

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



**Bakalářská práce**

**Vysokoteplotní neoxidová konstrukční keramika**

**Martin Nechvátal**

© 2023 ČZU v Praze

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Nechvátal

Procesní inženýrství  
Technologická zařízení staveb

Název práce

**Vysokoteplotní neoxidová konstrukční keramika**

Název anglicky

**High temperature non-oxide structural ceramics**

---

## Cíle práce

Shromáždit literární poznatky o vysokoteplotní neoxidové konstrukční keramice. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

## Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

## Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

## Klíčová slova

Keramické materiály, tepelné vlastnosti, slinování

---

## Doporučené zdroje informací

CARTER, B., C., GRANOT, N., M.: Ceramic Materials, Science and Engineering. Springer 2007.

IMANAKA, Y.: Advances Ceramis Technologies & Products. The Ceramic Society of Japan, Springer 2012.

KOLLER, A.: Structure and properties of ceramics, Material science Monographs, ACER Hradec Králové, 2007.

PÁNEK, Z.: Konstručná keramika. Bratislava: R&D Print, 1992.

RAHAMAN, M., N.: Ceramic Processing and Sintering, 2nd edition, New York: Rutledge, USA, 2003.

RICHERSON, D., W.: Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design. 2. vyd. New York: Marcel Dekker, 1992.

SANDVIK COROMAT, Nástrojové materiály-Cermet.

---

## Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

## Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2021

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 05. 03. 2023

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vysokoteplotní neoxidová konstrukční keramika" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30. 3. 2023

---

### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Petru Hraběti, Ph.D., za jeho cenné rady a vstřícný přístup během zpracování této bakalářské práce. Dále bych velice rád poděkoval své rodině a blízkým za jejich ochotu a podporu během celého mého bakalářského studia.

# Vysokoteplotní neoxidová konstrukční keramika

## Abstrakt

Cílem této práce je přiblížit problematiku technických vysokoteplotních neoxidových keramických materiálů, nastínit historické pozadí a jeho vliv na dnešní keramické materiály. V práci je rozveden pojem technické vysokoteplotní keramiky, popsány jednotlivé druhy, ale především vztahy mezi jednotlivými typy keramických materiálů. V neposlední řadě se tato práce zabývá vlastnostmi jednotlivých materiálů, jejich využitím v praxi, procesy výroby jednotlivých materiálů a dokončovacími procesy.

Práce představuje ucelený soubor informací o nejvýznamnějších zástupcích technické vysokoteplotní neoxidové keramiky, kteří jsou nezbytní pro fungování doslova všech odvětví průmyslu.

Přínosem této práce je interpretace literárních zdrojů do podoby, ve které je čtenář seznámen s nejdůležitějšími informacemi z této oblasti. Tato práce slouží jako ucelený základ pro hlubší studium nejen technické vysokoteplotní neoxidové keramiky.

**Klíčová slova:** Oxidová keramika, neoxidová keramika, keramika směsná, vysokoteplotní keramika, technická keramika, keramické prášky, slinování, tepelné vlastnosti, životnost, technologie, využití

# **High temperature non-oxide structural ceramics**

## **Abstract**

The aim of this thesis is to introduce the issue of technical high-temperature non-oxide ceramic materials, to outline the historical background and its influence on today's ceramic materials. The concept of technical high-temperature ceramics is elaborated, the different types of ceramic materials are described, but especially the relationships between the different types of ceramic materials. Last but not least, this thesis deals with the properties of the different materials, their applications in practice, the processes of production of each material and the finishing processes.

The work presents a comprehensive set of information on the most important representatives of technical high-temperature non-oxide ceramics, which are essential for the functioning of literally all branches of industry.

The contribution of this work is the interpretation of the literature sources into a form in which the reader is familiar with the most important information in this field. This work serves as a comprehensive basis for a deeper study of not only technical high-temperature non-oxide ceramics.

**Keywords:** Oxide ceramics, non-oxide ceramics, mixed ceramics, high temperature ceramics, technical ceramics, ceramic powders, sintering, thermal properties, durability, technology, applications

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>4</b>
<b>2 Cíl práce a metodika .....</b>	<b>5</b>
2.1 Cíl práce .....	5
2.2 Metodika .....	5
<b>3 Úvod do historie keramických materiálů.....</b>	<b>6</b>
3.1 Historie novodobé technické keramiky.....	6
3.2 Historie neoxidové technické keramiky.....	6
<b>4 Základní vlastnosti a použití konstrukční (technické) keramiky .....</b>	<b>7</b>
4.1 Definice keramických materiálů .....	7
<b>5 Dělení konstrukčních keramických materiálů .....</b>	<b>8</b>
5.1 Silikátová keramika.....	8
5.2 Oxidová keramika .....	8
5.2.1 Oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).....	9
5.2.2 Oxid zirkoničitý ( $\text{ZrO}_2$ ) .....	10
5.3 Keramika směsná .....	11
<b>6 Neoxidová keramika .....</b>	<b>12</b>
6.1 Karbidy.....	12
6.1.1 Karbid křemíku ( $\text{SiC}$ ) .....	13
6.1.1.1 Karbid křemíku vázaný silikátem (karbid křemíku s jílovou vazbou).....	13
6.1.1.2 Slinutý karbid křemíku v kapalně fázi (LPSIC).....	14
6.1.1.3 Beztlakový slinutý (sintrovaný) karbid křemíku (SSIC).....	15
6.1.1.4 Karbid křemíku lisovaný za tepla (HPSIC).....	16
6.1.1.5 Křemíkem infiltrovaný karbid křemíku (SISIC).....	16
6.1.1.6 Rekristalizovaný karbid křemíku (RSIC).....	17
6.1.1.7 Nitridicky vázaný karbid křemíku (NSIC).....	18
6.1.2 Karbid bóru ( $\text{B}_4\text{C}$ ).....	19
6.2 Nitridy .....	20
6.2.1 Nitridy křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).....	20
6.2.2 Sialony .....	22
6.2.3 Nitrid hliníku ( $\text{AlN}$ ).....	23
<b>7 Výroba Technické keramiky .....</b>	<b>24</b>
7.1 Suroviny a přísady.....	24



7.2	Příprava keramické hmoty .....	24
7.3	Tvarování keramické hmoty .....	25
7.3.1	Suché lisování .....	25
7.3.2	Izostatické lisování .....	26
7.3.3	Lisování za mokra / lisování za vlhka .....	26
7.3.4	Extrudování (lisotažení).....	27
7.3.5	Gravitační lití do forem.....	27
7.3.6	Lití tenkou vrstvou.....	27
7.4	Slinování .....	28
7.4.1	Sušení.....	28
7.4.2	Přežah.....	29
7.4.3	Druhý výpal .....	29
7.4.3.1	Lisování za tepla (HP).....	29
7.4.3.2	Izostatické lisování za tepla (HIP).....	29
7.4.4	Rozměry a smrštění .....	30
7.5	Abrazivní tvářecí procesy .....	30
7.5.1	Obrábění vysušených výrobků (zelené zpracování) .....	30
7.5.2	Tvrdé zpracování .....	31
7.5.2.1	Broušené povrchy.....	31
7.5.2.2	Honované povrchy.....	31
7.5.2.3	Lapované povrchy .....	32
7.5.2.4	Leštění .....	32
7.6	Dokončovací procedury .....	33
7.6.1	Metalizace .....	33
7.6.2	Glazování a engobování.....	33
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>34</b>
<b>10</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>35</b>
<b>11</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>36</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Struktura mikrokrytalického oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [2] .....	9
Obrázek 2 - Mikrostruktura hrubě krystalického oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [2] .....	9
Obrázek 3 - Mikrostruktura částečně stabilizovaného oxidu zirkoničitého ( $\text{ZrO}_2$ ) [2] .....	10
Obrázek 4 - Mikrostruktura hrubého karbidu křemíku vázaného silikátem [2] .....	14
Obrázek 5 - Mikrostruktura jemného karbidu křemíku vázaného silikátem [2].....	14
Obrázek 6 - Mikrostruktura slinutého karbidu křemíku v kapalně fázi (LPSIC) [2] .....	15
Obrázek 7 - Struktura jemnozrnného SSIC [2].....	16
Obrázek 8 - Struktura hrubozrnného SSIC [2] .....	16
Obrázek 9 – Struktura jemnozrnného SISIC [2].....	17
Obrázek 10 - Struktura RSIC [2] .....	18
Obrázek 11 - Struktura NSIC [2].....	19
Obrázek 12 - Mikrostruktura tlakově slinovaného nitridu křemíku ( $\text{Si}_3\text{O}_4$ ) [2] .....	20
Obrázek 13 - Povrch reakčního nitridu křemíku ( $\text{Si}_3\text{O}_4$ ) [2] .....	22
Obrázek 14 - Povrch nitridu hliníku ( $\text{AlN}$ ) [2] .....	23
Obrázek 15 - Hrubý prášek oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [2].....	24
Obrázek 16 - Jemný prášek oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [2] .....	24
Obrázek 17 - Jednoosé suché lisování, jednostranné a oboustranné [2].....	25
Obrázek 18 - Izostatické lisování s plochami různého zhutnění (stupně šedi) [2] .....	26
Obrázek 19 - Proces extrudování (lisotažení) [2] .....	27
Obrázek 20 - Proces lití tenkou vrstvou [2].....	28
Obrázek 21 - Procesy obrábění u vysušených výrobků [2] .....	30

# 1 Úvod

S pokrokem vědy, průmyslu a technologie, vzrostla poptávka po nových konstrukčních materiálech s velmi specifickými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi především v oblasti vysokoteplotních aplikací. Díky těmto požadavkům započal vývoj takzvané pokročilé neboli progresivní technické keramiky. Tato zhusta kompozitní keramika se odlišuje od tradiční keramiky svým složením a způsobem výroby. Jedná se totiž o polykrystalický materiál s převládajícím obsahem anorganických nekovových fází připravovaný procesem slinování za vysokých teplot. Výzkum těchto materiálů odhalil doposud neznámou skupinu progresivní keramiky, která patří mezi nejodolnější materiály co se extrémních teplotních podmínek týče, a to vysokoteplotní technickou keramiku.

Vysokoteplotní technická keramika je jedním z nejdynamičtějších technologických oborů současnosti. Výrobky z ní se prosazují doslova ve všech významných průmyslových odvětvích. Mezi hlavní oblasti využití lze jmenovat kosmonautiku, letectví, automobilový průmysl, chemický průmysl, elektroniku a elektrotechniku, životní prostředí, energetiku, medicínu a jiné. Mezi významné materiály v oblasti nových technologií a inovativních řešení se zařadila skupina technické keramiky zvaná neoxidová vysokoteplotní technická keramika. Tento druh keramiky je v dnešní době předmětem neustálého zkoumání a vývoje především pro své vlastnosti při extrémních teplotních podmínkách provozu. Výrobky z neoxidové vysokoteplotní technické keramiky vnesly do oboru žárovzdorných materiálů vlastnosti nové, doposud neznámé, nebo s použitím oxidových či jiných materiálů nedosažitelné. Ve srovnání s tradičními materiály rozšířily tyto nové technologie na bázi neoxidových keramik možnosti výroby složitých tvarů a do té doby nedosažitelných rozměrů a rozměrových tolerancí. Ve spojení s moderními způsoby obrábění se začaly přibližovat výrobky z technické keramiky parametrům, které byly doposud možné pouze u kovových materiálů.

Výzkum a vývoj nových technologií je velmi často spjat s chemickými reakcemi, složitými mineralogickými změnami, nebo technologickými postupy, které probíhají za vysokých teplot, vysokých tlaků za současné přítomnosti různých ochranných atmosfér nebo přímého vysokoteplotního působení plynných fází. Pro dosažení těchto podmínek již není možno použít konvenčních materiálů na bázi kovů nebo klasických žárovzdorných materiálů na silikátovém základě. Proto jsou stále zdokonalovány technologie na bázi neoxidových konstrukčních keramických materiálů, které umožňují vysokoteplotní technologické postupy uvést nejen do laboratorní nebo poloproduční, ale rovněž výrobní praxe.

S těmito materiály se lze dnes setkat i v běžném životě, například v podobě keramických brzd automobilů, filtrů pro čištění vody, jádra neprůstřelných vest či oteruvzdorné vrstvy hrotů vrtáků a řezných nástrojů, armatur a čerpadel.

V dnešní době si lze jen stěží dovedeme představit vysokoteplotní procesy bez použití neoxidové technické keramiky.

## **2 Cíl práce a metodika**

### **2.1 Cíl práce**

Cílem této bakalářské práce je nejen představit a vysvětlit použití a význam vysokoteplotní technické neoxidové keramiky v dnešní praxi, ale také shrnout znalosti potřebné k hlubšímu porozumění technických keramických materiálů jako celku. Tato práce má dále za cíl popsat jednotlivé postupy při výrobě a následném zpracování materiálů z technické keramiky.

### **2.2 Metodika**

Tato bakalářská práce je zpracována jako literární rešerše. Základem práce byl zvolen především vědecký popis podpořený věrohodnými aktuálními zdroji informací, které vycházejí z uvedené literatury. Při psaní této práce bylo dbáno na objektivitu a na pravdivost jednotlivých tvrzení. Dále se v práci vyskytují metody explanace, analýzy, analogie a syntézy. Metoda explanace byla využita především pro vyvození teoretických závěrů, metoda analýzy umožnila odhalit různé vztahy a podobnosti mezi jednotlivými druhy technických keramických materiálů, metoda analogie přispěla k orientaci při zkoumání jednotlivých jevů mezi keramickými materiály a v neposlední řadě metoda syntézy, která přispěla ke sjednocení jednotlivých celků do souvislého textu. V závěru mé práce je také vyvozen platný závěr, který sumarizuje podstatu problematiky keramických materiálů a dále také obsahuje subjektivní zhodnocení celého tématu autorem práce.

## **3 Úvod do historie keramických materiálů**

### **3.1 Historie novodobé technické keramiky**

Poptávka po speciálních keramických materiálech s izolačními vlastnostmi začala růst ve 20. letech 20. století, a to díky rozmachu výroby rádií. Ty vyžadovaly pro správnou funkčnost speciální keramické materiály, které byly schopné odolat vysokofrekvenčním polím bez toho, aniž by se zahřívaly. Tento vývoj vedl k vytvoření nových materiálů jako například steatit a forsterit, které se v elektrotechnice používají dodnes.

Ve 40. letech 20. století byly vyvinuty kondenzátorové materiály na bázi oxidu titaničitého a započaly výzkumy ferroelektrických a piezoelektrických vlastností perovskitů. To vedlo k vytvoření dalších materiálů na bázi oxidu zirkoničitého, oxidu zinečnatého, oxidu hlinitého včetně materiálů s polovodičovými vlastnostmi. Tyto materiály našly uplatnění v senzorech, frekvenčně selektivních součástkách, kondenzátorech s vysokou povrchovou kapacitou a dalších.

Významným milníkem v této oblasti bylo zavedení výroby izolátoru zapalovací svíčky ze slinutého korundu, a to v roce 1929 firmou Siemens. [1,2,3]

### **3.2 Historie neoxidové technické keramiky**

Z počátku se pro keramické konstrukční účely používal oxid hlinitý, později i oxid zirkoničitý. Postupem času se však začaly rozpoznávat a využívat pro konstrukční a žáruvzdorné účely vynikající vlastnosti kovalentně vázaných materiálů na bázi sloučenin křemíku, uhlíku (karbidy), dusíku (nitridy) a bóru (boridy). Rozvoj a zájem o tyto materiály započal v 60. letech 20. století. Jako zástupce lze uvést karbid křemíku, nitrid křemíku, nitrid bóru a další. Pro své unikátní vlastnosti zůstal výzkum všech materiálů spadajících do této skupiny aktuální dodnes.

Pro lepší pochopení a snadnější výzkum těchto materiálů bylo třeba vyvinout nové matematické metody, počítačové simulace pro modelování vztahů mezi strukturou a vlastnostmi daného materiálu a zdokonalení lomové mechaniky. Souběžně s teoretickým vývojem bylo nutné optimalizovat procesní technologie a vytvořit zcela nové procesy slinování.

