

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. Pálinkás 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

ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	7
1.1. A téma aktualitása.....	7
1.2. A kutatómunka céljai	8
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	9
2.1. Előzmények.....	9
2.1.1. Kerámiák csoportosítása	9
2.1.2. Kerámiák gyártása	10
2.1.3. A műszaki kerámiák tulajdonságai	18
2.2. Korszerű szerkezeti kerámiák	19
2.2.1. Alumíniumoxid alapú kerámiák Al_2O_3	20
2.2.2. Cirkónium-dioxid alapú kerámiák ZrO_2	21
2.2.3. Szilíciumnitrid Si_3N_4 , SIALON, Szilíciumkarbid.....	21
2.3. A ZrO_2 kristályszerkezete, fázisátalakulásai.....	23
2.4. Kemény- és precíziós forgácsolás.....	26
2.4.1. Forgácsolási mechanizmusok	27
2.4.2. Munkadarab anyaga és befogása.....	32
2.4.3. Szerszám gép, forgácsoló szerszám	33
2.4.4. Technológiai sajátosságok	35
2.4.5. Köszörült kerámia felületek.....	36
2.4.6. Hónolt kerámia felületek.....	37
2.4.7. Leppelt kerámia felületek.....	39
2.4.8. Polírozott kerámia felületek.....	39
2.5. Következtetések a szakirodalomból.....	40
3. KÍSÉRLETI MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK	43
3.1. A modellvizsgálatok helyszíne	43
3.2. A vizsgált anyagok és kialakításuk	43
3.2.1. Cirkónium-dioxid kerámia próbatest	43
3.2.2. Öntvény próbatest	45
3.2.3. Acél próbatest	45
3.2.4. Egyélű forgácsoló szerszám.....	46
3.3. Forgácsolási rendszer.....	47
3.3.1. A forgácsolási mechanizmusa	48
3.3.2. A forgácsolási geometriai összefüggései.....	49
3.3.3. Forgácsoló erők.....	50
3.4. Forgácsolási vizsgálatok	52
3.5. Forgácsolásnál mért és számított értékek.....	53
3.5.1. Kétkomponensű erőmérő rendszer.....	54

3.5.2. Mérőrendszer kapcsolása	56
3.6. Felület topográfiai vizsgálatok	57
3.7. Súrlódási vizsgálatok	60
3.7.1. Az érintkezési (Hertz) feszültség összefüggése	61
3.7.2. Súrlódási vizsgálatok paraméterei	63
3.8. Hőkamerás kiegészítő vizsgálatok	63
4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE.....	65
4.1. A forgácsolási vizsgálatok eredményei és értelmezésük	65
4.1.1. Kerámia fogácsolási eredményei	65
4.1.2. Lemezgrafitos öntvény forgácsolási eredményei.....	70
4.1.3. Gömbgrafitos öntvény forgácsolási eredményei.....	73
4.1.4. A forgácsoló szerszám élvizsgálati eredményei	75
4.2. Forgácsoló erő meghatározása a forgácsolási paraméterek függvényében .	76
4.2.1. A kísérletek tervezése, eredményei.....	77
4.2.2. A kísérletek kiértékelése többváltozós lineáris regresszióval.....	78
4.2.3. A kísérletek matematikai összefüggésének leírása	79
4.2.4. Faktorok hatásainak ábrázolása	80
4.2.5. A mérési eredményekre illesztett függvény paramétereinek meghatározása	81
4.2.6. A kapott összefüggés illeszkedésének jósága	84
4.3. Topográfiai felületvizsgálatok eredményei.....	85
4.3.1. Mikroszkópos és 3D felülettopográfiai vizsgálatok eredményei.....	85
4.3.2. Pásztázó elektron-mikroszkópos felületvizsgálatok eredményei.....	86
4.4. Súrlódási modell vizsgálatok eredményei és értelmezésük	90
4.4.1. Súrlódási, kopási eredmények ($v_c = 25$ m/min) és értékelésük	92
4.4.2. Súrlódási, kopási eredmények ($v_c = 75$ m/min) és értékelésük	94
4.5. Csúszási felületek mikroszkópos összehasonlítása.....	96
4.6. Hőkamerás kiegészítő vizsgálatok eredményei	97
4.7. Új tudományos eredmények.....	99
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	101
6. ÖSSZEFOGLALÁS	103
SUMMARY.....	105
MELLÉKLETEK.....	107
M1. Irodalomjegyzék	108
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk.....	112
M3. A középponti mérési adatok	114
M4. Mikroszkópos felvételek és mérési diagramok	115
M5. 3D-s felületvizsgálatok és a képelemzések eredményei.....	119
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	123

ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
a, h_{cu}	fogásmélység	[mm]
A_c	forgácskeresztmetszet	[mm ²]
b	forgácsszélesség	[mm]
b_1	az érintkezési felület félszélessége	[mm]
d, D	átmérő	[mm]
f	előtolás	[mm/fordulat]
F_c	főforgácsoló erő	[N]
F_f	előtolás irányú forgácsoló erő	[N]
F_n, p	normál erő, nyomó erő	[N]
F_p	passzív erő	[N]
F_s	súrlódó erő	[N]
HV	Vickers keménység	[-]
k_c	fajlagos forgácsoló erő	[N/mm ²]
m	tömeg	[kg]
n	fordulatszám	[1/min]
R_a	2D-s átlagos felületi érdesség	[μ m]
R_z	2D-s maximális felületi érdesség	[μ m]
s	elmozdulás	[mm]
S_a	3D-s átlagos felületi érdesség	[μ m]
S_z	3D-s felület tízpont magassága	[μ m]
v_c	forgácsoló sebesség	[m/min]
v_f	előtoló sebesség	[mm/min]
w	kopás	[mm]
x	előtolás hatványkitevője	[-]
y	fogásmélység hatványkitevője	[-]
z	forgácsoló sebesség hatványkitevője	[-]
α	hátszög	[°]
β	ékszög	[°]
γ	homlokszög	[°]
ε	csúcsház	[°]
κ	elhelyezési szög	[°]
μ	súrlódási tényező	[-]
ω	szögsebesség	[1/s]
Φ	nyírási szög	[°]

A dolgozatban használt anyagjelölések:

Jelölés	Megnevezés
Al ₂ O ₃	Alumínium-oxid kerámia
C	szén
CaO	kálciumoxid
CBN	köbös bórnitrid
Ce	cérium
Fe	vas
GJL 200	lemezgrafitos öntöttvas
GJS-400-15	gömbgrafitos öntöttvas
Mg	magnézium
MgO	magnéziumoxid
Mn	mangán
N ₂	nitrogén
PCBN	polikristályos köbös bórnitrid
PCD	polikristályos gyémánt
Si	szilícium
Si ₃ N ₄	szilíciumnitrid
SiC	szilíciumkarbid
ZrO ₂	cirkónium-dioxid kerámia
ZrO ₂ -Mg	magnéziummal stabilizált cirkónium-dioxid kerámia

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma aktualitása

Az ipar fejlődésével növekszik az igény olyan szerkezeti anyagok iránt, amelyek az eddigieknél lényegesen magasabb hőmérsékleteken, erős fizikai és kémiai igénybevétel mellett alkalmazhatók. A szerkezeti kerámiák 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. Amíg a gyártástechnológia ezt a szintet nem éri el, a kerámiák megmunkálásának szerepe növekszik. 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. Az 1.1. ábrán műszaki kerámiából készült alkatrészek láthatók.



1.1 ábra. Kerámiából készült alkatrészek

1.2. A kutatómunka céljai

Köztudott, hogy a szabályos élű szerszámokkal nagyobb anyagleválasztási teljesítmény érhető el, mint köszörüléssel (WERNER és társa, 1988), főleg bonyolultabb felületek esetén. Az előnyök különösen furatmegmunkálások esetén érzékelhetőek. Ha összevetjük a köszörűszerszámmal, egyrészt a geometriai méretek miatt az esztergákés szerszám jelentősen merevebb. A kisebb érintkező felület miatt a merőleges erőösszetevő is lényegesen kisebb. Ezen előnyök kihasználása célszerűen adódik. Azonban erre vonatkozóan a kutatások kezdeti stádiumban vannak. 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 kutatómunkám megvalósításának fő fejezetei:

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

- A vizsgálatokban szereplő műszaki kerámiák forgácsolhatósági tulajdonságainak vizsgálata egyélű forgácsolószerszámmal történő megmunkálás során, esztergálásnál.
- Mérőrendszer kifejlesztése a forgácsolás során fellépő fő- és előtolás 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. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Előzmények

A kerámiák korábban is széleskörű felhasználása az utóbbi néhány évtizedben jelentősen kibővült. Megjelentek a “korszerű” kerámiák, és velük együtt a műszaki alkalmazások is egyre nagyobb szerepet kaptak.

A korszerű műszaki kerámiák általában mesterséges, meghatározott összetételű és morfológiájú porokból, szigorú technológiai feltételek mellett készülnek (CURTIS, 1947). Kémiai jellegüket tekintve főként fémek és átmeneti fémek oxidjai, nitridjei, boridjai, karbidjai, ezek elegyei, elegyfázisai lehetnek. Fémes, ionos és kovalens kötések egyaránt megtalálhatók ezekben az anyagokban, így különleges tulajdonságok, tulajdonságkombinációk megvalósítására alkalmasak. WEIß, (1996) szerint általában kemények, kopásállóak, nagy a mechanikai szilárdságuk. Mindehhez nagy termikus és kémiai stabilitás, továbbá kis sűrűség társul. Legtöbbjük elektromos- és hőszigetelő sajátságú, ugyanakkor néhány képviselőjük a nagy elektromos ellenállás mellett nagyon jó hővezető-képességű. Egyes típusaik lehetnek szupravezetők, más típusok félvezető sajátságokkal rendelkeznek. Még továbbiak ferromágneses vagy piezoelektromos tulajdonságokat mutatnak. Bizonyos korszerű műszaki kerámiák jó dielektrikumok, mások biokompatibilisek lehetnek.

Annak ellenére, hogy sok gyártási eljárás ismert a kerámiák esetében, SZÉPVÖLGYI J. (2000) szerint azok alkalmazása még igen drága. A szinterelést követő megmunkálási költségek az alakítás mértékétől függően az alkatrész árának akár 80 %-át is elérheti SEMINAR: ”TECHNISCHE KERAMIK” (1999).

2.1.1. Kerámiák csoportosítása

A kerámiákat különböző módon lehet csoportosítani. Ezek szerint lehet:

- **Szerkezet szerint:**
 - Amorf (pl. üveg)
 - Kristályos (pl. bórnitrid)
 - Vegyes
- **Eredet szerint:**
 - Természetes anyagok (pl. kő)
 - Mesterséges kerámiák (pl. szilíciumkarbid)

- **Alkotók szerint:**
 - Oxidkerámiák (pl. Al_2O_3)
 - Vegyületkerámiák (pl. karbid, borid, nitrid)
 - Egyatomos kerámiák (pl. szén – gyémánt)
- **Gyártás szerint**
 - Olvasztás (üveggyártás)
 - Hidrát kötés (cement)
 - Nedves formázás (agyag árúk)
 - Porkohászat (műszaki kerámiák)

A műszaki kerámiák - mint szerkezeti anyagok - néhány fontosabb csoportja:

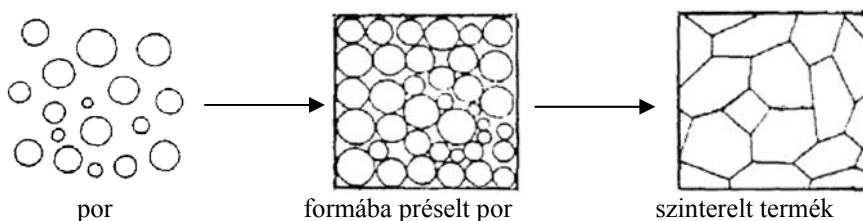
- **Oxidkrámia**
 - alumíniumoxid Al_2O_3
 - zirkóniumdioxid ZrO_2
- **Nem oxidkrámia**
 - szilíciumkarbid SiC
 - szilíciumnitrid Si_3N_4

Az általános ismertetést követően részletesebben csak a szerkezeti anyagként használatos kerámiákkal foglalkozom.

2.1.2. Kerámiák gyártása

A kerámiák képlékenyen nem alakíthatók, előállításukra általában porkohászati technológiákat használnak (szinterelés).

A gyártási eljárásoknál a terméket olvasztás nélkül állítják elő: először finom port készítenek, azt tömörítik (formázzák), végül magas hőmérsékleten izzítják (szinterelik). A folyamatot a következő ábra összegzi:



2.1. ábra. A kerámiák gyártásának egyszerűsített ábrája

Előnyei:

- Lényegesen alacsonyabb hőmérsékleten végezhető, mint az olvasztás. A szinterelés hőmérséklete általában alacsonyabb az olvadáspont kétharmadánál (K). Ez a tény a magas olvadáspontú kerámiáknál és fémeknél, pl. a volframnál előnyös.
- A porkohászati eljárások általában készterméket eredményeznek, nincs szükség további megmunkálásra. Ezért gazdaságosan használhatók közepes olvadáspontú fémek és ötvözetek, pl. acél esetében is.
- Lehetővé válik különleges mikroszerkezetek (pl. porózus anyagok és szemcsés kompozitok), valamint nem-egyensúlyi összetételű ötvözetek előállítására (lásd mechanikai ötvözés).

Hátrányai:

- A formázás általában drága berendezést igényel, ezért a gazdaságos gyártás csak nagy sorozatoknál valósítható meg.
- A porok előállítása és kezelése esetenként költséges.
- A termék mérete korlátozott: technikai okok miatt nem állíthatók elő olyan nagyméretű termékek, mint az olvasztásos technológiák esetében.

Legújabbban különösen fontossá vált a nanométeres tartományba eső részecskék előállítása.

A műszaki gyakorlatban a kerámia alkatrészek ritkán töltik be szerepüket, ha azok az adott rendszerbe nem épülnek be (pl.: elektromos szigetelő egy elektromos kapcsolatban, gyújtógyertya egy belső égésű motorban, vagy egy endoprotézis (biokerámia) az emberi testbe, stb.).

A kötések és illesztések legegyszerűbb alkalmazása esetén is ismerni kell a különböző kerámiákra jellemző alak és mérettűréseket, melyek a szinterelésük során kialakulnak. Ugyan „égetésük” után is megmunkálhatók, azonban leggyakrabban csak gyémánt alapanyagú szerszámmal és jelentős idő-, élömunka- és költségráfordítással oldható meg (TIKAL és társai, 1987; VIEREGGE, 1970). Ezért a kerámia alkatrészek keménymegmunkálását lehetőleg kerüljük, vagy legalább is minimálják.

A kerámiák gyártása a porkohászati eljárásokhoz hasonlít. A gyártás fontosabb lépései: nyersanyag, előkészítés, formázás, szárítás, lényegében előégetés, égetés (szinterelés) és utómegmunkálás.

Az alkatrészeket gyakran előégetik, hogy azok szilárdsága fokozódjon. Ezáltal egyszerű megmunkálással alakíthatókká válnak (fehér megmunkálás), vagy bevonatot (glazúr) visznek fel a felületre.

Ezt követően történik a szintterelés, amely során az alkatrész zsugorodik és eléri a kívánt szilárdságot. Ezt követően már csak fűrészeléssel, köszörüléssel, polírozással és leppeléssel munkálható meg. Mivel ezek az eljárások jelentős költségnövelő tényezők, igyekeznek csak a legszükségesebb esetben alkalmazni.

Ebből adódik az, hogy a kialakítandó felületeket „égetés” előtt készítik el. Ilyen esetekben korlátot jelent a gépelemek falvastagsága, kerülni kell a kis vállakat és az éles sarkokat.

Az illesztések és kötések alkalmazhatósága a kerámiáknál is ismert. Mégpedig zöld, vagy fehér állapotban (szinterelés előtt) kialakítják a kívánt illesztést, melyek a szinterelés során zsugorodnak. Ennek mértékét befolyásolja a szemcseméret, zöld állapotú tömörség, nedvességtartalom, hőmérséklet, idő, felfűtési sebesség, stb.. A zsugorodás mértékét jelenleg még empirikusan, kísérleti úton határozzák meg. Ennek mértéke alapanyagtól, illetve gyártási eljárástól függően akár 30 % is lehet. Ideális esetben a szárítás és az égetés (szinterelés) során végbe menő zsugorodás arányos, így az egyenesség, a párhuzamosság vagy szögérték nem változik. Azonban az inhomogenitás a nyersanyagban és a szórás az alakban, a szinterelésnél, stb., nem teszi lehetővé az ideális állapot elérhetőségét. Kis túlzással elmondható, hogy a gépelem nem ellenőrizhető módon vetemedik, keményállapotú megmunkálás nélkül nehéz szűk méret- és alaktűréseket garantálni, azaz nem érhetőek el a fémeknél alkalmazott pontossági értékek.

Az alábbi táblázatban a forma kialakítás módszereit foglalom össze:

2.1. Kerámiák formakialakítási módszerei

	Szilikát kerámiák (Porcelán, épületkerámiák)	Oxidkerámiák (Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , BeO)	Nem oxid kerámiák (SiC, Si ₃ N ₄)
Nedves préselés	nagy sorozatok		
Öntés	nagy sorozatok	elterjedt eljárás	elterjedt eljárás
Száraz préselés	viszonylag ritka	nagy sorozatok	elterjedt eljárás
Iszotatikus préselés	viszonylag ritka	nagy sorozatok	elterjedt eljárás
Extrudálás	nagy sorozatok	nagy sorozatok	viszonylag ritka
Fröccsöntés	viszonylag ritka	nagy sorozatok	elterjedt eljárás
Melegpréselés (Izosztatikus melegpréselés is *)		viszonylag ritka	elterjedt eljárás
* Ezzel zárul a szinterelési eljárás.			

Az alakváltozáson túlmenően - ami a zsugorodásból adódik – igen jelentősen befolyásolja a szinterelés a kerámiák tulajdonságait is. A szilikát- és az oxidkerámiák esetén a gazdaságos olaj- és gáztüzelésű kemencéket alkalmazzák. A szilikátkerámiák esetén a maximális hőmérséklet 1500 ° C, míg oxidkerámiáknál ez az érték 1800 ° C.

Ezzel szemben a nem oxidkerámiáknál elektromos kemencéket alkalmaznak és az oxigén kizárásához védőgázban (széndioxid, nitrogén, argon, stb.), vagy vákuumban végzik az égetést. Ezen kerámiák esetén a maximális hőmérséklet elérheti a 2400 ° C -ot, illetve védőgáz esetén néha túlnyomást alkalmaznak. A nem oxid kerámiák között vannak olyan anyagok, melyek az égetés során nem zsugorodnak. Ilyen esetekben elviekben nagyobb méret- és alaktűrések érhetőek el utómegmunkálás nélkül.

A kerámia alkatrészek méret- és alaktűréseit alapvetően a gyártási lépések (formázás, szárítás és égetés) során fellépő zsugorodás mértéke határozza meg. Minél nagyobb a zsugorodás, annál nehezebb szűkebb tűréseket elérni. Az alábbi táblázatban összefoglaltam az egyes eljárásokkal elérhető tűrések.

2.2. táblázat. Kerámiák gyártási elérhető pontosságok

Alakadó eljárás	Tűrések	
	Általános	Ma lehetséges precíziós eljárások esetén
Öntés	$\pm 5\%$ -tól $\pm 3\%$ -ig	$\pm 0,5\%$
Szárazpréslés ömlesztett granulátummal izosztatikusan	$\pm 2\%$ -tól $\pm 1\%$ -ig	$\pm 0,5\%$
Préslés ömlesztett granulátummal	$\pm 3\%$ *	$\pm 0,5\%$
Extrudálás	$\pm 5\%$ -tól $\pm 3\%$ -ig	$\pm 1,5\%$
Fröccsöntés	$\pm 3\%$	$\pm 1,5\%$
Zöld- és fehérmegmunkálás	$\pm 3\%$	$\pm 0,5\%$
* A nem deformálódó szerszámelemen.		

Porkészítés

Fontos a tisztaság, egyenletes szemcseméret, keverés, valamint reprodukálhatóság. Így lehet szűk tűrést elérni ($\pm 0,5\%$) száraz préslés esetén extrém egyenletes porgranulátumok segítségével.

A porkészítés legfontosabb alapfeltételei a következők:

- Gondosan ellenőrzött körülmények között kell végezni a kívánt morfológia, átlagos részecskeméret és eloszlás, valamint összetétel elérése céljából.
- Jellegzetes mérettartomány: 0,1-30 μm .
- A nagy fajlagos felület miatt jelentős az elszennyeződése lehetősége, szubmikronos poroknál a részecskék összetapadása (agglomeráció).

Eljárások:

Az anyag kémiai jellege és mechanikai tulajdonságai alapján nagyon sokféle módszer ismeretes. A leggyakoribbak:

szilárd fázisban: őrlés (rideg anyagok esetén)
termikus bontás
oxidáció, redukció

folyadék fázisban: oldószer elvonás (spray drying) kerámiáknál
szol - gél átalakulás
lecsapatás
fémolvadékoknál: atomizálás

gáz fázisban: gázok szintézise, plazma eljárások.

Formázás

Formázás: a porok tömörítése kompakt, de kis szilárdságú terméké (a porozitás: 25-50 térfogat %). Eredményül könnyen kezelhető, megmunkálható terméket kapunk (green compact vagy green body).

A tulajdonképpeni formázás előtt történik a por előkészítése: a porokat a kívánt arányban összekeverik, homogenizálják. Ekkor keverik be a különféle adalékokat, valamint a formázást megkönnyítő segédanyagokat. Utóbbiak a formázást vagy a szinterelést segítik elő. A bekeverés gyakran golyósmalomban történik. A homogenizálás előnyös a porszemcsék összetapadásának csökkentése szempontjából. A homogén keverék előállítása a jó minőségű végtermék előállításának egyik legfontosabb előfeltétele.

Módszerek:

a) préselés (pressing)

A port szerves kötőanyaggal (gyakran polietilén-glykollal) 30-40 térfogat %-ban összekeverik, majd présszerszámban préselik. Jellegzetes nyomás: 20-150 MPa. A módszer egyszerű, jól automatizálható. Hátrány: az erőhatás egytengelyű, a por részecskék egymással és fallal történő súrlódása miatt a tömörödés nem egyenletes. Égetés után alakváltozás következhet be.

b) (hideg) izosztatikus préselés (rubber mold pressing)

A port gumizacskóba töltik, majd folyadékban préselik (a nyomás jellemzően 100 MPa). Előnye: egyenletes tömörödés.

c) extrudálás (extrusion molding)

Képlékeny masszát extrudálnak megfelelő nyíláson keresztül. Rudak, csövek, üreges idomok kialakítására használják, főleg kerámiák esetében.

d) öntőpépes öntés (slip casting)

Vizes szuszpenziót készítenek, majd ezt porózus (gipsz) formába öntik. A forma beszívja a vizet, a szilárd rész kivehető. A porcelángyártás ősi módszere.

e) fröccsöntés (injection molding)

Képlékeny masszát készítenek szerves kötőanyag (gyakran parafin: viasz 1:1) segítségével (15-20 térfogat %), majd ezt a szerszámba nyomják. Bonyolult alakú termékek is készíthetők. Az eljárást eredetileg műanyagformák gyártásánál használták, ma már elterjedt a kerámiák esetében is.

A formázás után a szerves kötőanyagot vagy a vizet szárítással eltávolítják. A végtermék minősége szempontjából a homogenitás biztosítása alapvetően fontos.

Égetés/szinterelés (firing/sintering)

Szinterelés: a por vagy a kompakt hőkezelése a főkomponens olvadáspontjánál alacsonyabb hőmérsékleten, a kívánt szilárdság elérése céljából. Ez a termék előállításának utolsó szakasza. A szinterelt anyag (főleg a kerámia) csak nagyon nehezen munkálható meg (polírozás, vágás). A szinterelés körülményei nagyban meghatározzák a termék mikroszerkezetét és így tulajdonságait.

A szinterelés hajtóereje: a felületi energia csökkenése. A szilárd testek felületi energiája 1 Jm^{-2} körüli értékű. A szinterelés bonyolult folyamat szerint történik, melyben a diffúzió játszik döntő szerepet. A részecskék érintkezési pontjánál először úgynevezett "nyak" képződik, a pórustér nyitott. A szinterelés folyamata során a pórustér bezáródik, majd különálló pórusok keletkeznek. Végül ezek térfogata csökken.

Gyakorlati vonatkozások:

- A finom (szubmikronos) por átmérő előnyös a szinterelés sebessége és a végtermék tömörsége (pórusmentessége) szempontjából.
- Egyes kerámiák nehezen szinterelhetők. Ezeknél gyakran adalékokkal (a felületi energia csökkentése, szemcseközi fázis létrehozása) ill. nyomás egyidejű alkalmazásával segítik elő a zsugorodást.
- A szilárdság növelése érdekében gyakran szükséges a szemcsedurvulás megakadályozása. Ezt adalékokkal (kiválások a szemcsehatárokon) vagy a

szinterelési hőmérséklet csökkentésével érik el (nyomás egyidejű alkalmazása).

A kemencében kialakított, programozott hőmérsékletváltozások meghatározzák a kerámiák szerkezetét (porozitás, kristályok eloszlása és amorf fázis) és lényegében a zsugorodást. Az előírt hőmérsékleti értékektől való eltérés az alkatrészeket vetemedéseket idéz elő.

A kerámiáknál szokásos meghatározásokat, valamint tőrésre vonatkozó határértékeket a DIN 40680 (KISI, 1998) tartalmazza, amelyek bár csak az elektrotechnikában alkalmazott kerámiákra vonatkoznak (lásd: DIN 40685, PAUCKSCH és társai, 2008) is, de lehet más alkatrészekre is felhasználni. A DIN 40680 szabvány megadja az utómegmunkálás nélküli méret- és alaktűréseket az anyag, a gyártási eljárás és a pontossági fokozat szerint.

A pontosság durva, közepes és finom fokozatként határozzuk meg. A gépgyártásban legtöbbször a durva illetve közepes fokozat nem felel meg. Általában a gyártók a szabványban előírtal pontosabb méret- és alaktűréseket érnek el. Lényegesen kedvezőbbeket azonban csak utómegmunkálással lehetséges megvalósítani.

Az általános eljárások esetén a méret és alaktűrések egyértelműen $\pm 1\%$ felett vannak. Egyre növekvő mértékben vannak olyan különleges alakadó eljárások, melyek segítségével a $\pm 0,5\%$ tőrésértékek is elérhetők. Ezek az eljárások a kerámia alkatrészek hagyományos területein kívüli alkalmazások irányában váltanak ki fejlesztéseket, melyek olyan alternatív anyagokra vonatkoznak, amelyek magas hőmérséklet esetén kedvező kopási- és korrózióálló tulajdonságúak (ERNST és társai, 1941).

Megállapítható, hogy a kemény állapot elérésekor kialakuló $\pm 0,5\%$ -tól $\pm 1\%$ -ig terjedő tőrések alkalmazhatók. Ezek sok esetben kielégítik az igényeket. Azonban ennek ellenére megfigyelhető, hogy a gépiparban használatos oxid- és nem oxidkerámiák esetében a magas költségek ellenére is az utómegmunkálások (kemény állapot) egyre terjednek.

Módszerek:

a) Hagyományos szinterelés (standard pressure sintering)

Izzítás magas hőmérsékleten, levegőn vagy védőgázban. Időtartama: több óra.

Jellemző szinterelési hőmérsékletek: Al_2O_3 1400-1650 °C, ZrO_2 1400-1700 °C, Si_3N_4 1800 °C.

b) Meleg préselés (hot pressing, HP)

A porok szinterelése egyirányú (egy tengelyű) nyomás alatt történik. Előnyei: a szinterelési hőmérséklet csökkenthető, kis porozitású és finom szemcseszerkezetű termék készíthető. Hátrány: különleges anyagú (hőálló) szerszám szükséges. A berendezés főbb részei: prés (30-50 MPa), présszerszám, fűtés.

c) Meleg izosztikus préselés (hot isostatic pressing, HIP)

A szinterelés nagy nyomáson és magas hőmérsékleten történik, közvetítő gáz (általában argon) mint nyomásátadó közeg alkalmazásával. Előzetesen előszinterelt (zárt pórusú) anyagnál tokozás nélkül, egyébként tokozott (encapsulated) anyagon alkalmazzák. Előnyei: alacsonyabb hőmérséklet is elegendő, mint a hagyományos szinterelésnél, pórusmentes, finomszemcséjű termék készíthető, nincs présszerszám, számos olyan por esetén is eredményre vezet, mely másképpen nem zsugorítható pórusmentesre (SiC, Si₃N₄). Ipari méretekben elterjedt. Hátránya: bonyolult berendezés szükséges. Költséges. Berendezés: nagynyomású munkakamra, gázkompresszor (100-300 MPa), gázkezelő rendszer, ellenállás-fűtés (1000-2000 °C).

d) Reaktív szinterelés (reaction sintering)

A szinterelés közben kémiai reakció is lejátszódik, pl. Si₃N₄ előállítására Si por N₂ atmoszférában történő izzításával a $\text{Si} + \text{N}_2 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$ reakció szerint. Jelentős porozitás kialakulása nem kerülhető el.

e) Folyadékfázisú szinterelés (liquid phase sintering)

Olyan por keveréket szinterelnek ezzel a módszerrel, melynél az egyik (néhány százalékban levő) komponens olvadáspontja lényegesen alacsonyabb a másikénál. Az égetést az alacsonyabb olvadáspont feletti hőmérsékleten végezve folyadékfilm alakul ki a szilárd szemcsék felületén. Ez elősegíti a részecskék közötti anyagtranszportot. Lehűléskor az olvadék kristályos vagy üveg szerkezetben szilárdul meg. Feltétel, hogy az olvadék nedvesítse a szilárd részecskéket, valamint részleges oldódás is bekövetkezzen.

Például: MgO (CaO-SiO₂), Si₃N₄ (MgO adalékkal), keményfém (WC-8% Co).

Előnyök: lehetővé válik a nehezen szinterelhető anyagok pórusmentes zsugorítása; alacsonyabb hőmérsékleten történik, mint a hagyományos szinterelés. Hátrányok: a magas-hőmérsékletű szilárdság csökken, a kúszás (creep) növekszik.

2.1.3. A műszaki kerámiák tulajdonságai

A rideg anyagként viselkedő, emiatt csak korlátozottan alkalmazható műszaki kerámiák minősége az elmúlt néhány évtizedben jelentős mértékben javult. Ez mindenképp előtt anyagvizsgálati eszközök és a technológia nagyarányú korszerűsödésének valamint az anyagismeret fejlődésének köszönhető. Az eddigi rideg kerámiák helyett megjelentek a korszerű, mechanikai hatásoknak jobban ellenálló, úgynevezett szívós kerámia anyagok (WOLLAST és társa, 1963; KINGARY és társai, 1975). A 70-es évek óta háromszorosára nőtt a kerámiai anyagok szilárdsága és megbízhatósága. Ezek a kedvező változások elsősorban a korábbinál sokkal egyenletesebb mikroszerkezetű kerámia anyagok előállításának köszönhető. Amennyiben az anyag szerkezete homogénebb, csökken a terhelés közbeni helyi feszültségcsúcsok kialakulásának valószínűsége.

Kedvező tulajdonságok:

- I. Mechanikai
 - Nagy keménység
 - Nagy szilárdság
 - Nagy kopásállóság
 - Alaktartás (merevség)
 - Csekély tömeg
- II. Elektromos
 - Nagy elektromos szigetelő képesség
 - Nagy átütési szilárdság
 - Kedvező dielektromos / ferroelektromos tulajdonságok
 - Jó piezo-elektromos tulajdonságok
- III. Termikus
 - Magas alkalmazhatósági hőmérséklet
 - Csekély hővezetés / hőszigetelés
 - Kicsi hőtágulás
 - Magas hőmérséklet esetén is nagy alaktartósság
- IV. Kémiai / biológiai
 - Korrózióállóság
 - Időjárás állóság
 - Kedvező fiziológiai jellemzők
 - Kedvező élelmiszeripari jellemzők
 - Kedvező katalizációs jellemzők

Kedvezőtlen tulajdonságok:

- Ridegség
- Kritikus repedésnövekedés
- Hősokk veszély
- Nehézkes illesztés és kötészialakítás
- Csekély képlékenység
- Hosszadalmas keménymegmunkálás
- Magas gyártási költség

2.2. Korszerű szerkezeti kerámiák

A korszerű szerkezeti kerámiáknál sikerült megoldani a szívósság növelését, leginkább a mikrorepedések számának jelentős csökkentésével illetve a repedés tovaterjedésének megakadályozásával (YOSHIMURA, 1988). Több anyagcsalád tartozik ide, közülük legfontosabbak az alumíniumoxid, és a cirkóniumoxid alapú, a szilíciumnitrid és szilíciumkarbid kerámiák.

Ahhoz, hogy a kerámiákat különleges szerkezeti anyagként lehessen felhasználni, szívósságuk növelésére volt szükség. A probléma megoldásához felhasználták az anyagtudomány legújabb eredményeit. A szívósság növelésének legfontosabb módszerei:

a/ a mikrorepedések számának csökkentése.

Ezt elsősorban KRAUTH és társa, (1965) illetve ICHINOSE (1989) szerint finom (szubmikronos) por felhasználásával, adalékokkal, pórusmentes terméket eredményező formázási és égetési eljárásokkal érték el.

b/ a mikrorepedések terjedésének megakadályozása:

- Fázisátalakulással (transformation toughening). BAILEY (1972) szerint ebben az esetben a mikrorepedés olyan fázisátalakulást indít el, mely a repedés tovaterjedését gátolja (pl. ZrO_2 -dal szívósított Al_2O_3);
- Erősítőszálak vagy tűkristályok (whiskerek) (DREYER és társai, 1987) beépítésével (kerámia mátrixú kompozitok).

2.2.1. Alumíniumoxid alapú kerámiák Al_2O_3

Az alumíniumoxid az egyik legelterjedtebb, sokféle célra használható oxidkerámia.

