

OBRABNA OBSTOJNOST KERAMIKE

Milan Ambrožič

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, Ljubljana

POVZETEK

Obstojnost keramike proti obrabi med vsakdanjo uporabo je poleg drugih mehanskih lastnosti – trdote, togosti, tlačne in natezne trdnosti ter žilavosti – velikega pomena. Obstaja sicer povezava med obrabno obstojnostjo in nekaterimi drugimi mehanskimi lastnostmi, kot je trdota, vendar ta povezava ni vedno enolična in razvidna, saj so za obrabo keramike pomembni tudi mnogi drugi dejavniki, kot so koeficient trenja med stičnimi površinami, morebitne kemijske reakcije zaradi močno povišane temperature in nastanek "triboplasti". Zato je treba obrabno obstojnost kvantitativno opredeliti in jo izmeriti v ponovljivih razmerah.

Wear resistance of ceramic materials

ABSTRACT

Wear resistance of ceramics in the every-day use is of great importance, besides other mechanical properties, such as hardness, stiffness, compressive and tensile strength and toughness. There is some connection between wear resistance and other mechanical properties, such as hardness; this connection is however not always one-to-one correlated or obvious since several other factors are relevant, e.g. coefficient of friction between the contact surfaces, possible chemical reactions due to highly increased temperature, and the formation of tribofilm. Therefore, it is necessary to define the wear resistance quantitatively and measure it in the reproducible circumstances.

1 UVOD

Strukturna keramika se je zelo uveljavila in marsikje vsaj delno nadomestila kovine. Posebej pomembni področji njene uporabe sta inženirska keramika (keramika kot sestavni del naprav) in biokeramika (protetična keramika), kjer mora imeti material odlične mehanske lastnosti: veliko trdnost in trdoto ter čim boljše žilavost. Kjer pa je njena površina izpostavljena vsakodnevnemu trenju z drugimi stičnimi površinami, npr. v sklepnih keramičnih protezah (umetni kolk, kolena) in pri zobni protetiki, mora imeti tudi dobro obstojnost proti obrabi.

Zato je treba obrabno obstojnost kvantitativno opredeliti in jo meriti v čim bolj ponovljivih razmerah. Obraba materiala pri drgnjenju ob enak ali drugačen material je seveda tem večja, čim večja je sila trenja med površinama, ta sila pa narašča s pravokotno silo, ki tišči podlagi eno ob drugo. Obraba narašča tudi s časom drgnjenja oziroma relativnim premikom med stičnima površinama. Tako je smiselno opredeliti "faktor obrabe" k kot

$$k = \frac{\Delta V}{F_n s} \quad (1)$$

kjer je ΔV zmanjšanje volumna materiala oz. preskusnega vzorca (vzeto kot pozitivna količina) zaradi obrabe, F_n je pravokotna (normalna) sila med stičnima

površinama, s pa je razdalja, ki jo pri trenju naredi ena površina relativno glede na drugo. Fizikalna enota za faktor k je npr. mm^3/J in je skladna s pričakovanjem, da je zmanjšanje volumna materiala sorazmerno z delom sile (ali z vloženo energijo). Namreč, za trganje medatomske vezi v materialu je potrebna energija, število potrganih vezi pa je sorazmerno tako z volumnom odnesenega materiala kot z energijo. Zavedati pa se moramo, da ta sorazmernost velja le do določene mere, saj so prisotni različni mehanizmi odnašanja materiala s površine.

Po drugi strani je sila trenja F_{tr} med stičnima površinama bolj merodajna od normalne sile F_n , saj je delo sile trenja, ki je vzporedna z relativnim gibanjem obeh površin, različno od nič, medtem ko je delo normalne sile nič. Sila trenja je sicer sorazmerna z normalno silo, vendar pa je odvisna tudi od koeficienta trenja k_{tr} : $F_{tr} = k_{tr} F_n$. Tako je lahko pri isti normalni sili F_n in pri sicer enaki keramiki hitrost obrabe zelo različna, če imamo različne koeficiente trenja med stičnima površinama, npr. zaradi oblivanja površin z vodo. Zato se morda zdi bolj smiselna zamenjava normalne sile s silo trenja v enačbi (1). Delo sile trenja $F_{tr} \cdot s$ lahko neposredno izmerimo, če je elektromotor, ki pri obrabnem preskusu vrtil vzorce glede na drsno podlago (ali nasprotno), opremljen s prikazovalnikom njegove moči, ki jo pomnožimo s časom trajanja preskusa. Vendar če je pri neki aplikaciji koeficient trenja vedno enak, je normalna sila vedno sorazmerna s silo trenja, tako da je enačba (1) povsem uporabna.

