

UPOGIBNA TRDNOST KORUNDNE KERAMIKE PRI ENOOSNEM IN DVOOSNEM PREIZKUSU

Milan Ambrožič¹, Tomaž Kosmač², Tjaš Savarin³

ZNANSTVENI ČLANEK

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Koroška 160, 2000 Maribor

²Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

³Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Izmerjene upogibne trdnosti keramičnih vzorcev se navadno zelo dobro ujemajo z Weibullovo porazdelitveno funkcijo. Izmerili smo upogibne trdnosti korundne keramike, in sicer s štiritočkovno metodo za vzorce v obliki kvadrov in z dvoosnim preizkusom za okrogle ploščice. Weibullova parametra smo ocenili z metodo momentov, linearno regresijo in metodo maksimalne verjetnosti. Ugotovili smo, da porazdelitev trdnosti res dobro ustreza Weibullovi porazdelitvi in da metode dajo podobne, čeprav ne povsem enake vrednosti njenih parametrov. Povprečna trdnost paličastih vzorcev je manjša kot pri okroglih ploščicah in prav tako relativna standardna deviacija trdnosti. Weibullov modul za paličaste vzorce je bistveno večji kot pri okroglih ploščicah.

Ključne besede: korundna keramika, upogibna trdnost, enoosni preizkus, dvoosni preizkus, Weibullova porazdelitev

Bend strength of alumina ceramic in uniaxial and biaxial test

ABSTRACT

Measured values of the bend strength of ceramic samples usually agree very well with the Weibull distribution function. We measured the bend strength of alumina ceramics, using the four-point method for rectangular samples and biaxial test for discs. The Weibull parameters were evaluated with the momentum method, linear regression and maximum likelihood method. We found that the strength distribution fits the Weibull distribution well and the three methods give similar, but not equal parameter values. The mean strength of rectangular samples is smaller than for discs, and the same holds for the relative standard deviation of strengths. The Weibull modulus for rectangular samples is significantly larger than that for discs.

Keywords: alumina ceramics, bend strength, uniaxial test, biaxial test, Weibull distribution

1 UVOD

Weibullova porazdelitev je znana že od sredine prejšnjega stoletja in je osnovana na principu »najšibkejšega člana«, to je, material oz. izdelek se zlomi, ko popusti njegov najšibkejši del [1]. Pri značilnih upogibnih preizkusih se izmerjene trdnosti vzorcev navadno zelo dobro ujemajo z Weibullovo porazdelitveno funkcijo, ki jo karakterizirata dva parametra: Weibullov modul in umeritveni parameter [2–12]. Zavedati pa se moramo, da so rezultati meritev v splošnem odvisni ne le od materiala samega in končne priprave vzorcev (npr. brušenja in poliranja), temveč v manjši meri tudi od preizkusne metode.

Znano je, da vzdržijo strukturni keramični materiali za velikostni red večje tlačne napetosti od nateznih. Torej so pri vsakdanjih aplikacijah keramičnih izdelkov lahko kritične predvsem natezne napetosti.

Ker se pri upogibnem preizkus v vzorcu pojavijo tako tlačne kot natezne napetosti, ni vseeno, kako preizkus izvedemo in kakšni so njegovi geometrijski parametri. Med seboj se bistveno razlikujeta enoosni in dvoosni upogibni preizkus: pri prvem ima diagonalizirani napetostni tenzor samo en od nič različen diagonalni element, pri dvoosnem pa sta takšna dva elementa, navadno enako velika [13]. Povedano poenostavljeno, pri enoosnem preizkus se v vsaki točki vzorca napetosti (npr. natezne sile na ploščinsko enoto) pojavljajo v eni smeri, pri dvoosnem preizkus pa v dveh smereh (natančneje v celi ravnini po smereh). Pri keramiki z relativno nizko vrednostjo Weibullovega modula pa je ključen geometrijski parameter tudi efektivni volumen obremenjevanja vzorcev [14].

