docens, CSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

| | |
|---|-----------|
| 1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK | 5 |
| 1.1. A téma aktualitása..... | 5 |
| 1.2. A kutatás célja és feladatai..... | 5 |
| 2. ANYAG ÉS MÓDSZER | 7 |
| 2.1. A vizsgált anyagok..... | 7 |
| 2.2. Forgácsolási vizsgálatok | 8 |
| 2.3. Felület topográfiai vizsgálatok..... | 8 |
| 2.4. Súrlódási vizsgálatok | 8 |
| 2.5. Hőkamerás kiegészítő vizsgálatok | 8 |
| 3. EREDMÉNYEK..... | 9 |
| 3.1. A forgácsolási vizsgálatok eredményei..... | 9 |
| 3.1.1. Kerámia forgácsolási eredményei | 9 |
| 3.1.2. Lemezgrafitos öntvény forgácsolási eredményei..... | 12 |
| 3.1.3. Gömbgrafitos öntvény forgácsolási eredményei..... | 13 |
| 3.1.4. A forgácsoló szerszám élvizsgálati eredményei | 13 |
| 3.2. Forgácsoló erő meghatározása a forgácsolási paraméterek függvényében . | 14 |
| 3.3. Topográfiai felületvizsgálatok eredményei..... | 15 |
| 3.3.1. Mikroszkópos és 3D felülettopográfiai vizsgálatok eredményei | 15 |
| 3.3.2. Pásztázó elektron-mikroszkópos felületvizsgálatok eredményei..... | 16 |
| 3.4. Súrlódási modell vizsgálatok eredményei és értelmezésük | 17 |
| 3.4.1. Súrlódási, kopási eredmények és értékelésük | 17 |
| 3.5. Csúszási felületek mikroszkópos összehasonlítása..... | 19 |
| 3.6. Hőkamerás kiegészítő vizsgálatok eredményei | 20 |
| 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK | 21 |
| 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK..... | 23 |
| 6. ÖSSZEFOGLALÁS | 24 |
| SUMMARY..... | 25 |
| 7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK | 26 |



1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma aktualitása

A műszaki kerámiák olyan szerkezeti anyagok, amelyek az eddigieknél lényegesen magasabb hőmérsékleteken, erős fizikai és kémiai igénybevétel mellett alkalmazhatók. Az ipar fejlődésével a szerkezeti kerámiák iránti igény folyamatosan nő, és éppen ebben a szegmensben juthatnak fontos szerephez. Ilyen anyag a cirkóniumdioxid is. Hosszabb távon az atomi szintről kiinduló, számítógéppel irányított anyagfelépítés, szerkezet kialakítás és termékgyártás feltételeinek megteremtését prognosztizálják. A kész- és félkésztermékek gyártásának fejlődése igényli az egyre összetettebb felületek forgácsolását. A térbeli felületek gazdaságosabb megmunkálása a szabályos élű szerszámok további fejlesztését igényli. A cirkóniumdioxid, mint alapanyag a kisebb keménységéből és egyéb tulajdonságaiból adódóan alkalmas szabályos élű szerszámmal való megmunkálásra, így egyedi gyártás vagy akár kis és közepes sorozatok esetében, gyors prototípusgyártásnál egyaránt potenciális anyaggá válhat. Ahhoz, hogy ez bekövetkezzen, a forgácsolási, forgácsolhatósági sajátosságait meg kell ismerni. A kutatási tevékenységem ennek egy részére összpontosít, összhangban egy cirkóniumdioxid kerámia félterméket előállító és fejlesztő cég ajánlásaival.

1.2. A kutatás célja és feladatai

A szabályos élű szerszámokkal nagyobb anyagleválasztási teljesítmény érhető el, mint köszörüléssel, főleg bonyolultabb felületek esetén. Az előnyök különösen furatmegmunkálások esetén érzékelhetőek. Ha összevetjük a köszörűszerszámmal, megállapítható hogy a geometriai méretek miatt az esztergakés szerszám jelentősen merevebb. A kisebb érintkező felület miatt a merőleges erőösszetevő is lényegesen kisebb. Ezen előnyök kihasználása célszerűnek adódik. Azonban erre vonatkozóan a kutatások kezdeti stádiumban vannak. A kerámiákra, így a cirkóniumdioxidra és az alumíniumoxidra az irodalmi források az esztergálással való megmunkálásra minimális utalást tesznek. A ma általánosan elterjedt szinterelés utáni megmunkálás a köszörülés.

A kutatómunkám megvalósításának fő fejezetei:

Az irodalomkutatás alapján – mivel kerámia esztergálásra vonatkozó forgácsolási adatok korlátozottan állnak rendelkezésre – célkitűzésem a cirkóniumdioxid kerámia szabályos élgeometriájú szerszámmal történő forgácsolása. A megmunkálás során az alábbi részcélok elérését tűztem ki:

- A vizsgálataimban szereplő műszaki kerámia forgácsolási tulajdonságainak vizsgálata egyélű forgácsolószerszámmal történő megmunkálás során, esztergálásnál.
- Mérőrendszer kifejlesztése a forgácsolás során fellépő fő- és elótolás irányú erők mérésére.
- A beállított forgácsolási paraméterekkel történő megmunkálás utáni felületek topológiai vizsgálata. A felületeken esetlegesen kialakult mikrorepedések, kagylós kitörések elemzése.
- A forgácsolás során fellépő hőhatásövezet vizsgálata.
- A kerámia forgácsolási tulajdonságainak összehasonlítása a lemezgrafitos és gömbgrafitos öntöttvasak forgácsolási tulajdonságaival.
- Az eltérő beállításokkal megmunkált kerámia-acél felület párok esetén fellépő súrlódási tulajdonságok összehasonlítása száraz súrlódási állapotok esetén.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A vizsgálatok során különböző forgácsolási beállításokkal munkáltam meg a kerámia felületét. Előzetes mérések alapján megállapítottam, hogy a fogásmélységet 0,01 és 0,05 mm közöttire célszerű megválasztani, a fordulatonkénti előtolást pedig 0,01 és 0,05 mm/fordulat közötti ajánlatos. Ilyen vizsgálati paraméterek mellett a szerszám éle rögtön nem töredezett ki. A forgácsolási sebesség közelítő értékére is végeztem előzetes méréseket, ez 50 m/min körülire adódott. Az esztergálást követően a megmunkált felületekről felülettopográfiai, valamint elektronmikroszkópos felvételeket készítettem és azokat elemeztem. A kerámia esztergált és köszörült felületeinek további vizsgálataként összehasonlító jelleggel megmértem a kerámia/acél anyagpárosítás száraz súrlódási jellemzőit.

2.1. A vizsgált anyagok

Cirkónium-dioxid kerámia próbatest

A ZN 40 műszaki kerámia jellemzője, hogy magas hőmérsékleti tartományban kedvező fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkezik. Keménysége nagy, (HV 1250), ezért csak polikristályos gyémánt és kőbős bórnitrid szerszámokkal forgácsolhatóak. A vizsgált anyag magnéziummal stabilizált cirkóniumdioxid kerámia. Az esztergálási kísérleteknél használt hengeres próbatestek átmérője 16 mm.

Öntvény próbatest

A referencia öntvény próbatesteket a kerámia próbatestek geometriai méreteinek megfelelően alakítottam ki. Így előzetes megmunkálással a nyers munkadarabokból készítettem el a próbatesteket, melyek átmérője 16 mm, hosszúságuk pedig a befogási ráhagyás miatt 30 mm.

Acél próbatest

A súrlódási erő méréséhez a kerámia palástfelületére acél próbatestet helyeztem. Az acél lemezek anyaga S355, mérete 20x20 mm, vastagsága 1,5 mm. Az érintkező felülete köszörült, az átlagos felületi érdessége: $R_a = 0,8$.

Egyélú forgácsoló szerszám

A forgácsolószerszám 12x12-es szárú lapkás esztergakés. Kétféle lapkával, köbös bórnitriddel (CBN) és polikristályos gyémánttal (PCD) végeztem a kísérleteimet. Ezekkel az anyagokkal célszerű ilyen keményforgácsolást elvégezni.

