

POROZNOST KERAMIKE: MERJENJE POROZNOSTI IN NJEN VPLIV NA MEHANSKE LASTNOSTI SNOVI

Milan Ambrožič

Odsek za inženirsko keramiko, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Poroznost keramike je posledica ujetega zraka pri njeni izdelavi in močno vpliva na mehanske lastnosti materiala: elastični modul, trdnost, trdoto in druge. Zato je poroznost večinoma neželen pojav in jo skušamo izničiti, npr. s pazljivo pripravo prahov in primerno temperaturo sintranja, včasih pa namenoma naredimo porozen material. V vsakem primeru je dobro vedeti, kolikšna je poroznost, izmerimo ali ocenimo pa jo lahko na različne načine.

Porosity of ceramic materials: porosity measurement and influence on the mechanical properties of material

ABSTRACT

Porosity of the ceramics is a consequence of trapped air during the material processing, and it has a significant influence on the mechanical characteristics of the material: elastic modulus, strength, hardness, etc. Therefore, the porosity is in most cases undesirable and attempts are made to avoid it, e.g., by careful preparation of powders and suitable sintering temperature, however, sometimes the porous material is manufactured intentionally. In any case, it is good to know the porosity and it can be measured or estimated in several ways.

1 UVOD

Končne keramične izdelke ali laboratorijske vzorce izdelamo iz začetnih keramičnih prahov. Načini začetne priprave surovcev, tj. začetnih materialov iz prahov, ki jih potem sintramo pri visokih temperaturah, so raznovrstni: stiskanje suhih prahov v preproste modele, vlivanje navadno vodnih suspenzij prahov v mavčne modele, elektroforeza, nanašanje plasti napol plastičnih suspenzij prahov itd. V vsakem primeru se pri sintranju manjša kristalna zrna združujejo v večja, tako da se zmanjšuje površinska prosta energija stičnih površin snov – zrak. Nekaj zraka ostane ujetega v snovi in ta se med sintranjem delno ali skoraj v celoti sprosti, tako da še vedno ostanejo v snovi zračne pore. Poroznost opredelimo kot prostorninski delež por v snovi in jo merimo npr. v odstotkih.⁽¹⁾

Poroznosti komplementarna veličina je delna (relativna) gostota snovi D (simbol D je začetnica angleške besede *density* za gostoto), to je razmerje med dejansko gostoto in teoretično gostoto za povsem neporozen material. Med obema veličinama velja zveza: $D = 100 \% - P$. Čeprav je ta enačba praktično uporabna, pa ni absolutno natančna. Teoretično gostoto snovi opredelimo glede na kak standard. Najprej se moramo zavedati, da gostota polikristaliničnega materiala, kot je keramika, ni natančno enaka gostoti monokristala. Odvisna je tudi od mikrostrukture: velikosti kristalnih zrn, deleža posameznih kristalnih

modifikacij (npr. tetragonalne in monoklinske v polikristalnem ZrO_2), deleža nečistoč in deleža steklaste (nekristalinične, amorfne) faze med kristalnimi zrn. Na primer, steklasta faza ima nekoliko manjšo gostoto od kristalinične strukture. Zato je največkrat standard za teoretično gostoto kar čim čistejši monokristal snovi, seveda s stabilno kristalno modifikacijo pri sobni temperaturi. Zato je lahko tudi pri poroznosti nič delna gostota nekaj manjša od teoretične. Kljub vsemu pa zgoraj omenjena enačba za vse praktične primere dobro velja.

Poroznost navadno poslabša mehanske lastnosti keramičnih materialov,^(2,3) zato se je skušamo znebiti. Poroznost keramike lahko večinoma skoraj povsem odpravimo z dovolj visoko temperaturo sintranja.⁽¹⁾ Vendar pa dobimo v tem primeru v povprečju tudi veliko večja kristalna zrna, nekatera pa nekontrolirano zrastejo na račun drugih, tako da je statistična porazdelitev velikosti zrn zelo heterogena in temu se v veliko primerih želimo izogniti. Raje si pomagamo z izboljšanjem tehnologije priprave prahov.

V mnogih primerih pa namenoma naredimo porozni material.^(4,5) Zgled za to je uporaba poroznega cirkonijevega oksida (ZrO_2) kot dentalne keramike, npr. za zobne zatiče. Neporozni ZrO_2 ima veliko večji elastični (Youngov) modul kot dentin ($E \approx 215$ GPa za ZrO_2 in 50 GPa za dentin),⁽⁶⁾ glede na mehanske obremenitve v zobu pa je takšna razlika neugodna.

