

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor 23-07-08

strojírenská technologie

zaměření

strojírenská metalurgie

Katedra materiálu a strojírenské
metalurgie

KERAMICKÉ A KOVOKERAMICKÉ KOMPOZITY

VE STROJÍRENSKÉ VÝROBĚ JAKOŽTO KONSTRUKČNÍ DÍLY

Markéta Myšková

KPT - 342

Vedoucí práce: Doc.Ing.Miroslav Kořínek,CSc

Rozsah práce a příloh:

Počet stran49
Počet příloh -
Počet tabulek 9
Počet obrázků15
Počet výkresů -

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146076740

Datum: 17.8.1990

strojn^í a textiln^í
Vysoká škola: v. Liberci Fakulta: strojn^í
materiálu a strojírenské
Katedra: metalurgie Školní rok: 1989/90

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DĚLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Markéta J A K O U B K O V Á - MYŠKOVÁ
obor strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorozních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Keramické a kovokeramické kompozity
ve strojírenské výrobě jakožto konstrukční díly

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte literární rešerši se zaměřením na charakteristiku a použití metalokeramických součástí v konstrukční oblasti strojírenství podle dostupných materiálů
2. V experimentální části se zaměřte na stanovení struktury a vybraných mechanických vlastností u dostupných materiálů; navrhnete metodiku měření včetně přípravy vzorků.
3. Proveďte diskusi výsledků vzhledem k očekávaným vlastnostem a shrnutí tématu.

V 90/90S
VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 8
PSČ 461 17

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy, schémata

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

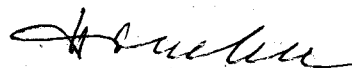
- /1/ BAREŠ, R.A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 1988.
- /2/ EVANS, A.G., LANGDON, T.G.: Konstrukcionnaja keramika. Moskva, 1980.
- /3/ ZEMÁNKOVÁ, J.: Strojírenství, 8, 1987
- /4/ GITTER, H.: Strojírenství, 9, 1986.

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Věra Vodičková

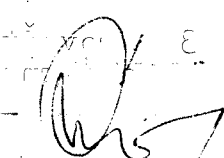
Datum zadání diplomové práce: 11.9.1989

Termín odevzdání diplomové práce: 17. srpna 1990




Doc. Ing. Zdeněk Holubec, CSc

Vedoucí katedry


Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc

Děkan

v Liberci dne 5.9. 1989

M í s t o p ř í s e ž n é p r o h l á š e n í

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 17.8. 1990

Marketa Ujtková
.....

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

b	- šířka vzorku
C	- poddajnost vzorku
d	- střední velikost zrn
d_v	- hustota, pevnost
E_M	- modul pružnosti kovové matrice
E_K	- modul pružnosti keramiky
F	- síla při zatěžování
G_I	- hnací síla trhliny
h	- tloušťka vzorku
H_{μ}	- mikrotvrdost
K_{IC}	- lomová houževnatost
l	- délka vzorku
L	- potenciální energie deformovaného systému
m	- Weibullův modul
P_f	- pravděpodobnost okamžitého porušení
P	- síla
Δp	- tlak
R_{mo}	- pevnost v ohybu
T_E	- teplota tavení eutektika
V	- objem vzorku
W	- práce vnějších sil
y	- průhyb při zatěžování
σ_M	- koeficient elektrické vodivosti kovové matrice

σ_K

ρ

γ

γ_{AA}

Π

$\sigma_{1,2}$

σ_{∞}

σ_M

σ_K

σ_v

φ_m

φ_v

λ_M

λ_K

- koeficient elektrické vodivosti keramiky
- radius póru křivky povrchu
- volná povrchová energie
- energie hranic zrn
- pórovitost
- napětí
- pevnost bezporézního materiálu
- pevnost kovové matrice
- pevnost keramiky
- hranice pevnosti při porušení
- hromadný podíl hmoty
- objemový podíl hmoty
- koeficient tepelné vodivosti kovové matrice
- koeficient tepelné vodivosti keramiky

OBSAH

	strana
1. ÚVOD	8
2. PŘEHLED DOSTUPNÉ LITERATURY.....	10
2.1. Struktury	10
2.2. Vlastnosti	13
2.3. Keramické systémy a jejich způsob výroby .	19
2.3.1. Výroba kovokeramických kompozitů	24
2.3.2. Charakteristiky cermetů	26
2.4. Zkoušení keramických a kovokeramických materiálů	28
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	
3.1. Dostupné materiály	35
3.2. Vlastnosti - hustota	36
3.3. Příprava vzorků, mikrostruktury	37
3.4. Modul pružnosti	44
3.5. Tvrdost	46
4. PROGNOZA VÝROBY A UŽITÍ KERAMICKÝCH A KOVOKERA- MICKÝCH KOMPOZITŮ U NÁS	48
5. Literatura	49

1. ÚVOD

Novým trendem ve strojírenství je využívání technologicky vhodných keramických materiálů. Keramika proniká do strojírenství jednak jako nástrojový materiál a jednak jako konstrukční materiál. Např. je všeobecnou snahou dosáhnout snížení spotřeby energie při výrobě součástí i při provozu strojů zmenšením tepelných a mechanických ztrát.

Nástrojová keramika se uplatňuje u obráběcích strojů - možnost použití keramických a cermetových řezných nástrojů.

Podnětem pro použití keramiky na konstrukční díly byly aplikace v proudových leteckých motorech. Svými vlastnostmi umožňuje nahradit částečně nebo zcela kovové součásti hlavně u spalovacích motorů. Jedná se o písty motorů, Al_2O_3 vložky válců, sací a výfukové ventily, kryt ventilového rozvodu, součásti vačkového hřídele, oběžné kolo turbodmyhadla, vedení odtokového ventilu pro turbodmyhadla (Porsche), díly výfukové soustavy, valivé elementy pro uložení hřídelů, vodící lůžka obráběcích strojů, stříkají se na pracovní plochy prstenkových a válcových kalibrů (WC-NiCrBSi), na vodící kolíky (Al_2O_3) zkušební měřidla (WC-Co). Mají uplatnění i v textilním průmyslu: vodiče nití, vodící kladky, hřebenové brzdičky nití, fixační lišty, tažné válečky, napínací kladky. Keramika má velmi rozmanité použití ve výrobě např.: sanitární předměty, vysokonapěťové izolátory, elektrotechnické zboží, raketové trysky, součásti tryskových motorů, vesmírných těles.

V současné době využívají keramiky ve své výrobě některé světové firmy. Např. firma ISUZU se zaměřila na výrobu

adiabatického motoru s plným využitím keramických součástí vystavených tepelným vlivům s cílem dosáhnout ekonomického využití paliv, snižování provozní hlučnosti.

Vychází se z izolační schopnosti keramických látek. Cílem je výroba celokeramického motoru, který svými tepelněizolačními vlastnostmi umožní odstranění konvenční chladicí kapalinové soustavy, tedy chladiče, větráku, ochranné mřížky. Dále některé motory Porsche mají vedení odtokového ventilu pro turbodmychadla z oxidu zirkoničitého ZrO_2 . Ventily pracují v přerušovaném provozu při teplotách 1050°C bez mazání, přičemž opotřebení vedení ve srovnání s kovovým kleslo na desetinu. Použití mají i keramická vlákna /výztuž kompozitů/. Už od roku 1978 jsou vyráběna firmou Carborundum Co /USA/ vlákna z nitridu bóru /mají vysokou teplotní stabilitu, oxid. stabilní do 855°C , vysoký elektrický odpor - $10^{14} \Omega\text{cm}$ při 25°C , vysokou teplotní vodivost $28,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ při 300°C /. V roce 1988 byla zahájena výroba spojitých vláken SiC u firmy Nippon Carbon, Japonsko. V roce 1985 vlákna hlinito-křemičitá, firma ICI/USA/, 1987 hlinitá vlákna firmy Sumitomo/Japonsko/.

Zavádění keramických materiálů zvětšuje u přeplňovaných vznětových motorů energii výfukových plynů, která může být využita pro zlepšení tepelné účinnosti přeplňováním turbodmychadlem o zhruba 2%. Má velkou budoucnost i z hlediska současného návrhu adiabatického motoru bez chlazení [1].

V zásadě lze konstatovat, že keramické eventuelně kovo-keramické konstrukční díly přinášejí zvýšení odolnosti strojů proti opotřebení třením a snižují energetickou náročnost na jejich výrobu. Proto jsou to materiály budoucnosti.

2. PŘEHLED DOSTUPNÉ LITERATURY

I když je používání keramiky ve strojírenství u nás na samém začátku, stav české a slovenské literatury ^{je} příznivý. Zejména literatury, která se týká nástrojové keramiky. Jednou z novinek, kterou vydal OBIS Praha, je kniha s názvem „Řezná keramika“ 1987 autora Tomáše Langa a kolektivu. Seznamuje nás nejen s vlastnostmi a použitím řezné keramiky, ale také s její úlohou v současné československé strojírenské výrobě a s tím, kde jsou začátky vzniku keramických materiálů. Jednou z dalších knih vydaných v roce 1987 týkající se keramiky je „Plazmové stříkání kovových a keramických prášků“ autorů P. Matejky a B. Benka. Seznamuje nás s novou technologií ochrany povrchu součástek, které musí odolávat korozi, erozi, tření a abrazi. K tomuto tématu také vychází sborníky ze seminářů a zprávy výzkumných pracovníků.

Použití keramiky ve světě se stalo téměř samozřejmostí a stav literatury o ní je podstatně vyšší než u nás. Většina literatury byla vydána v SSSR, USA nebo Japonsku už na počátku 80. let. Např.: Davidge R.W. "Mechanical behaviour of ceramics, Cambridge Univ, 1979; R.N. Katz, E.M. Lenol: Ceramics for diesel engines: Preliminary results of a technology assessment, 1981; Tatayoski Iseki and all: Brazing of skicon carbide to stain, 1985.

2.1. Struktury

Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více /nejméně 2/ fází z nichž alespoň 1 je pevná s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a které dosahují vlas-

tností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou/fází/
samostatně ani prostou sumací.[1] Takovým materiálem je kera-
mika a kovokeramika. Keramika je ze strukturního hlediska
jednoduchá nebo složená anorganická matrice obsahující oddě-
lené částice většinou granulárního, ale též destičkovitého
nebo vláknitého typu.

V každém takovém materiálu existují póry různých rozmě-
rů, které zodpovídají za rozdíl mezi skutečnou a teoretickou
pevností a ovlivňují mikrostrukturu. V monovlákně je velikost
pórů 1,5-20 nm. Póry vzniklé v materiálu úmyslně /expozicí ply-
nů/ nebo nedokonalostí míšení a zpracování jsou s průměrem
min. 100 μ m. Tyto póry jež spoluvytvářejí superstrukturu kompo-
zitu.

Při geometrickém popisu struktur je vhodné uvažovat
dva druhy systémů: A/ systémy s jednou spojitou fází /matricí/
a s jednou /i více/ dispergovanými fázemi
B/ systémy se dvěma/i více/ spojitými fázemi
ad A/

Je třeba /při popisu/ uvažovat charakteristiky dispergo-
vané fáze: tvar částic, velikost částic/ a charakteristiky sy-
stému: - koncentraci a koncentrační distribuci částic

- orientaci částic
- topologii částic

O tvaru částic můžeme předpokládat, že se přibližuje kouli
/elipsoidu/ nebo válci, který charakterizuje částice od desti-
ček k vláknům.