Materiály, kterými se tato práce zabývá se neustále zdokonalují a vyvíjejí, taktéž se s nimi vyvíjí i možnosti jejich využití. Dnešní materiály se již nedají srovnávat s materiály, které byly na trhu před dvaceti lety. Poptávka po stále dokonalejších a odolnějších materiálech podporuje jejich hlubší porozumění a vytváří nové, vylepšené výrobní techniky. [1,2,3]

## 4 Základní vlastnosti a použití konstrukční (technické) keramiky

Konstrukční keramika, někdy zvaná technická, zahrnuje skupiny materiálů, jejichž primárním cílem je nahrazení nekeramických materiálů v aplikacích, kde je kladen důraz na dlouhodobou životnost a spolehlivost při extrémních podmínkách provozu. Konstrukční keramické materiály jsou právě díky svým vlastnostem, mezi které lze zařadit vysokou tvrdost, vysokou mechanickou pevnost, vysokou přípustnou provozní teplotu při provozu, elektroizolační vlastnosti, vysokou tepelnou vodivost, rozměrovou stabilitu, odolnost proti opotřebení, korozi a povětrnostním vlivům a dalším, stále žádanější materiály. Tyto vlastnosti vycházejí primárně z charakteru vazeb, chemického a fázového složení. V závislosti na složení, přípravě použitých surovin a výrobních procesech lze vlastnosti příslušných keramických materiálů do značné míry přizpůsobit koncovému aplikačnímu využití.

Konstrukční keramika je syntetický materiál připravovaný z keramických prášků. Tyto prášky mají vliv na mikrostrukturu v počátečních stádiích přípravy keramické hmoty. Nerovnoměrná mikrostruktura při výchozí fázi výroby může mít za následek zárodky poruch konečného keramického výrobku. Dále může snižovat jeho pevnost a reprodukovatelnost požadovaných vlastností. Čistota keramických prášků ovlivňuje výsledné vlastnosti při extrémních podmínkách, především při vysokých teplotách. Z těchto důvodů se do keramických hmot přidávají organické přísady, které pozitivně ovlivňují procesy slinování a mikrostrukturu výsledného keramického materiálu. Dále ovlivňují hustější uspořádání částic, rychlejší a lepší zhutnění keramického materiálu.

Jak z výše uvedených informací vyplývá, keramické materiály vyžadují pro své správné fungování velmi striktní podmínky při zpracování keramických prášků a při samotné výrobě. Pokud jsou však všechny podmínky výroby dodrženy, vzniká výsledný produkt, který je pro potřeby dnešního průmyslu nepostradatelný. S výrobky z keramických materiálů se lze setkat v řadě odvětví, a to například ve strojírenství, metalurgii, energetice, chemii, v robotice a v dalších. [2,3,11,12]

### 4.1 Definice keramických materiálů

V následující kapitole je popsán vznik definice keramických materiálů. V minulosti se definice pro jednotlivé státy či kontinenty lišila, jelikož v každé definici mohl být zahrnut termín, který vycházel z historie, a to kvůli rozmanitosti použitých surovin a druhu aplikací. Tak to do jisté míry zůstalo až dodnes, proto se pro definici keramických materiálů zavedl termín takzvané minimální definice. Obecná (minimální) definice současných keramických materiálů tedy zní: „*Keramické materiály jsou anorganické a nekovové. Zpravidla vznikají ze surové hmoty při pokojové teplotě a své typické materiálové vlastnosti získávají procesem slinování za vysokých teplot.*“<sup>1</sup>

Při hlubším porozumění problematice keramických materiálů je však zřejmé, že s pokrokem vědy začíná být tato definice poněkud neaktuální. Stále se totiž vyvíjejí nové keramické materiály, které se v jistých ohledech neshodují s obecnou definicí, například

---

<sup>1</sup> Brevier - *Technische keramik*. 4. doplněné vydání. Berlín: Asociace keramického průmyslu, 2003. 18 s. ISBN 3-924158-77-0.

keramické materiály s obsahem kovů. V dnešní době je tedy lepší definici rozšířit až podle druhu, použití a složení dané keramiky. [2,3,5]

## 5 Dělení konstrukčních keramických materiálů

Konstrukční keramika se dělí na čtyři základní skupiny dle chemického složení, a to na keramiku silikátovou, oxidovou, neoxidovou a směsnou. Pro potřeby této práce a pro pochopení daného tématu je nutné v této kapitole uvést základní informace o všech druzích technických keramik, které přímo nespádají do skupiny neoxidové keramiky, jelikož v některých oblastech spolu tyto materiály úzce souvisí, nebo mohou sloužit jako pomocné prvky při výrobě již zmíněné neoxidové keramiky. [2,11,12]

### 5.1 Silikátová keramika

Silikátová keramika je nejstarší skupina konstrukční keramiky. Mezi základní složky silikátové keramiky patří jíly, kaoliny, živec a mastek. Tyto materiály slouží, jako silikátové nosiče. Pro dosažení potřebných materiálových vlastností se používají také komponenty jako například oxid hlinitý, zirkon a další.

Silikátová keramika je ,na rozdíl od oxidové či neoxidové keramiky, díky relativně nízkým teplotám slinování, dobré kontrole slinovacího procesu a vysoké dostupnosti přírodních surovin, znatelně levnější. Oxidová a neoxidová keramika totiž na rozdíl od silikátové keramiky vyžaduje složité syntetické prášky a výrazně vyšší teploty slinování.

Při oxidačním výpalu vzniká kromě krystalických fází také velký podíl skelné fáze. Tento podíl se může pohybovat až kolem dvaceti procent. Hlavní složkou skelné fáze je oxid křemičitý.

Mezi nejznámější silikáty patří technický porcelán, steatit, kordierit a mullit. Lze je nalézt například v topné technice, měřicí a regulační technice, procesní a environmentální technice, vysokonapěťové a nízkonapěťové technice v podobě izolátorů, pojistkových vložek, katalyzátorů, pouzder s různými aplikacemi, elektroinstalační technice a hlavně jako žáruvzdorné vyzdívky v pecích mnoha typů. [1,2,3]

### 5.2 Oxidová keramika

Oxidová keramika je pojem, který zahrnuje materiály složené z jednofázových, jednosložkových oxidů, nebo směsí několika oxidů. Převážně se jedná o oxidy kovů. Oxidová keramika se vyznačuje nízkým obsahem skelné fáze. V některých případech je zcela bez skelné fáze. Všechny produkty oxidové keramiky jsou vyráběny ze syntetických surovin v podobě práškových oxidů. Díky tomu dosahují výrobky z této keramiky velmi vysokého stupně čistoty.

Oxidovou keramiku lze použít v oblastech elektrotechniky, elektroniky, ale často také jako konstrukční materiál. Své vlastnosti získává z náročného procesu slinování za vysokých teplot, který má za následek vytvoření jednotné mikrostruktury. Jednotná mikrostruktura materiálu zajišťuje lomovou houževnatost, vysokou odolnost proti opotřebení, odolnost proti vysokým teplotám, dále také disponuje vysokou tvrdostí a pevností. V neposlední řadě se jedná o materiál s dobrými elektroizolačními vlastnostmi spolu s odolností proti korozi.

Oxidovou keramiku dělíme na dvě skupiny, a to s jedno materiálovým systémem a s vícesložkovým systémem. Vícesložkový systém lze dále dělit na směsnou oxidovou

keramiku a disperzní keramiku. Zástupci jednomateriálového systému jsou například oxid hlinitý, oxid hořečnatý, oxid zirkoničitý, nebo oxid titaničitý. Nejpoužívanější oxidová keramika pro účely konstrukčních aplikací je právě oxid hlinitý, též nazývaný slinutý korund a oxid zirkoničitý. Pro potřeby této práce se budeme zabývat právě těmito uvedenými, základními jednomateriálovými druhy keramik.

Jako zástupce vícesložkového systému lze uvést například oxid hlinitý vyztužený oxidem zirkonu nebo oxid titanatý s obsahem zirkonu a olova. Tyto materiály mají velmi úzké pole působnosti nebo jsou teprve předmětem výzkumu a hlubšího porozumění.

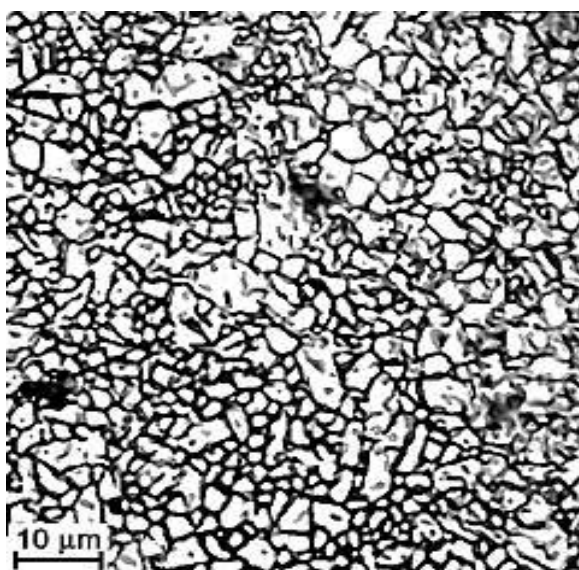
Oxidová keramika je v dnešní době používána jako významný konstrukční materiál především pro součásti vysokoteplotních zařízení v podobě tavicích kelímků a izolátorů zapalovacích svíček pro zážehové motory. Mezi další oblasti využití patří výrobky pro obrábění litiny a řezné pláty pro obrábění kovů. [2,6,11,12]

### 5.2.1 Oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

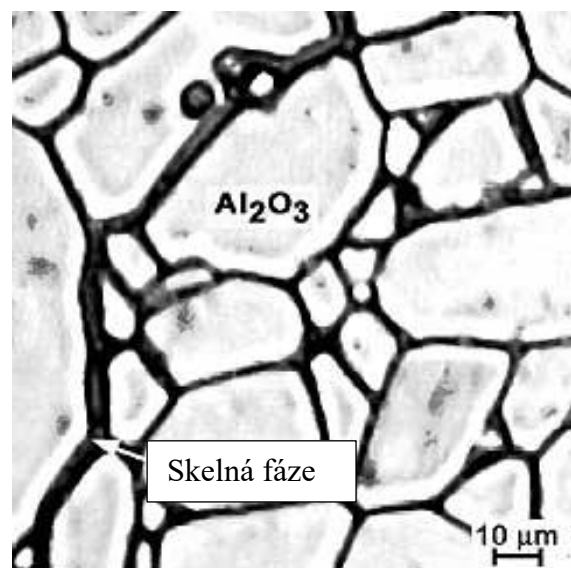
Oxid hlinitý patří mezi technicky nejdůležitější oxidový keramický materiál s nejširším spektrem využití, například ve formě slinutého korundu. Jeho průmyslová výroba je prováděna dle různě modifikovaného Bayerova postupu, který je založen na zpracování přírodního bauxitu.

Synteticky vyrobené materiály s obsahem oxidu hlinitého dosahují vysoké pevnosti, tvrdosti, odolnosti proti korozi a chemikáliím, teplotní stability, vysoké odolnosti proti otěru a mechanickému opotřebení nejen za vysokých teplot. Nevýhodou oxidu hlinitého je pak horší odolnost vůči teplotním šokům a relativní vysoká křehkost.

Procentuální zastoupení oxidu hlinitého v těchto materiálech se pohybuje od 80 % až do 99 %. Není však pravidlem, že materiál s vyšším obsahem oxidu hlinitého je nutně materiál lepší či odolnější. Vše závisí na aplikačních požadavcích, výrobní receptuře, a v neposlední řadě také na výrobcí a jeho postupech. Níže na obrázku je možné vidět dva chemicky totožné materiály. Odlišují se pouze rozdílným druhem práškových receptur a výrobním procesem. Každý z těchto materiálů má odlišné vlastnosti a následné využití.



Obrázek 1 - Struktura mikrokrystalického oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [2]



Obrázek 2 - Mikrostruktura hrubě krystalického oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [2]



Materiály z oxidu hlinitého se používají například jako izolační materiály v elektrotechnice, jako těsnící prvky, v elektronice jako leštěný substrát mikrovlnných integrovaných obvodů a jako jemnozrný nebroušený substrát, ve strojírenství jako ochrana proti otěru a mechanickému opotřebení, v metrologii jako ochranná trubice pro termočlánky při měření teplot, ve vysokoteplotních aplikacích jako trysky hořáku, nebo jako ochranné trubice pro topné články. [1,2,4,10,11]

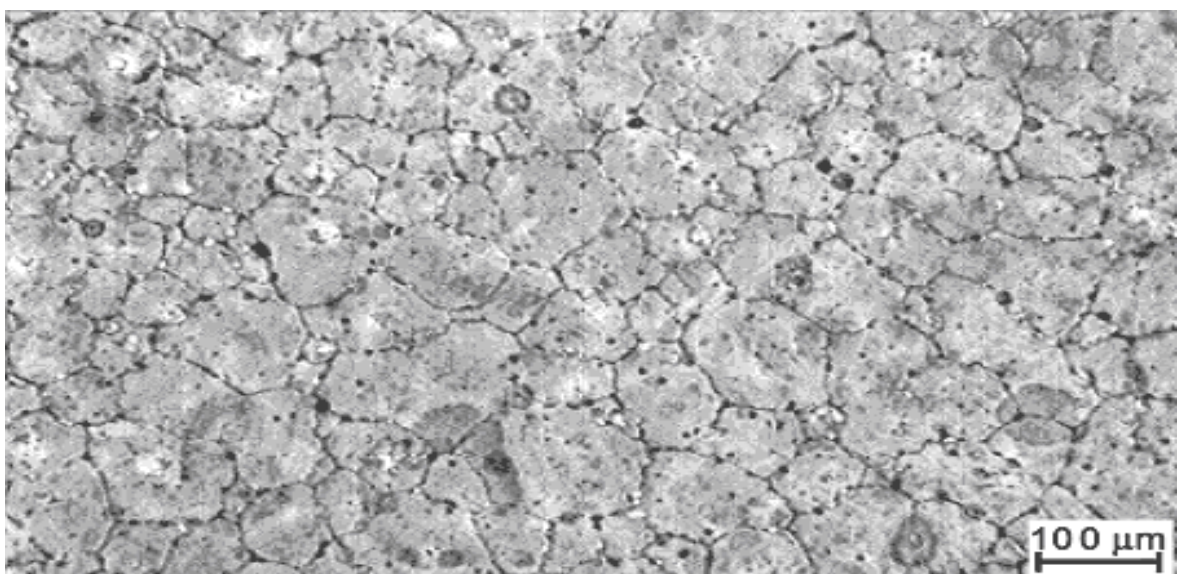
### 5.2.2 Oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ )

Oxid zirkoničitý je nejodolnější materiál ze všech materiálů oxidové keramiky. Vyskytuje se ve třech krystalových modifikacích, a to monoklinické, tetragonální a kubické. Pokud se však jedná o hustě slinutý oxid zirkoničitý, dá se vyrábět pouze v tetragonální, nebo kubické krystalové soustavě.

Pokud se jedná o kubickou krystalovou soustavu, je nutné přidat látku, která slouží jako stabilizátor. Mezi tyto sloučeniny můžeme zařadit například oxid hořečnatý, oxid vápenatý, oxid ceru, nebo oxid yttria. Pro konstrukční využití oxidu zirkoničitého je nutné, aby se nacházel v takzvané plně stabilizované fázi. Tato fáze může nastat právě přidáním cizích oxidů do krystalové mřížky, které zde plní funkci již zmíněných stabilizátorů. V praxi má tato fáze za následek zachování vysokoteplotní struktury a objemu i po ochlazení.

Nestabilizovaný oxid zirkoničitý je totiž schopen během výrobního procesu, který se provádí při teplotách 1170 °C a následnému ochlazení na 1040 °C, změnit svůj objem až o 9 %. Tato objemová změna může v krajních případech způsobit mechanické poruchy a tím znehodnocení výsledného produktu. Je pak skoro nemožné, díky proměnlivému objemu během výroby, vyrábět produkty z čistého oxidu zirkoničitého.