2 MERJENJE POROZNOSTI

Pri merjenju poroznosti je najprej pomembno, ali gre za zaprto ali odprto poroznost. Pri zaprti poroznosti, ki je pri relativno majhnem prostorninskem deležu por, so pore v glavnem med seboj izolirane. Zato pore v notranjosti materiala (vzorca) niso dostopne. Pri odprti poroznosti pa so notranje pore povezane s površino vzorca in z okolico, zato lahko okolišnja tekočina pri dovolj velikem tlaku, odvisno od velikosti por, prodre vanje. Obstaja veliko načinov merjenja poroznosti, tu pa opišem le nekaj najobičajnejših pri inženirski keramiki.⁽¹⁾

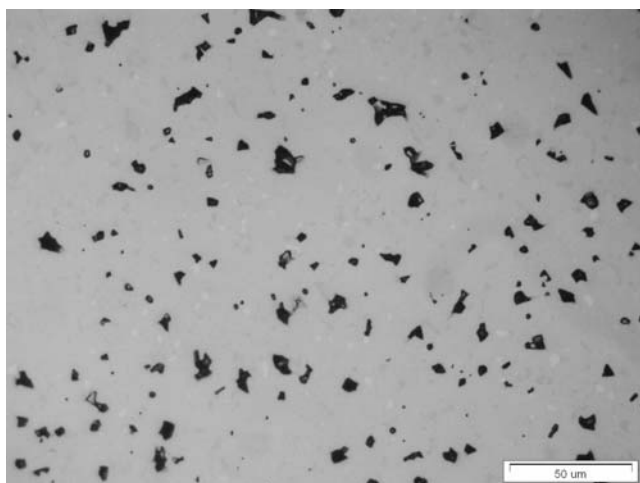
Najpreprostejši način merjenja poroznosti oz. delne gostote snovi je z Arhimedovo metodo. Čeprav imamo posebej pripravljene tehtnice za Arhimedovo merjenje gostote, je v osnovi meritev takšna: najprej tehtamo maso vzorca, potem pa še navidezno (manjšo) maso vzorca, potopljenega v destilirani vodi. S tema podatki lahko izračunamo absolutno gostoto vzorca, jo delimo s teoretično gostoto in dobimo relativno

gostoto. Metoda je dokaj natančna. Z njo merimo gostoto vzorcev z zaprto poroznostjo. V principu bi lahko (z manjšo natančnostjo) merili tudi odprto poroznost, če bi prej vzorce prevlekli s tanko plastjo snovi, ki bi zaprla pore, tako da voda ne bi prodrla vanje.

Seveda lahko pri vzorcih enostavne geometrijske oblike (valj, kvader) za silo izmerimo gostoto kar tako, da vzorec stehtamo in izmerimo njegove dimenzije, tako da najprej izračunamo njegovo prostornino. Vendar pri takšni meritvi lahko hitro pridemo do napake nekaj odstotkov ali več, prvič zaradi napak pri merjenju dolžin, drugič pa zato, ker vzorec navadno nima idealne oblike preprostega geometrijskega telesa.

Drugi način je ugotavljanje poroznosti s slik mikrostrukture, ki jih dobimo z optičnim (slika 1) ali elektronskim vrstičnim (SEM) mikroskopom. Površine vzorcev morajo biti za to dobro spolirane. Znano je, da je pri homogeni poroznosti materiala ploščinski delež por na sliki dane površine vzorca enak prostorninskemu deležu por v vzorcu. S primernim računalniškim programom, npr. prosto dostopnim paketom Image Tool, lahko ugotovimo ploščinski delež por (temne lise) na sliki v elektronski obliki. Vseeno je, ali gre za zaprto ali odprto poroznost. Takšna ocena poroznosti ima nekaj pomanjkljivosti in jo moramo vzeti z rezervo. Na primer, ena sama slika površine, iz katere nato izračunamo poroznost, navadno ni dovolj reprezentativna za zanesljivo statistiko. Treba je vzeti več različnih površin in izračunati aritmetično sredino in standardno deviacijo poroznosti. Razlike so lahko od slike do slike zelo velike. Drugič, posebno pri najmanjših porah je odločanje, kaj je pora in kaj ne (npr. nečistoča na površini slikanega vzorca), lahko zelo subjektivno.

