

7. KONŠTRUKČNÁ KERAMIKA

7.1 Všeobecné poznatky

Keramické materiály sa používajú už tisícročia. Boli vybudované obrovské keramické objekty, ktoré pretrvali dlhšie ako iné človekom vytvorené konštrukcie (pyramída v Gize, Forum Romanum, Veľký čínsky múr). Prvé náradia a zbrane boli vyrobené z kremeňa a hrnčiarske výrobky, vyrobené pred 5000 rokmi sa dochovali doteraz. Keramické materiály neodolávajú dynamickému namáhaniu ako kovové zliatiny, ale ich korózna odolnosť a odolnosť proti opotrebeniu je bezkonkurenčná.

Klasická keramika, z ktorej najväčší technický význam má *technický porcelán*, je zložená z kryštalických silikátov a pomerne veľkého podielu sklených (amorfných) fáz. Sortiment keramických materiálov sa v období rokov tesne pred a po II. svetovej vojne podstatne rozšíril z pôvodne ohraničeného počtu druhov klasickej keramiky na mnohonásobný počet nových keramických hmôt (ktoré často vôbec neobsahujú zlúčeniny kremíka), najmä v súvislosti s rozvojom priemyselnej elektrotechniky a zvlášť potom elektroniky. Prevažná časť hlavnej zložky je kryštalická, často však obsahuje i minoritnú sklenú fázu. Tieto materiály sa nazývajú *moderná technická keramika* (advanced ceramics). V súčasnosti sa široká paleta keramických materiálov z hľadiska zloženia základnej fázy v podstate stabilizovala; výskum sa zameriava na skúmanie ciest k zlepšeniu terajších materiálov, na ich nové tvarové a funkčné aplikácie a využívanie v nových súvislostiach. V minulosti sa využívala v strojárstve keramika len tam, kde vyrobené súčiastky neboli vystavené ťahovým napätiam alebo mechanickým či tepelným rázom a bolo vhodné využiť jej antikorózne vlastnosti, žiaruvzdornosť, izolačné vlastnosti či odolnosť proti opotrebeniu. Použitie moderná konštrukčnej keramiky sa výrazne rozširuje (tab. 7.1) a využíva sa dnes aj na náročné aplikácie - na vysokonamáhané súčasti (aj ťahom, príp. aj pri zmenách teploty) v koróznom prostredí. Takúto keramiku, vrátane nástrojových keramických materiálov, označujeme ako konštrukčnú keramiku, na rozdiel od funkčnej keramiky, ktorou rozumieme materiály určené svojimi špecifickými (najmä fyzikálnymi) vlastnosťami pre elektrotechniku, elektroniku, optiku a pod.

Tab. 7.1

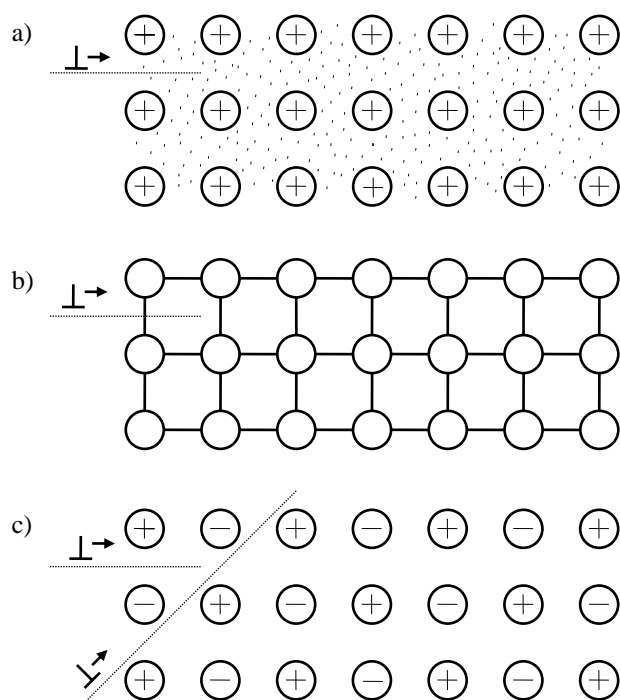
Vývoj objemu výroby súčiastok z konštrukčnej keramiky
a jeho prognóza na r. 2000 [10]