Kedvező tulajdonságai: nagy keménység (ötvezettől függően: 1600-1975 $\text{HV}_{0.5}$), magas olvadáspont (2054 °C), jó elektromos- és hőszigetelő képesség. Hőtágulása viszont aránylag nagy a többi kerámiához képest ($8 \times 10^{-6} \text{ 1/K}^\circ$). Több kristálytani módosulata közül legfontosabb az Al_2O_3 (korund), mely Cr_2O_3 típusú rácsban kristályosodik.

Több oxiddal szilárd oldatot (pl. Cr_2O_3), másokkal alacsony olvadáspontú eutektikumot képez (pl. SiO_2). Az Al_3^+ és az O_2^- ionok mozgékonyága magas hőmérsékleteken jelentős, ezért aránylag könnyen szinterelhető. Különböző tisztaságú minőségben használják.

Porkészítés: A tisztasággal és a részecskemérettel szemben támasztott igényektől függően számos változat terjedt el, a mechanikai őrléstől a különböző kémiai eljárásokig.

Szinterelés: szintén különféle módszerek használatosak.

Pórusmentes, áttetsző (a fény több mint 60 %-át átengedő), vékonyfalú cső készíthető szubmikronos porból, kevés (kb. 0,5 %) MgO hozzáadásával. A védőgázban hagyományos szintereléssel 1400-1600 °C-on megy végbe az átalakulás (a csövet nátriumlámpákban használják).

Meleg préseléssel (1200-1400 °C-on, 35-70 MPa nyomáson) néhány perc alatt pórusmentes termék készíthető (forgácsoló lapkák).

Folyadékfázisú szinterelést is alkalmaznak. Az Al_2O_3 - SiO_2 binér eutektikum 1590 °C-on, az Al_2O_3 - CaO - SiO_2 tercier rendszerben levő egyik eutektikum 1170 °C-on olvad. Ezek az adalékok a késztermékben üveges szemcseközi fázist alkotnak. Pórusmentes termék készítését segítik elő, de rontják a szilárdságot magas hőmérsékleteken.

Különleges alakú Al_2O_3 előállítás:

- tűkristályok ill. erősítőszálak is készíthetők
- egy kristály rudakat olvadékból növesztenek Czochralski módszerrel.

Főbb felhasználások:

- Tűzálló anyagok, pl. téglék, csövek, termoelem-szigetelők
- Mechanikai alkatrészek, pl. fűvókák, szelepek, csapágyak
- Optikai: áttetsző cső, Na lámpákhoz,
Lézer kristályok (Cr^{3+} vagy más adalékkal)
- Mikroelektronika: pl. zafír szubsztrát
- Elektromos, pl. gyújtógyertya vagy más szigetelő
- Féldrágakövek, stb.

2.2.2. Cirkónium-dioxid alapú kerámiák ZrO_2

A cirkónium-dioxid 2700 °C-on olvad. Három kristályos módosulata van:
 2700 és 2370 °C között köbös
 2370 és 900 °C között tetragonális
 900 °C alatt monoklin.

A 80-as években Jelentős eredményeket ért el a cirkónium-dioxid kutatása (HEUER és társa, 1981; CLAUSSEN és társai, 1983; SOMIYA és társai, 1986; STEVENS, 1986; HEUER, 1987).

A kutatások során megállapították, hogy a fázisátalakulások térfogatváltozással járnak együtt, és repedéseket okozhatnak. Ezért a ZrO_2 önmagában nem használható szerkezeti anyagként. Adalékokkal viszont kiváló tulajdonságú kerámiák készíthetők belőle.

A ZrO_2 alapú kerámiák három csoportra oszthatók, közülük a szerkezeti kerámiák témakörében csak a fázisátalakulással szívósított kerámiákkal célszerű foglalkozni.

A ZrO_2 -ban lejátszódó tetragonálisból monoklin (martenzites) átalakulás 3-6%-os térfogat-növekedéssel jár (HANNINK, 2000). Ez felhasználható más kerámiák szívósságnak növelésére is.

A hatvanas évek óta így például Al_2O_3 -hoz finom szemcsés (kb. 1 μm), tetragonális ZrO_2 („fehér” oxidkerámia) port adalékolnak 10 - 20 térfogat % -ban. (GRAIN, 1967; SWAIN és társa, 1986; RÜLE és társai, 1986) szerint ez több mechanikai tulajdonságot befolyásol:

A ZrO_2 -ban lejátszódó tetragonális - monoklin átalakulást nemcsak az alumíniumoxid, hanem más kerámiák (pl. a mullit $3Al_2O_3$, $2SiO_2$ vagy a spinel $MgAl_2O_4$) szívósságának növelésére is felhasználják. Ezek az anyagok a korszerű szerkezeti kerámiák ígéretes csoportját alkotják.

2.2.3. Szilíciumnitrid Si_3N_4 , SIALON, Szilíciumkarbid

Szilícium-nitrid Si_3N_4

A szilícium-nitridnek nagy a szilárdsága, kopásálló, aránylag szívós, kicsi a hőtágulása és jól viseli a hősokkot. Előállításánál és felhasználásánál nehézséget jelent, hogy 1800 °C felett bomlik. Erős kovalens jellege miatt nehezen szinterelhető pórusmentesre. Jól ellenáll az oxidációnak. Két kristályos módosulata van α - ill. β - Si_3N_4 : mindkettő hexagonális és csupán a c-tengely hosszában különböznek (politipok). Alapanyaga aránylag olcsó.

A szinterelési nehézségek leküzdésére több eljárást dolgoztak ki: • "reaction bonding": Si por szinterelése N_2 gázban. Si porból zöld kompaktot készítenek a formázási eljárások valamelyikével, majd ezt nitrogén gázban izzítják (1200-1450

°C-on, 100-200 óra hosszát). Ekkor lejátszódik a $3\text{Si} + 2\text{N}_2 = \text{Si}_3\text{N}_4$ Reakció. A termék 15-20 % pórust tartalmaz. Az égetés folyamán a méret alig változik, mivel a szintereléskor bekövetkező térfogatcsökkenést a nitrid képződésekor lejátszódó térfogat-növekedés közel kiegyenlíti. Bonyolult alakú termékek készítésére használják. Szilárdsága alacsony: csupán 1/3-a a tömör termékének.

- Meleg vagy meleg izosztatikus préselés (HIP) általában adalékok használatával. (folyadékfázisú szinterelés). Ez az eljárás tömör, nagyszilárdságú terméket eredményez. Hátránya: drága.

SIALON

A Si_3N_4 szintereléssel kapcsolatos kutatások vezettek a Si-Al-O-N anyagcsalád, a (szialonok) felfedezéséhez. A szialonok szilíciumnitrid rács típusokban kristályosodnak. Összetételük az alábbi általános képlettel jellemezhető:



(Si,Al)(O,N)₄ tetraéderekből épülnek fel, hasonlóan a szilikátokhoz. A tetraéderek igen változatos módokon kapcsolódhatnak egymáshoz. Eddig leginkább a β- Si_3N_4 -del azonos rácsban kristályosodó változatokat, a β-szialonokat kutatták és használják.

A Si és az Al számos fémmel helyettesíthető (Li, Be, Mg, Sc stb.), így az összetételek és szerkezetek nagy változatossága valósítható meg. Megfelelő adalékok (Y_2O_3 , MgO) hatására folyadékfázisú szinterelés következik be magas hőmérsékleteken. Ily módon hagyományos préseléssel és égetéssel (nyomás egyidejű alkalmazása nélkül is) pórusmentes, kiváló tulajdonságokkal rendelkező termék készíthető. Ez a szialonok előnye a szilícium-nitriddel szemben. A szemcsék határán kialakuló intergranuláris fázis nagymértékben befolyásolja a termék tulajdonságait, főleg a szilárdságot magas hőmérsékleten.

A β'-szialonnak magas a törési- és húzószilárdsága. Hőtágulása kicsi, ezért jól bírja a hősokkot. Kristályos szemcséközi fázis megléte esetén 1400 °C-ig használható.

Szilíciumkarbid

A SiC -nak több kristályos módosulata ismeretes, ezek a politípek. Az alap építőegység tetraéderesen koordinált Si és C atomokból áll, melyek sokféle módon kapcsolódhatnak egymáshoz. Régóta alkalmazzák csiszolóporaként, ennél a felhasználásnál nagy keménységét és szilárdságát használják ki. Hővezető-képessége nagy; közel akkora, mint az alumíniumé. A nagy tisztaságú SiC félvezető. A SiC-ből régóta készítenek fűtőelemeket ellenállás fűtésű kemencékhez (szilit rudak).

Az oxidációnak jól ellenáll még 1500 °C-on is. Ezért bevonat alakjában is használják magas hőmérsékletnek kitett alkatrészekben. Fém- és kerámia mátrixú kompozitokban erősítő szálakként vagy részecskékként alkalmazzák. A rendkívül erős kovalens kötések miatt nehezen szinterelhető.

- SiC port régóta készítenek karbotermikus eljárással, 1500-1600 °C-on $\text{SiO}_2 + 3 \text{C} = \text{SiC} + 2 \text{CO}$

A termék őrlésével finom por készíthető.

- Jó minőségű, finom szemcseméretű por készíthető különböző szilánokból, gázfázisban, magas hőmérsékleten (pl. $\text{CH}_4 + \text{SiCl}_4$ vagy $\text{CH}_4 + \text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{Cl}_2$ reagálásával). A reakciót sok esetben plazmával segítik elő.

- Reaktív szintereléssel (reaction bonding) a szokásos módon kompaktot készítenek Si és C porból, majd ezt a Si olvadáspontja feletti hőmérsékleten izzítják. A reakció a Si olvadék és a szilárd C szemcsék között játszódik le.

- Meleg préselésnél 2000 °C felett, néhány százalék Al_2O_3 vagy B_4C adalék folyadékfázisú szinterelést tesz lehetővé. Meglehetősen drága eljárás.

- Meleg izosztatikus préselésnél 2200 °C-on 140 MPa nyomáson 2 óra szükséges tömör termék előállításához. Igen költséges.

- Újabbban nyomásmentes szintereléssel is sikerült nagy tömörségű SiC-ot előállítani, B és C adalékkal.

Felhasználás

A SiC kedvező tulajdonságait olyan esetekben tudják igazán kihasználni, amikor magas hőmérsékleteken, esetleg oxidáló atmoszférában kell az alkatrész szilárdságát megőrizni. Ez főleg gázturbinákban, rakétahajtóművekben fordul elő. SiC bevonatokat használnak az oxidáció megakadályozására, pl. szén-szén kompozitoknál.

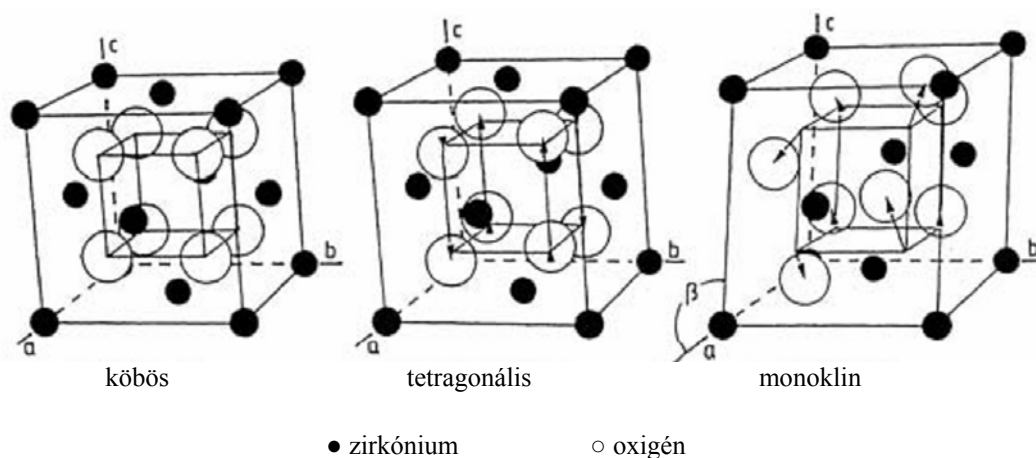
2.3. A ZrO_2 kristályszerkezete, fázisátalakulásai

TUEFER (1962), WOLTEN (1964), illetve SMITH és társa (1965) szerint ZrO_2 három kristályos szerkezeti állapotban létezik. A tiszta ZrO_2 szoba hőmérsékleten monoklin (m) állapotban van. Tetragonális (t) struktúrát vesz fel $T \sim 1170$ °C esetén. Innen köbös (c) rácsszerkezetűvé válik $T \sim 2370$ °C -nál (CaF_2 -struktúra). A magas hőmérsékletnél kialakuló üres helyek a hidrogén háló helyeire vezethető vissza.

A kristály-szimmetria változás az oxigénionok ideális helyzetéből történő részleges elmozdulásának köszönhető. Ugyanakkor SMITH (1962) és társa szerint a köbös CaF_2 háló tetragonálisba való átalakulása az elemi cella 0,3 % -os nyúlását eredményezi, míg a tetragonálisból monoklinba történő változás során közel 9° lapszög változás jön létre. Minden átalakulás reverzibilis és diszplazív, ezért nem szükségesek diffúziós martenzites átalakulási eljárások. A ZrO_2 olvadáspontját

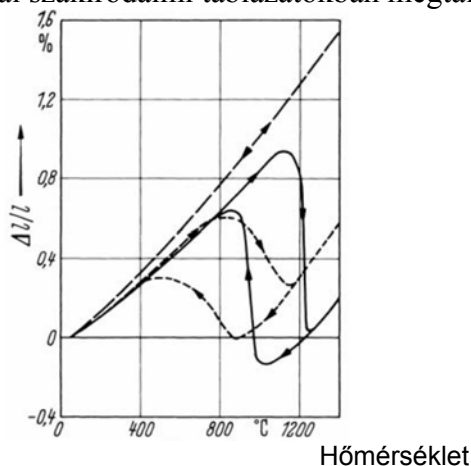
gyakran 2680–2710 °C közötti értékek adják meg. A termodinamikai számítások 2706–2710 °C értékekre vezettek.

GARVIE és társai (1975), illetve GARVIE (1982) szerint oxidokkal allovalis kationok bevitelével (CaO, MgO, Y₂O₃, Ce₂O₃, stb.) a Zr⁴⁺ helyet a kristályhálóban felveszi az ötvöző és így üres oxigén helyeket képez, így a (t) és (c) átalakulás szobahőmérsékleten stabilizálható.



2.2. ábra. A ZrO₂ három kristályos szerkezeti állapota (M. SWAIN és társai, 1994).

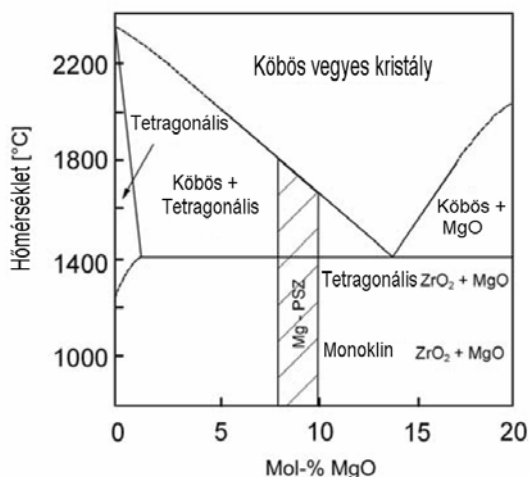
A monoklin állapota a természetben a Baddeleyit. A három állapot rácsállandói valamint fizikai tulajdonságai szakirodalmi táblázatokban megtalálhatók.



2.3. ábra. Dilatrometrikus görbe CURTIS szerint. Folyamatos vonal: tiszta ZrO₂; rövid szaggatott vonal; 5 Mol. % CaO ötvözet; hosszú szaggatott vonal: 19.8 Mol. % CaO [CURTIS, 1947]

A fázisátalakulás jól érzékelhető az ábra alapján. Emellett jól látható, hogy a felmelegítési és lehülési görbe egyértelműen hasonlít a vas martenzites átalakulásához. Később KRAUTH és társa (1965) is erre az eredményre jutott.

A műszaki alkalmazás szempontjából különösen fontos (HUGHAN és társa, 1986; HANNINK és társai, 1994) a részben stabilizált PSZ (Partially Stabilized Zirconia) és a tetragonális polikristályos cirkónium-oxid TZP (Tetragonal Zirconia Polycrystals). A továbbiakban a PSZ cirkónium-dioxiddal foglalkozom részletesebben.

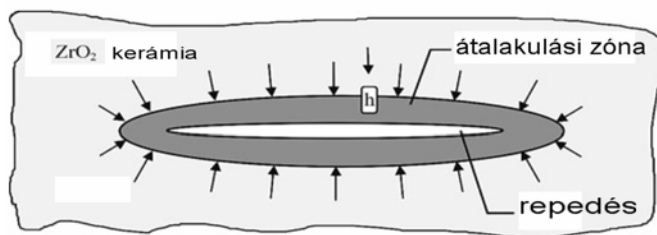


2.4. ábra. ZrO₂ fázis átalakulási rendszere a ZrO₂-MgO ötvözetben (GRAIN, 1967)

A részbeni stabilizálást kalciummal már régebb óta alkalmazzák. Azonban a jelentősebb műszaki lehetőségeket a MgO ötvözéssel lehet elérni, mert azzal alacsonyabb hőmérsékleten lehet a stabilizálást elérni.

A fázisátalakulás hatását a mikro-repedésekre többen kutatták (EVANS és társa, 1986; SWAIN és társa, 1986; RÜLE és társai, 1986; BECHER és társa, 1994; KISI, 1998). Ennek alapján megállapították, hogy az optimális stabilizáció a 8-10 %-os MgO tartalom mellett jön létre.

A szinterelt anyagban a tetragonális ZrO₂ szemcséknél a tetragonális – monoklin átalakulás elérhető. Szobahőmérsékleten metastabil állapotban vannak. Mechanikai igénybevétel esetén az anyagban egy mikro-repedésnél annak csúcs körül lokális húzófeszültség keletkezik, melynek egy kritikus értékénél bekövetkezik a fázisátalakulás: nagyobb térfogatú monoklin szemcsék keletkeznek és szinte "lezárják" a repedés terjedésének útját. A tetragonális-monoklin szerkezeti átalakulás az acélokban régóta ismert martenzites fázisátalakuláshoz hasonló diffúziómentes, összetétel-változás nélküli szerkezeti átalakulás. Ez a tulajdonság felelős a cirkónium-dioxid kerámiák hosszú távú ellenállásáért terheléssel szemben.



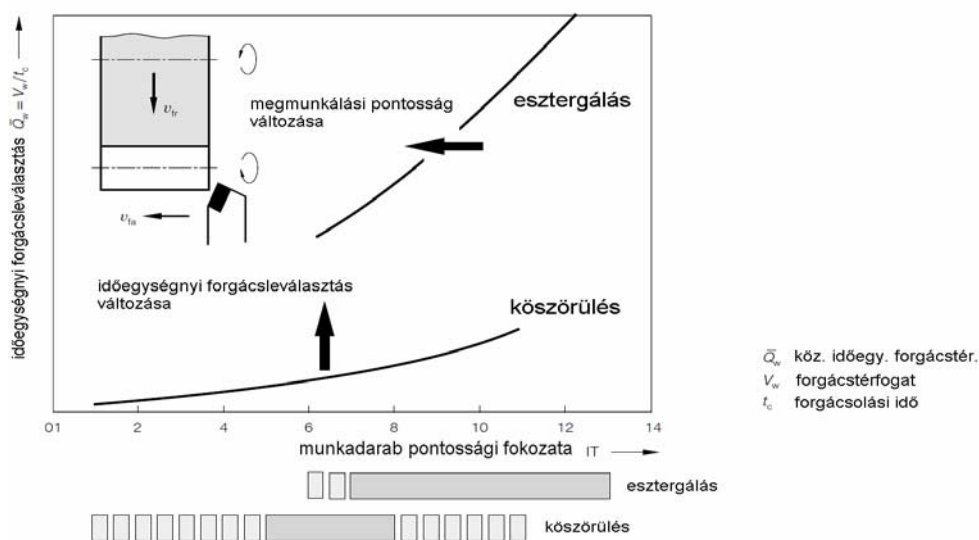
2.5. ábra. Egy repedés terjedésének korlátozási folyamata mechanikai igénybevétel esetén.

Ennek jelentős szerepe van egyes műszaki kerámiák alkalmazhatóságánál.

2.4. Kemény- és precíziós forgácsolás

A megmunkálási pontosság az acélból készült alkatrészekkel szemben is fokozódott. Vastartalmú kemény anyagok forgácsolására a gyémánt után a második legkeményebb anyag, a kőbős bórnitrid a legalkalmasabb. MÉSZÁROS és társa (2006), MÁTYÁSI és társa (2008) szerint megfelelően merev gépen, edzett kemény anyagok szabályos élű szerszámmal 1 μm körüli pontossággal 10 nanométer nagyságrendű átlagos érdességgel munkálthatók meg.

A kőbős bórnitrid (CBN) jó hőállósága miatt nem igényel hűtést, azaz környezetbarát megmunkálásnak tekinthető.



2.6. ábra. Esztergálásnál és kőszőrülésnél adódó időegységre jutó anyagleválasztás (FRITZ és társa, 2007)

Az ábrán (2.6. ábra) jól látható, hogy az egységnyi idő alatt leválasztott forgács mennyisége a megegyező pontossági tartományban esztergálás esetén jelentősen nagyobb.

A rugalmas alkalmazhatóság mellett kedvezően alakul az energia felhasználás és a környezetvédelem kérdése is akár az esztergálást, vagy a marást tekintjük. Ez abból is adódik, hogy csökkenthető ily módon a műveletek száma a nyersanyagtól a késztermék elkészültéig. Többek között ezen tulajdonságok miatt a köszörülés alternatívájaként egyre gyakrabban alkalmazzák (MÉSZÁROS és társa, 2005 a.; b.; KUNDRÁK és társa, 2006).

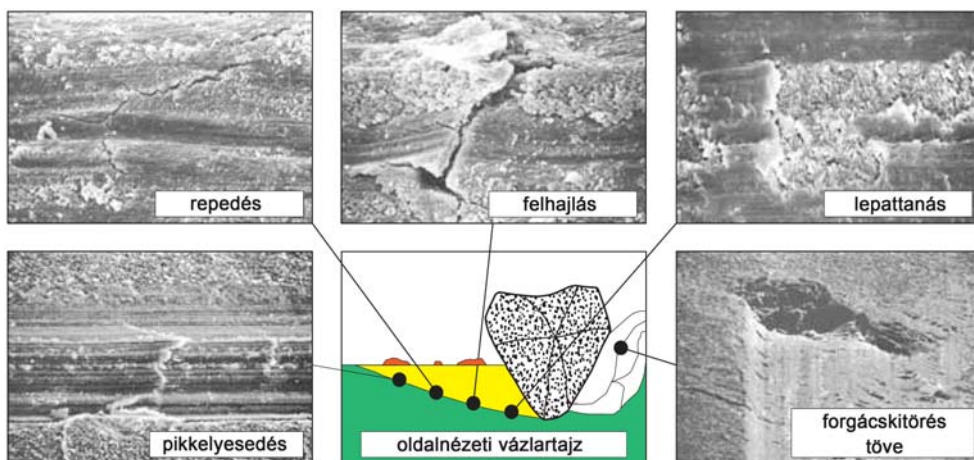
A szabályos geometriai éllel, éllel rendelkező szerszámokkal történő keményforgácsolás különleges igényeket támaszt a szerszámgéppel, a szerszámartóval és a szerszámmal szemben is. Még inkább fontossá válik a szerszám kopásállósága és élstabilitása.

Az új kerámia szerszámanyagok lehetővé teszik a kemény-, nagy forgácsolási sebességű-, száraz megmunkálást. A PCBN szerszámmal történő keményesztergálás esetén $v_c = 100-160\text{m/min}$. forgácsolási sebességnél, $f = 0,05-0,1\text{ mm}$ előtolásnál az elérhető felületi minőség $R_z \leq 2\ \mu\text{m}$.

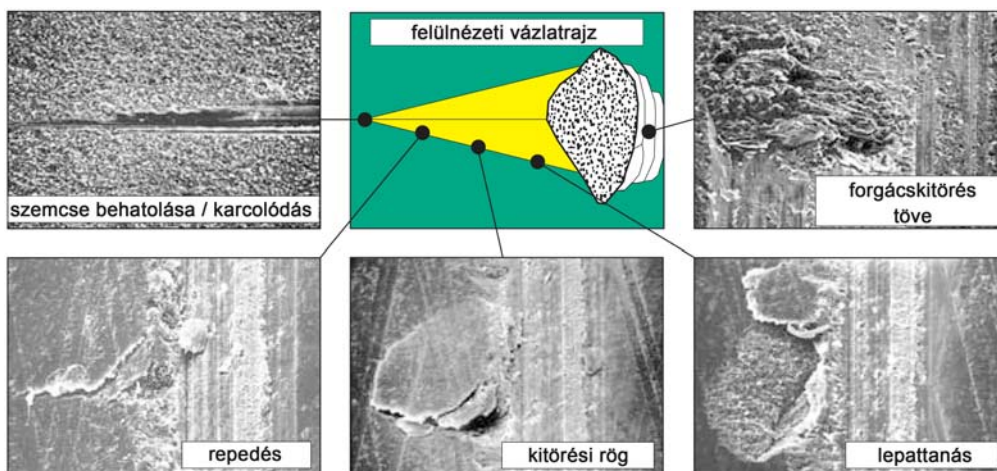
Megmunkálás után a kerámia felületek kialakuló felülettopográfiája az anyagán kívül függ az alkalmazott gyártástechnológiától, illetve az azokra jellemző forgácsleválási mechanizmustól. Így a felület kialakulását a szerszám, a munkadarab, a szerszámgép és az eljárás is befolyásolja. A következőkben műszaki kerámiákból készült alkatrészek felületkarakterisztikáját mutatom be anélkül, hogy külön megadnám az egyes tényezők befolyásolásának mértékét. Továbbiakban a teljesség igénye nélkül néhány fontosabb kemény megmunkálási eljárást, így a köszörülést, a hónolást, a leppelést és a polírozást mutatom be.

2.4.1. Forgácsképződési mechanizmusok

A szinterelt kerámiák keményforgácsolását általában szabálytalan élű és gyémánt szerszámmal végzik. Az egyes szemcsék forgácsolási mechanizmusának megértése lényeges a megmunkálás során kialakuló felületek megértéséhez. Az 2.7. és a 2.8. ábra egy elemi szemcse forgácsolása során kialakult felületeket mutatja (WARNECKE és társai, 1993).



2.7. ábra. Szemcse forgácsárkának oldalnézeti felvételei

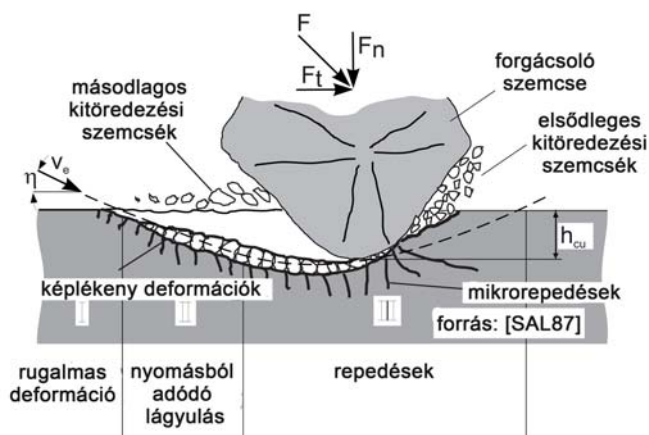


2.8. ábra. Szemcse forgácsárkának felülnézeti felvételei

Egy elemi szemcse forgácsolását különböző modellekkel írják le, amelyeket az alábbiakban röviden ismertetek.

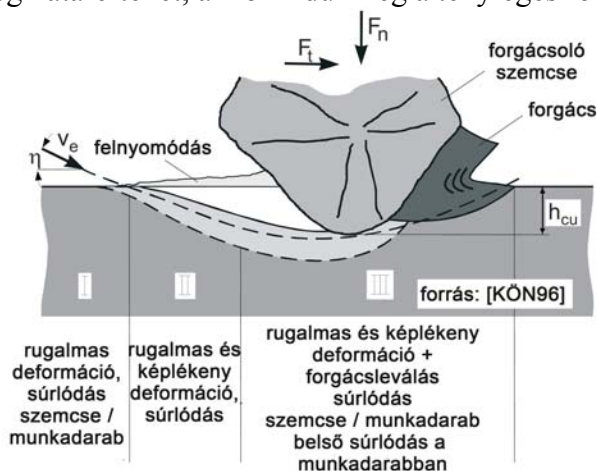
Forgácsolási mechanizmus modellek:

A legismertebb forgácsleválasztási modellt SALJÉ (1987) és KÖNIG (1996) adták. SALJÉ kemény anyagokra vonatkozó modellje jellemzően mikrorepedések, valamint az ezekből kialakuló kitöredezések növekedését írja le növekvő fogásmélység esetén.



2.9. ábra. Forgácsolási mechanizmus modell SALJÉ (1987) szerint

Ezzel ellentétben KÖNIG (1996) modell leírása a képlékeny anyagleválásra irányul. A szemcse éle egy fázist követően rugalmas alakváltozást és képlékeny forgácsleválást feltételez. Kezdetben a forgácsoló él kontúrja és a munkadarab felülete között nem alakul ki forgács. Csak, ha az elemi szemcse fogásmélység eléri a h_{cu} fogásmélység határértéket, akkor indul meg a tényleges forgácsképződés.

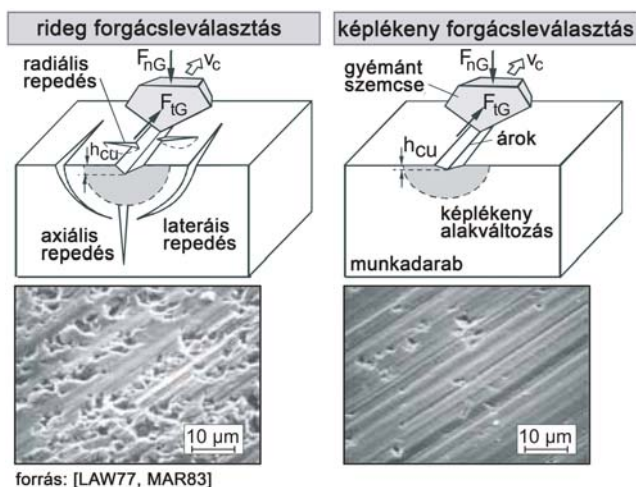


2.10. ábra. Forgácsolási mechanizmus modell KÖNIG (1996) szerint

A funkcionális és a forgácsolás alkalmazhatóságát a felületen kialakuló mikrorepedések befolyásolják. A repedések kialakulását, növekedését, mely az anyagleváláshoz vezet a repedés és benyomódás vizsgálatával kutatják. Az elemi szemcse és benyomódási vizsgálatok két különböző leválási mechanizmust adnak kemény rideg anyagok esetén. Az eltérő felület képződés az alkalmazott eljárástól és a rendszer méretétől függ. A két különböző leválási mechanizmus elvi működését MARSHALL és társa (1983) szerint a 2.11. ábra mutatja.

Mely anyagleválási mechanizmus valósul meg a megmunkálás során az nagyban függ a benyomódó test geometriájától. LAWN és társa (1977) szerint tompa test

esetén Hertz feszültségnek megfelelő íves jellegű repedések adódnak. Hegyes test benyomódása laterális, valamint radiális mélységi és felületi repedéseket eredményez, melyek anyagkitöredezésekhez vezetnek (LAWN, 1977; MARSHALL, 1983).



2.11. ábra. A mikrorepedések kialakulása köszörülés esetén (Forrás: LAWN, MARSHALL, EVANS)

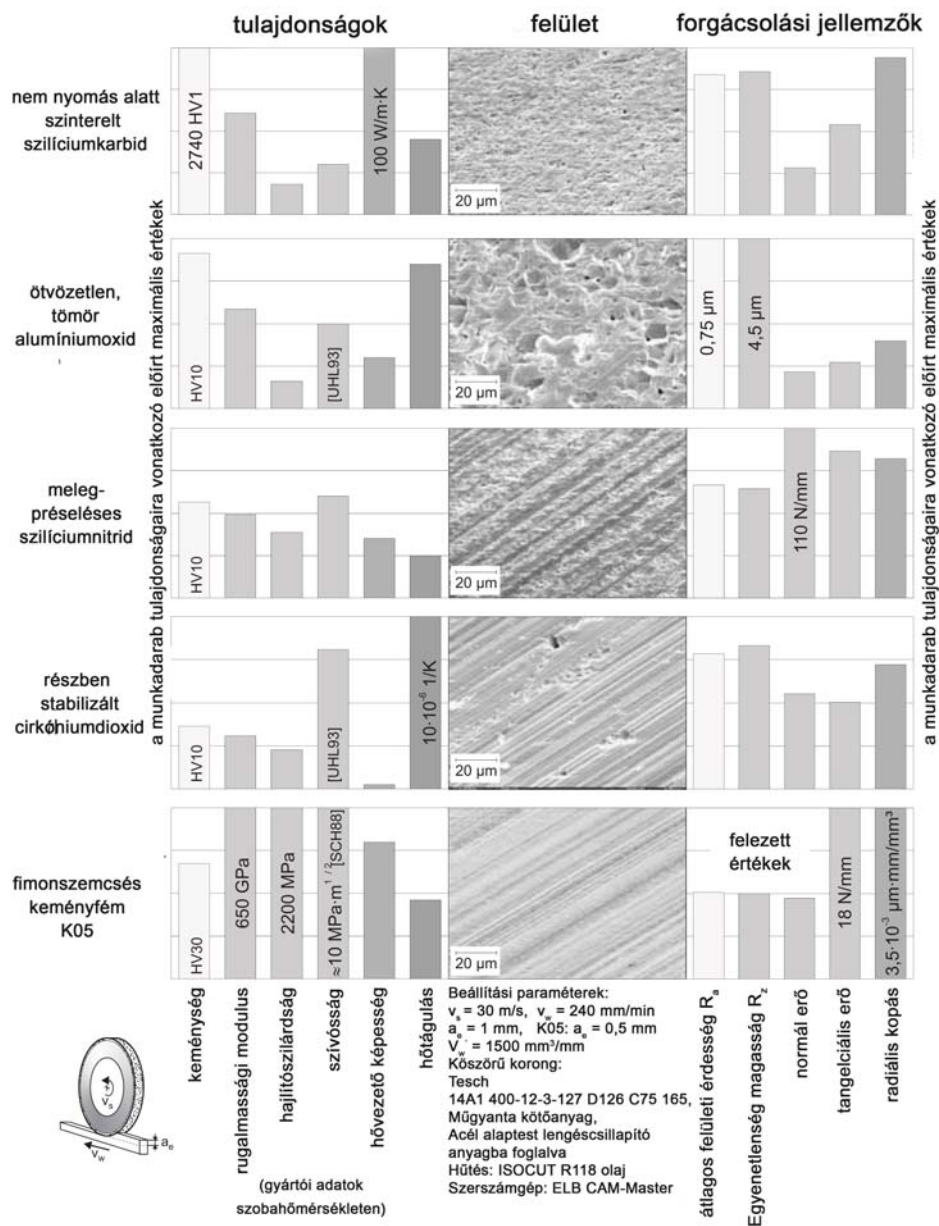
A hegyes test esetén kialakuló radiális repedések nyírórepedésekként jellemezhetőek.