Treba je tudi paziti, da vzorce pred opazovanjem ne poliramo niti premalo niti preveč. Na primer, pri



Slika 1: Fotografija slike značilne površine keramike Al_2O_3 z nekaj odstotki poroznosti na optičnem mikroskopu

pretirano dolgem poliranju iztrgamo nekaj kristalnih zrn s površine, kar seveda opazimo pod mikroskopom kot dodatne pore, tako da je navidezna poroznost večja od dejanske. Vseeno pa ima ta metoda prednost pred Arhimedovo v tem, da lahko z njo poleg poroznosti ugotovimo tudi povprečno velikost in velikostno porazdelitev por. Vendar pa je preračunavanje iz velikostne porazdelitve por na ploskvi v dejansko porazdelitev v volumnu snovi zapleten matematični problem. Ker je opisana metoda preprosta, se jo splača izvesti za primerjavo z drugimi metodami merjenja poroznosti.

Odprto poroznost, hkrati z velikostno porazdelitvijo por, merimo tudi z živosrebrno porozimetrijo. Gre za prodiranje živega srebra v evakuirane pore, za kar je potreben dovolj velik tlak, saj živo srebro večine keramičnih materialov ne omaka. Porozimetrovska naprava prikazuje slika 2. Vzorca materiala so v celoti potopljeni v živem srebru (Hg) v nosilcu. S hidravlično tekočino spreminjamo tlak Hg Δp . Če privzamemo valjno obliko por v vzorcu, je najmanjši radij por R_{\min} , v katere še prodre Hg, obratno sorazmeren s tlakom:

$$R_{\min} = -\frac{2\gamma \cdot \cos\theta}{\Delta p} \quad (1)$$

kjer je $\gamma = 0,474 \text{ N/m}$ površinska napetost med Hg in zrakom, θ pa je kontaktni kot Hg z materialom (keramiko). Za značilno oksidno keramiko je kot $\theta \approx 130\text{--}140^\circ$. Na primer pri $\theta = 130^\circ$ potrebujemo za vdor Hg skozi pore z radijem najmanj $1 \mu\text{m}$ tlak okrog $0,6 \text{ MPa} = 6 \text{ bar}$, za 10-krat manjši radij 10-krat večji tlak itd. Značilno območje tlakov porozimetrov je do 200 MPa . S postopnim povečevanjem tlaka lahko ugotovimo deleže poroznosti po velikosti por. Naprava meri nivo Hg v cevki nad nosilcem vzorcev in s tem volumen Hg, ki je prodril v pore vzorcev.

Obliko in velikostno porazdelitev por lahko skeniramo v treh dimenzijah, vendar je to zahteven in



Slika 2: Fotografija živosrebrne porozimetrovske naprave

zamuden postopek. Z vzorca bi bilo treba z žaganjem ali poliranjem postopoma odstranjevati plast za plastjo in na vsakem koraku slikati površino. Iz serije dvodimenzionalnih slik lahko dobimo tridimenzionalno sliko.⁽⁷⁾

3 VPLIV POROZNOSTI NA MEHANSKE LASTNOSTI KERAMIKE

Poroznost značilnih keramičnih materialov bistveno vpliva na različne mehanske lastnosti, od katerih omenimo naslednje veličine: elastični modul E , modul stisljivosti K , strižni modul G , upogibna trdnost σ_{\max} in trdota H .⁽⁸⁻¹¹⁾ Najprej na kratko opišimo njihove definicije. Omejimo se le na navadno polikristalinično keramiko, ki je izotropna v mehanskih lastnostih, sicer bi bil opis teh lastnosti bolj zapleten.

Tri module, povezane z linearnimi elastičnimi lastnostmi materiala, E , K in G , imajo dimenzijo napetosti in jih navadno izrazimo v gigapaskalih (GPa). Opazujmo deformacijo kocke z robom a in mejnimi ploskvami ploščine $S = a^2$. Zaradi nazornosti je na sliki 3 prikazana le dvodimenzionalna slika kocke (kvadrat), skupaj s koordinatnim sistemom, os z pa je pravokotna na ravnino slike. Elastični modul podaja togost snovi pri enoosni natezni ali tlačni napetosti. Enoosno natezno napetost ponazorimo s parom nasprotno enakih vodoravnih sil F_x in $-F_x$, ki delujeta na nasprotnih osnovnih ploskvah kocke (slika 3a), zaradi katerih se le-ta raztegne v vodoravni smeri za Δa_x :