Rok	Objem na svetovom trhu (10 ⁹ US \$)
1977	≈ 0,9
1980	≈ 4,2
1985	≈ 5,0
1988	≈ 11,0
1990	≈ 12,0
1995	≈ 16,0
2000	≈ 50

Pod konštrukčnou keramikou teda rozumieme polykryštalické materiály na báze anorganických zlúčenín nekovového charakteru, pripravované spekaním z práškov. Jej hlavnou nevýhodou je jej krehkosť, z ktorej vyplýva možnosť krehkého lomu ako dôsledok statickej únavy, mechanických alebo tepelných rázov. Krehké materiály sa doteraz ako konštrukčné prakticky nevyužívali a je preto s nimi pomerne málo skúseností. Rozvoj využívania konštrukčnej keramiky je preto nerozlučne spojený jednak s výskumom možností zvýšenia húževnatosti keramiky, jednak s vývojom prístupov ku konštrukčným výpočtom i skúšaním týchto materiálov. Hlavnými prednosťami konštrukčnej keramiky je ich mimoriadne vysoká tvrdosť (ktorá im dodáva vysokú odolnosť proti opotrebeniu), vysoká korózná odolnosť a vysoká žiaruvzdornosť. Keramické konštrukčné materiály sú elektricky nevodivé a majú aj tepelno-izolačnú schopnosť. Možno ich vytvárať s veľkou presnosťou, čo je veľmi dôležité vzhľadom na to, že sa dajú opracovávať len diamantovými nástrojmi. Keramiku možno vyrábať v pestrej škále farieb; výrobky si uchovávajú svoj lesk i farbu prakticky nekonečne dlho.

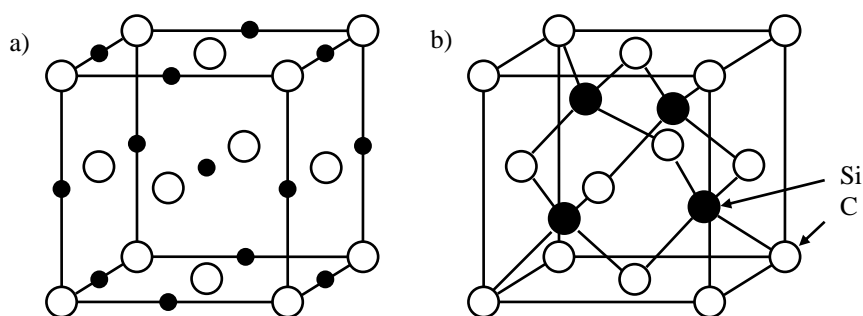
Príčiny krehkosti a možnosti jej zníženia. Odlišný typ medziatómovej väzby a odlišný typ kryštalovej štruktúry konštrukčnej keramiky je *základnou príčinou krehkosti*. Pri kovoch a zliatinách sa uplatňuje prednostne väzba kovová, zatiaľ čo pri keramike väzba kovalentná alebo iónová. V kovoch vďaka kovovej väzbe, ktorá nemá charakter lokalizovanej

(miestne definovanej) väzby, je pohybujúca dislokácia len vo veľmi malej miere ovplyvňovaná väzbou medzi kationmi a elektrónmi (obr. 7.1a) a stretáva sa len s nevelkým odporom. Naproti tomu kovalentná väzba je lokalizovaná tým, že atómy, ktoré ju tvoria sú skoncentrované medzi viazanými atómami; pohybujúca sa dislokácia musí mať energiu potrebnú na porušenie tejto väzby (obr. 7.1b), ktorá sa voči dislokácii chová ako pružná priečna prekážka. V iónovej keramike je pohyb dislokácií vo väčšine kryštalografických rovín veľmi obťažný (napr. vo vodorovnej rovine na obr. 7.1c sa musia premiestňujúce sa ióny prekonávať odpudivé sily rovnakých iónov, ponad ktorými sa premiestňujú), len v niektorých výhodne orientovaných rovinách ľahký (napr. v rovine pod uhlom 45° na obr. 7.1c, pretože pohyb dislokácie zloženej z Na^+ sa nepremiestňuje nad rovnakými iónami, pôsobiacimi odpudivou silou). Zvyčajne prevažuje vplyv nevýhodne orientovaných rovín. Z uvedených dôvodov vyžaduje pohyb dislokácií v kryštalických látkach s prevládajúcou kovalentnou alebo iónovou väzbou veľké Peierlsovo-Nabarrovo napätie a je pre ne charakteristická malá pohyblivosť dislokácií.



