



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra aplikované fyziky a techniky

Diplomová práce

Keramické materiály ve strojírenství

Vypracoval: Bc. Jan Kyselák
Vedoucí práce: Mgr. Pavel Černý, Ph.D.

České Budějovice 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě – v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 11. května 2020

Bc. Jan Kyselák

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá keramickými materiály, především technickou keramikou. Je zaměřena na rozdělení keramiky a keramických materiálů, dále se zabývá zpracováním a výrobou keramiky. Keramické materiály byly dále nastudovány v praxi, a to v několika českých firmách, kde byla provedena osobní exkurze a fotodokumentace. Nedílnou součástí je srovnání technických materiálů nejen z oblasti technické keramiky, ale také srovnání s materiály jako jsou kovy, polymery a kompozity. Dále byla pro výuku zpracována didaktická pomůcka ve formě ukázek jednotlivých keramických komponent, od keramických prášků, výrobků před výpalem, až po jednotlivé finální výrobky. Tyto keramické komponenty byly získány za pomoci dvou českých a jedné nadnárodní firmy.

Klíčová slova: technická keramika, výroba, praxe, exkurze, didaktická pomůcka, výrobek, výuka.

Abstract

This thesis deals with ceramic materials, especially technical ceramics. It is specialised in partition of ceramics and ceramic materials and also deals with the processing and production of ceramics. Ceramic materials were studied in practice in several Czech companies, where a personal excursion and photo documentation was performed. An integral part is the comparison of technical materials not only in the sphere of technical ceramics, but also a comparison with materials such as metals, polymers and composites. Furthermore, a didactic aid was prepared for teaching in the form of examples of individual ceramic components, from ceramic powders, products before firing, to individual final products. These ceramic components were obtained with the help of two Czech and one multinational company.

Keywords: technical ceramics, production, practice, excursion, teaching aid, product, teaching.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Mgr. Pavlovi Černému, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a trpělivost při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmám a jednotlivým osobám za vstřícnost a ochotu provést exkurzi ve výrobě a poskytnout vzorky keramických materiálů. Bez této pomoci by nemohla didaktická pomůcka vůbec vzniknout. PURECERAM, s.r.o. z Hradce Králové, panu Ing. Arnoštu Vackovi jednatelem firmy. STEATIT, s.r.o. z Klenčí pod Čerchovem u Domažlic, panu Liboru Pillmajerovi vedoucímu technologie. CeramTec Czech Republic, s.r.o. ze Šumperka, panu Ing. Tomáši Žaitlikovi Quality manager, IT manager.

Obsah

Úvod	7
Cíle práce	8
1 Základní poznatky z oblasti keramických hmot.....	9
1.1 Historie keramiky	9
1.2 Rozdělení keramiky	10
1.2.1 Podle použití	10
1.2.2 Podle chemického složení.....	11
1.2.3 Podle keramických surovin.....	12
1.3 Keramické materiály	15
1.3.1 Hořčnatá keramika	15
1.3.2 Steatitová keramika.....	15
1.3.3 Cordieritová keramika	16
1.3.4 Forsteritové a multi-korundové hmoty	16
1.3.5 Korundové hmoty	17
1.3.6 Cermety.....	18
1.3.7 Slinutá bezkyslíková keramika	19
1.4 Přípravy keramických materiálů	19
1.4.1 Mletí.....	20
1.4.2 Odvodnění suspenzí pro směsi technologicky vyspělé keramiky	21
1.4.3 Tvarování keramiky	22
1.4.4 Povrchové úpravy	28
1.5 Tepelné zpracování a výpal.....	29
1.5.1 Sušárny a pece	36
2 Výroba keramických materiálů v praxi	39
2.1 Pureceram spol. s r.o. Hradec Králové.....	39
2.1.1 Proces výroby	39
2.1.2 Výrobky a materiály	46
2.2 Steatit s.r.o. Klenčí pod Čerchovem.....	49
2.2.1 Proces výroby	49
2.2.2 Výrobky a materiály	53
2.3 CeramTec Czech Republic s.r.o. Šumperk	54
2.3.1 Proces výroby	54
2.3.2 Výrobky a materiály	56

3	Komparace keramiky a dalších technických materiálů.....	58
3.1	Diskuze.....	65
4	Didaktická pomůcka	66
	Závěr	68

Úvod

Vzdělávání je velmi složitý proces naučit člověka konkrétních vědomostí. Ke vzdělávání je využíváno různých postupů a metod pro zapamatování si dané problematiky. Při výuce se používají slovní metody jako jsou přednášky, výklady, vysvětlování a další metody verbálního projevu, ale nedílnou součástí výuky, především výuky zaměřené na technickou oblast lidské činnosti, jsou metody názorně demonstrační a metody praktické. Jedno arabské přísloví praví „Jeden pohled je víc než sto slov“. Toto přísloví není používáno přímo s výukou, ale náramně se pro tuto situaci hodí. Když si můžeme věc prohlédnout, zkrátí nám to čas k pochopení dané věci. Proto je nutné do výuky zařazovat metody jako je například názorná ukázka, kdy není žák odkázán pouze na sluch, ale využije pro pochopení učiva také zrak a hmat.

V současné době existuje několik druhů technických materiálů využívaných v praxi, které lze rozdělit na dvě hlavní skupiny, a to kovové a nekovové technické materiály. Do skupiny nekovových technických materiálů se řadí i technická keramika, která mě zaujala svým rozsahem vlastností a použitím (v praxi jsou některé kovové součástky nahrazovány keramickými pro její významně lepší technické vlastnosti) a motivovala mě k napsání této diplomové práce. Do skupiny technická keramika se řadí široká škála výrobků. Tyto výrobky jsou z mnoha oborů lidské činnosti, a to silnoproudá elektrotechnika (izolátory, bleskojistky atd.), elektronika (keramické hmoty pro kondenzátory, piezokeramické hmoty atd.), strojírenství (písty, řezná keramika atd.), metalurgie, osvětlovací technika, chemický a textilní průmysl, zdravotnictví a v neposlední řadě kosmická technika [1].

Cílem této diplomové práce je přinést přehled a komparaci keramiky s ostatními technickými materiály a zároveň vytvořit demonstrační didaktickou pomůcku s fyzickými vzorky keramického materiálu. Obsahem didaktické pomůcky je část keramických výrobků, polotovarů a vstupních materiálů k výrobě keramiky z firem, které byly navštíveny.

Cíle práce

- Nastudovat literaturu z oboru keramiky a zaměřit se především na technickou keramiku.
- Vypracovat rešerši a co nejvíce pojmout oblast technické keramiky od zpracování, až po jednotlivé keramické výrobky.
 - Přinést ucelený přehled keramiky dle použití, chemického složení a keramických surovin.
 - Zpracovat vlastnosti a přehled keramických materiálů.
 - Popsat výrobní proces a dokončovací operace technické keramiky.
- Seznámit se s výrobou technické keramiky v praxi se zaměřením na Českou republiku.
 - Navštívit osobně několik výroben technické keramiky v ČR.
 - Domluvit si exkurzi ve výrobním provozu těchto firem.
 - Získat vzorky jednotlivých druhů materiálů, které tyto firmy používají.
 - Získat vzorky výrobků pro zpracování výukového materiálu.
- Nastudovat a provést komparaci keramiky s dalšími druhy technických materiálů.
 - Provést komparaci s kovy, polymery a kompozity z hlediska mechanických vlastností.
- Sestavit demonstrační didaktickou pomůcku s jednotlivými vzorky keramických materiálů pro výuku technické keramiky.
 - Nastudovat vhodné možnosti ukládání získaných vzorků.
 - Zakoupit vhodný „kufřík“ k uložení vzorků k použití při výuce technické keramiky.

1 Základní poznatky z oblasti keramických hmot

1.1 Historie keramiky

Slovo keramika je řeckého původu a pochází ze slova KERAMOS. Ve starověkém Řecku to byl název pro hlínu a hrnčířskou hlínu. Keramika dnes neznamená jen hrnčířské výrobky, ale všechny vypálené hliněné výrobky. Keramická hlína je směs různých složek a různého určení. Výroba keramiky patří k nejstarším oborům lidské činnosti. Nejstarší nálezy keramických výrobků, které měly tvar košíku nebo měchu pochází ze 7. tisíciletí před n. l. Košíky nebo měchy byly vymazány zeminou a vysušeny. Ve 2. tisíciletí před n. l. jsou první nálezy keramických obkladaček. Východoasijský porcelán se datuje již v 6. stol. n. l. v Číně. Vyráběn byl z kaolínu a živice a po výpalu měl bílou barvu. Za vynálezce evropského porcelánu je považován Johann Friedrich Bottger, který v roce 1710 zavedl průmyslovou porcelánovou výrobu. Keramika je anorganický nekovový materiál vyrobený z práškové směsi vytvrzena teplem. Objev elektřiny a vynález žárovky v polovině devatenáctého století znamenaly první použití keramiky v oblasti techniky díky jejich vhodnosti jako izolačního materiálu [1].

V českých zemích k významným výrobním regionům keramiky a porcelánu se od počátku 18. století zařadily Čechy, nejprve výrobou kameniny v Týnci nad Sázavou, a dále množstvím porcelánek v severozápadních Čechách: Horní Slavkov (1789), Klášterec nad Ohří (1793), Březová (1803), Loket, Stará Role (1813), Dalovice, Praha - Smíchov, Dubí, Doubí, Trnovany, Duchcov, ad. Keramika s měkčím střepem byla nadále oblíbená, např. od firmy Ditmar a Urbach Znojmo, dále například Vranov nad Dyjí nebo Podmokly, odkud vyšel siderolit nebo teralit, na nějž se místo glazury užíval kopálový nebo jantarový lak [2].

Technická keramika již dlouho nahrazuje kovy a plasty v mnoha oblastech, protože jsou extrémně tvrdé a vysoce odolné proti opotřebení. Nejsou citlivé na extrémní teploty nebo agresivní média, izolují proti elektrickému napětí a jsou obecně účinnými tepelnými izolátory. V souhrnu lze říci, že technická keramika je zvláště užitečná v oblastech, kde jiné materiály dosáhnou svých limitů nebo tam, kde je cílem zlepšit účinnost systému. Rostoucí odbornost týkající se vlivu mikrostruktury na keramické vlastnosti pomohla dále rozvíjet různé typy keramiky. To umožnilo výrazně zvýšit mechanickou pevnost a spolehlivost moderních keramických materiálů ve srovnání s dřívější keramikou.

Dnešní simulační technologie navíc umožňuje konstruktérům navrhnout komponenty dostatečně účinné, aby se úplně vyhnuly špičkám napětí. Dnešní keramické

komponenty jsou často stále dražší než součásti vyrobené z kovu nebo syntetiky. Vzhledem k nákladové efektivnosti systému jako celku, ve kterém se používá keramika, mají však keramická řešení často největší výhody, protože vyžadují méně údržby a méně oprav, čímž se zvyšuje produktivita. Jednotlivé druhy technické keramiky tak tvoří rodinu materiálů s obrovským potenciálem pro inovace, která zdaleka není vyčerpána. Keramika je nekovový, anorganický, teplotně odolný materiál, který je nejméně 30% krystalický a je obtížné nebo nemožné jej rozpustit ve vodě [3].

1.2 Rozdělení keramiky

Keramiku můžeme rozdělit dle několika kritérií, jak podle použití, tak podle chemického složení a surovin. Keramika je velmi široký pojem, a tudíž si musíme dělení keramiky rozdělit do několika skupin, abychom co nejlépe pojali největší skupiny tohoto materiálu. Keramické materiály jsou soudržné ve vodě nerozpustné polykrystalické látky z anorganických nekovových surovin.

1.2.1 Podle použití

Rozdělení keramiky podle použití dělí keramiku do jednotlivých oblastí lidské činnosti na keramiku užitkovou, zdravotnickou a technickou. Materiály s mikrostrukturálními součástmi o průměru menším než 0,1 mm se považují za jemnou keramiku (všechny ostatní typy se považují za těžkou keramiku). Patří sem porcelán a obklady, umělecká keramika, brusiva a technická keramika [4].