$$\sigma_{xx} \equiv \frac{F_x}{S} = E \frac{\Delta a_x}{a} \quad (2a)$$

Oznaka σ_{xx} pomeni edino neničelno komponento ustreznega napetostnega tenzorja. Pri tem se prečni robovi kocke (pri natezni obremenitvi) skrčijo, kjer pa je skrček po absolutni vrednosti manjši od raztezka vzdolžnih robov: $\Delta a_y = \Delta a_z = -\nu \Delta a_x$. Poissonovo razmerje (število) ν je odvisno od snovi, njegova značilna vrednost za oksidno keramiko pa je od 0,25 do 0,3. Prostornina kocke se poveča.

Modul stisljivosti K opredelimo pri izotropni triosni tlačni obremenitvi $p = F/S$, ki jo ponazorimo s tremi pari sil, pravokotnih na ploskve kocke (slika 3b), vse pa imajo enako velikost F . Kocka se skrči v vseh smereh in sprememba njene prostornine ΔV je negativna:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -p = -K \frac{|\Delta V|}{V} \quad (2b)$$

kjer je $V = a^3$ prvotna prostornina kocke. Po definiciji so komponente napetostnega tenzorja pri stiskanju negativne.

Strižno obremenitev, pri kateri opredelimo strižni modul G , ponazorimo z dvema paroma sil, ki delujejo

vzporedno s ploskvami (slika 3c). Pri tem velja enačba za relativni strižni premik Δx dveh nasprotnih (vodoravnih) ploskev:

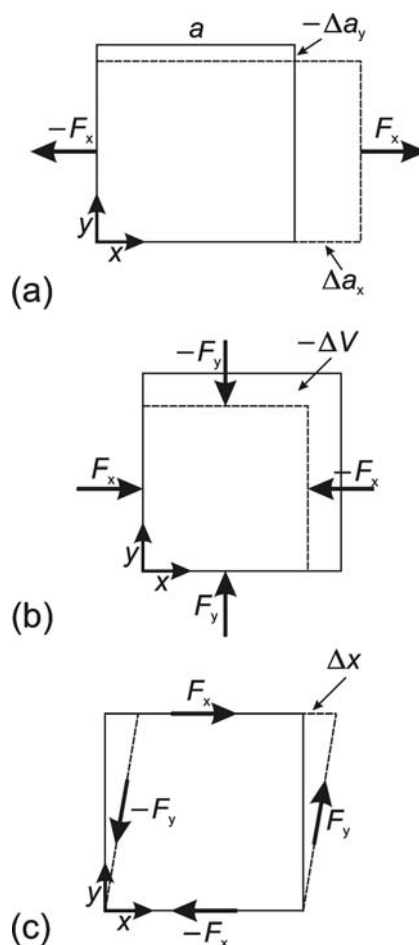
$$\sigma_{xx} = \frac{F_x}{S} = G \frac{\Delta x}{a} \quad (2c)$$

Strižna obremenitev je dvoosna, ponazorili pa bi jo lahko tudi s parom tlačnih in parom nateznih sil v diagonalnih smereh kocke. Prostornina kocke se ne spremeni. Na slikah so vse deformacije zaradi nazornosti zelo pretirane. Na primer, na sliki 3c je nagib navpičnih ploskev kocke tako majhen, da imamo lahko par sil $\pm F_y$ za navpičen.

Pri omenjenih treh tipih obremenitev je napetostni tenzor v snovi homogen, in to so najpreprostejši zgledi deformacij vzorcev. Vsi trije moduli, E , K in G so med seboj povezani (za homogeno snov):

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3a)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3b)$$



Slika 3: Definicija modulov: a) elastičnega modula E , b) modula stisljivosti K , c) strižnega modula G . Vse sile so porazdeljene ploskovno. Deformacije na sliki so pretirane. Pred deformacijo je kocka označena s polnim obrisom, po deformaciji pa s črtkanim.

$$G = \frac{3(1-2\nu)K}{2(1+\nu)} \quad (3c)$$

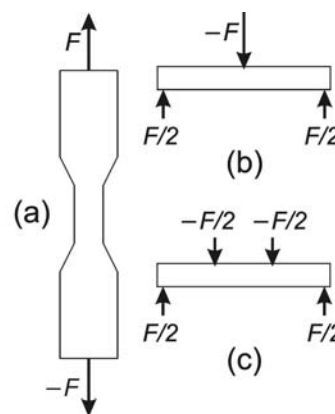
Elastične lastnosti izotropnega materiala zato lahko podamo z dvema veličinama, E in ν .