V některých případech je však změna objemu potřebná, pak využíváme takzvaný částečně stabilizovaný oxid zirkoničitý. Tento typ oxidu zirkoničitého má velký význam v technice. Aby se zabránilo procesu přechodu do monoklinické fáze, je při výrobě žíhán. To má za následek předepnutí konstrukce a tím zvýšení pevnosti a houževnatosti materiálu.



Obrázek 3 - Mikrostruktura částečně stabilizovaného oxidu zirkoničitého ( $ZrO_2$ ) [2]

Mezi další krystalovou modifikaci oxidu zirkoničitého patří polykrystalický tetragonální oxid zirkoničitý. Své vlastnosti, jako například extrémně vysokou mechanickou pevnost, která může dosahovat hodnot i přes 1500 MPa, získává díky velice jemným výchozím práškům a poměrně nízké teplotě slinování. I po dokončení slinovacích procesů je tento materiál jemnozrnný, jeho zrnitost se pohybuje kolem 100 $\mu$ m. Oxid zirkoničitý je také využíván pro svou chemickou a korozní odolnost, výbornou lomovou houževnatost a dobré odolnosti proti opotřebení.

Díky své vlastnosti, která spočívá ve vodivosti kyslíkových iontů, patří oxid zirkoničitý mezi ideální materiály pro měření parciálních tlaků kyslíku. Používá se třeba pro výrobu takzvaných lambda sond, které můžeme nalézt například ve výfukovém systému spalovacích motorů.

Jako další aplikace, kde je možno se s keramikou z oxidu zirkoničitého setkat, je tavení drahých kovů jako zlato, platina nebo palladium, především díky již zmíněné chemické stabilitě. [1,2,7,11]

### 5.3 Keramika směsná

Směsná keramika představuje speciální druh technických keramik, který spočívá v kombinaci keramiky oxidové a neoxidové. Vývoj směsné keramiky započal v 70. letech 20. století, kdy byl poprvé představen oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) vázaný karbidem titanu (TiC). Nejpoužívanější typy směsných keramik v dnešní době jsou:

- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC,
- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ZrO<sub>2</sub>,
- SiC-BN,
- SiC-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- SiC-SiC,
- AlN-BN,
- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC.

Směsná keramika se používá převážně na soustružení kalených ocelí a tvrzené litiny při dokončovacích procesech obrábění. Směsná keramika využívá vlastností obou skupin technických keramik, není však vhodná pro použití jako konstrukční materiál v extrémních teplotních podmínkách. Oproti klasické oxidové keramice je směsná keramika tvrdší za teplot přesahujících 800°C. Současně má lepší lomovou houževnatost a pevnost v ohybu. Díky nižší délkové roztažnosti a vyšší tepelné vodivosti je směsná keramika odolnější vůči teplotním šokům a cyklickému tepelnému zatížení. V případě keramiky  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC dochází ke sloučení 30 až 40 % TiC a 60 až 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tím vzniká směsná keramika, která dosahuje výrazně vyšší tvrdosti při pokojové teplotě. Přísada TiC dále zvyšuje stabilitu a tepelnou vodivost keramiky. [4,11,12]

## 6 Neoxidová keramika

Neoxidová keramika je tvořena třemi hlavními skupinami a to boridy, karbidy, nitridy a zvláštní skupinu materiálů nazývaných sialony, které jsou tvořeny tuhými roztoky. Tyto skupiny lze dále dělit na kovové a nekovové, avšak bez jasné hranice mezi nimi. Díky tomuto faktu jsou tyto materiály zajímavé jak z vědeckého, tak především z technologického hlediska. Velká část materiálů neoxidové keramiky vykazuje kovovou vodivost včetně supravodivosti. Zásahu na tom mají převládající kovalentní vazby nad iontovými.

Díky právě zmíněným převládajícím kovalentním vazbám získává neoxidová keramika své další charakteristické vlastnosti jako třeba extrémní tvrdost a ultra vysoké body tání. Jako příklad lze uvést nejznámějšího zástupce karbidů a to karbid křemíku (SiC), jehož bod tání se pohybuje kolem 2500 °C. Mezi rekordmany v této oblasti bezpochyby patří karbid tantalu (TaC) jehož udávaná teplota tání je 3980 °C.

Naproti tomu jsou zde nevýhody neoxidové keramiky, mezi které můžeme zařadit jejich relativně nízkou lomovou houževnatost a pevnost.

Neoxidová keramika se používá především jako vysokoteplotní strukturní a funkční keramika. Během posledních dvaceti let zaznamenala prudký rozvoj technologie výroby kompozitů na bázi karbidu křemíku infiltrovaného kovovým křemíkem. Tento materiál je unikátní především pro své multifunkční vlastnosti a také díky své stabilitě a konstantní pevnosti za ultra vysokých teplot.

Výroba neoxidové keramiky je možná výhradně ze syntetických surovin, stejně jako tomu bylo u keramiky oxidové. Pro výrobu neoxidové keramiky musí být navržen speciální pecní systém, který dosahuje alespoň 1500–2500 °C, vše záleží na druhu keramiky, způsobu výroby a výsledném produktu. Celý proces musí probíhat zcela bez přístupu kyslíku, například ve vakuu, nebo za přítomnosti inertních plynů, aby se zabránilo nežádoucí oxidaci. Jako inertní plyny se používají helium a argon, které se vhání do pecní soustavy v přímo určeném poměru. Dále je potřeba, aby byl během procesu slinování zachován požadovaný parciální tlak. Pro slinování některých látek je nutné slinování s kapalnou fází (LPS), nebo za pomoci speciální reakční techniky.

V neposlední řadě je nutno dodat, že ačkoli se neoxidová keramika stihla v mnoha odvětvích průmyslu prosadit a stát se jejich nenahraditelnou součástí, stále je předmětem experimentů a zkoumání. Především proto, že stále nebyl zcela zmapován difúzní systém neoxidové keramiky. [2,5,6,7,8,9,11,12,]

### 6.1 Karbidy

Skupina neoxidové keramiky na bázi karbidů se vyznačuje nejvyššími teplotami tání z dosud známých látek (např.: HfC a TaC asi 3980 °C). Dalšími charakteristickými znaky karbidů jsou extrémní tvrdost, dobrá tepelná a elektrická vodivost, ale především jejich vysoká stabilita za extrémních teplotních podmínek. Výjimku tvoří odolnost vůči oxidaci, i ta je však u karbidů vyšší než například u kovů se srovnatelnou teplotou tání.

Karbidy jsou tvořeny kombinací prvků s nízkým atomovým číslem uhlíku, bóru, křemíku a dusíku. Uhlík – uhlík jako diamant, bór – uhlík jako karbid bóru, křemík – uhlík, jako karbid křemíku a bór – dusík, jako nitrid bóru.

Karbid křemíku (SiC) a karbid bóru (B<sub>4</sub>C) spolu s tvrdými kovy na bázi karbidu wolframu jsou mnohými považovány za nejdůležitější karbidové materiály kvůli jejich extrémním vlastnostem a řadě současných a potenciálních komerčních aplikací. [5,9,10]

### 6.1.1 Karbid křemíku (SiC)

Materiály na bázi karbidu křemíku bezpochyby patří mezi nejdůležitější a nejpoužívanější materiály z oblasti neoxidových konstrukčních keramik. S karbidem křemíku se může setkat v různých variantách, přičemž každá vyniká jinými charakteristickými vlastnostmi. Mezi tyto vlastnosti patří všechny již uvedené pro karbidy jako celek, ale přidávají se k nim vlastnosti typické právě pro karbid křemíku jako například vysoká odolnost vůči opotřebení, teplotním šokům, kyselinám a louchům, nízká tepelná roztažnost, nízká hmotnost a v neposlední řadě má také vlastnosti polovodičů. Všechny tyto vlastnosti jsou závislé na různých variantách, druhů pojiv a výrobní technice karbidu křemíku, avšak do teplot kolem 1400 °C zůstávají tyto vlastnosti konstantními.

Karbid křemíku zaujímá dle Mohsovy stupnice stupeň 9,5, tudíž se jedná o téměř stejně tvrdý materiál jako diamant. Youngův modul pružnosti má karbid křemíku 400 GPa, což zaručuje jeho rozměrovou stabilitu. Karbid křemíku je polymorfní látkou. Nízkoteplotní modifikace  $\beta$  – SiC, která je kubická a nad teplotou 2100 °C se mění na vysokoteplotní modifikaci  $\alpha$  – SiC, která je hexagonální.

Jde o základní materiál pro výrobu žáruvzdorných tvarových staviv a monolitických směsí, výhřevných odporových článků elektrických pecí, brusiv a konstrukčním materiálem mechanicky a tepelně namáhaných částí plynových turbín, motorů, hořáků a dalších komponent. Takto rozsáhlé možnosti využití má karbid křemíku díky snadné dostupnosti ve složitých tvarech, převážně díky stále se zdokonalující výrobní technologii, technologii tváření včetně 3D tisku a také díky postupnému nahrazování karbidu wolframu v aplikacích odolných proti opotřebení.

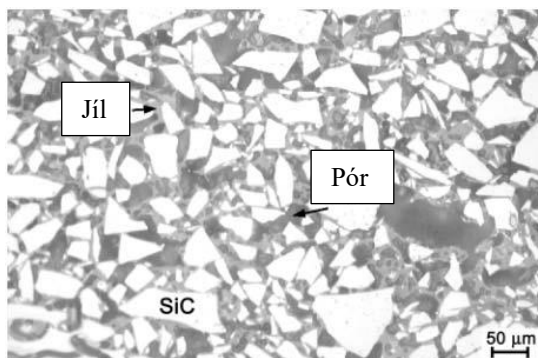
Karbid křemíku se dále dělí na dvě skupiny a to na takzvaný otevřený porézní karbid křemíku a hutný karbid křemíku. Mezi porézní karbid křemíku řadíme karbid křemíku s jílovou vazbou, rekrytalizovaný karbid křemíku (RSIC) a karbid křemíku s nitridickou vazbou (NSIC). Do skupiny hutného karbidu křemíku patří karbid křemíku infiltrovaný kovovým křemíkem (SISIC), reakčně slinutý karbid křemíku (SSIC), za tepla lisovaný karbid křemíku (HPSIC) a slinutý karbid křemíku v kapalně fázi (LPSIC). Jednotlivé druhy karbidu křemíku budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. [2,5,7,10,11]

#### 6.1.1.1 Karbid křemíku vázaný silikátem (karbid křemíku s jílovou vazbou)

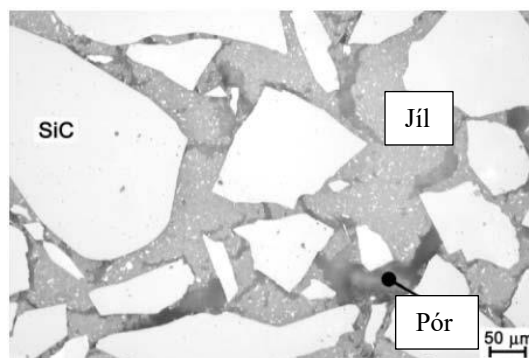
Karbid křemíku vázaný silikátem se vyrábí z hrubého a středně jemného SiC prášku, následně je vypálen s cca 5 až 15 % hlinitokřemičité (jílové) pojivové matrice za přítomnosti vzdušné atmosféry.

Co se pevnosti, korozní odolnosti ale především vysokoteplotních vlastností týče, ty jsou dány silikátovou pojivou maticí a jsou tedy výrazně nižší než u keramik z karbidu křemíku bez oxidů. Při velmi vysokých provozních teplotách začíná pojivová matrice na bázi silikátů měknout a materiál se může začít deformovat. Mezi výhody tohoto druhu keramiky patří jeho relativně nízké náklady na výrobu.

Tento materiál se používá například pro výrobu řezných a brusných kotoučů, pálicích pomůcek (regály do pecí pro výpal keramiky a porcelánu), odporových topných článků a nádob na tavení barevných kovů a slitin hliníku. [2,4,5,6]



Obrázek 5 - Mikrostruktura jemného karbidu křemíku vázaného silikátem [2]

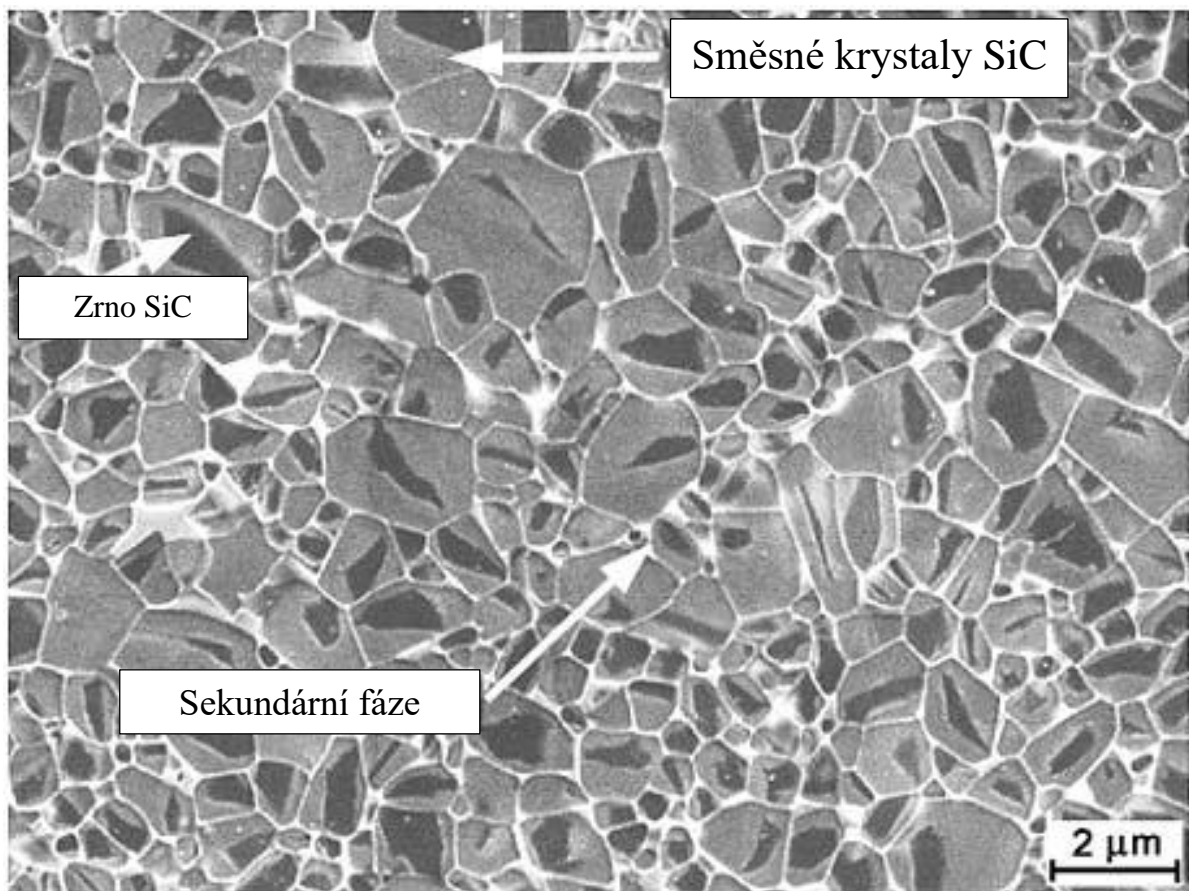


Obrázek 4 - Mikrostruktura hrubého karbidu křemíku vázaného silikátem [2]

#### 6.1.1.2 Slinutý karbid křemíku v kapalné fázi (LPSIC)

Slinutý karbid křemíku v kapalné fázi (LPSIC) se řadí do skupiny hustých materiálů na bázi karbidu křemíku. Jeho obsah tvoří smíšená fáze oxinitridu SiC a také oxidická sekundární fáze. Tento materiál se vyrábí z prášku karbidu křemíku a dalších směsí oxidových keramických prášků, ve většině případech se jedná o oxid hlinitý. Oxidické složky mají za následek zvýšení hustoty oproti slinutému karbidu křemíku (SSIC). Komponenty z tohoto typu keramiky jsou lisovány v procesu tlakového slinování. Tlak při tomto druhu slinování dosahuje hodnot kolem 20 – 30MPa, teplota se pohybuje kolem 2000 °C.