Zaradi primerjave rezultatov trdnosti za obe vrsti preizkusa smo izdelali keramične vzorce iz korundne keramike (aluminijevega oksida, Al_2O_3) v obliki kvadrov (paličk) in valjev (ploščic). Po priporočilih standardov smo izdelali po 30 vzorcev obeh oblik [15]. Po meritvi trdnosti smo podatke statistično analizirali in izračunali oba Weibullova parametra s tremi različnimi metodami: z metodo momentov, linearno regresijo in metodo maksimalne verjetnosti. Nazadnje smo primerjali tudi efektivna volumna vzorcev pri obeh upogibnih preizkusih, enoosnem za paličke in dvoosnem za okrogle ploščice. Razliko v povprečni trdnosti vzorcev pri obeh preizkusih se da delno razložiti z različnima efektivnima volumnoma. Vendar pa moramo zaradi različne priprave vzorcev (predvsem gre za različno geometrijo kalupov pri enoosnem stiskanju prahov pred sintranjem) pričakovati tudi vsaj nekoliko različno porazdelitev mikroskopskih napak pri končnih vzorcih obeh vrst, le-te pa določajo Weibullov modul.

2 PRIPRAVA VZORCEV

Uporabili smo prah (granulat) iz aluminijevega oksida APA RTP SB proizvajalca Sasol North America Inc. Za vzorce v obliki paličk smo odtehtali po 1,70 g, za tiste v obliki ploščic pa po 2,00 g, potem pa smo jih enoosno stisnili v jeklenem kalupu s tlakom 100 MPa (paličke) oziroma 150 MPa (ploščice). Vzorce obeh vrst smo sintrali v enakih razmerah: štiri ure pri temperaturi 1450 °C (zrak, $p = 1$ bar). Po sin-

tranju smo vzorce zbrusili in polirali, velikost abrazivnih delcev v končni stopnji poliranja pa je bila $1 \mu\text{m}$.

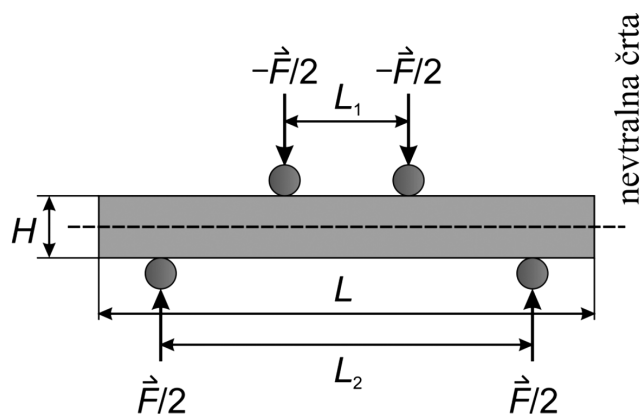
3 MERITEV TRDNOSTI

Trdnost je fizikalna količina, ki opisuje odpornost materiala ali vzorca proti mehanski napetosti. Pri keramičnih vzorcih jo je najlažje meriti z upogibnim preizkusom, saj je npr. enoosni natezni preizkus precej zahtevnejši [16].

3.1 Upogibni preizkus paličastega vzorca

Obravnavajmo upogib palice. Ta ima obliko kvadra z dolžino L , širino W in višino H . Pri preizkusnem upogibanju palice uporabimo štiritočkovno metodo. Pri njej postavimo vzorec na dva valjasta podstavka, tako da sta postavljena simetrično blizu levega in desnega konca palice. Nato z zgornje strani pritisnemo na vzorec preko valjev, ki sta bližje skupaj kot spodnja valja (sliki 1 in 2). Palica se ob tej obremenitvi elastično deformira, dokler je sila v elastičnem območju. V njej se pojavijo napetosti zaradi notranjih sil v materialu, ki nastanejo kot odziv na zunanje sile preko valjev. Ko silo na zgornji valj povečujemo do mejne napetosti v palici, le-ta počne. Pri računanju napetosti v vzorcu iz značilne krhke keramike lahko aproksimiramo linearno elastično vedenje snovi prav do sile zloma.