2.2. Forgácsolási vizsgálatok

A forgácsoló erő tengelyirányú és érintő irányú komponensének mérésére a késtartó és a készár között kialakított saját fejlesztésű és gyártású ellenállásos erőmérő-szerszámtartót alkalmaztam. Ebben a kialakításban palástesztergálás esetén az előtolás irányú erő (F_f) és a vágó erő (F_c) mérését teszi lehetővé.

2.3. Felület topográfiai vizsgálatok

A megmunkált felületekkel szemben támasztott növekvő követelmények miatt van szükség a felületi mikrotopográfia sokoldalú kiértékelésére, amely a mintavételi felületről gyűjtött adatok feldolgozásával történő felületjellemzést jelenti.

A vizsgálatokkal a köszörült valamint az eltérő forgácsolási paraméterekkel megmunkált kerámia felületekről elektron-mikroszkópos felvételeket készítettem.

2.4. Súrlódási vizsgálatok

A tribológiai vizsgálatok elvégzéséhez készítettem egy berendezést. A vizsgálat során a forgó kerámia próbatest palástfelületére adott normál irányú erővel nyomom az acél ellenfelületet és közben erőmérő cellával mérem a súrlódó erő nagyságát. A normálirányú nyomóerőből és a súrlódási erőből számítottam a rendszerjellemző súrlódási tényezőt, valamint mértem az acél próbatest kopását és deformációját

2.5. Hőkamerás kiegészítő vizsgálatok

A forgácsolás során keletkező hő nagymértékben befolyásolja az anyagleválasztás folyamatát, valamint erősen befolyásolja a szerszám élettartamát. A keletkező hőhatásövezet tanulmányozásához a forgácsolás alatt hőkamerás felvételeket is készítettem. Tekintettel arra, hogy az általam megmunkálásra kiválasztott alapanyag jelentősen ridegebb, a belső súrlódásból eredő hő várhatóan kisebb mértékben jelentkezik.

3. EREDMÉNYEK

3.1. A forgácsolási vizsgálatok eredményei

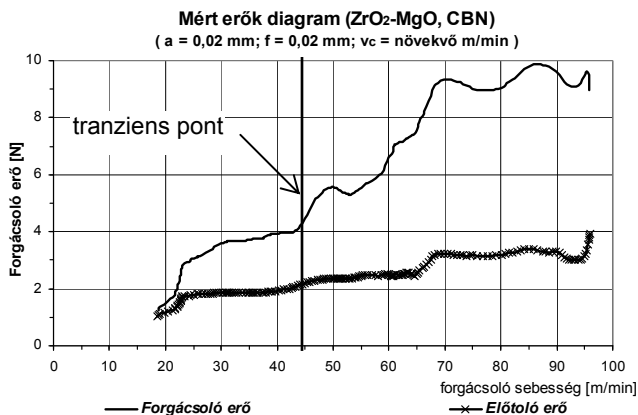
A vizsgálatok során mértem a fő- (F_c) és előtolás irányú (F_f) forgácsoló erő értékeket. A forgácsolási rendszerben beállított paramétereket a 3.1. táblázat tartalmazza. A mért főforgácsoló erő értékeiből matematikai statisztikai módszereket felhasználva meghatároztam a forgácsoló sebességet is figyelembe vevő, empirikus összefüggés (előtolás, fogásmélység, forgácsoló sebesség) adott paraméterterre jellemző állandóját és hatványkitevőit.

3.1. táblázat. Mérések fő jellemzői

| | Kerámia, ZrO_2 | Gömbgrafitos öntvény, GJS-400-15 | Lemezgrafitos öntvény, GJL 200 |
|------------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Forgácsoló sebesség, v_c [m/min] | 25 / 75 | | |
| Fogásmélység, a [mm] | 0,01 / 0,02 / 0,03 / 0,04 / 0,05 | | |
| Előtolás, f [mm/fordulat] | 0,01 / 0,02 / 0,03 / 0,04 / 0,05 | | |
| Környezeti hőmérséklet, T [°C] | 23 | | |
| Vizsgálat palásthossz, s [mm] | előtolásonként 3 mm, összesen 15 mm | | |
| Szerszámanyag | PCD / CBN | | |

3.1.1. Kerámia fogácsolási eredményei

A 3.1. ábra egyenletesen növekvő forgácsoló sebesség mellett, CBN szerszámmal végrehajtott mérések jellegzetes eredményeit szemlélteti. A diagram vízszintes tengelyén a forgácsoló sebesség (v_c), a függőleges tengelyen a forgácsoló erők (F_c , F_f) találhatók.



3.1. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

($v_c =$ változó m/min., $a = 0,02$ mm, $f = 0,02$ mm; kerámia: cirkóniumdioxid, szerszám: CBN)

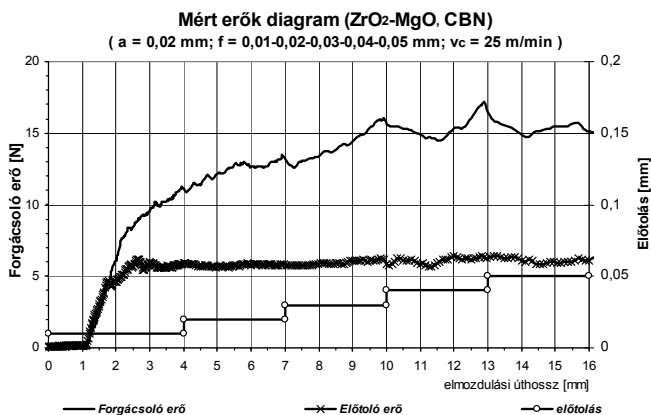
Láthatjuk, hogy a forgácsolás elején keletkező kis erők értéke nő. A köbös bórnitrid (CBN) szerszámnál a forgácsolási sebesség növelésével jelentősen növekedett a főforgácsoló erő értéke a transziens pont után.

Az előtolás irányú erők nagysága megközelítőleg fele a főforgácsoló erő nagyságának CBN szerszámanyag esetében. A gyémánt (PCD) szerszámmal az érték a forgácsoló erő mértékére adódott. Tendenciájában hasonló jelleget mutat a kétféle szerszámnál a két erő.

A következő diagramon (3.2. ábra) ismét a forgácsoló erők változását mutatom be. A forgácsoló sebességet 25 m/perc értékre állítottam. A fogásmélység értéke $a = 0,02$ mm. Az előtolás értékeit $f = 0,01; -0,02; -0,03; -0,04; -0,05$ mm/fordulat szerint változtattam.

Az előtolás növelésével a főforgácsoló erő növekszik, azonban az előtolás irányú erő értéke szinte alig változik. Az $a = 0,04$ mm fogásmélységnél a főforgácsoló erő nagy mértékű ingadozása a forgácsolóél sérülésére enged következtetni. Ezt később a mikroszkópos felvételek igazolták.

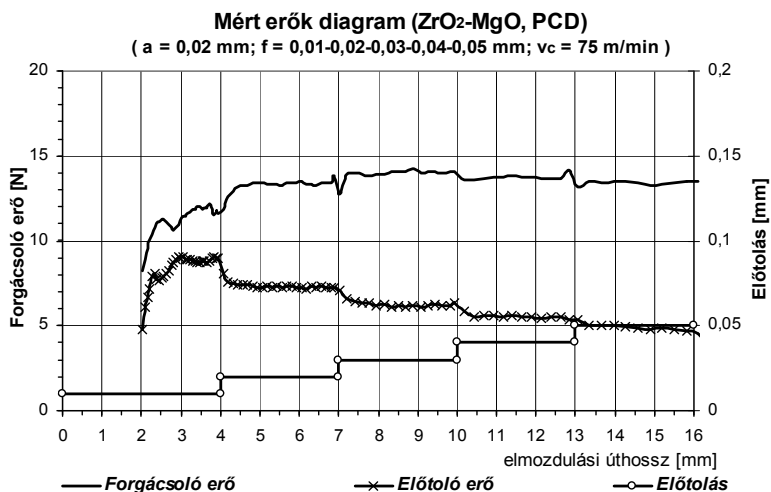
A kezdeti szakaszban az előtolás irányú erő felfutása is jelentős. Az érintkezés első pontjában mind a kerámia, mind a szerszám környezeti hőmérsékleten van. A forgácsolás során jelentős hő fejlődik, és melegedés kezdődik. Ennek hatására az erő értéke egy ideig növekszik, majd a diagramon is látható módon közel állandó értékre áll be.