Z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) in drugimi mikroskopskimi tehnikami lahko pregledamo površine po obrabnem preskusu in sklepamo o mehanizmi obrabe. Na primer, ugotovimo lahko, ali pri določenih pogojih nastane intenzivno trganje celih kristalnih zrn iz materiala, s čimer se močno poveča obraba.

2 ZGLEDI MERITEV OBRABNE OBSTOJNOSTI IZ LITERATURE

Tu se omejim na opis obrabne obstojnosti dveh najpomembnejših inženirskih in biomedicinskih keramičnih materialov: aluminijevega in cirkonijevega oksida (Al_2O_3 in ZrO_2) in njunih kompozitov. Kar se tiče protetičnih materialov, se je Al_2O_3 uveljavil predvsem za kolčne proteze (v manjši meri v zobni protetiki), ZrO_2 pa za zobne nadomestke in le delno za umetne sklepe. V obeh primerih je zelo pomembna

obrabna obstojnost, zato je bilo narejenih veliko raziskav vedenja obeh keramičnih materialov pri obrabnih preskusih.⁽¹⁻¹¹⁾ Za vedenje teh materialov pri trenju in obrabi se je uveljavilo tudi ime "tribološke lastnosti materialov". Ime izhaja iz tega, ker pri stiku in relativnem gibanju razmeroma gladkih površin dveh trdih materialov nastane med njima še tretja plast, na kratko triboplast, in sicer iz aglomeriranih odkrušenih delčkov z ene ali obeh keramičnih površin.⁽⁶⁾ Nastanek triboplasti na eni ali na obeh stičnih površinah trdih keramik je zapletena kombinacija tlačnih napetosti, faznih transformacij, kemijskih reakcij zaradi povišanih temperatur ob trenju, kompakfikacije odkruškov (ang. debris) in adhezije na prvotno keramično površino.

Triboplast spremeni hitrost obrabe ene ali obeh površin, med drugim zato, ker se zaradi nje spremeni koeficient trenja med površinama.^(3,7,9) Kemijsko in fazno sestavo triboplasti ter njeno hrapavost, ki seveda močno vpliva na koeficient trenja, lahko preučimo z vrstičnim in presevnim elektronskim mikroskopom (SEM in TEM), rentgensko spektroskopijo, mikroskopom na atomsko silo (AFM), ramansko spektroskopijo, optičnim mikroskopom – profilometrom itd.⁽¹⁻¹⁰⁾ Koeficient trenja zaradi triboplasti je v osnovi lahko večji ali manjši kot pri začetnih keramičnih površinah, odvisno od pogojev preskusa. Poskusi kažejo, da se po začetnem spreminjanju (po določenem času preskusa oz. relativnem premiku med stičnima površinama) koeficient uravnoteži pri stalni vrednosti, kar kaže na to, da ga zares določa nastala triboplast.^(6,7,11)

Cirkonijev oksid za protetično uporabo je predvsem v polikristalni obliki z umetno stabilizacijo tetragonalne strukture, kar navadno dosežemo z molskim deležem nekaj odstotkov dodanega itrijevega oksida (Y_2O_3). V navadi je kratka oznaka Y-TZP (yttria – tetragonal zirconia polycrystals). Tetragonalna modifikacija ZrO_2 je pravzaprav metastabilna, saj ima pri sobni temperaturi globalni minimum proste energije monoklinska struktura. Zato je za metastabilni Y-TZP značilna lokalna transformacija v monoklinsko strukturo ($t \rightarrow m$) tam, kjer lokalna mehanska napetost v materialu doseže kritično vrednost.