Obr. 7.1. Schémy prechodu dislokácií cez jednotlivé druhy medziatómárnych väzieb: a - kovovú, b - kovalentnú, c - iónovú [6]

Pre keramiku je ďalej charakteristické, že v porovnaní s kovmi kryštalizuje v zložitejších mriežkach, ktoré neumožňujú dostatočnú manévrovateľnosť. Príklady sú uvedené na obr. 7.2. Oxid horečnatý MgO, ako typický predstaviteľ iónovej keramiky má jednoduchú kubickú mriežku, v ktorej vrcholoch sú striedavo umiestnené ióny Mg a O. Karbid kremíka SiC patrí medzi kovalentnú keramiku a má kubickú mriežku diamantového typu. Kryštalické mriežky keramiky nevyhovujú podmienke, že v polykryštalických látkach musí byť min. 5 nezávislých sklzových systémov (tzv. Misesovo kritérium), aby sa pri plastickej deformácii mohli jednotlivé zrná navzájom tvarovo prispôbiť a nevznikali medzi nimi trhliny z geometrických dôvodov (nedostatočná manévrovateľnosť dislokácií).



Obr. 7.2. Príklady kryštalických mriežok keramiky: a) MgO, b) SiC [6]

Pohyblivosť i manévrovateľnosť (počet sklzových systémov) dislokácií sa zlepšuje až pri vysokých teplotách, nad prechodovou teplotou T_p , nad ktorou sa tvárnosť keramiky približuje tvárnosti kovov. Táto teplota je však veľmi vysoká, u väčšiny keramických materiálov $T_p = 0,7$ až $0,9 T_T$, kde T_T je teplota tavenia v K (napr. pre MgO je $T_p = 1700$ °C).

Vedľajšou príčinou krehkosti keramiky je ich mikroštruktúra spekaného materiálu, charakteristická pórovitosťou, nehomogenitou a pod. U klasickej keramiky je táto príčina zvyčajným zdrojom ich porušenia už pri nízkych zaťaženiach, u modernej konštrukčnej keramiky je z významnej časti potlačená. Pri vysokých teplotách sa nedokonalosti mikroštruktúry prejavujú u konštrukčnej keramiky často výraznejšie ako pri nízkych teplotách, preto sa ich principiálna tvárnosť nad teplotou T_p nemôže vo väčšine prípadov v plnom rozsahu realizovať.

Existuje niekoľko ciest k zvýšeniu húževnatosti konštrukčnej keramiky:

- a) Zabezpečenie schopnosti plastickej deformácie inými mechanizmami (ako mechanizmami založenými na pohybe dislokácií). Takýmto mechanizmom môžu byť predovšetkým sklzy po hraniciach zŕn, známe napr. u superplastických materiálov (kap. 6.2). Základným predpokladom je znižovanie zŕn, u keramiky navyše zníženie pórovitosti a odstránenie sklennej fázy na hraniciach zŕn. Požiadavka vysoko homogénneho jemnozrnného jednofázového materiálu sa môže dosiahnuť vysokou čistotou východiskového prášku a využívaním takých metód ďalšieho spracovania, ktoré zabezpečia vysokú hustotu (napr. izostatické lisovanie za tepla). Touto cestou sa dosahuje pevnosť v ohybe 500 až 1000 MPa (tab. 7.2). Mimoriadne plastické vlastnosti vykazuje nanokryštalická keramika (kap. 6.4).
- b) Zabezpečenie zvýšenia lomovej húževnatosti fyzikálnym spojením s húževnatým materiálom. Ide najmä o kompozity keramika - kov. Vyvíjajú sa aj čisto keramické kompozity, t. j. s keramickou maticou (napr. Si_3N_4), vystuženou keramickými vláknami alebo whiskermi (napr. SiC). Očakáva sa, že na tejto báze sa získajú keramické materiály s najväčším zvýšením lomovej húževnatosti.
- c) Zabrzdzenie šírenia trhliny fázovou premenou, indukovanou na jej čele vysokým napätím. U ocelí TRIP je známy mechanizmus spevňovania napät'ovo indukovanou martenzitickou premenou. Analogicky využiteľnou fázovou premenou v keramike obsahujúcej ZrO_2 je premena tetragonálnej allotropickej modifikácie ZrO_2 na monoklinickú (kap. 7.2).