Unikátní vlastností slinutého karbidu křemíku v kapalné fázi je jemnozrnnost jeho výsledné matrice. Velikost zrna je ve většině případech menší než 2 µm, díky těmto rozměrům zrna je výsledný materiál prakticky bez pórů. Dále vyniká v lomové houževnatosti a vysoké pevnosti. [2,5,6,7,10]



Obrázek 6 - Mikrostruktura slinutého karbidu křemíku v kapalné fázi (LPSiC) [2]

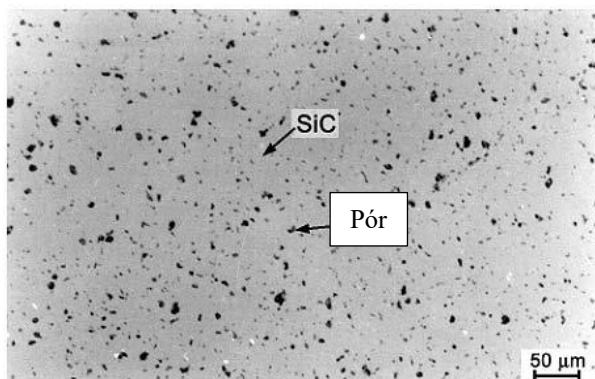
### 6.1.1.3 Beztlakový slinutý (sintrovaný) karbid křemíku (SSiC)

Beztlakový slinutý karbid křemíku, jak už jeho název napovídá, se vyrábí za atmosférického tlaku z jemně mletého SiC prášku. Do tohoto prášku se dále přidávají slinovací přísady, poté se vytvaruje do požadovaného tvaru a následně probíhá slinovací proces při teplotách od 2000 do 2200 °C. Celý proces slinování probíhá pod ochrannou atmosférou helia a argonu.

Tento druh keramiky je možné vyrábět ve dvou variantách, a to ve variantě jemnozrné a hrubozrné. Velikost zrna u jemnozrné varianty se pohybuje kolem 5 μm, zatímco u hrubozrné varianty může velikost zrna dosahovat až 1,5 mm.

Mezi charakteristické vlastnosti SSiC patří vysoká pevnost, která zůstává trvale konstantní až do teplot kolem 1600 °C, dále vyniká odolností vůči silným kyselinám a zásaditým látkám opět do teplot, které se pohybují kolem 1600 °C.

Hrubozrné varianty jsou navíc ideální pro aplikace, kde je nezbytná odolnost vůči teplotním šokům. Dále vyniká svou vysokou teplotní vodivostí a tvrdostí blížící se diamantu. Díky svým jedinečným vlastnostem nachází beztlakový slinutý karbid křemíku své uplatnění třeba jako materiál pro výrobu mechanických ucpávek v chemických čerpadlech, kluzných ložisek, vysokoteplotních trysek hořáků, nebo jako pálící pomůcky pro výpal za vysokých teplot (výpal korundových keramických rolen a trubic v závěsu až do teplot 1600 °C). [2,8,9,10]



Obrázek 7 - Struktura jemnozrnného SSIC [2]



Obrázek 8 - Struktura hrubozrnného SSIC [2]

#### 6.1.1.4 Karbid křemíku lisovaný za tepla (HPSIC)

Karbid křemíku lisovaný za tepla (HPSIC) společně s izostatickým za horka lisovaným karbidem křemíku (HIPSIC) tvoří skupinu karbidů, která má na rozdíl od beztlakově slinutého karbidu křemíku (SSIC) lepší mechanické vlastnosti. Hodnoty lisovacích tlaků mohou u tohoto procesu výroby dosahovat hodnot i přes 2000 barů. Důvod pro takto složitý proces výroby spočívá v množství pórů v materiálu.

Díky právě zmíněné metodě výroby dosahuje HPSIC společně s HIPSIC velmi nízké pórovitosti, která je hlavním důvodem pro zlepšení již zmíněných mechanických vlastností materiálu. Pro lisování se mohou využívat dvě metody, a to metoda axiálního lisování (HP) nebo metoda izostatického lisování (HIP). Nevýhodou těchto materiálů, i přes jejich vylepšené vlastnosti, je jejich schopnost vytvářet finální produkty, jelikož procesy lisování omezují tvary výsledných produktů.

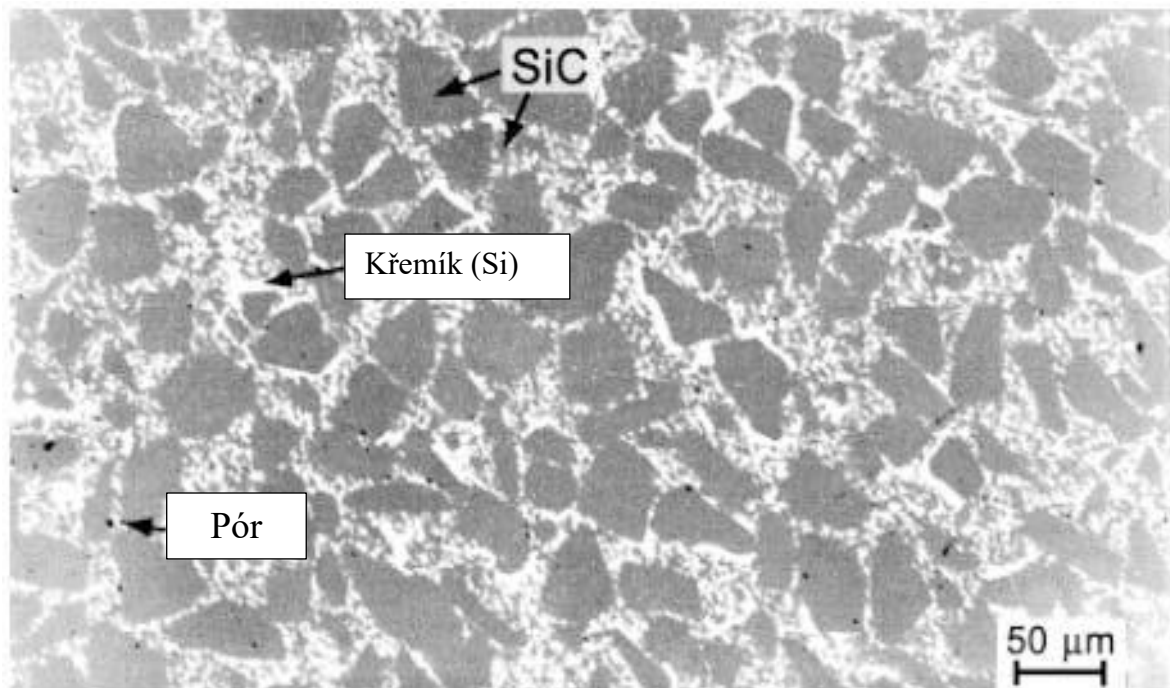
Výsledné produkty proto mohou být spíše jednoduché nebo malé geometrie. HPSIC a HIPSIC se z tohoto důvodu používají pouze v aplikacích s extrémní zátěží. V oblastech, kde není přímo nutné použít jeden z těchto materiálů, je z ekonomického hlediska lepší volba slinutý karbid křemíku (SSIC). [2,7,8]

#### 6.1.1.5 Křemíkem infiltrovaný karbid křemíku (SISIC)

Reakčně vázaný karbid křemíku infiltrovaný kovovým křemíkem obsahuje 85 až 94 % SiC a odpovídajícím způsobem 15 až 6 % kovového křemíku (Si). SISIC se vyznačuje prakticky nulovou otevřenou pórovitostí. Toho je dosaženo právě díky infiltraci kovového křemíku do tvarového tělesa z karbidu křemíku a uhlíku. Při reakci kapalného křemíku s uhlíkem dochází k tvorbě materiálu, který sám o sobě obsahuje póry, které jsou následně zaplněny kovovým křemíkem. Kovový křemík se do pórů matrice dostává během procesu slinování. Výhodou této metody výroby je, že na rozdíl od výrobní techniky práškového slinování se součásti během procesu silikonizace nesmršťují. Výsledkem je možnost vyrábět složité, často i rozměrově náročné produkty s přesnými koncovými rozměry. Nevýhodou SISIC je však teplota, do které je možno tento materiál vystavit. Jako ideální teplota, do které je možno SISIC použít se udává 1380 °C, právě kvůli nízkému bodu tání kovového křemíku. Až do tohoto bodu vykazuje SISIC konstantní velmi vysokou pevnost (přes 300 MPa)

a odolnost proti korozi v kombinaci s dobrou odolností vůči teplotním šokům a odolnosti proti opotřebení.

Díky svým vlastnostem se tento materiál používá převážně jako pálicí pomůcky ve formě nosníků, válečků, podpěr a dalších konstrukčních aplikací, kde je nutné použít materiál pro vysoký stupeň namáhání. Dále se také používá jako pláště hořáků pro přímé i nepřímé spalování ve formě plamencových trubic, rekuperátorů a sálavých trubic. V neposlední řadě je možné jeho využití ve strojírenství jako mechanické těsnění díky korozivzdorným vlastnostem. [2,9,10]



Obrázek 9 – Struktura jemnozrného SISIC [2]

#### 6.1.1.6 Rekrystalizovaný karbid křemíku (RSIC)

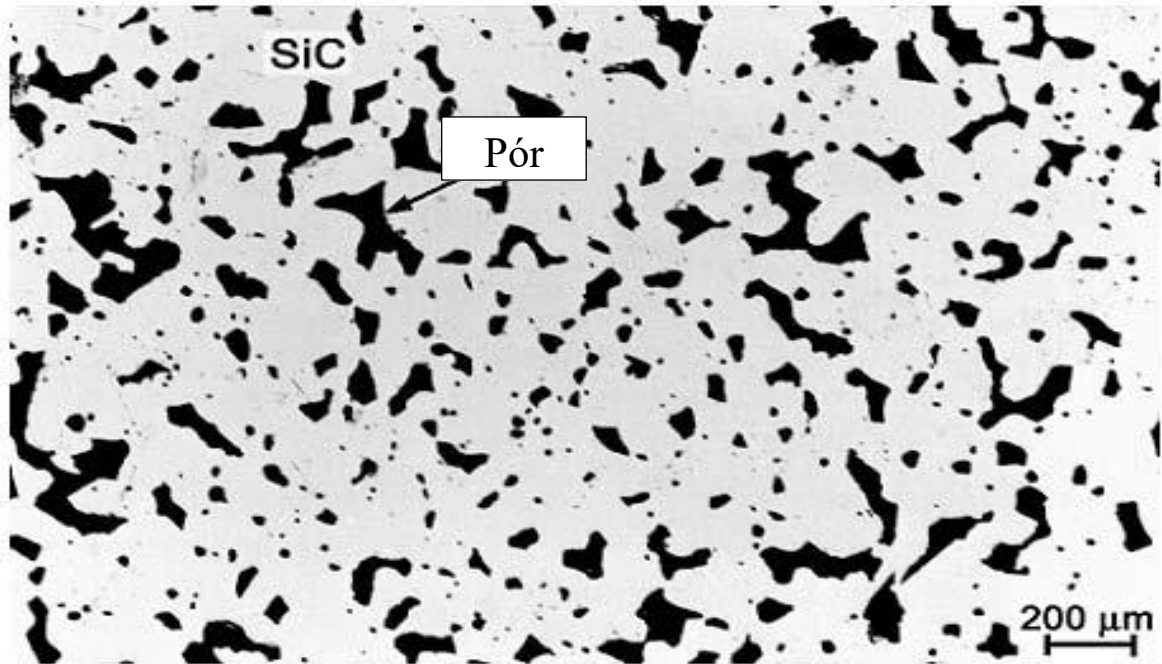
Rekrystalizovaný karbid křemíku (RSIC) je čistý karbid křemíku, který ve své finální fázi výrobku obsahuje 11 až 15 % otevřené pórovitosti. Výpal tohoto druhu keramiky probíhá za mimořádně vysokých teplot cca 2300 až 2500 °C. Směsi jemných a hrubých prášků se v průběhu slinování přeměňují na kompaktní SiC matrici bez smrštění. Tato vlastnost má za následek, stejně jako SISIC, možnost výroby velkoformátových komponentů, kde je ale nutné dodržet rozměry výsledného produktu kvůli problematickému řezání a broušení hotového výrobku.

Kvůli své otevřené pórovitosti má RSIC mnohem menší mechanickou pevnost než materiály patřící do skupiny hutných keramik z karbidu křemíku. Díky své porézности se však RSIC vyznačuje mnohem lepší odolností vůči teplotním šokům.

Rekrystalizovaný karbid křemíku se používá například pro výrobu konstrukčních pomůcek pro vypalování ve formě nosníků, válečků, nebo desek pro výpal nad 1450 °C, nebo v podmínkách výpalu s extrémními změnami teplot. Díky své otevřené pórovitosti je však tato keramika v pecních podmínkách náchylná k oxidaci, tudíž po několika desítkách



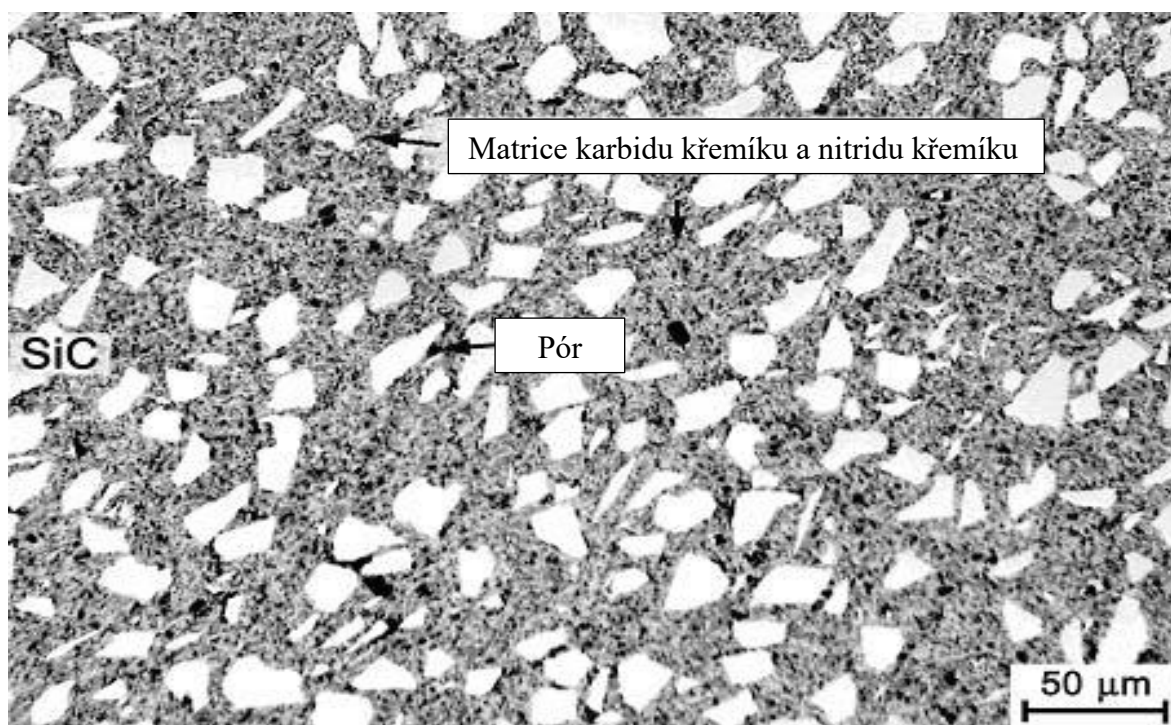
až stech cyklech výpalu podléhá korozi. Díky tomu je nutné průběžně kontrolovat stav komponent mezi jednotlivými výpaly, aby nedošlo k selhání některé součásti pecní konstrukce. Selhání pecní konstrukce má ve většině případů za následek nejen poškození vypalovaného materiálu a tím jeho znehodnocení, ale také poškození pecní vyzdívky a otopného systému. Maximální aplikační teplota se pohybuje mezi 1600 až 1650 °C. [2,5,6,10]



Obrázek 10 - Struktura RSIC [2]

#### 6.1.1.7 Nitridicky vázaný karbid křemíku (NSIC)

Nitridicky vázaný karbid křemíku obsahuje 10 až 15 % uzavřené pórovitosti a 1 až 5 % otevřené pórovitosti. Samotná výroba je realizována nitridací vytvarovaného tělesa z krystalů karbidu křemíku a prášku kovového křemíku v dusíkové atmosféře za teploty 1400 °C. Samotný proces je tvořen přeměnou kovového křemíku na nitrid křemíku za vzniku vazeb mezi zrnky karbidu křemíku. Materiál je následně vystaven oxidační atmosféře při teplotě 1200 °C, následkem je vytvoření tenké antioxidační vrstvy ve formě skleněného povrchu. Díky této ochranné vrstvě jsou výrobky z NSIC odolné vůči smáčení taveninami neželezných kovů. Další výhodou ochranné vrstvy je odolnost vůči oxidaci, lepší povrchové odolnosti a rezistenci vůči deformacím. Dále má díky menší velikosti pórů, než tomu bylo u RSIC, přibližně o 100% vyšší pevnost v ohybu. Materiály z NSIC se opět využívají převážně jako pálicí pomůcky pro teploty do 1450 °C. [2,7,10]



Obrázek 11 - Struktura NSIC [2]

### 6.1.2 Karbid bóru ( $B_4C$ )

Karbid bóru, stejně jako keramika z karbidu křemíku, je slinován ze submikronových prášků. V případě karbidu bóru se jedná o prášek  $B_4C$ . Proces slinování probíhá za přítomnosti inertních plynů při teplotách mezi 1900 až 2200 °C. Dále se pak proces výroby dělí na tři procesy lisování, a to bez tlaku (SBC), lisovaný za tepla (HPBC) nebo izostaticky lisovaný za tepla (HIPBC). Všechny procesy výroby patří mezi finančně nejnáročnější v oblasti neoxidových keramik.

