

Képlékeny alakváltozás Al_2O_3 kerámia anyagok ultraprecíziós megmunkálásánál

Hidasi Béla* - Dudás Zoltán* – A.G. Mamalis **

A kerámiák megmunkálásával kapcsolatosan felmerülő problémák megoldása és a megmunkálás eredményességének értékelése – sok, a fémek megmunkálásánál már megszokottól – eltérő szemléletmódot igényel. Mivel az anyagi tulajdonságokat a szerkezet határozza meg, nyilvánvalóan az alapvető különbségek oka a kerámiáknak a fémekétől eltérő szerkezetében keresendő. A kerámia anyagcsaládon belül is természetesen az anyagtulajdonságok és jellemzők széles spektrumával találkozhatunk, de itt a továbbiakban többnyire csak a kísérleteinkhez felhasznált Al_2O_3 -al foglalkozunk.

Az Al_2O_3 kerámia anyagok szerkezeti jellemzői

Az Al_2O_3 dominálónan ionos kötésű kristályos szerkezet, melynél az oxigén ionok által alkotott szorosan pakolt hexagonális rácsban a fémionok az ún. oktaédeses – hat O^{2-} ion által közrezárt – rács-hézagokba illeszkednek. Egy ilyen típusú cellánál az oktaédeses helyek száma megegyezik az oxigén ionok számával, így ezekben csak minden második-harmadik helyen található Al^{3+} ion.

A leggyakoribb szennyezők ill. adalékok a CaO , MgO és a SiO_2 . Szobahőmérsékleten gyakorlatilag egyik sem oldódik az Al_2O_3 -ban. A SiO_2 -re vonatkozóan még $1800\text{ }^\circ\text{C}$ -on is csak kb. 2%-nál van az oldódási határ. Az ezt meghaladó mennyiség a krisztallithatáron második fázisként (pl. mint $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ más néven mullit) jelenik meg. Az adalékok szerepe elsősorban abban nyilvánul meg, hogy csökkentik a szinterelési hőmérsékletigényt, ami a tiszta Al_2O_3 -nál kb. $1800\text{ }^\circ\text{C}$. Emellett az üvegfázist képező, a szemcsehatárokon elhelyezkedő szilikátok és a MgO is gátolják a szinterelés alatti szemcsenövekedést. A tapasztalatok szerint az apróbb szemcsés anyag jobban polírozható.

Ezen kerámia alapanyagból döntően porkohászati úton készült termékeket gyártanak, amelyek természetesen polikristályos szerkezetűek. A sajtolás és szinterelés során a laza porhalmazból létrejött szilárdtest a konkrét technológiától függő mértékben, de mindig porózus lesz.

Az alkalmazott sajtolási nyomás és az elérhető térkitöltés között (nem keményedő porok esetén) a leggyakoribb feltételezés szerinti kapcsolat

$$\lg p = \lg p_{max} - m \cdot \lg v$$

ahol p_{max} az elméleti sűrűség eléréséhez szükséges nyomás, m anyagállandó, v pedig a relatív térfogat. A modell azonos, a sajtolás megkönnyítésére alkalmazott (a szerszám és a szemcsék közti sűrűsítést csökkentő) adalékok használatát is feltételezi.

Szinterelés során az egymással érintkező szemcsék között megindul a nyakképződés, majd a nyakátmérő növekedése [7]. Tehát a kezdetben folyamatosan összefüggőnek tekinthető – ilyen értelemben nyitott – pórusok egyre inkább elszigetelődnek egymástól és kialakul egy zárt pórusrendszer.

A továbbiakban, sokféle diffúziós mechanizmus hatására, pórusmozgás tapasztalható, melynek eredménye a pórusok számának, alakjának és méretének a megváltozása. Ionkötésű oxidokban már a legegyszerűbb diffúziós folyamatok kezelése is sokkal nehezebb,

mint a fémek esetében, mert itt minden ion csak a saját alrácában diffundál. Tekintve, hogy a komponensek ionos állapotúak, a villamos töltés-semlegességet valamilyen mechanizmusnak biztosítania kell, így a legnagyobb diffúziós sebességet lehetővé tevő pontszerű hibák is villamos töltéssel rendelkeznek. Részen ez az oka annak, hogy a kerámiák alacsony hőmérsékleten képlékenyen egyáltalán nem alakíthatóak, mivel a diszlokáció-mozgás is felborítja a meglévő töltésegyensúlyt, az ezt kiegyenlíteni hivatott (termikusan aktivált) folyamatok pedig lassúak, a diffúziós sebességtől függően.

Általában elfogadott tény, hogy a mechanikai feszültségtér is növelheti a diffúziós sebességet (pl. ez egy forgácsolási folyamat hatása is lehet), de ilyen jellegű kísérleti eredményt a kerámiákra nem találtak.

A kerámiákban lezajló mikrofolyamatok felismerésére, leírására vonatkozó kutatások rendkívül szerteágazóak, de az eredményeket tekintve jelenleg még mindig a részeredmények gyűjtése folyik, vagyis az analízis területén mozognak, a szintézis még várat magára.

Az optikai/elektronoptikai úton megfigyelhető változások

A szinterelési technológia okozta legszembevetőbb változások a pórusokkal kapcsolatosak és egyben – a méretüktől, eloszlásuktól és alakjuktól függően – a legnagyobb mértékben befolyásolják a kialakuló tulajdonságokat. A jellemző változások a következők:

- A pórusok nagyobb csoportokba tömörülnek és egybeolvadnak, egy részük a felületekre diffundálva eltűnik.