Kerámia anyagok megmunkálása során az anyagleválási mechanizmus és ezzel együtt a megmunkálástól függő felület nagymértékben függ a munkadarab anyagától.

A befolyásoló paraméterekhez tartozik a keménység, a ridegség (rugalmassági modulus), a szilárdság, a szívósság, a hővezető képesség, a hőtágulás, a hőkapacitás és a hősokkérzékenység. Általános kijelentést tenni az anyagleválási mechanizmusra az egyes anyagtulajdonságra vonatkoztatottan szinte lehetetlen. Például az átmeneti, a rideg és a képlékeny anyagleválás függ a szívósságtól, a keménységtől és a szilárdságtól. A 2.12. ábra példákkal áttekintést nyújt az anyagspecifikus felületképződésekre és további eljárásfüggő hatásokra rideg-kemény anyagok köszörülése esetén.

A megadott anyagtulajdonságok mellett az anyagleválási mechanizmusra nagymértékben hatással van a szövetszerkezet – szemcseméret és szemcsehatár fázis – az egyes kerámiák esetén.

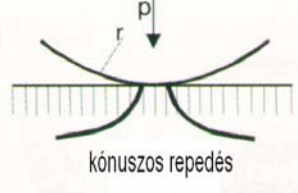
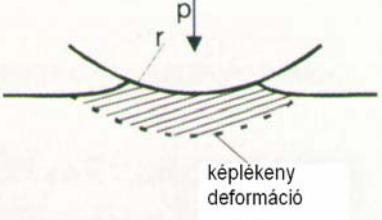
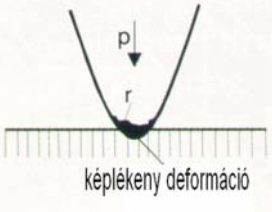
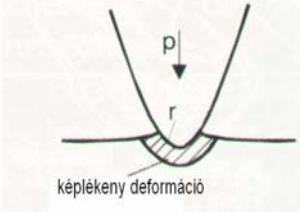
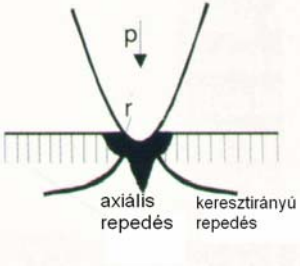
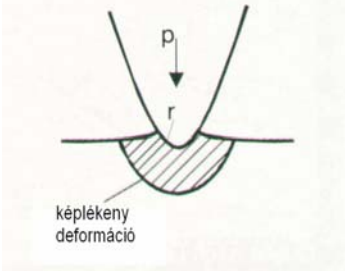
A kerámiák köszörülése során az alábbiak szerint alakulhatnak ki mikrorepedések. Finomszemcséjű kerámia kötésű köszörűszerszámok pozitívan befolyásolják a kerámiák megmunkálása során a felület minőségét. A kisebb szemcseméret csökkenti a leválasztott forgácsolóerőt, illetve forgácsoló erőt, valamint csökken a felületre ható nyomás is.



2.12. ábra. Rideg, kemény anyagok tulajdonságai és a köszörülésükre vonatkozó jellemzők

Az ennek ellenére növekvő forgácsolási energiaigény abból adódik, hogy a mikrorepedések száma és így az elemi részecskék kitörésének lehetősége is csökken.

A forgácsolás során a mikrorepedések csökkentése a képlékeny fázis elérésével lehetséges (2.13. ábra).

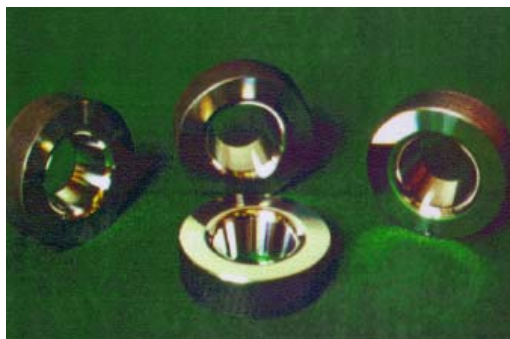
	Rideg anyag	Képlékeny anyag
Nagy csúcssugár	 <p>kónuszos repedés</p>	 <p>képlékeny deformáció</p>
Kisebb csúcssugár, alacsony nyomás	 <p>képlékeny deformáció</p>	 <p>képlékeny deformáció</p>
Kisebb csúcssugár, nagy nyomás	 <p>axiális repedés keresztirányú repedés</p>	 <p>képlékeny deformáció</p>

2.13. ábra. Képlékeny állapot kialakulása a csúcssugár nyomás hatására

2.4.2. Munkadarab anyaga és befogása

A munkadarabok anyagszerkezeti állapota, az anyag homogenitása, a kristallitok nagysága és orientáltsága nagymértékben befolyásolja a megmunkált felület topográfiáját. Legjobb felület amorf, mikrokristályos, vagy martenzites szerkezet esetén érhető el. Olyan megmunkálásoknál, amikor a szerszám eredő sebessége és az atomrács síkjainak az iránya állandó szöget zárnak be (pl. gyalulás), az egykristály anyagnál kiváló felületi minőséget tudnak elérni.

A munkadarabok befogására általában vákuumtokmányt használnak. Ha az nem lehetséges, akkor speciális felfogó készüléket alkalmaznak, amelyet azonban a befogott munkadarabbal együtt statikusan és dinamikusan ki kell egyensúlyozni. Üvegeket műanyagokat gyakran felragasztással rögzítenek. Edzett acélok puhapofás tokmányba, patronba stb. is befoghatók.



2.14. ábra. Ultraprecíziós esztergálással készült alkatrészek

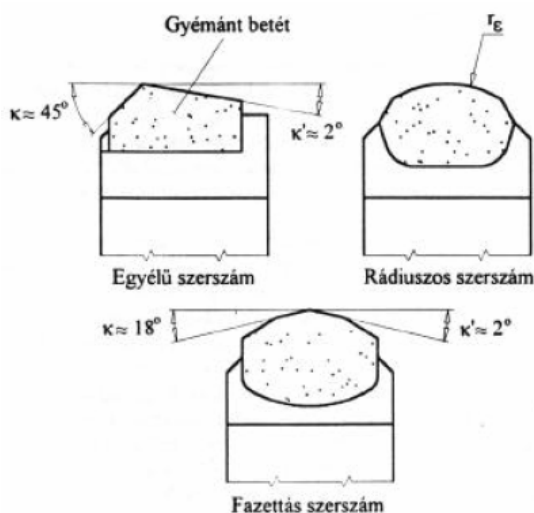
2.4.3. Szerszámgép, forgácsoló szerszám

Az ultraprecíziós gépeket rezgésszigetelt alapra helyezik. A gépágy alá aktív rezgéscsillapításként légrugókat helyeznek. A gépágyat jó rezgéscsillapító anyagból (gránit, gömbgrafitos öv) készítik. A főorsó és a vezetékek aerosztatikus vagy hidrosztatikus csapágyazásúak. A CNC vezérlés felbontóképessége (legkisebb programozható inkrementum) 0.1 mm ... 1 nm. Az ultraprecíziós gépeket klimatizált csarnokba telepítik, ahol a hőmérséklet $20 \pm 0,5$ °C határok között ingadozhat, a relatív nedvességtartalom 50%. A csarnok levegőjének porszegénynek kell lennie. Általában 4000-s tisztaságot írnak elő (4000 db 0,5mm alatti porszem 1 köblábban).

Gyémánt szerszám

A lágy és kemény anyagok forgácsolásakor alkalmazott szerszámok mind anyagukban, mind pedig geometriai kialakításukban rendkívüli módon eltérnek egymástól. Lágy anyagok (pontosabban vasat nem tartalmazó anyagok) ultraprecíziós forgácsolására kizárólag gyémánt egykristályt használnak. Néhány esztergakést láthatunk a 2.15. ábrán.

A szerszám jósága szempontjából meghatározó a gyémánt szennyezettsége (tisztasága), él lekerekedési sugara (élessége) az él érdessége és alakhibája. Szférikus és aszférikus felületek esztergálására rádiuszos éllel rendelkező szerszámot használunk. Mivel az esztergáláskor a munkadarabbal az él mindig más pontja vagy szakasza érintkezik, a pontosságot az él pontossága befolyásolja. Így az élsugar körüli eltérésének 1 μm alatt kell lennie. A leválasztható minimális forgácsvastagságot az él lekerekedési sugara (r_β) határozza meg. Tükörfelületek esztergálásakor 1 μm körüli előtolással is dolgozunk. Így a jól élezett gyémánt él étlekerekedési sugarának 10 nanométeres nagyságrendben kell lennie.



2.15. ábra. Néhány jellegzetes gyémánt esztergakés

Köbös bórnitrid szerszám

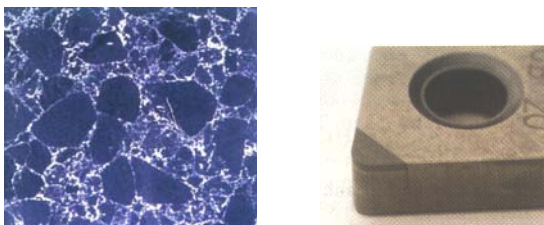
Mivel a köbös bórnitrid kristályok mérete az éllekerekítés mértékét (élezhetőségét) is meghatározza ($r = 1,5\text{-}3\ \mu\text{m}$) ezért a leválasztható minimális forgácsvastagságot nem célszerű $10\ \mu\text{m}$ -nél kisebbre választani. A forgácsleválasztási folyamatból származó rezgések csökkentése és a merevség növelése érdekében általában keményfémről készített késszárat alkalmaznak.

A CBN a gyémánt után a második legkeményebb szerszámanyag. Kiváló szerszámanyag, igen kemény, nagy a melegekeménysége ($2000\ \text{C}^\circ$ -ig), kiváló a kopásállása, nagy a kémiai stabilitása. Relatíve rideg, bár a kerámiáknál szívósabb. A kerámiákkal összehasonlítva keményebb, de nem olyan jó a hő- és kémiai ellenállása. Az 50-es években jelent meg, de a 70-es évektől alkalmazzák szélesebb körben. Az ára magas, de ennek ellenére elterjedten alkalmazzák különösen a keménymegmunkálásoknál. Acél kovácsdarabok, edzett acélok, öntöttvasak, felületi edzett alkatrészek, porkohászati termékek, hőálló acélok megmunkálásánál használatos.

A köbös bórnitrid előállításakor a CBN kristályokat nagy nyomáson és hőmérsékleten sajtolják össze kerámia vagy fém kötőanyaggal. A rendezetlenül elhelyezkedő kristályok a PCD-hoz hasonlóan akadályozzák a repedésterjedést. Messzemenően izotróp és kevésbé érzékeny az ütészzerű igénybevétellel szemben. A tulajdonságok függenek a CBN kristályok méretétől, a kötőanyag fajtájától és mennyiségétől (SANDVIK HANDBOOK, 1991).

A kis CBN tartalom, kerámia kötőanyaggal jobb kopásállóságot és kémiai stabilitást eredményez. Az ilyen anyag kiváló kemény acél és öntöttvasak megmunkálásához. A nagyobb CBN kristálytartalom szívósabb és alkalmasabb kemény (perlites) öntöttvasakhoz és acélokhöz valamint hőálló acélokhöz. A kerámia kötőanyag jobb kémiai stabilitást és kopásállóságot eredményez, de kisebb a szívósság.

A CBN 48 HRC keménységénél keményebb anyagoknál célszerű alkalmazni. Ha a megmunkálendő darab túl lágy intenzív szerszámkopás jön létre. Minél keményebb a munkadarab annál kisebb a szerszámkopás! (SANDVIK HANDBOOK, 1991)



2.16. ábra. Köbös bórnitrid szerkezete, és egy lapkakiállítás

A CBN szerszámok a PCD-hoz hasonlóan váltólapkák formájában kerülnek forgalomba. A váltólapka készülhet teljes egészében a CBN anyagból, de a leggyakrabban a keményfém alapanyagra szinterelt (zsugorított) 0,5-1,5 mm vastagságú réteg alkotja a szerszám anyagát.(2.16. ábra)

CBN alapú kompozitok

A polikristályos kompozitok különféle kötőanyagfázisból (pl.: Al, Ti, Co, Al_2O_3 , TiN, TiC, stb.) és 45-90 térfogatszázaléknyi CBN kristályból áll. A legnagyobb gyártók általában többféle összetételt gyártanak az alábbiak szerint:

- A kis CBN tartalmú (45 - 50 %), nagy szemcseméretű (4 - 8 μm) kristályok kemény anyagok finomesztergálására alkalmasak nagy forgácsoló sebesség esetén. A kompozitrészt egy keményfém-lapka egyik (vagy több) sarkába, vagy a lapka felső részére forrasztják be.
- A közepes CBN tartalmú (60 - 70 %), kis szemcseméretű (0,5 - 1 μm) kristályokkal kemény munkadarabok megszakított felületeinek forgácsolását végzik. A kompozitrészt egy keményfém-lapka egyik (vagy több) sarkába, vagy a lapka felső részére forrasztják be.
- A nagy CBN tartalmú (70 - 90 %), közepes szemcseméretű (2 - 4 μm) a tömör (keményfém lapka nélküli) változatoknál alkalmazzák.

2.4.4. Technológiai sajátosságok

A felület érdességére a forgácsolási sebesség általában nincs, vagy csak nagyon kis mértékben van hatással, ezért a fordulatszám sokszor tág határok között változtatható. Így lehetőségünk van a munkadarab tömegének figyelembevételével a legalacsonyabb rezgésszintet megkeresni és azt beállítani. A rezgésre és rezonanciára már a munkadarabok tervezésekor oda kell figyelni.

Fémek forgácsolásakor általában speciális petróleum vagy alkohol ködhűtést (kenést) alkalmazunk, míg műanyagoknál leginkább vizet. A hűtés-kenés

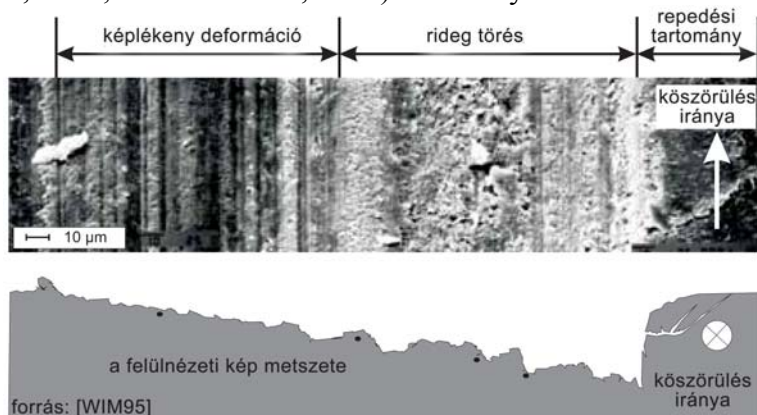
jelentősen befolyásolja a forgácsolt felület minőségét, ezért gondos beállítása fontos és nagy tapasztalatot igénylő feladat. Kiterjedt nagy felületek forgácsolása a kis előtolás miatt sokszor órákat is igénybe vesz. A legapróbb részletre kiterjedő, azonos körülményeket a forgácsolás egész időtartama alatt biztosítani kell.

Kemény, edzett acélok forgácsolásakor a forgácsméretek egy nagyságrenddel, az anyag szilárdsága sokszorosán nagyobb, mint nem vas alapú anyagok forgácsolása esetén. Ezért a forgácsoló erő komponensei is 1-2 nagyságrenddel nagyobbak lesznek. Mindebből az következik, hogy amíg a gyémánttal történő forgácsolást zömében aerosztatikus csapágyazású gépeken végezzük, addig az acélok forgácsolására a jobban terhelhető, merevebb, hidrosztatikus csapágyazású gépek a megfelelőek.

A szerszám kopási sebessége és a felület érdessége nagymértékben függ a forgácsolási sebességtől. Ultraprecíziós keményforgácsolásakor olyan forgácsolási sebességet célszerű választani, amelynél a szerszámkopás sebessége minimális. Általában ennél a sebességnél kapjuk a legjobb felületi minőséget is. Az optimális forgácsolási sebesség és a felületi érdesség a szerszám és munkadarab anyagától, forgácsméretektől, a szerszám élkialakításától és még számos más tényezőtől függ, amelyre technológiai ajánlások és a tapasztalat nyújtanak támpontot.

2.4.5. Kösörült kerámia felületek

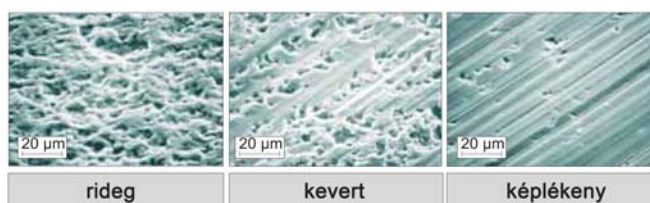
A kösörülésre jellemző, hogy a kösörülési szemcsék forgácsolás irányára azonosak a repedési irányok, valamint egy a felülettel párhuzamos főhatás irány alakul ki. A forgácsoló szemcse közvetlen repedéseket indukál és elemi kerámiarészecskék rideg kitöredezéseit és/vagy deformálódásait, képlékeny leválásait eredményezi. Közvetve ez egyrészt kitöredezésekhez, másrészt mélyebben lévő repedések repedésrendszerre alakulásához vezet, ami a szemcse méretéből nem szükségszerűen következő nagyobb méretű kiszakadásokat (UHLMANN, 1993; WEIGMANN, 1997) eredményez.



2.17. ábra. Különböző forgácsleválasztási mechanizmusok szilíciumnitrid kösörülése során

Az alábbiakban forgácsleválási mechanizmus modellezése látható a megmunkálási árkok mentén. Az 2.17. ábra a kialakult felületen egy tartomány főként képlékeny alakváltozásos, illetve egy másik főleg rideg kitöréses, repedéses tartomány különböztethető meg. A mikroszkópos felvételeken látható axiális-, radiális- és keresztirányú (laterális) repedések a jellemzőek.

Az a felület, amelyen főleg képlékeny deformáció azonosítható, árkok, lekerekedések, rétegződések, pikkelyesedések, és viszonylag kis mértékű kitöredezések láthatóak. Ezek a jellemzői a képlékeny forgácsleválasztásnak (2.18. ábra). Ezzel szemben a rideg forgácsolást a nagy számú kitöredezések, felverődések, rögszszakadások és lepattogások jellemzik.



2.18. ábra. Kösörült kerámia felületek rideg, kevert és képlékeny (duktilis) forgácsleválások esetén

Egy felület kösörülésekor rendszeresen előfordul a képlékeny és a rideg forgácsleválás is. A ridegből a képlékeny átmenetet alapvetően az anyagminőségtől függő egy szemcsére vonatkoztatott kritikus fogásmélység határozza meg, azonban a forgácsoló szemcsé mikro-élgeometriájától is jelentősen függ.

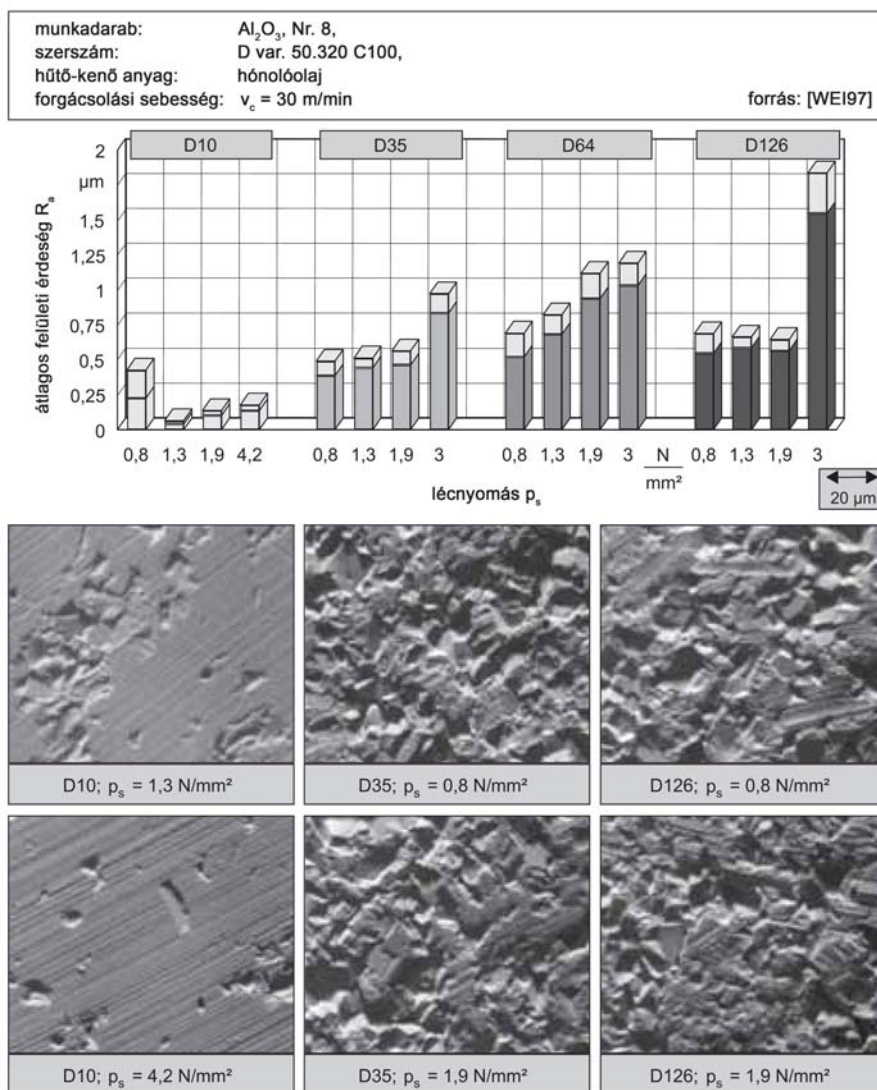
2.4.6. Hónolt kerámia felületek

A hónolásra főleg a forgácsoló szemcsé erőhatására kialakuló repedésterjedést és a felületre tapadó szemcsék fogásmélysége egy a felülettel párhuzamos hatásirányt ad meg.

Mivel a forgácsoló sebesség közel egy nagyságrenddel alacsonyabb, mint kösörülés esetén, a hőhatás is jelentősen kisebb. Hasonlóan a kösörüléshez itt is megtalálható a képlékeny leválás mellett a rideg forgácsleválási mechanizmusok. Hogy melyik mechanizmus lesz jellemző, azt a szemcsébenyomódás mélysége és a forgácsoló sebesség határozza meg.

SPUR és társai (1989) és WEIGMANN (1997) kutatásai azt mutatják, hogy alumínium-oxid és szilícium-nitrid hónolása esetén a felületi érdesség és az anyagleválasztás határfoka a szemcseméret és a lécek nyomásának növelésével durvul, illetve javul. Alumínium-dioxid kerámiák és kis gyémánszemcsék (D7, D10) esetén a főleg képlékeny (duktilos) anyagleválasztás miatt sokkal simább felületet adódik, amiket nagy számú hornyok, vályatok, árkok szakítanak meg. A

nagyobb szemcsék a forgácsleválási mechanizmust a rideg forgácsolás irányába viszi, a felületen sok interkristallitos kitöredezés alakul ki (2.19. ábra).



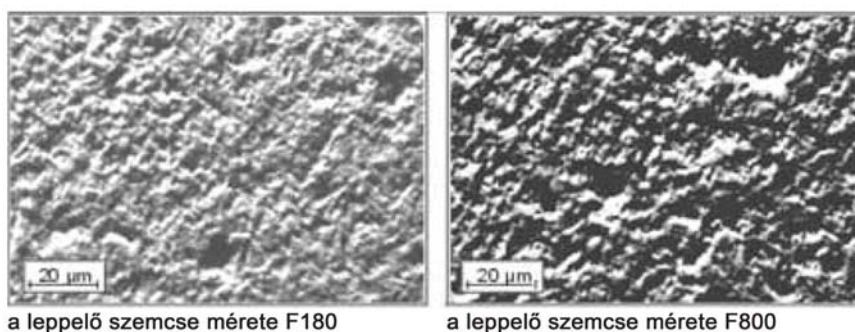
2.19. ábra. Alumíniumoxid felületek különböző szemcseméret és hónólólec nyomás esetén

Hónólás esetén a rideg forgácsleválasztási mechanizmusú nagy forgácsoló sebesség kedvező egységnyi idő alatti anyagleválasztást ad. Azonban a felület minősége romlik a nagyobb sebesség esetén, mert nagyobb repedéseket indukál, amelyek kitöredezéseket, lepattanásokat eredményezhetnek (HÖHNE, 1999).

2.4.7. Leppelt kerámia felületek

A leppelést pasztában, vagy folyadékban lazán elhelyezkedő szemcsék forgácsolásaként deffiniáljuk, melyek általában egy adott formát felvevő ellendarabbal (leppelő szerszám) -lehetőleg a szemcsék „szabálytalan forgácsolás-vezetésével”- végzünk.

Az alacsony forgácsleválasztási teljesítmény miatt a leppelési eljárást legtöbbször kedvezőbb méret-, alakpontosság és felületi minőség elérése céljából alkalmazzuk. A mikro-geometriára jellemző a közel izotrópos felülettopográfia szabályosan rendeződő árkokkal, és a jelentősen homogénebben elrendeződő vályatok néhány interkristallitos kitöredezésével (2.20. ábra). Ez a nagy tribológiai vagy optikai igények esetén előnyös (KÖNIG, 1996).



2.20. ábra. Leppelt szilíciumkarbid felületek

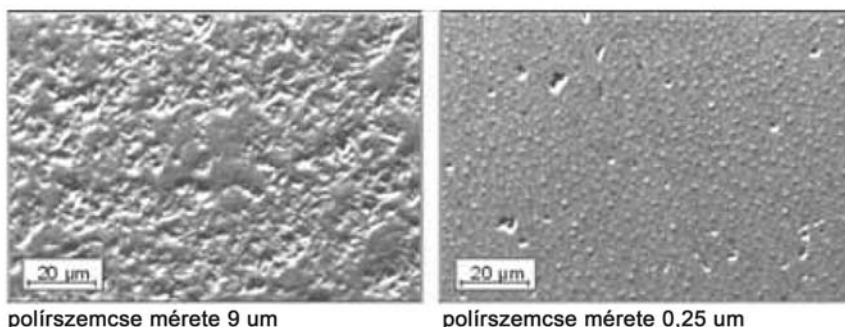
A rideg forgácsolási mechanizmus leppelés esetén a forgácsleválasztás határfokára kedvezően hat, mert a szemcsék méretéből adódóan nagyobb leválasztást eredményez (SABOTKA, 1991). Leppelésnél a forgácsleválasztást a forgácsoló szemcse legördülésével adják meg (2.20. ábra).

2.4.8. Polírozott kerámia felületek

Polírozással a felület minőségének nagy mértékű javítása a cél. A leppeléssel ellentétben a polírszemcse szövetbe, vagy polírkorongba ágyazódik, így irányított szerszám- és szemcsemozgás valósítható meg, ami a felület optikai tükrösségéhez szükséges. Idő- és ezáltal költségigényes.

A polírozás során működő forgácsleválasztási mechanizmus még nem került egyértelműen tisztázásra. Egyrészt abból indulnak ki, hogy a felületcsúcsok deformálódnak, bár a munkadarab az alkalmazott profiltányérral szorítódik. Másrészt a forgácsleválasztás során figyelembe kell venni a leválasztott forgács hatását.

A polírozott felületet polírozási időtől és az alkalmazott polírszemcsétől függően sima felületek és vályatok jellemzik. Más felületjellemzők csak egyedi elemként láthatóak, nem tipikusak (2.21. ábra).



2.21. ábra. Polírozott szilíciumkarbid felületek

2.5. Következtetések a szakirodalomból

A kerámiák, így a cirkóniumdioxid iránt is jelenős ipari igény van. Tulajdonságai széles körű alkalmazását vetítik előre. Az anyagtechnológiák fejlődése a megmunkálás fejlesztési igényeit is megköveteli. Kutatásaim ennek az igénynek szándékoznak megfelelni.

Mivel a szakirodalom nem ad meg esztergálási adatokat, összefüggéseket kerámiákra és azon belül a cirkóniumdioxidra vonatkozóan, célom ezek meghatározása.

- A fentieknek megfelelően a kutatásom célja cirkóniumdioxid esztergálása szabályos élgeometriájú szerszámmal. A megmunkálás során az alábbi részcélok elérését tűztem ki:
- A megmunkálásra a megfelelő forgácsolószerszám, és szerszámgép kiválasztása.
- A forgácsolás során létrejött felületek topológiai vizsgálata. A kapott eredmények kiértékelése.
- A megmunkált felületek vizsgálata a mikrorepedések szempontjából. A kapott eredmények kiértékelése.

A jellegzetes megmunkálások és az egyes szerkezeti anyag csoportok közötti ismeretekre vonatkozó szakirodalmi összegzés a 2.3. táblázat tartalmazza.

2.3. táblázat. Kerámiák esztergálásnak ismerete, helyzete a technológiák között

	köszörülés	hónolás	marás	esztergálás
színes fémek	ismert	ismert	ismert	ismert
műanyagok	ismert	ismert	ismert	ismert
acélok	ismert	ismert	ismert	ismert
öntöttvasak	ismert	ismert	ismert	ismert
kerámiák	ismert	ismert	ismert	kis mértékben ismert

A 2.4. táblázatban a kerámiák csoportján belül értékelem a cirkóniumdioxid kerámiák forgácsolással történő megmunkálási lehetőségét. A gyakoribb kerámiák – cirkóniumdioxid, szilíciumkarbid, szilíciumnitrid, alumíniumoxid – összehasonlítása soronként történik, anyagjellemzők figyelembe vételével.

Az esztergálás szempontjából minél kedvezőbb egy anyag, annál kisebb sorszámot kap. Pl. a cirkónium-dioxidnak a legkisebb a keménysége (esztergálás szempontjából előnyös), így az 1. sorszámot kapta. Szintén 1. sorszámra vezetett a cirkónium-dioxidnál a legmagasabb törési szilárdság.

Ha az egyes kerámiák oszlopaiban található értékeket összegzem, akkor az adott kerámia esztergálásának relatív összehasonlító jellemzőjét kapom.

A legkisebb összeg adja az esztergálás szempontjából leginkább előnyös kerámia anyagot. A 2.4. táblázatból kitűnik, hogy a cirkóniumdioxid féltermékek esztergálásával szélesebb körben kell a jövőben foglalkozni, emiatt kutatási munkám során ezzel a részterülettel foglalkoztam.

2.4. táblázat. Kerámiák esztergálásának szükségessége az irodalom alapján

	Cirkónium-dioxid	Szilícium-nitrid	Alumínium-oxid	Szilícium-karbid
Hajlítószilárdság	2	1	4	3
Nyomószilárdság	1	4	3	2
Törési szilárdság	1	2	3	4
Rugalmasági modulus	2	1	4	3
Weibul szám	1	2	3	4
Keménység	1	3	2	4
Összpontszám	8	13	19	20



esztergálás

3. KÍSÉRLETI MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK

3.1. A modellvizsgálatok helyszíne

Az első fejezetben megfogalmazott célkitűzések megvalósításához alkalmazott kísérleti eljárásokat több csoportra osztottam. A mérések elvégzésére több helyszínen volt lehetőségem.

A kerámia és az öntvény próbatestek egyélű szerszámmal történő megmunkálására a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet Laboratóriumában került sor. Ezek egy CNC esztergagépen elvégzett forgácsolási vizsgálatok. A forgácsolt felületek súrlódási vizsgálataihoz az Intézetben megterveztem és kialakítottam egy berendezést.

A forgácsolt kerámiák és öntvények felületéről készített elektronmikroszkópos vizsgálatok helyszíne a Budapesti Műszaki és Gazdaságtani Egyetem Polimertechnológia Tanszéke volt.

A megmunkált felületeket tovább elemeztem, és topográfiai felvételeket is készítettem. Ezeket az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet laboratóriumában végeztem el.

3.2. A vizsgált anyagok és kialakításuk

3.2.1. Cirkónium-dioxid kerámia próbatest

A vizsgálatokban szereplő műszaki kerámiák közös jellemzője, hogy igen magas hőmérsékleti tartományban kimagasló fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkeznek. Keménységük nagy, (HV 1250–1800), ezért csak polikristályos gyémánt és köbös bórnitrid szerszámokkal forgácsolhatóak. A vizsgált anyag a cirkóniumdioxid kerámia.