Keramika z karbidu bóru se vyznačuje svou mimořádnou tvrdostí. Tvrdší materiály už jsou pouze kubický nitrid bóru a diamant. Díky vlastnostem jako je nízká hustota (2,51 g/cm<sup>3</sup>), vysoká mechanická pevnost a dobré konstanty pružnosti je tato keramika ideální materiál pro použití ve vojenském průmyslu, jako balistická ochrana do neprůstřelných vest nebo jako lehké pancéřování bojových letounů. V dnešní době je možné se s touto keramikou setkat i v jaderné energetice, kde se používá pro absorpci neutronů. Díky vysoké tvrdosti se prášek z karbidu bóru využívá také jako abrazivum pro procesy leštění a lapování především v procesech úpravy diamantových nástrojů.

V oblasti vysokoteplotních aplikací se keramika z karbidu bóru používá pouze do teplot nepřesahujících 1000 °C. Navíc při vystavení této keramiky vzdušné atmosféře za vysokých teplot začíná velmi rychle oxidovat a tím ztrácet své vlastnosti. Karbid bóru se používá třeba jako materiál kontaktních hořáků ponořený do roztavených kovů, například v zinkových lázních. [2,11,12]

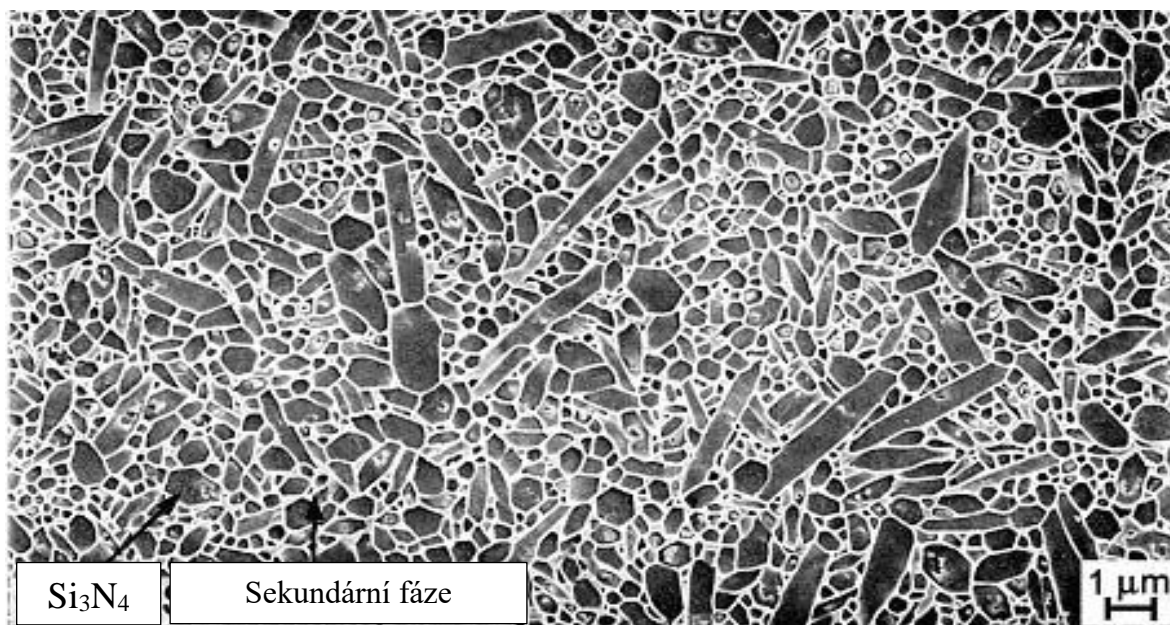
## 6.2 Nitridy

Nitridy jsou v dnešní době využívány především pro své mechanické vlastnosti jako jsou například vysoká pevnost, dlouhá životnost výrobků, vysoká odolnost proti mechanickému opotřebení a v neposlední řadě také chemická stabilita jak při pokojových teplotách, tak při teplotách přesahujících 1450 °C. Dále je tato oblast neoxidové konstrukční keramiky díky výzkumu směřována pro aplikace v prostředí elektroniky. Nitridy jsou však i přes jejich vynikající vlastnosti často nahrazovány jinými materiály převážně z kovu, a to díky jejich složité a velice nákladné výrobě. [8,9,10]

### 6.2.1 Nitridy křemíku (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

Nitrid křemíku a jeho varianty jsou v dnešní době největšími zástupci keramiky nitridů, především pro své vynikající materiálové vlastnosti, kterých ostatní druhy keramik nedosahují. Mezi tyto vlastnosti řadíme vysokou houževnatost, vysokou pevnost i při vysokých teplotách často přesahujících 1450 °C, vynikající odolnost proti tepelným šokům a mechanickému opotřebení, nízkou tepelnou roztažnost, průměrnou tepelnou vodivost, odolnost vůči chemickým reakcím s ostatními prvky a dlouhou životnost. Díky těmto atributům je keramika z nitridu křemíku schopná odolávat těm nejextrémnějším podmínkám. Používá se tedy převážně pro strojní součásti s velmi vysokým dynamickým zatížením, kde je kladen důraz na spolehlivost komponent a jejich dlouhodobá výdrž beze změny jejich vlastností.

Stejně jako u karbidu křemíku, i zde probíhá výroba ze submikronového prášku z Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> společně se slinovacími přísadami. Tyto přísady mohou být například Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, atd. Samotné slinování probíhá za teplot 1750 až 1950 °C. Nezbytnou součástí při slinování nitridu křemíku je zajištění slinovacího procesu za zvýšeného tlaku. Za atmosférického tlaku totiž dochází k rozkladu Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> na Si a N<sub>2</sub>, a to již při 1700 °C. Zvýšený tlak tak zajišťuje prostředí, které působí proti rozkladu. [4,5,10]



Obrázek 12 - Mikrostruktura tlakově slinovaného nitridu křemíku (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) [2]

Jako první variantu nitridu křemíku lze uvést nízkotlaký slinutý nitrid křemíku (SSN), tento keramický materiál je nejpoužívanější z kategorie nitridů. Jeho vlastnosti by se daly z pohledu nitridů nazvat průměrnými. Co však dělá tento materiál tak hojně využívaný, je jeho cena. Jedná se totiž o materiál s nejlevnějším procesem výroby. Používá se především pro výrobu velkoobjemových komponent, dále nachází své využití i v oblasti hutnictví.

Tlakově slinovaný nitrid křemíku (GPSSN) patří mezi další zástupce nitridové keramiky. Tento vysoce výkonný materiál je využíván především pro svou schopnost odolávat vysokému mechanickému zatížení. Těchto vlastností je dosaženo slinováním ve slinovací peci s přetlakem  $N_2$ , který dosahuje hodnoty až 100 barů.

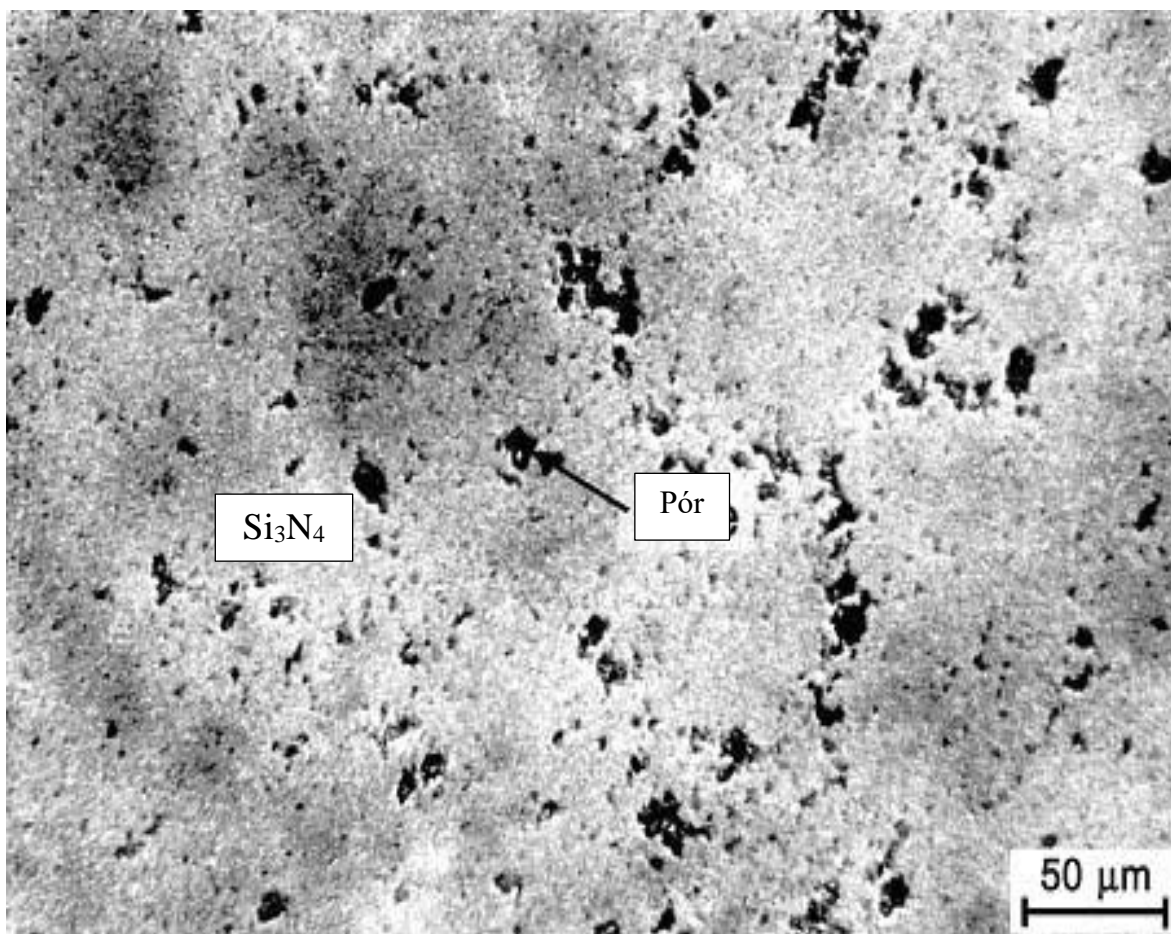
Ještě větší tlaky v procesu slinování za tepla můžeme pozorovat u lisovaného a za horka izostaticky lisovaného nitridu křemíku (HPSN nebo HIPSN). U těchto variant dosahuje tlak ve slinovací peci až 2000 barů. Materiály HPSN a HIPSN se tak vyznačují ještě vyšší pevností na rozdíl od GPSSN. Zvýšený mechanický tlak ve výrobním procesu zajišťuje téměř úplnou eliminaci otevřené pórovitosti. Mezi nevýhody patří možnost výroby pouze geometricky jednoduchých produktů a také nákladnost samotné výroby.

Výrobky z výše zmíněných hutných materiálů z nitridu křemíku nachází své uplatnění v oblasti technologie válečkových ložisek s kuličkami, válečků a kroužků pro strojírenství, strojními prvky vystavenými vysokému zatížení a obrábění kovů s řeznými materiály v podobě vyměnitelných břitových destiček a jiných nástrojů. Přítomnost těchto dílů v oblasti technologie tváření demonstruje výkonnost těchto materiálů.

Zcela odlišným způsobem se vyrábí vázaný nitrid křemíku (RBSN). U tohoto materiálu se nepoužívá výroba za pomoci drahého prášku  $Si_3N_4$ , na místo toho se používá levnější prášek, který obsahuje pouze křemík, který se následně formuje a nitriduje v atmosféře dusíku při teplotách 1400 °C za vzniku nitridu křemíku. Výhodou této metody výroby je také skutečnost, že se výsledný materiál nesmršťuje.

Produkty této keramiky mají dobré mechanické vlastnosti, jsou však náchylné na vysokoteplotní oxidaci díky přítomnosti jemné otevřené pórovitosti. Do práškového křemíku se v některých případech mohou přidávat takzvané slinovací přísady, díky kterým se nitrid křemíku může hutně spékat. Mezi tyto přísady řadíme primárně nitridovaný nitrid křemíku. Výsledný produkt se pak nazývá slinutý vázaný nitrid křemíku a označuje se jako SRBSN. S ohledem na výrobní proces se však doporučuje obě materiálové varianty používat pouze pro komponenty s maximální tloušťkou stěny 20 milimetrů.