Keramika užitková, kde hlavním požadavkem je pevnost, zdravotní nezávadnost, chemická odolnost a estetický vzhled můžeme rozdělit dle hmot a výrobků na užitkový porcelán, nebo figurální a ozdobný porcelán. Patří sem obklady, umělecká keramika, brusiva a technická keramika. Dále to může být ozdobná lidová keramika a varná keramika. Nemalý podíl této kategorie zahrnují kamnářské a zahradní výrobky.

Keramika zdravotnická, která se používá v hygienických zařízeních a ve stavebnictví, nepropouští kapaliny ani plyny a nejčastějšími výrobky jsou umyvadla, klozety a bidety.

Keramika technická, kde jsou rozhodující mechanické, elektrické, tepelné a fyzikální vlastnosti. Materiály známé jako funkční keramika se používají kvůli svým zvláštním funkčním vlastnostem, například díky svým vynikajícím izolačním vlastnostem. Používá se v elektrotechnice, elektronice, strojírenství, hutnictví, v textilním průmyslu a dále také v lékařské ortopedii, kde musí být tyto materiály velmi tvrdé a rozměrově stabilní.

V závislosti na použití by se měly tyto vlastnosti prokázat i při vysokých teplotách a měly by být také fyziologicky kompatibilní v lékařských aplikacích, příkladem jsou náhrady kyčelních kloubů. Musí být také vhodné jako náhradní materiál pro kosti nebo pro zubní implantáty. Pokročilá keramika demonstruje vlastnosti strukturální a funkční keramiky popsané výše a musí splňovat mimořádně vysoké požadavky, např. musí prokazovat výjimečnou odolnost proti opotřebení a teple (řezací keramika) nebo vysokou odolnost proti svodovému proudu (např. spínací zařízení, izolátory atd.) [4].

1.2.2 Podle chemického složení

V současné době existují čtyři hlavní skupiny keramických materiálů a to silikátová, oxidová a neoxidová keramika a piezokeramika. Pro zajištění přesně stanovených vlastností keramiky se používají chemicky čisté suroviny s nejlepší možnou zrnitou strukturou. Výběr správného materiálu pro aplikaci vyžaduje zkušenosti a intuici. Keramika je velmi tvrdá a odolná vůči vysokým teplotám, ale komponenty vyrobené z těchto materiálů se rozbíjí, když jsou vystaveny podmínkám, které překračují prahové hodnoty, zatímco komponenty vyrobené z kovu mohou před rozbitím podstoupit plastickou deformaci. Tyto rozdíly jsou již přítomny na atomové úrovni. V keramice dochází mezi atomy k iontovým nebo kovalentním vazbám a jsou silnější než kovové vazby, ale umožňují pouze nízkou úroveň tažnosti. Podle chemického složení dělíme keramiku dle hlavních složek v keramice obsažených. Toto rozdělení nám nejlépe charakterizuje keramický materiál [1].

Keramika na základě křemičitanů hlinitých, a to bez taviv, kde patří hmoty mullitové a sillimanitové. A s alkalickými tavivými, kde patří porcelán, kamenina, pórovina, hrnčířské a kamnářské výrobky a další druhy keramiky odvozené od těchto hmot. Dalším zástupcem je hlinitokřemičitan kovů alkalických zemin, kde patří bezalkalický porcelán, celsián ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), anorthit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Keramika na bázi křemičitanů a hlinitokřemičitanů hořčíku jsou steatity, jejichž základem je metakřemičitan hořečnatý ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) a hmoty na základě kordieritu, to je hlinitokřemičitan hořečnatý ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$).

Keramiku na základě sloučenin titanu obsahuje oxid titaničitý (TiO_2) nebo to jsou titaničitany alkalických zemin (BaTiO_3 , CaTiO_3 , MgTiO_3). A na základě pevných roztoků titaničitanů a zirkoničitanů olovnatých jsou základem pro piezokeramické hmoty.

Keramika s feromagnetickými vlastnostmi obsahuje ferity. Ferity jsou sloučeniny, jejichž stálou složkou je oxid železitý v kombinaci s dalšími oxidy. Termistory mají podobné složení a používají se k výrobě prvků s teplotně silně závislým elektrickým odporem.

Keramika z čistých kovů tzv. oxidová keramika (Al_2O_3 , ZrO_2 , CaO , MgO , BeO , ThO_2 , UO_2 a další). Jedná se o oxidové keramické hmoty slinuté bez přídavku taviv, dosahují chemické čistoty 99,9 %. Korund je hlavním představitelem této skupiny. Výrobky se používají pro náročné technické účely v elektronice, jaderné technice, raketové technice, v technice vysokých teplot, ve zdravotnictví jako náhrada kyčelních kloubů v endoprotézách.

Přídavek cizích látek a podmínky vybrané během dalšího zpracování mají vliv na mikrostrukturu keramických materiálů. Jedním z příkladů je oxid zirkoničitý (ZrO_2), ve kterém dominantní roli hrají iontové vazby. V závislosti na teplotě se objevuje ve třech různých krystalových strukturách, které se liší svými objemy. Pod $1175\text{ }^\circ\text{C}$ má ZrO_2 monoklinickou strukturu, poté přechází na tetragonální strukturu a od $2300\text{ }^\circ\text{C}$ přechází na krychlovou strukturu.

Keramiky bezkyslíkové jsou keramické hmoty na základě karbidů, titankarbidů, nitridů, boridů apod. Dosahují mimořádných vlastností, které jsou vysoká pevnost v žáru, vysoké odolnosti proti teplotním nárazům, vysoké vodivosti apod.

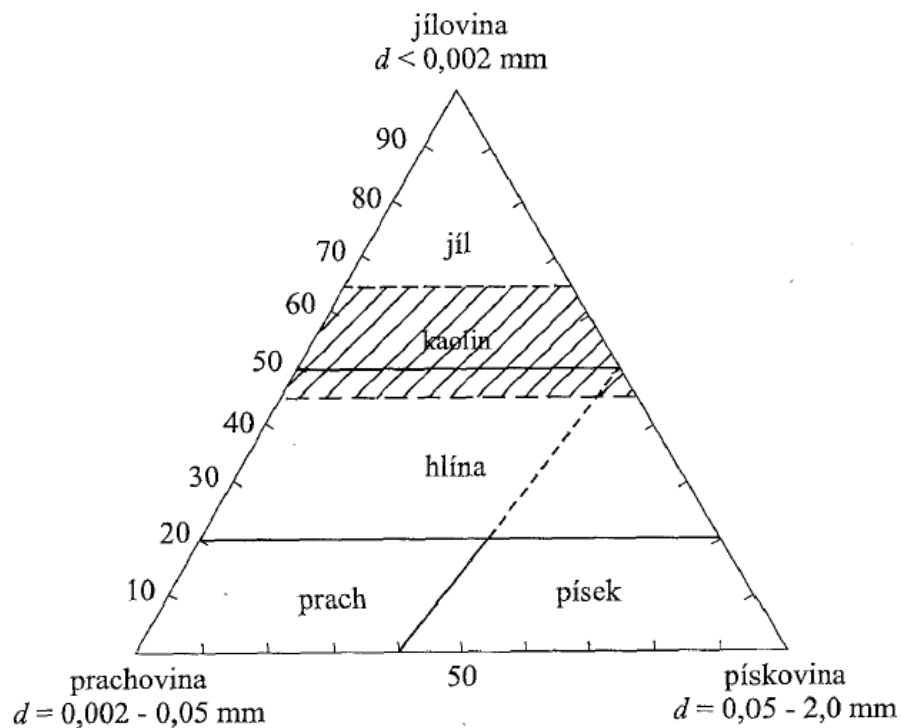
Chování neoxidového keramického nitridu křemíku (Si_3N_4), nejdůležitějšího zástupce sloučenin dusíku mezi keramickými materiály, je téměř výhradně určeno kovalentními vazbami. Výsledkem je nízká hustota, vysoká mechanická pevnost při teplotách nad $1000\text{ }^\circ\text{C}$ a tepelná i chemická stabilita. Křišťálová modifikace Si_3N_4 je indikována jehlovitými zrny, které se spojují dohromady, čímž se vytváří větší odolnost proti trhlinám. Mezi další vynikající vlastnosti neoxidové keramiky, patří mimořádná odolnost vůči extrémně vysokým teplotám, kyselinám a alkalickým roztokům, minimální expanze při vystavení teple, jejich nízká hustota a tepelná vodivost podobná jako u hliníku [1, 4, 5].

1.2.3 Podle keramických surovin

Keramické suroviny jsou minerály nebo horniny, které se používají k výrobě keramických výrobků. Podle původu se keramické suroviny rozdělují na přírodní, syntetické a druhové (odpadní). Tradiční keramická výroba využívá přírodní suroviny

především zeminy a horniny, které se nemusí upravovat, nebo upravovat velmi jednoduchým způsobem. Mezi takové jednoduché úpravy plastických keramických surovin patří např. odležování zemin (tzv. zimování nebo letnění). Zeminy jsou základem plastických surovin a horniny se využívají v keramických směsích jako taviva nebo ostřiva či plniva. Moderní keramické technologie vyžadují především konstantní vlastnosti dodávaných surovin [6].

Jílové plastické suroviny mají charakteristickou vlastnost, že při určitém přídavku vody (cca 20 % hmotnosti) poskytují snadno tvarovatelné těsto. Nejvýznamnějšími jílovými minerály z hlediska keramické technologie jsou kaolinit, illit a montmorillonit. Plastické keramické suroviny jsou součástí zemin, tzv. jemnozemi, rozdělení je vidět na obrázku 1.



Obrázek 1: Rozdělení jemnozemi dle ČSN 72 1330 kde d je střední velikost částic jemnozemi [6]

Plavené kaoliny nacházejí největší uplatnění jako plnivo při výrobě papíru, jako plnivo do plastických hmot, nátěrových hmot apod. V keramických aplikacích se nejvíce kaolinu zpracovává při výrobě žárovzdornin (tab.1) a jen menší část produkce v ostatních keramických výrobcích. Ložiska kaolinu v České republice jsou především na Karlovarsku, Plzeňsku, Podbořansku, Kadaňsku a Znojemsku [6, 7].

Tabulka 1: Jíly a zeminy používané v keramické technologii je možné třídit podle žárovzdornosti [6]

Hlíny	Žárovzdornost [°C]	Poznámka
Žárovzdorné	158 – 175	obsah $Al_2O_3 = 26 - 38$ hmot. % hranice, žárovzdornosti je $\bar{Z} = 150$ tj. $1500\text{ }^\circ C$.
Pórovité	125 – 128	např. ball clay.
Kameninové	112 – 128	
Hrnčířské	96 – 110	chudé na obsah CaO, bohaté na CaO až do 40 hmot. % CaO.
Cihlářské	90 – 100	hlíny – spraše, jednosložkové málo plastické zeminy s uhličitánem vápenatým na znech křemene, sprašové hlíny – plastičtější než spraše a mají nižší obsah uhličitánu vápenatého, jíly – jílovce, vápenaté jíly a velice plastické slíny.

Neplastické vrstevnaté suroviny, kam patří například pyrofylyt $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$, který se používá při výrobě žárovzdornin nebo jako těsnící materiál ve vysokotlaké technice. Dále telek a mastek, které se používají při přípravě hořečnaté keramiky.

Neplastické suroviny ovlivňují vlastnosti keramických směsí. Je možné je rozdělit na ostřiva a taviva. Od ostřiv se očekává, že ovlivní smrštění a mechanické vlastnosti během jejího celého technologického zpracování a dělí se na ostřiva křemičitá (zejména křemen), hlinitokřemičitá (šamot) a zvláštní (karbid křemíku, korund a další). Taviva při výpalu keramického materiálu tvoří taveninu, která spojuje krystalické fáze střepu, reaguje s nimi a často spolupůsobí při tvorbě nových krystalických fází. Po ochlazení tvoří základní nekrytalickou skelnou fázi keramického střepu, tzv. matrix.

Přírodními tavivy jsou živce (draselné, sodné, vápenaté a směsné), fonolity, nefelinické fonolity a nefelinický syenit. Skelná taviva jsou skla s vhodnou teplotou tání a frity, skla tavená pro použití v glazurách. Eutektická taviva jsou založena na tvorbě tzv. primární taveniny s nízkou viskozitou v důsledku vzájemné reakce dvou nebo více složek ve vypalovaném materiálu [6, 7].