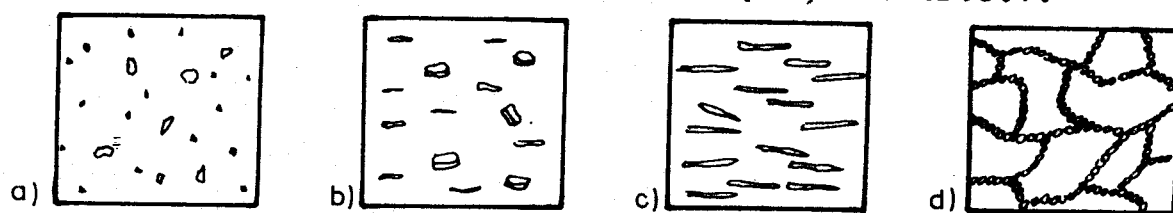
Velikost a distribuce velikostí určují texturu materiálu a

spolu s objemovým poměrem fází také vnitřní povrch.

Koncentrace je objemová část dispergované fáze.

Koncentrační distribuce popisuje rozsah smíšení fází a lze ji považovat za nejdůležitější měřítko kvazihomogenity systému.

Orientace částic ovlivňuje izotropii systému. Výrobní technologie míšení, válcování, lisování, vytlačování atd., budou v případě nekulových částic způsobovat neplánovanou orientaci částic, a tím budou vytvářet anizotropii, viz. obr. č. 1.



Obr. 1 Anizotropie

- a/ náhodně uspořádané koule
- b/ orientované destičky
- c/ orientovaná diskontinuální vlákna
- d/ řetězcově agregované koule

Topologií částic rozumíme jejich vzájemný prostorový vztah.
ad B/

Tyto soustavy popisuje druh dimenzionální /geometrické/ spojitosti, která může být v jednom směru /vlákna/, ve dvou /deska/ a ve třech /dimenzích/. Tyto materiály se popisují stejně jako předchozí a zaujímají významné místo v kompozitech, neboť mají zvlášť výhodné vlastnosti. Příkladem jsou cermety, které vznikají slinutím směsi dvou materiálů /jeden keramický, druhý kovový/ smíšených v práškovém stavu. Při popisu struktury je třeba uvažovat také fyzikální charakteristiky složek: - fyzikální stav dispergované fáze /s, l, g fáze/

- složení matrice /tedy fyzikální vlastnosti/
- fyzikální /popř.i chemická/ interakce fází
ve struktuře
- mezifázové rozhraní

Na fyzikální popis struktury neexistuje jednotná teorie
vzhledem k rozmanitosti materiálů.

2.2. Vlastnosti

Keramika ať masivní, nebo ve formě nástřiku, má následující vlastnosti:

- vysokou tvrdost s nízkým třením
- malé opotřebení
- vysokou odolnost proti korozi
- nízkou hustotu
- malé třecí opotřebení
- malou tepelnou vodivost
- vysokou schopnost tlumení tepelných vln
- křehkost
- malou pevnost v ohybu a stříhu
- velkou pevnost v tlaku

Význačnou roli v ovlivňování vlastností keramiky mají jednotlivá zrna, póry a hranice zrn s ohledem na: velikost, množství, počet, tvar, utvoření, rozdělení, stejnoměrnost.

Při výrobním procesu keramiky se usiluje o složení s velmi malou velikostí zrn, úzkým spektrem rozdělení zrn a homogenní strukturou. Vliv velikosti zrn ukazuje tabulka 1.

Znázorňuje pevnost v ohybu oxidové keramiky v závislosti na střední velikosti zrn slinované struktury.

Toto chování je obecně popsáno vzorcem

$$R_{mo} = k \cdot d^{-n} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

kde R_{mo} je pevnost v ohybu, k - konstanta, d - střední velikost zrn, n - exponent.

Některé fyzikálně mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab.2.

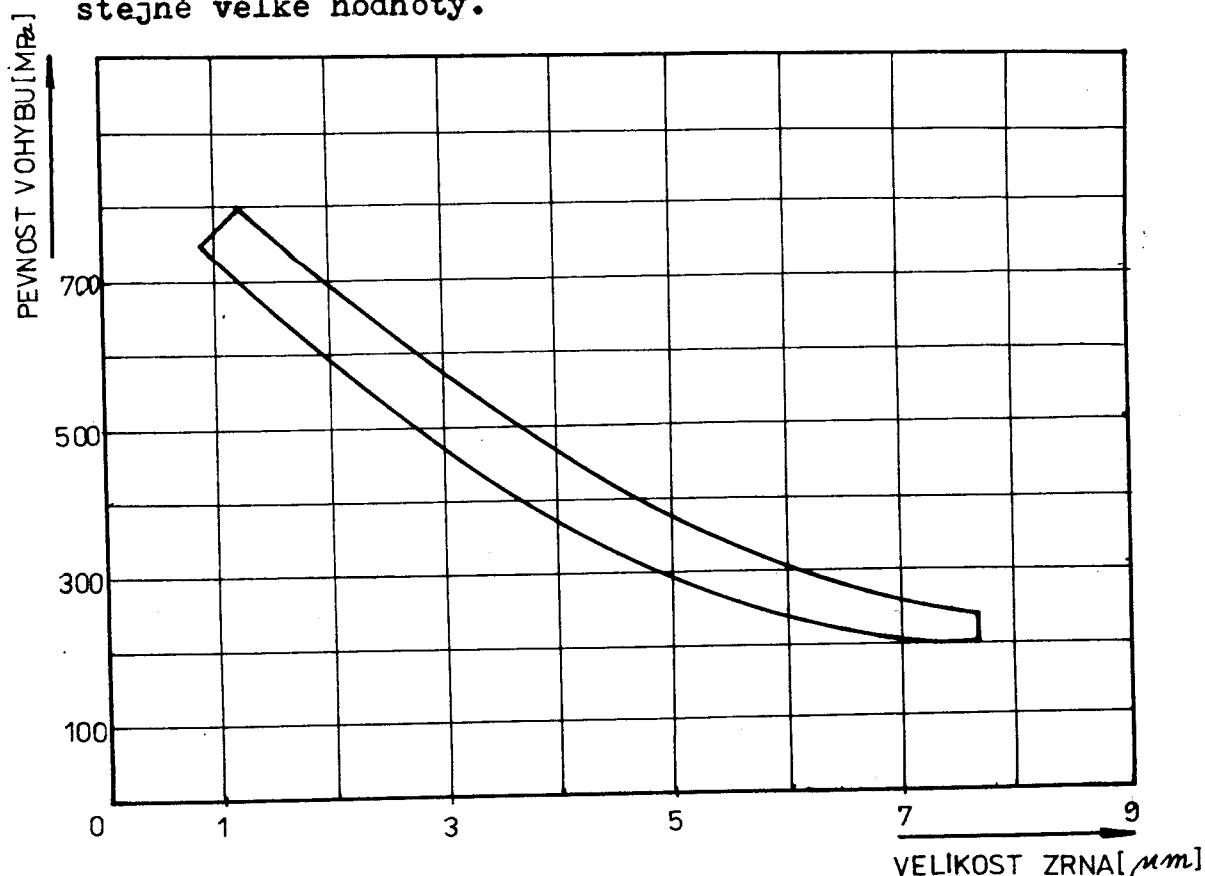
VLASTNOST	ZNAČKA	JEDNOTKA	D-210	Si_3N_4	PKNB	OCEL 12050
MĚRNÁ HUSTOTA	ρ	g.cm^3	4,22	3,3	3,4	7,8
STŘ. VEL. ZRN	d	μm	0,5 - 1,0	—	4	—
TVRDOST	HV10	—	1700	1600	6000	700
PEVNOST V TLAKU	R_m	MPa	4000	2500	—	6-700
PEVNOST V OHYBU	R_{mo}	MPa	650	800	550	7-800
LOM. HOUŽEVNOST	K_{IC}	$\text{MPa.m}^{\frac{1}{2}}$	190	220	—	—
MODUL PRUŽNOSTI	E	GPa	380	320	680	210
TEPEL. VODIVOST	λ_1	W/mK	23	36	—	50
SOUČ. TEP. ROZTAŽNOSTI	α_1	$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	7,8	3,2	3,6	11,2
PARAMETRY TEP. ŠOKU	R_1	$^\circ\text{C}$	120	400	180	—

Tabulka 2 Některé fyzikálně mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti

Keramické materiály se liší od kovů větší tvrdostí, vysokou pevností v tlaku, vysokým modulem pružnosti a malou hustotou. Další rozdíl je v poměru pevnosti v tlaku k pevnosti v ohybu. U keramických materiálů je pevnost v tlaku 7 až 10 krát

vyšší, zatímco u kovů vykazuje pevnost v tlaku a ohybu skoro stejně velké hodnoty.

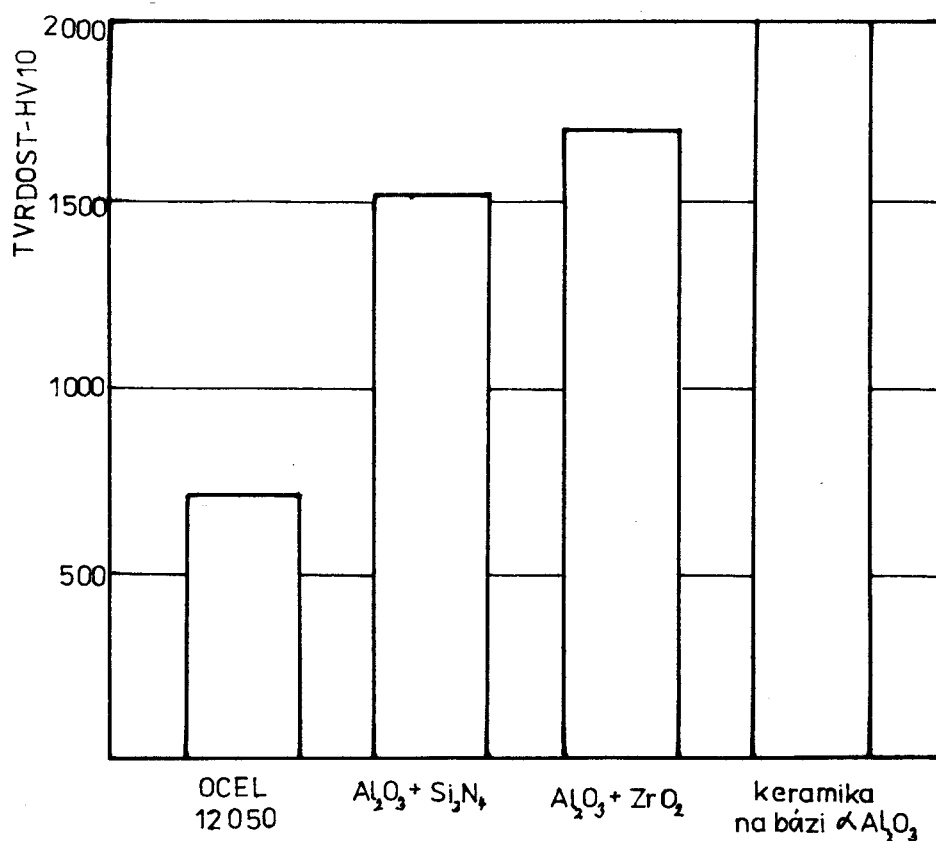


Tabulka 1 Diagram závislosti pevnosti v ohybu oxidové keramiky na střední velikosti zrn slinované struktury

Další význačné vlastnosti keramiky ve srovnání s kovy jsou:

- vysoká tepelná odolnost
- stálá pevnost v ohybu i při vysokých teplotách
- chemická stálost
- odolnost proti opotřebení [2].