To je po eni strani dobro za mehansko žilavost ZrO_2 , ki se zaradi možnosti transformacije $t \rightarrow m$ efektivno poveča.¹² Mehanizem tega tako imenovane transformacijskega ojačanja ZrO_2 je v tem, da ima monoklinska struktura večjo prostornino od tetragonalne, ker pa se v polikristalni obliki transformirana kristalna zrna ne morejo neovirano razširiti, povzroči transformacija lokalne tlačne napetosti v materialu. Tlačne napetosti lahko direktno zaustavijo širjenje kritične razpoke skozi snov ali vsaj absorbirajo del energije za njeno širjenje. Posledica tlačnih napetosti so tudi mikrorazpoke, ki tudi

absorbirajo del energije velike, kritične razpoke pri njeni lokalni interakciji z njimi.

Zaradi teh mehanizmov je značilna lomna žilavost K_C (merjena v nenavadnih enotah $MPa \cdot m^{1/2}$ = megapaskal krat koren iz metra) za ZrO_2 2-krat ali 3-krat večja kot za Al_2O_3 : $K_C \approx 6 MPa \cdot m^{1/2}$. Ravno lomna žilavost je inherentna lastnost materiala in ne trdnost (merjena v megapaskalih), ki je odvisna tudi od velikosti največjih defektov v materialu. Enota za lomno žilavost K_C izhaja iz tega, ker je trdnost materiala sorazmerna s K_C in obratno sorazmerna s korenomo velikosti največjih defektov. Po drugi strani pa se zaradi nastanka mikrorazpok na površini Y-TZP pri transformaciji $t \rightarrow m$ zaradi napetosti pri trenju površin lahko precej poslabša obrabna obstojnost materiala. Zato so začeli že takoj, ko se je pokazala možnost uporabe Y-TZP v protetiki, preučevati vpliv omenjene transformacije na njegove tribološke lastnosti.⁽¹⁻²⁾

Treba je najti kompromis med lomno žilavostjo in obrabno obstojnostjo ZrO_2 , razen tega pa rezultati raziskav kažejo na neenolično povezanost med tema veličinama, odvisno tudi od drugih pogojev obrabnih preskusov, ki med drugim določajo, kateri so poglobitveni mehanizmi obrabe. Medtem ko so Fischer in sodelavci ugotovili povečanje obrabne obstojnosti z večjo žilavostjo,⁽²⁾ je bila ugotovitev Basuja in sodelavcev ravno nasprotna.⁽⁷⁾

Aluminijev oksid ima sicer manjšo lomno žilavost kot cirkonijev oksid, ima pa večjo trdoto in navadno tudi večjo obrabno obstojnost, tj. manjši faktor obrabe pri enakih ali podobnih preskusnih pogojih. Danes marsikdo uporablja merilo, da je material dobro obrabno obstojen, če ima faktor obrabe po enačbi (1) manjši od vrednosti 10–15 m^3/J .^(8,10)

Krell in Klaffke sta primerjala obrabo Al_2O_3 , tetragonalnega ZrO_2 (z molskim deležem Y_2O_3 3 %) in kompozita Al_2O_3/TiC (TiC je titanov karbid).⁽³⁾ Pri tem je imela keramika Al_2O_3 različne povprečne velikosti zrn, od 0,4 μm do 3 μm , odvisno od majhne količine dodatkov, npr. MgO, ki imajo bistven vpliv na potek sintranja. Velikost zrn sta, kot je to v navadi, izmerila iz SEM-slik. Ob ravne površine vzorcev omenjenih materialov sta drgnila kroglice iz Al_2O_3 s premerom 10 mm. Obrabni preskusi so potekali v komori s kontrolirano temperaturo in vlažnostjo zraka. Drgnjenje kroglic Al_2O_3 ob vzorce je bilo oscilacijsko z amplitudo (polovičnim hodom) 0,2 mm in frekvenco 20 Hz; število ciklov je bilo 100 000 ob normalni sili 10 N. Poskus sta naredila pri sobni temperaturi, brez omakanja površin pri suhem zraku (relativna vlažnost 4 %) in vlažnem zraku (50-odstotna vlažnost), pa še tako, da sta kapnila malo destilirane vode med stični površini. Zmanjšanje volumna vzorcev zaradi obrabe sta izmerila z optičnim mikroskopom, z opazovanjem dimenzij sledi obrabe na vzorcih. Med preskusom sta

merila tudi koeficient sile trenja. Faktor obrabe sta izračunala po enačbi (1). Poleg obrabne obstojnosti materialov sta izmerila tudi njihov Youngov modul (meritev resonančne frekvence), trdoto in lomno žilavost (iz odtisov Vickersove piramide) in drugo.