Syntetická keramika používá suroviny produkované v masovém měřítku v chemickém průmyslu a označujeme je jako suroviny syntetické např. oxid hlinitý nebo oxid zirkoničitý. Zatímco druhová (odpadní) keramika používá suroviny odpadní z jiné výroby např. různé strusky, popílky, kały apod. [6].

1.3 Keramické materiály

1.3.1 Hořčnatá keramika

K hořčnaté keramice se řadí materiály s vysokým obsahem mastku ve výrobní směsi. Jsou to steatitová, forsteritová a cordieritová keramika. Tyto druhy keramiky se uplatňují především v technických aplikacích. Vzájemně se liší druhem základní krystalické fáze, která vzniká při výpalu těchto materiálů, a tím i řadou vlastností. Steatitová keramika, jako hlavní krystalickou fází, obsahuje enstatit $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$. Forsteritová keramika obsahuje forsterit $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ a cordieritová keramika cordierit $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ [1, 8].

1.3.2 Steatitová keramika

Steatitová keramika, je pro svoje mechanické a elektrické vlastnosti používána jako konstrukční izolační materiál. Náročnější varianta tohoto materiálu, která se vyznačuje nízkými dielektrickými ztrátami, se nazývá stealit. Surovinová směs steatitové keramiky obsahuje jak přírodní mastek (talek), tak kalcinovaný mastek. Správný poměr těchto surovin ovlivní jak chování směsi při tvarování, tak při výpalu. Typické vlastnosti jsou vypsány v tabulce 2.

Tabulka 2: Typické vlastnosti steatitové keramiky [6]

Vlastnost	Symbol	Jednotky	Steatit	Stealit
Otevřená pórovitost	P_a	obj. %	0	0
Objemová hmotnost	ρ_a	gcm^{-3}	2,6	2,7
Pevnost v ohybu	R_f	MPa	120	140
Modul pružnosti	E	GPa	80	110
Koeficient délkové teplotní roztažnosti	$\alpha_{30-100\text{ }^\circ\text{C}} \cdot 10^{-6}$	K^{-1}	7 - 9	6 - 8
Odolnost proti teplotním šokům	ΔT	K	80	100
Ztrátový činitel	$T_g \cdot 10^{-3}$	-	5	1,5
Vnitřní rezistivita	$P_{v20^\circ\text{C}}$	Ωm	10^{11}	10^{11}
Poměrná permitivita	ϵ_r	-	6	6
Elektrická pevnost	E_d	kVmm^{-1}	15	20
Tepelná vodivost	$\lambda_{30-100\text{ }^\circ\text{C}}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	2 - 3	2 - 3

1.3.3 Cordieritová keramika

Cordierit je minerál vzorce $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$, který vzniká reakcemi v pevném stavu ze směsi kalcinovaného mastku, metakaolinitu a oxidu hlinitého. Minerál cordierit má dvě modifikace. Nízkoteplotní forma μ -cordierit má vláknité krystaly a vzniká krystalizací skla cordieritového složení pod teplotou 925°C . Vysokoteplotní forma α -cordierit vzniká monotropní, nevratnou, přeměnou μ -cordieritu v teplotním intervalu 975 až 1150°C . Při tání cordieritu vzniká mullit a hořečnaté sklo a mění se výrazně vlastnosti cordieritové keramiky, zejména její teplotní roztažnost. Použití cordieritové keramiky je tedy limitováno teplotou 1435°C [1, 8].

Při přípravě cordieritové keramiky se prakticky vychází ze směsi 30 až 45 hmotn. % mastku, 35 až 45 hmotn. % žárovzdorného jílu a 17 až 25 hmotn. % oxidu hlinitého nebo oxidu hořečnatého. Pro rozšíření slinovacího intervalu, snížení vypalovací teploty a docílení nulové nasákavosti slinutého střepu se přidává do hmoty živec.

Cordieritová keramiky vyniká především svým nízkým koeficientem délkové teplotní roztažnosti, a tedy i vysokou odolností proti náhlým změnám teploty (tab. 3). Široké uplatnění nachází v elektrotechnických aplikacích. Jsou to např. zhášecí komory stykačů, nosiče topných drátů, tělesa infrazářičů apod. Cordieritová keramika se také plně osvědčila jako materiál nosičů katalyzátorů výfukových plynů spalovacích motorů [6, 9].

Tabulka 3: Vlastnosti cordieritové keramiky [6]

Vlastnost	Symbol	Jednotky	Cordierit
Otevřená pórovitost	P_a	obj. %	20
Objemová hmotnost	ρ_a	gcm^{-3}	1,9
Pevnost v ohybu	R_f	MPa	30
Koeficient délkové teplotní roztažnosti	$\alpha_{30-100^\circ\text{C}} \cdot 10^{-6}$	K^{-1}	1,5 – 3,5
Koeficient délkové teplotní roztažnosti	$\alpha_{30-600^\circ\text{C}} \cdot 10^{-6}$	K^{-1}	2 – 4
Odolnost proti teplotním šokům	ΔT	K	300
Vnitřní rezistivita	$P_{v200^\circ\text{C}}$	Ωm	10^7
Tepelná vodivost	$\lambda_{30-100^\circ\text{C}}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	1,3 – 1,8

1.3.4 Forsteritové a multi-korundové hmoty

Hlavní surovinu forsteritové hmoty tvoří mastek. Protože poměr $\text{MgO} : \text{SiO}_2$ musí být v poměru 2 : 1, doplňuje se MgO magnezitem MgCO_3 . Dalšími složkami je jíl a kaolin, pro zlepšení plasticity hmoty. Pro vytvoření skelné fáze se přidává uhličitán barnatý BaCO_3 a oxid zinečnatý ZnO . V praxi se díly z forsteritu používají hlavně ve vakuové

technice pro jejich vysokou vakuotěsnost, dále pak proto, že koeficient teplotní roztažnosti je shodný s roztažností kovů [1, 6].

Multi-korundové hmoty se vyznačují vysokou odolností proti otěru. Se zvyšováním obsahu Al_2O_3 ve hmotách porcelánového typu, který může při výpalu zreagovat na $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ a volný korund. Přídavek MgO je nejvhodnějším mineralizátorem pro krystalizaci mullitu. V praxi se používají tyto hmoty na výrobu konstrukčních dílů a na mlecí tělesa (koule nebo válečky) pro mletí hmot [1, 6].

1.3.5 Korundové hmoty

Hlavní složkou korundových hmot je α Al_2O_3 . Modifikace α je dosahována kalcinací hydroxidu hlinitého při teplotách 1200–1550 °C podle požadovaných vlastností měrného povrchu. Mikrokrnná korundová hmota s obsahem Al_2O_3 nad 99,85 % obsahuje velmi čistý reaktivní Al_2O_3 typ III., který je připravený tepelným rozkladem síranu hlinitoamonného $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ při 1100 °C. Získaný Al_2O_3 krystalizuje v γ modifikaci a je velice jemnozrný. Pro získání korundové hmoty s velmi jemnozrnou krystalickou strukturou (velikost zrn pod 1 μm) je potřeba do oxidu hlinitého zapracovat před kalcinací přísadu 0,15 % MgO , která blokuje nárůst krystalů při výpalu. MgO se do oxidu hlinitého zapracuje ve formě dusičnanu hořečnatého $\text{Mg}(\text{MO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

V praxi se mikrokrnný korund používá na výrobky, které musí mít vysokou mechanickou pevnost a jsou vystaveny velkému otěru a teplotě. Substráty pro mikrovlákné integrované obvody, kde je požadována vysoká jemnost a hladkost povrchu. Řezné plátky pro obrábění kovů a ve zdravotnictví k ortopedickým náhradám kostí a kloubů.

Průsvitný korund s obsahem Al_2O_3 nad 99,85 % se používá na výrobu izostaticky lisovaných trubic pro hořáky vysokotlakých sodíkových výbojek. Základní surovinou pro výrobu této hmoty je oxid hlinitý typ III., připravený tepelným rozkladem síranu hlinitoamonného a přísadou 0,15 % MgO . Další možná přísada oxidu vápenatého a yttritého snižuje vypalovací teplotu a vytváří skelnou fázi na rozhraní zrn [1, 3, 6].

1.3.6 Cermety

Významnou skupinu v oblasti kompozitních materiálů tvoří kovokeramické materiály – cermety, složené z kovových a keramických komponentů. Kovokeramické materiály představují novou kvalitu hmot z hlediska vlastností a rozšiřují významně konstrukční použití v těch aplikacích, kde již keramika nevyhovuje. Je to oblast kosmické techniky, raketové a letecké techniky, obrábění kovů a osvětlovací techniky.

Z hlediska vlastností chemického charakteru kovové složky se cermety dělí na skupiny, z nichž jsou hmoty připravené. Z vysokotavitelných kovů (wolfram W, molybden Mo, tantal Ta, niob Nb a hafnium Hf) a z dalších kovů (křemík Si, titan Ti, chrom Cr, kobalt Co, ytrium Y, železo Fe, zirkon Zr, nikl Ni nebo jejich sloučenin), z oxidů kovů (oxid hlinitý Al_2O_3 , oxid hořečnatý MgO , oxid chromitý Cr_2O_3 , oxid titaničitý TiO_2 , oxid ytřitý Y_2O_3 a oxid zirkoničitý ZrO_2) a různých kombinací skupiny kovů a skupiny oxidů kovů. Běžné cermety a speciální cermety $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{W}$, díky svým příznivým vlastnostem, nalézají použití v různých oblastech průmyslu, především tam, kde je požadavek na vysokou odolnost proti otěru, korozi, odolnost proti změnám teploty a na vysokou mechanickou pevnost [1].

Cermety, kde hlavním představitelem je oxid hlinitý, doplněný wolframem nebo molybdenem, železem, chromem, niklem apod. Představují novou kvalitu hmot, hlavně v těch konstrukčních aplikacích, kde již keramika svými vlastnostmi nevyhovuje. Jsou to oblasti kosmické techniky, letecké techniky a dalších. Nejdůležitější z těchto materiálů je oxid hlinitý (Al_2O_3). Je to materiál užívaný ve více než 80 % všech aplikací, ať už v jeho nejčistší formě nebo v kombinaci s jinými oxidy, jako jsou silikáty. Al_2O_3 hraje také klíčovou roli nejen díky svým vynikajícím vlastnostem (je odolný proti opotřebení, je elektrický izolant a je odolný vůči korozi), ale také proto, že je po vázání kyslíku akřemíku třetí nejhojnější sloučeninou v zemské kůře. Cermety jsou vyráběny především z přírodních surovin ve spojení s oxidem hlinitým za vzniku materiálů, jako je steatit, kordierit, mullit a mnoho dalších variací těchto látek. Tyto typy materiálů se vyznačují extrémně nízkou tepelnou vodivostí a vysokou úrovní elektrické izolace. Především jsou optimalizovány, aby poskytovaly vynikající procesní schopnost, a díky své křemičité surovinové bázi nabízejí vynikající hodnotu pro výrobu spínacích zařízení a pouzder regulátorů [3].

1.3.7 Slinutá bezkyslíková keramika

Keramickou technologií je možné zpracovávat nitridy a karbidy, které nemají v chemickém vzorci kyslík jako Nitrid boritý BN, Karbid křemíku SiC, Nitrid křemičitý Si₃N₄. Tyto látky jsou odolné proti roztaveným kovům a neslinují obvyklým způsobem.

Karbidy se vyznačují vysokými teplotami tání, extrémní tvrdostí, dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Výjimkou je odolnost k oxidaci, která je však u některých karbidů vyšší než u kovů se srovnatelnou teplotou tání.

Nitridy křemíku jsou perspektivním keramickým materiálem. Vyznačuje se vysokou pevností a vysokými teplotami při aplikacích. Keramika na bázi nitridu křemíku má vysoký elektrický odpor při vysoké teplotě, velmi nízkou teplotní roztažnost a extrémně dobrou odolnost proti změnám teploty. Je extrémně tvrdý, dobře odolává abrazi a korozi taveninami neželezných kovů. Tato keramika je vhodná pro výrobu kelímků na tavení indukčním ohřevem. Používá se na výrobu dílů tepelně namáhaných strojů např. lopatky plynových turbín, trysek, ústí pro tažení kovů, pyrometrové ochranné trubice a jiné velmi exponované konstrukční díly [1, 3].