Keramika na bázi oxidu hlinitého patří k nejtvrdějším známým materiálům. Tvrdost je vyšší než u všech kovů a leží také výšše než u většiny všech přírodních látek s výjimkou diamantu. Vysoká tvrdost je také významným znakem pro dobrou odolnost proti opotřebení keramického materiálu /tab. 3/.



Tabulka 3/Graf tvrdosti některých materiálů

Hlavní předností jsou vysoké tvrdosti při vysokých teplotách. Keramické materiály jsou velmi citlivé na defekty, neboť i ty nejvyšší z nich mají relativně malou lomovou houževnatost /řádově jednotky $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ /. Polykrystalická /keramická/ vlákna, která jsou použitelná jako výztuž kovů a keramiky, mají extrémní odolnost prostředí, vysokou tuhost a pevnost a vysokou tepelnou odolnost / 1350 - 1600°C /.

Modelem pro popis pevnostního chování keramických materiálů je WEIBULLOVA pravděpodobnostní teorie. Podle ní je pravděpodobnost okamžitého porušení P_f definována vztahem

$$P_f = 1 - \exp \left[- \int_{(V)} \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m dV \right] = 1 - \exp[B], \quad (2)$$

kde V je objem namáhaného materiálu, σ je napětí působící v tomto objemu, σ_u je hodnota napětí, pod níž se materiál nebude porušovat / $P_f \rightarrow 0$ / , σ_0 je normalizační hodnota /tzv. charakt. pevnost objemové jednotky/, m je WEIBULLŮV modul. Cílem technologie výroby keramiky je tedy produkce s co nejmenším rozptylem vlastností / vysokým modulem m /. Pro jednoduchost statického rozložení pevnosti keramických materiálů předpokládejme jednorozměrné rovnoměrné tahové namáhání součásti objemu V a zvolme prahovou hodnotu $\sigma_u = 0$, pak z rovnice plyne pro pravděpodobnost porušení

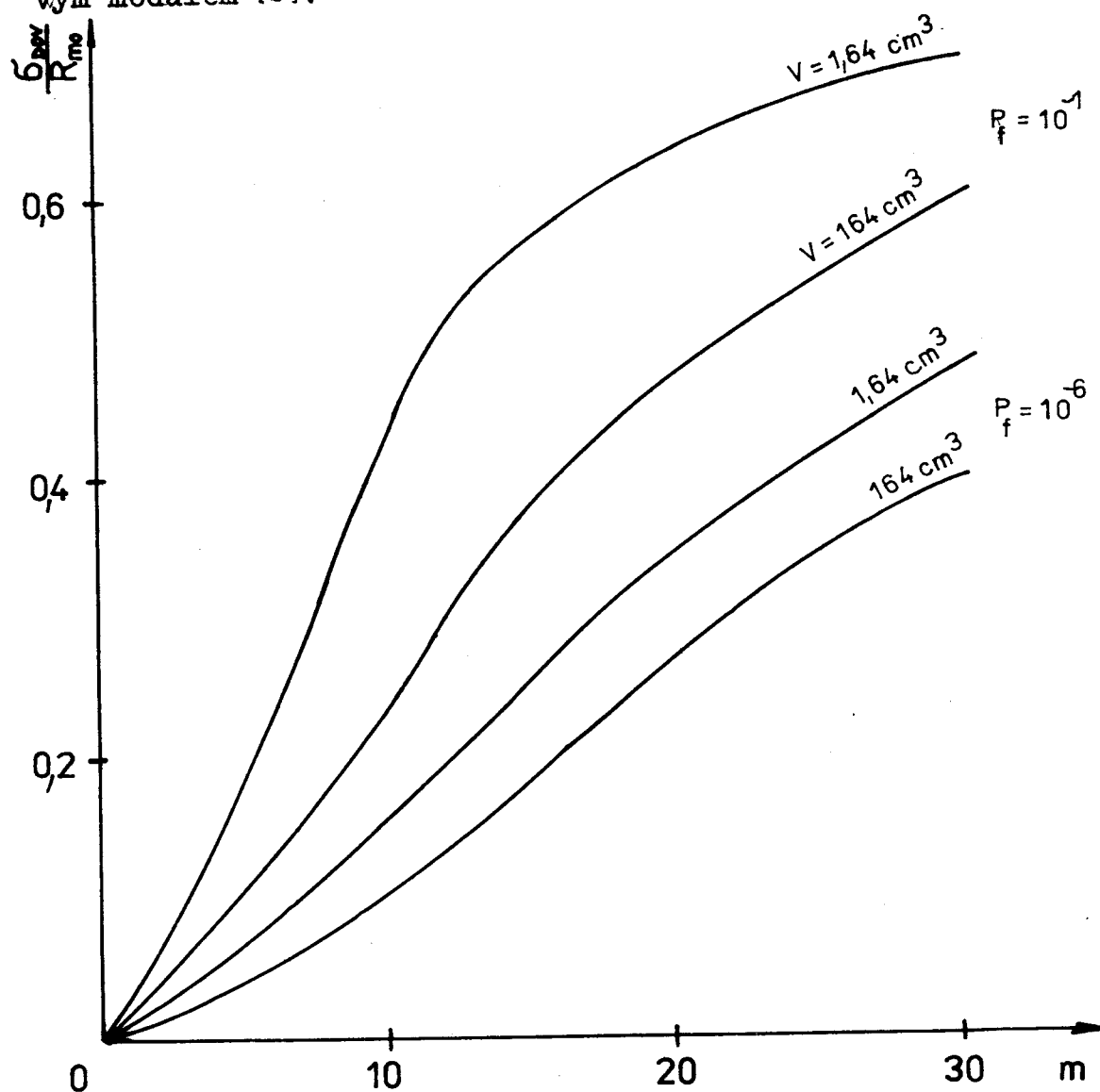
$$P_f = 1 - \exp \left[- (\sigma / \sigma_0)^m \cdot V \right] . \quad (3)$$

Jestliže např. objem velikosti V_2 má povolené napětí σ_2 pak součást stejně namáhaná s objemem V_1 bude mít přípustné napětí σ_1 :

$$\sigma_1 = \sigma_2 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{1}{m}} . \quad (4)$$

Z toho vyplývá, že dovolené návrhové napětí pro keramiku není pevnou hodnotou jako u kovů a jejich slitin, ale mění se s objemem namáhaného materiálu. V tabulce 4 je znázorněn pokles přípustného návrhového napětí s klesajícím m a rostoucím V pro 2 hodnoty P_f . Weibullův modul keramiky dosahuje hodnot

8-15. Volbou materiálu s vyšší pevností je možné při dané pevnosti zvětšit spolehlivost volbou materiálu s vyšším Weibullovým modulem [3].



Tabulka 4 Pokles dovoleného namáhání se změnou Weibullova modulu m pro dva objemy součástí a dvě hodnoty pravděpodobnosti porušení

Keramické materiály mohou působením prostředí a zejména teploty měnit populace defektů /existující se otupují, jiné vznikají/ a některé materiály mohou v užitém rozsahu teplot procházet strukturálními změnami např. formou fázových

transformací jako je tomu u parciálně stabilizovaného ZrO_2 . To vše se odrazí ve změně modulu m . Jestliže při změně teploty klesne modul z hodnoty 20 na 10, může pravděpodobnost porušení vzrůst až o 5 řádů.

2.3. Keramické systémy a jejich způsob výroby

Nejjednodušší keramický systém je dvoufázový kompozit z keramické a pórové fáze, vyráběný slinutím prášků oxidu /např. Al_2O_3 , ZrO_2 , BeO , Si_3O_2 / při vhodných teplotách, přičemž rozsah porozity lze měnit tlakem aplikovaným na práškový kompak před slinováním. Množství pórů výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti [1]. Např. porcelán s 3% pórů má pevnost 195 - 205 MPa, s 10% pórů jen 125 - 140 MPa, kamenina má obvykle 15 - 17 % pórů a pevnost 50 - 60 MPa. Na druhé straně za hranicí kompozitů prvního typu určitá porozita zlepší vnitřní napjatost i výslednou pevnost a houževnatost kompozitu. Póry zde působí jako účinná bariéra rozvoje mikroporuch. Vytvoří-li se slinutím keramického prášku materiál spojitě porézní, je možno penetrací/infiltrací kovu do pórové sítě vytvořit kompozit se dvěma prolínajícími se spojitými strukturami /s obsahem kovu 20 - 60% objemu/ je vytvořen kompozit, který obsahuje dvě infrastruktury a uzavřené póry. Vlastnosti u těchto systémů jsou přibližně stejné jako u cermetů, mají však lepší /min. 2x / rázové pevnosti při nízkých teplotách /t.j. největší problém u cermetů/ a také pevnosti při vysokých teplotách jsou lepší. Pevnost je nepřímo úměrná druhé odmocnině z průměru zrna. Je třeba brát zřetel na: obsah pórů,

tvár pórů, velikost zrna, stupeň slinutí mezi zrny,
povrchové podmínky vzorků.

Tradiční keramika - systém keramika + sklo + póry
příkladem je porcelán tvořený křemenem a mulitem dispergova-
né fáze ve spojitě skelné matrici s porozitou 3-5% objemu.
Porcelán vzniká smíšením tří minerálů, jílu $/\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}/$
pazourku $/\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}/$ a živce $/\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2/$ a ohřátím na
1100 až 1400°C. Při této teplotě dojde k chemickým a fyzikál-
ním změnám, každá ze složek se transformuje zcela nebo částečně
do skla a nejméně dvou rozdílných krystalických látek /krysta-
lického aluminosilikátu - mulitu $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ a křemene/.
Podobné složení má i kamenina.

Mechanické vlastnosti velmi závisí na tvaru dispergova-
ných částic. Částice s ostrými úhly poskytují materiálu větší
tuhost než kulaté, avšak na druhé straně iniciují rozvoj mikro-
trhlin, které pozorujeme v mikrostruktuře řady keramik. Důležitý
je vliv rozložení dispergované fáze. /Může dojít ke shlukům
o průměru 300 μm. /Vlastnosti systémů, kdy je sklovitá fáze
naopak dispergovaná v keramické matrici, se značně liší.
Pevnost je určena povahou keramické fáze, především dosaženým
stupněm mezičásticového slinutí. Vysoce vypalované cihly mají
například spojitou fázi z keramiky /ze slinutých zrn mulitu/
s izolovanými oblastmi skla dispergovanými v tuhé matrici.
Ohybová pevnost je asi 10 MPa, zatímco nízkovypalované cihly
se skelnou spojitou fází mají pevnost značně nižší, 1,5-2 MPa.