RBSN se primárně používá jako pálicí pomůcky ve formě kelímků a tavících forem pro solární techniku. [2,4,5,10]



Obrázek 13 - Povrch reakčního nitridu křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) [2]

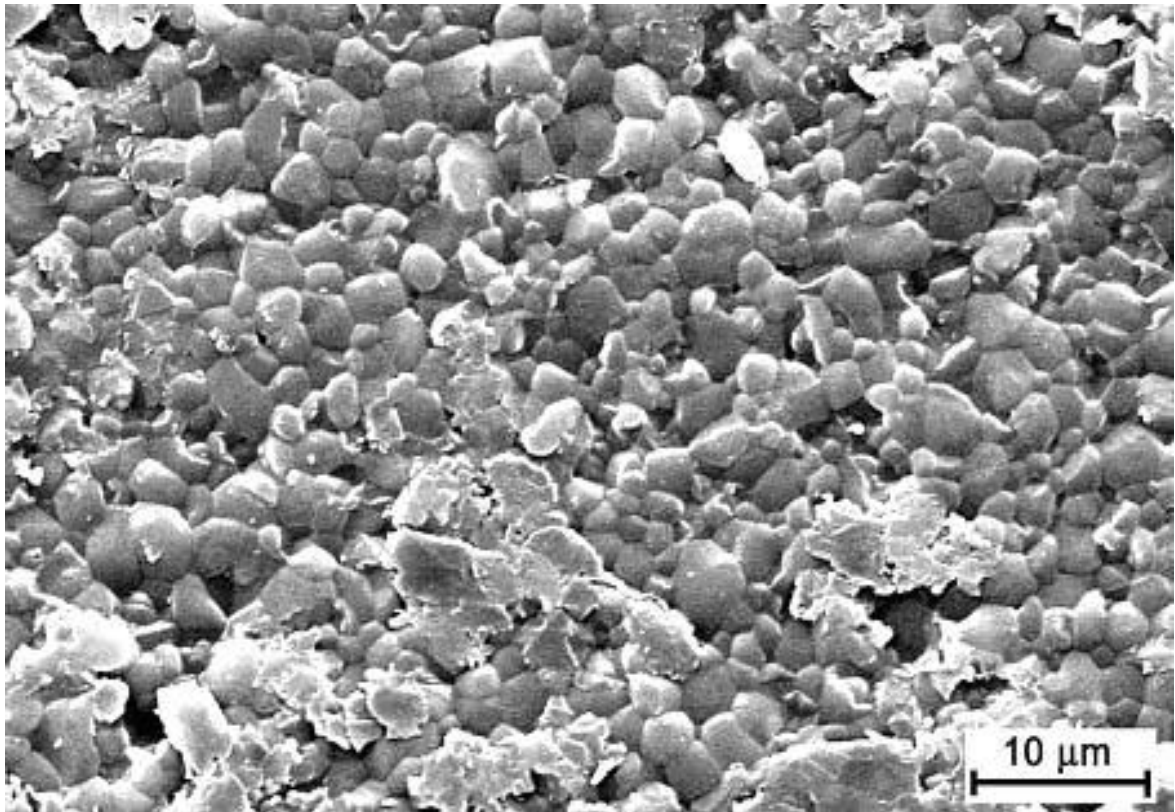
### 6.2.2 Sialony

Do skupiny nitridové keramiky řadíme skupinu s názvem sialony. Tato skupina je tvořena oxinitridy křemíku a hliníku (SIALON). Výroba tohoto druhu keramiky vychází ze surovinové směsi nitridu křemíku, který se následně obohacuje oxidovou keramikou, jmenovitě oxidem kovu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , z důvodu tvorby specifické směsné krystalové formy. Důvodem pro výrobu těchto materiálů je dosažení podobných vlastností jako u nitridu křemíku za použití výrazně nižší slinovací teploty. Mechanické vlastnosti se díky možnosti použití různých typů a množství přísad dají upravit v různém rozsahu. Sialony tak dosahují násobně vyšší lomovou houževnatost. To je také jeden z důvodů využití těchto materiálů, pro řezné nástroje. [2,3,8]

### 6.2.3 Nitrid hliníku (AlN)

Nitrid hliníku se vyznačuje vysokou tepelnou vodivostí v kombinaci s dobrými elektrickými izolačními vlastnostmi, tyto atributy ho předurčují pro elektrotechnické aplikace. Výhodou keramiky z nitridu hliníku je možnost materiál pokovovat všemi běžnými metodami a lze jí tím pádem připravit pro měkké či tvrdé pájení. Tepelná roztažnost zůstává u nitridu hliníku srovnatelná s roztažností u křemíku.

Aplikace, ve kterých je možné se setkat s nitridem hliníku, jsou například součástky pro telekomunikační techniku, výrobu substrátů pro polovodičové součástky a pro součástky výkonové elektroniky v podobě pouzder či chladičů. Obecně se dá říci, že keramika z nitridu hliníku je vhodná pro aplikace, kde je třeba velmi vysoká tepelná vodivost, vysoká izolační schopnost, tepelná roztažnost podobná křemíku a prostředí, kde je nutné inertní chování vůči ostatním sloučeninám. Na druhé straně se nedoporučuje používat keramiku z nitridu hliníku pro aplikace nad 1000 °C, v prostředí obsahujícím vodu či kyslík nebo při mechanickém namáhání se současným smáčením vodou. [2,8,9,10]



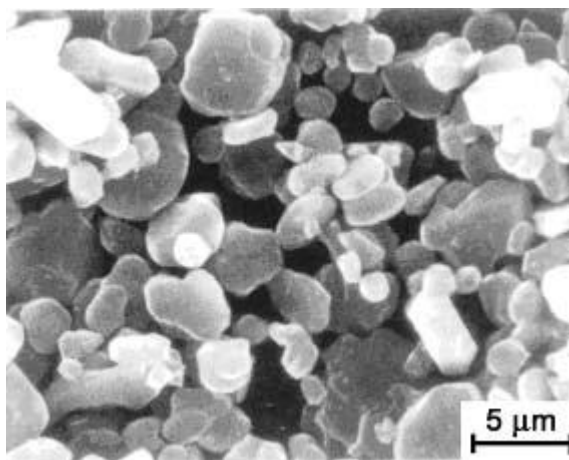
Obrázek 14 - Povrch nitridu hliníku (AlN) [2]

## 7 Výroba Technické keramiky

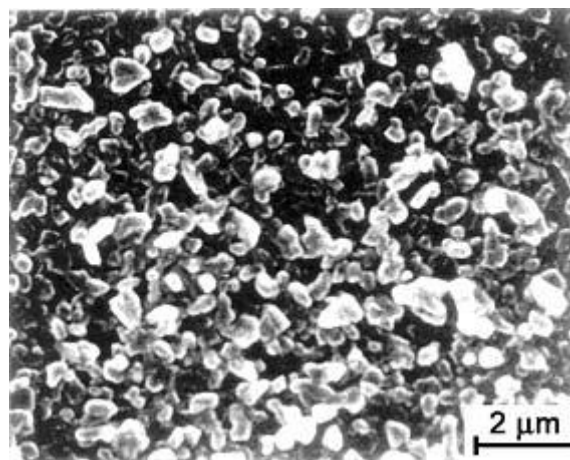
Vlastnosti technické keramiky jsou dány především zvolenými surovinami a vhodným výrobním procesem. Výrobní procesy pro technickou keramiku jsou velmi náročné především technologicky, ale také energeticky. Výsledné vlastnosti produktů a rozpětí mikrostruktur jsou dány volbou vhodného keramického prášku, procesu tvarování a v neposlední řadě velmi důležitým procesem slinování. Pro potřeby různých použití technické keramiky mohou po procesu slinování následovat další procesy úprav materiálu pro danou aplikaci. Mezi tyto úpravy lze řadit například tvrdé opracování slinuté keramiky. Pro konečného uživatele je nadmíru důležitá konzistentní kvalita a spolehlivost výrobků, ta je zaručena kvalifikovaným výrobním procesem, jehož předpisy a výsledky jsou monitorovány a protokolovány během celého procesu výroby. [2,3,11,12]

### 7.1 Suroviny a přísady

Klíčovým prvkem v procesu výroby technické keramiky je výběr vstupních surovin. Vstupní suroviny jsou hodnoceny v několika ohledech jako je druh, čistota, zrnitost, či specifické povrchy. Důležitým prvkem při výrobě jsou přísady neboli pomocné suroviny. Tyto suroviny v podobě slinovacích přísad, deflokulantů, a změkčovadel jsou zásadní a nedílnou součástí výroby technické keramiky. [2,3]



Obrázek 15 - Hrubý prášek oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) [2]



Obrázek 16 - Jemný prášek oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) [2]

### 7.2 Příprava keramické hmoty

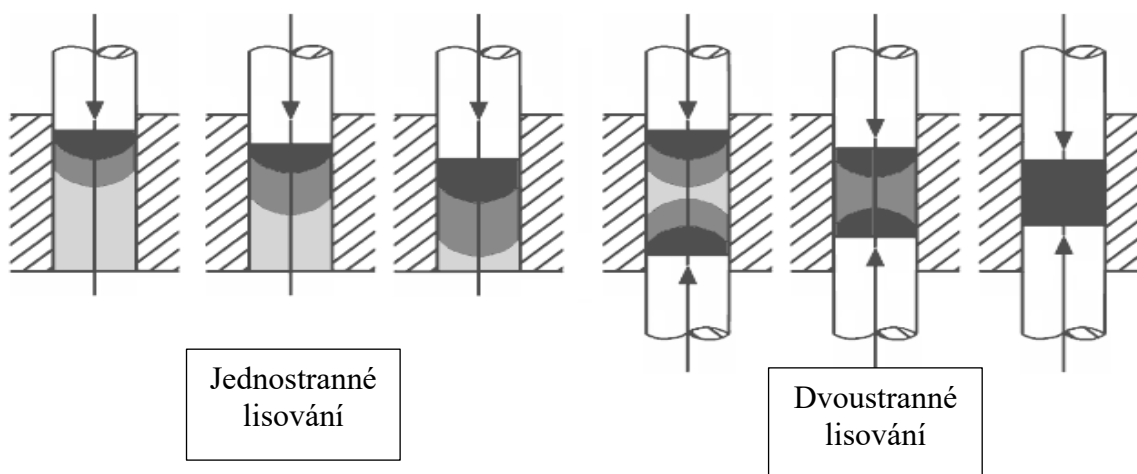
Pro přípravu keramické hmoty jsou využívány dva způsoby. Jako první a zároveň složitější se uvádí způsob, kde si výrobce keramiky získává suroviny potřebné pro vytvoření keramické hmoty a následně provádí všechny další kroky potřebné k vytvoření finálního produktu. Druhý proces je o něco jednodušší. Při tomto procesu výrobce již nakupuje hotové keramické hmoty, které následně dále zpracovává. Tento proces výroby začíná tvarováním zakoupené hmoty. Pro různé procesy tvarování je nutné zajistit specifický výchozí stav keramické hmoty. Pro tvarování odléváním je nutné, aby výchozí hmota byla ve formě suspenze, pro lisování ve formě granulí a pro extrudování ve formě tvárné plastické hmoty. [2,8,12]

## 7.3 Tvarování keramické hmoty

Při procesu tvarování dochází ke zhuštění částic prášku a převedení tvarovaného objektu do koherentní formy tak, aby bylo možné s ním následně manipulovat. Ještě před výpalem je možné tuto nevypálenou hmotu, dle potřeby konečného uživatele, zpracovat. Ať už se jedná o jakýkoliv druh tvarování, vždy je důležité dbát na to, aby se ve tvarovaném tělese nevyskytovali gradienty hustoty a různé textury. Ty mohou v průběhu vypalování zesílit a vést tak k deformaci nebo vnitřnímu pnutí. Volba vhodného procesu tvarování je závislá na konečné aplikaci produktu a na ekonomických aspektech tvarování. Procesy tvarování keramických hmot je možné rozdělit dle vlhkosti hmoty do tří základních typů a to lisování, plastické tvarování a lití. Lisování je možné uplatnit pro hmoty s celkovou vlhkostí od 0 do 15 %, pro plastické tvarování je nutná vlhkost materiálu od 15 do 25% a lití se provádí při vlhkosti vyšší než 25%. [2,8,12]

### 7.3.1 Suché lisování

Suché lisování se převážně používá k sériové výrobě předmětů, kde je kladen důraz na přesné rozměry výrobku. Materiálem vhodným pro proces lisování je hmota ve formě granulí, která se lisuje do ocelových matic, které jsou profilovány dle vyráběného dílu. Proces lisování je velmi finančně nákladný, především výroba ocelových matic z tvrdokovu. Ekonomickým se tento proces stává až v momentě, kdy je třeba vyrábět velké množství stejných dílů ze stejného materiálu. Suché lisování je vhodné pro výrobu jednoduchých až středně složitých výrobků. Se suchým lisování se lze setkat ve dvou variantách. První varianta je lisování pouze z jedné strany neboli jednoosé lisování. Tento typ lisování je levnější a používá se nejčastěji pro výrobky, jejichž následná aplikace nevyžaduje rezistenci proti extrémním podmínkám, jelikož v různých oblastech výrobku může být zhuštění materiálu rozdílné. Druhá varianta suchého lisování se nazývá oboustranná neboli dvouosá. Při tomto typu lisování dochází k lepšímu zhuštění materiálu, a je tedy vhodný pro výrobky, kde se očekávají dlouhodobé extrémní podmínky použití. [2,8,12]

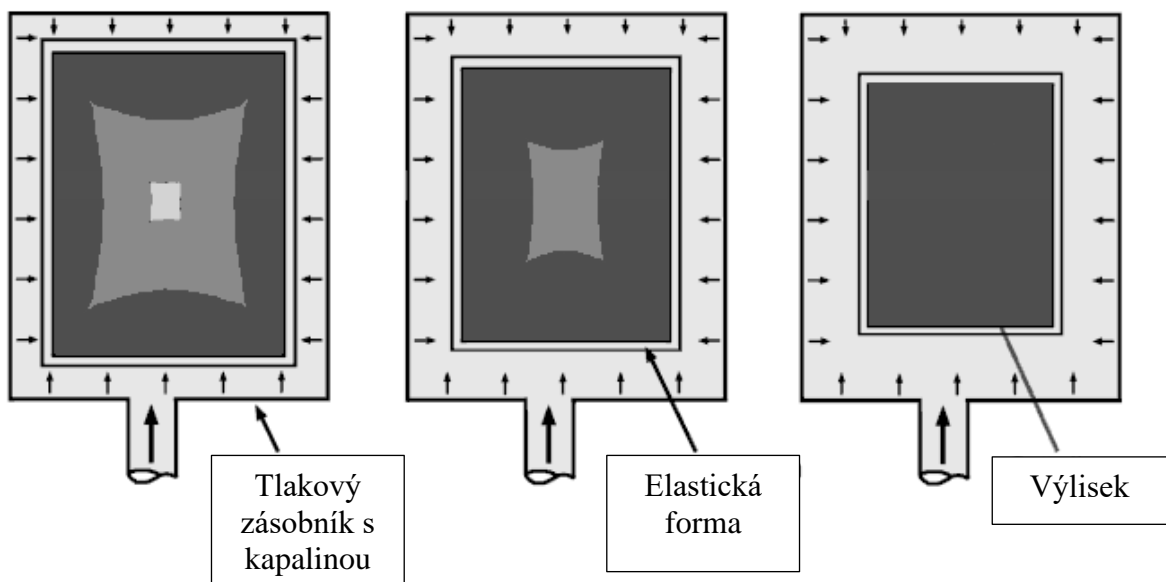


Obrázek 17 - Jednoosé suché lisování, jednostranné a oboustranné [2]



### 7.3.2 Izostatické lisování

Izostatické lisování se používá k výrobě rovnoměrně zhuštěných těles převážně velkých rozměrů. Po izostatickém lisování z pravidla následuje proces obrábění tělesa v surovém stavu. Izostatické lisování probíhá za pomoci pryžových forem, které zaručují homogenitu výsledného materiálu, jelikož zde působí stejný tlak všemi směry. Výsledný produkt je pak dokonale homogenní a na povrchu nemá takřka žádné póry. Přípravou keramických výrobků tímto způsobem je docíleno lepších vlastností než například u klasického lisování, nebo výroby z plastických hmot. Jedná se však o nákladnější metodu lisování. Pro specifické výrobky je možné tento typ lisování plně automatizovat, jedná se o výrobky typu zapalovací svíčky do aut, mlecí tělesa, svařovací trysky nebo velké izolátory pro energetiku. [2,11,12]



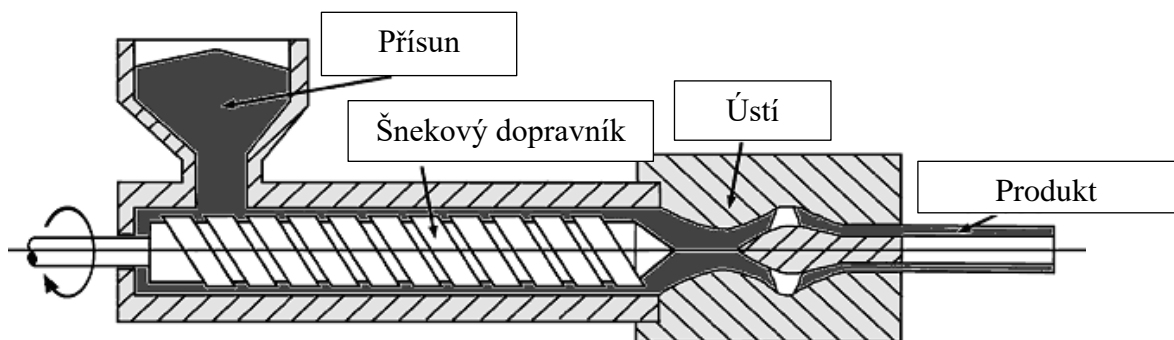
Obrázek 18 - Izostatické lisování s plochami různého zhuštění (stupně šedi) [2]