3.2. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

Az előzőekkel megegyezően polikristályos gyémánt szerszám esetére is megmértem a főforgácsoló erő változását. A forgácsolási sebesség értéke $v_c = 25$ m/min. A fogásmélység értéke $a = 0,02$ mm. Az előtolás értékei $f = 0,01; -0,02; -0,03; -0,04; -0,05$ mm/fordulat.

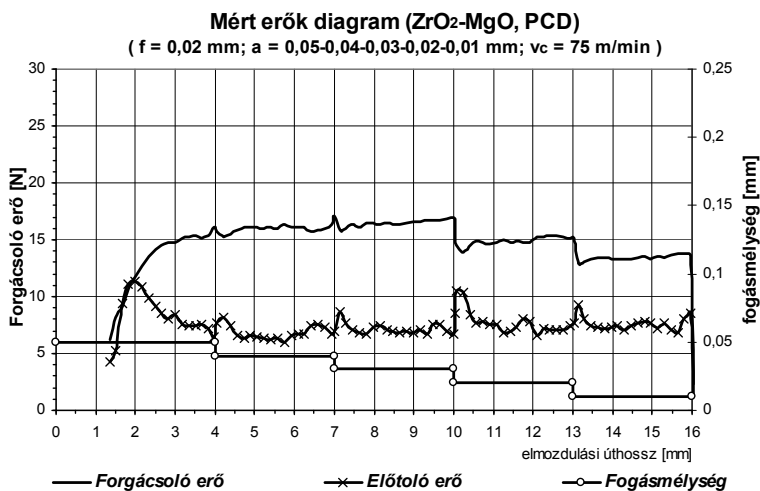
A tendenciák hasonlóak, mint a köbös bórnitrid szerszámnál. A forgácsoló erő növekvő tendenciát mutat, míg az előtolás irányú erő beállt egy értékre, majd enyhe csökkenést mutatott.



3.3. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A magasabb forgácsolási sebességnél (3.3. ábra) a forgácsoló erő a meredek felfutást követően beállt közel állandó értékre, ami alacsonyabbra adódott, mint a kisebb ($v_c = 25$ m/min) forgácsoló sebességnél. Az előtoló erő a felfutást követően vagy csökkent, vagy azonos értékű volt. Nagy valószínűséggel a szerszám éle okozta az előtoló erő ilyen értelmű ingadozását.

Az eddigi diagramok az előtolás változásának hatását szemléltették. A következőkben ismertetek néhány diagramot, melyeknél a fogásmélység változtatásának hatását vizsgáltam a fő és előtolás irányú forgácsoló erőre vonatkozóan. A forgácsoló sebességet $v_c = 75$ m/min értékekre állítottam be. A fogásmélység értéke palástesztergálásnál $a = 0,05; -0,04; -0,03; -0,02; -0,01$ mm. Az előtolás értékei $f = 0,02$ mm/fordulat. A vizsgálatokat csak a kedvezőbb felületi jellemzőket adó PCD szerszámmal végeztem.

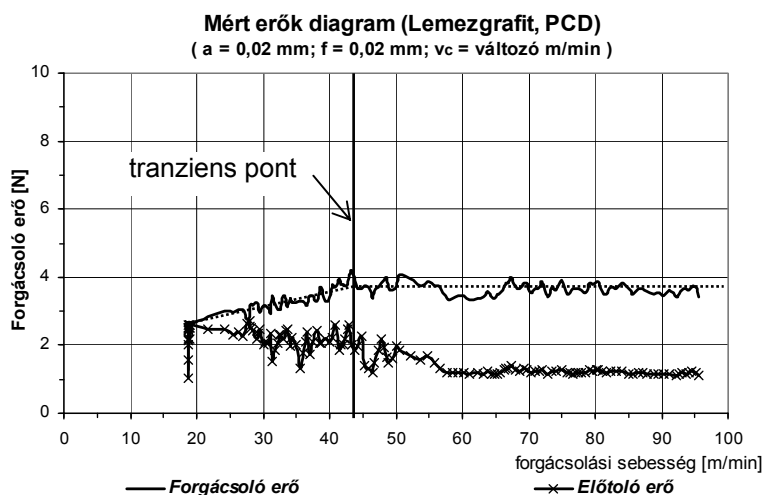


3.4. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A 3.4. ábra a főforgácsoló és az előtolás irányú erő változását mutatja, ami a fogásmélység változtatásának hatására jött létre. Megállapítható, hogy a fogásmélység változása a $a = 0,02$ mm felett nem hat jelentős mértékben a főforgácsoló erő nagyságára. A magasabb forgácsoló sebességgel végzett megmunkálás esetén ($v_c = 75$ m/perc), alacsonyabb főforgácsoló erő értékek adódtak.

3.1.2. Lemezgrafitos öntvény forgácsolási eredményei

Mivel az irodalomban a kerámiákra minimális utalást találtam a forgácsolási paraméterekre és jellemzőkre, ezért összehasonlítás céljából azonos beállításokkal lemezgrafitos (200-350 N/mm² szakítószilárdság) és gömbgrafitos öntvények (400-700 N/mm² szakítószilárdság) esetére is végeztem vizsgálatokat. Az alábbiakban ezeket mutatom be.



3.5. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

Megállapítható egy egyértelmű hasonlóság, bár nem az a felfutási tendencia tapasztalható, mint a kerámiáknál. A forgácsoló erő értékek eltérőek a két különböző szerszám esetén. Ami egyértelműen megfigyelhető, hogy az előtolás irányú erők is azonos jelleget mutatnak.

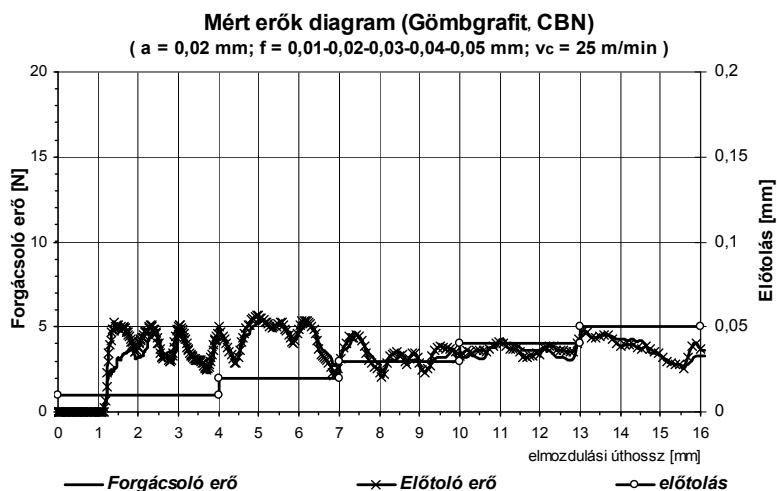
Az alacsonyabb ($v_c = 25$ m/min) állandó forgácsolási sebesség esetén CBN szerszámmal történő megmunkálás során nagyon kicsi forgácsoló erő (2-3 N) adódik. Erre az értékre állt be az $f = 0,02$ mm/fordulat után. Az előtolás irányú erő is azonos értékű és tendenciájú.

A referencia anyagként használt lemezgrafitos öntvény esetén is megfigyeltem egy tranzien্স zónát $v_c = 40-50$ m/min forgácsoló sebesség értéktartományban a forgácsoló erőre (3.5. ábra), amely előtt szerszámtól függően különböző meredekségű lineárisan közelíthető emelkedő szakasz van, míg azt követően a forgácsoló erő állandó, vagy közel állandó értékre áll be.

3.1.3. Gömbgrafitos öntvény forgácsolási eredményei

A gömbgrafitos öntvény szívósabb a lemezgrafitos öntvényénél. Ez tapasztalható volt a megmunkálás során is. Mivel a kapott adatokból a rideg polikristályos szerszám esetén gyors szerszám-törés volt várható, ezért erre az anyagra csak köbös bórnitrid szerszámanyaggal végeztünk méréseket.