Systém keramika - keramika - tuhá keramická fáze dispergo-
vaná v tuhé keramické matrici, za přítomnosti pórů /např.

matrice Si_3N_4 s dispergovanými částicemi SiC nebo B_6C /.

Je třeba, aby základní vlastnosti /pevnost, pružnost, dilatace/ složek nebyly příliš rozdílné. Pevnost systému Si_3N_4 -SiC je např. 40 - 55 MPa pro teploty 20 - 1100 °C.

Systém keramika v kovu / cermety / - jsou připravovány slinutím směsi kovových a keramických prášků. Strukturně jde o disperzi keramických částic ve spojitě kovové matici, popř. disperzi kovových částic ve spojitě keramické matici, nebo v některých speciálních, ale velmi perspektivních soustavách o dvou vzájemně se prolínajících fázích. V moderních kompozitech je keramická nebo kovová fáze ve tvaru jemných vláken nebo whiskerů / zvyšují pevnost, houževnatost/.

Parametr určující vlastnosti : poměr obou fází.

Je-li v soustavě 60 - 65 % kovové fáze, chová se kompozit spíše jako kov, pokud jde o houževnatost a rázovou pevnost, má však menší pevnost a větší creep při vyšších teplotách. Převažuje-li keramika je kompozit křehký, ale s lepšími vlastnostmi za vyšších teplot. Další parametr: typ vazby mezi keramickou a kovovou fází.

Několik mechanismů tvorby:

- mechanická interakce / bez chemické interakce/
např. cermety měď-sillimanit / bucholzit / , používané pro letecké brzdy, v nichž jsou keramické vláknité částice Al_2SiO_5 obklopeny spojitou kovovou maticí
- pouze povrchové chemické interakce při nichž se vytvoří tuhý roztok jako třetí fáze, např. cermety Cr-Al
- penetrace podíl hranice zrn, ale s chemickými vazbami

pouze na povrchu

- smíšení fází - vzniká většinou tuhý roztok než kompozit.

Působí-li mechanická interakce, pevnost kompozitu je nízká. Čím je silnější afinita mezi kovem a keramikou / vlivem účinku povrchových napětí nebo chemických vazeb /, tím je pevnost kompozitu vyšší. Chemické reakce na rozhraní fází mohou sice zvýšit soudržnost, zároveň však mohou negativně ovlivňovat pevnost některé fáze.

Velký vliv má také velikost zrn / nebo jejich specifický povrch /. Bylo např. prokázáno, že nejlepší výsledky cermetu kobalt-karbid wolframu se získají při průměru částic 3 - 4 μm a při průměrné vzdálenosti mezi částicemi 0,3 - 0,4 μm .

Zmenšuje-li se tloušťka kovového spoj. filmu, zlepšují se mechanické vlastnosti kompozitu za předpokladu, že je zachována fázová kontinuita. Jedním z důvodů může být, že kov ve formě tenkého filmu je méně tažný než kov v kompaktu, hlavním důvodem je změna superstruktury systému a z toho plynoucí změny vnitřní napjatosti a stavu mikroporuch. Mají-li částice dispergované v kovu extrémně malé rozměry / řádu 10 - 1 nm / a jejich vzdálenost je rovněž malá / menší než 10 nm / zamezují pohyb dislokací a výrazně zvyšují mechanické vlastnosti materiálu.

Je-li kompozit tvořen spojitou keramickou fází, v níž jsou dispergovány kovové částice, převažují vlastnosti keramické fáze, avšak může být dosaženo výrazného zvýšení pevnosti

rázové odolnosti a dynamického tlumení. Kovová zrna působí jako účinné překážky pohybu mikrotrhlin ve struktuře kompozitu / viz. tabulka 5 /.

	PODÍL DIS. FÁZE	ROZMĚRY ČÁSTIC
K - PÓRY PÁLENÉ CÍHLY	10-90 obj. %	0,5 - 300 μm
K - SKLO PORCELÁN	30-50 obj %	KŘEMEN 5-50 μm MULIT 0,1-3 μm
ŽÁRUVDORNÁK	50-90 obj %	μm - 1,5 cm
KAMENINA	50-60 obj %	PAZOUREK 10-15 μm KŘEMEN 0,5-50 μm NĚKTERÉ Č. 300 μm
K - K NITRID Si POJENÝ KARB. Si	5-40 obj %	1-10 μm
K - KOV DISPERZ. ZPEV.	5-10 obj %	asi 1 mm
CERMETY	15-80 obj %	1 - 10 μm
K VYZTUŽENÁ	5-30 obj %	0,05-0,4 mm
DRÁTY		délka 3-12 mm
KOVY VYZTUŽ.	20-65 obj %	0,02-0,05 mm
KER. VLÁKNY		délku > 5 mm

Tabulka 5 Rozměry dispergované fáze v keramickém kompozitu

2.3.1. Výroba kovokeramických materiálů

Nejčastějším způsobem vzniku keramických a hlavně kovokeramických látek je výroba spékáním.

Spékání je proces přetvoření látky, složené z systému částic s mechanickými nebo fyzikálními styky /spojeními/ malé vzdálenosti, v celistvou látku.

Rovnováha v systému disperzních částic se vyjadřuje rovností práce, vynaložené systémem na snížení povrchu i objemu. V souladu s tím na povrchu fáze vzniká tlak, odlišný od tlaku v sousední obklopující fázi

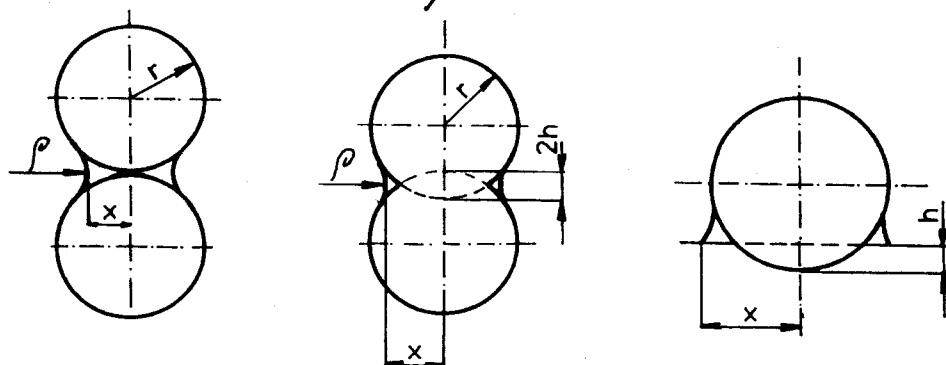
$$\Delta p = \frac{2\gamma}{\rho} \quad (5)$$

kde γ je volná povrchová energie, ρ radius póru křivky povrchu nebo

$$\Delta p = \frac{\gamma}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}} \quad (6)$$

kde ρ je hlavní radius zakřivení [4]. (Obr.13)

$$\Delta p = -\gamma \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{x} \right) \quad (7)$$



Obr.13. Hlavní radius zakřivení póru

Zvláštním druhem získávání kovokeramických kompozitů je usměrněná krystalizace. Výsledkem jsou tzv. eutektické cermety, představované kovy a nižšími sloučeninami v dvojných systémech. Takové cermety odpovídají potřebám termomechanické spojitosti.

OXID	KOV	$\varphi_m [\%]$	$T_E [^{\circ}\text{C}]$
Al_2O_3	Cr	78,00	1640
Cr_2O_3	Cr	80,00	1660
	Mo	13,9	1860
ZrO_2	Zr	—	1900
	V	1,5	1900
	Nb	1,5	—
TiC	W	13,3	2650
TiN	V	9,0	1870
W_2B	W	10,3	2700

Tabulka 6 Obsah oxidů v eutektických cermetech

2.3.2. Charakteristiky cermetů

Ve dvoufázových cermetech jsou možné tři případy koncentrační závislosti pevnostních vlastností podmíněné pevností spojení na hranicích fází. Jestliže pevnost spojení na hranicích fází $\alpha-\beta$ odpovídá pevnosti spojení na hranicích $\alpha-\alpha$ a $\beta-\beta$, tak lze pozorovat přímočarou koncentrační závislost. Jestli pevnost spojení na hranicích $\alpha-\beta$ je větší nebo menší než $\alpha-\alpha$ a $\beta-\beta$, lze pozorovat koncentrační závislost pevnosti s výstupkem nebo propadlinou. Obecně platí, že

$$\zeta = \zeta_{\infty} \exp(-b \Pi), \quad (7)$$

kde Π je pórovitost, b je koeficient, ζ je pevnost, normálové napětí, ζ_{∞} je pevnost bezporézního materiálu.

V případě $\gamma_{AB} \approx \gamma_{AA} \approx \gamma_{BB}$ platí pro koncentrační závislost pevnosti cermetů:

$$\zeta = \zeta_M \pm a \zeta_K \varphi_V, \quad (8)$$

kde a je koeficient, ζ_M je pevnost kovové matrice, ζ_K je pevnost keramiky a φ_V je objemový podíl hmoty.

V případě $\gamma_{AB} < \gamma_{AA}, \gamma_{BB}$ pevnost cermetu závisí na obsahu druhé fáze:

$$\zeta = \zeta_M (1 - b\varphi - c\varphi_V^2) \quad (9)$$

A při $\gamma_{AB} > \gamma_{AA}, \gamma_{BB}$ platí:

$$\sigma = \sigma_M (1 - d\varphi + f\varphi_V^2) \quad (10)$$

kde b, c, d, f jsou koeficienty.

Modul pružnosti cermetů:

$$E = E_M (1 - \varphi_V) + E_K \varphi_V \quad (11)$$

Modul pružnosti kovové matrice je E_M a modul pružnosti keramiky je E_K . Důležitou charakteristikou je také koeficient elektrické a tepelné vodivosti [4].

$$\sigma = \sigma_M (1 - \varphi_V) + \sigma_K \varphi_K \quad \lambda = \lambda_M (1 - \varphi_V) + \lambda_K \varphi_V \quad (12, 13)$$

Největší vliv na vlastnosti cermetů má porozita, rozměry zrn a tloušťka kovových vrstev mezi keramickými zrny.

Jestliže spojující fáze úplně obklopuje keramickou, tak pevnost cermetu je tím vyšší, čím je tenčí vrstva mezi keramickými zrny. Při menších rozměrech keramických zrn tloušťka mezivrstev spojující fáze se zmenšuje při stejném obsahu, pak pevnost cermetu s disperzní strukturou je vyšší. Příklady pevnostních vlastností některých keramických fází i kovů jsou uvedeny v tab. 7.

FÁZE	E [MPa]	E/d _v [m]	H _m [MPa]	σ _v [MPa]
TiB ₂	660	15,9	34 000	14 000
W ₂ B ₅	790	7,2	26 600	—
B ₄ C	460	18,0	45 000	12 000
TiC	510	10,0	31 700	20 000
ZrC	400	5,9	29 500	—
WC	731	4,6	21 000	7 000
BeC	360	12,0	14 900	7 000
Al ₂ O ₃	530	13,0	20 700	15 000
W	415	2,1	3 420	14 71

Tab. 7 Pevnostní vlastnosti keramických fází i kovů,
perspektivních pro vytvoření cermetů

2.4. Zkoušení keramických a kovokeramických kompozitů

Do výpočtů a odhadů spolehlivosti, životnosti i únosnosti konstrukčních dílů z těchto materiálů vstupují především parametry lomové mechanické. Patří mezi ně v první řadě lomová houževnatost K_{IC} , která je závažnou veličinou řídící životnost komponent, jejich časový průběh pevnosti atd.