### 7.3.3 Lisování za mokra / lisování za vlhka

Lisování za mokra umožňuje výrobu produktů se složitými geometriemi součástí, jedná se především o závity, boční otvory, vybrání a různé zářezy. Obsah vlhkosti ve hmotě musí být od 10 do 15 %. Nevýhodou lisování hmot za mokra je absorpce tlaku, což v některých případech může negativně ovlivňovat proces zhuštění. Zpravidla je zhuštění výrobků procesem lisování za mokra menší než u dílů lisovaných ze suchých hmot. Další nevýhoda spočívá v potřebě sušení výrobků před procesem slinování a jeho smrštění. [2,8,12]

### 7.3.4 Extrudování (lisotažení)

Proces extrudování se provádí pomocí pístových nebo vakuových šnekových lisů. Homogenizovaná hmota je protlačována přes ústí lisu, čímž z lisu vystupuje „nekonečný“ výrobek. Tento druh lisování se využívá pro výrobu rotačně symetrických dílů jako jsou například trubice, kapiláry, potrubí, cihly atp. S příslušným tvarem lisovací formy je možné vyrábět i složitější profily. Délky vyráběných výrobků jsou závislé především na náchylnosti pracovní hmoty k deformaci. Výsledná délka výrobku vzniká zařiznutím za studena. [2,8,12]



Obrázek 19 - Proces extrudování (lisotažení) [2]

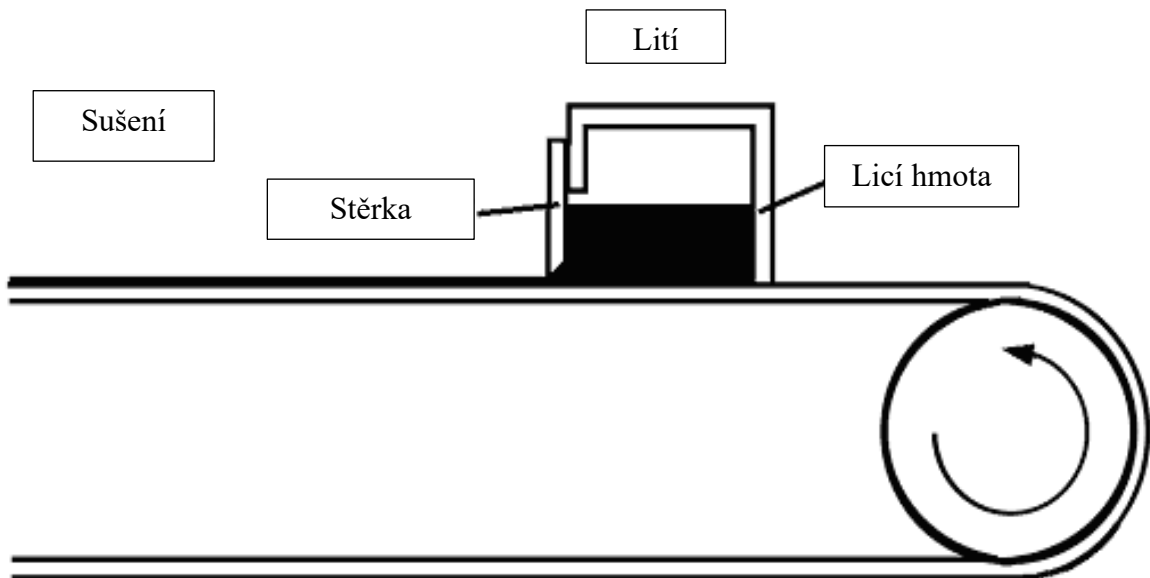
### 7.3.5 Gravitační lití do forem

Lití patří mezi vůbec nejjednodušší metody tvarování keramických hmot. Při procesu lití je možno realizovat jak duté výrobky, tak i homogenní tělesa. Při tvarování touto metodou je nutné nejprve z keramického materiálu vytvořit takzvanou břečku. Břečkou se nazývá keramický materiál o vlhkosti vyšší než 25 %. Výroba produktu probíhá za pomoci porézní savé sádrové formy, do které se lije stabilní suspenze neboli břečka. Po následném vyelití břečky zůstane na sádrové formě vrstva pevné hmoty. Nastavením časového intervalu lze korigovat množství pevného materiálu na stěně sádrové formy viz. příloha 4. [2,8,12]

### 7.3.6 Lití tenkou vrstvou

Tvarování pomocí páskového odlévání probíhá na ocelových páslech poháněných válečky. Na tyto pásy se postupně nalévá keramická hmota pomocí takzvané keramické skluzavky. Pro správný rozliv keramiky na ocelových páslech je nutné do keramické hmoty přidat organické přísady jakými jsou pojiva a ztekucovadla. Ztekucovadla umožňují přípravu vysoce tekuté hmoty s nižším obsahem vody. Pojiva se v tomto případě používají proto, aby skluz keramické hmoty probíhal nepřetržitě a nevznikali tak trhliny v materiálu. Množství přísad je závislé na výsledné tloušťce keramického materiálu. Celý mechanismus je dále vybaven fukary teplého vzduchu, které pokládáný keramický materiál vysušují a připravují tak k dalším procesům tvarování. Na konci tvarovacího procesu získáváme takzvaný zelený film, který je však stále pružný. Výsledný film lze navinout nebo uložit v plochém stavu k pozdějšímu zpracování, kterým se rozumí řezání, ražení, nebo embosování. Tloušťka nalévaného materiálu se pohybuje v rozmezí 0,25 až 1 milimetr.

Metoda páskového odlévání je hojně využívána při výrobě pouzder, kondenzátorů, nebo substrátů. [2,8,12]



Obrázek 20 - Proces lití tenkou vrstvou [2]

## 7.4 Slinování

Surové výrobky, jež jsou výsledným produktem tvarování keramické hmoty, obsahují kromě práškových keramických směsí také vlhkost, organická ztekucovadla, plastifikátory, pojiva a další pomocné látky. Všechny tyto organické přísady v průběhu sušení nebo na počátku výpalu musí být řízeně odstraněny. Odstraňování probíhá vysušením nebo řízeným vyhořením tak, aby nekontrolovaně odcházející zplodiny nepoškodili finální výrobek. Pokud by došlo ke zbytkovému výskytu těchto látek při výpalu, keramická hmota by se při výpalu mohla poškodit nebo ztratit své mechanické vlastnosti. [2,3,12]

### 7.4.1 Sušení

Sušení je proces řízení obsahu vlhkosti. Ve vlhké hmotě jsou částice obklopeny vodním obalem. Při sušení se vodní obal vypařuje, čímž se k sobě částice keramické hmoty začínají přibližovat a dochází tak k úbytku objemu – smrštění sušením. Čím vyšší je vlhkost keramického materiálu při tvarování, tím větší je pak smrštění sušením. Další faktory, které ovlivňují proces sušení, popřípadě smrštění, jsou zrnitost materiálu, druh, množství použitých surovin a v neposlední řadě také procesy tvarování. Procentuální smrštění u jednotlivých keramických materiálů viz. příloha 2.

Například u porcelánových výlisků jsou částice jílových minerálů deskovité, a proto se podél vlákna smršťují méně než kolmo k němu. Obecně lze říci, že proces sušení je pro každý keramický materiál individuální a nelze tak sušit výlisky z různých keramických hmot, různých velikostí a tvarů dohromady. [2,3,8]

## 7.4.2 Přežah

Vysušená tělesa z přírodních plastických hmot mají často nedostatečnou mechanickou pevnost. Z důvodu lepší plasticity a vytváření se do těchto materiálů přidávají organické přísady. Mezi tyto látky řadíme ztekucovadla a pojiva. Přežah slouží k odstranění těchto pomocných přísad, aby se zamezilo nežádoucím stavům při druhém, takzvaném hladkém výpalu. Při vypalování těchto přísad je nutné dbát na teplotu, tlak, atmosféru a čas, aby bylo spolehlivě dosaženo odstranění těchto látek bez poškození samotného tvarovaného tělesa.

Mezi varianty prvního výpalu spadá například karbonizace u karbidu křemíku (SiC). Při karbonizaci dochází k přeměně pomocných látek na uhlík, který následně zůstává v samotné struktuře a při následném druhém (reakčním) výpalu se pomocí přidaných reaktantů přemění na keramickou matici.

Po prvním výpalu je struktura surového tělesa držena pohromadě pomocí adhezivních sil, a tudíž vyžaduje pečlivé zacházení, aby nedošlo k poškození tvarovaného tělesa před druhým výpalem. [2,3,8]

## 7.4.3 Druhý výpal

Druhý výpal slouží k vytvoření materiálu s požadovanými vlastnostmi koncového uživatele. Těchto vlastností se dá dosáhnout pouze vypalováním při vysokých teplotách. Procesy slinování keramických materiálů jsou velmi složité a probíhají různými rychlostmi v závislosti na čistotě, velikosti zrna, hustotě pojiva a atmosféře, která je při tomto procesu přítomna. Dále lze rozdělit slinovací procesy s kapalnou fází a bez kapalně fáze. Výrobky z oxidové keramiky s vysokým stupněm čistoty se slinují reakcí v pevné fázi, tudíž vyžadují mnohem větší teploty slinování než například porcelán, který se slinuje s vysokým podílem taveninové fáze. Samotný výpal způsobuje zhutňování výrobku, což se projevuje snižováním pórovitosti, dále také zmenšením objemu neboli smrštěním. Stejně jako při sušení vyžadují keramické výrobky pro výpal určitý čas a vhodnou atmosféru. Nedodržení těchto parametrů může vést ke zvýšenému vnitřnímu pnutí ve výsledném výrobku či vadám na obrobku, což má za následek zhoršení výsledných vlastností nebo praskání. Tenčí střepy a hutně tvarované obrobky se zpracovávají lépe než velkoformátové objekty se silnějšími stěnami.

S růstem teploty v peci se exponenciálně zvyšují náklady na energii pro proces slinování. Při vyšších teplotách výpalu také stoupají náklady na pálící pomůcky, které slouží pro ukládání výrobků do pecního prostoru. [2,8]

### 7.4.3.1 Lisování za tepla (HP)

Lisování za tepla (HP) se používá především k výrobě součástí s přibližnou teoretickou hustotou, kde je proces slinování podpořený procesem lisování. [2,8,]

### 7.4.3.2 Izostatické lisování za tepla (HIP)

Izostatické lisování za tepla poskytuje přednostně malým komponentům nejvyšší hustotu díky použití izostatického tlaku plynu, který může dosahovat až 3000 barů. Teplota slinování se u tohoto procesu pohybuje kolem 2000 °C. [2,8]

#### 7.4.4 Rozměry a smrštění

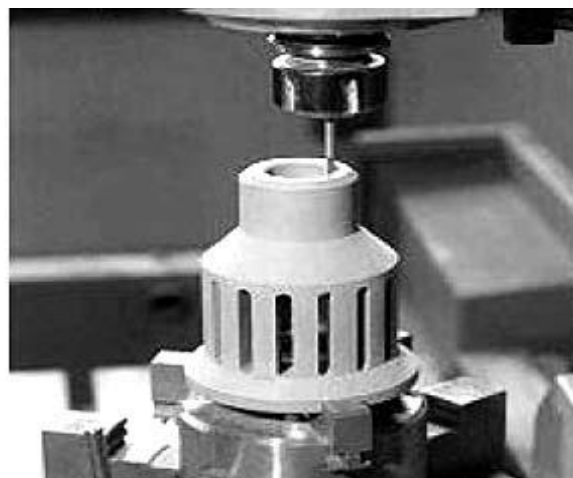
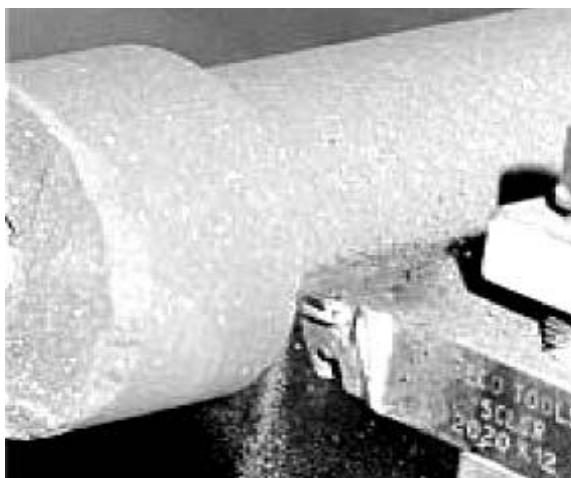
Principem řízeného tvarování surového keramického vylisku z keramické hmoty je zachování jeho přesných rozměrů a tvaru vypáleného keramického materiálu. Jakékoliv dodatečné úpravy rozměrů jsou velmi nákladné z důvodu extrémní tvrdosti vypáleného keramického materiálu. Společně s tím se také prodlužuje doba výroby. Všechny keramické materiály se tvarují na začátku samotného výrobního procesu na rozdíl od kovů, které se tvarují až v posledních fázích výroby. Pro zachování výsledných rozměrů keramického výrobku je tedy nutné nevypálené polotovary vyrobit rozměrově větší, aby výsledný produkt vyhovoval požadovaným rozměrům. Díky vysokým teplotám během výpalu se v materiálu začínají projevovat difúzní procesy, tvorba taveniny a fázové přeměny. Tyto procesy zajišťují zhutnění výsledného keramického materiálu, avšak opět u nich dochází ke smrštění výsledného výrobku. Míra smrštění výsledného keramického výrobku při jednotlivých procesech představuje velmi důležitou oblast při výrobě technické keramiky. Pro správné fungování výsledného produktu a zajištění jeho nejnižší možné výrobní ceny je stěžejní porozumět procesům smršťování u jednotlivých druhů keramik, jak v procesu sušení, tak v procesu slinování. [2,8,10]

### 7.5 Abrazivní tvářecí procesy

Abrazivní tvářecí procesy mohou probíhat jak před prvním výpalem neboli po vysušení (zelené zpracování), tak před druhým výpalem, nebo na konci samotného výrobního procesu (tvrdé zpracování). [2,3,4]

#### 7.5.1 Obrábění vysušených výrobků (zelené zpracování)

Zelené zpracování probíhá na sušených vyliscích, které ještě obsahují organické přísady. Tento proces je možné uplatnit pro výrobu jednotlivých dílů, dále také pro úpravu malých sérií výrobků, ale také u velkých sérií. Obecně se abrazivní tvářecí u zeleného zpracování využívá jako sekundární proces po tvarování neabrazivním. Jako příklad využití abrazivního tvarování lze uvést příčné otvory ke směru lisování. [2,3,4]



Obrázek 21 - Procesy obrábění u vysušených výrobků [2]

## 7.5.2 Tvrdé zpracování

Tvrdé zpracování probíhá na hotových vypálených součástkách, které již prošly všemi teplotními procesy, avšak pro velmi úzké rozměrové tolerance je nezbytná úprava za pomoci finálního neboli tvrdého opracování. Nejužších tolerancí je dosaženo pomocí abrazivních dokončovacích procesů. Díky velkým nárokům na rozměrovou přesnost, tvarovou variabilitu a kvalitu povrchu je nutné použít nejmodernější obráběcí stroje pro zpracování keramických materiálů. Vzhledem k vysoké tvrdosti těchto materiálů se na jejich opracování používají z velké části diamantové nástroje. Mezi typy výsledného tvrdého zpracování lze zařadit broušené povrchy, honované povrchy, lapované povrchy a leštěné povrchy.