Az esztergálási kísérleteknél használt hengeres próbatestek átmérője 16 és 20 mm (3.1. ábra).

A cirkónium-dioxidot már a 19. század végén használták tűzálló anyagként. Szerkezeti anyagként 1975 óta egyre gyakrabban alkalmazzák. A funkcionális anyagként az oxigénnel való erős kapcsolódó képessége miatt oxigén-érzékelőként valamint oxigénion vezetőként is alkalmazzák. A mechanikai alkalmazások során a tetragonálisból monoklinba történő fázisátalakulás során létrejövő térfogatváltozást használják fel.



3.1. ábra. A vizsgálatokban szereplő kerámiák cirkóniumdioxid (ZrO₂)

3.1. táblázat. Különböző ZrO₂-ok rácsparamétereit és fizikai tulajdonságait (HEUER, 1987)

Térceport	Monoklin: addeleyit	tetragonális	köbös
Rácsparaméter [pm, °]	P2 ₁ /nmc	P4 ₂ /nmc	F m ₃ m
a ₀ ötvözetlen	514.5-516.9	364.4 ¹⁾ 1250 °C esetén 1/√2 · 515.3 ⁴⁾	525.7 ¹⁾ 2400 °C esetén
9.4 Mg-PSZ	511.7	507.7	508.0 20 °C esetén
8.4 Ca-PSZ	515.6	509.4	513.2 20 °C esetén
12 Ce-TZP	519.3	513.2	--
4.5 Y-PSZ	--	511.6	513.0 20 °C esetén
3 Y-TZP		--	
b ₀ ötvözetlen	514.5-516.9	--	--
9.4 Mg-PSZ	511.7	--	--
8.4 Ca-PSZ	519.1	--	--
12 Ce-TZP	520.4	--	--
4.5 Y-PSZ	--	--	--
3 Y-TZP		--	
c ₀ ötvözetlen	531.1-534.1	527.4	--
9.4 Mg-PSZ	530.3	518.3	--
8.4 Ca-PSZ	530.4	518.0	--
12 Ce-TZP	536.2	522.8	--
4.5 Y-PSZ	--	515.7	--
3 Y-TZP		517.6	
β ötvözetlen	99.15-99.25	--	--
9.4 Mg-PSZ	98.91	--	--
8.4 Ca-PSZ	98.8	--	--
12 Ce-TZP	98.8	--	--
Stabil tartomány ¹⁾ [C°]	<950...1170	1170 – 2370	2370 – 2706
Tömeg [g/cm ³]	5.56	6.10	5.68 – 5.91
Hőtágulás	6.8 – 8.4 a-tengely 7 ³⁾	8 – 10 ¹⁰⁾ a-tengely	10.8 (teljes stab.)
25 – 1000 C° [10 ⁻⁶ /K]	1.1 – 3.0 b-tengely	--	
	12 – 14 c-tengely 15 ³⁾	13-10.5 ²⁾ c-tengely	
Hővezető képesség[W /mK]	1 – 2	1 – 2	1.675 100 °C 2.094 1300 °C

tiszta, ötvözetlen; ²⁾ a felvett ötvözők mennyiségétől függ; ³⁾ mért ötvözött anyagokból extrapolálva ötvözetlenre; ⁴⁾ a tetragonális elemi cella kristallográfiai elhelyezkedése az a irányban a monoklin cella 1/√2 szerese szerint.

A vizsgált ZN 40 kerámia mechanikai tulajdonságait a 3.2. táblázatban foglaltam össze:

3.2. táblázat. Cirkóniumdioxid kerámia tulajdonságai

	Mértékegység	
Anyag		ZN 40
Fő összetevő		ZrO ₂ -MgO
Sűrűség	g/cm ³	5,74
Hajlító szilárdság	MPa	500
Nyomó szilárdság	MPa	1600
Young modulus	GPa	210
Poisson tényező		0,3
Vickers keménység HV0,5		1240
Hővezetési tényező	W/mK	3
Lineáris hőtágulási együttható	10 ⁻⁶ K ⁻¹	10,2

3.2.2. Öntvény próbatétel

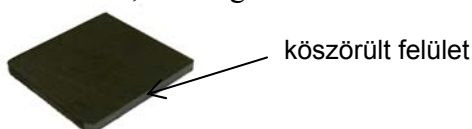
Az öntvény próbatétek (3.2. ábra) kialakításánál arra törekedtem, hogy a méreteik egyezzenek a kerámia próbatétel méreteivel. Így előzetes megmunkálással a nyers munkadarabokból készítettem el a próbatéteket, melyek átmérője 16 mm, hosszuk pedig a befogási ráhagyás miatt 30 mm.



3.2. ábra. A forgácsolási vizsgálatban szereplő öntöttvasak lemezgrafitos (GJL 200) és gömbgrafitos (GJS-400-15)

3.2.3. Acél próbatétel

A súrlódási erő méréséhez a kerámia palástfelületére acél próbatéteket (3.3. ábra) helyeztem. Az acél lemezek anyaga S355, mérete 20x20 mm, vastagsága 1,5 mm. Az érintkező felülete köszörült, az átlagos felületi érdessége: $R_a = 0,8$.



3.3. ábra. A súrlódási vizsgálatban szereplő acél próbatétek

3.2.4. Egyélű forgácsoló szerszám

A forgácsolószerszám lapkás esztergakés 12x12-es szárral. Kétféle lapkát használtam, köbös bórnitrid (CBN) és polikristályos gyémánt (PCD) lapkákat (BEX és társa, 1977; DREYER és társai, 1987). Ezekkel az anyagokkal lehet a keményforgácsolást elvégezni.

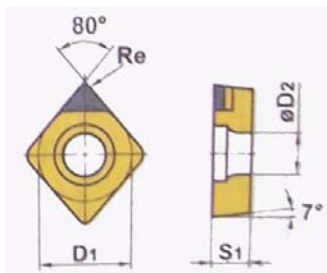


3.4. ábra. A vizsgálathoz használt esztergakés és lapkák gyémánt (PCD) és köbös bórnitrid (CBN)

A lapkák kialakításukból adódóan a szerszámba csavarral rögzíthetők.

A lapkák típusai és szabványos ISO azonosítója:

- Köbös bórnitrid: CCMW09 T304 MB825
- Polikristályos gyémánt: CCMW09 T304 MD220



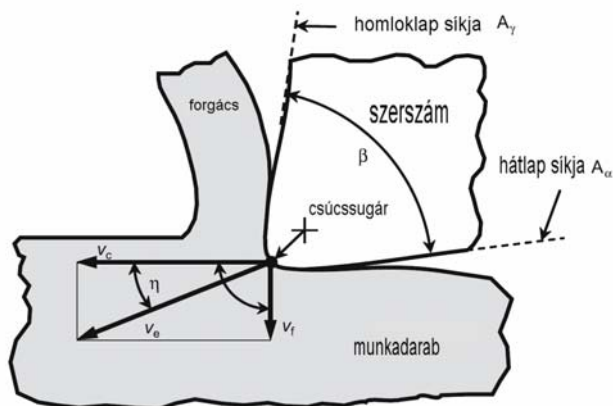
$R_e = 0,4 \text{ mm}$
 $D_1 = 9,525 \text{ mm}$
 $S_1 = 3,97 \text{ mm}$
 $D_2 = 4,4 \text{ mm}$

3.5. ábra. A forgácsolási vizsgálatokhoz használt lapka méretei és élszögei

MB825 CBN szerszám :
 finomszemcsés (0,5 - 1 μm)
 ötvözők: TiC, Al₂O₃
 fazon TA 35°
 fazon szélesség: 0,13 mm
 fazon mentén a lekerekítés: R = 0,03 mm

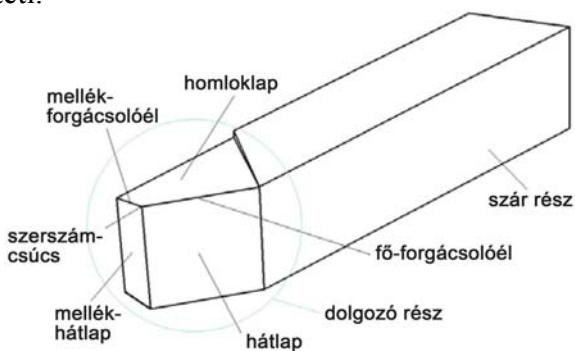
3.3. Forgácsolási rendszer

A félkésztermékeket a felhasználás előtt még valamilyen módon megmunkálják. A legerjedtebb gépészeti megmunkáló módszer a forgácsolás, amelynek segítségével megadják az alkatrésznek beépítés előtti végleges formáját. Jellemzője, hogy az alkatrész alakját anyagrészek eltávolításával alakítjuk ki. Az anyagleválasztás a munkadarab és szerszám egymáshoz viszonyított elmozdulása révén valósul meg.



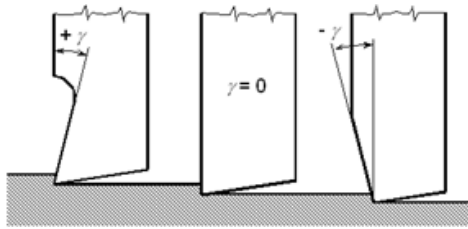
3.6. ábra. Nem idealizált szerszám munkadarab kapcsolat forgácsoláskor.

(BEER és társai, 1988) szerint a szerszám ékhez hasonlóan behatol a munkadarabba és arról anyagot választ le (3.6. ábra). A forgácsoló szerszámok esetén egyértelműen meghatározható élgeometriáról csak a szabályos élű szerszámok esetén lehet beszélni. Egy egyélű szerszám (esztergakés) főbb elemeit a 3.7. ábra szemlélteti.



3.7. ábra. Az egyélű szerszám főbb elemei

A lapok és az élek által bezárt szögértékeket a munkadarab, illetve a szerszám anyagától függően kell megállapítani, ezek irányértékeit táblázatokban foglalták össze. A homlokszög értéke pozitív, negatív, vagy nulla lehet (3.8. ábra).

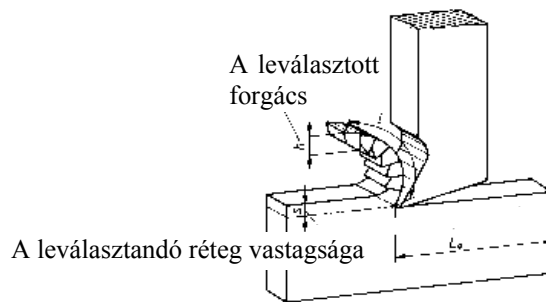


3.8. ábra. Különböző homlokszög kialakítások

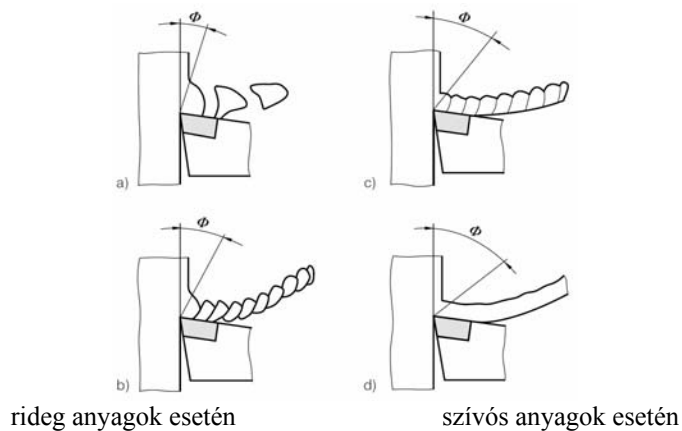
Az optimális forgácsoló él kialakításának várhatóan fontos szerepe lesz a megmunkálás során. Esztergálás során szokásos szerszám munkadarab keménységi arány csak gyémánt szerszám használatát vetíti előre. Kísérletként azonban más anyag alkalmazását sem szabad elvetni.

3.3.1. A forgácsképződés mechanizmusa

A forgácsképződést szabad forgácsolás vagy ortogonális forgácsolás esetén vizsgálják.



3.9. ábra. A munkadarab alakítása szabadforgácsolás esetén.



3.10. ábra. Különböző jellegzetes forgácsalakok (ERNST, 1938; ERNST és társa, 1941)

Ennek az a lényege, hogy csak egyetlen él forgácsol, a megmunkált felület azonos a forgácsolt felülettel (3.9. ábra).

A forgácsképződés menete eszerint úgy történik, hogy a szerszám előre haladva az anyagban, a homlokfelület előtti anyagrészt összetömöríti, majd amikor a feszültség egy síknak feltételezett felület (iránysík) mentén meghaladja az anyag nyírószilárdságát, a forgács elnyíródik, és elcsúszik a szerszám homlokfelületén. A 3.10. ábra szerint rideg anyagok forgácsolása során elemi vagy tört forgács keletkezik, míg szívós anyagok esetén inkább átmeneti és folyó forgács. A vizsgálataimban szereplő kerámia meglehetősen rideg anyagnak számít.

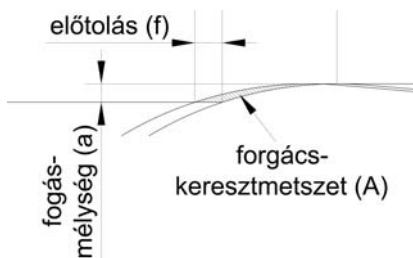
3.3.2. A forgács geometriai összefüggései

A megmunkálás során fellépő erők vizsgálatához elengedhetetlen a forgácskeresztmetszet pontos ismerete. FARKAS (2008) a nagy pontosságú keménysztergálás vizsgálatainál alkalmazott wiper lapka (YUSOF és társai, 2008) forgácskeresztmetszete helyett az érintkezési ívhosszt (s_k) határozta meg. Itt használta fel azt a tapasztalati feltételezést, hogy a forgácsolóerő (F) és a kontakt ívhossz közt függvénykapcsolat állapítható meg ($F = f(s_k)$). A kerámiák szélsőséges forgácsolási viszonyai, kis fogásmélység (0,01 – 0,05 mm), kis előtolás (0,01 – 0,05 mm/ford) valamint a használt lapkák élgeometriája, a csúcscsúgár miatt a forgács keresztmetszet egyértelmű meghatározása geometriai összefüggésekkel bonyolult (3.11. ábra).



3.11. ábra. Szerszám csúcscsúgár menti érintkezése

Ezért a forgácskeresztmetszet meghatározását számítógépes programmal végeztem el. A forgácskeresztmetszetet a 3.12. ábra szemlélteti.



3.12. ábra. A kialakuló forgácskeresztmetszet

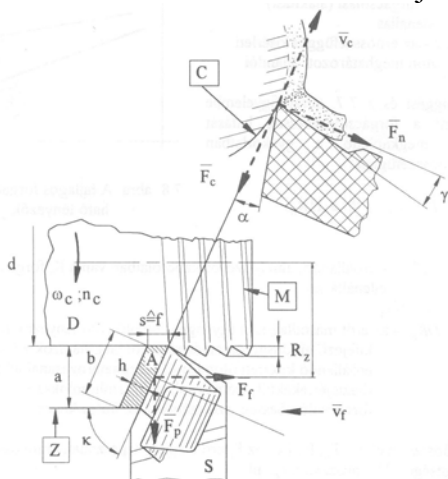
A vizsgálatok alatt alkalmazott fogásmélység és az előtolásokhoz tartozó forgácskeresztmetszet értékeket a 3.3. táblázatban foglaltam össze. A számított értékekből kitűnik, hogy ilyen kis fogásmélység és előtolás esetén nincs számottevő eltérés az egyszerűsített módszerrel történő számításhoz ($A_c = f \cdot a$) viszonyítva.

3.3. táblázat. Forgácskeresztmetszetek szoftveres és egyszerűsített számítással

f [mm/ford]	a [mm]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
0,01		0,999	1,999	2,999	3,999	4,999
		1	2	3	4	5
0,02		1,9917	3,9917	5,9917	7,9917	9,9917
		2	4	6	8	10
0,03		2,9719	5,9719	8,9719	11,9719	14,9719
		3	6	9	12	15
0,04		3,933	7,933	11,933	15,933	19,933
		4	8	12	16	20
0,05		4,8697	9,8697	14,8697	19,8697	24,8697
		5	10	15	20	25
Forgácskeresztmetszet (A_c) szoftveres számítással [$\cdot 10^{-4}$ mm ²]		→				
Egyszerűsített számítással ($A = f \cdot a$) [$\cdot 10^{-4}$ mm ²]		→				

3.3.3. Forgácsoló erők

Az anyag képlékeny alakváltozásához, töréséhez, átrendezéséhez, a mozgásokhoz erőkre van szükség, amelyek a szerszám és a munkadarab között alakulnak ki és illetve az erőlánc rajta keresztül záródik.



3.13. ábra. Forgácsolási modell általános vázlata [HORVÁTH – MARKOS, 1995]

A 3.13. ábra az úgynevezett kötött forgácsolásra mutatja a mozgás- és erőviszonyokat, ahol: F_c - forgácsolóerő; F_n - normál, vagy nyomóerő; F_f - előtolóerő; F_p - passzíverő, melyek közül egyszerű forgácsolásra csak az első kettő értelmezhető. Az így értelmezett erők a forgácsolóékre ható F eredő forgácsolási erő, megfelelő irányokban felbontott összetevői. Az erők ismerete a rendszer elemeinek terhelése, valamint a gépteljesítmény meghatározásához szükségesek (az utóbbihoz csak F_c) (HORVÁTH és társa, 1995).

A fajlagos forgácsolóerő igen sok tényezőtől függ, ugyanúgy, mint az alakváltozási tényező, többek között a forgácsolási sebességtől és a forgácsvastagságtól, független viszont a b forgács szélességtől:

$$k_c = \frac{k_1}{h^{x_k} v_c^{z_k}}$$

ahol: k_1 - forgácsolási (alakítási) ellenállás [N/mm^2]
 x_k, z_k - az erőösszefüggés kísérleti úton meghatározott állandói

A k_c összefüggést és a 3.13. ábrát figyelembe véve, valamint a forgácsoló sebesség hatását elhanyagolva, a gyakorlatban használatos erő összefüggése:

$$F_c = C_F \cdot f^{x_F} \cdot a \cdot \Pi K_{iF}$$

ahol: C_F - erőállandó, amely szoros kapcsolatban van a k_1 forgácsolási ellenállással
 x_F - $1-x_k$
 ΠK_{iF} - az erőt másodlagosan (gyengén) befolyásoló tényezők hatását kifejező módosító paraméterek szorzata, ha azok a C_F erőállandó kísérleti úton történt meghatározásánál alkalmazott (bázis) értékektől eltérnek, pl. szerszámhomlokszög; forgácsolósebesség; szerszámkopás; hűtés-kenés.

Az általános forgácsolóerő összefüggés szerint:

$$F_c = C_F \cdot f^x \cdot a^y \cdot v_c^z$$

ahol: C_F - erőállandó
 x - előtolás hatványkitevője
 y - fogásmélység hatványkitevője
 z - forgácsoló sebesség hatványkitevője

3.4. Forgácsolási vizsgálatok

Esztergálás során a főmozgás a munkadarab forgó mozgása, a mellék mozgások pedig az esztergakés alkotó irányú előtoló és a sugárirányú irányú mozgása (3.14. ábra). A munkadarab fordulatszámával állítottam be a forgácsoló sebesség értékét.



3.14. ábra. Forgácsoló mozgások

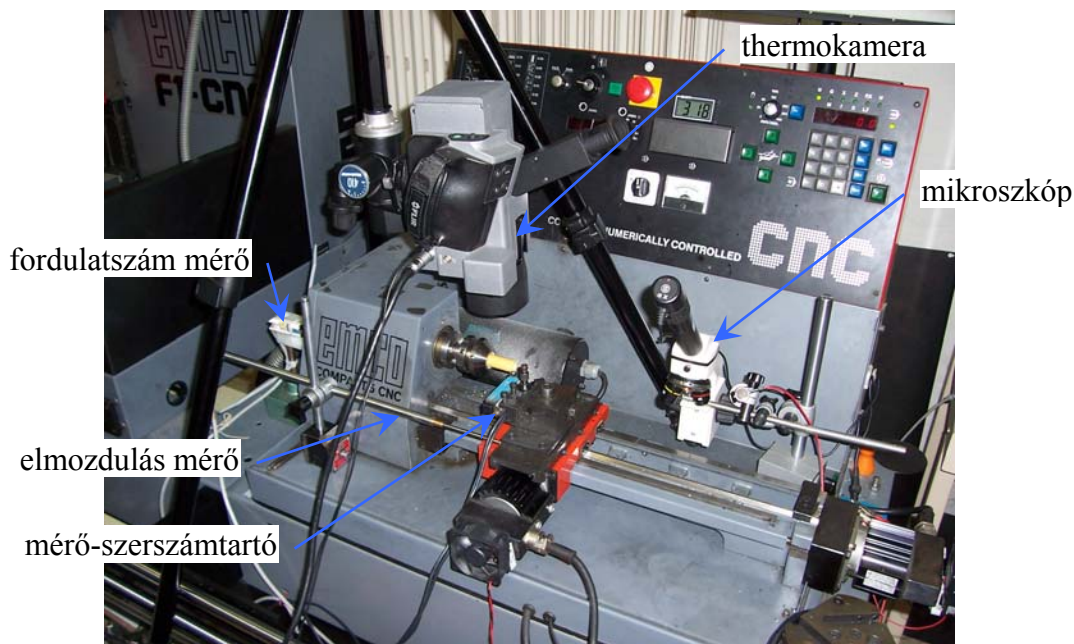
A forgácsoló erők meghatározásához célszerű az aktív erők egyidejű mérését végző rendszert kialakítani.

A forgácsoló erő vizsgáló berendezés felépítése

A forgácsolási vizsgálatokhoz használt berendezés EMCO COMPACT 5 CNC esztergagép. A következő ábrán (3.15.) a berendezés és a rászerezelt mérő-érzékelők láthatók.

A berendezés főbb műszaki adatai:

- Fordulatszám tartomány: 50 – 3500 1/min.
- Előtolás: 5 – 400 mm/perc vagy 0,01 – 1 mm/ford.
- Legnagyobb befogható átmérő: $\varnothing 100$ mm.
- Maximális befogható hossz szegnyereggel: 250 mm.



3.15. ábra. CNC esztergára felszerelt mérőberendezések

A főorsót fordulatszám szabályozó egyenáramú villamos motor ékszíjhajtáson keresztül hajtja meg. A fogásvétel- és előtolás irányú mozgásokat léptetőmotorok biztosítják. Fogazott szíj áttételen keresztül hajtják meg a golyós orsókat, amely a golyós anyákon keresztül mozgatja a hossz szánt és a keresztzánt. A munkadarab befogása a megfelelő központosság miatt ER20-as patronnal történt.

A vizsgálatokhoz használt vezérlő parancsoknál figyelembe kell venni, hogy a szerszámgép programjában minden értéket század milliméterben kell megadni. Ez alól kivétel az f érték, ahol 1 ezredmilliméter/fordulat a megadási mód.

3.5. Forgácsolásnál mért és számított értékek

A vizsgálatok során különböző forgácsolási jellemzőket állítottam be. Előzetes mérések alapján megállapítottam, hogy a fogásmélységet 0,01 és 0,05 mm között kell megválasztani, a fordulatonkénti előtolást pedig 0,01 és 0,05 mm/fordulat közt. Ilyen vizsgálati paraméterek mellett a szerszám éle rögtön nem töredezett ki. A forgácsolási sebesség közelítő értékére is végeztem előzetes méréseket, ez általam 50 m/min körülire adódott.

Beállított jellemzők:

forgácsoló sebesség,	v_c	[m/min]
előtolás,	f	[mm/fordulat]
fogásmélység,	a	[mm]

Mért jellemzők:

főforgácsoló erő,	F_c	[N]
előtolás irányú forgácsoló erő,	F_f	[N]
fordulatszám,	n	[1/perc]
elmozdulás,	s	[mm]

hőhatás övezet, felület,	hőkamera mikroszkóp
-----------------------------	------------------------

Számított jellemzők:

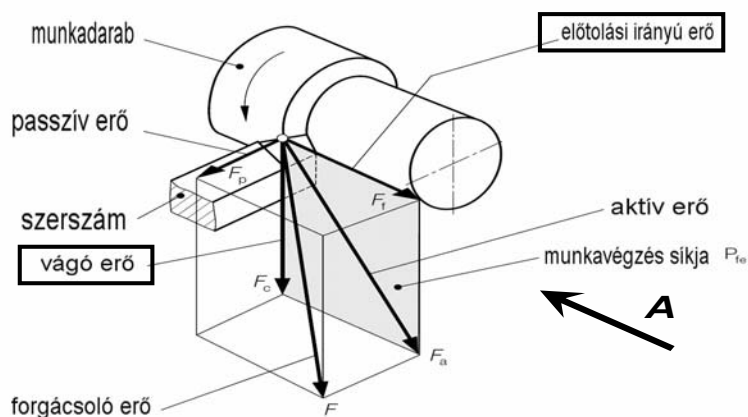
aktív forgácsoló erő nagysága:

$$F_a = \sqrt{F_c^2 + F_f^2}$$

- F_c , főforgácsoló erő [N]
- F_f , előtolás irányú erő [N]

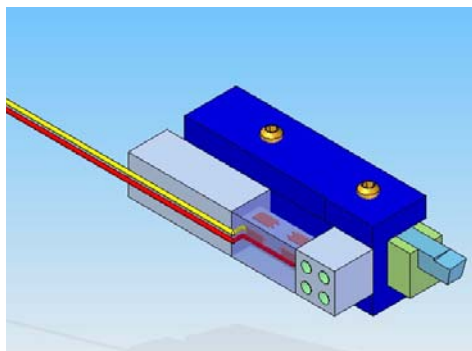
3.5.1. Kétkomponensű erőmérő rendszer

A forgácsoló erő összetevőit a 3.16. ábra mutatja.



3.16. ábra. Forgácsolás erőösszetevői (ISO 3002/4, DIN 6584)

A forgácsoló erő tengelyirányú és érintő irányú komponensének mérésére a késtartó és a késszár között kialakított saját fejlesztésű és gyártású ellenállásos erőmérő-szerszámtartót alkalmaztam. A mérő-szerszámtartó 3D-s modellje a 3.17. ábrán látható.



3.17. ábra. Mérő-szerszámtartó modellje

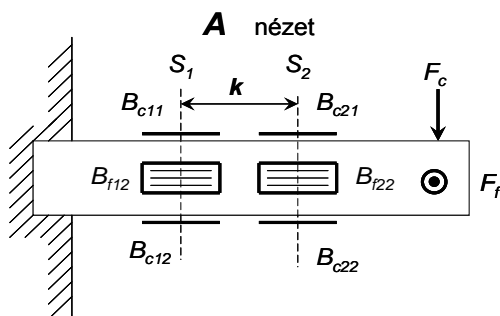
Az elkészült tartót mutatom be a következő képen (3.18. ábra). Ebben a kialakításban az előtolás irányú erő (F_f) és a vágó erő (F_c) mérését teszi lehetővé.



3.18. ábra. Az elkészült mérő-szerszámtartó fényképe a befogott tartóval

A kétkomponensű erőmérő működése a 3.19. ábra alapján röviden a következő. Az F_c erő által az S_1 síkban létrehozott hajlító nyomatékkal egyenesen arányos a B_{c11} és B_{c12} nyúlásmérő bélyeges félhíd kimenő (villamos) feszültsége. Hasonlóképpen az F_c erő által az S_2 síkban létrehozott hajlító nyomatékkal arányos a B_{c21} és B_{c22} nyúlásmérő bélyeges félhíd kimenő jele. A két feszültség nem egyenlő, mivel az S_1 síkban nagyobb az erő hajlító nyomatéka, mint az S_2 síkban. Ha a két félhidat egy teljes híddá egészítjük ki úgy, hogy a két feszültség kivonódjon, akkor a teljes híd kimenő feszültsége a két hajlító nyomaték különbségétől, azaz csak a $(F_c * k)$ -től függ. Mivel a k állandó, ezért a kimenőjel az F_c erővel lesz arányos, és nem függ az erő hatásvonalának a befogástól mért távolságától. Értelemszerűen az F_f erő mérése a B_{f11} , B_{f12} , B_{f21} , B_{f22} nyúlásmérő

ellenállásokból kialakított teljes hidas erőérzékelővel az előzőekkel teljesen hasonlóan történik.

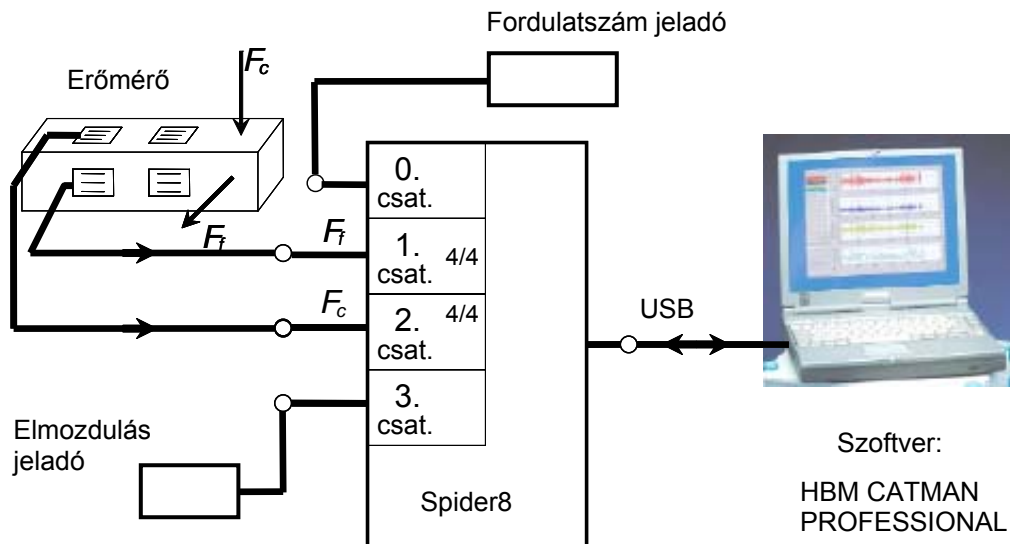


3.19. ábra. A mérő-szerszámtartó vázlatja

A KYOWA gyártmányú fólia nyúlásmérő típusa: KFG-1-120-C1-11. A bélyeg mérőhossza 1 mm, a hordozó mérete: 4,8 mm x 2,4 mm, ellenállása: 120 Ω, a nagyítási tényezője: 2,1. A bélyegek acélra önkompenzáltak, továbbá a nyúlásmérő bélyeges teljeshidas konfiguráció már önmagában is hőkompenzálást valósít meg, ezért az érzékelő eredő hőfokfüggése igen jó.

Az erőmérő kalibrálását súlyterheléssel végeztem el.

3.5.2. Mérőrendszer kapcsolása



3.20. ábra. A mérőrendszer felépítése

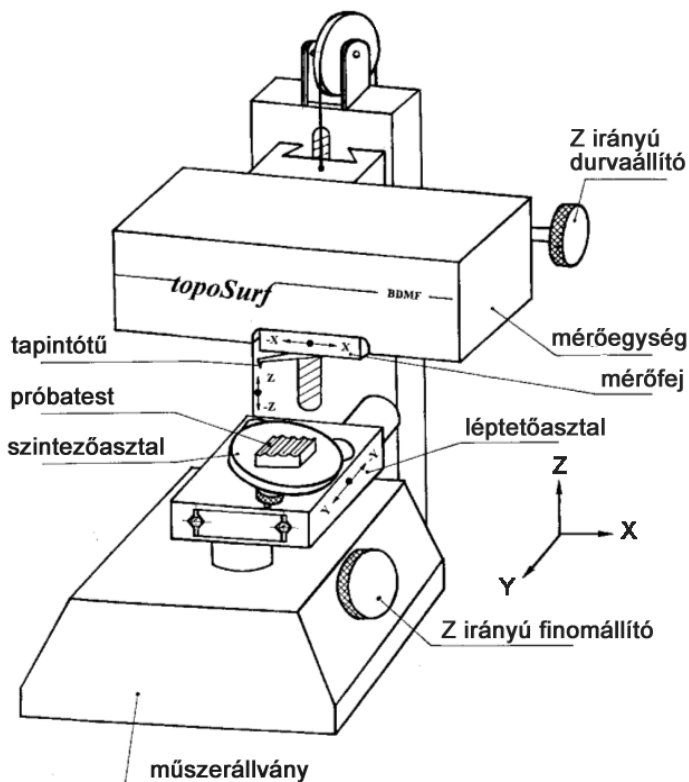
A mérésekhez a Spider 8 mérőerősítőt használtam. Négy csatornát kötöttem be. A 0 csatornára csatlakoztattam a fordulatszám jeladót, az 1-es és a 2-es csatornákon mértem a tangenciális és az előtolás irányú erőket. A 3. csatorna a kés elmozdulásának mérésre a rugó visszatérítésű inductív elmozdulás távadó szolgált.

A számítógépen a Catman program segítette a mérést. Minden csatlakoztatott műszer beállítását és kalibrálását elvégeztem, valamint a mérés indítása előtt nulláztam az értékeket.

3.6. Felület topográfiai vizsgálatok

A felületi érdességet és mikrogeometriát mérő rendszerek az utóbbi évek alatt óriási fejlődésen mentek keresztül. Az egy-két jellemzőt (R_a , R_z) mérő 2D-s analóg műszereket felváltották a számítógépes kiértékelést, és a 3D-s megjelenítést nyújtó nagy pontosságú, vezérelt mérő rendszerek (Palásti és társai 2001).

Az Óbudai Egyetem Gépészmérnöki Karán található berendezés vázlatos látszati képe a 3.21. ábrán látható. A topografikus (3D-s) felületérdességmérő berendezés mechanikai érintkezés útján, gyémánttűvel végzett profilletapogatás módszerével dolgozik.