Palico na sredi njene višine H v mislih prerežemo z vzdolžno ravnino. To ravnino v dvodimenzionalnem prerezu prikažemo kot črto, imenujemo pa jo nevtralna črta brez napetosti (slika 1). Seveda se ta črta nahaja na sredini le takrat, ko je palica homogena. Ob obremenitvi palice se pod nevtralno črto pojavijo natezne sile, nad njo pa tlačne.



Slika 1: Štiritočkovni upogibni preizkus (dvodimenzionalni prerez)

Zgornja dva valja sta oddaljena za L_1 , spodnja dva pa za L_2 . Upogibno trdnost vzorca σ izračunamo iz lomne sile F po enačbi:

$$\sigma = \frac{3F(L_2 - L_1)}{2WH^2} \quad (1)$$

Dolžina vzorca L se v enačbi (1) ne pojavi, seveda pa mora veljati $L > L_2$.

Za statistično porazdelitev trdnosti je pomemben tudi efektivni volumen pri upogibu. To je del vzorca, ki občuti napetosti. Pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu je efektivni volumen tisti del vzorca, ki ga omejujeta spodnji dve podpori, kot razberemo s slike 1. Seveda napetost občuti (skoraj) cel vzorec, vendar so te napetosti največje in najpomembnejše za zlom med spodnjima podporama. Zato prevzame spodnji del vzorca največji delež pri računu efektivnega volumna. Smiselna enačba za oceno efektivnega volumna pri splošni obliki vzorca je:

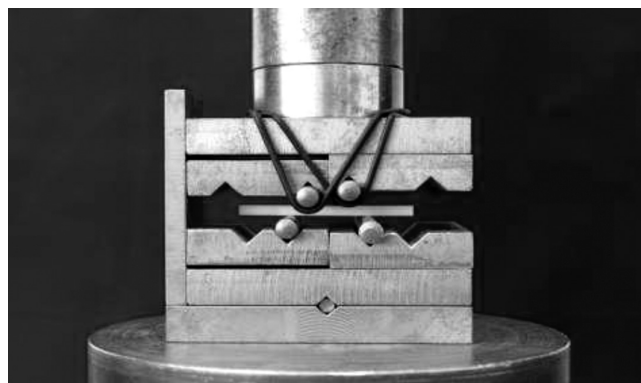
$$V_{\text{ef}} = \int \frac{\sigma}{\sigma_{\text{max}}} dV \quad (2)$$

Integriramo le po tistem delu prostornine vzorca, kjer se pri preizkusu pojavijo natezne napetosti. V enačbi (2) se natezna napetost σ spreminja po prostornini vzorca, s σ_{max} pa označimo največjo napetost v vzorcu.

Efektivni volumen pri enoosnem upogibnem preizkusu za paličko je:

$$V_{\text{pal}} = \frac{WH(L_1 + L_2)}{8} \quad (3)$$

Enačbo (3) izpeljemo iz splošne enačbe (2), če integriramo le po spodnji polovici vzorca na sliki 1. Pri tem upoštevamo, da se napetost po debelini vzorca povečuje linearno od nevtralne ploskve do spodnjega roba vzorca, medtem ko se v vzdolžni smeri linearno zmanjšuje od območja pod bližnjima valjema do vrednosti nič na mestih spodnjih podpornih valjev. To pomeni tudi, da je napetost levo od levega spodnjega valja in desno od desnega spodnjega valja enaka nič;



Slika 2: Fotografija štiritočkovnega upogibnega preizkusa

zato se dolžina vzorca L ne pojavlja v enačbah (1) in (3).