Keramika je materiálem téměř ideálně křehkým, který až do porušení nevykazuje plastické deformace a to vede ke zkoušení ohybovým zatěžováním vlastního zkušební vzorku.

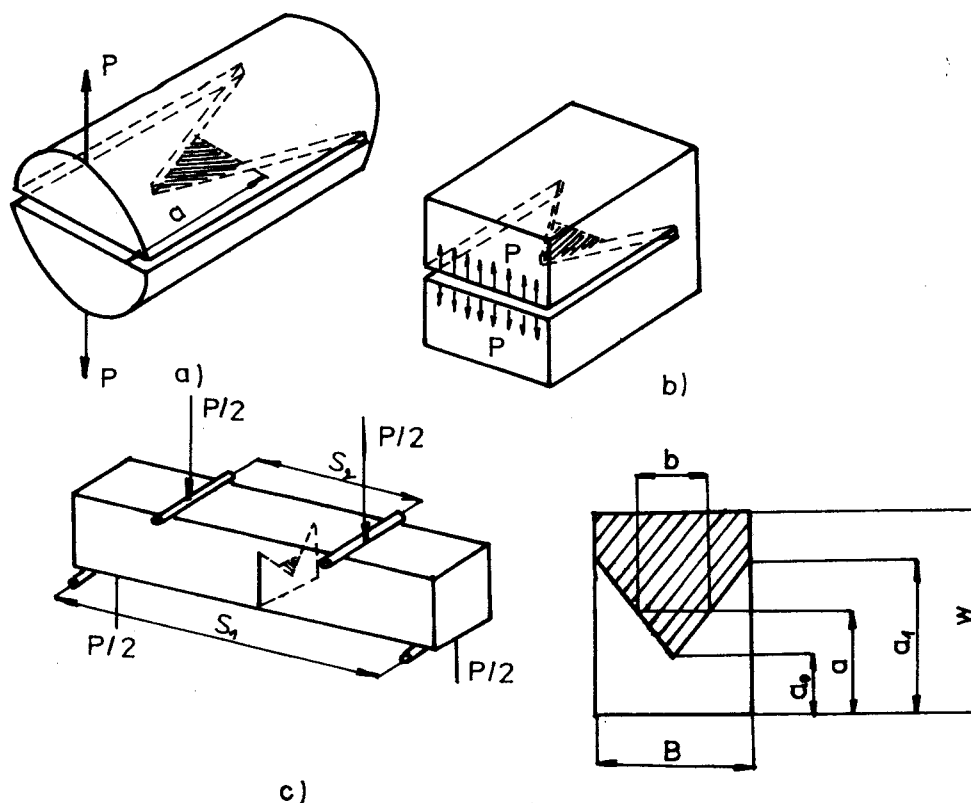
Obtížná obrobiteľnosť keramických materiálov vede ke snahe vyhnout se tvarově složitým vzorkům s otvory a zářezy, sloužícími jako koncentrátoři napětí, které napomáhají vzniku a vedení ostré iniciační trhliny.

Při výrobě iniciační trhliny pomocí teplotního šoku je nezbytné určit velikost vznikajících vnitřních prutí nebo je zvláštními postupy eliminovat. Je možné také použít metody cyklického zatěžování při působení koroze pod napětím. Vzorek se zářezem je umístěn do korozního média a zatížen tak, aby vznikající pole napětí vytvářelo faktor intenzity napětí blízký K_{IC} . Délku iniciační trhliny lze sledovat a řídit pomocí změn poddajnosti vzorku. Tato metoda je však zdlouhavá, koroze může změnit a ovlivnit výchozí vlastnosti materiálu a nelze ji použít pro všechny druhy nových keramických a kovokeramických kompozitů.

Nejrozšířenějším způsobem výroby iniciační trhliny se stala metoda vtisku pomocí Vickersova či Knoopova tvrdoměru nebo mikroměru.

Další způsob je zkouška vzorku s ševronovým zářezem /návrh podal Barker/. Vzorek může být malý, výroba levná, jelikož nevyžaduje povrchové broušení a leštění; není zapotřebí uměle vyrábět výchozí trhlínu, neboť ta vzniká sama z vrcholu zářezu pomalým podkritickým růstem, není zapotřebí měření trhliny, neboť K_{IC} se určuje pouze z hodnoty maximální síly při zatěžování; ~~chybové~~ zatěžování vzorku s ševronovým zářezem umožňuje měření za vysokých teplot. Používá se také termální naleptání v atmosféře za vysokých teplot louhy, potom postupné odkrývání struktur.

Na obr.14. jsou uvedeny různé modifikace vzorků s ševronovým zářezem.



Obr.14. Různé modifikace vzorků s ševronovým zářezem;
 a/ krátký prut; b/ krátká tyč; c/ pro čtyřbodový
 ohyb.

Teoretická analýza podmínek nestability vzniknuvší trhliny vychází z energetické bilance zatěžovaného vzorku s trhlinou. Neboť geometrie, uložení a zatížení vzorku s ševronovým vrubem při čtyřbodovém ohybu jsou dány obrázkem 14c. Zavádí se bezrozměrný popis tvaru zářezu a délky

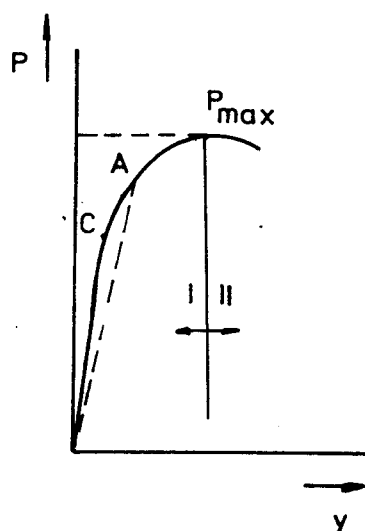
trhliny:

$$\alpha_0 = \frac{a_0}{W}, \quad \alpha_1 = \frac{a_1}{W}, \quad \alpha = \frac{a}{W} . \quad (16)$$

Délka čela trhliny b je

$$b = B \frac{a - a_0}{a_1 - a_0} = B \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_1 - \alpha_0} . \quad (17)$$

Při zatěžování vzorku lineárně narůstá síla a průhyb až do okamžiku, kdy se ve vrcholu vrubu iniciuje trhlina. Na křivce zatížení - průhyb /obr.15/ se v tomto okamžiku objeví odklon od linearit v důsledku změny tuhosti /podajnosti/ vzorku. Při odlehčení vzorku v bodě A se síla vrací lineárně k nule a vzniklá plocha v zátěžném diagramu představuje práci vnějších sil investovanou do nevratných změn ve vzorku [10].



Obr.15. Schematický průběh závislosti síly P na průhybu y ohýbaného vzorku s ševronovým zářezem.

C...iniciace trhliny; I - oblast stabilního růstu
trhliny, II - oblast nestabilního růstu trhliny.

Další nárůst trhliny o Δa vyžaduje postupné zvyšování síly pro tento pomalý podkritický růst až do okamžiku, kdy se trhlina rozběhne spontánně sama bez dalšího růstu síly a dolomí vzorek.

Hnací síla trhliny G_I představuje energii, kterou mechanická soustava těleso - vnější síly uvolní, když se plocha trhliny zvětší o jednotku plochy:

$$G_I = - \frac{dL}{da} \cdot \frac{1}{b} \quad (18)$$

Zde L je potenciální energie deformovaného systému s trhlinou. K L přispívá deformační energie U a práce vnějších sil W :

$$L = U - W \quad (19)$$

Z elastické teorie ohýbaného nosníku lze energii deformační vyjádřit pomocí poddajnosti vzorku C , což je průhyb vztažený na jednotkovou sílu:

$$C = \frac{y}{P} \quad (21)$$

$$U = (1/2C) \cdot y^2 = 1/2 \cdot P^2 \cdot C \quad (20)$$

Ze zátěžného diagramu lze diferenciál práce vnějších sil vyjádřit

$$dW = P \cdot dy = P \cdot dC . \quad (22)$$

Úprava a dosazení vztahů vede k vyjádření hnací síly trhliny:

$$G_I = \frac{P^2}{2b} \cdot \frac{dC}{da} \quad (23)$$

Jelikož trhlina je v postupném pohybu, je zřejmé, že při každém přírůstku musí hnací síla vyvážit odpor proti jejímu růstu, který materiál klade.

Ten je určen kritickou hodnotou hnací síly trhliny G_{IC} , jež je materiálovou charakteristikou:

$$G_I = G_{IC} \quad \text{neboli} \quad (P^2 / 2b) \frac{dC}{da} = G_{IC} \quad (24)$$

Z teorie lineární lomové mechaniky je známa vazba mezi G_{IC} a K_{IC} :

$$G_{IC} = K_{IC}^2 / E' , \quad (25)$$

kde $E' = E$ pro rovinnou napjatost,

$= E / (1 - \nu^2)$ pro rovinnou deformaci

Zde E, ν jsou Youngův modul pružnosti v tahu a Poissonovo číslo. Předpokladem je, že G_{IC} / K_{IC} nezávisí na délce trhliny.

Spojením vztahů (24) a (25) lze získat vztah pro kritický součinitel intenzity napětí :

$$K_I = \left[E' \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} \right]^{1/2}. \quad (26)$$

Kritický součinitel intenzity napětí je konečným výsledkem zkoušky vzorku s ševronovým vrubem a tudíž důležitou charakteristikou keramických i kovokeramických kompozitů.

3. EXPERIMENTALNÍ ČÁST

3.1. Dostupné materiály

Hlavním cílem této diplomové práce je nejen seřídění informací o keramických a kovokeramických materiálech z dostupné literatury, ale také i experimentální ověření některých vlastností těchto materiálů. Měření se měla provádět na vzorcích, resp. na výrobcích z keramiky /popř. z kovokeramiky/, které jsou dostupné na našem trhu. Protože u nás je výroba konstrukčních dílů z těchto materiálů teprve ve stadiu příprav, obrátila jsem se na Výzkumný ústav elektrotechnické keramiky v Hradci Králové.

Tento ústav je výzkumným pracovištěm spadajícím pod podnik Tesla a zabývá se využitím keramických materiálů v elektrotechnice. Pro kvantitativní vyhodnocování **struktury** kovokeramických materiálů / i keramických / zde využívají automatického analyzátoru obrazu IBAS-SEM-IPS firmy Opton.

Z Výzkumného ústavu elektrotechnické keramiky jsem získala tyto vzorky:

- A - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$
- B - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{W}$ /CERMET/
- C - korund - hrubozrnný
- jemnozrnný
- D - korund
- E - řezná keramika

Jednotlivé vzorky jsou uvedeny na obrázcích pod čísly 2.,

3., 4. a 5. Lze si udělat představu o jejich velikostech, neboť jsou vyfotografovány na sítnici o velikosti polí 1×1 cm.

3.2. Vlastnosti - hustota

Jednou z prvních experimentálně získaných informací o vlastnostech jsou hodnoty hustot uvedených vzorků. Ke stanovení byla použita metoda dvojího vážení / na vzduchu a v destilované vodě /.