A szívósságból adódóan a szerszám-befogó érzékenyebben reagált a nem optimális forgácsolási viszonyokra. Mivel összehasonlító vizsgálatokat végeztem, a korábbi forgácsolási értékek beállítása volt szükséges. A főforgácsoló erő és az előtoló erő a lemezgrafitos öntvény megmunkálási tendenciáihoz hasonlít.



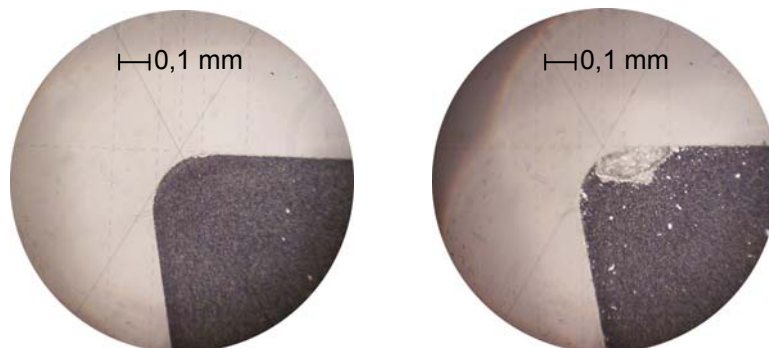
3.6. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

Az alacsonyabb ($v_c = 25$ m/min) forgácsolási sebességnél a forgácsoló erő és az előtoló erő szinte azonos értékű (3.6. ábra). A kisebb előtolás esetén ($f = 0,01$; - $0,02$ mm) nagyobb volt a szerszám rezgése a kedvezőtlen beállítási paraméterek miatt. Értékét tekintve 2x-esére adódott a lemezgrafitos anyagénak.

3.1.4. A forgácsoló szerszám élvizsgálati eredményei

Az eszterga lapkákról optikai mikroszkóppal felvételeket készítettem (3.7. ábra). A forgácsolás során a főforgácsoló él kis mértékben kitöredezett. Ez a kitörés az erődiagramokon is látható. Az első képen az eredeti polikristályos gyémánt lapka látható. A második képen már az élből kipattant egy darab, kagylós kitörés keletkezett. A szerszámot tovább használva, egyéb kitöredezések keletkeztek. Ezek a kitörések az élgeometriát jelentősen megváltoztatják, bár forgácsolásra továbbra is alkalmas maradt a szerszám. A kitöredezett lapkával forgácsoló felület minőségi

mutatói nagy valószínűséggel rosszabbak és nagyobb szórást mutatnak, mint a még szabályos élgeometriával rendelkezőé.



3.7. ábra. Mikroszkópos felvételek, PCD szerszám a forgácsoló lapka eredeti, első kitérés és további kitérések

3.2. Forgácsoló erő meghatározása a forgácsolási paraméterek függvényében

A forgácsolási erőre az irodalmi források (Horváth és társa 1995, König és társa 1997, Dudás 2000) egy elsősorban acélokra kidolgozott elméleti összefüggést használnak, amely a következő módon alakul a beállított forgácsolási paraméterek függvényében:

$$F_c = C_v \cdot f^x \cdot a^y \cdot v_c^z \text{ [N]}$$

Az elvégzendő tervezett kísérletekkel célok az előbbi egyenlet kerámiára történő használhatóságának eldöntése, és a szükséges paraméterek meghatározása többváltozós lineáris regresszióval.

A tervezett kísérletek eredményeire illesztett matematikai függvény:

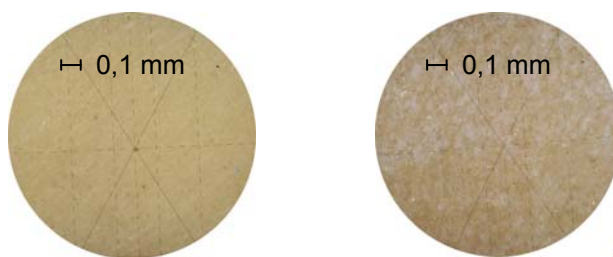
$$F = 477,183 \cdot f^{0,1646} \cdot a^{0,4397} \cdot v_c^{-0,2994}$$

Az egyenlet használhatóságára vonatkozóan fontos megjegyezni, hogy ez az összefüggés a kísérleti tervben meghatározott paraméter-intervallumokon belül írja le a mérési eredmények alakulását.

3.3. Topográfiai felületvizsgálatok eredményei

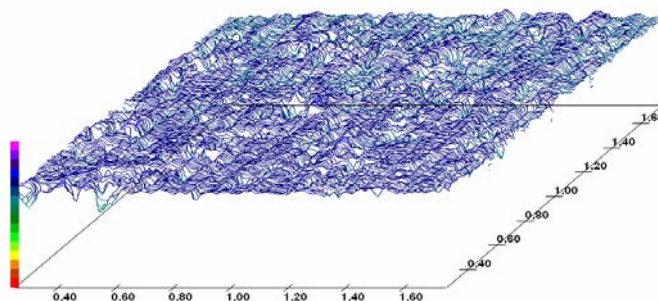
3.3.1. Mikroszkópos és 3D felülettopográfiai vizsgálatok eredményei

A forgácsolás minőségét a felület minősége jól tükrözi. A kerámiák ridegségéből adódóan megmunkálásuk során a felületen mikrorepedések keletkeznek. A repedések kialakulása nem kívánatos, ezért a forgácsolási paraméterek helyes megválasztása elengedhetetlen. A mikroszkópos vizsgálatokat több nagyításon végeztem el (3.8. ábra). Optikai mikroszkóp segítségével vizsgáltam a munkadarab felszínét, és az előzőekben ismertetett esztergalapka forgácsolóélén kialakult kitéréseket.



3.8. ábra. Mikroszkópos felvételek, eredeti köszörült és esztergált kerámia felület

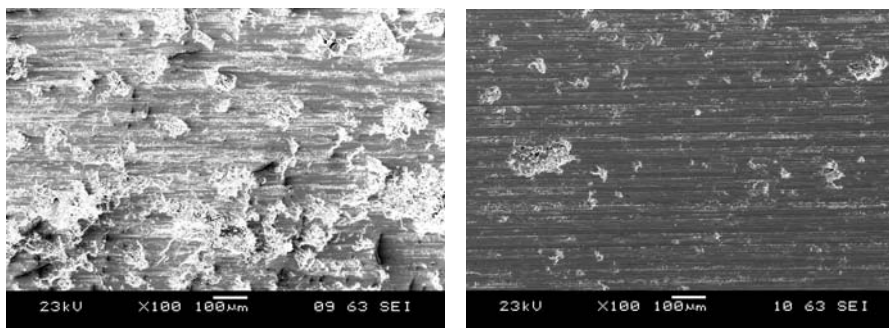
A 3D felülettopográfiai mérések számszerűsítették a felület érdességét térben kiterjesztve, egy ilyen mintafelületet szemléltet a 3.9. ábra. A forgácsolási beállítások bizonyos eseteiben a felületi jellemzők megközelítették a köszörüléssel kialakított kerámia felület jellemzőit.



3.9. ábra. PCD szerszámmal esztergált kerámia felület
($v_c = 25$ m/min., $a = 0.02$ mm, $f = 0.05$ mm/ford)

3.3.2. Pásztázó elektron-mikroszkópos felületvizsgálatok eredményei

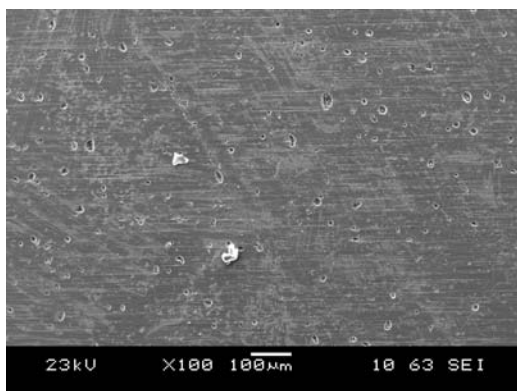
A nagyobb nagyítás érdekében pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettem a kerámia megmunkált felületeiről 100x, 500x majd 2000x-es nagyításokon. Ezek közül mutatok be néhányat.