3.21. ábra. A topoSurf, 3D-s érdességmérő műszer vázlatos látszati képe

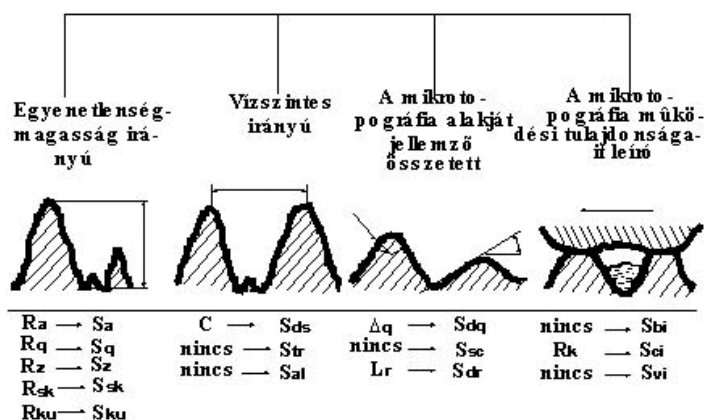
A megmunkált felületekkel szemben támasztott növekvő követelmények miatt van szükség a felületi mikrotopográfia sokoldalú kiértékelésére, amely a mintavételi felületről gyűjtött adatok feldolgozásával történő felületjellemzést jelenti.

A 3D-s érdességmérő műszer beállításai:

Gép típusa:	Mahr Perthometer Concept
Használt tapintó:	FRW-750
Vizsgált felület nagysága (LTxLY):	2mm x 2mm
Felvett profilok száma (NY):	351
Egy profilon belül felvett pontok száma (NX):	4000
Vontatási sebesség (VT):	0,5 mm/s

A felületek háromdimenziós feldolgozásakor az "érdesség" helyett a felületi mikrogeometria átfogóbb jellemzésére utaló mikrotopográfia elnevezést alkalmazzuk. Az egyes paraméterek betűjelére a kétdimenziós jellemzőknél használt R (roughness) helyett a térbeliségre utaló S (surface) használata javasolt, a hagyományos, tényleges geometriai tartalomra utaló alsó index feltüntetésével (pl. S_a , S_q , S_z , stb.).

Az EU (STOUT és társai 1994) ajánlás a bevezetésre javasolt háromdimenziós paramétereket négy csoportba sorolja (3.22. ábra).



3.22. ábra. A 3D-s mikrotopográfiai paraméterek és a hagyományos 2D-s megfelelőjük (PALASTI és társai, 2001)

A háromdimenziós topográfiai jellemzők csoportosítása közül a méréseim és az értékeléseim során használt amplitúdó- (vagy egyenetlenségmagasság-) irányú paramétereket emelem ki:

- Felületi közepsíktól való eltérések számtani középértéke, S_a . 2D-s megfelelője: R_a .
- Felületi közepsíktól való eltérések geometriai középértéke S_q . 2D-s megfelelője: R_q .
- A felület tízpont magassága, S_z . 2D-s megfelelője az R_z .
- A felületi topográfia magasság-eloszlásának aszimmetriája, S_{sk} . 2D-s megfelelője: R_{sk} .

- A felületi topográfia magasság-eloszlásának hegyessége, S_{ku} . 2D-s megfelelője: R_{ku} .

A vizsgálatokkal a köszörült valamint az eltérő forgácsolási paraméterekkel megmunkált kerámia felületekről készítettem felvételeket. A felületekről különböző 3D-s mikrotopográfiai jellemzőket határoztam meg. A 3D-s paraméterek jelentős része a 2D-ben jól ismert jellemzők egy dimenzióval magasabb szintre helyezésével származtatható. Megjelentek azonban újabb mérőszámok is. A következőkben az előbb említett 3D-s paraméterek összefüggéseit és értelmezésüket ismertetem (PALÁSTI, 1983; PALÁSTI és társai, 2001).

A felület középsíkjától való eltérések számtani középértéke:

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |\eta(x_i, y_j)|$$

Matematikailag a mintavételezési pontok középsík körüli szórását adja. A legismertebb paraméterek egyike; értéke nagymértékben függ a mintavételezési pontok számától, a letapogatott felület nagyságától.

A felületi középsíktól való geometriai eltérések középértéke:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^2(x_i, y_j)}$$

Szintén középsík körüli szórást mér, de lényegesen érzékenyebb a nagy kiugrásokra, mint az S_a . Ezen két paraméter egymáshoz való viszonya utal a felület tagoltságára.

A felület tíz-pont magassága:

$$S_z = \frac{\sum_{j=1}^5 |\eta_{pj}| + \sum_{i=1}^5 |\eta_{ri}|}{5}$$

Az öt legmagasabb csúcs és az öt legmélyebb völgy távolságának középértéke a középsíktól mérve. Információtartalma meglehetősen csekély, hiszen szinte minden felületen akadnak nagy kiugrások, és hirtelen bemélyedések. Értéke mégis fontos lehet, hiszen éppen ezen paraméter alapján tudjuk eldönteni, hogy vannak-e nagy kiugrások a felületen. Azonos felületről különböző helyeken végzett mérések esetén az azonos S_z érték jelentheti a felület egyenletességét.

A felületi topográfia magasságeloszlásának asszimetriája:

$$S_{sk} = \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^3(x_i, y_j)$$

Ez a mérőszám a sűrűségfüggvény asszimetriáját jellemzi, és utal a felület típusára. Ha értéke nagy negatív szám, a felület „telt” jellegű, néhány éles völgytel tarkítva, ellenkező esetben „üres” profilokról van szó, tehát néhány kiugró csúcs jellemzi a felületet.

A felületi topográfia magasságeloszlásának hegyessége:

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^4(x_i, y_j)$$

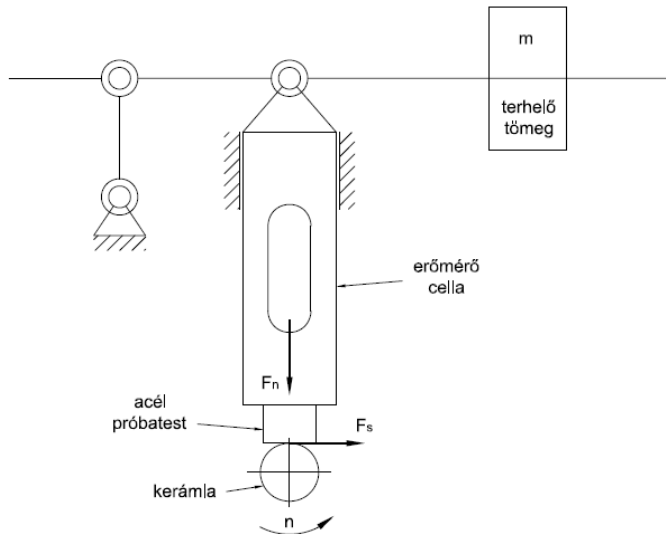
Ez a paraméter a magasságeloszlás csúcosságát jelzi. Utal arra, hogy mennyire egyenletes az adott felület. Nagy értéke azt jelenti, hogy a mérési pontok közül igen sok esik egy adott magasságértékhez, tehát a felület nagy része egyenletes. Természetesen ez nem zárja ki kiugróan nagy csúcsok illetve völgyek létét.

3.7. Súrlódási vizsgálatok

A műszaki gyakorlatban ma a kerámiák felhasználása kiterjed a siklócsapágyak területére is. Gyakran gyártanak kerámiából siklócsapágy perselyeket és különböző helyeken alkalmazzák azokat. Működésük egyaránt elképzelhető száraz körülmények közt vagy vízkenéssel ellátott szivattyúházakban. Ezért az eredeti köszörült és a különböző forgácsolási paraméterekkel megmunkált kerámia felületeken acél ellenfelülettel súrlódási vizsgálatokat is végeztem. Ehhez készítettem egy vizsgáló berendezést. Elrendezési vázlatát a 3.27. ábra szemlélteti.

A vizsgálat elve, hogy a forgó kerámia palástfelületére rányomom 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 a mértem az acél próbatest kopását és deformációját (függőleges helyzet méretváltozása, mm-ben kifejezve). A berendezésen a hajtó motor tengelyére elkészítettem a kerámia felfogó tuskét. Erre rögzítettem a kerámia próbatestet. A felette elhelyezett erőmérő cella végére csavarral szorítottam a köszörült acél ellenfelületet. A terhelést a rudazaton elcsúsztatható tömegekkel állítottam be. A kerületi sebesség a kerámiát forgató motor fordulatszámával változtatható.

A mérési rendszer (3.23. ábra) száraz súrlódást modellez, külön kenést nem használtam, az egymáson elmozduló felületeket a mérés előtt denaturált szesszel tisztítottam le.



3.23. ábra. Súrlódási vizsgálat működési vázlata

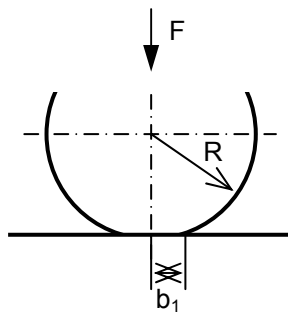
A 3.24. képen a súrlódást vizsgáló berendezés egy része, valamint a kerámia és az acél próbatestek láthatók.



3.24. ábra. A súrlódási vizsgálatához befogott kerámia és acél próbatestek

3.7.1. Az érintkezési (Hertz) feszültség összefüggése

A henger-sík érintkezésénél alkalmazott Hertz feszültség összefüggése a 3.25. ábrán vázolt henger-sík modell felvételével határoztam meg.



3.25. ábra. Henger-sík modell (VAN BEEK, 2006)

Az érintkezési feszültség legnagyobb értéke henger-sík érintkezésének feltételezésével Hertz elmélete szerint (VAN BEEK, 2006):

$$\sigma_{\max} = \frac{4}{\pi} \cdot p_m = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F}{A} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F}{2 \cdot b_1 \cdot l} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot b_1 \cdot l} \quad [\text{N/mm}^2]$$

- ahol: p_m - az átlagos érintkezési nyomás [N/mm²]
 F - a terhelő erő [N/mm]
 A - az érintkezési felület [mm²]
 l - az érintkezési felület hossza [mm]
 b_1 - az érintkezési felület félszélessége [mm]

Az érintkezési felület fél szélessége Hertz számításai alapján:

$$b_1 = \sqrt{\frac{8 \cdot F \cdot R}{\pi \cdot E' \cdot l}} \quad [\text{mm}]$$

- ahol: R - görbületi sugár [mm]
 E' - egyenértékű rugalmassági modulus [MPa]

Az egyenértékű rugalmassági modulus (E'):

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{2 \cdot E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{2 \cdot E_2} \quad [1/\text{MPa}]$$

- ahol: ν_1 - a kerámia próbatest Poisson tényezője
 E_1 - a kerámia próbatest rugalmassági modulusa [MPa]
 ν_2 - az acél próbatest Poisson tényezője
 E_2 - az acél próbatest rugalmassági modulusa [MPa]

A súrlódás vizsgálatokban szereplő kerámia és acél próbatestek érintkezésénél számított Hertz feszültség értékét a 3.4. táblázatban foglaltam össze. A számításhoz a következő paramétereket vettem figyelembe:

- kerámia: $E_1 = 210 \text{ GPa}$, $\nu_1 = 0,3$
 acél: $E_2 = 210 \text{ GPa}$, $\nu_2 = 0,3$
 sugár: $R = 8 \text{ mm}$
 terhelés: $F = 50 \text{ N}$
 vizsgálati sebesség: $v_k = 0,23 \text{ m/s}$

3.4. táblázat. A számított értékek

Egyenértékű rugalmassági modulus (E') [MPa]	Az érintkezési felület fél szélessége (b_1) [mm]	Érintkezési maximális feszültség Hertz szerint (σ_{\max}) [MPa]
230769	0,054	391,2

A vizsgálat során a kopás növekedésével a kezdeti pillanatban vonal menti terhelésből felületi terhelés alakul ki.

3.7.2. Súrlódási vizsgálatok paraméterei

A vizsgálatok során a különböző forgácsolási paraméterekkel megmunkált kerámia felületen mértem az acél ellenfelület közötti súrlódási tényezőt. A beállított paramétereknél figyelembe vettem a mérnöki gyakorlati alkalmazások feltételeit. Általános feltételek közt a kerámia siklócsapágyak csúszási sebessége 1~5 m/s. A kerámia próbatest átmérője 16 mm, az acél ellendarab szélessége 1,5 mm. Az érintkezési geometriából adódik a vonal menti érintkezés, ahol a Hertz feszültség értékét a szilárdsági és geometriai adatokat is figyelembe véve meghatároztam.

Beállított jellemzők:

csúszási sebesség,	v_k	[m/s]
terhelés,	F_n	[N]

Mért jellemzők:

súrlódó erő,	F_s	[N]
kopás,	w	[mm]

Számított jellemzők:

súrlódási tényező:

$$\mu = \frac{F_s}{F_N}$$

- F_s , súrlódó erő [N]
- F_N , normál irányú erő [N]

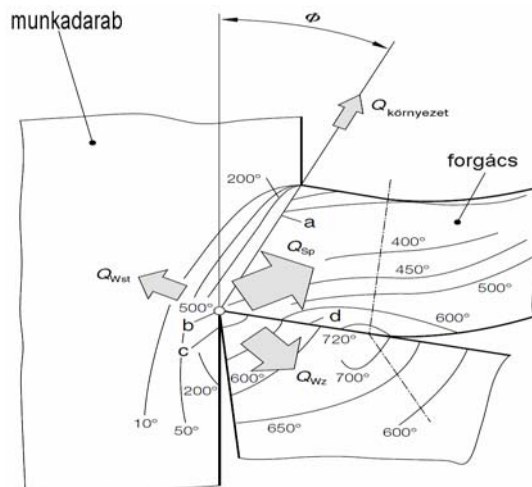
3.8. Hőkamerás kiegészítő vizsgálatok

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. A hőkamerát a 3.26. ábra mutatja.



3.26. ábra. A vizsgálatokhoz használt hőkamera

HASTINGS (1967), CHILDS (1971), LEOPOLD (1980), LEOPOLD (2000) szerint a forgácsolás során egyrészt a képlékeny alakváltozás miatt, másrészt a súrlódások (szerszám, munkadarab, forgács) miatt jelentős hő keletkezik. Ez visszahat a helyes technológiai paraméterek meghatározásán túl a megmunkálás további elemeire (szerszám, szerszámgép, stb.). Az alábbiakban látható (3.27. ábra) TÖNSHOFF és társai (1997) szerint milyen hő és energia viszonyok alakulnak ki esztergálás során.



3.27. ábra. Energiavándorlás és hőeloszlás alakulása munkadarab, forgács és szerszám között acél esztergálása során (szerszámanyag: P 20 keményfém, munkadarab: acél $k_f = 850 \text{ N/mm}^2$, forgácsolási sebesség $v_c = 60 \text{ m/min}$, fogásmélység $a = 0,32 \text{ mm}$, homlokszög $\gamma = 10^\circ$)

- a nyírási sík
- b a forgácsolás környezete
- c súrlódási zóna a szerszám hátlapjának környezeténél
- d súrlódási zóna a szerszám homloklapi környezeténél

Tekintettel arra, hogy az általam megmunkálásra kiválasztott alapanyag jelentősen ridegebb, a belső súrlódásból eredő hő várhatóan kisebb mértékben jelentkezik. A szerszám-munkadarab közti súrlódás lesz várhatóan a legnagyobb.

4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

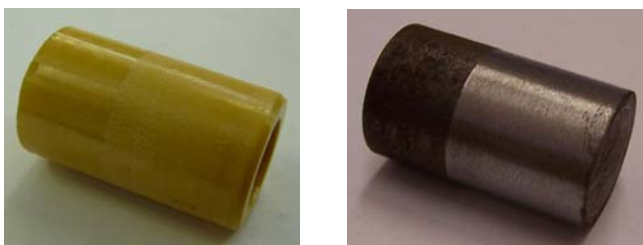
4.1. A forgácsolási vizsgálatok eredményei és értelmezésük

A vizsgálatok során mértem a fő- (F_c) és előtolás irányú (F_f) forgácsoló erő értékeit. A forgácsolási rendszerben beállított paramétereket a 4.1. táblázat tartalmazza. A mért főforgácsoló erő értékeiből matematikai statisztikai módszereket felhasználva meghatároztam a forgácsoló sebességet is figyelembe vevő, empirikus összefüggés (előtolás, fogásmélység, forgácsoló sebesség) hatványkitevőit.

4.1. 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		
Szerszámananyag	PCD / CBN		

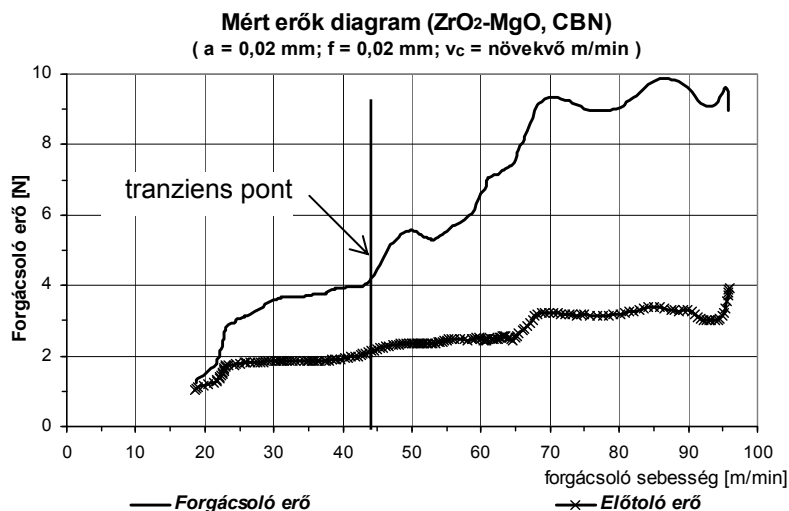
A 4.1. ábra egy forgácsolt kerámia és öntvény próbatestet szemléltet. A kerámia esetében jól látható a befogáshoz használt eredeti köszörült és a már esztergált felület. Öntvényeknél a befogott részt is esztergálással alakítottam ki.



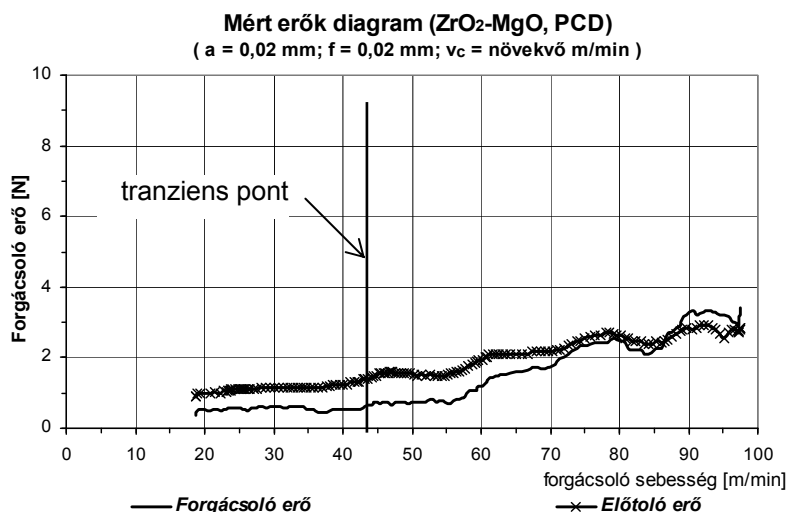
4.1. ábra. Forgácsolt kerámia és öntvény próbatestet

4.1.1. Kerámia fogácsolási eredményei

A 4.2. és a 4.3. ábra egyenletesen növekvő forgácsoló sebesség mellett, CBN és PCD 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.



4.2. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja
($v_c =$ változó m/min., $a = 0,02$ mm, $f = 0,02$ mm; kerámia: cirkóniumdioxid, szerszám: CBN)



4.3. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja
($v_c =$ változó m/min., $a = 0,02$ mm, $f = 0,02$ mm; kerámia: cirkóniumdioxid, szerszám: PCD)

A forgácsoló sebesség növelése során a referenciaként használt lemezgrafitos öntvényénél megfigyeltem egy határozottan jelentkező tranziens zónát. Ez a cirkónium-dioxid kerámiánál kisebb mértékben, de szintén megtalálható, a $v_c = 40 - 50$ m/min forgácsoló sebesség tartományban.

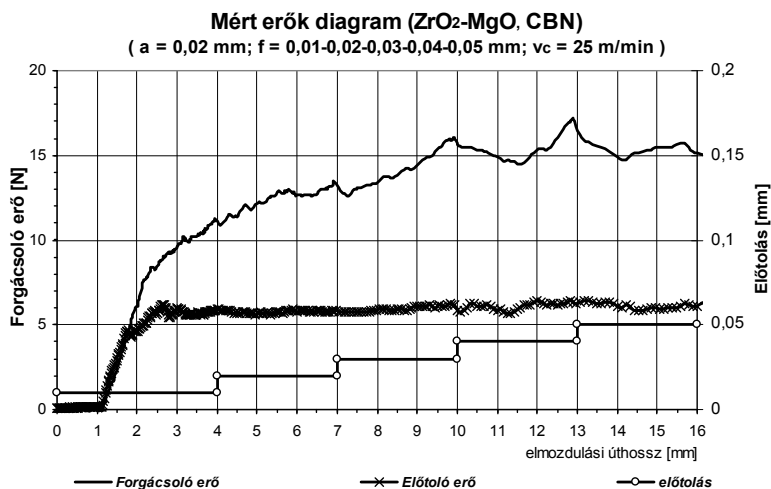
Láthatjuk, hogy a forgácsolás elején keletkező kis erők értéke nő, mindkét forgácsoló szerszám esetén. Azonban a köbös bórnitrid (CBN) szerszámnál a forgácsolási sebesség növelésével jelentősen növekedett a főforgácsolóerő értéke. A polikristályos gyémánt (PCD) szerszám esetében a növekedés csak alig 50 %-a a CBN szerszámnál kialakulnak. Ez a forgácsleválással, a szerszámkopással valamint a szerszám és a kerámia hővezetési tulajdonságaival magyarázható.

Az előtolás irányú erők nagysága megközelítőleg fele a főforgácsoló erő nagyságának CBN szerszámanyag esetében. A gyémánt szerszámmal az érték a forgácsoló erő mértékére adódott. Érdekes, hogy tendenciájában is hasonló jelleget mutat a kétféle szerszámnál a két erő.

A következő diagramon (4.4. ábra) ismét a forgácsoló erők változását mutatom be. A forgácsoló sebességet 25 m/perc értékre állítottam. A fogásmélység értéke a $a = 0,02$ 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. A 0,04 mm fogásmélységnél a főforgácsoló erő nagy mértékű ingadozása a forgácsolóél sérülésére enged következtetni. Ezt később a mikroszkópos felvételek igazolták.

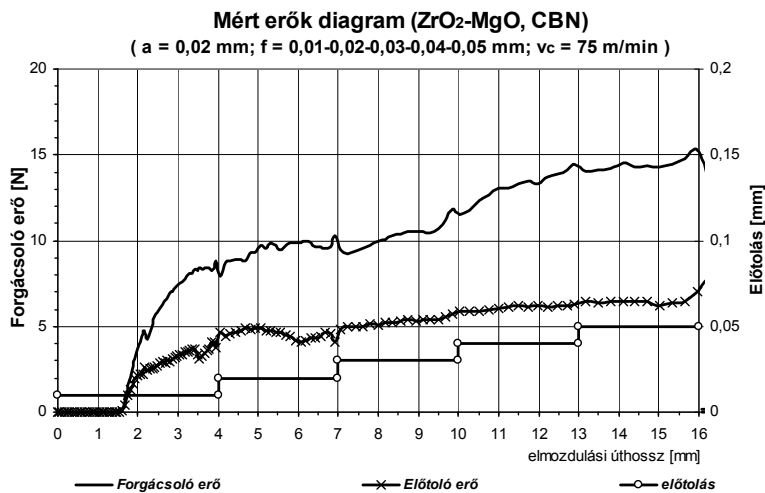
A kezdeti szakaszban az előtolás irányú erő felfutása jelentős. Az érintkezés első pontjában mind a kerámia, mind a szerszám környezeti hőmérsékleten van. A forgácsolás során jelentős hő fejlődik, és melegedés kezdődik. Az erő értékét ez a hőfejlődés egy ideig növeli, majd a diagramon is látható módon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



4.4. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

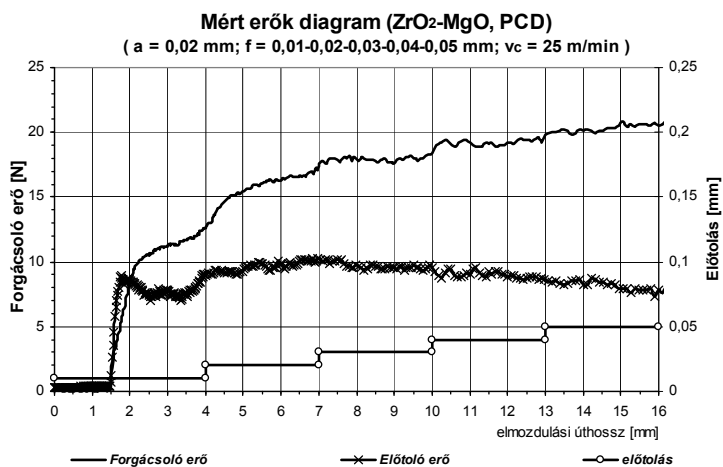
A következő 4.5. ábrán szintén a főforgácsoló erő változását mutatom be. Itt a forgácsoló sebességet már 75 m/perc értékre állítottam. A fogásmélység értéke a

= 0,02 mm. Az előtolás értékei $f = 0,01; -0,02; -0,03; -0,04; -0,05$ mm/fordulat. A szerszám anyaga köbös bórnitrid.



4.5. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

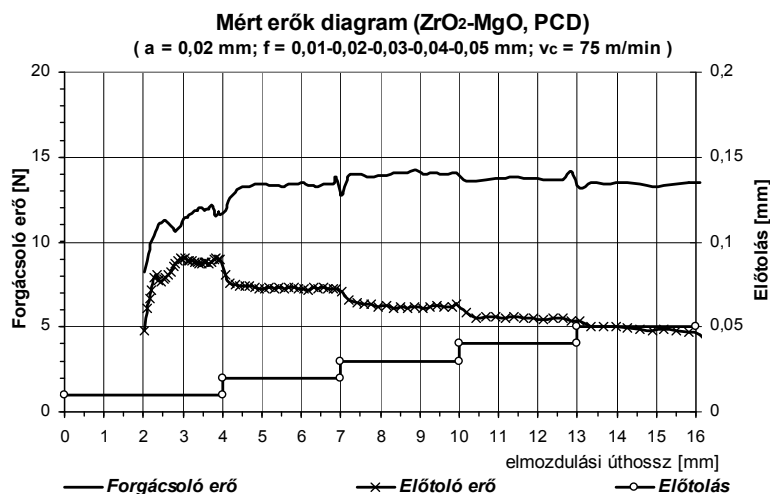
A forgácsoló erő hasonlóan alakul, mint az alacsonyabb megmunkálási sebesség esetén. Az előtoló erő az előző diagramnál beállt egy értékre, a magasabb forgácsolási sebességnél azonban folyamatos növekedést mutat.



4.6. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

Az előzőekkel megegyezően polikristályos gyémánt szerszám esetére is megvizsgáltam a főforgácsoló erő változását. A forgácsolási sebesség értéke 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 kőbős bórnitrid szerszámnál. A forgácsoló erő növekvő tendenciát mutat, míg az előtolás irányú erő beállt egy értékre, majd enyhe csökkenést mutatott.



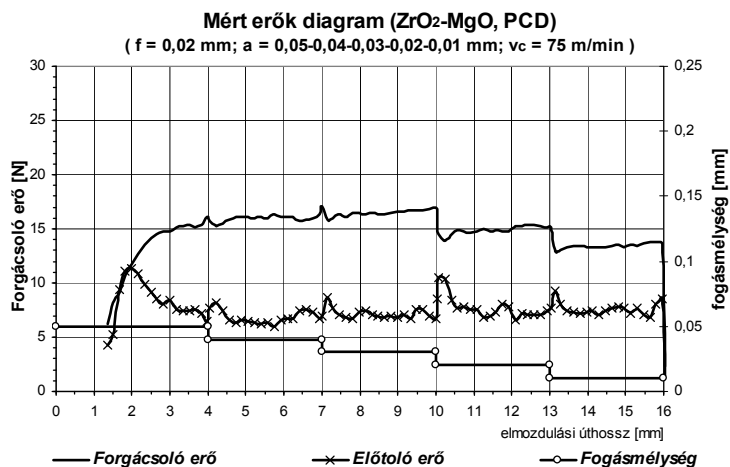
4.7. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A magasabb forgácsolási sebességnél 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 kitöredezettsége befolyásolja az előtoló erő ingadozását.

Az eddigi diagramok az előtolás változásának hatását szemléltették. A következőkben ismertetek néhány diagramot, melyeknél már a fogásmélység változtatásának hatását vizsgáltam a fő és előtolás irányú forgácsoló erőre vonatkozóan. A forgácsoló sebességet 25 m/min, valamint 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 $f = 0,02$ és $0,04$ mm/fordulat. A vizsgálatokat csak a kedvezőbb felületi jellemzőket adó PCD szerszámmal végeztem.

A diagramok egy része a 3. mellékletben található. A 4.8. ábra a főforgácsoló és az előtolás irányú erő változását mutatja, ami a fogásmélység változtatásának hatására jött létre. Megállapítható, hogy a fogásmélység változása 0,02 mm felett nem hat jelentős mértékben a főforgácsoló erő nagyságára. A magasabb forgácsoló sebességgel végzett megmunkálás esetén (75 m/perc), alacsonyabb főforgácsoló erő értékek adódtak.

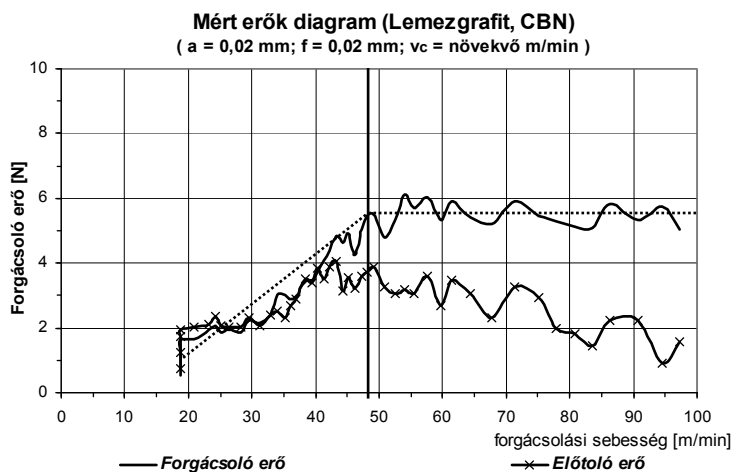
A kerámia forgácsolása esetén $v_c = 40-50$ m/min forgácsoló sebesség értéktartományban egy tranziens zóna adódik a forgácsoló erőre, amely előtt szerszámagyagtól függően különböző meredekségű lineárisan közelíthető szakasz van, míg azt követően a forgácsoló erő növekvő tendenciát mutat.



4.8. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

4.1.2. Lemezgrafitos öntvény forgácsolási eredményei

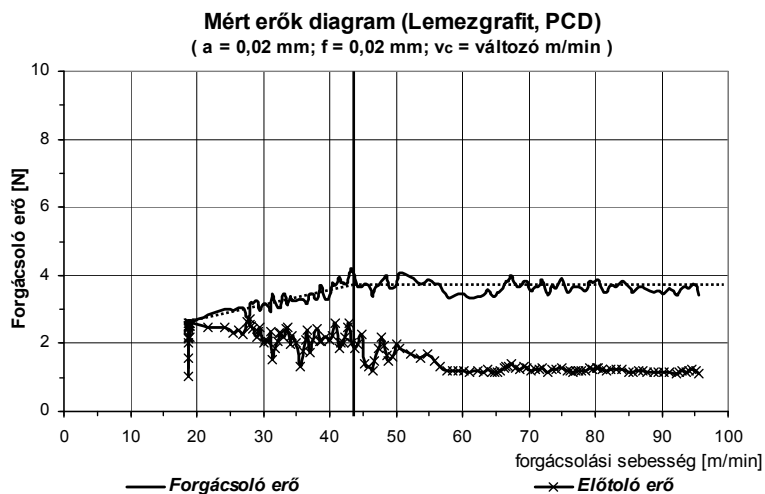
Mivel az irodalomban a kerámiákra nem találtam utalást a forgácsolási paraméterekre és jellemzőkre, ezért összehasonlítás céljából azonos beállításokkal lemezgrafitos (200-350 N/mm² szakítószilárdság) és gömbgrafitos öntvények (400-700 N/mm² szakítószilárdság) esetére is végeztem vizsgálatokat. Az alábbiakban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



4.9. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A referencia anyagként használt lemezgrafitos öntvény esetén is megfigyelhető egy tranzien্স zóna $v_c = 40-50$ m/min forgácsoló sebesség értéktartományban a forgácsoló erőre, amely előtt szerszámtól függően különböző

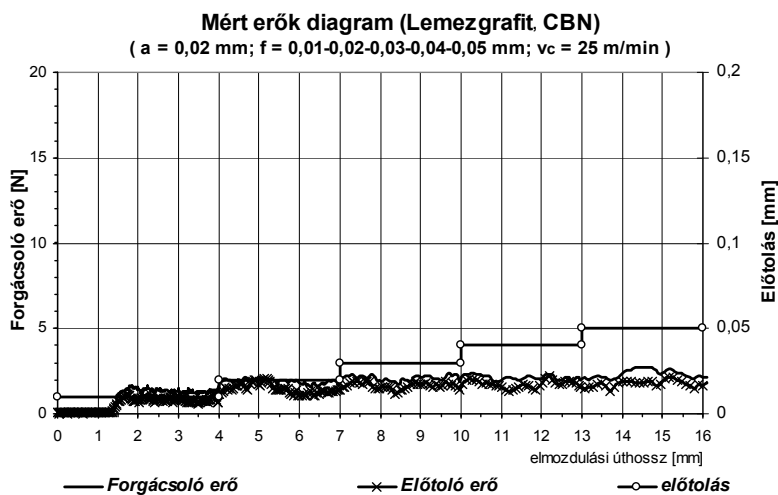
meredekségű lineárisan közelíthető emelkedő szakasz van, míg azt követően a forgácsoló erő állandó, vagy közel állandó értékre áll be.