- Szerencsés esetben a pórusok alakja a gömb alak felé közeledik (csökken a repedés keletkezési hajlama), az éles póruscsarkok nagy része eltűnik. Diffúziós anyagáramlás indul meg a belső pórusfelületen, melynek révén az ionok a nagyobb görbületi sugarú helyekről a kisebb görbületi sugarú helyekre vándorolnak.

- A pórusfelületek ún. termikus átoldódás révén kisimulhatnak, kivéve azt a helyzetet, amikor nagy a szemcsehatár energiája. Akkor árokképződés jöhet létre és ezek a helyek a későbbi repedések magjaként viselkedhetnek.

Az eddigiekből remélhetőleg kiderül, hogy egy késztermék porozitásának jellemzői igen erős technológiafüggést mutatnak és még az azonos látszólagos-sűrűségű, de különböző gyártóktól származó anyagok tulajdonságai is nagymértékben eltérhetnek egymástól.

A szinterelt kerámiák forgácsolása

Szinterelt kerámiák forgácsoló megmunkálásánál az anyagleválasztás háromféle formája képzelhető el:

- A szemcsék elhasadása, elvágása (nagy krisztallithatár szilárdság esetén) a (Cottrel-féle) hasadási diszlokációk terjedésének következményeként.

- A szemcsék speciális nagy hőmérsékletű képlékeny alakváltozása, illetve elkenődése a levált forgácsdarabok mozgásának és felpadásának következményeként.

- A szemcsék kifordulása (kis krisztallithatár szilárdság esetén) annak következményeként, hogy a krisztallithatár szilárdsága kisebb, mint az anyag aktuális hőmérsékletéhez tartozó folyási határa illetve törőszilárdsága. A kiperzés erősen függ az egyes szemcsék geometriai környezetétől, beágyazottságától (pl. pórusok és egyéb szélék közelségétől).

* Budapesti Műszaki Egyetem, Mechanikai Technológia és Anyagszerkezettani Tanszék

** National Technical University of Athens, Department of Mechanical Engineering, Manufacturing Technology Division

A forgácsolt felület minőségét befolyásoló anyagszerkezeti tulajdonságok

Az adott kerámia anyagra jellemző átlagos felületi pórusűrűsége, a pórus méret- és alakeloszlásra (a széleken tapasztalható kipergettől eltekintve) nyilvánvalóan nincs hatása a megmunkálási műveleteknek. Ezek, mint láttuk, csak az előzetes porkohászati technológia következményei [1]. Így egy-egy forgácsolási művelettel elérhető mérettartás és felületi minőség csak a ténylegesen megmunkált (domináns) felületre vonatkozóan értelmezhető.

Ezekén túlmenően fellép az élek forgácsolásánál jól ismert jelenség a minta belső tartományaiban is. Mivel a minta (a pórusok létéből adódóan) nem tekinthető kontinuumnak, számítani kell arra, hogy a forgácsoló élek okozta mechanikai feszültség illetve a bevitt energia egy része nem az anyagleválasztásra, hanem a szemcsék rugalmas deformálására fordítódik. Az él tovahaladtával ez a rugalmas alakváltozás megszűnik. Elvben definiálni lehetne egy olyan effektív (az optikailag láthatónál nagyobb) pórusfelületet, amely mind a mérettartás, mind a felületi minőség szempontjából csökkent értékű.

Sokélű forgácsolószerszámmal történő megmunkálás esetén gyakori jelenség, hogy a pórusokban eltárolódnak a durvább csiszolószemcsék és a forgácsdarabkák is. Ezek a finomabb megmunkálási fázisokban előbukkanva rontják a felületi minőséget vagy feleslegesen megnövelik a művelet időtartamát.

A leírtak alapján könnyű arra a következtetésre jutni, hogy a finomforgácsolásra szánt kerámiáknál a minél kisebb porozitás – a praktikumban a minél nagyobb sűrűség – elérése érdekében kívánatos a minél nagyobb sajtózási nyomás és a minél nagyobb szinterelési hőmérséklet alkalmazása. Elvben ez természetesen igaz is, de a megvalósítást lehetővé tevő technológiák költségkihatásai minden gyártót megalakúvársra – szebben fogalmazva (mint az élet minden más, beleértve a műszaki gyakorlat, területén) – az optimum keresésére készítetnek.

A sajtózási területén látszik jelenleg több elérhető technológiai tartalom (többtengelyű és HIP módszerek). A szinterelés gyakorlatilag mindenhol már olyan hőmérsékleten zajlik, ami a levegő atmoszférában működtethető – ezen szempontból legjobb minőségű – ellenálláshuzal fűtőanyagokkal még megvalósítható.

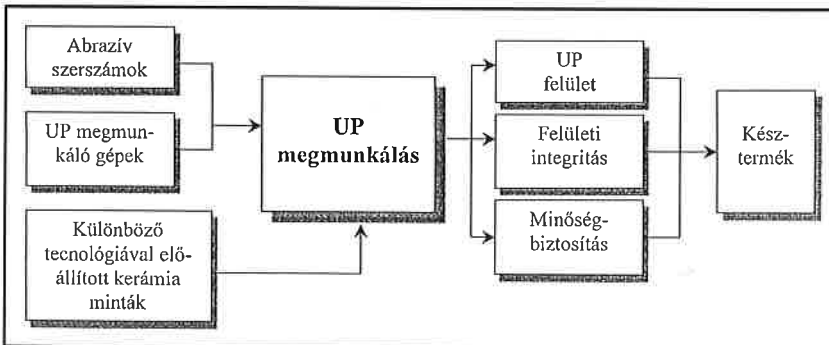
Technológiai kísérletek

A Nogava szerinti [8] koncepciót elfogadva az e tárgy körben kifejtett tevékenységünk egyszerűsített blokkémszerű összefoglalását az 1. ábra mutatja.