1.4 Přípravy keramických materiálů

Cílem přípravy keramické směsi je požadované rozřídění výchozích surovin, jejich homogenizace a dosažení takového stavu materiálu, který je optimální pro zvolený způsob vytváření polotovaru. Maximální velikost zrn pro jednotlivé druhy keramiky znázorňuje tab. 4.

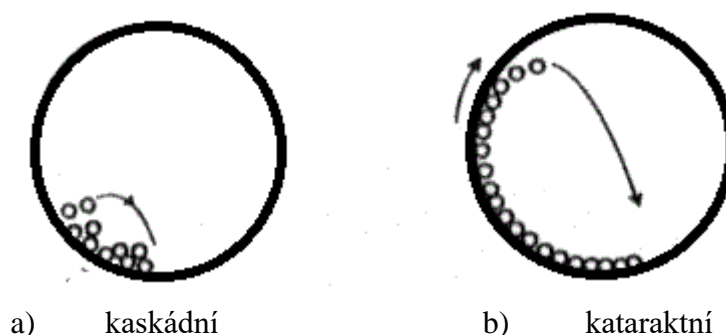
Tabulka 4: Maximální velikost zrna pro jednotlivé druhy keramiky [2]

Druh keramiky (keramického výrobku)	Maximální velikost zrna v mikrostruktuře keramiky d/μm
Technologicky vospělá keramika	< 1
Slinutá oxidová keramika	4 – 5
Porcelán s vysokou pevností	50
Porcelán	60
Pórovité obkladačky	90
Zdravotnická keramika	100
Kamenina	120
Kameninové dlaždice	60 – 200
Slinuté obkladové tvarovky	90 – 500
Pórovina	300 – 2000
Kabřince, žárovzdorné materiály	3000
Cihly	5000

1.4.1 Mletí

Mlýny lze použít k mletí živce, křemene, jílu a dalších tvrdých a křehkých materiálů pro výrobu keramického prášku. Mlýny se používají jak pro suché, tak i pro mokré způsoby mletí, z nichž suché mletí může produkovat velmi jemný prášek.

Tradičním způsobem přípravy keramické směsi je společné mletí v kulovém mlýnu ve vodní suspenzi. Mletí se provádí v kulových mlýnech (obr.2), jejichž vnitřní povrch je vyzděn silicovými kameny, keramickou vyzdívkou nebo vyložen otěruvzdornou pryží. Mlecími tělesy jsou obvykle přírodní pazourky nebo keramické koule z materiálu s vysokým obsahem Al_2O_3 , nebo čistě korundové [1, 2, 4].



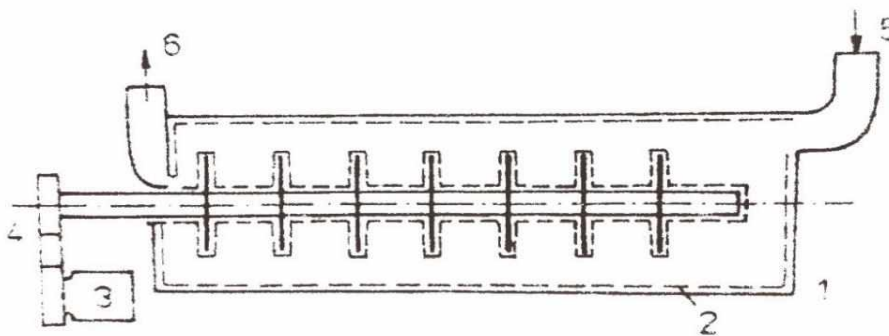
Obrázek 2: Schématické znázornění pohybu mlecích těles při mletí v bubnovém mlýnu [2]

- a) Ke kaskádnímu režimu mletí dochází při nízkých otáčkách mlýna nebo při malém plnění mlýna mlecími tělesy (cca do 30 % objemu mlýna). Mletí se uskutečňuje hlavně třením meliva s mlecími tělesy a vnitřním povrchem mlýna. Tento režim je vhodný zejména pro jemné mletí za mokra. Malá mlecí tělesa zintenzivňují proces mletí [6].
- b) Kataraktní režim mletí se ustavuje při otáčkách blízkých se kritickým. Dochází k němu také vždy, jestliže stupeň plnění mlýna mlecími tělesy je vyšší než 50 %. Mletí probíhá hlavně nárazem. Zintenzivňuje se zvýšením hmotnosti mlecího tělesa (větší průměr tělesa, vyšší hustota materiálu) a průměru mlýna. Tento režim je vhodný zejména pro hrubé mletí [6].

U oxidových nebo neoxidových prášků pro přípravu keramiky se při jejich mletí často jedná o rozrušení agregátů velmi jemných krystalických částic. Mletí se provádí v kulových mlýnech za sucha v pružném latexovém (pryžovém) vaku nebo pěnovou latexovou vystýlkou nebo pevnou otěruvzdornou pryží.

Velmi jemné prášky se melou v kontinuálních mlecích zařízeních, jejichž funkční části jsou obloženy keramickými tvarovkami (z téhož materiálu jako je melivo). Takovým zařízením je např. autogenní mlýn (obr. 3) pro mletí za mokra. Mlecími tělesy jsou malé keramické kuličky.

Suroviny jsou mleté vícekrát, aby se změnila jejich velikost. Typické průměry se pohybují od 0,1 do 10 μm . Prášky však mohou dosahovat až 50 μm nebo u specializovaných špičkových produktů jsou zpracovávány prášky, které mají velikost jen několika nanometrů [2, 4].



Obrázek 3: Schéma autogenního mlýna pro mikromletí prášku v suspenzi: 1 - těleso mlýna, 2 - keramické obložení, 3 - motor, 4 - převod, 5 - vstup suspenze, 6 - výstup suspenze [6]

Mletí se kombinuje s pojivky a jinými organickými přísadami za vzniku granulátu. Aby se toho dosáhlo, musí se jemný prášek umístit do vodní suspenze, která se poté atomizuje proudem horkého vzduchu. Během tohoto procesu se vytvářejí kapky, velmi přesně nastavitelné sférické částice, které se suší ve stejném kroku zpracování. Jejich průměry jsou v rozsahu od 50 do maximálně 150 μm . Díky svému kulovému tvaru se granuláty chovají během procesu plnění formy mnohem lépe než čistá surovina, což umožňuje automatické dávkování [2, 4].

1.4.2 Odvodnění suspenzí pro směsi technologicky vyspělé keramiky

Máme několik způsobů přípravy směsi jako je reakce v plynné fázi, společné srážení z roztoků solí, hydrolytické srážení z roztoků solí nebo organokovových sloučenin, hydrolytické srážení dopantu na dispergované částice (otěrové mletí), metoda sol-gel a vymrazování.

Tyto způsoby přípravy umožňují přesné řízení chemického složení a stechiometrie látky, dosažení vysokého stupně homogenity látky bez cizích příměsí, řízení velikosti a tvaru částic, dosažení velmi reaktivních a dobře slinovatelných (při nižších teplotách) částic [2, 4].

1.4.3 Tvarování keramiky

Při normální teplotě se provádí lití suspenzí, kde disperzním činidlem je 20 až 40 % vody a lije se do pórovitých sádrových forem nebo pod tlakem do polymerních forem. Také může být disperzním činidlem nepolární kapalina (organické rozpouštědlo) a lije se na hladkou, nepórovitou podložku. Dalším způsobem tvarování při normální teplotě je plastické tvarování. Provádí se z těst s obsahem 17 až 27 % vody nebo ze směsí s obsahem 1 až 10 % nevodného rozpouštědla a organických pojiv. V neposlední řadě sem patří lisování. Pro lisování se používá vlhkých směsí, polosuchých směsí a suchých směsí. Vlhké směsi obsahují 15 až 18 % vody a s organickými lisovacími přísadami. Polosuché směsi obsahují 8 až 15 % vody s bezvodným rozpouštědlem a organickými pojivy. A suché směsi obsahují < 4 až 8 % vody nebo organických pojiv pístovým nebo izostatickým způsobem.

Za vyšších teplot rozdělujeme tvarování keramiky na vstříkové lití a žárové lisování. Vstříkové lití se dále dělí na nízkotlaké a vysokotlaké při teplotách do cca 150 °C. Žárové lisování se provádí při teplotách většinou nad 1000 °C a může být pístové nebo izostatické.

Tvarování keramiky litím z vodní suspenze je umožněno vlastnostmi jílových surovin keramické směsi. Jílová složka směsi, která má největší měrný povrch z celkového povrchu dispergované pevné fáze v suspenzi, má rozhodující vliv na její fyzikální chemické a reologické vlastnosti, tj. na stabilitu, litelnost, viskozitu a tixotropii suspenze. Velmi důležitou vlastností keramických suspenzí je jejich stabilita – kinetická a koagulační.

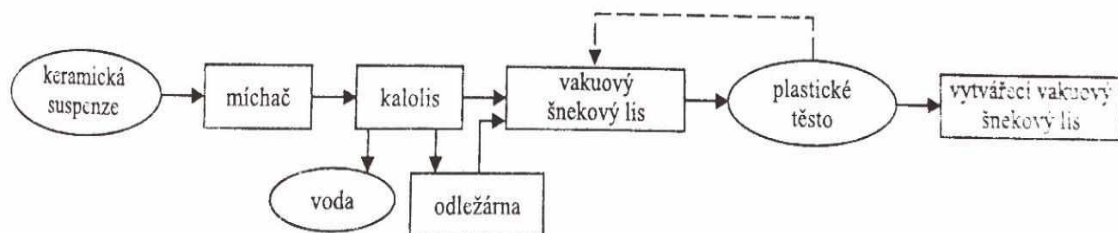
Při lití do sádrových forem musí keramická licí suspenze vykazovat minimální viskozitu a téměř nulovou mez toku při maximálním obsahu pevné fáze. Keramické licí suspenze musí dále vykazovat vysokou stabilitu, minimální tixotropii, minimální korozivní působení na formy, vysokou rychlost tvorby střepe, rychlé zatužování vytvořeného střepe, vysokou homogenitu a pevnost střepe v plastickém (tzv. koženém) stavu a po vysušení [2, 6, 10].

Rozlišují se dva způsoby lití keramických suspenzí do sádrových forem. Lití na střepey a lití na jádro. Při lití na střepe se po vytvoření požadované tloušťky střepey na vnitřní straně formy zbývající suspenze z formy odstraní. Suspenze je formou odvodňována pouze z jedné strany tvarovaného tělesa. Při lití na jádro je ve formě vytvořen prostor, který odpovídá tloušťce stěny tvarovaného tělesa. Suspenze je odvodňována stěnami formy z obou stran [2].