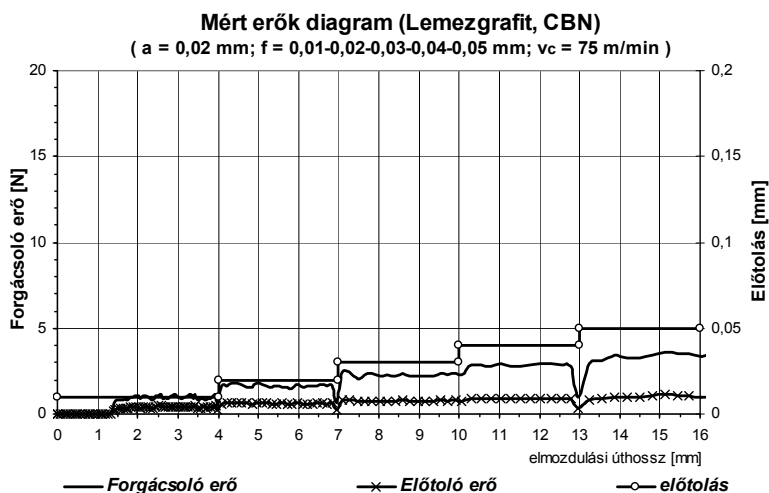
4.10. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

Az előző két diagrammot összevetve (4.9., 4.10. ábra) megállapítható egy egyértelmű hasonlóság, bár nem az a felvétési 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.

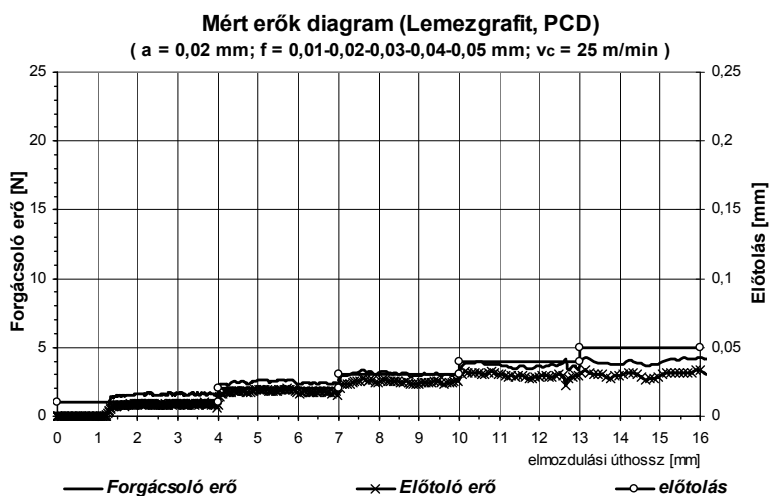


4.11. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja



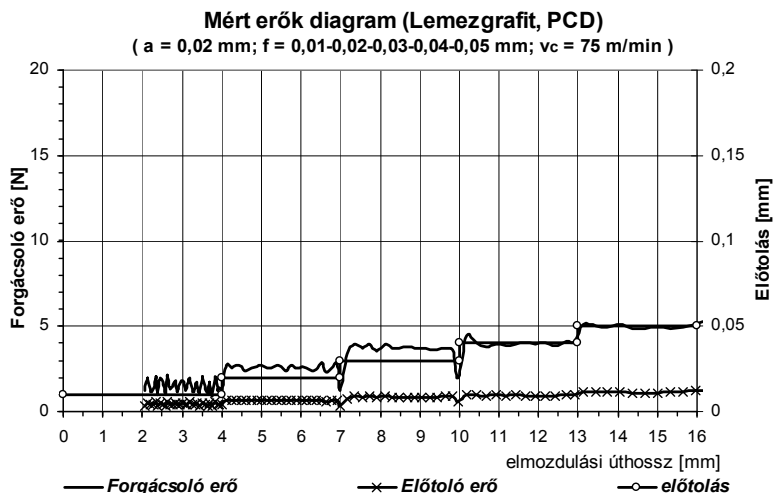
4.12. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A nagyobb ($v_c = 75$ m/min) forgácsolási sebességnél a forgácsoló erő enyhén emelkedő 4 N-ig. Ez volt a legnagyobb érték. Az előtolás irányú erő beállt egy közel állandó értékre (1 N).



4.13. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A polikristályos gyémánttal való megmunkálás során hasonlóan a CBN szerszámú megmunkáláshoz mind a forgácsoló erő, mind pedig az előtoló erő azonos tendenciájú. Értékük is megközelítőleg azonos.

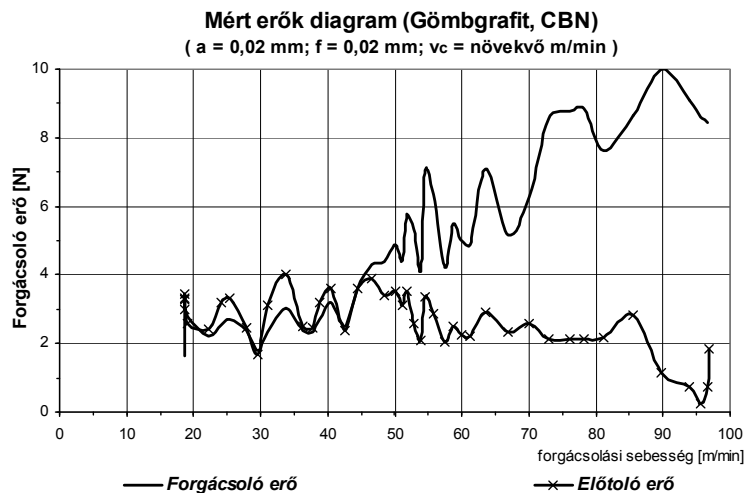


4.14. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A nagyobb forgácsolási sebességnél PCD szerszám esetén a forgácsoló erő az előtolás változásával párhuzamosan változik. Az előtolás irányú erő mindössze 20-25 % a forgácsoló erőnek.

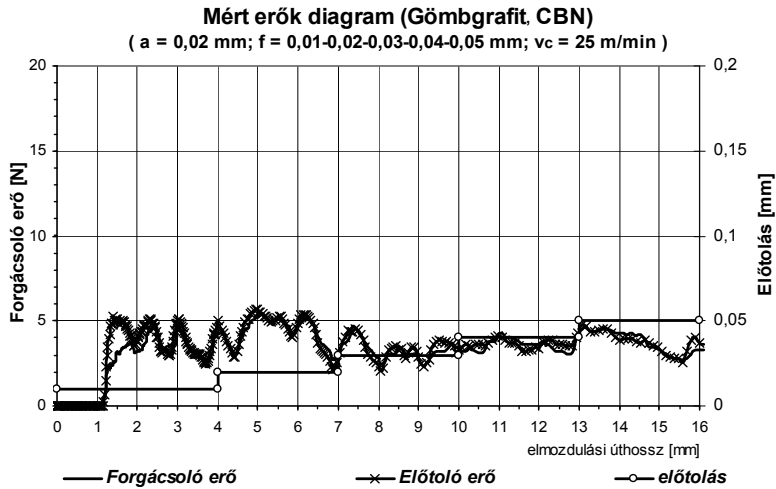
4.1.3. Gömbgrafitos öntvény forgácsolási eredményei

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



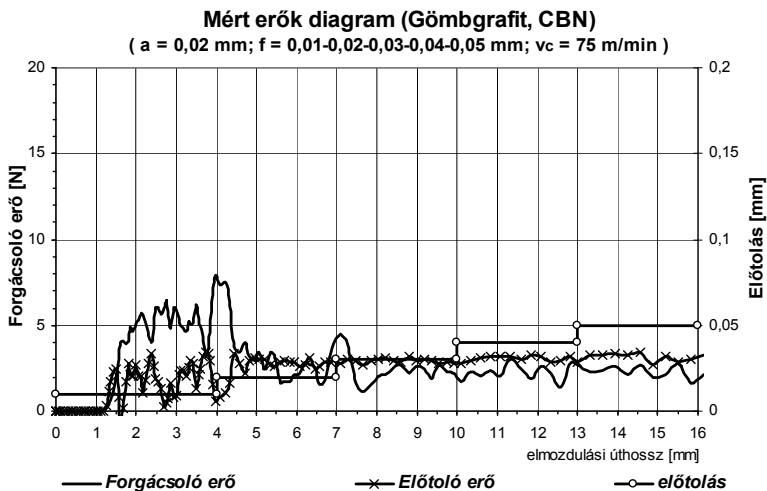
4.15. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A szívósságból adódóan a szerszámbefogó 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.



4.16. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

Az alacsonyabb ($v_c = 25$ m/min) forgácsolási sebesség esetén a forgácsoló erő és az előtoló erő szinte azonos értékű. 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.



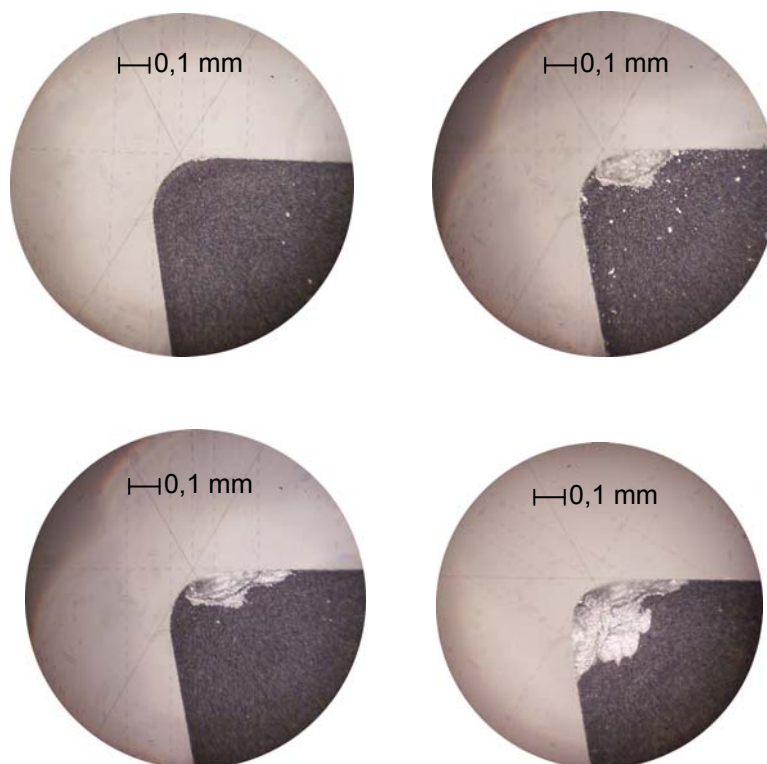
4.17. ábra. Fő és előtolás irányú erők diagramja

A nagyobb forgácsolási sebesség ($v_c = 75$ m/min) alkalmazásakor az erők nagysága és tendenciája az alacsonyabb sebességű vizsgálatokhoz közel azonosra adódott.

4.1.4. A forgácsoló szerszám élvizsgálati eredményei

Az eszterga lapkákról optikai mikroszkóppal felvételeket készítettem (4.18. ábra).

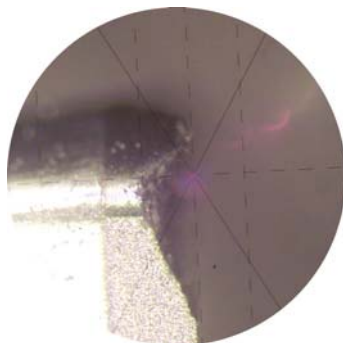
A szerszám élének sérülése látható az ábraszorozaton. A forgácsolás során a főforgácsoló él kis mértékben kitöredezett. Ez a kitörés az erődiagramokon is látható. Az első képen az eredeti polikristályos gyémánt lapka látható. A második képen már az élből kipattant egy darab, kráteres kitörés keletkezett. 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 forgácsolt felület minőségi mutatói nagy valószínűséggel rosszabbak, mint a még szabályos élgeometriával rendelkezőé.



4.18. ábra. Mikroszkópos felvételek, PCD szerszám a forgácsoló lapka eredeti, első kitörés és további kitörések

A mikroszkópos felvételek elkészítését jelentősen megnehezíti, hogy a forgácsolt felület valamint a lapkában keletkező kitöredezések felülete nem sík

hanem hengeres illetve kráteres. Így a hagyományos mikroszkópokon történő fókuszálás nem minden esetben vezetett eredményre.



4.19. ábra. PCD szerszám élkitörése másik irányból

Mind a forgácsolandó anyag, mind a szerszámanyag nagyon rideg, ezért a szerszámkatasztrófa, illetve az alkatrész felületén kagylós kitorpedezések könnyen kialakulhatnak.

4.2. Forgácsoló erő meghatározása a forgácsolási paraméterek függvényében

A vizsgálatok során a különböző forgácsolási paramétereket előzetes mérések alapján állapítottam meg. A fogásmélységet és a fordulatonkénti előtolást 0,01 és 0,05 mm között választottam. Ilyen vizsgálati paraméterek mellett a szerszám éle nem töredezett ki. A forgácsolási sebesség értékére is végeztem előzetes méréseket, azt tapasztaltam, hogy megközelítőleg 50 m/min körül adódott az ideális vágósebesség.

Beállított jellemzők:

- forgácsoló sebesség, v_c [m/min]
- előtolás, f [mm/fordulat]
- fogásmélység, a [mm]

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 célt az előbbi egyenlet kerámiára történő használhatóságának eldöntése, és a szükséges paraméterek meghatározása többváltozós lineáris regresszióval.

4.2.1. A kísérletek tervezése, eredményei

A forgácsolás paramétereinek módszeres változtatásával meghatározható az összefüggés a mért és a beállított paraméterek között.

A kívánt összefüggés leírására 3 faktor beállításait kell változtatni (f , a , v_c), amely azt jelenti, ha minden faktort két szinten (beállított értéken) vizsgálunk, akkor 2^3 teljes kísérleti tervet kell végrehajtanunk. Ez összesen 8 kísérletet jelent. Figyelembe véve a kísérletek lefolytatásának menetét, minden egyes beállítási paraméternél 10 mérési eredményt veszek figyelembe a forgácsoló erő nagyságára vonatkozóan. Ez összesen $8 \times 10 = 80$ mérési eredmény feldolgozását jelenti, amelyből meghatározható az elméleti összefüggés paramétereinek becsült értéke.

A tervezett kísérletek elvégzése előtt nagyon fontos meghatározni, hogy a beállított paraméterek milyen értékeket vegyenek fel, vagyis milyen intervallumokra vonatkozzon a becsült összefüggés a forgácsoló erőre. A beállítandó paraméterek értékei a 4.2. táblázatban láthatók.

4.2. táblázat. kísérlettervezés során beállított paraméterek

	f [mm/ford]	a [mm]	v_c [m/perc]
Alsó szint (-)	0,02	0,02	25
Felső szint (+)	0,04	0,04	75

Ezek a beállítások meghatározzák az eseménytérnek azt a részét, amelyen a beállított paraméterek és a forgácsolási erő közötti elméleti összefüggés leírható.

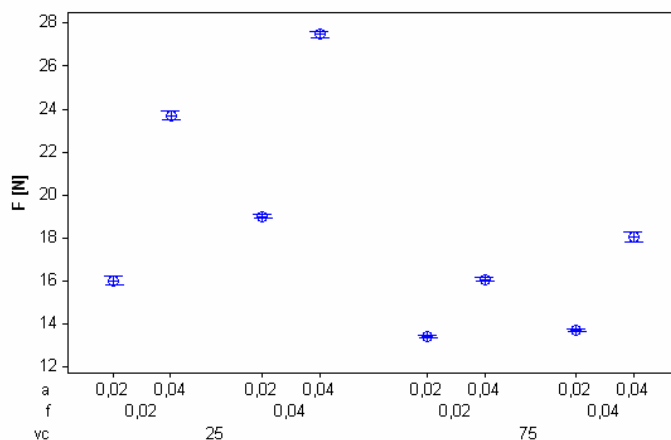
A tervezett kísérletek során kapott mérési eredményeket a 4.3. táblázatban foglaltam össze.

4.3. táblázat. A tervezett kísérletek beállításai és eredményei

v_c	f	a	F	v_c	f	a	F	v_c	f	a	F	v_c	f	a	F
25	0,02	0,02	15,47	25	0,02	0,04	23,76	75	0,02	0,02	13,38	75	0,02	0,04	16,10
25	0,02	0,02	15,65	25	0,02	0,04	23,66	75	0,02	0,02	13,45	75	0,02	0,04	16,08
25	0,02	0,02	15,86	25	0,02	0,04	23,20	75	0,02	0,02	13,36	75	0,02	0,04	16,12
25	0,02	0,02	16,01	25	0,02	0,04	23,41	75	0,02	0,02	13,37	75	0,02	0,04	15,99
25	0,02	0,02	15,87	25	0,02	0,04	23,45	75	0,02	0,02	13,31	75	0,02	0,04	16,06
25	0,02	0,02	16,19	25	0,02	0,04	23,66	75	0,02	0,02	13,24	75	0,02	0,04	15,93
25	0,02	0,02	16,32	25	0,02	0,04	24,09	75	0,02	0,02	13,39	75	0,02	0,04	16,36
25	0,02	0,02	16,24	25	0,02	0,04	24,11	75	0,02	0,02	13,44	75	0,02	0,04	16,08
25	0,02	0,02	16,22	25	0,02	0,04	23,94	75	0,02	0,02	13,43	75	0,02	0,04	16,06
25	0,02	0,02	16,41	25	0,02	0,04	23,87	75	0,02	0,02	13,53	75	0,02	0,04	16,07
25	0,04	0,02	19,04	25	0,04	0,04	27,03	75	0,04	0,02	13,57	75	0,04	0,04	18,01
25	0,04	0,02	18,94	25	0,04	0,04	27,37	75	0,04	0,02	13,65	75	0,04	0,04	17,65
25	0,04	0,02	18,94	25	0,04	0,04	27,26	75	0,04	0,02	13,77	75	0,04	0,04	17,58
25	0,04	0,02	18,92	25	0,04	0,04	27,52	75	0,04	0,02	13,72	75	0,04	0,04	17,93
25	0,04	0,02	19,19	25	0,04	0,04	27,45	75	0,04	0,02	13,86	75	0,04	0,04	18,21

25	0,04	0,02	19,09	25	0,04	0,04	27,72	75	0,04	0,02	13,73	75	0,04	0,04	17,95
25	0,04	0,02	19,19	25	0,04	0,04	27,52	75	0,04	0,02	13,73	75	0,04	0,04	17,97
25	0,04	0,02	18,89	25	0,04	0,04	27,48	75	0,04	0,02	13,69	75	0,04	0,04	18,08
25	0,04	0,02	18,90	25	0,04	0,04	27,76	75	0,04	0,02	13,66	75	0,04	0,04	18,52
25	0,04	0,02	19,01	25	0,04	0,04	27,70	75	0,04	0,02	13,65	75	0,04	0,04	18,53

A mérési eredmények megjelenítésével látható (4.20. ábra), hogy az egyes beállítások során hogyan változik a forgácsolási erő értéke. A forgácsoló sebesség növekedésével a forgácsoló erő minden beállításnál csökken, az előtolás növekedésével a forgácsoló erő nő, illetve nagyobb fogásmélység esetén nagyobb forgácsoló erőt mértem.



4.20. ábra. A mérési eredmények ábrázolása különböző faktor-beállítások függvényében (a határvonalak az átlag 95%-os konfidencia-intervallumát jelzik)

4.2.2. A kísérletek kiértékelése többváltozós lineáris regresszióval

A tervezett kísérletek elvégzésével első közelítésben lineáris összefüggéseket célszerű keresni a forgácsoló erő és a beállított faktorok értékei között. Az eredményekből az alábbi összefüggést lehet felírni:

$$F = 12,6013 - 0,125 \cdot v_c + 112,805 \cdot f + 289,955 \cdot a$$

Az értékeléshez a Minitab14 szoftvert alkalmaztam, mely az alábbi formában adja meg a számítás eredményeit.

Estimated Effects and Coefficients for F [N] (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		18,432	0,1522	121,10	0,000
vc	-6,253	-3,126	0,1522	-20,54	0,000
f	2,256	1,128	0,1522	7,41	0,000
a	5,799	2,900	0,1522	19,05	0,000

S = 1,36136 R-Sq = 91,70% R-Sq(adj) = 91,37%

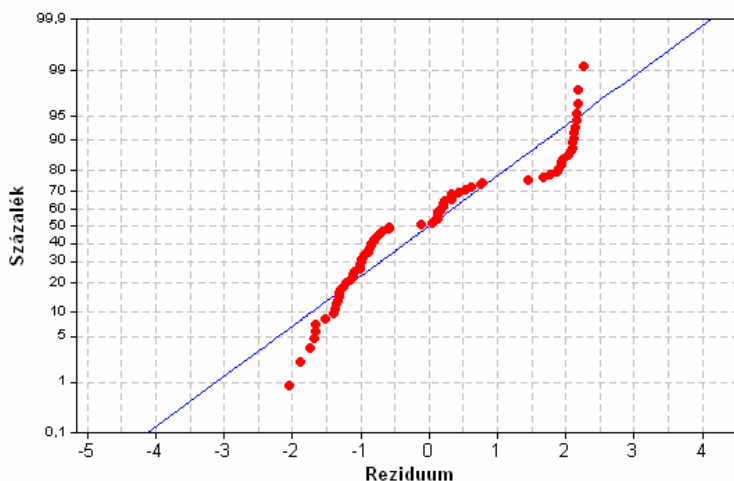
Term	Coef
Constant	12,6013
vc	-0,125052
f	112,805
a	289,955

Az illeszkedés jósága vizsgálható az R^2 értékkel (R-sq; R-sq (adj)), amelyből látható, hogy a becült függvény jól illeszkedik-e a mérési adatokra. Az illeszkedés jóságára jellemző R^2 értéke csak 91,70%-nak adódik (nem elfogadható).

A maradékok a mért és az illesztett függvény értékeinek különbségeiből adódnak:

$$\text{Reziduum} = y_{\text{mért}} - \hat{Y}$$

Ha megvizsgáljuk a maradékok eloszlását (4.21. ábra), akkor láthatjuk, hogy nem normál eloszlást követnek, mert a Gauss-hálón a pontok az egyenes körül nem véletlenszerűen helyezkednek el. Ebben az esetben a becült függvény illeszkedése nem tekinthető megfelelőnek. Megoldás lehet az összefüggés minden (függő és független) változójának logaritmizálása, és a logaritmizált változók közti lineáris összefüggés keresése.



4.21. ábra. A maradékok normál eloszlásának vizsgálata Gauss-hálón (a maradékok F arányában vannak ábrázolva)

4.2.3. A kísérletek matematikai összefüggésének leírása

A forgácsoló erőre az alábbi összefüggés jellemző:

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

Többváltozós lineáris regresszió alkalmazásához a fenti egyenletet linearizálni kell, amely úgy tehető meg, hogy mindkét oldal természetes alapú logaritmusát vesszük:

$$\ln F = \ln C_v + x \cdot \ln f + y \cdot \ln a + z \cdot \ln v_c$$

Vagyis a becsült linearizált függvény általános alakjaként a következő összefüggés adódik:

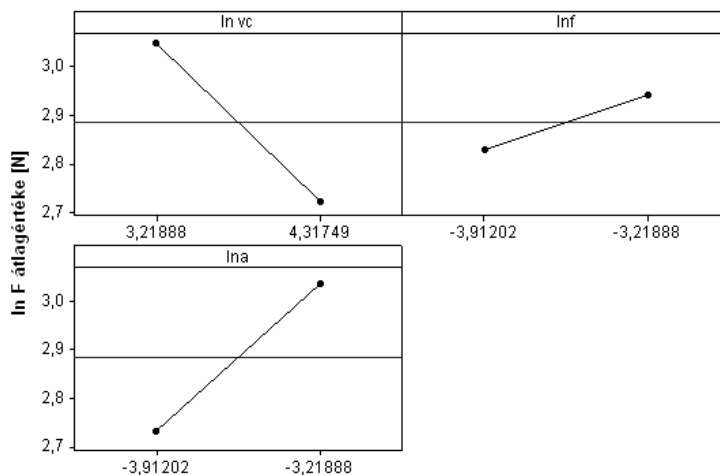
$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

A kísérletek eredményeinek kiértékelése során a cél a b_i ($i = 0,1,2,3$) paraméterek meghatározása.

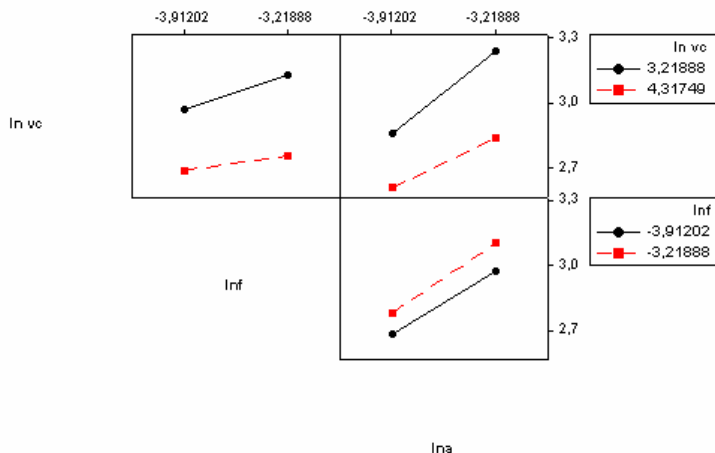
4.2.4. Faktorok hatásainak ábrázolása

A tervezett kísérletek elvégzése során fontos a faktorok hatásainak vizsgálata. Minden egyes faktor (f , a , v_c) hatását egymástól elkülönülten lehet értékelni és a hatását megbecsülni. A fő-hatás ábrák alapján adódik, hogyha a faktorok szintjét megváltoztatjuk, akkor átlagosan mennyivel változik meg a függő változó, esetünkben a forgácsoló erő mértéke.

A főhatás diagramok a 4.22. ábra tartalmazza. A 4.23. ábrán a faktorok (logaritmizált formában) kölcsönhatásainak ábrája látható. Az ábra szerint, az egyes faktorok hatásai azonosan alakulnak a másik faktor adott szintjeinek függvényében, azaz az egyik szinten rögzített átlagértékek közötti egyenes ugyanolyan meredekségű a faktor másik szintjéhez viszonyítva (párhuzamosak a hatásvonalak). Ezért mondhatjuk, hogy az egyes faktorok között nem lép fel kölcsönhatás.



4.22. ábra. A faktorok hatásainak ábrázolása



4.23. ábra. A faktorok kölcsönhatásainak szemléltetése

4.2.5. A mérési eredményekre illesztett függvény paramétereinek meghatározása

Az előzőekhez hasonlóan a Minitab14 program segítségével végeztem el az eredmények kiértékelését. A számítások az alább láthatóak:

Estimated Effects and Coefficients for ln F[N] (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		2,8851	0,005543	520,49	0,000
ln vc	-0,3290	-0,1645	0,005543	-29,67	0,000
ln f	0,1141	0,0570	0,005543	10,29	0,000
ln a	0,3047	0,1524	0,005543	27,49	0,000

S = 0,0495787 R-Sq = 95,82% R-Sq(adj) = 95,65%

Estimated Coefficients for ln F[N] using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	6,16793
ln vc	-0,299437
ln f	0,164607
ln a	0,439657

A számítások alapján a becsült összefüggés egyenlete a következő lesz:

$$\hat{Y} = 6,1679 - 0,2994 \cdot x_1 + 0,1646 \cdot x_2 + 0,4397 \cdot x_3, \text{ vagyis}$$

$$\ln F = 6,1679 - 0,2994 \cdot \ln v_c + 0,1646 \cdot \ln f + 0,4397 \cdot \ln a$$

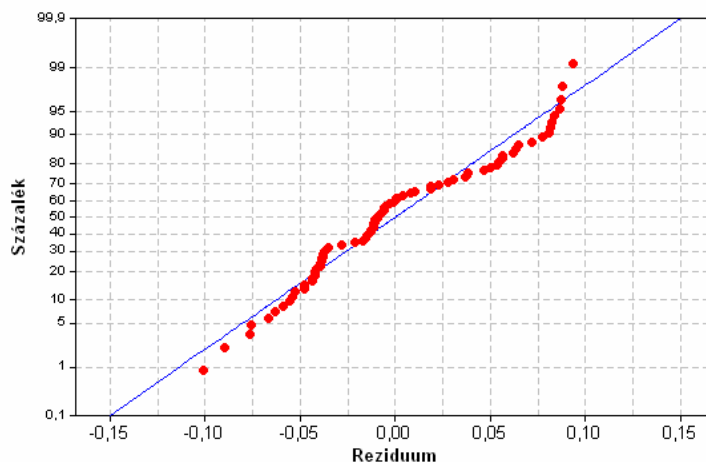
$$F = e^{6,1679} \cdot f^{0,1646} \cdot a^{0,4397} \cdot v_c^{-0,2994} = 477,183 \cdot f^{0,1646} \cdot a^{0,4397} \cdot v_c^{-0,2994}$$

Az illeszkedés jósága vizsgálható az R^2 értékkel (R-sq; R-sq (adj)), amelyből látható, hogy a becsült függvény jól illeszkedik a mérési adatokra ($R^2 > 0,95$).

A maradékok a mért és az illesztett függvény értékeinek különbségeiből adódnak:

$$\text{Maradék} = y_{\text{mért}} - \hat{Y}$$

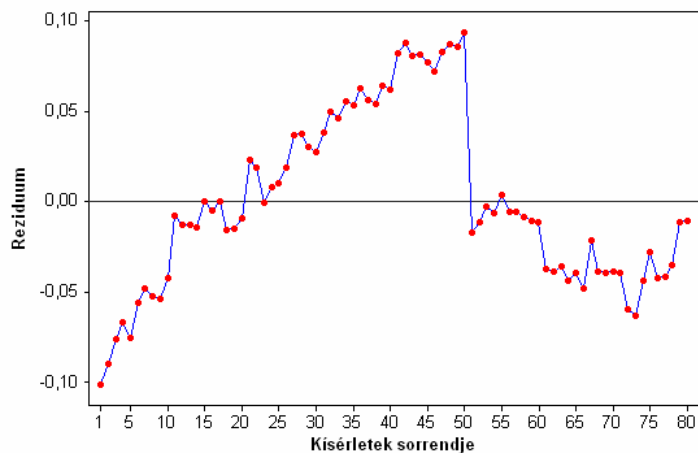
A függvény illeszkedésének vizsgálatakor fontos megvizsgálni, hogy a maradékok véletlen eloszlásúak-e és mekkora mértékűek. Ha az illeszkedés megfelelő, akkor a maradékok normál eloszlást követnek. Ennek ellenőrzését vizsgálhatjuk az ún. Gauss-hálóval, amelyen ha az ábrázolt adatok véletlenszerűek, azaz normális eloszlást követnek, akkor a pontok egy egyenes mentén helyezkednek el. Ez a vizsgálat látható a 4.24. ábrán, ahol a maradékok normális eloszlást követnek.



4.24. ábra. A maradékok normál eloszlásának vizsgálata Gauss-hálón (a maradékok ln F függvényében vannak ábrázolva)

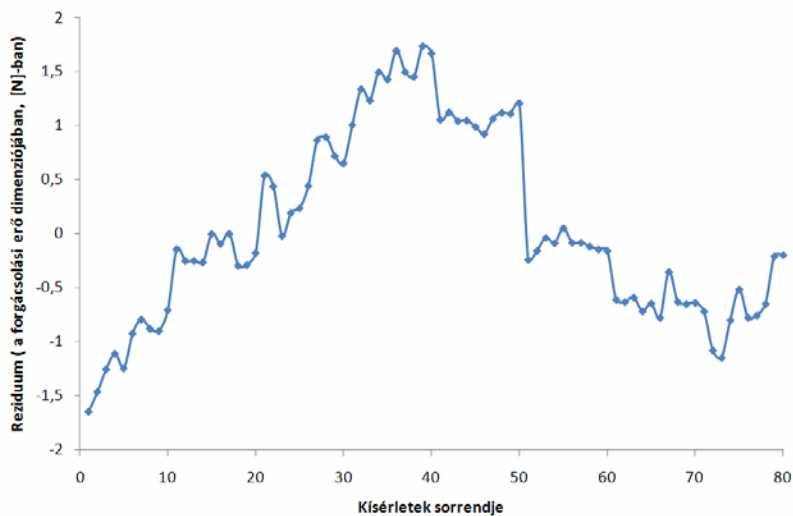
Az 4.25. ábrán ábrázoltam a maradékok értékeit a mérések sorrendjének függvényében. Látható, hogy a becsült és a mért értékek eltérései nem haladják meg a 0,1 értéket, azaz:

$$|\ln F_{\text{mért}} - \ln F_{\text{becsült}}| < 0,1$$



4.25. ábra. A reziduumok alakulása az elvégzett kísérletek sorrendjében (a reziduumok ln F -el arányosak)

Fontos a mért és a számított értékek eltéréseinek meghatározása az eredetileg feltételezett, nem logaritmizált összefüggéssel is. Ábrázolva ezen eltéréseket a forgácsolási erő mértékegységében – esetünkben N-ban – kapom meg az értékeket a kísérletek sorrendjében. (4.26. ábra) Látható, hogy a becsült összefüggéssel legfeljebb 2 N mértékig lehet megközelíteni a mérési eredményeket.