Az alkalmazott szinterelési technológia

A jelenleg ismertetendő kísérleteinkben azonos alapanyagból különböző sajtózási nyomásokkal előállított ún. zöld termékeket azonos technológiai paraméterekkel (együtt) szintereltük [2]. Ezt követően a minták durvább majd finomabb forgácsoló megmunkálást kaptak.

Alapanyagként 95% Al₂O₃ tartalmú, 250 µm átlagos szemcseméretű granulátumot használtunk fel. Ez lényegében megfelel az ipari kerámiaalkatrész-gyártásra jellemző tisztasági foknak.



1. ábra. A kísérleti tevékenységünk blokkémsája

A sajtózással – három különböző erő alkalmazásával – elvben azonos méretű gyűrű alakú mintákat gyártottunk. A szerszámméret kialakítását az határozta meg, hogy a zsugorodást követően a késztermék névleges mérete Ø27 x Ø17 x 4 mm legyen. Ezen technológiai fázisra vonatkozó legfontosabb jellemzőket és a vastagsági méretek átlagértékét az I. táblázat foglalja össze.

I. táblázat

Sajtoló nyomás (tonna)	A sajtolás utáni mintavastagság (mm)	A vizsgált minták darabszáma
5	5,15	9
3	4,82	9
1,8	5,02	9

Az összes mintát egyszerre – azonos technológiával – szintereltük, ami esetünkben T=1570±20 °C, és t=5 óra paraméterekkel jellemezhető.

A II. táblázatban a szinterelés utáni jellemzőket láthatjuk.

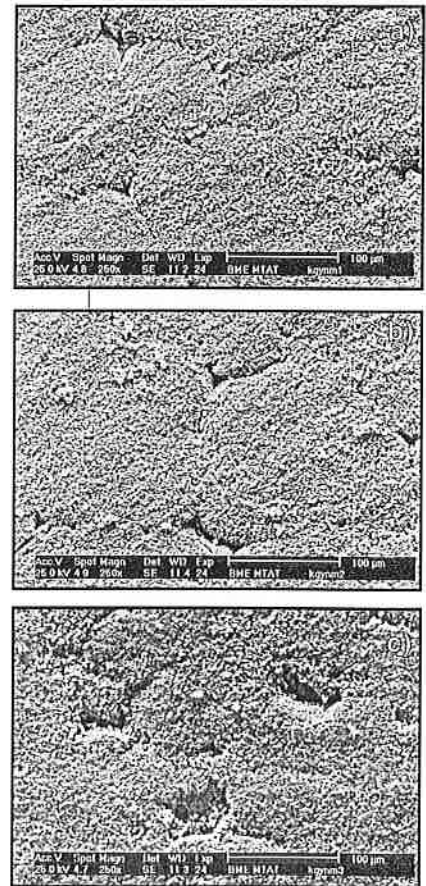
II. táblázat

Sűrűség (g/cm ³)	A szinterelés utáni méretek átlaga		A vizsgált minták darabszáma
	átmérők (mm)	mintavastagság (mm)	
3,795	Ø27,5xØ17,3	4,4	9
3,775	Ø27,3xØ17,1	4,1	9
3,770	Ø26,9xØ16,9	4,2	9

A mért sűrűségváltozás a várakozásunknak megfelelően alakult. A méretváltozások pontosabb számszerű értékelése a tapasztalt méretszórások miatt értelmetlen, de itt is a megfelelő tendenciájú változás érzékelhető. A zsugorodás közvetlen értékei a nyomásnövekedés irányában: 17,5; 16; 15%-ra tehető.

A szinterelés során kialakult felületek jellemző képét mutatja 150-szeres nagyításban az 2.a.b.c. ábrásor. Az ábrákon jól megfigyelhető, hogy a szinterelés hatására 50-200 µm szemcseméret-tartományba eső szilárdtest jön létre.

Az is megállapítható, hogy a nagyobb



2. ábra. A szinterelt kerámiagyűrűk felülete a sajtózási nyomás csökkenésének (a–c) sorrendjében

sajtölési nyomás alkalmazásának hatására mind a pórusok átlagos mérete, mind azok mennyisége csökken.

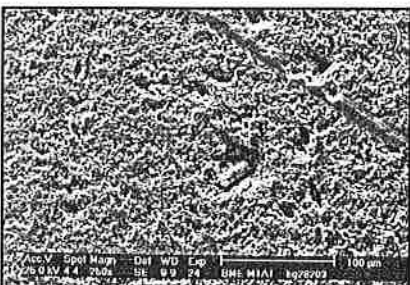
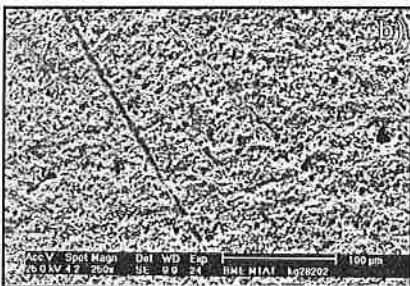
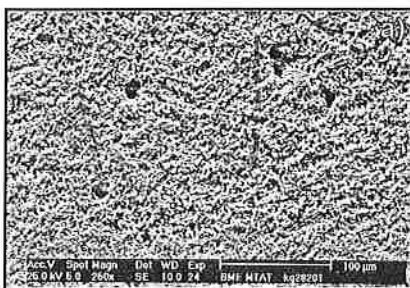
A durva-megmunkálás és hatása

A szinterelést követően a gyűrűk először durva-megmunkálásra kerültek. Ezen technológia lényegi jellemzői:

- A csiszolóanyag: vízben szuszpendált 28/20 gyémántpor.
- Gömbgrafitos öntöttvas polírozótárcsa.
- Az egyszerre megmunkált minták száma: 10 db.
- Az alkalmazott nyomóerő: 760 N.
- A tárcsa fordulatszáma: 56 min⁻¹.
- A tárcsa átlagos kerületi sebessége: 70,5 m/min.