Za Al_2O_3 sta ugotovila, da se z zmanjšanjem kristalnih zrn zmanjša faktor obrabe, torej poveča obrabna obstojnost. Nadalje, vlažen zrak ali tekoča voda med stičnima površinama zmanjšata koeficient trenja, kar v glavnem vodi do zmanjšanja faktorja obrabe. Faktorja obrabe Al_2O_3 in kompozita $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ sta podobna, obraba ZrO_2 pa je večja, ker pokažejo SEM-slike večjo površinsko razpokanost obrabne površine ZrO_2 v primerjavi s prvima dvema keramikama. Za boljšo obrabno obstojnost Al_2O_3 pri manjših zrnih so zelo pomembne mehanske lastnosti mej med kristalnimi zrnji, kar se kaže npr. v razmerju števila poti razpok po sredi zrn ali med njimi.

Z delčnimi homogenimi ali plastnatimi kompoziti $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ lahko združimo prednosti obeh keramičnih komponent za doseganje večje zanesljivosti umetnih sklepov.^(5,9) Novak in sodelovci so razvili simetrične plastnate kompozite $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (ZrO_2 stabiliziran z Y_2O_3) s tremi do sedmimi plastmi, tako da sta zunanji plasti iz Al_2O_3 , delež ZrO_2 pa se v notranjih plasteh povečuje. S tem so kombinirali veliko trdoto in obrabno obstojnost zunanjih plasti z veliko žilavostjo in upogibno trdnostjo notranjih plasti. Takšna sestava, kjer imajo notranje plasti večji prostorninski delež ZrO_2 kot zunanje, pa ima še eno posledico. Koeficient temperaturnega raztezanja ZrO_2 je večji kot pri Al_2O_3 , zato bi se notranje plasti pri ohlajanju od temperature sintranja do sobne temperature bolj skrčile kot zunanje, če bi bile proste. Ker pa so plasti povezane in se vse enako skrčijo, nastanejo v notranjih plasteh natezne preostale termične napetosti, v zunanjih plasteh pa tlačne. Le-te so za optimalne sestave plastnatih kompozitov v zunanjih dveh Al_2O_3 -plasteh enake več 100 MPa (negativne!). Zunanje tlačne napetosti še povečajo učinkovito upogibno trdnost kompozita,⁽¹³⁾ povečajo pa tudi obrabno obstojnost zunanjih površin.⁽⁹⁾

Obrabne preskuse kompozitov so Novakova in sodelavci izvedli na napravi TE77, Phoenix Tribology Ltd., Newbury, Anglija, in sicer z drsnim trenjem kompozitnih valjastih vzorcev (premer 36 mm, debelina 5 mm, ravne plasti razvrščene po debelini) ob 10-milimetrski kroglice iz Al_2O_3 , pri tem pa so bili vzorci potopljeni v destilirano vodo. Vzorci so bili pritrjeni v epoksi-smoli v nosilcu, gibanje kroglice Al_2O_3 pa je bilo enodimenzionalno drsno nihanje s hodom 7 mm in frekvenco 1 Hz. Normalna sila je bila $F_n = 50$ N, trajanje preskusov $t = 2$ h, kar je pomenilo relativno drsno razdaljo $s \approx 100$ m. Naprava je sproti merila silo trenja in z njo koeficient trenja. Sledi

obrade in obrabni volumen v vzorcih so izmerili z optičnim mikroskopom in profilometrom. Napetosti v posameznih plasteh so analizirali z rentgensko analizo (XRD) in nevtronsko difrakcijo. Tribo-pasti so preučili s SEM. Ugotovili so, da tlačne zunanje napetosti zmanjšajo število razpok v zunanjih plasteh, zmanjšajo količino odkruškov in s tem tudi debelino triboplasti, naredijo triboplast gladkejšo, s tem pa zmanjšajo koeficient trenja in dodatno povečajo obrabno obstojnost.