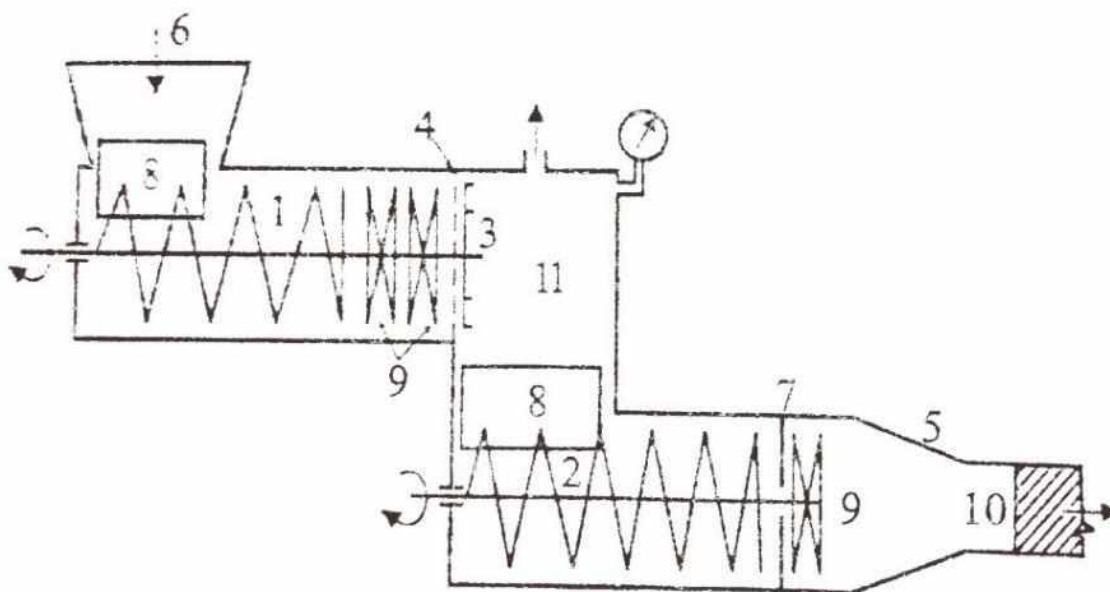
Nevodné keramické suspenze jsou tvořeny jemně disperzní keramickou směsí a organickým pojivem s přidavkem plastifikátoru. Tvarují se pod tlakem většinou za zvýšené teploty do kovové formy. Rozlišujeme dva způsoby, a to nízkotlaké a vysokotlaké. Při nízkotlakém vstřikování se používají směsi s obsahem cca 10 až 20 hmotn. % parafinu (ceresinu) s malým přidavkem včelího vosku (oleje). A při vysokotlakém injekčním vstřikování se používají směsi s obsahem cca 60 obj. % práškového materiálu, např. Al_2O_3 se střední velikostí částic $d_{stř.} = 0,53 \mu m$. Jako pojivo se osvědčila např. směs 60 % kopolymeru etylen-vinylacetátu a 40 % parafinu. V obou případech se musí před výpalem odstranit z výlisku organické pojivo buď výpalem výlisku v práškovém zásypu (např. Al_2O_3) nebo depolymerací a odkouřením pojiva. Tento způsob tvarování keramiky umožňuje tvarovat tělesa složitých tvarů s vysokou rozměrovou přesností. Vzhledem k nezbytnosti nezávadného odstranění organické složky směsi, je omezujícím parametrem tloušťka stěny tvarovaného tělesa.

Keramickou fólií se rozumí rovinný nevypálený polotovar s velmi malou tloušťkou v porovnání s délkou a šířkou. Fólie se tvarují litím ze suspenze, kalandrováním nebo tvarováním na vakuovém šnekovém lisu z plastického těsta. Z těchto fólií se razí různé tvary, které po výpalu slouží jako tzv. substráty, tedy podložky, např. pro tištěné elektronické obvody.

Tvarování těsta v plastickém stavu (obr. 4) vyžaduje jeho přípravu s optimální vlhkostí. Homogenizace se provádí dostatečným odležením při zabránění vysychání nebo promísením těsta na šnekovém lisu [2, 6, 11].



Obrázek 4: Schéma přípravy plastického těsta z kalolisovaných koláčů [6]



Obrázek 5: Schéma vakuového šnekového lisu: 1 - mísící šnek, 2 - lisovací (výtlačný) šnek, 3 - odřezávací rozeta ve vakuové komoře, 4 - protlačovací síto, 5 - lisovací hlava, 6 - podávací otvor, 7 - protinože, 8- podávací válec, 9 - koncová hlava šneku, 10 - ústí lisu, 11 - vakuová komora [6]

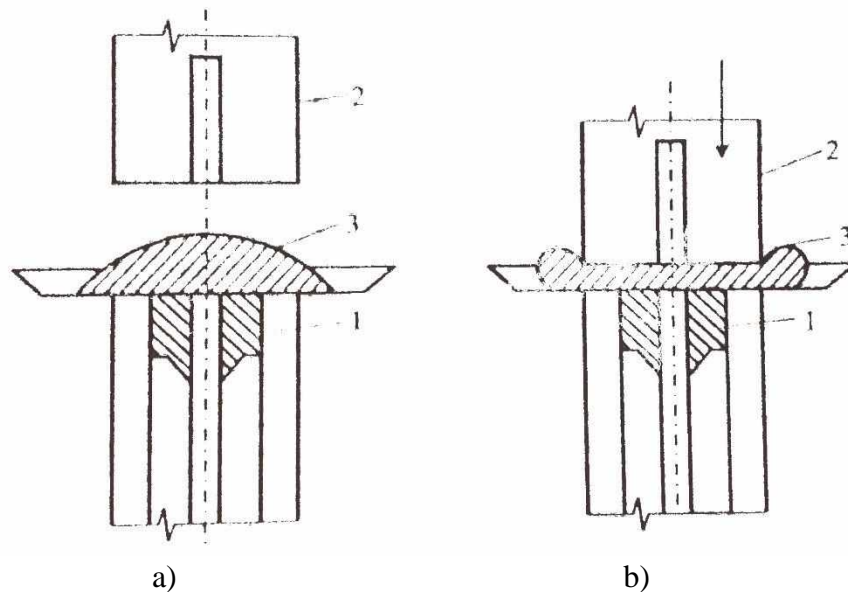
Tvarování plastického tělesa se provádí většinou vakuovým šnekovým lisem (obr. 5). Tento stroj zhomogenizuje těsto a protlačí je sítím do vakuové komory. Tam nudličky těsta rozřeže rozeta na kousky, které se snadno odvzdušní. Kousky odvzdušněného těsta se dopravují výtlačným šnekem do vytvářecí sestavy tvořené lisovací hlavou a ústím (někdy je součástí vytvářecí sestavy před lisovací hlavou i tzv. uklidňující část). Protinože brání rotaci těsta v komoře výtlačného šneku. Slisované a odvzdušněné těsto je tvarováno ústím lisu.

Proces vytlačování je vhodný pro rotačně symetrické komponenty s minimálním průřezem vzhledem k jejich délce, tj. trubky, tyče, voštiny a podobně. Naproti tomu v procesu vstřikování, např. u vodítek nití v textilním průmyslu se hmota vstřikuje do kovové formy a ztvrdne do pevného obrobku. Jedná se o spolehlivou metodu používanou zejména pro složité geometrie s podříznutím.

Lisování sypkých keramických směsí se rozděluje na přetokové, pístové a izostatické. Zvláštní způsob lisování představuje žárové lisování. Zejména lisování tuhým razníkem, je vhodné pro výrobu ve velkém množství. Při tomto postupu se granulát nalije do ocelové formy ve tvaru vyráběné součásti. Klíčovým faktorem v této metodě je rozdělení velikosti výchozího materiálu: Velká zrna proudí lépe do formy a plní ji rovnoměrněji než malá. Přesto jsou pro vyplnění prostor nezbytné jemnější částice

prášku. Protože se používají suché granuláty s velmi minimální zbytkovou vlhkostí, je tato technika známá také jako lisování za sucha. Při aplikaci z jedné nebo ze dvou stran za vysokého tlaku, obvykle 1500 bar, je materiál stlačen na 50 až 60 % původního objemu. Vyšší tlak by proces nezlepšil, protože na rozdíl od kovových částic nejsou keramické částice tvárné [4, 6].

Přetokové lisování (obr. 6) je způsob tvarování s přebytkem vlhké keramické směsi, drolenky ($W = 15$ až 21 %), do otevřených kovových forem.

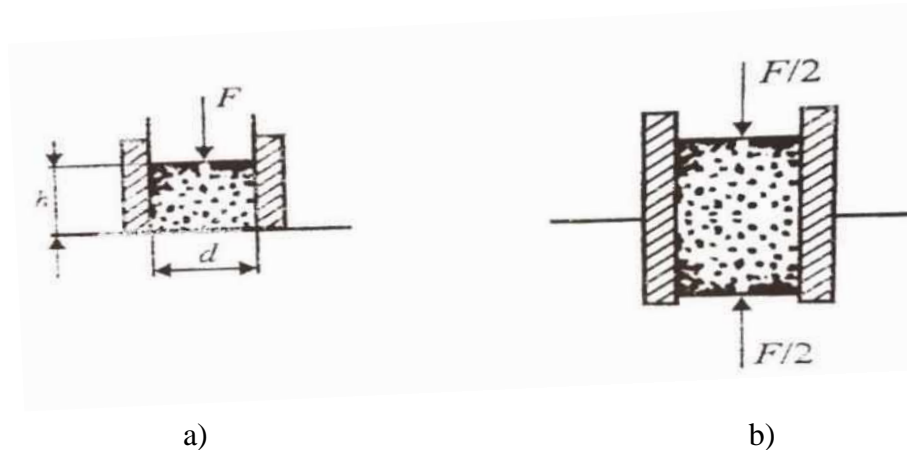


Obrázek 6: Schématické znázornění přetokového lisování s přebytkem vlhké směsi: a) zaplnění lisovací formy přebytkem směsi, b) fáze lisování před uzavřením formy.

1 - lisovníkem, 2 - s únikem přebytku lisovací směsi, 3 - štěrbinou mezi formou a lisovníkem [6]

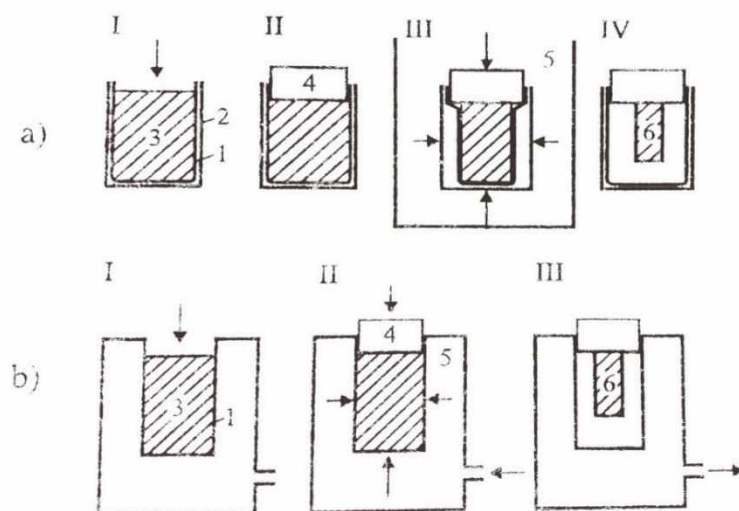
Jakmile lisovací tlak překročí mez toku, začne se lisovací směs chovat jako nestlačitelná newtonská kapalina. Tlak se v ní šíří všemi směry a vyplní i složité tvary formy.

Pístové lisování je způsob tvarování práškové keramické směsi s nízkým nebo nulovým obsahem vlhčiva do pístově uzavřených kovových forem. Při tomto způsobu tvarování probíhají prakticky současně dva procesy: uspořádávání částic směsi a deformace, případně i lom částic. Uspořádávání částic směsi probíhá ve směru lisovací síly a vede ke zvýšení objemové hmotnosti výlisku. K deformaci anebo lomu částic dochází v důsledku jejich tření většinou až při vyšších tlacích. Částice vyplní prostor formy dokonaleji, než tomu bylo ve fázi uspořádávání. Při pístovém lisování může působit lisovací síla jednostranně, dvoustranně nebo izostaticky (obr. 7 a 8) [2, 6, 12].



Obrázek 7: Schématické znázornění rozdělení objemné hmotnosti materiálu ve výlisku: a) po jednostranném působení lisovací síly F , b) po dvoustranném působení lisovací síly [6]

Izostatické lisování je lisování všesměrné. Existují dva základní způsoby lisování, a to do mokré formy a do suché formy (obr. 8). Izostatické lisování s ohledem na možnou aplikaci vysokých lisovacích tlaků poskytuje výlisky s rovnoměrně rozdělenou vysokou objemovou hmotností. Tyto výlisky je prakticky vždy možno v suchém stavu obrábět soustružením, frézováním nebo broušením. Izostatické lisování se doporučuje v případech, kdy produkty kladou vyšší nároky na homogenitu materiálu, například kvůli jejich velikosti nebo geometrii. Tvar je zde elastický a je vyroben z gumy nebo latexu. Okolní tekutina vyvíjí tlak rovnoměrně a ze všech stran. Tato metoda je především vhodná pro výrobu rotačně symetrických dílů se složitými geometrickými tvary. Příkladem výrobku může být zapalovací svíčka.