3.10. ábra. CBN és PCD szerszámmal esztergált kerámia felületek
 $v_c = 75$ m/min, $f = 0,04$ mm/ford, $a = 0,02$ mm, $N = 100x$

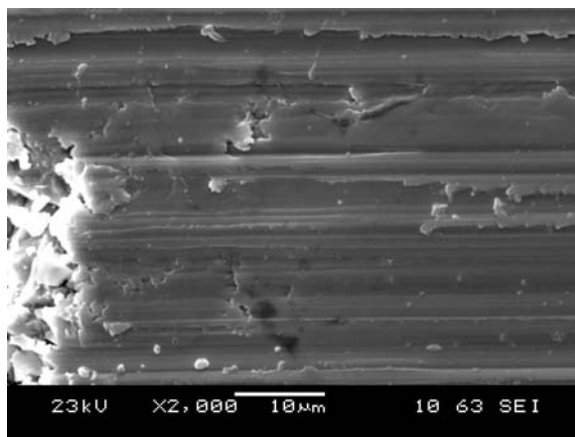
A 3.10. ábrán a CBN szerszámmal készült felület felvételén a megmunkálás erősen szabdalt, nagyon durva, kráteres. A PCD szerszámmal való esztergálás kevesebb és kisebb krátereket eredményezett. Jól látható a forgácsolás iránya. A szerszám csúcsa barázdálttá alakította a felületet.

A 3.11. ábrán az eredeti kőszőrült felület elektronmikroszkópos felvétele látható. A megmunkálás eredményeként kialakult kráterek mennyisége azonosnak tekinthető a PCD szerszámmal való megmunkáláshoz viszonyítva (3.10. ábra). Azonban a kialakult kráterek 30-40 % -nak a mérete nagyobb. Ez a méretbeli eltérés a felület kenőanyag megtartó képességét növelheti. A kőszőrű szemcsék szintén barázdálttá alakították a felületet, de a szemcsék kisebb méretei miatt a kialakult árkok, barázdák, karcok méretei is kisebbek.



3.11. ábra. Kőszőrült kerámia felület

A 2000 x-es nagyítású felvételek a képlékeny (duktilis) forgácsleválasztás létrejöttét (3.12.) igazolja, amely jelentősen kedvezőbb felület-folytonosságot mutat. Ez a polikristályos gyémánttal való esztergálás alkalmazhatóságát igazolja.



3.12. ábra. PCD szerszámmal esztergált felület.
 $v_c = 75$ m/min, $f = 0,04$ mm/ford, $a = 0,02$ mm, $N = 2000x$

A gyakorlatban, javaslatként a szerszámanyag keménységeként a forgácsolandó anyag keménységének természetes logaritmus alapjának („e” szám) egész számú többszörösét adják meg. Ennek a követelménynek a gyémánt, mint a kerámiák megmunkálásához használható szerszámanyag megfelel. Vannak olyan kísérletek, melyek kisebb keménységű anyaggal való megmunkálást is felvetik lehetőségként, mivel az acélok megmunkálásához képest jelentősen eltérő viszonyok jöhetnek létre. Azonban ipari célra ezek még nem alkalmasak.

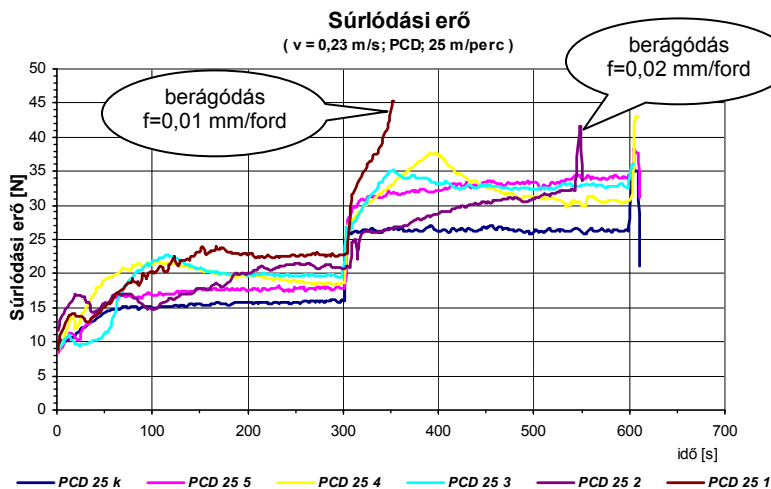
3.4. Súrlódási modell vizsgálatok eredményei és értelmezésük

A következőkben a munkám során létrehozott súrlódás modellvizsgálati rendszerben kapott súrlódási tényező, valamint kopás és deformáció értékeket elemzem. A kerámia megmunkálása során alkalmazott két szerszámanyag közül a polikristályos gyémánt bizonyult megfelelőnek. Ezért a súrlódási vizsgálatokat a PCD szerszámmal forgácsolt kerámia próbatestekkel, valamint az eredeti köszörült felületekkel végeztem el.

3.4.1. Súrlódási, kopási eredmények és értékelésük

A vizsgált ZrO_2 kerámia palástfelületén, a $v_c = 25$ és 75 m/min forgácsolási sebességen és 5 különböző előtoláson ($f = 0,01; -0,02; -0,03; -0,04; -0,05$ mm/fordulat) megmunkált felület található. Ezek szélessége egyenként 3 mm. A 3.13. ábra a vizsgált kerámia és az acél próbatest közt fellépő súrlódási erő értékét

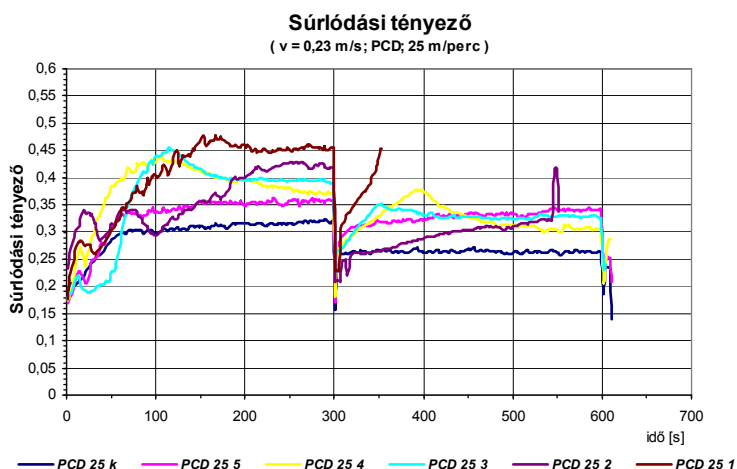
mutatja. Az eltérő színekkel és jelekkel az eltérő felületeket különböztettem meg. A jelölésben a „k” a köszörült kerámia felületre, míg a számok „1, 2, 3, 4, 5” az esztergálás során beállított előtolások értékét jelölik század milliméterben.



3.13. ábra. Súrlódási erő diagram
(acél/köszörült és forgácsolt kerámia felületek közt)

A köszörült felületen a súrlódási erő azonos terhelési szakaszon belül nem mutatott jelentős változást. Rövid időn belül (50 s) beállt egy közel állandó értékre. A legnagyobb terhelés ráadásával a köszörült felületek is berágódtak.

A diagramon szembevetendő, hogy a 0,01 és a 0,02 mm/ford előtolással forgácsolt kerámia felületeken a 2. terhelési szinten a súrlódási erő olyan nagymértékben megnőtt, hogy ebben a szakaszban a felületek berágódtak. A nagyobb előtolással készült felületeken a 3. terhelési szinten következett be a berágódás.