Novakova in sodelavci so izdelali tudi prototipno glavico kolčne proteze na osnovi plastnatega kompozita $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$. Pri izdelavi takšnih kompozitov in njihovih izdelkov pa je treba biti previden: prevelik prostorninski delež ZrO_2 v notranjih plasteh sicer poveča velikost ugodnih tlačnih napetosti v zunanjih plasteh, a poveča tudi natezne napetosti v notranjih plasteh, ki lahko povzročijo tunelske razpoke, le-te pa seveda močno zmanjšajo upogibno trdnost kompozita.⁽¹⁴⁾ Eksperiment in račun sta pokazala, da je varna meja okrog 20 % prostorninskega deleža ZrO_2 v najbolj notranji plasti.

Ker se aluminijev oksid uporablja tudi v zobni protetiki, čeprav manj kot cirkonijev oksid, so Kalin in sodelavci raziskali obrabo sintetičnega hidroksiapatita (HA) pri drgnjenju ob aluminijev oksid.⁶ Hidroksiapatit je namreč glavni sestavni del zobne sklenine, izdelava in priprava vzorcev iz umetnega HA pa je enostavnejša. Uporabili so mešanico Ceratite (NGK, Spark Plug Co. Ltd., Nagoya, Japonska), ki je vseboval 70 % masnega deleža pravega hidroksiapatita, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, in 30 % β -trikalcijskega fosfata (TCP). Za keramiko Al_2O_3 so vzeli vrsto In-Ceram (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Nemčija), ki se na splošno uporablja v zobni protetiki in vsebuje tudi infiltrirano lantan-aluminosilikatno steklo (le-to se nahaja na mejah med kristalnimi zrnji Al_2O_3). Pri obrabnih preskusih so drgnili HA-palčke dimenzij 5 mm \times 5 mm \times 15 mm z zaobljeno stično površino ob valje Al_2O_3 , in sicer v destilirani vodi. Parametri obrabe so bili: drsna hitrost $v = 2,5$ mm/s, sila $F_n = 10$ N, 20 N ali 30 N, drsna razdalja od $s = 3$ m do 20 m. Za merjenje obrabnega volumna so uporabili optični profilometer, za pregledovanje triboplasti in delčkov odkruškov (pobranih iz vode) pa mikroskopijo SEM, TEM in AFM.

Ugotovili so, da se površina Al_2O_3 skoraj nič ne obrablja in da k njeni obrabi prispeva le steklasta faza, na površini pa se ne tvori triboplast. Faktor obrabe HA je $1,1 \cdot 10^{-5}$ mm³/J = $1,1 \cdot 10^{-14}$ m³/J, in ta vrednost se uravnovesi nekako po 3 m drsne razdalje, podobno kot koeficient trenja, ki so ga sproti merili. Triboplast na obrabljenih površinah HA vsebuje različne strukture, njeni glavni elementi pa so kalcij, fosfor in kisik.

Liu in sodelavci so ugotovili, da dodatek 6 % (prostorninski delež) diopsida, $\text{MgCa}(\text{SiO}_3)_2$ precej izboljša tribološke lastnosti keramike Al_2O_3 . Obrabne preskuse so izvedli z rotacijskim drgnjenjem koluta iz ogljikovega jekla HRC 38–45 z notranjim radijem 35 mm in zunanjam radijem 50 mm ob kvadraste vzorce dimenzij 5 mm × 8 mm × 16 mm. Normalno silo so spreminjali od 50 N do 200 N, rotacijsko frekvenco jeklenega koluta pa od 40 r/min do 160 r/min. Silo in koeficient trenja so izmerili z meritvijo navora na kolut med vrtenjem, zmanjšanje prostornine vzorcev pa z optičnim profilometrom.