3.2 Upogibni preizkus za okroglo ploščico

Ploščice smo lomili z metodo »bat na tri kroglice« (sliki 3 in 4). Pri tej metodi se presekanjani stožec vpne v premerično os naprave, nosilec vzorca pa je posodica s tremi vdolbinicami. V te se pred meritvijo vstavi tri majhne kroglice. Te so postavljene na enaki razdalji med seboj, tako da oblikujejo oglišča enakostraničnega trikotnika. Prav je, da se vzorec centrirata tako, da so vse kroglice enako oddaljene od zunanega roba ploščice. Ploščica največkrat počni tako, da nastanejo trije kosi ali več, le včasih dva. Čim večje je število kosov, tem večje so vrednosti upogibne trdnosti. Pri samo dveh kosih so navadno izmerjene trdnosti precej slabše. Upogibno trdnost ob lomni sili F izračunamo takole [13]:

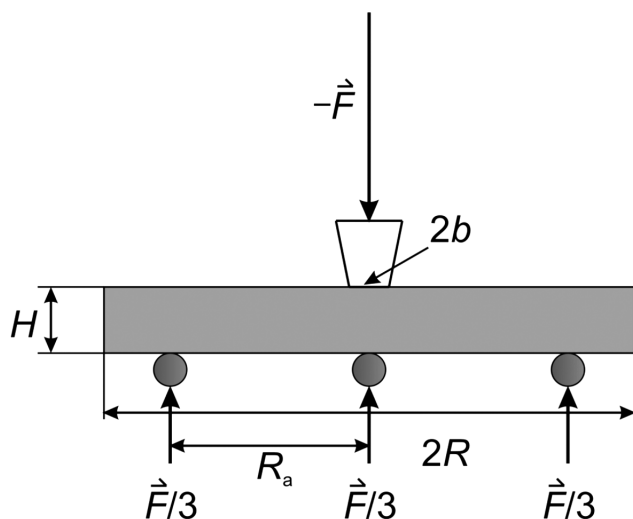
$$\sigma = \frac{3F(\xi - \lambda)}{2\pi H^2} \quad (4a)$$

kjer sta brezdimenzijska parametra:

$$\xi = (1 + \nu) \ln\left(\frac{b}{R}\right) + \frac{1 - \nu}{2} \left(\frac{b}{R}\right)^2 \quad (4b)$$

$$\lambda = (1 + \nu) \left[1 + \ln\left(\frac{R_a}{R}\right) \right] + (1 - \nu) \left(\frac{R_a}{R}\right)^2 \quad (4c)$$

Pri tem sta H in R debelina in polmer ploščice, R_a oddaljenost kroglic od geometrijske osi ploščice, b pa



Slika 3: Shema upogibnega preizkusa »bat na tri kroglice«: pogled s strani. Kar je videti kot pravokotnik, je v resnici valj z navpično geometrijsko osjo. Tri spodnje kroglice niso v isti liniji, temveč so razporejene v oglišča enakostraničnega trikotnika. Razdalja R_a je razdalja kroglic od geometrijske osi valja. Zgoraj pritiska s silo velikosti F na ploščico bat v obliki presekanega stožca. Zaradi simetrije prevzame spodaj vsaka podporna kroglica tretjino te sile.

je polmer kontaktne površine bata s ploščico. Enačbe (4) so samo semi-analitični približek, ki so ga preverili z numerično metodo končnih elementov.