3.14. ábra. Súrlódási tényező diagram
(acél / köszörült és forgácsolt kerámia felületek közt)

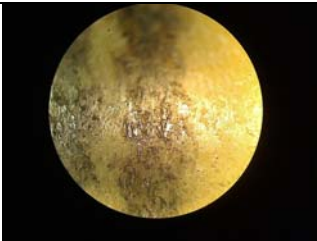
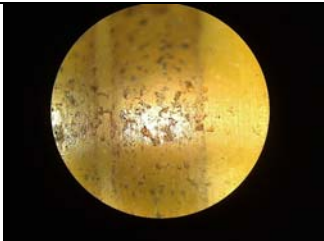

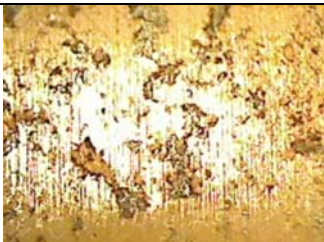
A száraz súrlódási tényezők értékeiből (3.14. ábra) kitűnik, hogy a kisebb előtolással megmunkált felületeket magasabb μ értékek jellemzik. Az $f = 0,05$ mm/fordulat előtolással esztergált felületen kialakult súrlódási tényező értéke, a köszörült felülethez hasonlóan, a vizsgálati szakaszok alatt közel állandó értéken maradt. A berágódásra jellemző, ingadozó súrlódási tényező nem figyelhető meg.

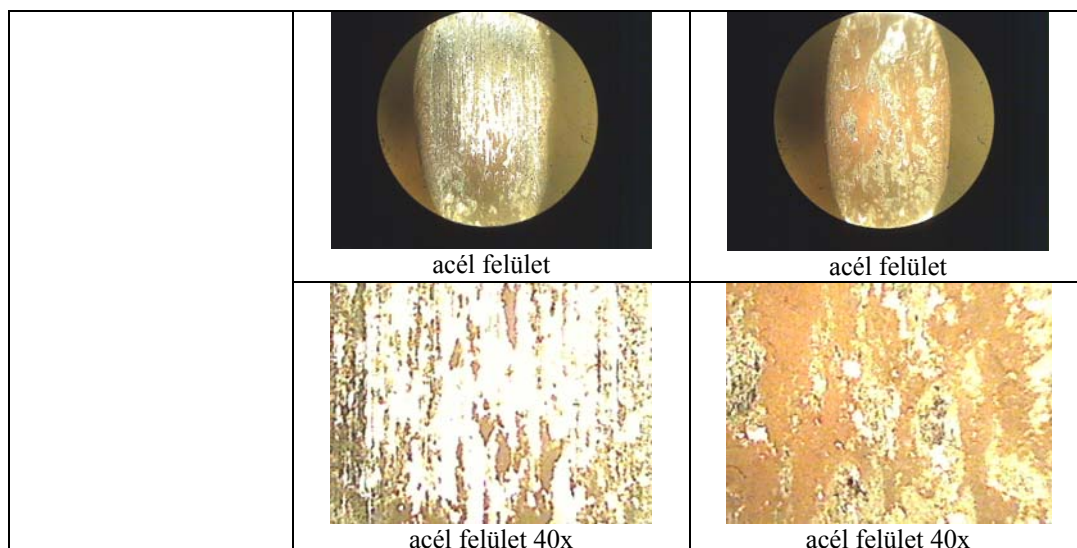
3.5. Csúszási felületek mikroszkópos összehasonlítása

A kerámia és acél száraz csúszási felületekről mikroszkópos felvételeket készítettem. A mikroszkóp maximális nagyítása 40x volt. Mindkét felületről kettő felvétel áll rendelkezésre. Egyiket a teljes csúszási felületről, másikat pedig a 40x-es nagyítással a felület egy részéről. A 3.2. táblázatban egy adott előtolással megmunkált felületen végzett csúszási vizsgálat felvételét mutatom be.

A csúszási nyom mikroszkópos felvételein jól látszik, hogy az alacsonyabb sebességen ($v_c = 25$ m/min) történt megmunkálás durvább, nagyobb kráterek kialakulását eredményezte a kerámia felületén. Ezek a kráterek a súrlódási vizsgálat során az acél felületét nagyobb mértékben forgácsolták, és így hamarabb töltődtek fel acéllal. Ezután már egyes helyeken ki tudott alakulni adhéziós kapcsolat azonos anyagok (acéllemez és a kráterekbe tapadt acélrészecskék) között. Ez a berágódási folyamatot jelentősen gyorsítja.

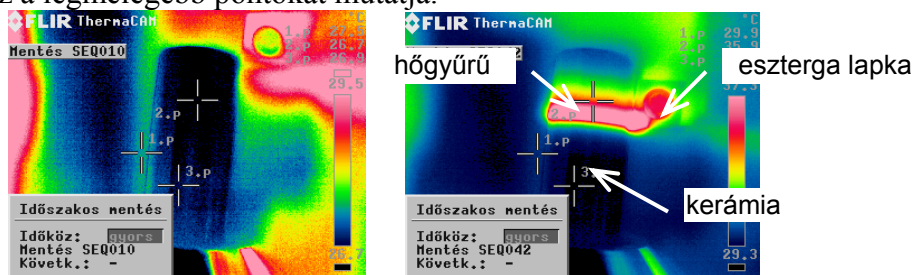
3.2. táblázat. Csúszási felület mikroszkópos felvételei (megmunkálási paraméterek: $v_c = 25$ m/min, 75 m/min; $f = 0,02$ mm/ford; $a = 0,02$ mm; vizsgálati paraméterek: $v_k = 0,23$ m/s; $F_N = 50$ N, 100 N, 150 N)

| szerszám: PCD | forgácsoló sebesség 25 m/min | forgácsoló sebesség 75 m/min |
|--------------------------------|--|---|
| előtolás $f = 0,02$ mm/ford |  kerámia felület |  kerámia felület |
| |  kerámia felület 40x |  kerámia felület 40x |



3.6. Hőkamerás kiegészítő vizsgálatok eredményei

A forgácsolás során keletkező hőhatásövezet hőkamerás felvétele látható a 3.15. ábrán. A felvételek egyértelműen igazolják, hogy a kerámia jó hőszigetelése miatt a szerszám csúcsánál a munkadarabon egy högyűrű alakul ki, ami a szerszám csúcsának a hőterhelését jelentősen megnöveli. Az első kép a forgácsolás elején készült, itt inkább a szerszám csúcsa melegszik. A forgácsolási úthossz növelésével a szerszám és a kerámia hőmérséklete is jelentősen nő. Ezt mutatja a második kép. Az alsó két képen a vörös szín a munkadarabon kialakult högyűrűt és a szerszám csúcsát, azaz a legmelegebb pontokat mutatja.



3.15. ábra. Hőkamerás felvételek a forgácsolás során

Ezeket a vizsgálatokat csak összehasonlító jelleggel értékeltem, pontos hőmérsékleti eredményeket nem vettem figyelembe. Meggyőződtem arról, hogy a kerámiák rossz hővezetése miatt, a forgácsolási folyamat olyan hőszókot okoz a megmunkálandó felületen (högyűrű) és a szerszámon egyaránt, ami a kerámiák esztergálását egy teljesen más alapra helyezi a fémekhez képest. Kvázi-adiabatikus forgácsolási rendszerek hőtani kutatása egy újabb fejezet a technológiai fejlesztések terén.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A környezetvédelmi szempontokat is jól kielégítő különleges tulajdonsággal rendelkező kerámiák iránt nagy mértékben megnőtt a kereslet. A különböző alkatrészek a szinterelést követően átlagosan $\pm 0,5-1,5$ %-os méretpontossággal (Fritz, 2007) készíthetők el. Így sok esetben adott felületeket kemény ($\sim 1200-4000$ HV) állapotukban is meg kell munkálni. Alkatrészgyártás során a félkész termékek gazdaságos alkalmazása csak nagyobb anyagleválasztási módszerek kialakítása esetén célszerű. A kemény állapotban történő megmunkálások komoly problémája a mikrorepedések kialakulása. Ezek csökkentése a megfelelő anyagkiválasztás mellett a minél kedvezőbb megmunkálást feltételezi.