Med drugim so potrdili splošno znano dejstvo, da pri večjih silah F_n nastane bolj izrazito puljenje celih zrn, s čimer se močno poveča obraba. Zmanjšanje prostornine pa ni preprosto sorazmerno s silo F_n pri nespremenjenih drugih pogojih, saj je med drugim tudi koeficient trenja odvisen od F_n . Njihova najpomembnejša ugotovitev pa je verjetno ta, da se faktor obrabe $k = 10^{-15} \text{ m}^3/\text{J}$ za čisti Al_2O_3 pri danih pogojih preskusa zmanjša na desetino vrednosti pri 12-odstotnem deležu diopsida.



Slika 1: Fotografija nosilca s tremi belimi keramičnimi vzorci (a) in polirne naprave z nosilcem med prvo stopnjo obrabnih preskusov, s predhodnim poliranjem vzorcev na eni od treh polirnih plošč (b). Pri poliranju in obrabnem preskusu se vrtila spodnja plošča in nosilec z vzorci.

3 MERITEV OBRABNE OBSTOJNOSTI KORUNDNE KERAMIKE NA ODSEKU ZA INŽENIRSKO KERAMIKO

Ker na Odseku za inženirsko keramiko (K6) na Institutu "Jožef Stefan" nimamo komercialne naprave za merjenje obrabne obstojnosti keramike, smo se zatekli k improvizaciji. Zaradi sodelovanja z industrijo (AET, Tolmin) nas je zanimala obrabna obstojnost aluminijevega oksida Al_2O_3 . Obrabne preskuse lahko naredimo kar na napravi za poliranje keramičnih vzorcev, če poskrbimo za ponovljive pogoje preskušanja. Značilni postopek izdelave keramičnih valjastih vzorcev (tablet) je naslednji: vhodne prahove najprej meljemo z artritorskim mlinom 1 h v izopropanolu. Nato jih enoosno stisnemo v valjastem kalupu s silo 4900 N, nato pa izostatsko stisnemo pri sobni temperaturi (CIP = cold isostatic pressing) pri tlaku 740 MPa. Vzorce sintramo 3 h pri temperaturi 1640 °C v zraku pri normalnem tlaku. Pripravili smo vzorce premera okrog 16,5 mm in višine okrog 4,5 mm, jih prilepili z lepilom Wax (tališče pri okrog 95 °C) po tri na nosilec, jih spolirali na več polirnih ploščah, nazadnje pa še z diamantno pasto z delci velikosti 3 μm. Potem smo vzorce odlepili, jih očistili z ultrazvokom v acetonu, jih stehali in ponovno prilepili na nosilec.

Naredili smo 5-minutni obrabni preskus pri stalni normalni sili in frekvenci vrtenja spodnje polirne plošče in nastavka za nosilec z vzorci (slika 1). Vzorce smo drgnili ob smirkov papir, na katerega smo zlivali suspenzijo deonizirane vode in diamantne paste s povprečno velikostjo zrn 45 μm. Nazadnje smo vzorce odlepili, očistili in spet stehali. Masa vsakega vzorca pred poliranjem in obrabnimi preskusi je bila okrog 3,5 g, zmanjšanje njegove mase pa nekaj stotink grama, kar smo lahko brez težav izmerili na laboratorijski tehtnici. Nismo uporabili enačbe (1) za faktor obrabe, ker nismo poznali sile F_n , razen tega, da je bila zaradi posebnega mehanizma vpetja nosilca vzorcev stalna. Ker so bili vsi pogoji za vse vzorce enaki, nam je zadostovala primerjava zmanjšanja njihove prostornine. Izračunali smo prostorninsko obrabo na enoto časa:

$$w = \left| \frac{dV}{dt} \right| = \frac{\Delta m}{\rho t} \quad (2)$$

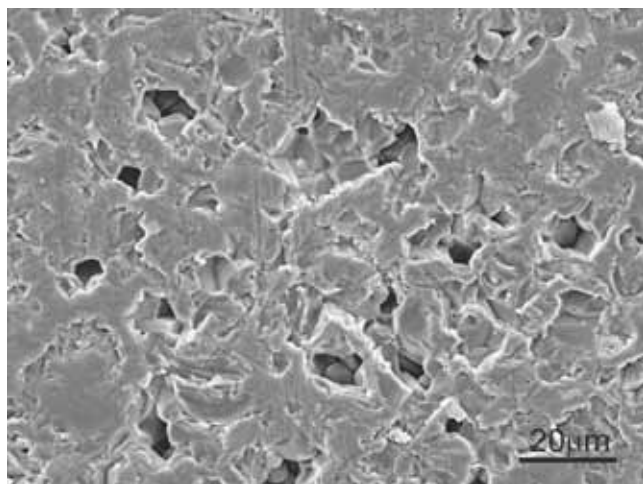
kjer je Δm zmanjšanje mase med preskusom, ρ gostota, izmerjena po Arhimedovi metodi, $t = 5$ min pa čas preskusa.

Izmerili smo obrabno obstojnost osem vrst keramike Al_2O_3 z različnimi dodatki, katerih sestavo – masne deleže prikazuje tabela 1. Keramiko z oznakami od 1 do 7 smo izdelali sami ali pa v podjetju AET iz Tolmina, s katerim sodelujemo pri optimizaciji Al_2O_3 -keramike, medtem ko je keramika z oznako 8 iz

nemškega podjetja Martinswerk in smo jo vključili v študij obrabne obstojnosti zaradi primerjave. Keramike 5–7 imajo enako sestavo, vendar je bilo nekaj razlik v postopku njihove izdelave. Za preverjanje ponovljivosti rezultatov smo za vsako vrsto keramike naredili po dva preskusa s po tremi vzorci. V zadnjem stolpcu tabele 1 je podana teoretična gostota keramike, izračunana na osnovi znanih gostot njenih sestavin. Dejanska gostota, izmerjena po Arhimedovi metodi, je manjša od teoretične, ker ima keramika poroznost med 3 % in 5 % (tabela 2).

Tabela 1: Sestava keramičnih vzorcev Al_2O_3 (v masnih deležih (%)) in njihova teoretična gostota

Oznaka	Al_2O_3 (%)	Steatit (%)	Drugo (%)	ρ_{teo} (g/cm^3)
1	97	3	-	3,93
2	94,08	3,92	ZrSiO ₄ : 2	3,92
3	94,08	5,92	-	3,875
4	94,08	3,92	AlTiO ₃ : 2	3,98
5	96	4	-	3,91
6	96	4	-	3,91
7	96	4	-	3,91
8	96	-	SiO ₂ : 1.9 CaO : 1.3 MgO : 0.8	3,93



Slika 2: Površina Al_2O_3 -keramike z oznako 1 po 5-minutnem obrabnem preskusu. SEM-mikroskop Jeol JSM-5800, povečava 1000-kratna, pospeševalna napetost elektronov 15 kV

Tabela 2: Rezultati meritev relativne gostote, velikosti kristalnih zrn, trdote in hitrosti obrabe po enačbi (2). Poleg povprečnih vrednosti so podane tudi standardne deviacije teh veličin.

Oznaka	Posebnost	ρ/ρ_{th} (%)	d (μm)	H_v (GPa)	w (mm^3/min)
1	manj steatita	$96,65 \pm 0,58$	$5,65 \pm 3,31$	$12,2 \pm 0,5$	$1,58 \pm 0,26$
2	ZrSiO ₄	$95,03 \pm 0,57$	$7,28 \pm 3,74$	$10,05 \pm 0,35$	$2,44 \pm 0,26$
3	več steatita	$94,77 \pm 0,67$	$4,65 \pm 2,45$	$9,9 \pm 0,65$	$2,72 \pm 0,14$
4	AlTiO ₃	$95,72 \pm 0,36$	$11,13 \pm 6,07$	$10,25 \pm 0,4$	$1,91 \pm 0,20$
5	ni mletja	$95,80 \pm 0,38$	$3,67 \pm 1,93$	$12,35 \pm 0,45$	$3,30 \pm 0,31$
6	-	$95,14 \pm 0,45$	$6,35 \pm 3,11$	$11,6 \pm 0,6$	$1,79 \pm 0,17$
7	ni mletja, CIP	$95,64 \pm 0,40$	$3,83 \pm 2,30$	$12,9 \pm 0,5$	$2,45 \pm 0,07$
8	Martinswerke	$97,24 \pm 0,40$	-	$12,9 \pm 0,4$	$2,15 \pm 0,15$

Razen obrabne obstojnosti in relativne gostote različnih vrst keramike smo izmerili tudi njeno trdoto H_v z Vickersovim odtisom pri normalni sili 49 N in povprečno velikost zrn d iz SEM-slik poliranih in termično jedkanih vzorcev. Rezultati so prikazani v tabeli 2.