A gyártott mintákból minden nyomásfokozatnak megfelelően 3-3 db került finomszerkezet-vizsgálatra.

A megmunkálás révén nyert felületeket mutatja a 3.a.b.c. ábrásor – a jobb összehasonlíthatóság érdekében – szintén 150-szeres nagyításban.



3. ábra. A kerámiagyűrűk felülete a durva-megmunkálás után a sajtoló nyomás csökkenésének (a-c) sorrendjében

Általános jellemzőként megállapítható, hogy a különböző sajtölési nyomással készült 95%-os tisztaságú Al₂O₃ kerámiák durva-megmunkálási nyomaiban nincs lényegi különbség. A forgácsolás eredménye, vagy – talán az itt történeteket jobban tükröző megfogalmazásban – a felületi minőség javulása többnyire a felületből durván kiálló szemcsék eltávolításának és egy nem folytonos felületet alkotó képlekenyen elkent réteg kialakulásának az eredménye.

Érdekes, hogy a 28/20 megmunkálási fokozat hatása a felületnek csak viszonylag kis hányadára (20-30%-ra becsülhető) terjed ki. A helyenként előforduló durva karcok valószínűsíthetően a pórusok által begyűjtött és később kiszabadult – az átlagos szemcseméretet jóval meghaladó méretű – gyémántszemcsék nyomai.

A finom-megmunkálás és hatása

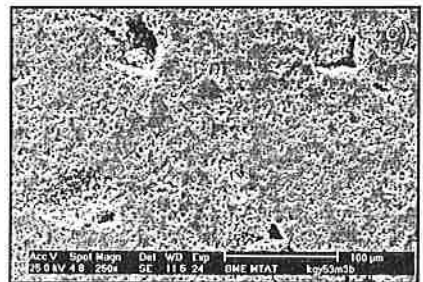
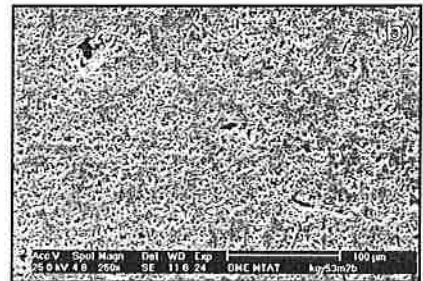
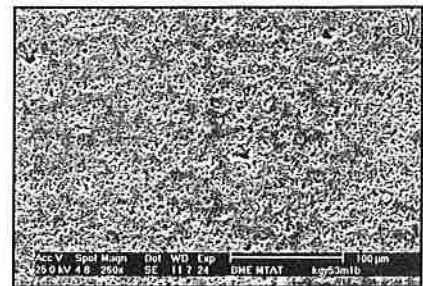
A durva megmunkálást követő finom-megmunkálási technológia lényegi jellemzői:

- A csiszolóanyag vízben szuszpendált 5/3 gyémántpor.
- 99,99 Sn polírozótárcsa.
- Az egyszerre megmunkált minták száma: 10 db.
- Az alkalmazott nyomóerő: 760 N.
- A tárcsa fordulatszáma: 32 min⁻¹.
- A tárcsa átlagos kerületi sebessége: 30 m/min.

A gyártott mintákból minden nyomásfokozatnak megfelelően ugyancsak 3-3 db került finomszerkezet-vizsgálatra.

A finom-megmunkálás révén nyert felületeket mutatja a 4.a.b.c. ábrásor 150-szeres nagyításban.

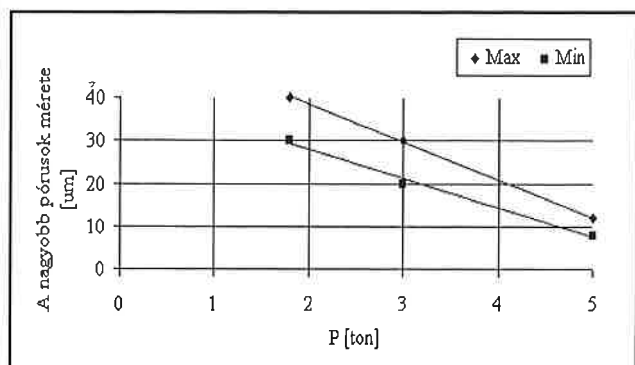
Ennél a technológiai lépésnél a megmunkálás már becsülhetően a teljes felület 60-65%-ra terjedt ki. Jól érzékelhető, hogy a sajtölési nyomás csökkenésével az apróbb pórusok mérete növekszik, de a durvább eltérés a rosszul szinterelődött nagyobb üregek méretnövekedésében mutatkozik meg. A III. táblázat és a 5. ábra a minták összes pórusfelületének 87 felület-%-át kitevő nagyobb pórusok méret-tartományait mutatja be. A legnagyobb pórusméret lényegi szerepe az, hogy meghatározza a zárófelület minimális szélességét a tömítést igénylő felhasználásoknál.