Kutatásaim alapján az alábbi új tudományos megállapításokat tettem:

1. A vizsgálati térben megállapítom, hogy a ZR 40 (ZrO_2 -MgO) kerámia alapanyag esetén, az általam kiválasztott szabályos élgeometriájú CBN és PCD szerszámokkal, illetve típusokkal, a beállított forgácsolási paraméter térben ($a = 0,02$ mm; $f = 0,01 - 0,02 - 0,03 - 0,04 - 0,05$ mm/ford; $v_c = 25 - 75$ m/min) képlékeny (duktilis) forgácsleválasztás elérhető esztergálás során.

2. Méréseimmel igazoltam, hogy a kísérleti tér forgácsoló sebességének felső tartományában a magnéziummal stabilizált cirkónium-dioxid kerámiák esztergálásánál a polikristályos gyémánt szerszám kedvezőbb – kisebb – forgácsoló erő keletkezése mellett használható, mint a köbös bórnitrid szerszám.

Továbbá megállapítottam, hogy az alacsonyabb ($v_c = 25$ m/min.) vizsgálati forgácsoló sebességnél a polikristályos gyémánt (PCD) a köbös bórnitridhez hasonló forgácsoló erőt eredményezett. Az eltérő vágósebességeknél tapasztalt jelenségek a határozottan eltérő súrlódási folyamatokkal magyarázható. A kialakuló és eltérő hőgyűrűk létrejöttét hőkamerás felvételekkel igazoltam.

3. A kísérleti térben megállapítottam, hogy egyenletesen növekvő forgácsolási sebesség mellett a forgácsoló erő a cirkónium-dioxid kerámia és a lemezgrafitos öntvény esetében egyaránt - a szakirodalomban meglévő, az acélok megmunkálására vonatkozó összefüggéssel ellentétben - növekvő tendenciát mutat. A referencia anyagként használt lemezgrafitos öntvény esetén $v_c = 40-50$ m/min forgácsoló sebesség értéktartományban egy tranzien্স zóna adódik a forgácsoló erőre, amely előtt szerszámtól függően különböző meredekségű lineárisan közelíthető emelkedő szakasz van, míg azt követően a forgácsoló erő állandó, vagy közel állandó értékre áll be. A cirkónium-dioxid PCD-vel történő esztergálásánál is mérhető a tranzien্স zóna $40-50$ m/min esetén, de a trend ellentétes: kisebb sebességnél közel konstans forgácsoló erő mérhető, afelett pedig egy folyamatosan növekvő erő-trend jelentkezik. CBN szerszám esetén is létezik a $40-50$ m/min

forgácsoló sebességhez tartozó átmeneti zóna, melynél kisebb sebességek esetén folyamatosan növekvő forgácsolóerő jelentkezett, a tranzien zóna után pedig az erő növekedése még meredekebb.

4. Matematikai statisztikai módszerekkel igazoltam, hogy a szakirodalomban megtalálható $F_c = C_v \cdot f^x \cdot a^y \cdot v_c^z$ [N] főforgácsolóerőre vonatkozó összefüggés a vizsgált paramétertérben ($f = 0,02 - 0,04$ mm/ford; $a = 0,02 - 0,04$ mm; $v_c = 25 - 75$ m/perc) kiterjeszhető ZrO₂-MgO kerámia PCD szerszámmal (a definiált élgeometriával) történő esztergálására. Méréseimmel meghatároztam az állandó és a kitevők értékét $-C_v = 477,183$ – $-x = 0,1646$ – $-y = 0,4397$ – $-z = -0,2994$ –, és igazoltam, hogy a vizsgált paraméter-intervallumon belül az összefüggés 95%-os valószínűséggel alkalmazható.

5. a. A mikroszkópos felvételek alapján digitális képelemzéssel megállapítom, hogy a kőbös bórnitrid (CBN) típusú szerszámmal végzett forgácsolásnál az egységnyi cirkónium-dioxid felületre vonatkoztatva, ≈ 57 % - os felületsérülés (mikrorepedés, kagylós kitöredezés, stb.) keletkezett a megmunkált felületen, már abban az esetben is, amikor a fogásmélység csak 0,02 mm, az előtolás pedig csak 0,04 mm/ford volt. Ennél nagyobb fogásmélység és előtolás még kedvezőtlenebb felületet eredményezett. Ezért ezzel a szerszámanyag típusal a ZR 40 kerámia esztergálása csak korlátozottan javasolt.

5. b. A vizsgálati rendszer feltételei mellett megállapítom, hogy a polikristályos gyémánt esztergakéssel (PCD) történő esztergálás, valamint a köszörülési eljárás egyaránt kagylós kitöredezéseket, mikrorepedéseket eredményezett a kerámia felületén. A PCD-vel történő esztergálás során, egységnyi felületen a felületi sérülések mértéke megközelítőleg ≤ 8.5 % -nál és jellegében, méretében eltér a köszörülésnél tapasztalt 8-9 % -os felületi sérüléstől. Az eltérés hatása a siklasi tulajdonságokat befolyásolja, melyet súrlódási mérésekkel igazoltam.

6. SEM felvételekkel igazoltam (2000x), hogy a köszörülésnél kialakuló, nagy passzív erő hatására keletkező fázisátalakulást jelző gyűrődések a polikristályos gyémánt (PCD) esztergakés használata esetén ($\gamma=0^\circ$) nem jelennek meg a ZrO₂ kerámia megmunkált felületen.

7. Súrlódási kísérletekkel (block-on-ring tribológiai rendszer, S355 köszörült acél ($R_a = 0.8 \mu\text{m}$) „block” felület, kenés nélkül, kerámia „ring” próbatesten) igazoltam, hogy a nagy esztergálási vágósebességnél ($v_c=75$ m/min) és kisebb előtolásnál ($f = 0,01 - 0,02$ mm/ford) kialakult kerámia felületeken a súrlódási ellenállás kisebb, mint a köszörült gyári kerámia felületen. A köszörült felület kisebb méretű, de nagyobb számú kagylós kitöredezéseibe az acél kopadék gyorsan beágyazódik, mely a kerámia/acél súrlódó kapcsolatot acél/acél jellegű súrlódássá alakítja, ami a súrlódási erő adhéziós komponensét jelentősen megnöveli.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kerámiákra, így a cirkóniumdioxidra és az alumíniumoxidra vonatkozóan az irodalmi források az esztergálással való megmunkálásra nem tesznek utalást. A ma általánosan elterjedt szinterelés utáni megmunkálás a köszörülés. A kész- és félkésztermékek gyártásának fejlődése igényli az egyre összetettebb felületek forgácsolását. A térbeli felületek gazdaságosabb megmunkálása a szabályos élű szerszámok további fejlesztését igényli. A cirkóniumdioxid, mint alapanyag a kisebb kerámia keménységéből és egyéb tulajdonságaiból adódóan alkalmas szabályos élű szerszámmal való megmunkálásra, így egyedi gyártás vagy akár kis és közepes sorozatok esetében, gyors prototípusgyártásnál egyaránt potenciális anyaggá válhat. Ahhoz, hogy ez bekövetkezzen, a forgácsolási, forgácsolhatósági sajátosságait fel kell tárnunk.

A gépgyártásban a hagyományos szerszámgépeken való forgácsolást egyre inkább felváltják a számítógéppel vezérelt (CNC), a nagy sebességű (HSC), a „kemény” megmunkálások. Ma már lehetséges megmunkálni a legújabb 5 tengelyes HSC maró, pl. megmunkálóközpont segítségével komplex háromdimenziós formát és profilt kialakítani olyan anyagokban, mint a réz, a grafit, a műanyag és az acél, egészen 70 HRC keménységig. Kutatásaim segítenek az esztergálás ilyen értelmű további kiterjesztésére. A kidolgozott kutatási program alapján választ adtam az alábbi tisztázatlan kérdésekre:

- Esztergálhatóság értelmezése egyélű forgácsolószerszámmal történő megmunkálás során, cirkónium-dioxid kerámia alapanyag esetén
- Alkalmas mérőrendszer kifejlesztése a kerámiaforgácsolás során fellépő fő- és előtolás irányú erők mérésére.
- A beállított forgácsolási paraméterekkel történő megmunkálás utáni felületek topológiai vizsgálata. A felületeken esetlegesen kialakult mikrorepedések, kagylós kitérések elemzése.
- A forgácsolás során fellépő hőhatásövezet alakulása.
- Hasonlóság vagy esetleges összefüggés tisztázása a lemezgrafitos és gömbgrafitos öntöttvasak és a vizsgált kerámiák forgácsolási jellemzői között.
- Az eltérő beállításokkal megmunkált kerámia-acél felület párok esetén fellépő súrlódási tulajdonságok összehasonlítása száraz súrlódási állapotok esetén.