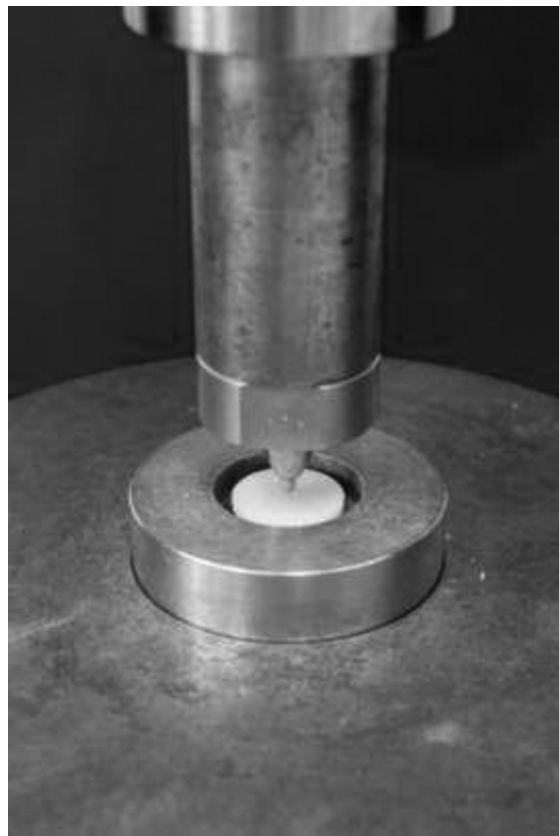
Enačba za efektivni volumen ploščice pri tem preizkusu je:

$$V_{\text{plo}} = \frac{\pi H}{4} \left[R_a b + \frac{(R_a - b)^2}{3} \right] \quad (5)$$

Izračunamo ga iz enačbe (2), tako da integriramo le po spodnji polovici vzorca, privzamemo radialno simetrično porazdelitev napetosti ter grob približek, da se napetost linearno povečuje od srednje ravnine ploščice do spodnje ploskve (podobno kot pri paličkah), v radialni smeri pa se linearno zmanjšuje od roba bata do kroga z nosilnimi kroglicami.

4 WEIBULLOVA PORAZDELITEV IN IZRAČUN NJENIH PARAMETROV

Naredimo samo kratek povzetek Weibullove porazdelitve in bistva uporabljenih metod za izračun Weibullovih parametrov, saj smo že obširneje pisali v prejšnjih številkah Vakuumista [11, 17]. Naša ključna spremenljivka je upogibna trdnost σ . V računih uporabimo obe porazdelitveni funkciji: verjetnostno gostoto $p(\sigma)$ in kumulativno verjetnostno funkcijo:



Slika 4: Fotografija dvoosnega upogibnega preizkusa; kroglice so skrite pod vzorcem

$$P(\sigma) = \int_0^{\sigma} p(x) dx$$

Pri dvoparametrični Weibullovi porazdelitvi sta obe verjetnostni funkciji p in P :

$$p(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right) \quad (6a)$$

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right) \quad (6b)$$

z Weibullovim modulom m in karakterističnim (umeritvenim) parametrom σ_0 . Za izračun obeh Weibullovih porazdelitev (v bistvu gre za statistično oceno njihovih najverjetnejših vrednosti) smo uporabili tri dobro znane metode: linearno regresijo (LR), metodo največje verjetnosti (v literaturi: ML = *maximum likelihood*) in metodo momentov (MM). Pri LR lineariziramo funkcijo (6b) in iščemo premico, ki se najbolje prilega eksperimentalnim podatkom. Pri ML uporabimo funkcijo (6a) in maksimiramo logaritem produkta vrednosti funkcije pri vseh izmerjenih trdnostih. Pri MM pa izračunamo Weibullova parametra s primerjavo eksperimentalne in teoretične vrednosti povprečne trdnosti in njene standardne deviacije. Pričakujemo, da bodo za zelo veliko številov vzorcev vse tri metode dale enake vrednosti parametrov; ne sme pa nas čuditi, če se pri številu vzorcev $N = 30$, ki je s statističnega vidika še dokaj majhno, izračunane vrednosti predvsem parametra m znatno razlikujejo. Omenimo še, da smo pri metodi LR uporabili obe značilni različici: pri »x-regresiji« (xLR) pri iskanju najprimernejše premice $y = kx + n$ minimiziramo vsoto kvadratov »vodoravnih« razdalj med premico in N točkami (x_i, y_i) , $i = 1 - N$. Nasprotno minimiziramo pri »y-regresiji« (yLR) vsoto kvadratov »navpičnih« razdalj.