Tab. 7.2

Vlastnosti vybraných keramických materiálov

Vlastnosť	SiC	Si_3N_4	Čiast.stabiliz. ZrO_2
Hustota, g/cm^3	3,3	3,2	5,8
%	98	98	98
Pevnosť v ohybe pri 25 °C, MPa	705	670	1040
1000 °C	665	455	240
1200 °C	490	450	230
1400 °C	210	440	-
Tvrdosť podľa Knoopu	1340	2740	1100
Lomová húževnosť, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	4,6	3,6	9

Druhy konštrukčnej keramiky. Jednotlivé známe materiály (porovnanie vlastností pozri v tab. 7.2) možno rozdeliť do troch hlavných skupín:

- Oxidová keramika - materiály s typicky konštrukčnými aplikáciami na báze ZrO_2 alebo na báze iného oxidu (Al_2O_3).
- Nitridická keramika - materiály na báze Si_3N_4 a fáz sústavy Si-Al-O-N.
- Keramika na báze SiC.

7.2 Oxidová keramika

Oxidická keramika je najznámejším, najdlhšie vyrábaným a doteraz aj najviac používaným predstaviteľom konštrukčnej keramiky. Ide o pomerne širokú skupinu materiálov na báze rôznych oxidov, z ktorej najväčší význam pre konštrukčné aplikácie majú materiály na báze oxidu hlinitého a oxidu zirkoničitého.

Materiály na báze $\alpha-Al_2O_3$. Sú najznámejšou oxidovou keramikou, ktorá sa často používa ako konštrukčný materiál pre rôzne aplikácie. Vyrába sa kalcináciou $Al(OH)_3$ v rotačných peciach. $\alpha-Al_2O_3$ začína vznikať asi pri $950\text{ }^\circ\text{C}$ a pri teplote $1300\text{ }^\circ\text{C}$ konverzia prebehne asi za 1 h. Vzhľadom na existenciu silných chemických väzieb medzi iónmi Al a O má Al_2O_3 dobrú chemickú stabilitu, vysoký bod tavenia ($2050\text{ }^\circ\text{C}$) a najvyššiu tvrdosť zo všetkých druhov oxidickej keramiky. Spomínané materiály majú pri izbovej teplote vysokú pevnosť v ohybe, ktorá však nad teplotou $1000\text{ }^\circ\text{C}$ prudko klesá. Ich tepelná vodivosť je relatívne vysoká, majú vysoký koeficient teplotnej rozťažnosti, čo spôsobuje, že ich odolnosť voči tepelným rázom je nižšia než akú majú materiály Si_3N_4 a SiC. Lomová húževnatosť pri izbovej teplote sa pohybuje v intervale od 3,8 do 5,9 MPa.m^{1/2}. Niektoré vlastnosti najznámejších keramik sú uvedené v tab. 7.3.

Materiály na báze oxidu zirkoničitého. Oxid zirkoničitý má teplotu topenia $2680\text{ }^\circ\text{C}$. V tuhom stave vystupuje v troch modifikáciách: c- ZrO_2 (vysokoteplotná kubická fáza s mriežkou fluoritu, nad $2200\text{ }^\circ\text{C}$), t- ZrO_2 (strednoteplotná tetragonálna fáza, $c/a=1,02$, medzi 2200 a $1000\text{ }^\circ\text{C}$) a m- ZrO_2 (nízkoteplotná monoklinická fáza, pod $1000\text{ }^\circ\text{C}$). Premena t- ZrO_2 na m- ZrO_2 je martenzitického typu a je spojená s objemovou zmenou asi 3%. Výrobky z čistého ZrO_2 sa preto často rozrušia už pri vypaľovaní a sú prakticky nepoužiteľné. Prídavkom vhodných oxidov, napr. CaO alebo Y_2O_3 je však možné docieľiť to, že sa ZrO_2 prevedie na pevný kubický roztok,

stály v celom teplotnom rozsahu. Takto upravenú keramiku označujeme ako stabilizovanú. Stabilizovaný oxid zirkoničitý sa ako konštrukčná keramika neuvažuje, pretože má pomerne nízke mechanické vlastnosti. (Využíva sa však ako funkčná keramika pre svoj vysoký bod topenia a elektrické vlastnosti.)