Zvážením vzorků na vzduchu $/m_1/$ a ve vodě $/m_2/$, a po té jednoduchým propočtem na základě vzorce

$$\rho = \frac{m_1}{V} \quad (14)$$

jsem získala tyto hodnoty: viz. tabulka 8.

VZOREK	$m_1 [g]$	$m_2 [g]$	$V [cm^3]$	$\rho [g \cdot cm^{-3}]$
A	5,4714	4,1796	1,2918	4,2355
B	13,0255	11,5480	1,4775	8,8159
C	3,2289	2,4221	0,8068	4,0021
C	2,9034	2,1429	0,7605	3,8178
D	0,6177	0,4665	0,1512	4,0853
D	0,6005	0,4433	0,1572	3,8199
D	7,9859	5,9332	2,0527	3,8904
D	18,9432	13,9296	5,0136	3,7784
D	8,3063	5,9720	2,3343	3,5584
E	6,8997	5,1495	1,7502	3,9422

Z uvedených hodnot vyplývá, že hustoty keramiky se pohybují v rozmezí 3,56 až 4,2355 g.cm⁻³, pouze keramika s s příměsí kovu, tedy wolframový cermet, /Al₂O₃ o hustotě $\rho = 3,99 \text{ g.cm}^{-3}$, W o hustotě $\rho = 19,26$ /, má vlivem právě přísadového wolframu hustotu největší, a to 8,8159 g.cm⁻³. Tento vzorek obsahuje podle propočtů 31,5 % W a 68,5 % Al₂O₃.

3.3. Příprava vzorků, mikrostruktury

Keramické a kovokeramické kompozity jsou v podstatě novými materiály a proto ještě nejsou stabilizované všechny výzkumné metody, jak by se měly připravovat vzorky a něco o jejich zkoušení.

Neboť se vyznačují pórovitostí a většinou se skládají ze dvou /někdy i více/ spékanych systémů /kompozic/, volila jsem u jednotlivých vzorků takto:

porcelán - neupravený povrch

keramika - neupravený povrch

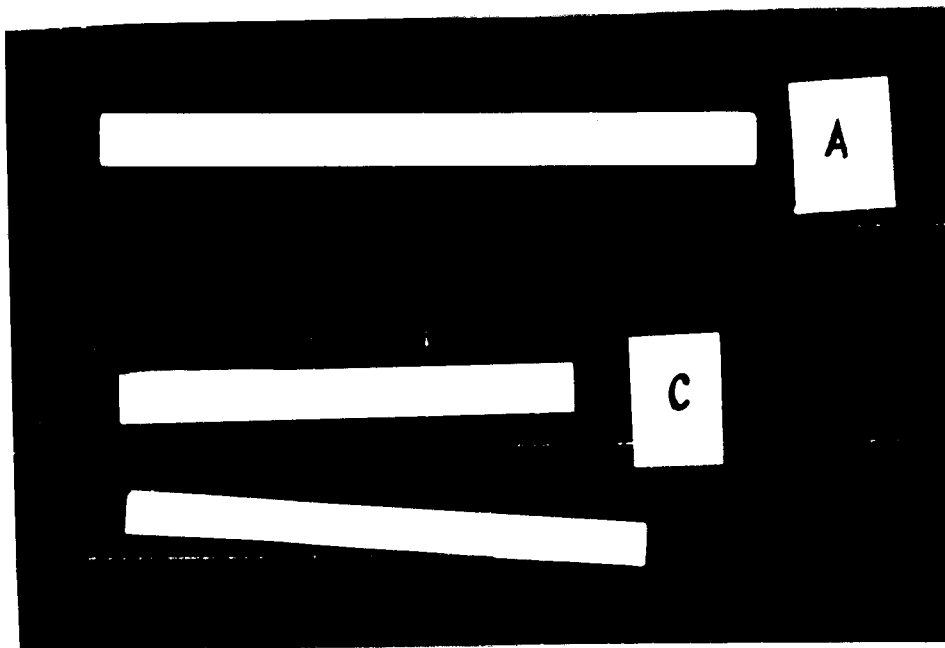
měkká keramika - neupravený povrch

cermet - broušení, leštění, nenaleptaný stav
naleptaný stav /Nital 3%/

Al₂O₃+ZrO₂ - broušení, leštění

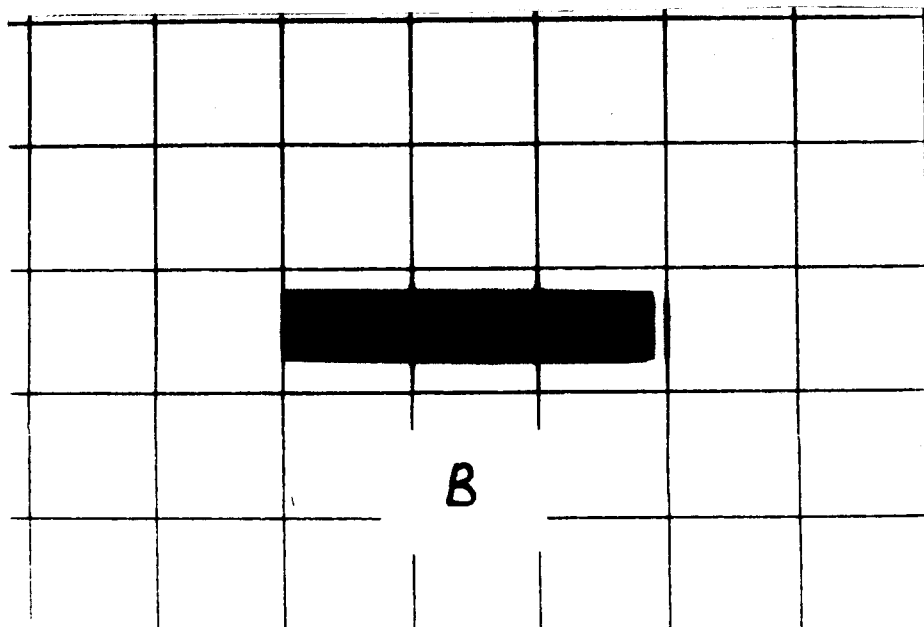
korund - neupravený povrch

Mikrostruktury jednotlivých vzorků jsou na obrázcích s čísly 6. až 12.



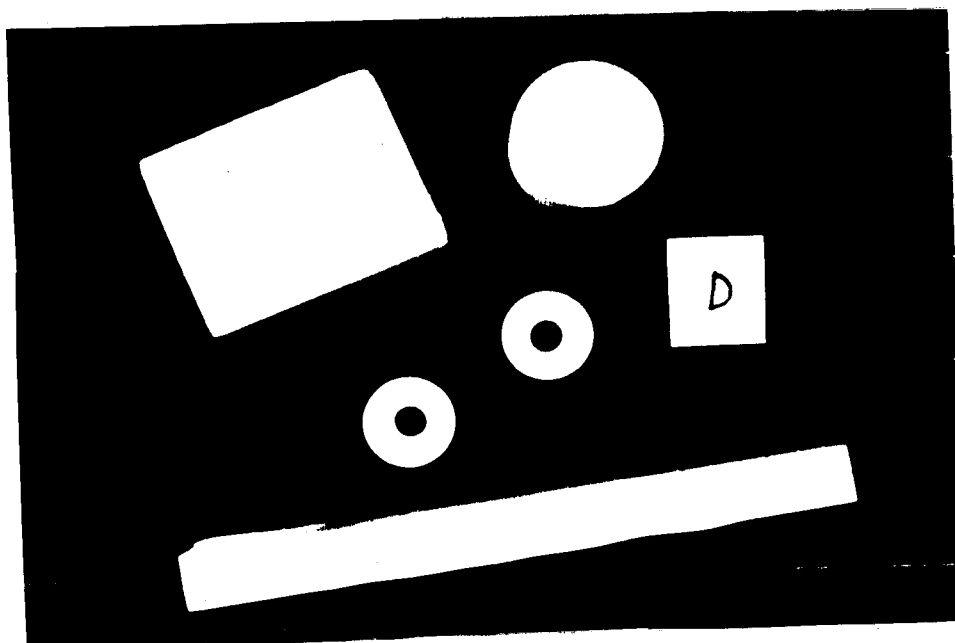
Obr.2 A - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$
 C - korund

Síť 10x10 mm



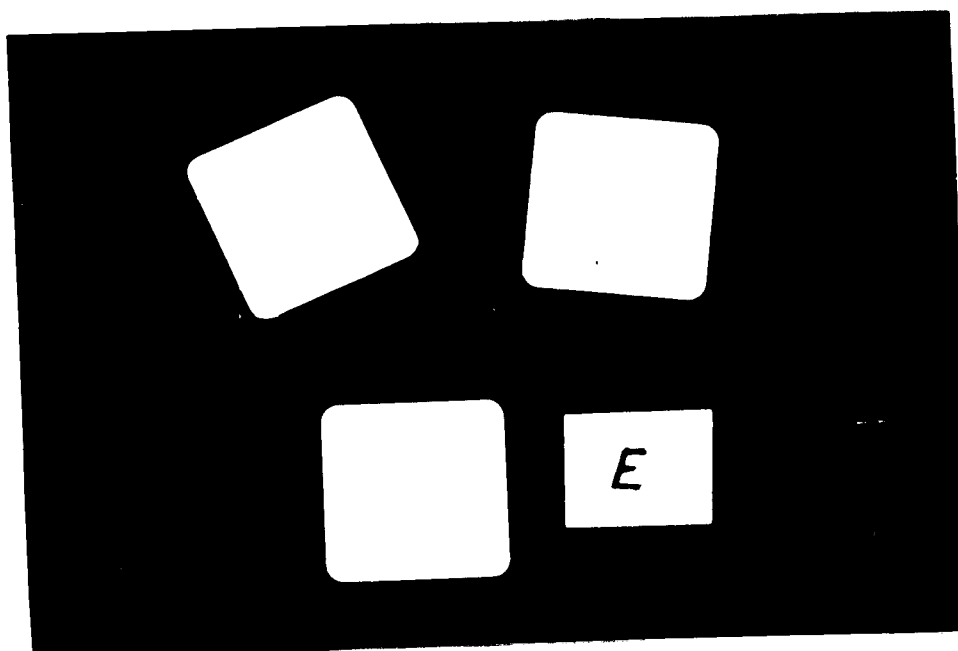
Obr.3 B - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{W}$