5 REZULTATI IN DISKUSIJA

5.1 Trdnost paličk

Dimenzije paličk so bile približno: $L = 35$ mm, $H = 4$ mm, $W = 2,5-3$ mm, pri vsaki posebej pa smo dimenzije pri preizkusu natančno izmerili. Razmika med valji sta bila: $L_1 = 10$ mm, $L_2 = 20$ mm [16]. Od

Tabela 1: Izračunana Weibullova parametra za 30 podatkov trdnosti za paličke

Metoda	m	σ_0 /MPa
xLR	8,59	292,74
yLR	6,81	297,84
ML	6,15	298,10
MM	7,02	296,82

30 meritev je bila najmanjša trdnost 221,14 MPa, največja pa 372,80 MPa. Vrednosti trdnosti so za korundno keramiko dokaj skromne. Povprečna vrednost trdnosti je bila $\langle \sigma_{\text{pal}} \rangle = 277,69$ MPa, standardna deviacija pa $\delta \sigma_{\text{pal}} = 47,35$ MPa. Weibullova parametra, izračunana po vse štirih metodah (LR ima dve različici), sta prikazana v **tabeli 1**.

Weibullov modul m je dokaj majhen, saj je za skrbno izdelano keramiko navadno precej večji od 10. Različne metode dajo precej različne vrednosti m , medtem ko je ocena umeritvenega parametra veliko bolj zanesljiva.

5.2 Trdnost okroglih ploščic

Dimenzije ploščic so bile približno: $2R = 16,7$ mm, $H = 1,8$ mm. Tako kot pri paličkah, smo posebej natančneje izmerili dimenzije vsake ploščice. Posebej previdno in natančno je treba izmeriti debelino H , saj je tako pri ploščicah kot pri paličkah v izrazu za upogibno trdnost kvadrat debeline; enačbi (1) in (4a). Debeline vzorcev so namreč majhne, da jih laže zlomimo, pri nenatančnem merjenju pa je lahko relativna napaka meritve debeline velika. Po priporočilih smo debeline ploščic izmerili po zlomu: če se je npr. ploščica zlomila na tri kose, smo izmerili debeline vseh treh blizu središča in izračunali povprečje debelin. Premer kroglic je bil 2 mm (nepomemben podatek za enačbo (4), da le kroglice niso prevelike), drugi ključni podatki za izračun trdnosti pa so bili še: $2R = 16,70-16,81$ mm, $2R_a = 11$ mm, $2b = 1,4$ mm. Od 30 meritev je bila najmanjša trdnost 197,20 MPa, največja pa 533,06 MPa. Povprečna vrednost trdnosti je bila $\langle \sigma_{\text{plo}} \rangle = 338,39$ MPa, večja kot pri paličkah, standardna deviacija pa $\delta \sigma_{\text{plo}} = 86,77$ MPa. Relativna standardna deviacija je večja kot pri paličkah, kar kaže na še manjši Weibullov modul pri ploščicah, pa čeprav je povprečna trdnost večja. Weibullova parametra za ploščice sta prikazana v **tabeli 2**.

Tabela 2: Izračunana Weibullova parametra za 30 podatkov trdnosti za ploščice

Metoda	m	σ_0 /MPa
xLR	5,27	365,54
yLR	4,78	369,58
ML	4,13	371,86
MM	4,50	370,81

Pozorni smo bili tudi na to, na koliko kosov se pri preizkusu zlomi ploščica: pri naših preizkusih od dva do štiri. Po pričakovanju so imeli vzorci, ki so se zlomili na tri ali štiri kose, precej večje trdnosti od tistih, ki so se zlomili samo na dva kosa. Zanimivi so tudi koti, pod katerimi so se vzorci zlomili (središčni koti kosov): ti koti kažejo tendenco k trištevni simetriji zaradi geometrije preizkusa, vsaj pri zlomu na dva ali tri kose. Simetrija ni bila popolna, vendar smo pri zlo-

mu vzorcev na tri dele opazili preferenčni kot 120° , pri zlomu na dva kosa pa preferenčna kota 120° in 240° . Pri zlomu na dva kosa je bil namreč en kos vedno večji od drugega in ni bilo primera, da bi bila oba središčna kota vsaj približno enaka 180° .