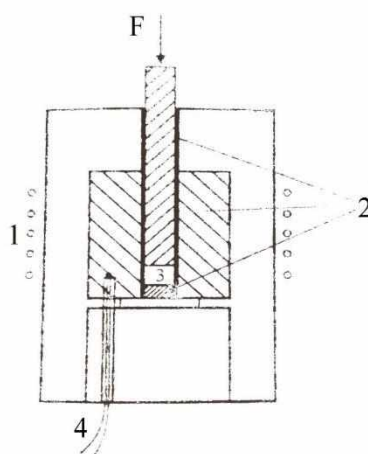
Obrázek 8: Schématické znázornění fází při izostatickém lisování granulované směsi v mokré formě a) a v suché formě b).

1 - elastická lisovací nádoba (vak), 2 - kovová děrovaná manžeta, 3 - lisovací směs, 4 - zátka, 5 - tlaková nádoba, 6 - výlisek.

Ad a) Fáze I značí plnění vaku směsí, II – uzavření vaku se směsí před ponořením do kapaliny, III – zalisování, IV – stav před vyjmutím výlisku.

Ad b) Fáze I značí plnění směsí do vaku, II – zalisování, III – fáze před vyjmutím výlisku [6]

Žárové lisování (obr. 9) je zvláštním způsobem tvarování, kdy se lisuje vysokými tlaky v grafitové formě při teplotách 1200 až 2000 °C v ochranné atmosféře. Metoda vyžaduje nákladné zařízení a nemá vysokou produktivitu, je ale vhodná pro přípravu výlisků oxidových i neoxidových prášků, u nichž se dosahuje objemové hmotnosti blízké jejich hustotě [6, 13].



Obrázek 9: Schéma zařízení na žárové lisování. 1 - elektrická pec, 2 - grafitová forma, píst a podložka, 3 - výlisek, 4 - termočlánek [6]

Při žárovém lisování za působení vysokého tlaku a za vysoké teploty se slinovaný keramický materiál chová jako Binghamova látka. Žárové lisování poskytuje materiály s řízenou mikrostrukturou, a tedy i s velmi vysokými mechanickými pevnostmi. Výlisky je třeba po vylisování opracovat nejčastěji broušením a následným leštěním. Izostatické žárové lisování využívá jako lisovacího media inertního plynu (např. argonu) [14].

1.4.4 Povrchové úpravy

Keramické výrobky jsou v řadě případů povrchově upravovány. Na jejich povrch jsou nanášeny a fixovány výpalem buď skelné vrstvy, glazury nebo hutné vrstvy, engoby. Tyto povrchové vrstvy se také dekorují. Další možnosti povrchové úpravy poskytují různé způsoby mechanického opracování povrchů. Ty se uplatňují zejména u výrobků pro technické aplikace. Pro tyto účely se také povrchy opatřují kovovými vrstvami [6].

Běžně používanou povrchovou úpravou řady keramických výrobků je glazování. Glazury jsou tenké skelné vrstvy na povrchu keramických výrobků. Podle surovinového složení se glazury dělí na zemité, fritované a živcové.

Základ zemitých glazur tvoří nízko tavitelný jíl nebo zemina (např. slín, cihlářská hlína apod.) případně hornina s vyšším obsahem alkalických oxidů (např. znělec). Po výpalu jsou nejčastěji zemitě barevné, někdy i bílé. Jejich vlastnosti mohou být korigovány přísádky jemně mletého křemene, živce nebo barvicích oxidů apod. Teplota výpalu se pohybuje většinou na 1160 až 1180 °C [15].

Fritované glazury obsahují ve vodě rozpustné látky (např. borax, soda, potaš, sloučeniny olova apod.), které umožňují výpal glazury při nízkých teplotách. Tyto látky se předem roztaví s přísádkem dalších surovin na sklo. Toto sklo je ve vodě málo rozpustné, je to tzv. frit. Frita tvoří část surovinového složení glazury. Fritují se také glazury, u nichž je třeba jemně dispergovat v glazuře nerozpustnou látku.

Živcové glazury se připravují mletím ze surovin, jejichž základem je glazurový živec. Dalšími složkami mohou být např. vápenec, dolomit, magnezit, barvicí oxidy a plavený kaolin [9].

Minimální tolerance vypálených keramických dílů dodatečně neopracovaných jsou $\pm 1\%$. Taková přesnost rozměrů je pro řadu aplikací nedostatečná, a proto je nutné keramické díly řezat, obrábět, brousit, leštit, ev. jejich povrch pokovovat apod. Nejsnadnější je provádět uvedené mechanické operace po výpalu polotovaru na teploty 800 až 1000 °C. Materiál je však velmi křehký a má relativně nízkou pevnost. Po výpalu

na optimální teplotu se sice zvýší jeho mechanická pevnost, ale stoupne i jeho tvrdost, a tedy i odpor proti obrábění a zvýší se nároky na kvalitu obráběcích nástrojů [2].

K řezání a broušení keramiky se používají kotouče SiC s různou vazbou anebo kotouče ze syntetických diamantů s bronzovou vazbou. Kotouče SiC jsou chlazeny vodou a jejich obvodová rychlost je 6 až 8 ms⁻¹. Diamantové kotouče pracují při obvodové rychlosti 20 ms⁻¹ a jsou chlazeny vodou nebo olejem. Při práci se suchým nástrojem se zkracuje jeho životnost až 100krát. Broušení a leštění keramiky jsou velmi nákladné operace. Je možné dosáhnout tolerance ±0,01 mm a ve speciálních případech až ±0,001 mm. U keramických součástek např. pro strojírenské aplikace tvoří náklady na jejich opracování 50 až 70 % ceny výrobku [2, 16].

1.5 Tepelné zpracování a výpal

Mezi základní fáze výroby keramiky patří sušení a výpal. Obecně lze tyto fáze označovat jako vypuzování vytvářecích přísad a pálení. Voda používaná k přípravě většiny keramických směsí je nejčastěji používanou přísadou. Dalšími přísadami jsou například plastifikátory, nebo ztekucovadla, která jsou však vypuzována jinak než sušením. Termín pálení je pak nadřazen pojmu výpal, protože výpal je operace, při které keramický produkt získá konečné vlastnosti, a to někdy není případ během vypalování, protože může následovat další tepelná operace. Tabulka 5 poskytuje analýzu pojmu tepelného zpracování.

Tabulka 5: Tepelné zpracování [17]

Tepelné zpracování v keramice						
Odstraňování vytvářecích přísad		Získávání požadovaných vlastností (odstraňování chemicky vázané vody)				
sušení	vypuzování	žihání	kalcinace	přežah	dožah	výpal

Tepelné zpracování je řízený proces používaný ke změně mikrostruktury materiálů. Je jim například žihání oceli, kalení a popouštění, syntéza nitridů, rozprachové sušení suspendovaných hmot i sušení a pálení keramiky atd. Tepelné zpracování v keramice je působení teploty na surovinu sloužící k následné výrobě keramiky nebo na keramický

polovýrobek, jehož cílem je odstranění vytvářecích přísad nebo získání požadovaných vlastností. Sem patří sušení a kalcinace surovin, sušení výlisků, vypuzování pojiv z neplastických hmot, přežahování před dalším zpracováním, výpal, zažihání dekoru a jiných povrchových vrstev a další operace [17].

Odstraňování vytvářecích přísad je tepelné zpracování výrobků, při kterém se odstraní všechny těkavé a spalitelné složky keramické vytvářecí hmoty zajišťující její zpracovatelnost. Příklady mohou být sušení výrobků z jílových těst, vypuzování naftalenu či parafinu z oxidových hmot, vypalování novolaku a depolymerace polystyrénového lehčiva. Tepelné zpracování dodává polotovaru vlastnosti pro další procesy při výrobě například kalcinace před mletím, přežah před glazováním či před mechanickým obráběním.

Sušení je odstraňování vody působením tepla a sušicího média. Rozumí se tím odstraňování fyzikálně vázané vody z keramických směsí. Nepatří sem odstraňování vody jinými způsoby, jako například vytěsňování organickými rozpouštědly, odstředování či vymrazování.

Vypuzování organických látek je odstraňování organických přísad z keramické směsi působením tepla a transportního média. Působením tepla dojde k odpaření nebo k sublimaci organické látky a transportní médium, kterým je nejčastěji vzduch anebo spaliny, odnese páry. Jiným mechanismem odstraňování organické přísady je její řízené spálení. Vzduch pak slouží nejen jako transportní médium produktů hoření, ale i jako zdroj kyslíku [18].

Kalcinace je tepelné zpracování keramiky zahříváním na vysoké teploty ve vzduchu nebo kyslíku, jehož cílem je odstranění krystalové vody, rozklad karbonátů a jiných sloučenin rozložitelných teplem, při kterém zpravidla nedochází k syntéze nových sloučenin. Příkladem může být kalcinace kaolínu pro přípravu směsí pro vytváření lisování a kalcinace jílu pro použití jako korekční přísady do vytvářecích plastických těst.

Přežah je tepelné zpracování vysušeného keramického polotovaru pro získání vlastností potřebných k jeho dalšímu zpracování, po kterém následuje konečný výpal. Přežahuje se tenkostřepý porcelán proto, aby jej bylo možno glazovat ponořováním do glazury. Přežahují se výlisky z oxidové keramiky proto, aby získaly pevnost potřebnou pro mechanické opracování před výpalem na konečnou teplotu (dožahem), a pórovinové obkládačky proto, aby je bylo možno po glazování vkládat do drážkových pouzder, a samozřejmě i proto, aby nedocházelo k jejich deformaci při glazování [17,18].

Výpal je proces zahřívání keramického polotovaru na vysokou teplotu zrání materiálu, při kterém střepe získává konečné vlastnosti. Je to takové tepelné zpracování, při kterém bylo dosaženo požadovaného proreagování hmoty střepe. Při dalším zpracování již reakce dále neprobíhají anebo proběhnou v zanedbatelné míře. Patří sem výpal hmot pálených jen jednou, jako například kanalizačních trubek, cihel, hrnčiny anebo dožah hmot přežahovaných jako je například užitkového porcelánu, izolátorů zapalovacích svíček či některých obkládaček a dlaždic. Dožahem se rozumí výpal výrobků, které byly přežahovány.

Zažihání je tepelné zpracování vypáleného keramického výrobku, jehož povrch byl dodatečně upravován nanášením dalších materiálů a jehož cílem je tyto materiály neoddělitelně s výrobkem spojit. Sem patří například zažihání naglazurového zdobení (dekoru), zažihání mezivrstvy pro pájení, pokovování v žáru atp. [17,18].

Sušičky a pece, jsou technologickým zařízením i termodynamickými systémy. Sušárna je zařízení, ve kterém je fyzikálně vázaná voda odstraněna z předmětu. Pec je zařízení, ve kterém se provádí kalcinace, přežah, dožah, vypalování keramického polotovaru, nebo zažihání povrchové úpravy. Jako termodynamické systémy pec a sušárnu definujeme tak, že sušárna (pec) je otevřený systém vzájemného působení zdroje tepla, teplonosné látky na předmět tepelného zpracování. Otevřené systémy jsou také v termodynamickém smyslu, protože nejsou odděleny od druhého prostoru, vždy si vyměňují teplo s prostředím. Dokonalé zvládnutí problematiky sušení a pálení keramiky je cestou nejen ke snížení spotřeby tepla, ale i k získání kvalitních výrobků. Popis důležitých stavů a teplot pro pálení keramiky je vypsán do tabulky 6 [18, 5].