4.26. ábra. A reziduumok alakulása a kísérletek sorrendjében (a forgácsolási erő mértékegységében, N-ban)

4.2.6. A kapott összefüggés illeszkedésének jósága

A tervezett kísérletek eredményeire illesztett matematikai függvény:

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

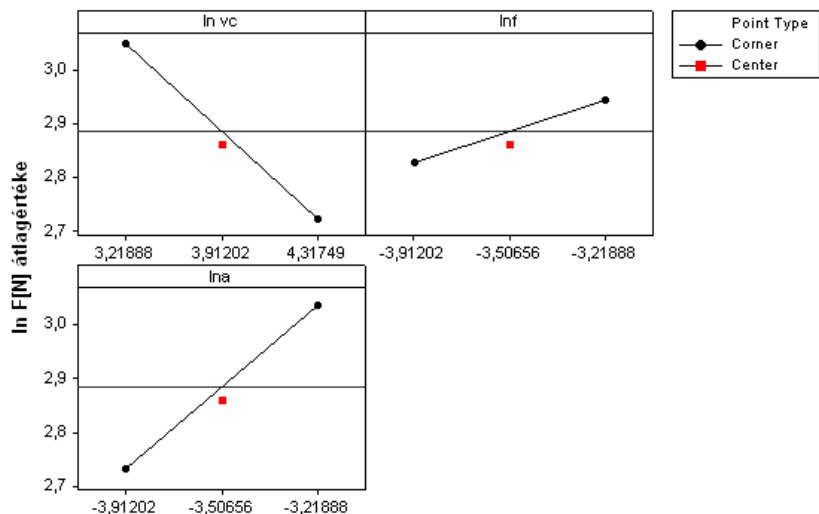
Az egyenlet használhatóságára vonatkozóan fontos megjegyezni, hogy ez az összefüggés a 4.2. táblázatban meghatározott paraméter-intervallumokon belül írja le a mérési eredmények alakulását. Az illesztett függvény adott paraméter-térben való illeszkedésének ellenőrzésére célszerű ismételt kísérleteket végezni a paraméterek vizsgált intervallumainak közepén. Ezen ismételt kísérletekkel azt lehet meghatározni, hogy valójában az illesztett sík a paramétertér közepén is jól leírja-e a mérési eredményeket vagy nem síknak kell feltételezni az illesztett felületet, hanem görbült felületnek. A mérési eredmények táblázatát a 3. melléklet tartalmazza.

Ha a sík adekvát, azaz a terv középpontjában kapott mérési eredmények jól illeszkednek a terv középpontjában levő értékekkel, akkor egymintás t-próba szerint a mért értékek átlagának és a becsült értékek átlagának eltérése zérusnak adódik.

A centrumpontbeli mérések átlagaira vonatkozó t-próba eredményéből adódik, hogy 95%-os szignifikancia-szinten a kísérletterv centrumában végzett mérések eredményei nem különböznek a becsült síkkal leírt eredménytől, azaz $p > 0,05$.

Estimated Effects and Coefficients for ln F[N] (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		2,8851	0,004921	586,26	0,000
ln vc	-0,3290	-0,1645	0,004921	-33,42	0,000
lnf	0,1141	0,0570	0,004921	11,59	0,000
lna	0,3047	0,1524	0,004921	30,96	0,000
Ct Pt		-0,0166	0,009584	-1,73	0,086

A faktorok hatásait ábrázolva megjeleníthetjük a centrumpontbeli mérések átlagértékeit (4.27. ábra). Látható, hogy a középponti mérések átlagai jól közelítik a lineáris összefüggést, vagyis a becsült összefüggés jól leírja mind a sarokpontokban (a kísérletterv során felvett szélső értékeknél), mind pedig a centrumpontbeli mérések eredményeit is, így az összefüggés adekvátnak tekinthető az egész eseménytérben belül.



4.27. ábra. A faktorok hatásai a centrumbeli ismételt mérések eredményeire

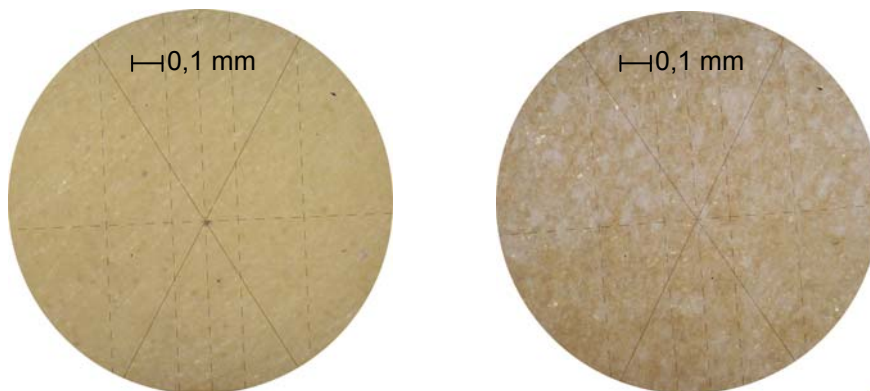
4.3. Topográfiai felületvizsgálatok eredményei

4.3.1. 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. Optikai mikroszkóp segítségével vizsgáltam a munkadarab felszínét, és az előzőekben ismertetett esztergalapka forgácsolóélén kialakult kitöréseket.



4.28. ábra. Optikai mikroszkópok



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

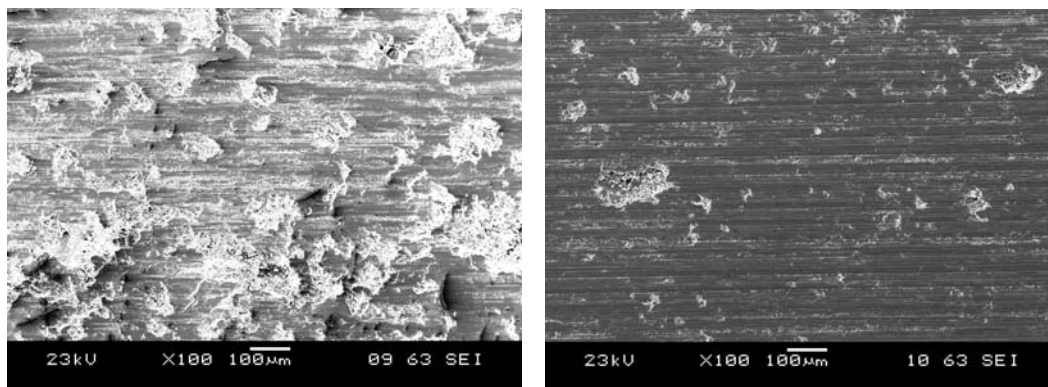
Az eredeti köszörült és az esztergált felület optikai mikroszkópos képe látható a 4.29. ábrán. A köszörült felületen láthatóak a köszörülés barázdái. Az esztergálással készített felületen kagylós kitöredezések láthatók. Ez arra enged következtetni, hogy a forgács leválása elemi darabokban történik. A 3D felülettopográfiai mérések számszerűsítették a felület érdességét térben kiterjesztve, a rögzített grafikákat a 4. sz. melléklet tartalmazza.

4.3.2. Pásztázó elektron-mikroszkópos felületvizsgálatok eredményei

A nagyobb nagyítás érdekében pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettem a kerámia megmunkált felületeiről. Ezek közül néhányat mutatok be, 100x, 500x majd 2000x-es nagyításokon. A berendezést a 4.30. ábra mutatja.



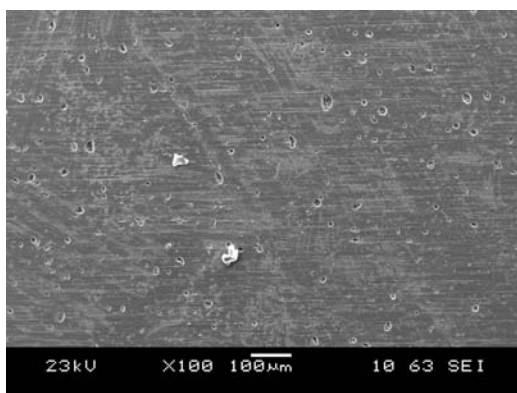
4.30. ábra. Pásztázó elektron-mikroszkóp (SEM)



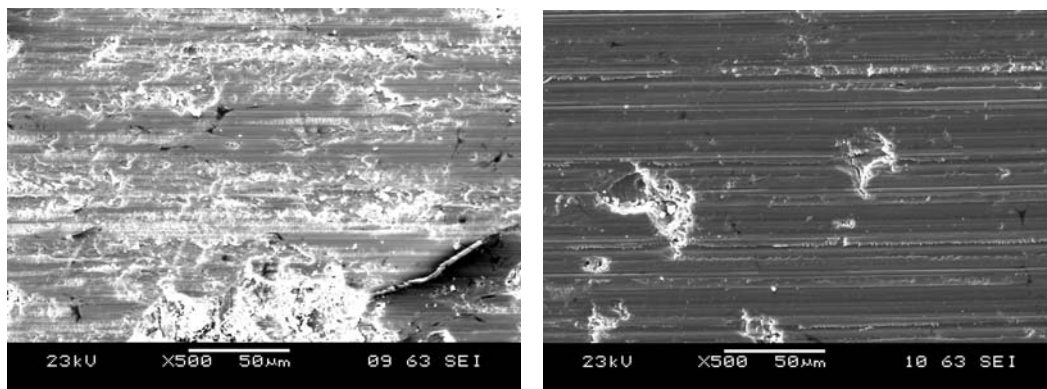
4.31. ábra. CBN és PCD szerszámmal esztergált kerámia felületek
 $v_c = 75$ m/min, $f = 0,04$ mm/ford, $a = 0,02$ mm, $N = 100x$

A 4.31. 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 4.32. ábrán az eredeti kőszőrült felület elektronmikroszkópos felvétele látható. A megmunkálás eredményeként kialakult kráterek mennyisége azonosnak tekinthető a PCD szerszámmal való megmunkáláshoz viszonyítva (4.31. ábra). Azonban a kialakult kráterek 30-40 % -nak a mérete nagyobb. Ez a méretbeli eltérés a felület kenőanyagmegtartó képességét növelheti. A kőszőrűszemcsék szintén barázdálttá alakították a felületet, de a szemcsék kisebb méretei miatt a kialakult árkok, barázdák, karcok méretei is kisebbek.

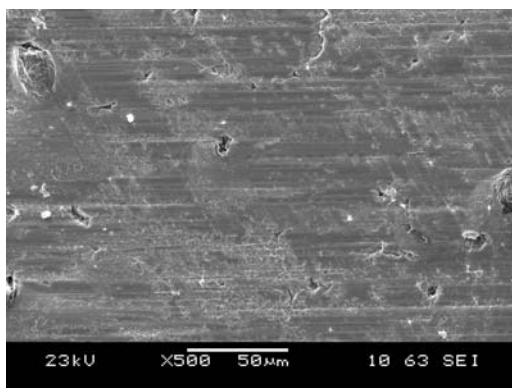


4.32. ábra. Kőszőrült kerámia felület



4.33. ábra. CBN és PCD szerszámmal esztergált felületek
 $v_c = 75$ m/min, $f = 0,04$ mm/ford, $a = 0,02$ mm, $N = 500x$

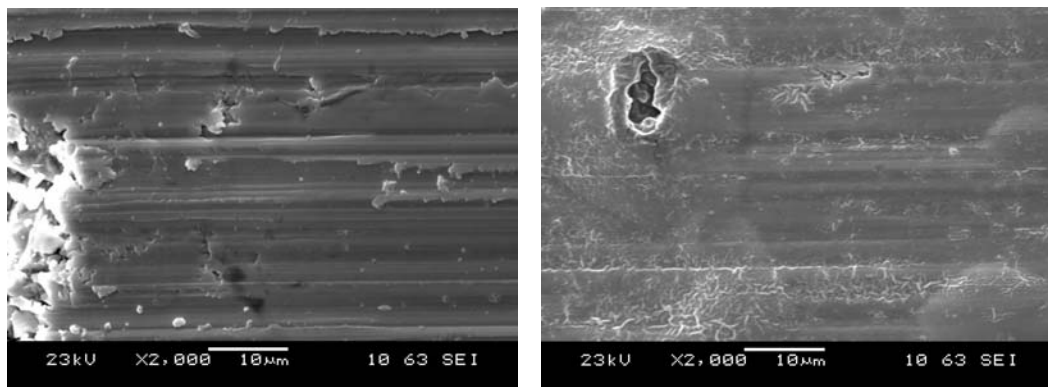
Az 500x-os nagyításon (4.33. ábra) a CBN szerszámmal megmunkált felületen kialakult mikrorepedések láthatóak. A megmunkált kerámia felület erősen kráteres és durva. A gyémánt szerszámmal való megmunkálás során a kerámia felületén repedések nem mutatkoztak.



4.34. ábra. Kőszőrült kerámia felület, $N = 500x$

A kőszőrült felület esetén az 500x nagyításnál is látható, hogy a forgácsolási árkok kisebbek, de a kisebb kráterek száma viszont több a gyémánt szerszámmal való esztergáláséhoz viszonyítva.

A 2000 x-es nagyítású felvételek is jelentősen kedvezőbb felület-folytonosságot mutatnak. Ez a köbös bórnitrid helyett a gyémánt szerszám használatát indokolja.



4.35. ábra. PCD szerszámmal esztergált és köszörült felületek, $N = 2000\times$
(esztergálás beállításai: $v_c = 75$ m/min, $f = 0,04$ mm/ford, $a = 0,02$ mm)

A köszörült felületnél a mechanikai igénybevétel hatására fázisátalakulás jelei figyelhetők meg a kerámia gyártó cégek szerint, melynek jelei az általam használt köszörült próbatesteken is felfedezhetők voltak (4.35. ábra).

A gyakorlatban, javaslatként a szerszámanyag keménységéeként 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.

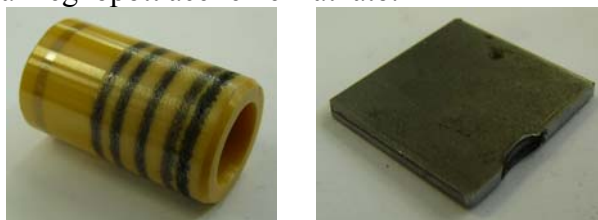
Képelemzés:

A felvételeken látható forgácsolási nyomokban kép analizáló szoftver segítségével meghatározásra került a kitöredezések aránya is. A módszer a felvételeken látható eltérő fázisok kontrasztja közötti eltéréseket veszi alapul, ahol a forgácsolt felületet sötétebb fázisként érzékeli. Hasonló tónus vagy színeképelemzésen alapuló módszerek leírása, más vizsgálatok értékelésénél is megtalálhatók (OLÁH és társai, 2004). Az elemzés eredményeit az M5 melléklet tartalmazza.

4.4. Súrlódási modell vizsgálatok eredményei és értelmezésük

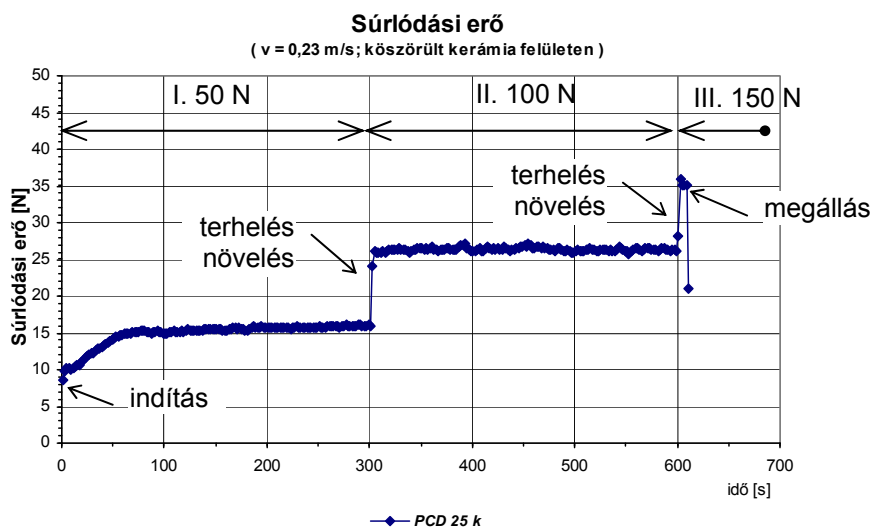
A következőkben a munkám során létrehozott súrlódás modellvizsgálati rendszerben kapott súrlódási tényező, valamint kopás és deformáció értékeket elemzem. A kerámia megmunkálása során alkalmazott két szerszámanyag közül a polikristályos gyémánt bizonyult megfelelőnek. Ezért a súrlódási vizsgálatokat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

A 4.36. ábrán a vizsgálat utáni, a kerámia felületén kialakult súrlódási nyom és egy kopott acél próbatest látható.



4.36. ábra. A kerámia felületén kialakult súrlódási nyom és egy kopott acél próbatest

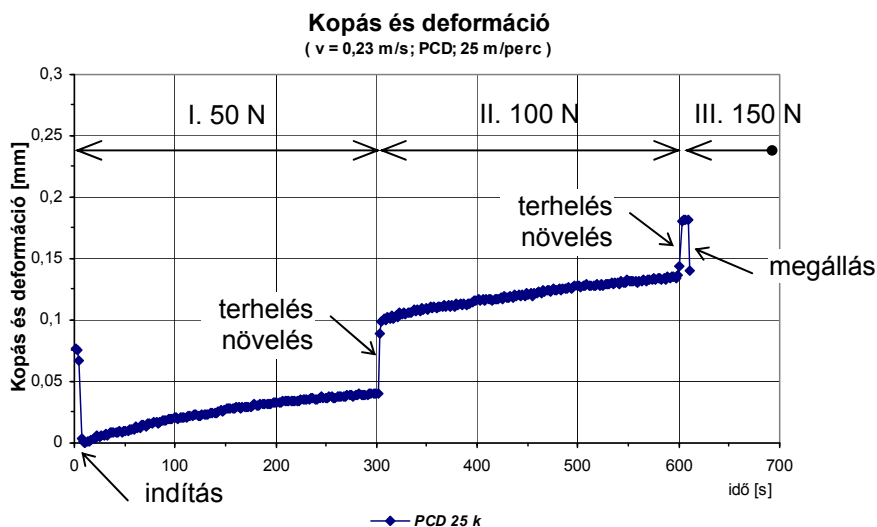
A 4.37. ábra egy súrlódási erő mérési diagramot szemléltet az idő függvényében. A terhelést 3 lépésben változtattam. A kezdeti terhelés 50 N (ez megfelel 391 MPa Hertz feszültség maximumnak vonal menti érintkezésnél). Ezen a terhelésen indítottam a mérést, majd 5 perc elteltével a terhelést 100 N-ra növeltem. Ismét 5 perc elteltével 150 N-ra emeltem a terhelés értékét. Ezen a terhelésen addig folytatódott a vizsgálat, amíg a két felület teljesen berágódott, és a motor már nem tudta meghajtani a szerkezetet. Ez az esetek túlnyomó többségében a legnagyobb terhelés ráhelyezésénél megtörtént. A diagramon az eltérő terhelési szakaszokat bejelöltem.



4.37. ábra. Súrlódási erő diagram köszörült kerámia / acél felületek között

Az első szakasz elején lévő felfutás után a súrlódási erő állandósul, és a terhelés növelésénél a súrlódási erő is növekszik. A 150 N terhelés után a súrlódási erő annyira megnőtt, hogy a motor megállt. Ez jelenti a mérés végét.

A 4.38. ábra az előző ábrához kapcsolódóan a kopás és deformáció mérési diagramját szemlélteti az idő függvényében.

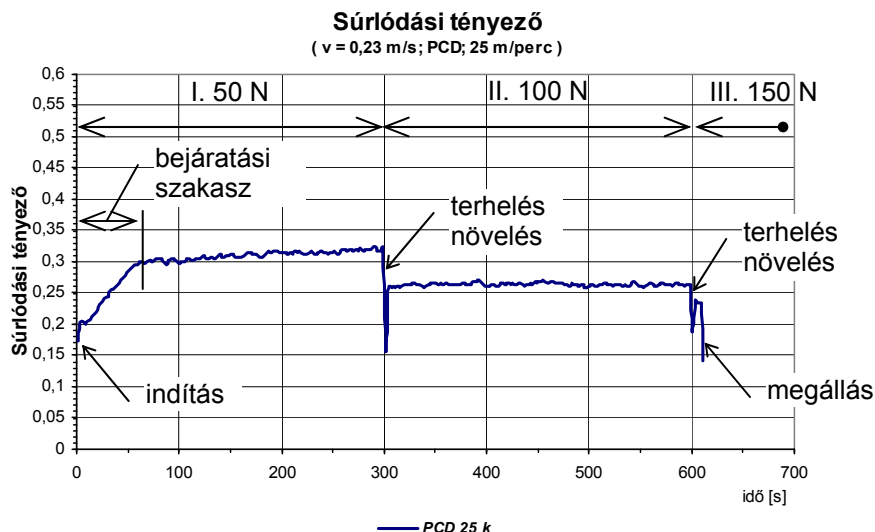


4.38. ábra. Kopás és deformáció diagram
(acél / köszörült kerámia felületek közt)

A terhelés növelésére a diagramon ugrásszerű kopás és deformáció változás látható. A kopás növekedésével az érintkező felület nagysága is változik. A kezdeti, vonali érintkezésből számított 391 MPa Hertz feszültség a terhelési szakaszokon belül fokozatosan csökken.

A függőleges terhelő erő és a vízszintes súrlódó erő hányadosaként értelmeztem a megmunkált kerámia felület és acél felület közt jelentkező száraz súrlódási tényezőt (μ).

A vizsgálat ideje alatti változását a 4.39. ábra mutatja. A terhelési szakaszok ezen az ábrán is jól elkülöníthetőek. A terhelés növelésével a súrlódási tényező értéke csökkent. A kopás növekedésének hatása, azaz az érintkező felület növekedése a súrlódási tényező változására nem jelentős, csak az első szakasz kezdetén, amikor a vonali érintkezés átalakul felületi érintkezéssé. Ebben a bejáratási szakaszban a súrlódási tényező értéke folyamatosan emelkedik. A második szakaszon belül már a felület növekedés hatása a súrlódási tényező értékére nem mutatható ki.



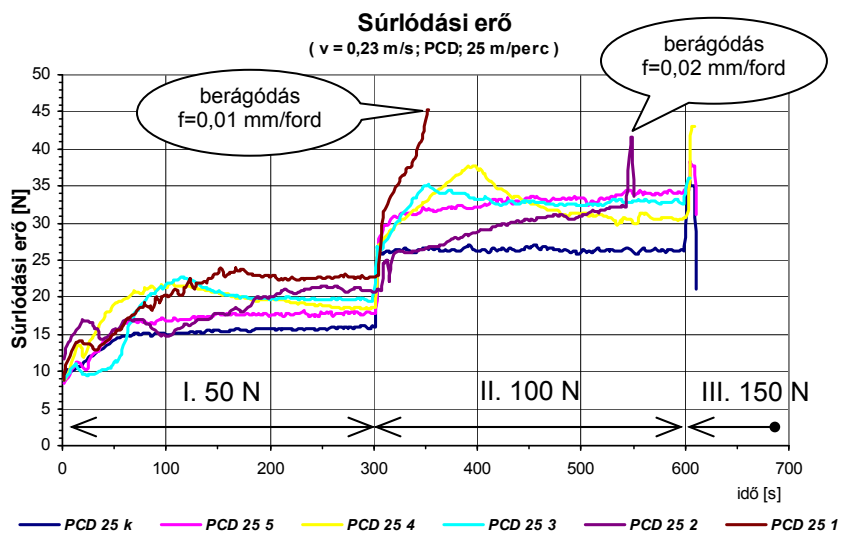
4.39. ábra. Súrlódási tényező diagram
(acél / köszörült kerámia felületek közt)

4.4.1. Súrlódási, kopási eredmények ($v_c = 25 \text{ m/min}$) és értékelésük

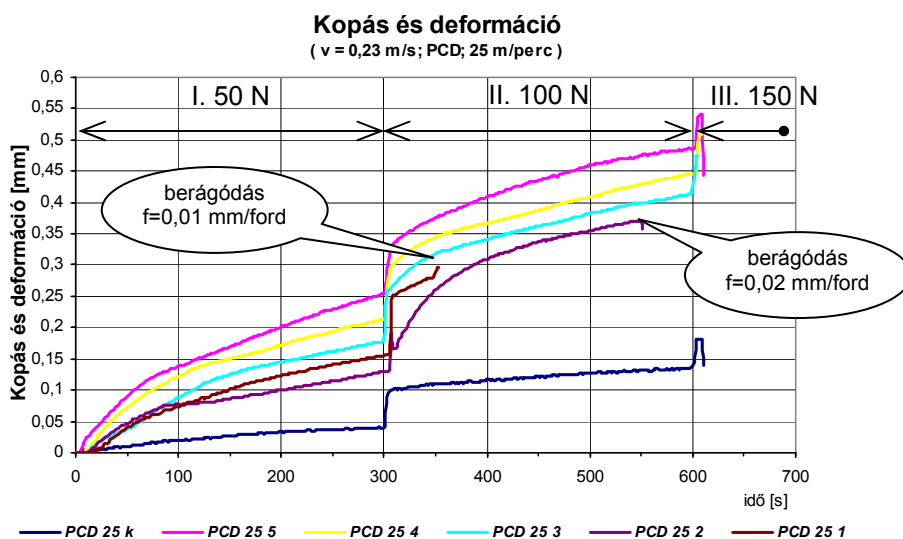
A vizsgált ZrO_2 kerámia palástfelületén, a $v_c = 25 \text{ m/min}$ forgácsolási sebességen és 5 különböző előtoláson ($f = 0,01$; $-0,02$; $-0,03$; $-0,04$; $-0,05 \text{ mm/fordulat}$) megmunkált felület található. Ezek szélessége egyenként 3 mm. A 4.40. ábra a vizsgált kerámia és az acél próbatest közt fellépő súrlódási erő értékét mutatja, míg a 4.41. ábra a kopás és deformáció alakulását szemlélteti. 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.

A köszörült felületen a súrlódási erő azonos terhelési szakaszon belül nem mutatott jelentős változást. Rövid időn belül (50 s) beállt egy közel állandó értékre. Ez azzal magyarázható, hogy a kerámia felületén kevés a kagylós kitöredezés, és ennek hiányában az acél ellenfelületről leváló anyag nem tud beletapadni, ezáltal a súrlódási erőt növelni. A legnagyobb terhelés ráadásával a köszörült felületek is berágódtak.

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

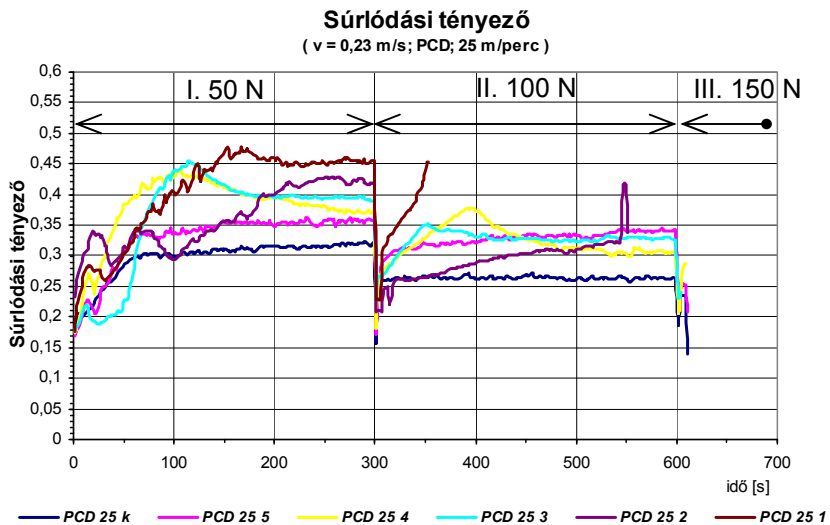


4.40. ábra. Súrlódási erő diagram
(acél/köszörült és forgácsolt kerámia felületek közt)



4.41. ábra. Kopás és deformáció idődiagram
(acél/köszörült és esztergált kerámia felületek között)

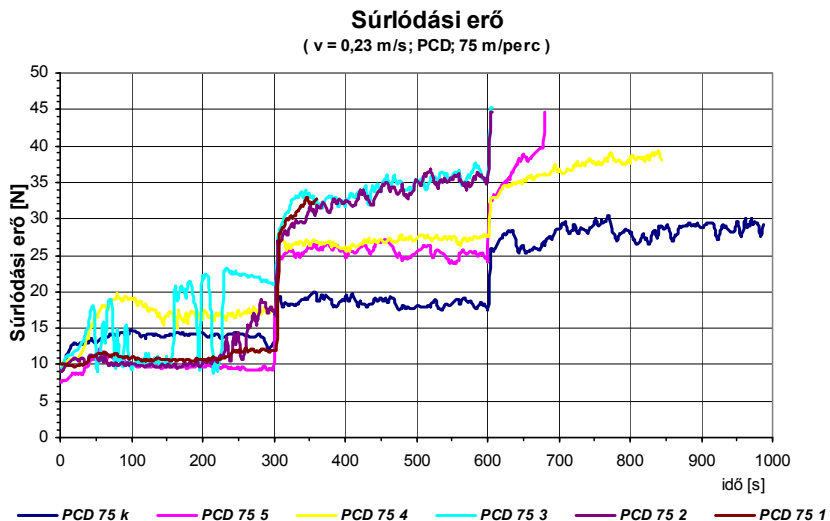
A száraz súrlódási tényezők értékeiből (4.42. ábra) kitűnik, hogy a kisebb előtolással megmunkált felületeket magasabb μ értékek jellemzik. Az $f = 0,05 \text{ mm/fordulat}$ előtolással esztergált felületen kialakult súrlódási tényező értéke, a köszörült felülethez hasonlóan, a vizsgálati szakaszok alatt közel állandó értéken maradt. A berágódásra jellemző, ingadozó súrlódási tényező nem figyelhető meg.



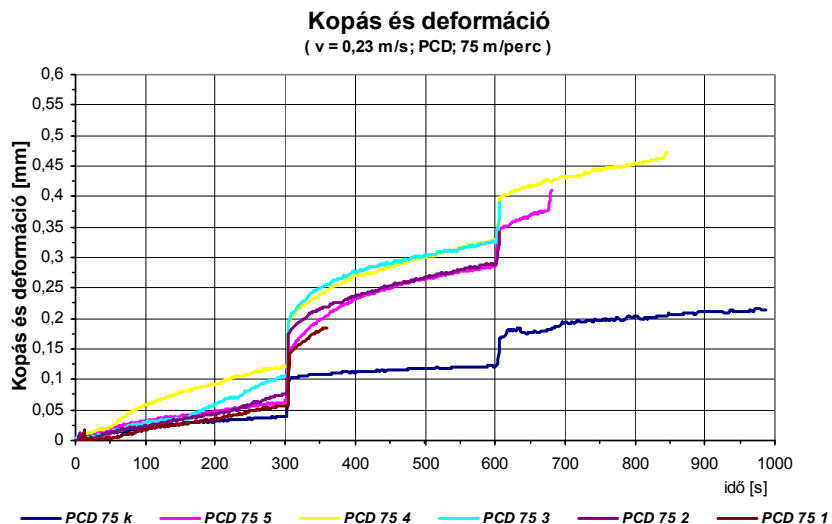
4.42. ábra. Súrlódási tényező diagram
(acél / köszörült és forgácsolt kerámia felületek közt)

4.4.2. Súrlódási, kopási eredmények ($v_c = 75 \text{ m/min}$) és értékelésük

A következőkben a 75 m/min forgácsolási sebességgel megmunkált kerámia palástfelületén végzett súrlódási valamint kopás és deformáció mérési eredményeket ismertetem. Alapvető eltérés az alacsonyabb sebességű forgácsolási felületen történt vizsgálatokhoz képest, hogy a legnagyobb terhelési szakaszban (150N) nem rögtön a terhelés ráadása után rágódott össze a két felület. A súrlódás alakulását a 4.43. ábra mutatja.



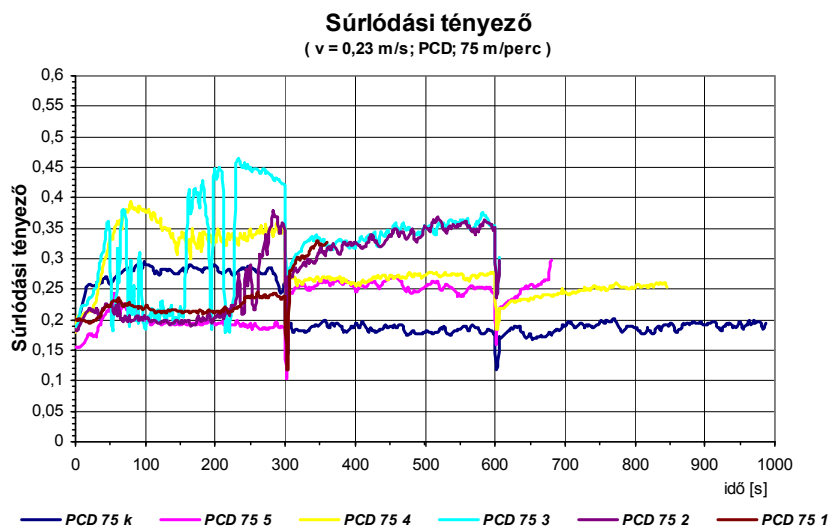
4.43. ábra. Súrlódási erő diagram
(acél / köszörült és forgácsolt kerámia felületek közt)



4.44. ábra. Kopás és deformáció diagram
(acél / köszörült és forgácsolt kerámia felületek közt)

A 4.44. ábrán szemléltetett kopás és deformáció diagramból jól leolvasható, hogy ezek az értékek alacsonyabbak, mint a kisebb forgácsolási sebességen megmunkált felületé. Ez azzal magyarázható, hogy a súrlódási vizsgálatok alatt a kerámia felülete kevésbé munkálja le az acél felületét.