Elastični in druge module merijo na različne načine: s hitrostjo ultrazvoka v snovi, neposredno z merjenjem elastičnih deformacij materiala pri dani obremenitvi, z resonančnimi meritvami itd.

Trdnost (tlačna, natezna, upogibna itd.) σ_{\max} pove, kolikšno napetost (merimo jo v megapaskalih, MPa) vzdrži material pri različnih načinih obremenitve, preden se poškoduje (trajno deformira, zlomi, počí itd.). Za značilne inženirske keramične materiale je natezna trdnost veliko manjša od tlačne, podobno kot pri betonu. Zato na keramičnih vzorcih večinoma preskušajo, kolikšne natezne obremenitve lahko vzdržijo. Direktno merjenje natezne trdnosti je v osnovi prikazano na sliki 4a. Natezno silo F postopoma povečujemo, dokler se vzorec ne pretrga. Na zoženem prerezu je največja napetost $\sigma = F/S$, zato se navadno vzorec pretrga prav tam.

Tehnično pa je lažje izvesti 3- ali 4-točkovni upogibni preskus (sliki 4b in 4c). Največja natezna napetost nastane na sredini spodnje ploskve takšnega vzorca, zato se zlom začne tam in zaradi krhkosti keramike takoj počí cel vzorec. Zaradi sorazmerno proste geometrije se da izračunati, kolikšna je pri dani sili F napetost σ_{\max} na sredini spodnje ploskve. Pri idealnem materialu, kjer bi imel prav vsak vzorec enako trdnost, bi morali dobiti enak izid za trdnost pri nateznem in obeh upogibnih preskusih. Vendar statistika meritev trdnosti keramičnih vzorcev na različne načine pokaže, da ni tako. Izmerjene vrednosti σ_{\max} se lahko od vzorca do vzorca močno spreminjajo. Na primer, pri 3-točkovnem upogibnem preskusu dobimo večjo povprečno vrednost σ_{\max} in tudi večjo standardno deviacijo kot pri direktnem nateznem preskusu. Razlog za to je naslednji. Prelom v keramiki se vedno začne ob nekem defektu v snovi, kot je npr. večja mikrorazpoka ali pora; ob robu defekta se namreč zaradi geometrije še poveča lokalna napetost, ki je tako lahko veliko večja od povprečne napetosti v večjem delu vzorca. Defekti pa so lahko različno veliki in pri tem so večji defekti veliko nevarnejši za dokončni zlom materiala; odločilni so torej največji defekti. Razen tega je prostorska porazdelitev defektov naključna. Zato so npr. v enem vzorcu lahko večji defekti kot v drugem in bo imel ta vzorec manjšo trdnost. Tako lahko razložimo deviacije trdnosti različnih vzorcev in tudi to, da imajo v splošnem večji vzorci manjšo trdnost; pri večjih vzorcih je pač večja verjetnost, da bodo imeli zelo velike defekte.

Poglejmo si še bistveno razliko pri obremenitvi vzorca pri direktnem nateznem in pri 3-točkovnem



Slika 4: Merjenje trdnosti materiala: a) direktni natezni preskus, b) 3-točkovni upogibni preskus, c) 4-točkovni upogibni preskus, č) fotografija naprave (podjetje Instron) za 3- in 4-točkovni upogibni preskus

upogibnem preskusu. Pri direktnem preskusu je povsod v stanjšanem delu vzorca enaka napetost, zato se lahko prelom začne kjerkoli, in sicer se bo začel tam, kjer je največji defekt. Pri upogibnem preskusu pa bi moral biti največji defekt ravno na sredini spodnje ploskve. To pa seveda ni vedno res, prelom se lahko začne nekje drugje pri manjši napetosti, kot je maksimalna napetost vzorca. Ker pa izračunamo upogibno trdnost tako, kot da bi se prelom začel na sredini spodnje ploskve (saj ne moremo vedeti, kje se je res začel), dobimo večjo trdnost, kot je v resnici. Včasih je defekt, kjer se res začne prelom, bližje, včasih dlje od sredine spodnje ploskve. To je vzrok za oboje, večjo povprečno vrednost in večjo standardno deviacijo trdnosti materiala v primerjavi z direktnim nateznim preskusom.