Síť 10x10 mm



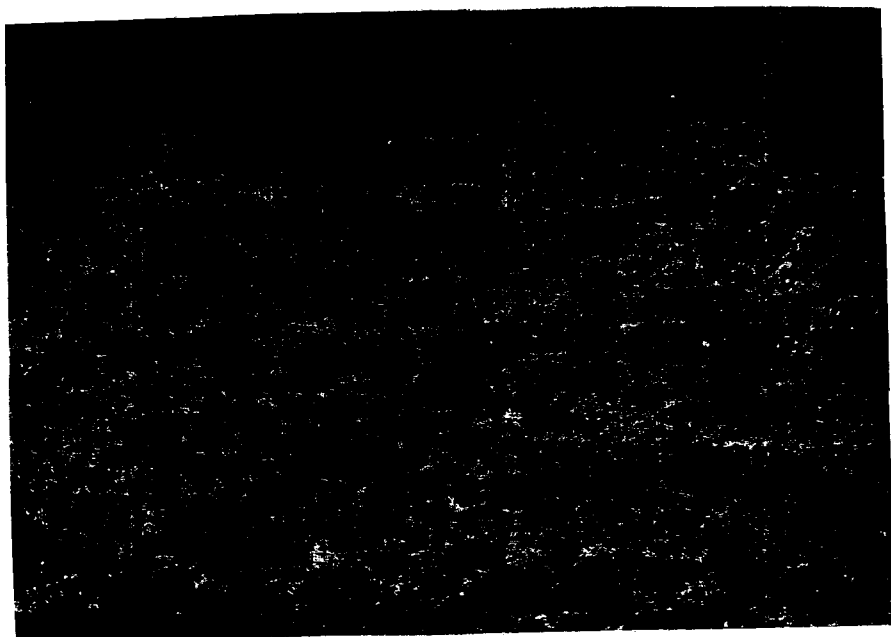
Obr. 4 D - korund

Síť 10x10 mm

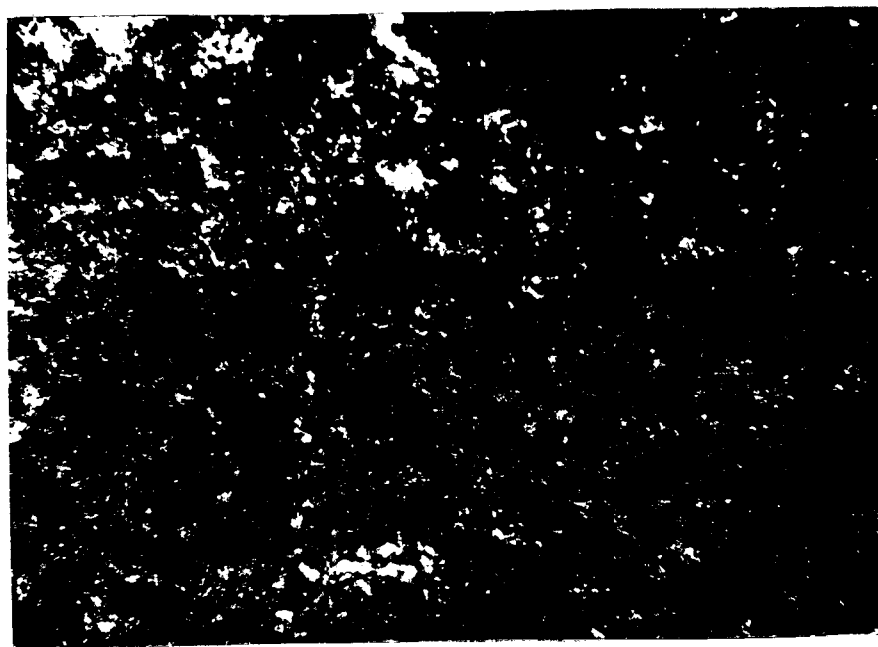


Obr. 5 E - řezná keramika

Síť 10x10 mm



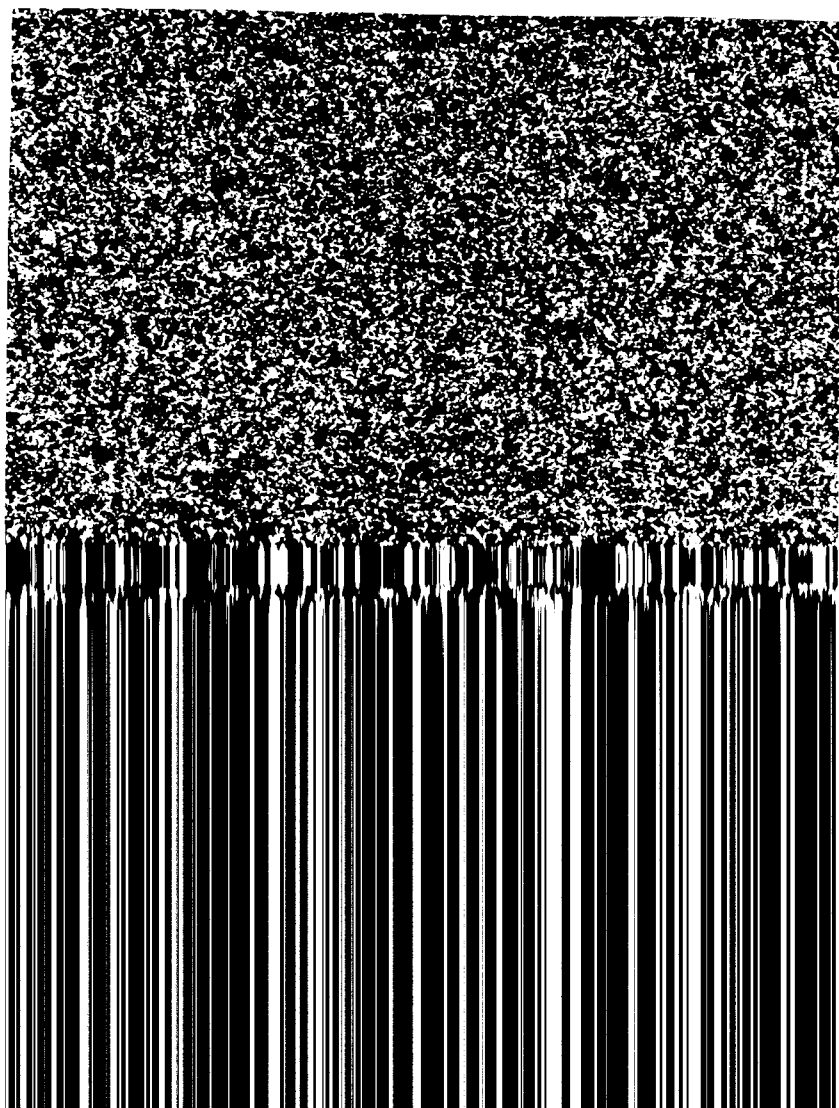
Obr.6 Struktura technického porcelánu;100x