Tabulka 6: Popis důležitých teplot a stavů [19]

Teplota [°C]	Popis procesu
100	Bod varu vody. Jakkoli suchý se zdá střep, vždy obsahuje atmosférickou vodu. Přežah: stoupaní k této teplotě musí být velmi pomalé. Výrobky nepraskají kvůli vzduchovým bublinám, ale kvůli rychlému pálení. Stěna je v místech s bublinou nejtenčí. Glazura: vlhké glazury se před tímto bodem mohou sbalovat, proto se nechávají vyschnout.
226	Náhly nárůst objemu o 3 % u výrobku již jednou páleného nad 1100 °C.
450 – 600	Přežah: odchází chemicky vázaná voda. Výrobek se nesmršťuje, ale je v této fázi velmi křehký. Mohou nastat potíže s výrobkem již jednou páleným, na kterém může pára, která se uvolňuje, nadzvedávat glazuru.
573	Bod vzniku vazby mezi glazurou a střepem. Při rychlém pálení mohou vznikat praskliny ve velkých výrobcích, kvůli nerovnoměrnému rozložení tepla. Proto je vhodné umísťovat takové výrobky ve stejné vzdálenosti od zdroje tepla.
750+	Alkalické kovy (K ₂ O, Na ₂ O, Li ₂ O) začínají tvořit kapalnou složku s křemenem.
750 – 900	Z hmoty vyhořívají organické složky. Nad 750 °C se ze hmoty uvolňuje uhlík, spojuje se s kyslíkem v atmosféře a vzniká CO ₂ . Pokud v atmosféře není dostatek kyslíku, uhlík si ho vezme např. z kteréhokoli Fe ₂ O ₃ . To vede ke vzniku FeO, který se stává velmi silným tavivem při 900 °C.
1050	Vhodná teplota pro ukončení přežahu. Pokud je problémem praskání přežahu, jednou z příčin by mohla být nízká teplota výpalu.
1050 – 1100	Začíná se utvářet mullit, který dává pevnost kamenině a porcelánu. Jeho přítomnost však není jistá pod 1150 °C. Nepřítomnost mullitu vysvětluje, proč hrncina není tak pevná jako kamenina nebo porcelán.
1150	Začíná vznikat kristobalit z volného křemíku. Čím déle a vyšší teplota, tím více kristobalitu. Rychlé chlazení do 1100 °C zpomaluje tvorbu kristobalitu. Proti jeho účinkům ve střepu pomáhá živce. Tyto střepy s kristobalitem by neměly být znova vypalovány.
800 – 500	Glazury tuhnou.

Sušení je fyzikální děj, při kterém se snižuje obsah kapaliny v sušeném materiálu, aniž se mění jejich chemické složení. Z keramiky se vypuzuje téměř vždy voda. Odstraňuje se odpařováním nebo sublimací. Účelem operace je snížit obsah vody na hodnotu, která umožňuje další zpracování, zejména tváření a pálení. Během sušení je kapalná a plynná voda transportována z vnitřku výrobku na jeho povrch a sdílána mezi výrobkem a prostředím.

Keramické směsi se chovají různě podle svého složení. Obecně je můžeme rozdělit na hmoty jednosložkové a vícesložkové. Jednosložkové hmoty získávají vlastnosti

zpravidla pouhým slinováním, zatímco komponenty vícesložkových hmot mohou navzájem během tepelného zpracování různě reagovat [20].

Vzduch je v keramické technologii velmi důležitý. Používá se jako zdroj kyslíku při spalování paliv zejména k otáčení pecí, při sušení slouží jako teponosné médium a k odvádění vlhkosti ze sušeného materiálu. Pro sušení se používá vzduch o různé vlhkosti.

Suchý vzduch obsahuje 78,1 % obj. N₂ (75,5 % hm.), 20,9 % obj. O₂ (23,1 % hm.) a zbytek tvoří směs asi 15 plynů (obsah jednotlivých plynů je do 0,1 % obj.)

Suchý vzduch se však v praxi vyskytuje velice zřídka (pouze po jeho záměrném vysušení). Vlhký vzduch obsahuje kromě výše uvedených složek i vodní páru. V praxi se vzduch vyskytuje téměř vždy jako vlhký.

Množství vodní páry ve vzduchu lze vyjádřit parciálním tlakem vodní páry p_w . Vzduch je schopen přijmout za určité teploty pouze určité množství vodní páry. Čím vyšší je teplota vzduchu, tím více vodní páry může vzduch přijmout. Množství vodní páry, které je vzduch schopen za dané teploty maximálně přijmout v plynném stavu, odpovídá stavu nasycení (nasycenému stavu). Parciální tlak vodní páry v nasyceném vzduchu je tlak nasycené (syté) vodní páry p_w^0 . Tlak syté vodní páry v závislosti na teplotě je uveden v následující tabulce [20].

Tabulka 7: Závislost tlaku syté vodní páry ve vzduchu na teplotě [20]

Teplota vzduchu t (°C)	Tlak syté vodní páry p_w^0 (kPa)	Teplota vzduchu t (°C)	Tlak syté vodní páry p_w^0 (kPa)
0	0,611	65	25,008
5	0,872	70	31,161
10	1,227	75	38,548
15	1,704	80	47,359
20	2,337	85	57,803
25	3,166	90	70,108
30	4,242	95	84,525
35	5,622	100	101,325
40	7,375	110	143,26
45	9,582	120	198,54
50	12,335	130	270,12
55	15,740	140	361,36
60	19,919	150	475,97

Voda může být ve vlhké keramické směsi vázána různými způsoby, a tedy různě pevně. Podle pevnosti vazby se postupně z materiálu uvolňuje.

Voda volná je obsažena mezi pevnými částicemi a odděluje je od sebe, takže se nedotýkají. Při sušení se odstraňuje jako první při teplotách pod 100 °C, protože je vázána s pevnými částicemi jen velmi slabými silami. Její odstranění je příčinou smrštění.

Voda kapilární je uzavřena v pórech a je vázána kapilárními silami, které jsou poměrně slabé, takže se odstraňuje také při teplotách pod 100 °C. V keramické směsi, z níž byla již volná voda vysušena, se pevné částice vzájemně dotýkají, takže při dalším sušení, kdy se uvolňuje kapilární voda, se sušené těleso již nesmršťuje [20].

Voda adsorbovaná tvoří vodní obaly jílových částic. Je vázána na povrch částic poměrně silnými silami, takže se odstraňuje teprve sušením při teplotách nad 100 °C. Její obsah je kolem 2 - 3 %.

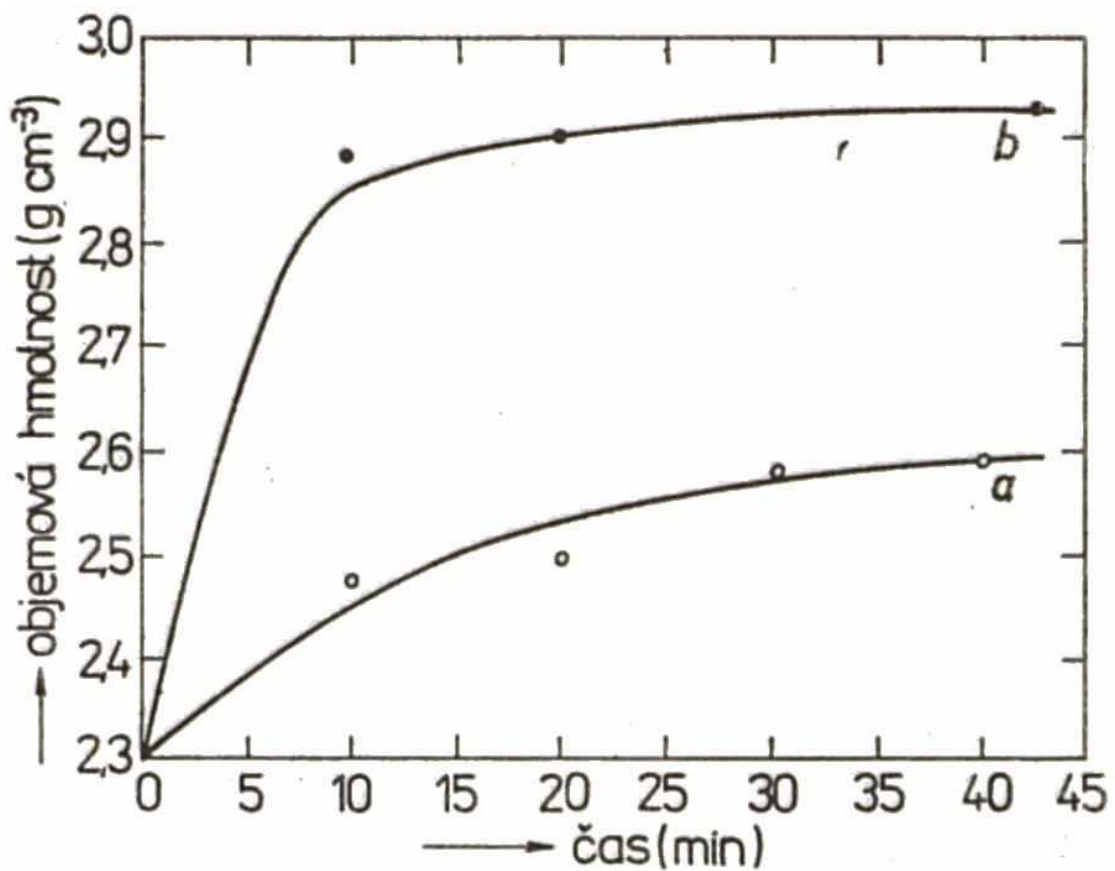
Voda chemicky vázaná je součástí krystalové mřížky jílových minerálů. Proto ji lze odstranit teprve při teplotách nad 400 °C (obvykle 400 - 700 °C), tj. až při výpalu.

Nejdůležitějším procesem tepelného zpracování keramiky je slinování. Je to proces, spojování částic pevné látky při působení tepla, přičemž se zmenšuje pórovitost materiálu. Slinování se provádí buď v nepřítomnosti kapalné fáze, která je typická pro jednosložkové hmoty, nebo v přítomnosti taveniny, která je typická pro vícesložkové hmoty.

Proces slinování má zhruba dvě etapy. První etapa končí přeměnou původně spojitých pórů aglomerátu částic v póry uzavřené. Ve druhé etapě se póry zmenšují. Značný praktický význam mají faktory, které ovlivňují rychlost slinování. Je to především mechanická povaha slinující látky, kterou je dán působící mechanismus slinování. Dále je to výchozí velikost slinujících částic. Čím menší jsou částice, tím větší je povrch i hnací síla slinování. Rychlost slinování je výrazně závislá i na teplotě, neboť s rostoucí teplotou roste pohyblivost atomů či iontů. S rostoucí teplotou vzrůstá i koncentrace poruch v krystalické mřížce, což usnadňuje objemovou difúzi. Podobný účinek mají i přísady, reakce s plynnou atmosférou, vyvolávající nepravidelnost mřížky a probíhající modifikační přeměny [20, 4].

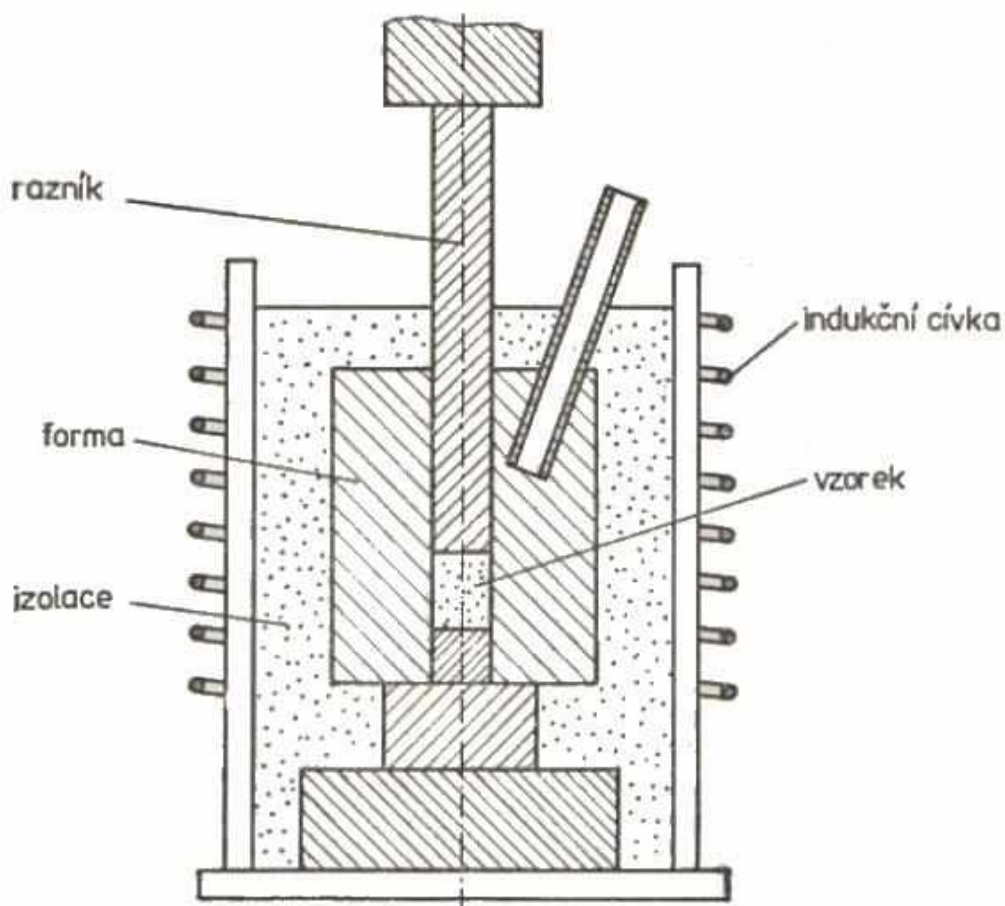
Jestliže mez toku pevných látek za slinovacích teplot je řádu 0,1 až 1 MPa, vnější tlaky řádu 10 MPa způsobují, že deformace probíhají v oblasti plastického toku. Důsledkem je rychlejší zhutňování, slinování za podstatně nižších teplot a také dosažení vyšších relativních hustot. Je to zapříčiněno tím, že při použití nižších slinovacích teplot

je omezen růst zrn. Na obrázku 10 je vidět rozdíl mezi tlakovým a normálním slinováním [20, 4].