Pri 4-točkovnem upogibnem preskusu smo nekje vmes med 3-točkovnim preskusom in direktnim nateznim preskusom, kot kažejo eksperimentalni rezultati in teorija. Zato govorimo posebej o upogibni in natezni trdnosti materiala, navedemo pa tudi geometrijske parametre pri preskusih, če hočemo biti natančni. Še opozorilo: čeprav govorimo o 3- in 4-točkovnem preskusu, pa obremenitvene sile v resnici ne prijemljejo v točkah, temveč so porazdeljene linijsko, po širini vzorca (linije prijemališč sil so pravokotne na ravnino slik 4b in 4c). Upogibna preskusa na slikah 4b in 4c sta primerna za vzorce v

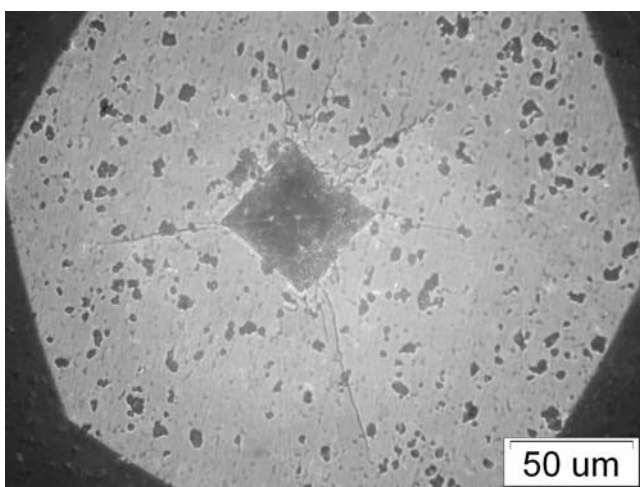
obliki paličic oblike kvadra, za vzorce v obliki okroglih ploščic (tablet) pa se uporabljajo drugačne geometrije obremenitve.

Trdota je povezana z odpornostjo snovi proti trajni (plastični) deformaciji površine materiala, če nanjo pritismo s predmetom relativno majhnih dimenzij iz drugega (navadno tršega) materiala. Zelo razširjeno je merjenje trdote vzorcev z Vickersovo metodo, kjer pritismo na polirano ravno površino vzorca z znano silo in v pravokotni smeri diamantno 4-strano piramido predpisanih dimenzij; npr. kot med diametralnima stranskima roboma prizme je 136° . Trdoto H izračunamo takole:

$$H = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

kjer je F sila, s katero pritismo s prizmo na površino vzorca, d pa diagonala odtisa na površini (odtis vidimo na površini vzorca kot kvadrat). Diagonalo d izmerimo npr. tako, da na optičnem mikroskopu posnamemo Vickersov odtis v elektronski obliki (slika 5), potem pa v programu Image Tool ugotovimo d po predhodni umeritvi dolžin na sliki. Pri sodobnih napravah je ves postopek avtomatiziran.

Pri poroznem materialu se zmanjša vseh pet opisanih veličin. Bilo je veliko teoretičnih in eksperimentalnih raziskav, kakšna je odvisnost mehanskih lastnosti od poroznosti same, pa tudi od oblike por. Glede eksperimentalnih raziskav je stvar preprosta: da dobimo npr. odvisnost elastičnega modula od poroznosti $E(P)$, izmerimo pri različnih poroznostih (ki jih dobimo npr. z različnimi temperaturami in časi sintranja) pare podatkov (P , E) z enim od opisanih načinov. Sama meritev, npr. elastičnega modula, pa je lahko vse prej kot preprosta, če hočemo zagotoviti zadovoljivo natančnost. Teoretična interpretacija odvisnosti mehanskih lastnosti od poroznosti je težavna. Dokler gre za zelo majhno poroznost s



Slika 5: Značilna optična slika Vickersovega odtisa na keramiki Al_2O_3

porami pravilne oblike (krogle ali vsaj rotacijski elipsoidi), imamo lahko pore za izolirane objekte v neskončni keramični matrici. Tedaj lahko uporabimo analitične ali semianalitične ocene za izračun mehanskih veličin. Pri večjih poroznostih se čuti vpliv sosednjih por, poleg tega pore nikoli niso povsem pravilnih oblik, še bolj zapleteno pa je vse skupaj pri odprti poroznosti. Mehanske veličine, npr. E , lahko v tem primeru kolikor toliko pravilno teoretično izračunamo samo z uporabo numerične metode končnih elementov, ki zahteva uporabo profesionalnih računalniških programskih paketov (npr. ABAQUS) in seveda zmogljivih računalnikov.