4. ábra. A kerámiagyűrűk felülete a finom-megmunkálás után a sajtoló nyomás csökkenésének (a-c) sorrendjében

III. táblázat

sajtölési nyomás:	nagy pórusok:
5 tonna	8-12 μm
3 tonna	20-30 μm
1,8 tonna	30-40 μm



5. ábra. A nagyobb pórusok méretének a változása a sajtölési nyomás függvényében

Értékelés

Az adott technológiával már az 1,8 t sajtölési nyomással készült minták esetén is összefüggő megmunkált, ún. domináns felület alakult ki (pl. a folyadékzárás már biztosítható). Ez természetesen azt is jelenti, hogy a szinterelési technológia révén a minták túljutottak a perkolációs küszöbön, a pórusok különváltak, nem alkotnak összefüggő hálózatot.

ANYAGOK

Ugyanakkor azonban (mintáinkat ugyanezen technológiával, de 96%-os tisztaságú alapanyagból hasonló célra készült kerámiatermékekkel összehasonlítva) az is megállapítható, hogy az apró pórusok eltűnése, a maradékpórusok egyesülése és gömbösödése itt kisebb mértékű. Vélelmezhetően a szinterelési hőmérséklet emelése javulást eredményezne. Ebből következően mintáinkon a ténylegesen forgácsolt relatív felület is kisebb.

A megmunkált felületet megfigyelve érdekesnek mondható (meg egyezően több más megfigyeléssel), hogy az alig tartalmaz klasszikus forgácsolásra utaló nyomokat. A felületen minden esetben jellegzetesen egy képlékeny alakítással elkent felületi réteg jön létre. Hasonló felvétel található pl. az [6] irodalomban. Több cikkben található a forgácsleválasztásra vonatkozó diszlokációs mechanizmusokat feltételező modellek, de a legtöbb esetben tisztázatlan marad, hogy milyen típusú diszlokációról van szó és a diszlokációmozgás révén repedés vagy képlékeny alakváltozás jön-e létre, lásd a [3], [4], [5] irodalmakat. Ezekben, a golyómodellekkel érzékeltetett változásokkal modellezve, feltételezik az atom-sűrűség lokális megváltozását, de nem mondják ki, hogy ez csak a rács-szerkezetváltozás esetén következhet be.

Megfigyeléseink alapján feltételezhető, hogy a forgácsolt felületen kisebb-nagyobb mértékű kristályszerkezeti- és ennek megfelelően, fázisarány-változás zajlik le. Ennek következtében a megmunkált felület fizikai-kémiai tulajdonságai is megváltoznak, eltérnek a tömb (bulk) anyag tulajdonságaitól. Érvelésünket alátámaszthatja az a tény, hogy a különböző technológiákkal (különösen a plazmaszórás alkalmazása esetén) leválasztott Al_2O_3 rétegek szerkezetvizsgálataival foglalkozók egyre több szerkezeti módosulást felismeréséről / azonosításáról számolnak be.

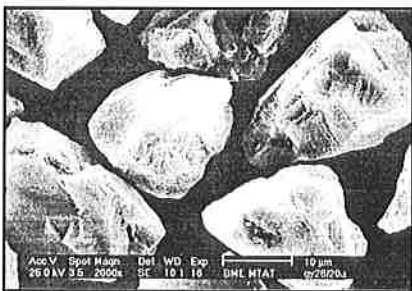
A továbbiakban anyag-szerszám kölcsönhatást vizsgálva próbáljuk értelmezni ezen képlékenyen alakított réteg létrejöttének okait és szerkezetét.

A kerámia-szerszám kölcsönhatás

Az ismertetett forgácsoló technológiákhoz kétféle méretű, sokélű gyémántszerzámot (csiszolóport) alkalmaztunk. A gyémántpor, és a gyémánt mikroporok használatának alapvető szempontjait összefoglalva pl. a [9], [10] irodalomokban található. Itt a megmunkáló gyémántszemcsék vizsgálatáról és a kerámia-szerszám kölcsönhatás megfigyelhető jelenségeiről számolunk be.

A durva szerszámanyag használat előtti állapota

Mindkét gyémánt csiszolópor a méret- és alakeloszlása alapján megfelel a kategóriájának. Itt a továbbiakban – a jobb összehasonlíthatóság végett – többnyire csak azonos nagytípusú szekunder elektron-

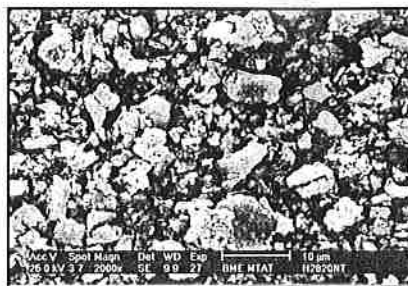


6. ábra. A durva, 28/20 gyémántpor használat előtti állapota

képekkel találkozunk. Ezekből a felvételekből nehéz megítélni, de azonos szemcseméretre történő nagytípusoknál mindkét szemcsehalmaz méreteloszlása és élszerkezete a meg-tévesztésig hasonló képet mutat. A gyémánt csiszolóporokat – mint említettük –

A szerszámanyag vizsgálata a durva-megmunkálás után

A durva-megmunkálás után visszamaradó frakcióban – preparálás



7. ábra. A durva-megmunkálás után visszamaradt forgács

nékül – a gyémántszemcsék meg sem találhatók a rájuk tapadt Al_2O_3 „forgácsok” és egyéb szennyezők miatt. A 7. ábrán látható a kiszűrt frakció beszárított maradványa.