Tab. 7.3

Vlastnosti konštrukčnej keramiky na báze oxidu hlinitého [10]

Druh a zloženie Vlastnosti	α -Al ₂ O ₃ 99,9 %	α -Al ₂ O ₃ 96 %	Spinel MgAl ₂ O ₄	Mulit 3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	PSZ 3 % MgO
Hustota [g.cm ⁻³]	3,99	3,72	3,58	3,16	5,75
Veľkosť zrna [μm]	15-45	2-20			
Modul pružnosti [GPa]	393	303	250	50-220	200
Poissonovo číslo	0,22	0,21			0,22
Ohybová pevnosť [MPa]					
25 °C	282	358	110-245	500	635
1000 °C	172	172			290
Pevnosť v tlaku [MPa]	2550	2070			1760

Vynikajúce mechanické vlastnosti naopak má tzv. čiastočne stabilizovaný oxid zirkoničitý, t. j. keramický materiál na báze ZrO₂ so zníženým obsahom stabilizačných prísad, u ktorého bola nasledujúcim tepelným spracovaním vyvolaná v kubickej matici precipitácia veľmi malých útvarov (rozmer 50 - 100 nm) metastabilnej tetragonálnej fázy [168]. Priaznivý účinok sa dosahuje, ako už bolo uvedené, tým, že vysoké napätia v okolí koreňa trhliny pri zaťažení vyvolávajú transformáciu tetragonálnej fázy do stabilnej monoklinickej formy. Uvedená fázová transformácia nastáva i pri mechanickom opracovaní povrchu, kedy vznikajú tiež pomerne vysoké napätia. Na rozdiel od bežnej keramiky, kde sa mechanickým opracovaním, napr. brúsením, pevnosť zníži vznikom početných povrchových trhlín, u čiastočne stabilizovaného ZrO₂ sa naopak v dôsledku vyvolania transformácií a tlakového pnutia v povrchovej vrstve pevnosť zvýši.

Napät'ovo indukovaná martenzitická premena t-ZrO₂ na m-ZrO₂ sa v súčasnosti využíva u troch druhov materiálov, na ktoré sa súčasne aj sústreďuje ďalší výskum:

1. *PSZ - Partially Stabilized Zirconia - čiastočne stabilizovaný oxid zirkoničitý.*

Ako prísada sa používa Y₂O₃, MgO, CaO a i., vyrába sa spekaním pri 1800 °C, po žíhaní pri 1400 °C má kubickú maticu s tetragonálnymi precipitátmi. Donedávna keramický materiál s najlepšimi mechanickými vlastnosťami pri nižších teplotách. Využíva sa na prievlaky v metalurgickom priemysle, pre extrémne namáhané súčasti Dieselových motorov (časti piestov, vložky valcov, vodidlá a sedlá ventilov pod.) a i. V Japonsku sa využíva aj v spotrebnom priemysle (nože, nožnice, plášte hodínok, kávové filtre a pod.

2. *TZP - Tetragonal Zirconia Polycrystals - tetragonálny polykryštalický oxid zirkoničitý.*

Pripravuje sa z veľmi jemného prášku ZrO₂ (pod 1 μm) so stabilizačnou prísadou (najčastejšie Y₂O₃) spekaním pri 1400 °C, t. j. v oblasti stability t- ZrO₂. Výsledná štruktúra je jednofázová, tvorená jemnými zrnami metastabilného t- ZrO₂. Tento materiál je teda schopný vo všetkých miestach mikroštruktúry sa transformovať na m- ZrO₂. Dosahuje pevnosť v ohybe 1000 - 2500 MPa a lomovú húževnatosť 10 - 15 MPam^{1/2} čo sú najvyššie hodnoty dosahované v súčasnosti u konštrukčnej keramiky.

3. *ZTA - Zirconia Toughened Alumina - oxid hlinitý spevnený oxidom zirkoničitým.*

Pripravuje sa z Al₂O₃ (korund) a 10-30 % jemných častíc ZrO₂, čiastočne stabilizovaných napr. Y₂O₃ alebo MgO [169]. Aby sa ZrO₂ udržal v metastabilnej tetragonálnej modifikácii, musí byť rozmer jeho častíc nižší ako kritický (uvádza sa 0,5 μm). S rastom rozmeru častíc ZrO₂ a tiež s nepravidelnosťou jeho tvaru (napr. ostrohranné častice) narastá pravdepodobnosť transformácie t- ZrO₂ už v beznapät'ovom stave. Jemnozrnný korund s prísadou 20 % ZrO₂ má pevnosť v ohybe až 1200 MPa, lomovú húževnatosť až 8 MPam^{1/2}. V zásade je možné uvažovať i iné oxidy spevnené ZrO₂ (vo všeobecnosti sa preto používa aj označenie ZTC - Zirconia Toughened Ceramic).