Keramiko z oznako 6, ki ima 4 % steatita, navadno pripravljajo v podjetju AET.

SEM-posnetek na sliki 2 prikazuje značilno površino keramike Al_2O_3 po obrabnem preskusu. Vidimo lahko raze na posameznih zrnih in velike votline, ki so znak puljenja celih zrn s površine.

4 SKLEP

Iz tabele 2 so tudi z upoštevanjem standardne deviacije razvidne razlike v hitrosti obrabe w različnih keramik. Očiten je vpliv deleža steatita (primerjava keramik 1, 3 in 6): z zmanjšanjem deleža steatita se poveča obrabna obstojnost (manjši w). Steatit se namreč nahaja med kristalnimi zrnji čistega Al_2O_3 in verjetno oslabi meje kristalnih zrn. Ni pa videti za te tri keramike korelacije med obrabno obstojnostjo in drugimi veličinami v tabeli 2, kot je trdota. Če pa primerjamo keramike 5–7 z enako sestavo, a nekoliko različno pripravo, ugotovimo, da ima keramika 6 največja kristalna zrna in najmanjšo obrabo. To je v nasprotju z rezultati Roya, Krella in sodelavcev, ki so ugotovili manjšo obrabo za keramiko s submikrometrskimi kristalnimi zrnji v primerjavi s keramiko z večjimi zrnji. Vendar so že Roy in sodelavci glede na svoje vire opozorili, da so si rezultati odvisnosti obrabne obstojnosti keramike od povprečne velikosti njihovih kristalnih zrn za nadmikrometrska zrna v literaturi nasprotujoči.⁽¹¹⁾ Rezultati so res močno odvisni tudi od pogojev in izvedbe obrabnih preskusov.

5 LITERATURA

¹Birkby I., Harrison P., Stevens R., *J. Eur. Ceram. Soc.* **5**, (1989) 37–45

²Fischer T., Anderson M. P., Jahanmir S., *J. Am. Ceram. Soc.* **72** (2), (1989) 252–257

³Krell, D. Klaffke, *J. Am. Ceram. Soc.* **79** (5), (1996) 1139–1146

- ⁴Gee M. G., Jennett N. M., *Wear* **193** (2), (1996) 133–145
- ⁵Morita Y., Nakata K., Ikeuchi K., *Wear* **254** (1–2), (2003) 147–153
- ⁶Kalin M., Hockey B., Jahanmir S., *J. Mater. Res.* **18** (1), (2003) 27–36
- ⁷Basu B., Vleugels J., Van der Biest O., *J. Eur. Ceram. Soc.* **24** (7), (2004) 2031–2040
- ⁸Kerkwijk B., Garcia M., van Zyl W. E., Winnubst L., Mulder E. J., Schipper D. J., Verweij H., *Wear* **256**, (2004) 182–189
- ⁹Novak S., Kalin M., Lukas P., Anne G., Vleugels J., Van der Biest O., *J. Eur. Ceram. Soc.* **27** (1), (2007) 151–156
- ¹⁰Liu C., Zhang J., Sun J., Zhang X., *J. Eur. Ceram. Soc.*, v tisku (2007)
- ¹¹Singha Roy R., Guchhait H., Chanda A., Basu D., *J. Eur. Ceram. Soc.*, v tisku (2007)
- ¹²Lange F. F., *J. Mater. Sci.* **17** (1), (1982) 225–262
- ¹³Ambrožič M., Kosmač T., *J. Amer. Ceram. Soc.* **90** (5), (2007) 1545–1550
- ¹⁴Beranič Klopčič S., Ambrožič M., Kosmač T., Novak S., *J. Eur. Ceram. Soc.* **27**, (2007) 1333–1337