Za poroznosti nekako do 30 % ali 40 % lahko uporabljamo tudi preproste empirične formule, npr. za elastični modul:^(9,10)

$$E = E_0(1 - c_1P + c_2P^2) \quad (5a)$$

$$E = E_0(1 - cP)^n \quad (5b)$$

$$E = E_0 \frac{1 - P}{1 + cP} \quad (5c)$$

kjer je E_0 elastični modul pri poroznosti nič. Podobno velja tudi za druge veličine, kot sta K in G . Parametre v formulah lahko za vsako keramiko posebej ugotovimo z najboljšim prilagajanjem formul eksperimentalnim podatkom. Uporabnost teh enačb je bolj ali manj omejena, predvsem kar se tiče natančnosti. Vendar nam velikokrat za predhodno oceno pričakovanih mehanskih lastnosti porozne keramike povsem zadostujejo.

4 POROZNI CIRKONIJEV OKSID ZrO_2

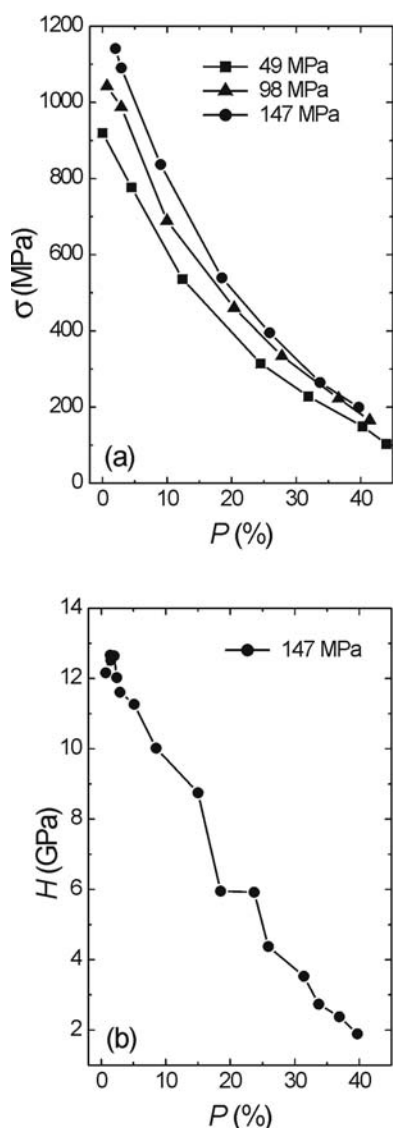
Oglejmo si vpliv poroznosti na omenjene mehanske lastnosti cirkonijevega oksida, s katerim se ukvarjamo tudi na Odseku za inženirsko keramiko. V več raziskavah so ugotovili, da so enačbe (5) kar uporabne za oceno vpliva poroznosti na E , K , G in trdoto H . Posebej si oglejmo uporabo enačbe (5c) za izračun E , K in G , ki sta jo med drugim teoretično obravnavala tudi Luo in Stevens.⁽⁹⁻¹⁰⁾ V primeru idealno okroglih por se da konstanto c v enačbi (5c) izraziti s Poissonovim številom ν (kjer vzamemo ν pri $P = 0$):

$$c = \frac{(13 - 15\nu)(1 - \nu)}{14 - 10\nu} \quad (6a)$$

$$c = \frac{(1 + \nu)}{2 - 4\nu} \quad (6b)$$

$$c = \frac{8 - 10\nu}{7 - 5\nu} \quad (6c)$$

Če pa pore niso okrogle in lahko zanje vzamemo približek podolgovatih ali pa sploščenih rotacijskih elipsoidov, se konstanta c v obeh primerih lahko



Slika 6: Odvisnost upogibne trdnosti (a) in Vickersove trdote (b) ZrO_2 od poroznosti. Različne krivulje v (a) ustrezajo različnim tlakom pri enoosnem ročnem stiskanju vzorcev (tablet) pred sintranjem. Geometrija upogibnega preskusa: tableta je postavljena na treh simetrično postavljenih majhnih kroglicah, z vrha pa na njeno sredino pritiska četrta kroglica, vse skupaj pa je v posebnem nosilcu (t. i. preskus "3 kroglice + 1 kroglica").