7.3 Nitridová keramika

Medzi nitridovú keramiku zaraďujeme nitrid kremíka Si_3N_4 a sialony, t. j. z neho odvodené materiály, v ktorých sú niektoré atómy Si a N nahradené Al a O. Nitrid kremíka sa vyskytuje v dvoch štruktúrnych modifikáciách: α - Si_3N_4 (ktorá má defektnú mriežku v tom, že jeden zo základných atómov dusíka je nahradený kyslíkom) a β - Si_3N_4 (zastúpenie atómov plne zodpovedá stechiometrickému vzorcu). Obe sú hexagonálne. Keramika sialonového typu je odvodená od nitridu kremíka náhradou niektorých atómov kremíka hliníkom a niektorých atómov dusíka kyslíkom. Dnes je známych asi 400 takýchto materiálov sústavy Si-Al-O-N. Z chemických značiek zložiek sústavy je odvodený ich názov, ktorý sa píše niekedy aj SiAlON.

Spôsoby výroby nitridovej keramiky. Súčiastky z nitridu kremíka je možné vyrábať rôznymi metódami, z ktorých najznámejšie sú:

- reakčné spekanie (reaction bounded silicon nitride - RBSN),
- žiarové lisovanie (hot pressed silicon nitride - HPSN),
- beztlakové spekanie (alebo spekanie pod pretlakom dusíka) (sintered silicon nitride - SSN),
- dospekanie reakčne spečeného nitridu kremíka (sintered reaction bounded silicon nitride - SRBSN),
- izostatické lisovanie za tepla (hot isostatically pressed silicon nitride - HIPSN).

Charakteristické zloženie a charakter štruktúry sú uvedené v tab. 7.4.

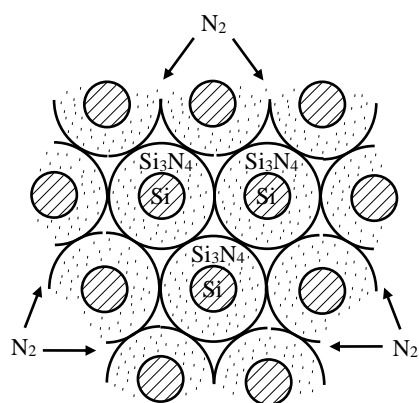
V počiatočnom štádiu rozvoja keramiky nitridického typu (Si_3N_4) sa používali technológie založené na súčasnom nitridovaní a spekaní kompaktovaného kremíkového prášku (obr. 7.3). Tento proces bol nazývaný reakčným spekaním (ozn. RSSN). Pri použití tejto techniky je keramika charakterizovaná vysokou poréznosťou, čo vedie k nízkej pevnosti keramického materiálu. Naopak v tomto prípade je možné zaznamenať zanedbateľne malé zmraštenie počas reakčného spekania pri teplote 1400 °C. Nedávno bola vyvinutá tzv. hybridná technológia reakčného spekania vychádzajúca z RSSN, ktorá potom bola doplnená vysokoteplotným spekacím procesom s aditívami. Táto technologická varianta je obvykle označovaná ako SRBSN (tab. 7.4). Dosahovaná štruktúra je svojim charakterom blízka štruktúre, dosahovanej pri použitej

techniky označovanej ako SSN, avšak pri nižšom zmrašení (10 %), čo je veľmi priaznivé z hľadiska tvarovania keramiky.