EMP módszerrel azonosítva itt minden látható szemcse gyakorlatilag Al_2O_3 a felületére rákent szennyezőkkel. A látott felületen mért szennyező-tartalmat illetve ennek mennyiségi és minőségi viszonyait mutatja az IV. táblázat.

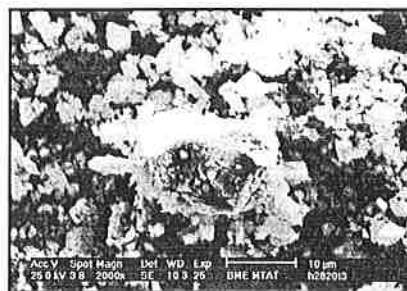
A Si és a Ca az Al_2O_3 szennyezői, a Fe a polírozótárcsából, a Cr a tárcsa ötvözött acéllal történt polírozásából kerülhetett ide. Szén felületet (gyémántot) még tört szemcsék formájában sem sikerült találni, ami azt jelenti, hogy a gyémántszemcsék felületén vastagon elkenődnek a leválasztott alapanyag egyes szemcséi ill. a szennyező anyagok.

IV. táblázat

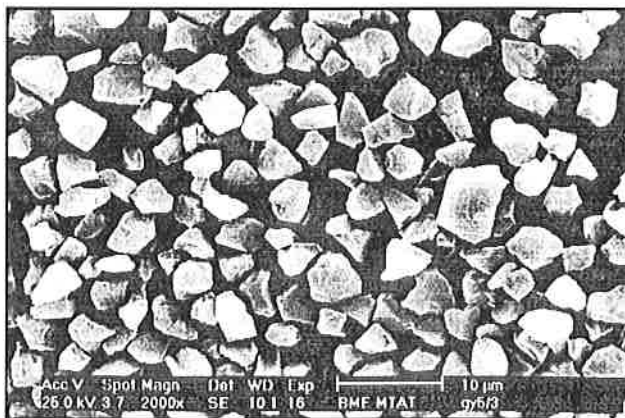
Elem	súly%
Si	16,3
Ca	0,7
Cr	4,9
Fe	23,5

Kioldva a fémes szennyezőket gyakorlatilag csak a leválasztott Al_2O_3 (a világos területek) és a gyémántszemcsék maradnak vissza. Az ismételt kémiai elemzés is ezt igazolta, ebben az állapotban már csak C, Al, O, és Si jelenléte volt kimutatható.

A 8. ábra közepén egyetlen gyémántszemcsét láthatunk a rákenődött kerámiaanyaggal. Az ábrán érzékelhető a leforgácsolt Al_2O_3 szemcsék többségének 1–4 μm mérete és (ahol nincs összetapadva) sokszögű alakja. Tehát a leválasztott „forgácsdarabkák” – legalább-



8. ábra. A 7. ábra szerinti forgács a tisztítás után



9. ábra. A finom, 5/3 gyémántpor használat előtti állapota

VI. táblázat

Fázis	Kémiai összetétel	Reference patterns
Corundum	Al ₂ O ₃	10-0173
Spinel	MgAl ₂ O ₄	21-1152
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	41-1486

is a térfogatra nézve – döntő többsége megegyező nagyságú a forgácsolt szinterelt anyag átlagos szemcseméretével. Így kézenfekvőnek látszik annak a feltételezése, hogy a leválasztott forgácsmennyiség döntő része a felületből kiálló szemcsék kiforgatásából származik.

A használt gyémántszemcséken szignifikáns kopás nem érzékelhető, hasonló megállapítás található az [12, 13] cikkben.

A finom szerszámanyag használat előtti állapota

A vizsgálatokat a finom-megmunkáláshoz felhasznált 5/3 gyémánt csiszolóporon megismételve a használat előtti állapot a 9. ábrán látható. (A sötét háttér minden felvételnél a beágyazó ragasztófelület képe.) A kívánt felületi minőség eléréséhez szükséges (8 perces) polírozási időt az [11] irodalom alapján választottuk. Esetünket a 5,5 N/cm² lapnyomás jellemzi, amelynek az említett irodalom szerint 0,04 μm R_a érték felel meg.

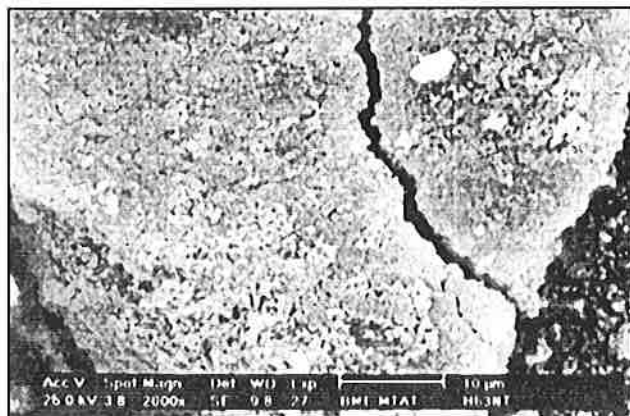
A szerszámanyag vizsgálata a finom-megmunkálás után

A forgácsolás után visszamaradt szűrt és beszárított frakcióban a gyémántszemcsék egyáltalán nem, Al₂O₃ forgács alig-alig azonosítható, mert tömör fémes törmelékbe ágyazódnak (10. ábra), megegyezően mások tapasztalataival [11]. Az ábra mutatta felületen mért szennyező-tartalom az V. táblázat szerint alakult.