Vzroki za to, da je predvsem Weibullov modul tako majhen in pri ploščicah še manjši kot pri paličkah, so lahko različni. Najprej gre za pripravo vzorcev že pri pazljivosti nasipavanja prahov v kalupe, poravnavanju in ročnem stiskanju. Že v tej prvi fazi priprave lahko nastane razlika v kakovosti različnih oblik vzorcev (paličk in ploščic v našem primeru), ker so pri stiskanju zelo pomembne nehomogenosti tlaka po prostornini vzorca. Dalje, pomembni so parametri sintranja pa tudi končno oblikovanje (brušenje in poliranje) vzorcev pred upogibnimi preizkusi.

Omenimo še, da na končne rezultate, predvsem gre za relativno standardno deviacijo trdnosti in izračunani Weibullov modul, vplivajo tudi napake pri sami meritvi. Ne gre toliko za nenatančnost merjenja lomne sile, saj je merilna naprava zelo zanesljiva. Na napake morda najbolj vpliva morebitna površnost pri merjenju debeline vzorcev, saj je v obeh ključnih enačbah, (5) in (7 a), v imenovalcu izraza kvadrat debeline. Na rezultate vpliva tudi prevelika nehomogenost debeline, ki je lahko posledica nepravilnega nasipavanja in stiskanja v kalupih pred sintranjem. Gre pa tudi za poravnavo vzorcev v nosilcu, predvsem dobro centriranje ploščic. Vendar pa so računske simulacije na osnovi metode končnih elementov pokazale, da je vpliv takšnih napak zanemarljiv v primerjavi z inherentnimi razlikami med vzorci zaradi naključno porazdeljenih strukturnih napak, če le nismo pri merjenju preveč površni [18].

5.3 Primerjava efektivnih volumnov paličk in ploščic

Nazadnje primerjajmo vrednosti efektivnega volumna za ploščice in paličke. Efektivni volumen za paličke izračunamo po enačbi (6) in meri $V_{\text{pal}} = 44,1 \text{ mm}^3$. Efektivni volumen za ploščice pa je po enačbi (8) enak $V_{\text{plo}} = 16,75 \text{ mm}^3$. Iz teorije zloma, ki izhaja iz statistične porazdelitve (mikro)napak v vzorcih, sklepamo, da je pri Weibullovi porazdelitvi trdnosti vzorcev povprečna trdnost odvisna ne samo od kakovosti materiala, temveč tudi od efektivnega volumna pri upogibnem ali kakem drugem preizkusu trdnosti [14]. Čim večji je ta volumen, tem manjša je povprečna trdnost. Če med seboj primerjamo povprečno trdnost dveh skupin vzorcev iz sicer enakega materiala, a pri različnem načinu merjenja, lahko uporabimo enačbo:

$$\frac{\langle \sigma_{\text{plo}} \rangle}{\langle \sigma_{\text{pal}} \rangle} = \left(\frac{\langle V_{\text{pal}} \rangle}{\langle V_{\text{plo}} \rangle} \right)^{1/m} \quad (7)$$