precej poveča glede na vrednosti v enačbah (6), posebno za sploščene elipsoide. Tako nam model sferičnih por da premajhne vrednosti c in s tem prevelike vrednosti vseh treh modulov. Podobno sta Luo in Stevens ugotovila za trdoto H . Tabela 1 podaja njihove izmerjene vrednosti E , K , G in H pri neporoznem ZrO_2 ($P = 0$) in pri poroznosti $P = 30$ %.

Tabela 1: Odvisnost mehanskih veličin od poroznosti

Veličina	$P = 0$	$P = 30$ %
E (GPa)	215	75
K (GPa)	200	40
G (GPa)	80	30
H (GPa)	12	2,5

Na Institutu "Jožef Stefan" na Odseku za inženirsko keramiko smo izmerili upogibno trdnost in trdoto ZrO_2 v odvisnosti od poroznosti.⁽⁵⁾ Rezultati so prikazani na sliki 6. Ne smemo se preveč čuditi, če se podatki iz različnih virov ne ujemajo povsem med seboj, saj so mehanske lastnosti odvisne ne le od poroznosti, temveč tudi od marsičesa drugega, npr. velikostne porazdelitve kristalnih zrn. Tudi pri enakem začetnem materialu (prahovih) in enakih pogojih sintranja so lahko končne mehanske lastnosti, npr. trdota (slika 6a), odvisne od takšnih podrobnosti, kot je tlak pri enoosnem ročnem stiskanju vzorcev pred sintranjem.

5 SKLEP

Poroznost močno vpliva na mehanske lastnosti keramike. Ta vpliv je težko teoretično preučevati, celo z zahtevno numerično metodo končnih elementov, saj mehanske lastnosti niso odvisne le od poroznosti same, temveč tudi od velikostne porazdelitve in oblike por. Pore so lahko zelo nepravilnih oblik, še posebno pri odprti poroznosti, zato je njihovo obliko težko prav modelirati. Primernejše je eksperimentalno ugotavljanje odvisnosti mehanskih lastnosti od poroznosti in uporaba empiričnih enačb, katerih koeficiente prilagajamo meritvam. Poroznost in velikostno porazdelitev por lahko merimo na različne načine, ki se med seboj dopolnjujejo.

6 LITERATURA

- ¹James. S. Reed, Principles of Ceramics Processing, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995
- ²C. R. Gentle, Mechanical properties of biomaterials, John Wiley, New York, 1980
- ³D. Sherman, D. Brandon, Mechanical properties of hard materials and their relation to microstructure, Advanced Engineering Materials 1(1999) 3-4, 161-181
- ⁴A. Portinha, V. Teixeira, J. Carneiro, M. G. Beghi, C. E. Botlani, N. Franco, R. Vassen, D. Stoeber, A. D. Sequeira, Residual stresses and elastic modulus of thermal barrier coatings graded in porosity, Surface & Coatings Technology 188(2004), 120
- ⁵M. Andrzejczuk, Porous zirconia for application as biomaterial, Marie Curie programme (IJS), Work report (2005)
- ⁶R. Stevens, Introduction to zirconia, Magnesium Elektron Ltd (1986)
- ⁷S. G. Lee, A. M. Gokhale, A. Sreeranganathan, Reconstruction and visualization of complex 3D pore morphologies in a high-pressure die-cast magnesium alloy, Mat. Science and Engineering A 427(2006), 92
- ⁸D. Hardy, D. J. Green, Mechanical properties of a partially sintered alumina, J. Eur. Ceram. Soc. 15 (1995), 769-775
- ⁹J. Luo, R. Stevens, Porosity-dependence of elastic moduli and hardness of 3Y-TZP ceramics, Ceramics International 25(1999), 281-286
- ¹⁰J. Luo, R. Stevens, Micromechanics of randomly oriented ellipsoidal inclusion composites, Part 2: Elastic moduli, J. Appl. Phys. 79(1996), 9057-63
- ¹¹A. K. Gain, H.-Y. Song, B.-T. Lee, Microstructure and mechanical properties of porous yttria stabilized zirconia ceramic using poly methyl methacrylate powder, Scripta Materialia 54(2006), 2081-2085