V. táblázat

Elem	súly%
Si	8,5
Sn	74
Ca	2,3
Fe	0,6

A számadatokból is kitűnik, hogy a fémes törmelék döntően az Sn polírozótárcsa anyagából áll.



10. ábra. A finom-megmunkálás után visszamaradt forgács

A fémes szennyezők kioldása utáni állapot a 11. ábrán látható. A kép közepén egy gyémántszemcse (fehér, nyújtott trapéz alakú terület) található a felületére rákenődött kerámiával. A 2 μm-nél nagyobb szemcséket egyenként azonosítottuk. Mindegyik egyedi vagy összetapadt szemcsékből álló Al₂O₃ forgács, néhányban C is kimutatható, ami belül gyémántszemcse jelenlétére utal.

A munkadarab vizsgálata

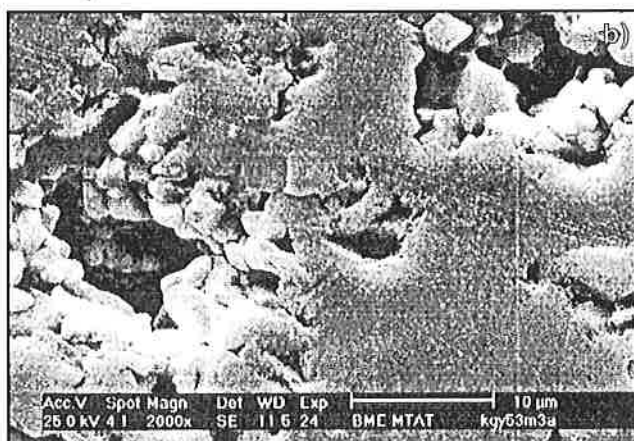
Forgácsolás után vizsgálva a felületi morfológiát a képlekenyen alakított felület kialakulása nyomon követhető mind a 28/20 durva- (12.a. ábra), mind az 5/3 finom-megmunkálás (12.b. ábra) esetében.

A mintáinkban, normál röntgendiffrakciós módszerrel, háromféle – a VI. táblázatban összefoglalt – kristályos fázist sikerült azonosítanunk.



11. ábra. A 10. ábra szerinti forgács a tisztítás után

Karakterisztikus változásnak tekinthető, hogy az anorthite fázis részaránya a felületen jól kimutatható módon megnő (a két megmunkálás hatására 2%-ról 5%-ra), a spinel fázis nem mutatott mennyiségi változást.



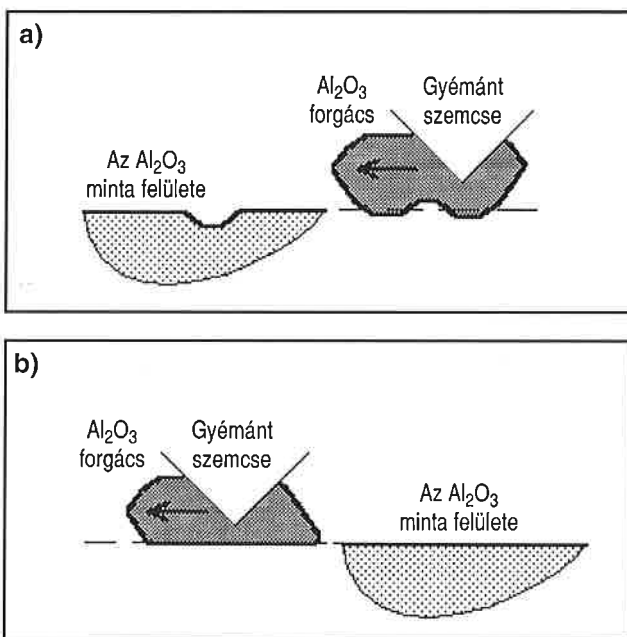
12. ábra. A kerámiagyűrű képlekenyen alakított felülete a durva- (a) és a finom-megmunkálás (b) után

Értékelés

Sem a nagyobb, sem a kisebb szemcseméretű gyémántnál az élek legömbölyödésére vonatkozó korrekt megállapítás nem tehető, mert a legtöbb forgácsolószemcse felületének nagyrésztét beteríti az Al_2O_3 .

Minden megfigyelésünk azt támasztja alá, hogy az egy időben kevés szerszám–anyag érintkezési felületen a kerámia lokálisan magas hőmérsékletre hevül. Ennek következtében a kerámia felületi rétege képlékenyen alakíthatóvá válik és a magas hőmérsékletnek megfelelően itt egy időben egy újraszajtolási és újraszinterelődési folyamat zajlik le. Esetünkben a látott felületi morfológia nem igazolja az [1] irodalomban található, sematikusan feltételezett benyomódási effektusokat. Magára a gyémántszerkezetre is rászinterelődik a kerámia alapanyag. Talán az észlelt karcok ritkasága is megerősíti azt a megállapítást, mely szerint itt többnyire Al_2O_3 felületek csúsznak el egymáson és a gyémánt lényegi szerepe nem a forgácsolóképeségében, hanem a rendkívüli hőszilárdságában és jó hővezetőképességében rejlik. A [14] Al_2O_3 esetén beszámol a köszőrülésnél tapasztalt a felületi elkenődésszerű képlékeny alakváltozás észleléséről, de a jelenséget további értelmezése nélkül hagyja.

Ezt a „vágás” mechanizmust sematikusan szemlélteti, felkenődés előtt a 13.a. ábra és felkenődés után a 13.b. ábra. (Az is feltételezett, hogy a felületi réteg szerkezete és/vagy amorf jellegű.)