Obr.7 Struktura keramiky;100x

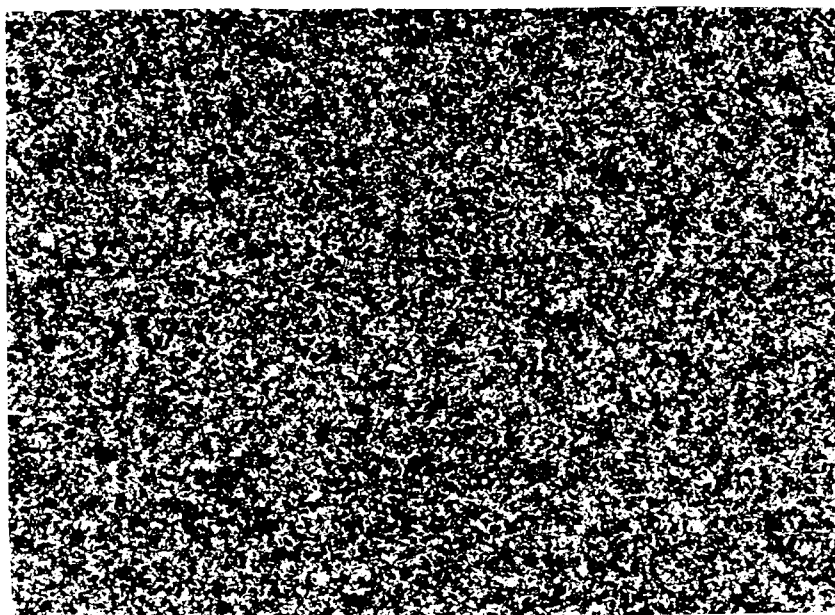


Obr.8 Struktura měkké keramiky;100x

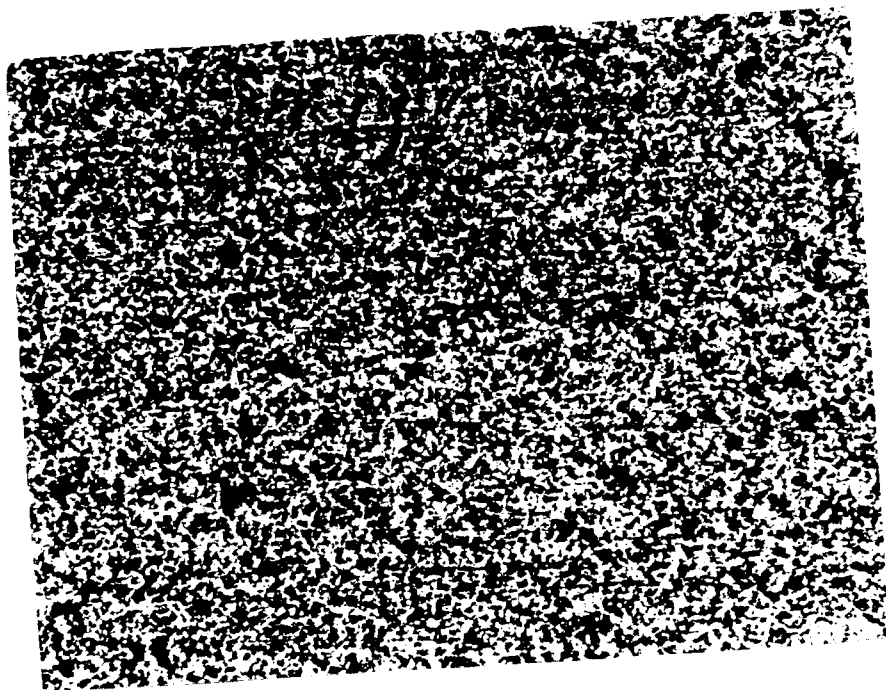




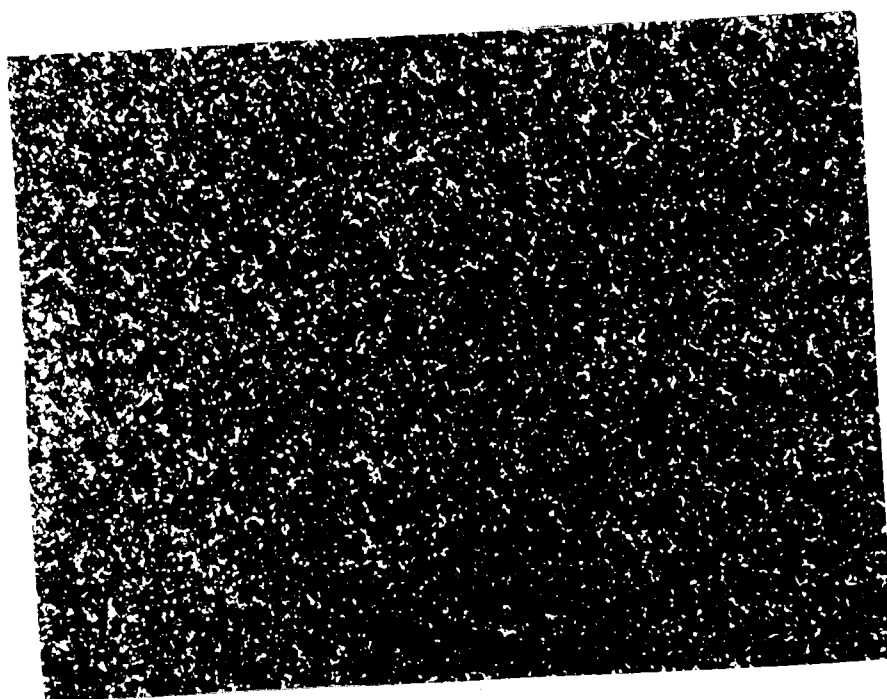
Obr.8 Struktura měkké keramiky; 100x



Obr.9 Struktura cermetu/ Al_2O_3 + W; 100x



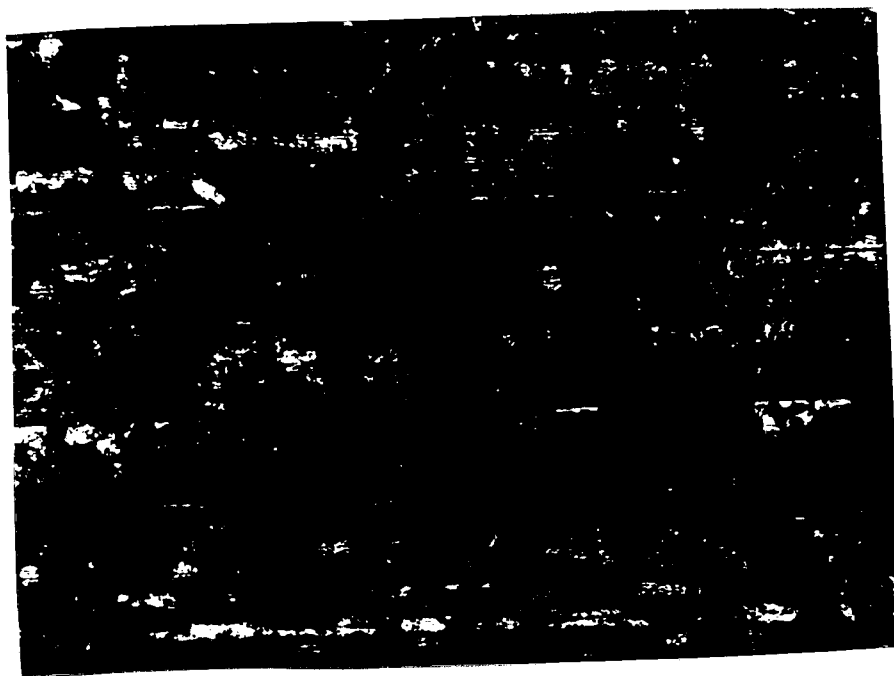
Obr.9 Struktura cermetu, 100x, Nital



Obr.10 Struktura $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$; 250x



Obr.11 Struktura hrubozrnného korundu;250x



Obr.12 Struktura jemnozrnného korundu;250x

Ze struktur běžně používané keramiky, tedy technického porcelánu a měkké keramiky, /obr.6-8/, je patrné, že se skládají většinou ze dvou fází a obsahují značné množství pórů - největší zastoupení pórů má měkká keramika /obr.8/. Na obr.9. je ze struktury cermetu vidět zastoupení kovové fáze v keramice, na obr.10. jemná struktura $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, které se dosáhne vhodnými podmínkami spékání. Obr.11. a 12. ukazuje strukturu korundu Al_2O_3 /bílého a tmavšího/.

3.4. Modul pružnosti

Pro získání hodnot modulu pružnosti jsem volila zkoušku ohybem na trhacím stroji. Zatížení vzorku cermetu rostlo až do hodnoty 845 N, po překročení této hodnoty vzorek praskl.

Vzorek měl tyto rozměry: $l = 0,02 \text{ m}$

$h = 0,005 \text{ m}$

$b = 0,0025 \text{ m}$

Při měření mohlo dojít k určité nepřesnosti způsobené vlivem ocelových podpěr.

Výpočet vychází ze základů pružnosti a pevnosti při ohybu: modul E

$$E = \frac{Fl^3}{4b^3hy} \quad (15)$$

Výpočet: 1/ První zatěžování, označují body 1 a 1'

$$y = 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad F = 115 \text{ N}$$

$$E_1 = \frac{115 \cdot 0,02^3}{4,78,1 \cdot 10^{-12} \cdot 1,75 \cdot 10^{-5}} = \underline{168 \cdot 10^9} \text{ [Pa]} \quad ($$

$$E_1 = 168 \text{ GPa}$$

2/ Druhé zatěžování, označují body 2 a 2'

$$y = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad F = 215 \text{ N}$$

$$E_2 = \frac{172 \cdot 10^{-5}}{1952,5 \cdot 10^{-17}} = \underline{88 \cdot 10^9} \text{ [Pa]} \quad 1$$

$$E_2 = 88 \text{ GPa}$$

$$y = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad F = 255 \text{ N}$$

$$E_{2'} = \frac{204 \cdot 10^{-5}}{2186,8 \cdot 10^{-17}} = 93 \cdot 10^9 \text{ [Pa]}$$

$$E_{2'} = 93 \text{ GPa}$$

3/ Třetí zatěžování, označené body 3 a 3'

$$y = 1,125 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad F = 350 \text{ N}$$

$$E_3 = \frac{2,8 \cdot 10^{-3}}{3,51 \cdot 10^{-14}} = 8 \cdot 10^{10} \text{ [Pa]}$$

$$E_3 = \underline{80 \text{ GPa}} \quad 1$$

$$y = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$F = 260 \text{ N}$$

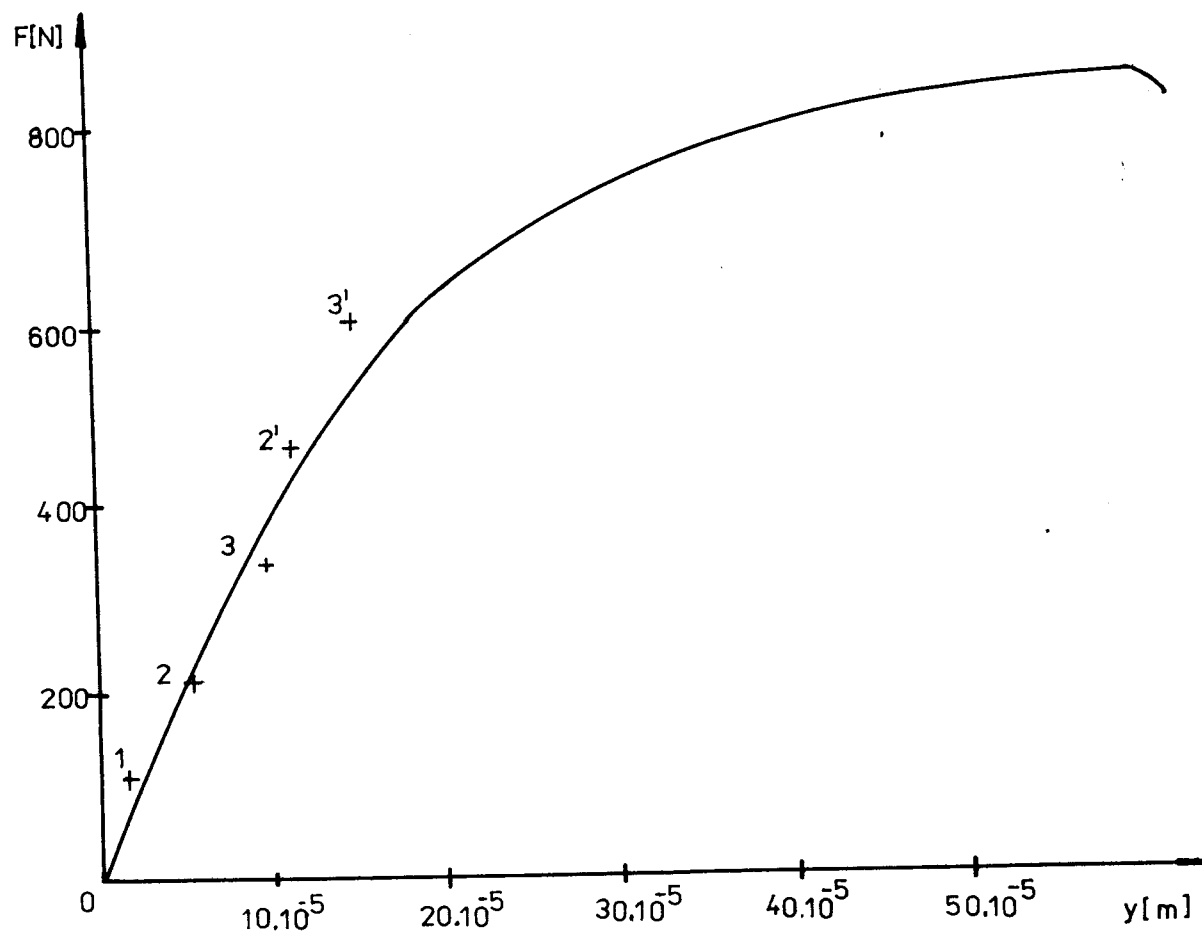
$$E_3' = \frac{208 \cdot 10^5}{15,62 \cdot 10^{-15}} = 13,3 \cdot 10^{10} \text{ [Pa]}$$

$$E_3' = 130 \text{ GPa}$$

Naměřené hodnoty v porovnání s hodnotami uvedenými v předchozích kapitolách jsou poměrně nižší./tab. 9./

3.5. Tvrдость

K měření tvrdosti jsem nezjistila žádnou vhodnou metodu. Tyto materiály mají dost vysokou tvrdost, proto se také používají tam, kde je způsobováno velké opotřebení třením. Důsledkem toho je, že při klasickém měření tvrdosti /např. Rockwella/ se vydrolují, tudíž nejsou plastické. Jedinou vhodnou zkouškou tvrdosti je odskoková zkouška Schoreho. Schoreho tvrdoměr je svým rozsahem vhodný pro kovy, a proto nedával u cermetu žádné rozlišení. Hodnoty se pohybovaly na začátku stupnice. Tento typ tvrdoměru není vhodný.



Tabulka 9 Graf závislosti síly na průhybu

5. LITERATURA

- [1] Bareš, R.A.: Kompozitní materiály, Praha SNTL, 1988
- [2] Lang, T. a kol.: Řezná keramika, Praha, OBIS INPRO, 1987
- [3] Zemánková, J.: Strojírenství, 8, 1987, s 413
- [4] Kislyj, P.S.: Kermety, Kijev, 1985
- [5] Gitter, H.: Strojírenství, 9, 1987, s 527
- [6] Dworak, U.: Řezná keramika, Düsseldorf SPK, 1986
- [7] Evans, A.G.-Langdon, T.G.: Konstrukcionnaja keramika, Moskva, Metalurgie, 1980
- [8] Matejka, P.-Benko, B.: Plazmové striekanie kovových a keramických práškov, Bratislava, Veda, 1987
- [9] Karpinos, D.M.: Kompozicionnyje materialy, Kijev, 1985
- [10] Zemánková, J.-Joch, J.-Kazda, J.: Lomová houževnatost keramických materiálů, Silikáty č.2, 1988, s 125-138