Tvrdé zpracování se při výrobě keramických materiálů používá velmi zřídka, především pro svou náročnost na obráběcí techniku a finanční aspekty tohoto procesu. Dále je potřeba zmínit, že některé keramické materiály jsou po druhém výpalu sice velmi tvrdé, avšak také velmi křehké, tudíž zde tvrdé zpracování není možné provádět. [2,4]

### 7.5.2.1 Broušené povrchy

Charakteristickým rysem broušení je superpozice četných pohybů brusných zrn ve směru primárního účinku, který je rovnoběžný s povrchem obrobku. Stírací činnost brusných zrn způsobuje křehké trhliny, mikrotrhliny, plastifikaci a tvárné oddělování keramických částic. Povrchové charakteristiky, jako jsou rýhy, zaoblení, vrstvy, šupiny a relativně malý počet zlomů, jsou přítomny na površích, jejichž vznik je primárně výsledkem plastických deformačních procesů. Tento proces je znám jako "tvárné frézování". Naproti tomu "křehké frézování" se vyznačuje vysokým stupněm lámavosti, bobtnání, hrudek a odlupování. Při leštění povrchu obvykle probíhá jak tvárné, tak křehké frézování. O tom, který z těchto procesů oddělování materiálu převládá, rozhodují místní napěťové podmínky na jednotlivých keramických zrnech během procesu škrabání.

Změna z křehkého na tvárné obrábění závisí především na překročení kritické tloušťky třísky závislé na materiálu, jednotlivém zrně, ale také na mikrogeometrii řezného zrna. [2,3,4]

### 7.5.2.2 Honované povrchy

Honování je definováno kombinací četných silově vázaných stíracích pohybů řezných zrn materiálem a rovinného kontaktu nástroje s primárním účinným směrem rovnoběžným s povrchem předmětu. Ve srovnání s broušením má honování relativně menší tepelný dopad, protože řezné rychlosti jsou přibližně o řád nižší. V důsledku toho se na honovaných porcelánových površích obvykle nevyskytují žádné trhliny způsobené tavením nebo teplem. Procesy dělení křehkého a tvárného materiálu probíhají vedle sebe stejně jako při broušení. Vyšší řezné rychlosti při broušení zlepšují rychlost oddělování materiálu při křehkém frézování. Vyšší řezné rychlosti mohou způsobit vznik většího množství trhlín, což může mít za následek praskání a odlupování a negativně se projevit na kvalitě povrchu. [2,3,4]

### 7.5.2.3 Lapované povrchy

Norma DIN 8589 popisuje lapování jako řezání volným zrnem rozptýleným v pastovité nebo kapalné lapovací směsi, které je nasměrováno na protizávaží primárně přenášející tvar (lapovací nástroj), přičemž cílem je, aby řezné dráhy jednotlivých zrn byly co nejvíce náhodné. Lapovací techniky se používají ke zlepšení kvality povrchu a přesnosti tvaru díky nízké míře odstraňování látek. Typické jsou mikrogeometricky téměř izotropní topografie povrchu s nepravidelně rozmístěnými rýhami, četnými prohlubněmi a osamocenými mezikrystalickými povrchovými trhlinami. Tyto struktury jsou výhodné pro četná použití s náročnými tribologickými nebo optickými funkčními potřebami. Odvalováním řezného tělesa a drážkováním řezných zrn, která jsou na okamžik upevněna v lapovacím kotouči, se z povrchu odstraňuje materiál. Struktura ošetřované keramické hmoty určuje stupeň povrchu, kterého lze lapováním dosáhnout. Vyšší kvalitu povrchu lze dosáhnout u menších a těžších materiálů. [2,3,4]

### 7.5.2.4 Leštění

Leštění se používá pouze v kombinaci s jinými výrobními procesy a podle normy DIN 8589 není považováno za samostatný výrobní proces. Procesy jako leštění broušením, leštění lapováním, elektrolytické leštění a krycí leštění se navzájem odlišují (nanášení leštidla s mechanickým obráběním). Hlavním cílem leštění je dosažení vysoce kvalitního povrchu. Na rozdíl od lapování je lešticí zrna vpraveno do tkaniny nebo lešticího kotouče, aby se dosáhlo lineárního pohybu nástroje, který je nutný k vytvoření opticky reflexních povrchů. Protože se při leštění odstraňuje z povrchu málo hmoty, proces trvá dlouho. [2,8]

## 7.6 Dokončovací procedury

### 7.6.1 Metalizace

Metalizovaná keramika je produkt, který nabízejí někteří specializovaní výrobci keramiky. K dispozici jsou základní materiály jako oxid hlinitý a nitrid hliníku. Další princip metalizace spočívá v provrstvení na bázi wolframu, kdy se kovová vrstva nanáší pomocí síťotisku. Následně je tato metoda vhodná jak pro tvrdé, tak měkké pájení. Pro lepší tok pájky je přítomna bezproudová vrstva niklu o minimální šířce 2 mikrometry.

Mezi další procesy metalizace patří:

- Metoda pozlacování s tloušťkou vrstvy cca 1 mikrometr
- Metoda niklování
- Metoda niklování
- Metoda cínování

[2,9,10]

### 7.6.2 Glazování a engobování

Keramický výrobek má určitou drsnost povrchu, která způsobuje zejména znečištění v závislosti na velikosti zrn surovin a krystalické fázi vzniklé při výpalu. Povlak glazury zjemňuje povrch a zvýrazňuje barvu. Glazura výrazně zlepšuje řadu technicky významných vlastností keramického výrobku (např. elektrické vlastnosti, mechanickou pevnost, chemickou odolnost atd.). Ve srovnání s vypáleným keramickým jádrem obsahuje glazura více tavidla, proto má při vysokých teplotách tendenci vyplavovat částice ze střepu. V důsledku toho vzniká mezivrstva, která v konečném výrobku vytváří pevné spojení mezi glazurou a tělem pod ní. Přidáním barevných látek (oxidů kovů) je možné dosáhnout mnoha barev glazur. Pro dosažení optimální pevnosti musí být dobře sladěna míra tepelné roztažnosti jak glazury, tak střepu. Tahová napětí oslabují pevnost výsledného výrobku, a jsou proto nežádoucí, zatímco mírná tlaková napětí v glazuře ji zvyšují. Glazury se na střep nanáší stříkáním, máčením, nebo štětcem.

Podobným procesem povrstvování je takzvané engobování. Engoby jsou na rozdíl od glazur propustné. Obvykle se vyrábějí ze žáruvzdorných oxidů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  a  $\text{ZrO}$ ), jejich směsí nebo žáruvzdorných minerálů jako je mullit, spinel, křemičitan zirkoničitý, ale také kaolin nebo jíl. Vypálená engoba chrání keramické povrchy před chemickými a mechanickými vlivy. Engoby se využívají jako separační vrstvy pálicích pomůcek, které tak chrání před reakcemi nebo lepivými účinky výrobků, které jsou na nich v průběhu výpalu umístěny. [2,6,7]



## 9 Závěr

Studiem a analýzou problematiky zabývající se vysokoteplotní neoxidovou konstrukční keramikou jsem dospěl k závěru, že ačkoli je možné tuto problematiku zkoumat pouze v mezích neoxidové keramiky, pro její úplné pochopení je nezbytné poznání i dalších odvětví technické keramiky jako celku, a to z důvodu souvislostí mezi jednotlivými druhy keramických materiálů. Tyto souvislosti vycházejí z historického vývoje keramických materiálů, který započal od základních výrobních či aplikačních procesů, které díky zdokonalování vědy a techniky umožnili vznik nových vysoce výkonných keramických materiálů. Výrobky z konstrukčních keramických materiálů, především z vysokoteplotní neoxidové konstrukční keramiky, jsou dnes již nenahraditelnou součástí celosvětového průmyslu, který by bez těchto materiálů nebyl schopen dosahovat tak razantního pokroku.

Co se vlastností vysokoteplotní neoxidové konstrukční keramiky týče, obecně se dá říci, že vyniká v oblastech tvrdosti, odolnosti proti chemickým sloučeninám, mechanických vlastností za extrémně vysokých teplot a v oteřuvzdorných aplikacích. Všem těmto vlivům je tento druh keramických materiálů schopen odolávat po dobu, kterou není schopen překonat žádný jiný materiál. Jako nevýhody se jeví finanční náklady na získávání surovin potřebných k výrobě a následná výroba samotného produktu. Dále také křehkost materiálu.

Ačkoli se může zdát, že všechny materiály ze skupiny technických keramických materiálů jsou svými vlastnostmi prakticky totožné, opak je pravdou. Většina materiálů, která spadá do skupiny technických keramických materiálů, je vyráběna pro předem známé aplikační účely, od kterých se odvozují i jejich specifické vlastnosti, a také se podle nich upravují samotné výrobní procesy. Přesné procesy výroby a zpracování jednotlivých druhů technických konstrukčních neoxidových keramických materiálů jsou však patentově chráněny, tudíž je znám pouze obecný postup výroby. Z toho vyplývá, že v této práci mohou být popsány pouze obecné postupy výroby bez konkrétních údajů. Například není možné získat informace o přesných teplotách či poměrech ochranných atmosfér při slinovacích procesech a dalších výrobních postupech.

Věřím, že pokud bude výzkum a vývoj těchto materiálů pokračovat stejným tempem jako doposud, bude v budoucnu možné vytvořit ještě dokonalejší a odolnější materiály, které svými vlastnostmi předčí ty nejodolnější materiály současnosti.

## 10 Seznam použitých zdrojů

- [1] VALENTA, Ladislav. *Keramická příručka. 2.*, V Silikátovém svazu 1., dopl. a upr. vyd. [Praha]: Silikátový svaz, 2007. ISBN 978-80-86821-46-7.
- [2] *Brevier - Technische keramik. 4.* doplněné vydání. Berlín: Asociace keramického průmyslu, 2003. ISBN 3-924158-77-0.
- [3] PÁNEK, Zdeněk a kolektiv. *Konstrukční keramika*. Bratislava: R&D print, 1992. ISBN 80-85488-00-0.
- [4] HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDÖRFER. *Technologie keramiky*. Praha: Silikátový svaz, 2008. ISBN 978-80-86821-48-1.
- [5] WACHTMAN, JR., John B. *Structural ceramics: Treatise on materials science and technology, volume 29. 2.* vydání. Londýn: Academic press inc. (London), 1989. ISBN 0-12-341829-1.
- [6] *Ceramics science and technology*. Editor Ralf RIEDEL, editor I-Wei CHEN. Weinheim: Wiley-VCH, c2008. ISBN 978-3-527-31155-2.
- [7] RIEDEL, Ralf a I-Wei CHEN, ed. *Ceramics science and technology: Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. ISBN 978-3-527-31158-3.
- [8] *Ceramics science and technology*. Editor Ralf RIEDEL, editor I-Wei CHEN. Weinheim: Wiley-VCH, c2012. ISBN 978-3-527-31157-6.
- [9] *Ceramics science and technology*. Editor Ralf RIEDEL, editor I-Wei CHEN. Weinheim: Wiley-VCH, c2010. ISBN 978-3-527-31156-9.
- [10] SOMIYA, Shigeyuki, ed. *Handbook of Advanced ceramics. 2.* vydání. Waltham: Library of Congress, 2013. ISBN 978-0-12-385469-8.
- [11] OVČÁČÍKOVÁ, Hana a Jozef VLČEK. *Speciální keramické materiály*. Ostrava: TU - Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3365-1.
- [12] JONŠTA, Zdeněk. *Technické materiály II: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2574-8.

## 11 Přílohy

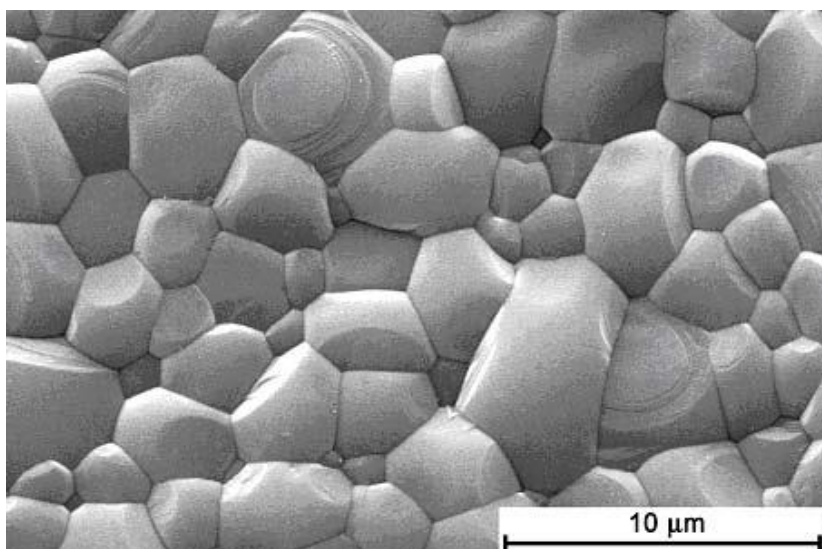
Příloha 1 - Mechanické vlastnosti vybraných typů keramických materiálů [12]

Materiál	E[GPa]	R <sub>m,tlak</sub> [MPa]	R <sub>m,ohyb</sub> [MPa]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400 - 410	3000	350 - 400
SiC	410 - 480	2000	200 - 400
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (tlakově sintrovaný)	200 - 310	1200	700 - 800
ZrO <sub>2</sub>	150 - 200	2000	100 - 200

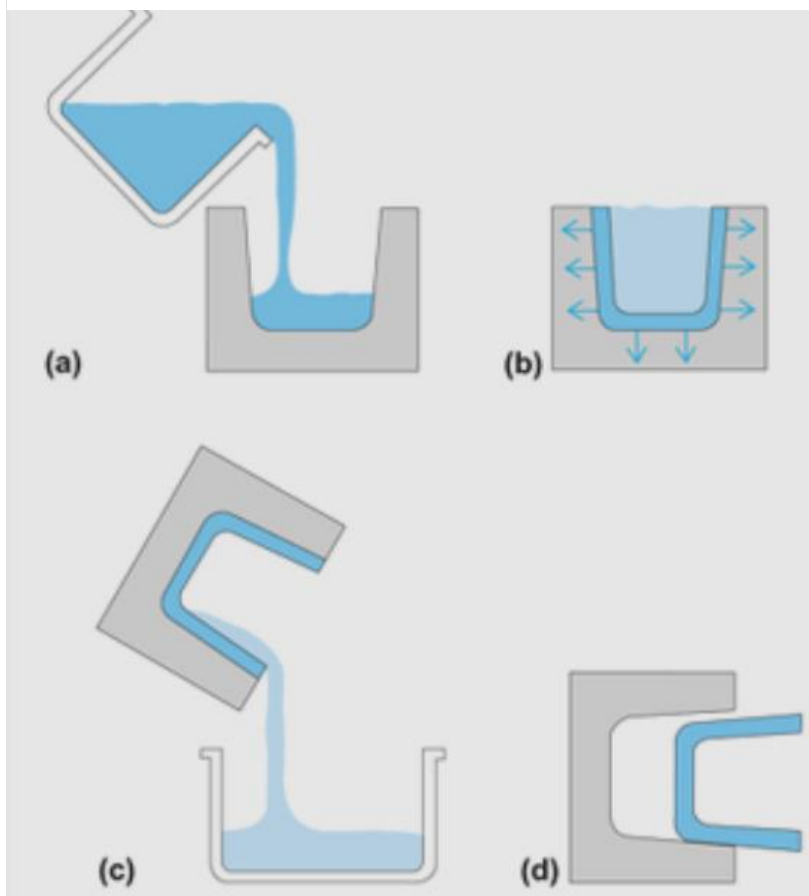
Příloha 2 - Procentuální smrštění jednotlivých keramických materiálů po vysušení [2]

Materiál	Procentuální smrštění
Karbid křemíku (SISIC, RSIC)	0%
Slinutý karbid křemíku (SSIC)	18-20%
Kordierit	3-8%
Porcelán se zvýšeným obsahem Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13-16%
Oxid hlinitý Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17-20%
Oxid zirkoničitý ZrO <sub>2</sub>	25-32%

Příloha 3 - Povrch lomu u nitridu hliníku (AlN) [2]



Příloha 4 - Příklad lití ze suspenzí [12]



Příloha 6 - Struktura hrubozrnného SISIC [2]