Enačba (7) dobro velja za enotno vrednost Weibullovega modula m . Ker je potenčni eksponent pri razmerju volumnov na desni strani enačbe enak $1/m$, je očitno, da čim večja je vrednost modula m , tem šibkejša je odvisnost povprečne trdnosti od efektivnega volumna pri preizkusu. Če pa so vrednosti m skromne kot pri naših meritvah, utegne različen efektivni volumen pri obeh preizkusih precej vplivati na razliko v povprečni trdnosti. V našem izračunu smo za Weibullov modul m vzeli kar njegovo povprečno vrednost iz tabel 1 in 2 za obe vrsti preizkusa in za vse metode. To sicer ni povsem pravilno, saj sta modula pri obeh vrstah preizkusov precej različna med seboj, a vseeno nam bo račun dal neko kvalitativno oceno. Po enačbi (7) dobimo teoretični rezultat za razmerje povprečnih trdnosti ploščic in paličk 1,18, medtem ko je eksperimentalno razmerje enako:

$$\langle \sigma_{\text{plo}} \rangle / \langle \sigma_{\text{pa}} \rangle = (338,39 \text{ MPa}) / (277,69 \text{ MPa}) = 1,22.$$

Rezultata sta si relativno blizu, tako da je zelo verjetno delni vzrok za različni povprečni trdnosti pri obeh preizkusih različen efektivni volumen vzorcev. Zagotovo pa so vzroki za različne parametre Weibullove statistike tudi »notranje« narave (različna porazdelitev napak), saj različen efektivni volumen ne more razložiti zelo različna Weibullova modula pri obeh skupinah vzorcev.

6 SKLEP

Pri vzorcih v obliki okroglih ploščic in ravnih paličk iz korundne keramike smo izmerili upogibno trdnost z dvoosnim in enoosnim preizkusom. Ugotovili smo, da je povprečna upogibna trdnost okroglih ploščic večja kot pri paličkah in prav tako relativna standardna deviacija. To pomeni, da je Weibullov modul pri ploščicah bistveno manjši kot pri paličkah. Razlika v obeh Weibullovih modulih najverjetneje izhaja iz razlik v pripravi vzorcev. Medtem ko je pri paličkah zveza med lomno silo in upogibno trdnostjo preprosta, potrebujemo pri ploščicah za izračun trdnosti semianalitične modele, ki izhajajo iz numeričnih simulacij (metoda končnih elementov). Pri dejanski aplikaciji keramičnih izdelkov pa je dvoosna napestna obremenitev verjetno bolj realna od enoosnega opisa. Večjo povprečno trdnost pri ploščicah v primerjavi s paličkami se da samo delno razložiti z manjšim efektivnim volumnom obremenjevanja.

7 LITERATURA

- [1] W. Weibull, *J. Appl. Mech.*, 18 (1951), 293
- [2] P. Kittl, G. Diaz, *Res. Mech.* 24 (1988), 99
- [3] N. Orlovskaja, H. Peterlik, M. Marcevski, K. Kromp, *J. Mater. Sci.*, 32 (1997), 1903
- [4] R. Danzer, T. Lube, P. Supancic, *Z. Metall.*, 92 (2001), 773
- [5] D. Wu, Y. Li, *Chem. Eng. Sci.*, 56 (2001), 7035
- [6] I. J. Davies, *J. Mater. Sci.*, 39 (2004), 1444

- [7] D. Wu, J. Zhou, Y. Li, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 26 (2006), 1099
- [8] M. Ambrožič, L. Gorjan, *J. Mater. Sci.*, 46 (2011), 1862
- [9] L. Gorjan, M. Ambrožič, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 32 (2012), 1221
- [11] M. Ambrožič, L. Gorjan, *Vakuumist*, 32 (2012) 3, 12
- [12] M. Ambrožič, L. Gorjan, M. Gomilšek, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 34 (2014), 1873
- [13] A. Borger, P. Supancic, R. Danzer, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 22 (2002), 1425
- [14] R. Danzer, P. Supancic, T. Lube, *Z. Metall.*, 92 (2001), 773
- [15] ASTM C 1239 – 95: Standard practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995
- [16] ASTM C 1161 – 94: Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994
- [17] M. Gomilšek, M. Ambrožič, L. Gorjan, *Vakuumist*, 33 (2013) 4, 4
- [18] A. Borger, P. Supancic, R. Danzer, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 24 (2004), 2917