13. ábra. A 12. ábra szerinti felületet eredményező forgácsolás mechanizmusa

A feltételezésünk szerinti, a felületen kialakuló nem kristályos üveg-fázis létét a röntgendiffrakciós vonalprofil analízissel nem sikerült egyértelműen kimutatnunk. A mért vonalszélesedés olyan nagyságrendű, amit még a szemcseméret-szórásis effektus is okozhat.

A probléma részbeni megválaszolására a mintákat HF-ban kezeltük amely a kisebb kötési energiával rendelkező (ilyen az üveg is) fázisokat könnyebben oldja. A kezelés hatására a megmunkált felület drasztikusan fagy, emellett újra előtűnnek a felületre kifutó szemcsehatárok.

A finom-megmunkáláson is tülesett mintánál pedig jól érzékelhető a domináns felület megszűnése. A lazább kötésű fázisok eltávolítása után a megmunkált felületek már nem alkotnak összefüggő tartományt, mivel a pórusok egybenyíltak. Megítélésünk szerint ennek az effektusnak a következménye az a jelenség amit a [15] cikk a szemcseméret csökkenéseként interpretál. A maratás után a szemcsehatárok menti árokképződés, a szemcseélek legömbölyödése is (a tényleges

traszkrisztalin törések mellett) erős szemcseméret-csökkenés illúzióját kelti.

A röntgendiffrakcióval kimutatott fázisarány-változás a valóságban jóval nagyobb lehet, mert az alkalmazott nyaláb becsült behatolási mélysége esetünkben lényegesen meghaladta a forgácsolás fogásmélységét. Tehát a „látott” térfogatnak csak relatíve kis része szolgáltatott a változásra jellemző információt.

A fentieket azonban kiegészítve a maratási kísérleteink eredményeivel, véleményünk szerint egyértelműen igazoltnak tartható a forgácsolás hatására bekövetkező felületi mikrostruktúra-változás.

Nem utolsósorban említhető az a tény, hogy a vázolt „forgácsolási” mechanizmusnak a feltételezésével a megmunkált felület, optikai képe, jellege és kialakulása a mikroszerkezetben kimutatható változásokkal összhangba hozható.

Összefoglalás

A különböző porozitású, ultraprecíziósan megmunkált Al_2O_3 kerámia anyagok vizsgálati eredményei alapján megállapítható, hogy a gyémántporral végzett megmunkálást nem a klasszikus forgácsolási, hanem egy felületi képlékeny alakváltozási folyamat jellemzi. A szerszámnyomás okozta lokális felmelegedés hatására a kerámia felületen egy újraszinterelődési folyamat zajlik le. A felületi réteg tényleges képlékeny alakítását a gyémánt csiszolószemcsékre szinterelődött kerámiaforgács hozza létre. Ez a szerszámként alkalmazott gyémántpor és a kerámia kölcsönhatására alapozott szemlélet újszerű eredménynek tekinthető.

Irodalom

1. K. Kitajima, G.Q. Cai, N. Kumagai, Y. Tanaka, and H.W. Zheng: Study on mechanism of ceramics grinding, *Annals of the CIRP* 41(1), p. 367-371, 1992.
2. R. Komanduri, D.A. Lucca and Y. Tani: Technological advances in fine abrasive processes, *Annals of the CIRP* 46(2), p. 545-596, 1997.
3. Bi Zhang and T.D. Howes: Material-removal mechanism in grinding ceramics, *Annals of the CIRP* 43(1), p. 305-308, 1994.
4. T. Nakasuji, S. Kodera, S. Hara, H. Matsunaga, N. Ikawa and S. Shimada: Diamond turning of brittle materials for optical components, *Annals of the CIRP* 39(1), p. 89-92, 1990.
5. V.C. Venkatesh, I. Inasaki, H.K. Toenshoff, T. Nakagawa and I.D. Marinescu: Observation on polishing and ultraprecision machining of semiconductor substrate materials, *Annals of the CIRP* 44(2), p. 611-618, 1995.
6. V.C. Venkatesh, F. Fang and W.K. Chee: On-mirror surfaces obtained with and without polishing, *Annals of the CIRP* 46(1), p. 505-508, 1997.
7. ASM International handbook committee, "Ceramics and Glasses", *Engineered materials handbook*, 4, p. 261-265, 1991.
8. ASM International handbook committee, "Ceramics and Glasses", *Engineered materials handbook*, 4, p. 322, 1991.
9. J.E. Field (1979): "The properties of Diamond", Academic Press
10. J. Wilks, E. Wilks (1991): "Properties and Applications of Diamond", Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford
11. A.G. Mamalis, R. Schulze and W.K. Tonshoff (1979): "Experimental investigations into hard-rock removal processes using a segmental diamond wheel", *Proc. 20th Inter. MTDR Conf., Birmingham UK 1979*, Mc Millan Publishing Co., p. 361-370.
12. A. Wagemann (1994): "Wirkzusammenhänge beim Planparallellpolieren von Hochleistungskeramik", *Diss. RWTH Aachen*, p. 67-70.
13. A.G. Mamalis, R. Schulze and W.K. Tonshoff (1979): "The slotting of blocks of hard rock with a diamond segmented circular sawblade", *Industrial Diamond Review*, 1979, p. 356-365.
14. B. Zhang, T.D. Howes (1995): "Subsurface Evaluation of Ground Ceramics", *Annals of the CIRP*, Vol: 44/1/1995, p. 263-266.
15. J. Yoshioka, F. Hashimoto, M. Miyashita (1987): "Application of Grinding Wheel to Ultraprecision Machining", *Symposium on Machining of Advanced Ceramic Components*, American Ceramic Society