Tab. 7.4

Spôsoby výroby nitridovej keramiky [167]

Typ	Zloženie	Charakter štruktúry
HPSN alebo HIPSN	1 % MgO-aditíva 2-5 % Y ₂ O ₃ -aditíva	0-3 % hlavne skleneného intergran.rezidua
SSN	5 % MgO+9 % Al ₂ O ₃ 6 % Y ₂ O ₃ +prísada Al ₂ O ₃ /AlN	5-10 % sklenej fázy alebo kryštal.matrice+β' β Si ₃ N ₄ +sklená fáza
RBSN	nitridácia Si počas sintrovania bez aditív	50-65 % α Si ₃ N ₄ 30-40 % β Si ₃ N ₄ , 5 % Si 15-30 % porézności
SRBSN	podobne ako v prípade RBSN s následným vysokoteplotným sintrovaním s aditívami	podobne ako SSN



Obr. 7.3. Schéma reakčného spekania [6]

Nitrid kremíka s vysokou hustotou sa sa získava pri použití lisovania za tepla (HPSN) alebo izostatického lisovania za tepla (HIPSN). Vo všetkých prípadoch je komponent SiO₂ spekanej taveniny odvodený z komponentu prítomného na povrchu α Si₃N₄, ktorá je hlavnou súčasťou východiskovej zmesi tvorenej jeho jemnými časticami. Použitie α Si₃N₄ je priaznivé nielen

pre jeho jemnozrnnosť a dosiahnutie mikrohomogenity v rozdelení SiO₂, ale aj z hľadiska zaistenia chemického komponentu hybnej sily pre priebeh spekacej reakcie, založenej na procese rozpúšťania a následnej reprecipitácii [166].

Tab. 7.5

Vlastnosti konštrukčnej keramiky na báze nitridu kremíka [10]

Druh keramiky	RBSN	HPSN	SSN	SRBSN	HIP-SN	HIP-RBSN	HIP-SSN	SiAlON
Relatívna hustota	70-88	99-100	95-99	93-99	99-100	-	-	97-99
Tepelná rozťažnosť 10 ⁻⁶ /°C	3,0	3,2-3,3	2,8-3,5	3,0-3,5	3,0-3,5	-	-	3,0-3,7
Tepelná vodivosť W/m pri 250 °C 1000 °C	7-14 1,4-3	30-43 5-10	15-31 4-5		22			15-22 2,5
Modul pružnosti GPa	150-250	310-330	260-320	280-300		310-330		≈ 300
Poissonove číslo	0,2	0,27	0,25	0,23	0,23	0,27		0,23
Ohybová pevnosť MPa pri 250 °C 1000 °C	150-350 140-340	450-1000 250-450	600-1200 340-550	500-800 350-450	600-1200 350-550	500-800 250-450	600-1200 300-520	5300-550
Weibullov modul	19-40	10-30	10-25	10-20	-	20-30		15
Lomová húževnatosť MPa.m ^{1/2}	1,5-2,8	4,2-7,5	5-8,5	5-5,5	4,2-7,0	2,0-5,8	4,0-8,0	6,0-8,0
Odolnosť voči tepelným rázom kritická T (°C) vo vode	200-600	400-800	600-750	-	-	800	-	300-500

Sialonová keramika obsahuje odvodenú fázu β' obvykle s veľmi nízkou substitučnou úrovňou, takže jej nosné vlastnosti zostávajú vzhľadom k porovnávanému stavu β Si₃N₄ prakticky nezmenené. Znamená to, že zo sialonovej keramiky spekané bez superpozičného napätia, je možné zhrnúť do kategórie sintrovaného Si₃N₄ (SSN). Spekaním zmesi β-Si₃N₄ + Al₂O₃+ AlN vzniká β'-sialon, ktorý má charakter fázy typu tuhého roztoku (s mriežkou β-Si₃N₄) a možno ho formálne popísať vzorcom Si_{6-Z}Al₂O₃N_{8-Z}, kde 0<Z<4. Pre zrýchlenie spekania možno použiť prísadu

Y_2O_3 (spekanie prebieha za prítomnosti tekutej fázy, výsledný materiál má zvlášť vysokú hustotu) a vzniká tak yttriový sialon (Y-Si-Al-O-N); sú známe aj sialony odvodené od $\alpha-Si_3N_4$ alebo od keramického oxinitridu Si_2N_2O .

Vlastnosti. Nitridová keramika je predurčená na vysokoteplotné aplikácie. Uvažuje sa s ňou na súčiastky tepelných strojov namáhaných ťahovými napätiami nad 100 MPa pri teplotách až okolo 1500 °C. Ich pevnosť pri vysokých teplotách preyšuje i niklové superzliatiny. Nitridová keramika sa ďalej vyznačuje odolnosťou proti tepelným rázom, nízkou tepelnou vodivosťou, nízkou tepelnou rozťažnosťou, vysokou tvrdosťou a koróznou odolnosťou (pozri tab. 7.5).