A kutatások továbbvitelének két fő iránya fogalmazható meg.

- technológiai paraméterek változtatásával az alkalmazhatóság kiterjesztése
- alkalmazástechnikai szempontoknak megfelelő, technológia optimalizálás

Ezen területek további átfogó kimunkálása a kerámia anyagokat és alkatrészeket gyártó cégek együttműködésével és bevonásával valósítható meg. Az elérhető további eredmények a technológiai adatbázisok jelentős kiszélesítésével jár.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A műszaki gyakorlatban felhasznált kerámiák jelentősége egyre nagyobb. A gyártási folyamat után gyakran előfordul, hogy a végleges méret eléréséhez utólagos méretpontosítás-, valamint a javítóiparban adott méretre történő megmunkálás szükséges. A kerámiák nagy keménysége miatt ez túlnyomórészt köszörüléssel érik el. A köszörülési méretpontosság megfelelő, azonban kis anyagválasztási teljesítménnyel jár. Egyes esetekben a kerámiák tulajdonságai és a köszörűszemcsék felületi nyomása miatt a felületen repedések alakulhatnak ki, ami a kerámia gyártmány törését okozhatja. Kutatómunkám célja ezért olyan esztergaszerszám kiválasztása, valamint esztergálási paraméterek meghatározása volt, amelyekkel a ZrO_2 -MgO kerámia kedvezően megmunkálható.

A szakirodalom áttekintése során számos hazai és nemzetközi tudományos cikket dolgoztam fel. Összefoglaltam a kerámiák megmunkálási lehetőségeit, ismertettem a forgácsoló erőre vonatkozó összefüggést.

A kerámia esztergálásához egyedi mérőrendszert terveztem és valósítottam meg. Ennek segítségével mértem az esztergálás során a fő- és előtolás irányú forgácsoló erőket. Az esztergált és az eredeti köszörült kerámia felületek gyakorlati használhatóságának értékelésére, a tribológiai viselkedés összehasonlítására is összeállítottam egy laboratóriumi mérőberendezést, amellyel köszörült acél ellenfelületen a súrlódási erőt mértem száraz súrlódási viszonyok mellett.

A forgácsolóerő mérési eredményekből, matematikai statisztikai módszerek felhasználásával meghatároztam az irodalomban fellelhető főforgácsolóerő összefüggés változóit. A vizsgálatok után a forgácsolt felületek elektronmikroszkópos felvételeit elemeztem a felületi repedések és kitérődések szempontjából. 3D-s felületi jellemzőket is meghatároztam felülettopográfiai mérés módszerével. Kiegészítő, összehasonlító hőkamerás vizsgálatokkal igazoltam a forgácsolószerszám érintkezésénél keletkező hőgyűrű kialakulását.

Az elvégzett kutatásaim alapján, a kerámia esztergálásra is kiterjesztettem a esztergálási forgácsolóerő számításának lehetőségét, tisztáztam a megmunkált kerámia felület súrlódó alkalmazástechnikai lehetőségét, mindamelllett, hogy tanulmányoztam a szerszám tönkremenetel és sérülés folyamatát. Ennek eredményeként megfogalmaztam a PCD esztergakések eredményes alkalmazási határait.

A kutatások továbbvitelének egyik iránya a forgácsolási paraméterek kiszélesítése. Ez egyrészt az eddig is vizsgált előtolás, fogásmélység, de még inkább a forgácsolási sebesség tekintetében ($v_c = 150$ - 200 m/min.) szükséges.

A dolgozatban ismertett kutatási eredmények hasznosítása a gépészmérnöki gyakorlatban egyre jobban terjedő kerámiák megmunkálási területén jelent előrelépést.

SUMMARY

The importance of ceramics used in engineering practice is more and more greater. After the manufacturing process often occurs post-accuracy to dimension to be needed to reach the final dimension, as well as in the repair industry is needed machining to a certain dimension. Because of the high hardness of ceramics this is reached with grinding in the overwhelming majority of cases. The grinding accuracy to gauge is appropriate but it results small rate of stock-removal. In some cases because of the characteristics of ceramics and of the surface pressure of grinding grains cracks can develop on the surface, which can cause the ceramic product fracture. The aim of my research work was to choose such turning tool as well as to determine turning parameters by which the ZrO_2 -MgO ceramic can cut favourably.

During surveying the technical literature I have written up several domestic and international scientific articles. I have summarized the machining possibilities of ceramics, I made know the connection concerning the cutting force.

I have planned and accomplished an individual measuring system for turning ceramic. During turning I measured the main cutting forces and the cutting forces in feed rate. To evaluate the practical applicability of ceramic surfaces turned and grinded originally, to compare the tribological behaviour I have also assembled a laboratory measuring equipment by which I measured the frictional force on steel counter-surface grinded at dry friction condition.

I have determined with mathematical-statistical methods the variables of the main cutting forces connections to be found in literature from the measuring results of cutting force. After tests I have analysed the electron-microscope exposures of the surfaces cut concerning the surface cracks and pittings. I also determined the 3D-al surface characteristics with surface topography measuring method. I proved with complementary, comparative thermo-camera examinations the forming of arising heat-circle at the contact of cutting tool.

Based on my research work carried out I also extended to the ceramic turning the possibility of calculating the turning cutting force, I cleared the frictional application-technique possibility of ceramic surface machined, notwithstanding that I studied the process of tool deterioration and damage. As a result of this I drafted the effective application boundaries of the PCD turning tools.

Extending the cutting parameters is one direction to take on further the researches. This is necessary concerning partly the feed rate, the depth of cut also examined till now, but still rather concerning the cutting speed ($v_c=150$ -200 m/min).

The utilization of research results presented in the dissertation indicates advance in the field of machining ceramics spreading better and better in the mechanical engineering practice.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. Eberst O., Pop S., **Fledrich G.** (2009): The sticking particularities of industrial plastics. International multidisciplinary Conference, Serie C, volume XXIII. North University of Baia Mare. pp. 137-143
2. **Fledrich G.**, Pálincás I. (2009): High performance engineering ceramics in the practice. International multidisciplinary Conference, Serie C, volume XXIII. North University of Baia Mare. pp. 147-151
3. **Fledrich G.**, Pálincás I. (2009): Machinig questions of engineering ceramics (Zirconium-dioxide ZrO_2). Trans-Trio Sciences. Mechanical Engineering Letters. Volume 2. pp. 114-120.
4. **Fledrich G.**, Pálincás I., Keresztes R. (2010): Turning ZRO2 ceramics. International Review of Applied Sciences and Engineering. Volume 1. 2010 December Numbers 1-2. pp. 3-6.
5. **Fledrich G.** (2010): Machining the zirconium-dioxide engineering ceramics. Sustainable Construction & Design. Vol. 2010/b, pp. 37-41.
6. **Fledrich G.**, Pálincás I., Keresztes R., Zsidai L., Petróczki K. (2011): Turning specialities of ZrO_2 ceramics. Sustainable Construction & Design. (in print)

Lektorált cikk magyar nyelven

7. **Fledrich G.** (2009): Kerámiák forgácsolása szabályos élű szerszámmal (cirkónium-dioxid esztergálása). Mezőgazdasági technika. L Évfolyam, 2009. szeptemberi szám. 2-3. o.
8. **Fledrich G.** (2010): Kerámiák forgácsolása szabályos élű szerszámmal. Mezőgazdasági technika. L I Évfolyam, 2010. júniusi szám. 2-4. o.
9. **Fledrich G.**, dr. Pálincás I., dr. Keresztes R. (2011): Forgácsoló erő kutatása cirkónium-dioxid (ZrO_2) esztergálásánál. Gép, 2011. (in print)