A súrlódási tényező diagramot mutatja a 4.45. ábra. Ebben az esetben már előfordul, hogy az esztergálással kialakított kerámia felület és az acél közötti száraz súrlódási tényező értéke alatta marad a köszörült felületen mérhetőek.

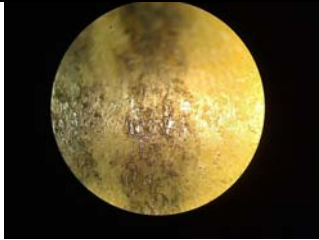
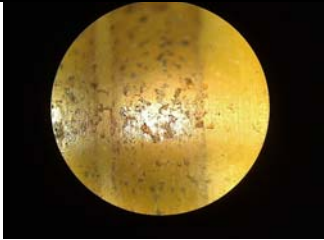

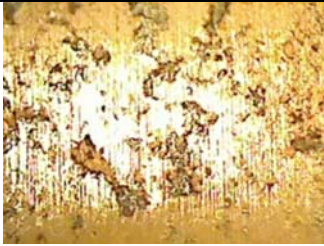
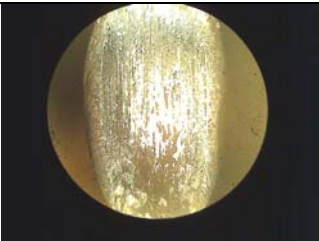
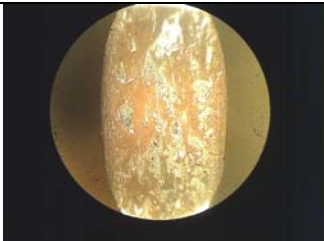

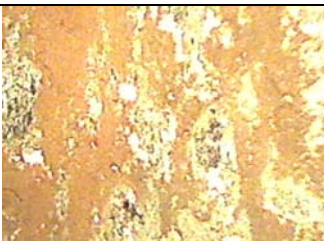


4.45. ábra. Súrlódási tényező diagram
(acél / köszörült és forgácsolt kerámia felületek közt)

4.5. 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 4.4. táblázatban egy adott előtolással megmunkált felületen végzett csúszási vizsgálat felvételét mutatom be. A felületekről készített további képek az M4. mellékletben találhatóak.

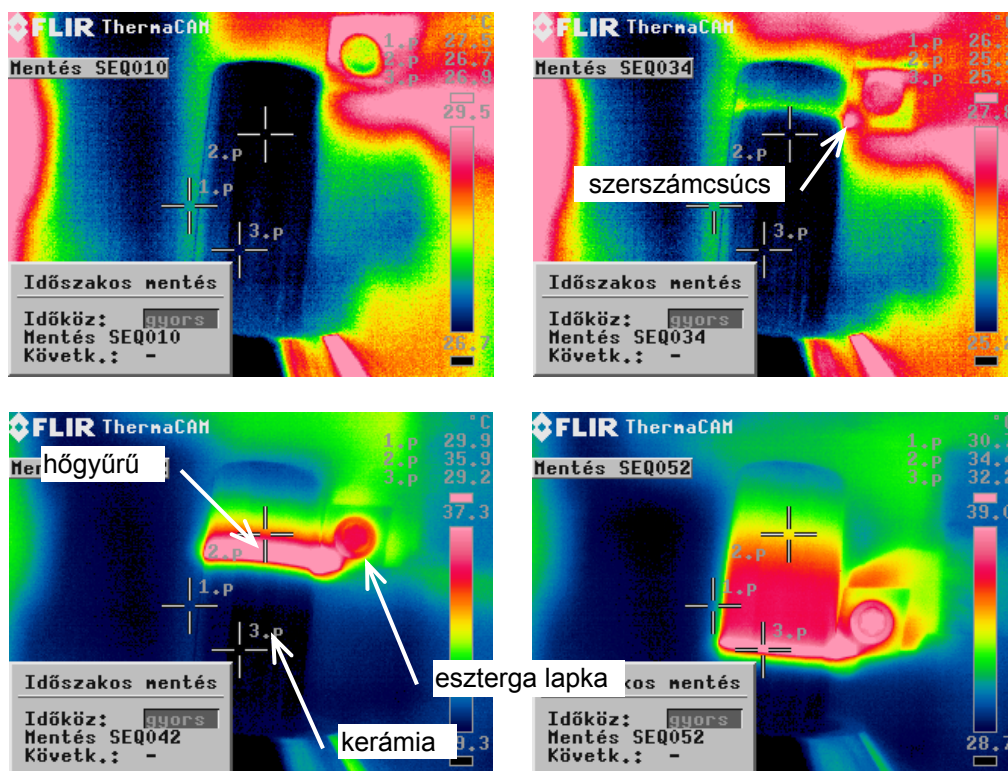
4.4. táblázat. Csúszási felület mikroszkópos felvételei (megmunkálási paraméterek: $v_c = 25$ m/min, 75 m/min; $f = 0,02$ mm/ford; $a = 0,02$ mm; vizsgálati paraméterek: $v_k = 0,23$ m/s; $F_N = 50$ N, 100 N, 150 N)

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
	 acél felület	 acél felület
	 acél felület 40x	 acél felület 40x

A csúszási nyom mikroszkópos felvételein jól látszik, hogy az alacsonyabb sebességen ($v_c = 25\text{m/min}$) 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.

4.6. Hőkamerás kiegészítő vizsgálatok eredményei

A forgácsolás során keletkező hőhatásövezet hőkamerás felvétele látható a 4.46. 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.



4.46. 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 hősokkot okoz a megmunkálandó felületen (hőgyűrű) 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.

4.7. 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 tranzien্স 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 paraméterterben ($f = 0,02 - 0,04$ 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 $\leq 8,5$ % -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 tárni.

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 kitörések 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 anyagleválasztási 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 ismertetett 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.

MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. Fritz A. H., Schulze G. (Hrsg.) (2007): Fertigungstechnik. 8. Aufl *Springer Verlag, Berlin* 279. old.
2. Bailey J.E., u.a. (1972): Phase transformations in milled zirconia. *Trans. J. Brit. Ceram. Soc.* 25-30.
3. Becher, P.F., Rose L.R.F. (1994): Toughening Mechanisms in Ceramic Systems. *Materials Science and Technology Vol. 11*, ed. by M. Swain, 568-627.
4. Beer GY., Pálkás I., Pellényi L. (1988): Mezőgazdasági gépek gyártása, Mezőgazdasági Könyvkiadó, Műszaki Könyvkiadó.
5. Bex P. A., Wilson W. J. (1977): Der neue isotrope Diamant. *Diamant-Information M 3,1* De Beers Industrial Diamond Division.
6. Childs T.H.C. (1971): A new visio-plasticity technique and a study of curly chip formation. *Int. J. mech. Sci.* vol. 13 iss. 4, pp. 373–387 Oxford (UK): Pergamon Press.
7. Claussen N., Rühle M., Heuer A. (1983); Science and Technology of Zirconia II, *American Ceramic Society, Advances in Ceramics* Vol. 12.
8. Curtis C.E. (1947): Development of zirconia resistant to thermal shock. *J. Am. Ceram. Soc.* 30 180-196.
9. Dreyer K., Kolaska J., Grewe H. (1987): Schneidkeramik, leistungsstärker durch Whisker. *In: VDI-Z 129Nr. 10*, S. 10–05.
10. Dudás I. (2000): Gépgyártástechnológia I. egyetemi tankönyv, Miskolci Egyetemi Kiadó.
11. Dudás I. (2005): Korszerű gépgyártástechnológia, *Gépgyártás XLV. évf. 4. sz.* 3-7 old.
12. Kisi E. H. (1998): Zirconia Engineering Ceramics: Old Challenges -New Ideas, *TransTech Publications, Key Engineering Materials*, Vol. 153-4.
13. Paucksch E., Holsten S., Linß M., Tikal F. (2008): Zerspantechnik Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
14. Ernst, H. (1938): Physics of Metal Cutting. *Machining of Metals*. American Society for Metals, Cleveland, Ohio, pp. 1–34.
15. Ernst, H., Merchant, M. E. (1941): *Chip Formation, Friction, and High Quality Machined Surfaces*. In: "Surface Treatment of Metals". ASM, Cleveland, Ohio (USA), 29, 299.
16. Evans A.G., Cannon R.M. (1986): Toughening of Brittle Solids by Martensitic Transformations. *Acta metall.* 34 761-800.
17. Werner G., Keuter M. (1988): Schleifbarkeit von polykristallinem Diamant. *In: IDR 22, Heft 3*, S. 16–68.
18. Garvie R.C. (1982): Stabilization of the tetragonal structure in zirconia microcrystals. *J. Physic. Chem.* 82 218-224.
19. Garvie R.C., Hannink R.H.J., Pascoe R.T. (1975): Ceramic Steel?. *Nature* 258 703-704.

20. Grain C.F. (1967): Phase Relations in the ZrO_2 -MgO-System. *J. Am. Ceram. Soc.* 50 288-290.
21. Tönsoff H. K., Karpuschewski B., Borbe C. (1997): Comparison of Basic Mechanisms in Cutting and Grinding of Hardened Steel Production *Engineering Vol. IV/2.* p. 5-8.
22. Hannink R. H. J., Howard C. J., Kisi E. H.; Swain M.V. (1994): Relationship between Fracture Toughness and Phase Assemblage in Mg-PSZ. *J. Am. Ceram. Soc.* 77 571-579.
23. Hannik R. H. J., Kelly P. M., Muddle B. C. (2000): Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 83 461-487.
24. Hastings W. F. (1967): A new quick-stop device and grid technique for metal cutting research. *Annals of the CIRP*, vol. XV, pp. 109–116.
25. Heuer A., Hobbs L. W. (1981): Science and Technology of Zirconia I , *American Ceramic Society, Advances in Ceramics* Vol. 3.
26. Heuer A. H. (1987): Transformation Toughening on ZrO_2 -Containing Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 70 689-698.
27. Horváth M., Markos S. (1995): Gépgyártástechnológia, egyetemi jegyzet, Műegyetemi Kiadó
28. Hughan R. R., Hannink R. H. J. (1986): Precipitation During Controlled Cooling of Magnesia-Partially-Stabilized Zirconia. *J. Am. Ceram. Soc.* 69 556-563.
29. Szépvölgyi J. (2000): Low cost composites made of oxides and nitrides: State-of-the-art and perspectives, *Key Engr. Mater.* 175-176, 79-90.
30. König W., u. Klocke F. (1997): Fertigungsverfahren. Bd. 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 5. Aufl. *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.*
31. Krauth A., Meyer H. (1965): Über Abschreckmodifikationen und ihr Kristallwachstum in Systemen mit Zirkondioxid. *Ber. Dtsch. Keram. Ges.* 42 61-72.
32. Kundrák J., Gyáni K. (2006): Szuperkemény szerszámokkal végzett precíziós megmunkálások kutatása, *Gépgyártás* XLVI. évf. 3. sz. 3-10 old.
33. Leopold J. (1980): Modellierung der Spanbildung – Experiment. *Wissenschaftliche Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt.*
34. Leopold J. (2000): The Application of Visioplasticity in Predictive Modelling the Chip Flow, Tool Loading and Surface Integrity in Turning Operations. 3rd *CIRP International Workshop on “Modelling of Machining Operations”* University of New South Wales, Australia.
35. Swain M., Badwal S.F. (1994): Ceramic Superionic Conductors. *Materials Science and Technology* Vol. 11, , 568-627.
36. Mátyási GY., Mészáros I. (2008): Mikromegmunkálások, *Gépgyártás* XLVIII. évf. 4. sz. 3-10 old.
37. Mészáros I., Szepesi D. (2005): Edzett acélok nagy pontosságú megmunkálása II. *Gépgyártás* XLV. évf. 4. sz. 20-25 old.

38. Mészáros I., Szepesi D. (2005): Edzett acélok nagy pontosságú megmunkálása III. *Gépgyártás XLV.* évf. 5. sz. 15-18 old.
39. Mészáros I., Szepesi D. (2006): Edzett acélok nagy pontosságú megmunkálása IV. *Gépgyártás XLVI.* évf. 4. sz. 29-33 old.
40. Ichinose N. (1989): Introduction to Fine Ceramics, *Academic Press*, Boston.
41. Noordin Mohd. Yusof*, Affandi M., Zainal Hendrico, Denni Kurniawan (June 2008): Hard turning of cold work tool steel using wiper ceramic tool, *Jurnal Mekanikal*, No. 25, 92 – 105.
42. Palásti Kovács Béla (1983): Forgácsolással megmunkált felületek mikrogeometriájának értékelése, *Kandidátusi értekezés, Budapest.*, 31-35. old.
43. Rüle M., Claussen N., Heuer A.H. (1986): Transformation and Microcrack Toughening as Complementary Process in ZrO₂-Toughened Al₂O₃. *J. Am. Ceram. Soc.* 69 195-197.
44. Seminar „Technische Keramik in der Praxis“, (1999) München, Stuttgart, Köln.
45. Sipos S., Bíró SZ., Tomoga I. (2006/4): A termelékenység és a minőség egyidejű növelése wiper élgeometriával. *Gépgyártás XLVI. évfolyam.*, 17-24. old.
46. Smith D. K., Cline C. F. (1962): Verification of existence of cubic zirconia at high temperature. *J. Am. Ceram. Soc.* 45 249-250.
47. Smith D. K., Newkirk H. W. (1965): The crystal structure of baddeleyite (monoclinic ZrO₂) and its relation to the polymorphism of ZrO₂. *Acta Crystallogr.* 18 983-991.
48. Somiya S., Yamamoto N., Yanagida H. (1986): Science and Technology of Zirconia III, *American Ceramic Society, Advances in Ceramics Vol. 26 A+B.*
49. Stevens R. (1986): An Introduction to Zirconia“, *publ. by Magnesium Elektron. Deutsche Übersetzung in: Handbuch der Keramik, Deutscher Wirtschaftsdienst*, Kap. 4.2.2.0.
50. Swain M. V., Rose L. R. F. (1986): Strength Limitations of Transformation-Toughened Zirconia Alloys. *J. Am. Ceram. Soc.* 69 511-518.
51. Szépvölgyi J. (1994): Korszerű műszaki kerámiák, *Magyar Tudomány*, 4. sz. 7-13 old.
52. Teufer G. (1962): The crystal structure of tetragonal ZrO₂. *Acta Crystallogr.* 15 1187.
53. Tikal F., Schneider J., Wellein G. (Oktober 1987): Starker Schneidstoff. In: *moderne Fertigung.*
54. Weiß Torsten (1996): Kundenspezifische Bauteile = Problemlöser aus Keramik, *BCE Special Ceramics GmbH Mannheim. Gyártói kiadvány.*
55. Vieregge G. (1970): Zerspanung der Eisenwerkstoffe. *Düsseldorf Verlag Stahleisen GmbH.*
56. Kingary W. D., Bowen H. K., Uhlmann D. R. (1975): Introduction to Ceramics, Second edition, *John Wiley and Sons*, New York.
57. Wollast R.; Raucq J. (1963): Beitrag zur Kenntnis der polymorphen Umwandlungen des reinen Zirkonoxids. *Ber. Dtsch. Keram. Ges.* 40 527-532.

58. Wolten G. M. (1964): Direct, high-temperature single crystal observation of orientation relationship in zirconia phase transformation. *Acta Crystallogr.* 17 763-765.
59. Yoshimura M. (1988): Phase Stability of Zirconia. *Ceram. Bull.* 67 1950-1955.
60. Palásti Kovács Béla, Kovács Kálmán, Pálinkás Tibor, Váradi Károly (2001): A topoSurf, PC-vezérelt 3D-s érdességmérő műszer. *Műszerügyi és Méréstechnikai Közlemények* 37. évfolyam, 68. szám,.
61. Stout K. J., Sullivan P. J., Dong W. P., Mainsah E., Luo N., Mathia T., Zahouaro H. (1994): The Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions, Commission of the European Communities.
62. Farkas B. Zs. (2008): Nagypontosságú keményesztergálás vizsgálata, diploma Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
63. Anton van Beek (2006): *Advanced Engineering Design*. TU Delft, p 87 – 136.
64. Höhne, L. (1999): *Honen technischer Keramik*. Essen, Vulkan- Verlag, - Braunschweig, Techn. Universität, Fachbereich 7, Diss., 1998
65. König, W., Klocke, F. (1996): *Fertigungsverfahren*. Bd. 2: Schleifen, Honen, Läppen. 3. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag
66. Lawn B.; Evans A. G. (1977): *A model of crack initiation in elastic/plastic indentation fields*. *Journal of Mat.*, 12, S. 2195-2199
67. Marshall D. B.; Evans A. G. (1983): *The nature of machining damage in brittle materials*. *Proc. R. Soc. Lond.* A385, S. 461-475
68. Sabotka I.(1991): *Planläppen technischer Keramiken*. Dissertation, TU Berlin
69. Saljé E., Möhlen H. (1987): *Prozeßoptimierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe*. IDR 21, Nr. 4, S. 243-247
70. Samuels L.E. (1972): *Mechanism of Abrasive Polishing*. *Anal. of the CIRP* Vol. 21/1/1972, S. 87-88
71. Spur G., Linke K., Sabotka I., Tio T.H., Uhlmann E. (1989): *Keramikbearbeitung*. München, Carl Hanser Verlag
72. Uhlmann E. (1993): *Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe*, Dissertation, TU Berlin
73. Warnecke G., Rosenberger U. Wimmer J. (1993): *Mikrovorgänge beim Schleifen von Hochleistungskeramik*. In: IDR 27 4, S. 247-252
74. Weigmann U.-P. (1997): *Honen keramischer Werkstoffe*. *Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin*, Berlin, Techn. Universität, Diss.,
75. Wimmer J. (1995): *Konditionieren hochharter Schleifscheiben zum Schleifen von Hochleistungskeramik*. Dissertation, Universität Kaiserslautern
76. *Modern Metal Cutting A Practical Handbook* Sandik Coromant (1991)
77. Oláh Zs., Szirmai L., Resofszki G. (2004): A new aspect of the evaluation of diesel fuel lubricity properties. 8th International Conference on Tribology. In: *Proceedings. 2004 június 3-4. Veszprém* 194-197 pp.

M2. 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 Róbert (2011): Forgácsoló erő kutatása cirkónium-dioxid (ZrO_2) esztergálásánál. Gép, 2011. (in print)

Nemzetközi konferencia proceedings

10. **Fledrich G.** (1999): Machining aspects of polymer composites (Die Komposiete aus Gesichtspunkt Drehen) International Symposium on engineering Systems and Tribological research of up-to-date, environment-friendly self-lubricating bearing materials. Abstract. BWO- Flamish Ministry, Gent, Belgium
11. Pálincás I.– Kalácska G.– Pék L.– Pellényi L.– **Fledrich G.** (2000): The applicability of engineering plastics in the desing of tools. X th International Conference on Tools Miskolc, Sept.6-8. 2000. pp. 421 – 426
12. **Fledrich G.** (2001): Medical plastics for development of measuring device. (Medicinische Kunstmaterialen zur Entwicklung Messanlage) International Symposium on Polymers and Composite Materials. 2001. OMFB-BWO- Flamish-Hungarian Ministry, Gent, Belgium
13. **Fledrich G.** Pálincás I. (2010): Turning ZrO₂ ceramics, International Conference 14-15 October 2010 Debrecen, pp. 48-55.

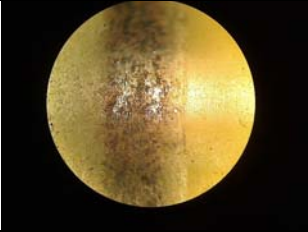


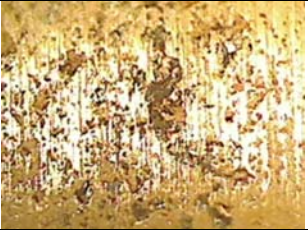
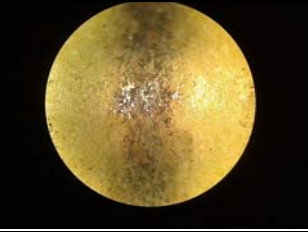


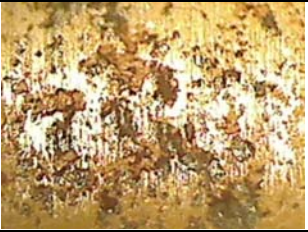

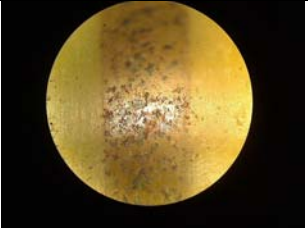

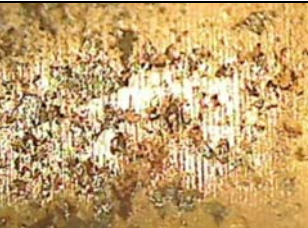
M3. A középponti mérési adatok

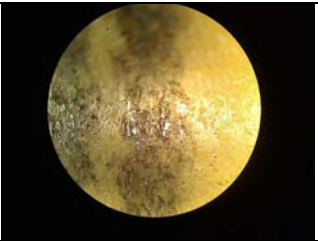
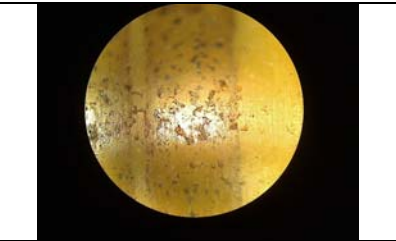

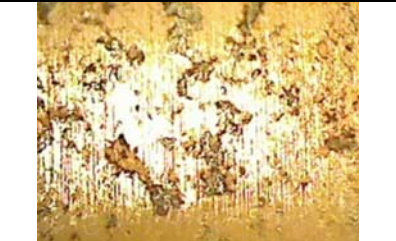

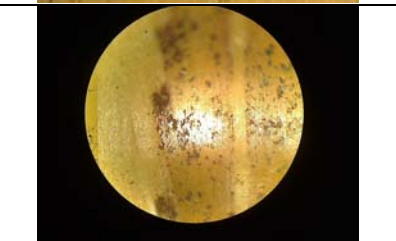


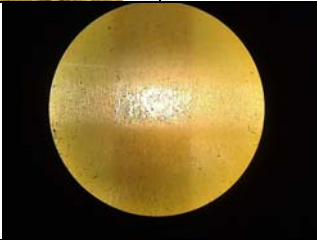
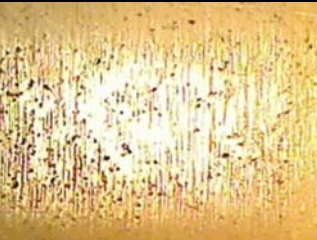
A terv középpontjában mért forgácsoló erő értékek

	f [mm/ford]	a [mm]	v_c [m/perc]	Becsült F [N]	Mért F [N]
1. ismétlés	0,03	0,03	50	17,77	17,05 17,07 16,83 17,41 17,26 17,05 17,26 17,10 17,55 17,22
2. ismétlés	0,03	0,03	50	17,77	17,11 16,99 17,09 17,25 17,20 17,15 17,28 17,48 17,55 17,57
3. ismétlés	0,03	0,03	50	17,77	17,86 18,03 18,05 17,82 17,96 17,93 18,04 17,82 18,37 18,18

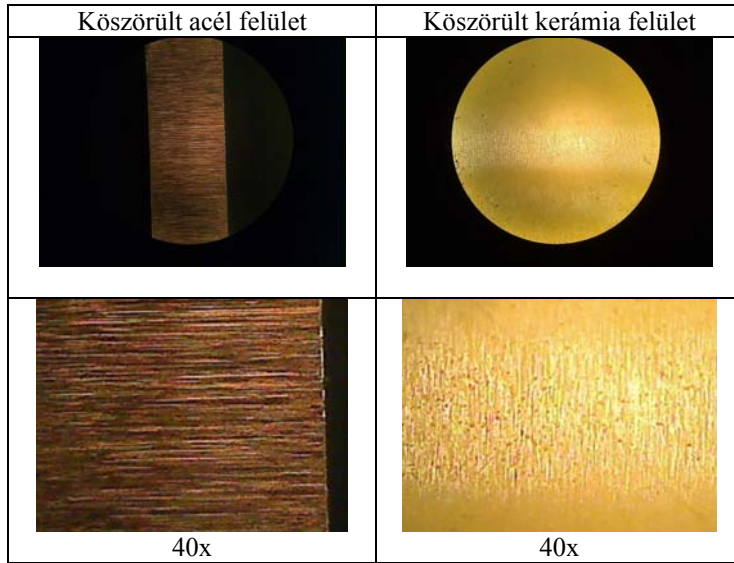
M4. Mikroszkópos felvételek és mérési diagramok

Mikroszkópos felvételek a kerámia csúszási felületekről

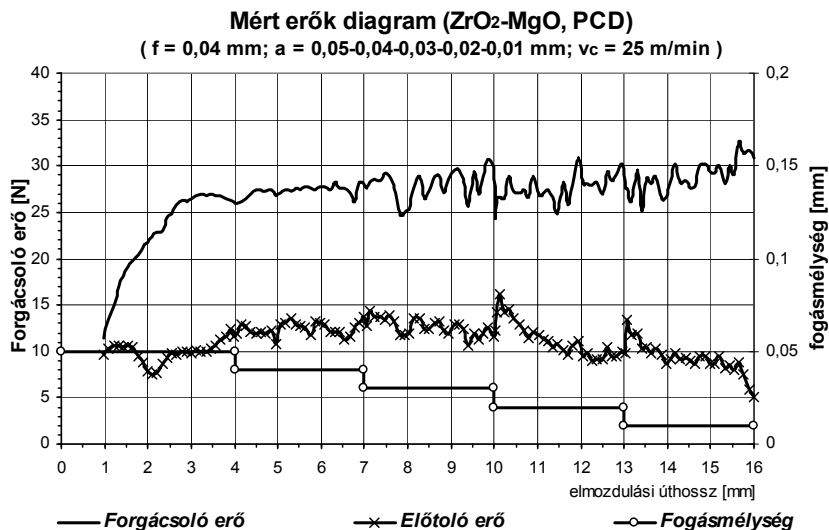
Forgácsoló sebesség →	25 m/perc		75 m/perc	
Előtolás ↓				
0,05 mm/ford				
				
0,04 mm/ford				
				
0,03 mm/ford				
				

<p>0,02 mm/ford</p>		
		
<p>0,01 mm/ford</p>		
		
<p>eredeti köszörült felület</p>		
		

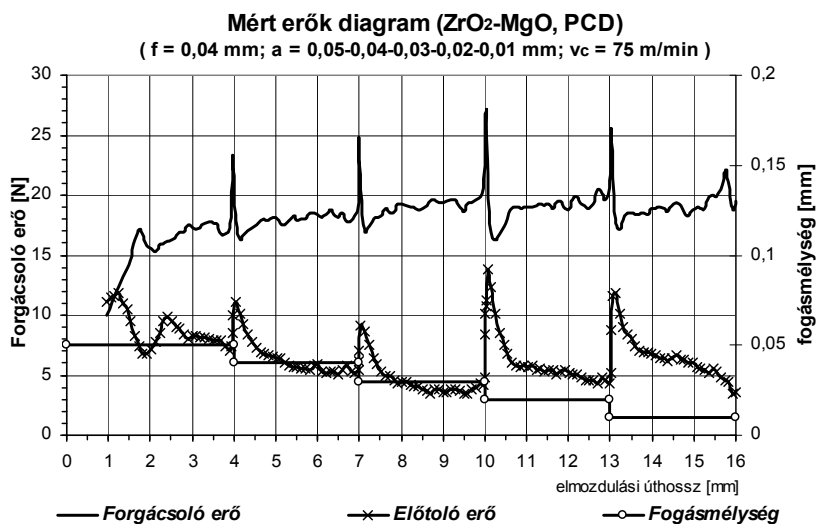
Köszörült acél és kerámia felületek



Mérési diagramok

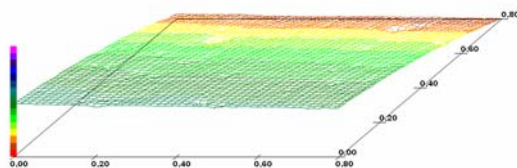


Fő- és előtolás irányú erők diagramja

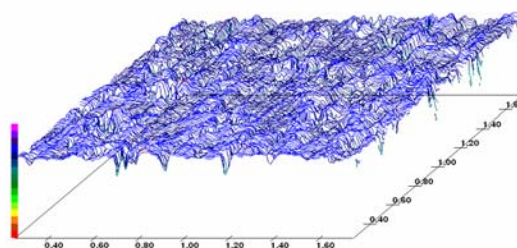


Fő- és előtolás irányú erők diagramja

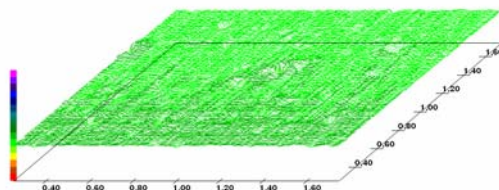
M5. 3D-s felületvizsgálatok és a képelemzések eredményei



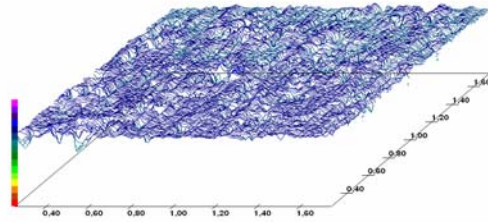
PCD szerszámmal esztergált kerámia felület
($v_c = 75$ m/min., $a = 0.02$ mm, $f = 0.02$ mm/ford)



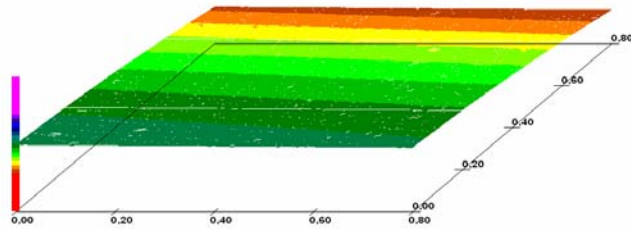
PCD szerszámmal esztergált kerámia felület
($v_c = 25$ m/min., $a = 0.02$ mm, $f = 0.02$ mm/ford)



PCD szerszámmal esztergált kerámia felület
($v_c = 75$ m/min., $a = 0.02$ mm, $f = 0.05$ mm/ford)

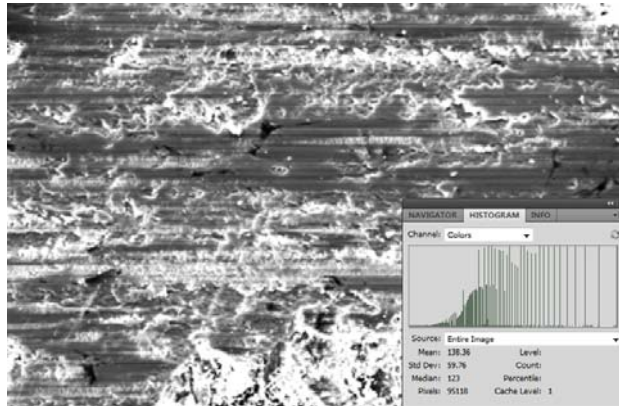


PCD szerszámmal esztergált kerámia felület
($v_c = 25$ m/min., $a = 0.02$ mm, $f = 0.05$ mm/ford)

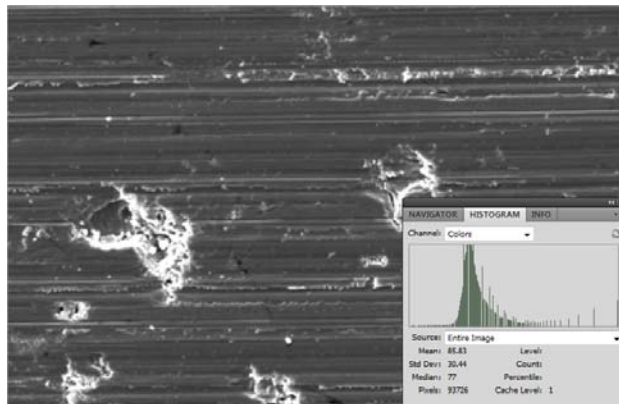


Köszörült kerámia felület (gyártói felületminőség)

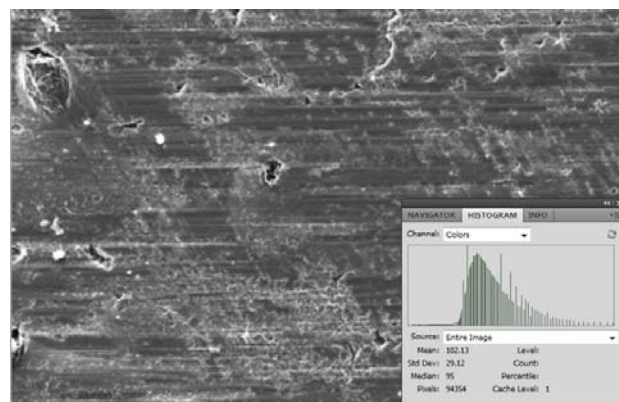
Képelemzési eredmények



CBN lapkával megmunkált kerámia felület



PCD lapkával megmunkált kerámia felület



Köszörült kerámia felület

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek Dr. Pálinkás Istvánnak és Dr. Jánosi Lászlónak a több éves szakmai támogatásért, a munkámhoz szükséges feltételek megteremtéséért és a dolgozatom elkészítéséhez nyújtott segítségéért.

Köszönet illeti a Gépipari Technológiai Intézet vezetőjét, Dr. Kalácska Gábort, valamint az intézet dolgozóit, akik tudásukkal, tanácsaikkal, észrevételeikkel önzetlenül segítették kutatói munkámat.

Köszönet illeti A Korszerű Technológiákért Alapítványt az általa nyújtott támogatásért.

Külön szeretném megköszönni Dr. Keresztes Róbertnek a témámhoz kapcsolódó mérések során adott értékes segítségnyújtását.

Köszönöm családomnak, feleségemnek a támogatását, mely nélkül a kutató munkám nem lehetett volna ilyen eredményes.