Priaznivejšie charakteristiky sialonu vyplývajú z toho, že výhodne kombinuje vlastnosti Si_3N_4 a Al_2O_3 . U nitridovej keramiky sa dosahuje lomová húževnatosť okolo 5 MPa.m^{1/2}, v niektorých prípadoch až okolo 10 MPa.m^{1/2}. Používa sa aj ako rezná keramika.

7.4 Keramika na báze karbidu kremíka

V podstate všetky materiály na báze karbidov možno zaradiť medzi keramické. Ako konštrukčná keramika prichádzajú do úvahy SiC, B_4C , WC a TiC [170]. Okrem SiC ide o materiály určené na výrobu nástrojov a nebude im v ďalšom venovaná pozornosť.

Výroba. Karbid kremíka sa vyrába žiarovým lisovaním (HP SiC), reakčným spekaním (Si SiC) alebo spekaním bez použitia tlaku (S SiC). Karbid kremíka, pripravený žiarovým lisovaním (2000 °C, 35 MPa) sa vyznačuje vysokou hustotou a pevnosťou, ale neľahkým opracovaním a tvarovaním. Tento problém viedol k vývoju SiC pripraveného reakčným spekaním. Veľkou výhodou tohto spracovateľského postupu sú malé rozmerové zmeny počas procesu. Reakčne spekaný SiC sa najčastejšie získava zo zmesi SiC, grafitového prášku a kremíka. Kremík, ktorý je počas spekania tekutý, reaguje s grafitovým práškom a vytvára sklenú fázu SiC, pôsobiacu ako spojivo. Po spracovaní obsahuje materiál obvykle 10 - 15 % zvyškového kremíka. Spekaný SiC bez použitia tlaku je pripravovaný spekaním prášku SiC s prídavkom bóru, uhlíka alebo hliníka.

Karbid kremíka sa dá získať aj chemickou parnou depozíciou (CVD procesom). Touto metódou sa dajú zhotoviť predovšetkým povrchové vrstvy (do hrúbky 1 mm), ktoré sa uplatňujú ako povlaky odolné voči oxidácii, ale

aj celé súčiastky. Mechanické vlastnosti takýchto SiC keramik sú určené okrem iného aj teplotou povlakovaného materiálu a podmienkami rastu kryštálov. CVD-SiC je vysoko čistý materiál a ako taký vykazuje najvyšší odpor voči oxidácii. Najčastejšie sa používa povlak na pórovitých súčiastkach vyrobených z SiC keramiky.

Vlastnosti. Pevnosť SiC je nižšia než Si_3N_4 , rovnako tak i odolnosť proti tepelnému šoku. Vyznačuje sa vysokou tvrdosťou a vysokou tepelnou vodivosťou, ktorá sa využíva pri konštrukcii tepelných zariadení. Pri teplotách do $1300\text{ }^\circ\text{C}$ má výhodnejšie vlastnosti Si_3N_4 , pre teploty $1300 - 1500\text{ }^\circ\text{C}$ sa javí výhodnejší SiC. Za hlavnú oblasť využívania konštrukčnej keramiky sa považujú spaľovacie turbíny a naftové motory pri zvýšených prevádzkových teplotách $1200 - 1400\text{ }^\circ\text{C}$. Najmä americké a japonské firmy venujú veľkú pozornosť možnosti uplatnenia keramických materiálov pri konštrukcii tepelných strojov. Ich cieľom je vývoj motora bez vonkajšieho chladenia, čím by sa značne zvýšila jeho účinnosť. Podľa údajov z 80-tych rokov japonská spoločnosť Isuzu Motora Ltd. začala vývoj celokeramického vznetrového turbomotora pre osobné automobily s obsahom 1800 cm^3 , ktorý bude vybavený elektronickým zariadením pre využívanie energie horúcich výfukových plynov a vstrekaním paliva. Motor z keramických materiálov znesie teplotu až $1000\text{ }^\circ\text{C}$, čo umožní využitie väčšiny výfukových plynov ako zdroja energie. Oproti bežnému vznetrovému motoru sa tak zníži spotreba paliva približne o 30 %. Adiabaticky koncipovaný motor eliminuje chladič a cca 360 iných súčastí - vodnú pumpu, čerpadlo, ventilátor a pod. vrátane asi 40 kg chladiacej kvapaliny. Výsledkom je redukcia hmotnosti asi o 200 kg a menšie rozmery motora.