Obrázek 10: Slinování BeO při 1600 °C: a – normální tlak, b – slinování pod tlakem 14 MPa [4]

U nových typů keramik (např. oxidové, karbidové apod.) chceme dosáhnout maximální hutnosti, tj. minimální pórovitosti slinutých výrobků, což je podmínkou optimálních vlastností. Současně však je nutno zabránit nadměrnému růstu krystalů, jenž brání eliminaci pórů a vlastnosti zhoršuje. Proto musíme volit co nejnižší slinovací teploty za působení vyššího tlaku. Na obrázku 11 je schéma zařízení pro tlakové slinování.

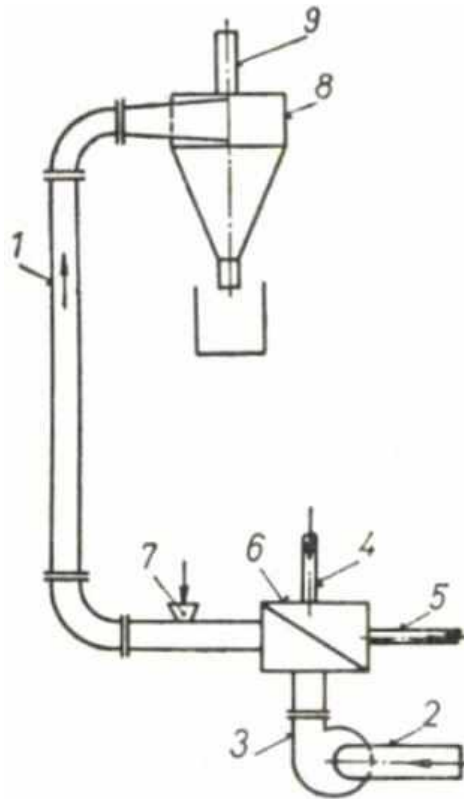


Obrázek 11: Schéma zařízení pro tlakové slinování (podle Murraye) [4]

Pokud během slinování probíhají i chemické reakce, může se tím průběh procesu různě modifikovat. Často se některé komponenty rozkládají za vzniku plynné fáze. Pokud k tomu dojde ve druhé etapě slinování, kdy jsou póry uzavřeny, může být proces zhutňování zpomalen nebo dokonce obrácen [17].

1.5.1 Sušárny a pece

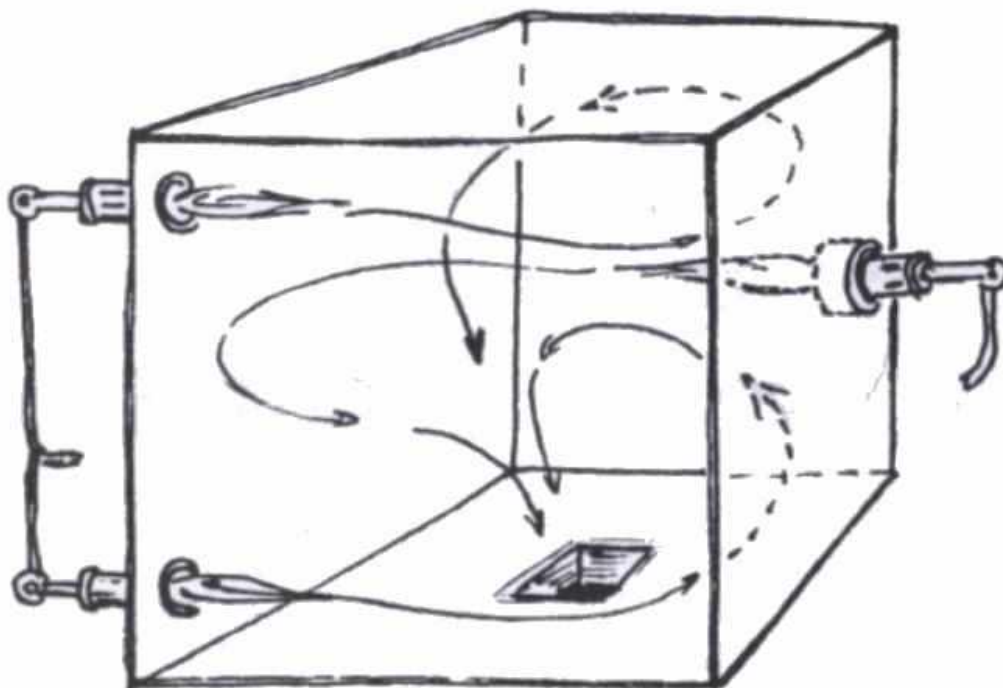
Sušení se používá jak pro keramický prášek, tak i pro polotovary. Pro keramický prášek se používá například proudové sušení (obr. 12), kde relativně malé částice zrnitého materiálu se uvádějí do proudu sušícího prostředí a vysoušejí se.



Obrázek 12: Schéma průběžné proudové sušárny. 1 - sušící potrubí, 2 - přívod vzduchu. 3 - ventilátor, 4 - přívod páry nebo topného plynu, 5 - odvod kondenzátu nebo spalin při rozběhovém chodu, 6 - výměník tepla nebo spalovací komora, 7 - podavač materiálu, 8 - odlučovač, 9 - výstup sušícího prostředí [21]

Pece s cyklonovým plamenem (obr. 13) zajišťuje rovnoměrný výpal. Hořáky jsou v ní umístěny vždy na bočních protilehlých stěnách v rozdílné výšce, aby se plamen roztočil v horizontální rovině. Odtah je sveden do středu podlahy. Tato pec vyžaduje nejméně dva hořáky. Čím více jich však rozmístíme, tím lépe dosáhneme rovnoměrnosti výpalu. Lépe se rozloží sudý počet hořáků než lichý. Mezi žáruvzdornými materiály a typy hořáků jsou rozdíly v kvalitě i ceně doslova propastné. Nekvalitní levné izolační materiály či nevhodné hořáky způsobí nepřekonatelné potíže při výpalu. Stávají se i případy, že pec nelze dopálit, nebo lokálně uniká teplo, což vede k výrazným teplotním rozdílům uvnitř pece. Proto i zde platí, že málokdo je tak bohatý, aby mohl kupovat levné věci [22].

Pece se vyrábí ve variantách vozokomorové, kdy se celá vsázka vkládá na vůz, kterým se pak zajíždí do pece. Nebo ve variantě standartní, kde je stabilní vsázka. Pro stabilní vsázku se dále používají elektrické pece (obr. 14).



Obrázek 13: Pece s cyklonovým plamenem [22]



Obrázek 14: Elektrická pec pro stabilní vsázku [23]

2 Výroba keramických materiálů v praxi

2.1 Pureceram spol. s r.o. Hradec Králové

V Hradci se nachází malá firma, Pureceram, spol. s r.o. Tato firma začala vyrábět keramiku jako součást družstva Morava Zlín, ale již pod značkou PURECERAM. Firma vyrábí technickou a elektrotechnickou keramiku na bázi korundu, zirkonoxidu, steatitu a kordieritu. Keramické díly vyrábí na zakázku podle výkresové dokumentace zákazníka. Zajišťuje kompletní výrobu od malých sérií, až po hromadnou velkosériovou produkci na základě individuálních potřeb každého zákazníka. Specializuje se především na výrobu rozměrově menších, ale technicky náročnějších výrobků technické keramiky. V sortimentu má přibližně 150 různých typů keramických výrobků [24].

2.1.1 Proces výroby

Před lisováním se prášek nijak zvlášť neupravuje, pouze se kordieritový prášek navlhčí směsí oleje a vody pro lepší zpracovatelnost. Firma si keramický prášek nechává dovážet z Německa a případné promísení provádí na šnekovém míchacím stroji (obr. 15).



Obrázek 15: Šnekový míchací stroj pro přípravu keramického prášku

Voda s olejem je přidávána zhruba v poměru 2 %. Při lisování se prášek lépe spojí a nedochází k jeho rozpadání. I při relativně vysokém lisovacím tlaku docházelo k nesoudržnosti materiálu. Vylisované výrobky je nutné rozměrově hlídat a při vychýlení z tolerance se musí lis (obr. 16) přenastavit.



Obrázek 16: Lis DORST TPA pro sériovou výrobu keramických výrobků

Po vylisování je výrobek ukládán do vypalovacích pouzder (obr. 17), kde je za pokojové teploty ponechán asi jeden den, než dojde k částečnému vypaření vody z výrobku.



Obrázek 17: Vypalovací pouzdra s výrobky určené pro výpal

Pro lisování se používá železná forma nebo forma z tvrdokovu, kterou si firma nechává na míru vyrobít v nástrojárně. Firma si připraví přesný výkres, který pak předá do nástrojárny a formy jsou poté dodány dodavatelským způsobem. Pro velké série výrobků jsou formy vyráběny z tvrdokovu. Forma vydrží přibližně 8-10.000 kusů při výrobě keramiky z korundu. Druhá možnost výroby, kterou firma též používá, je tažení.



Obrázek 18: Stroj pro tažení keramických výrobků z plastického keramického těsta

Pro tažení (obr. 18) se přidává do keramické směsi větší poměr olej-voda, než pro lisování. Prášek už vypadá spíše jako hodně vlhká drobenka, podobná plastelině. Takto připravená směs se dává do zásobníku, kde je šnekový dopravník. Šnek poté materiál tlačí zmenšujícím se průměrem, až k tažnému ústí. U výrobků, které nejsou porézní po výpalu, se komora u tažného ústí vakuuje, aby nedocházelo k zavzdušnění. U porézních výrobků to není potřeba.

Po vytažení musí výrobek pomalu schnout (obr. 19), nejlépe pod igelitovou plachtou, aby se zamezilo praskání a deformaci vytaženého výrobku. Tento proces trvá zhruba týden.



Obrázek 19: Schnutí výrobku na vzduchu

Poté se igelitová plachta odstraní a nechá se výrobek volně doschnout asi 2 dny. Při vysychání dochází k tvrdnutí výrobku. Po usušení se provádí řezání (obr. 20), vrtání (obr. 21), drážkování a úprava finálního výrobku.



Obrázek 20: Řezačka pro řezání před výpalem



Obrázek 21: Vrtačka na keramické polotovary

K řezání se používají karborundové kotouče. Výrobky je nutné opracovat ještě před výpalem. Po výpalu je obrábění keramických výrobků složité.

Po všech obráběcích procesech, které probíhají ještě před výpalem, (aby nevznikaly velké náklady na obrábění, kvůli tvrdosti obrobku po výpalu) probíhá výpal v plynových pecích (obr. 22).



Obrázek 22: Plynová vypalovací pec se zapálenými hořáky

Vnitřek pece je vyzděn vláknitou vyzdívkou, která odolává vypalovacím teplotám. Celý proces vypalování, který je řízen teplotní křivkou, trvá přibližně dva dny. Tento proces je počítán od studeného po studený výrobek. 16 hodin probíhá vypalování prvního cyklu a dále 1,5h výdrž na teplotě 1180 °C poté probíhá samovolné chladnutí na 500 °C. Následuje puštění ventilátoru, který fouká do pece přes hořáky vzduch z okolí a tím zajišťuje vychlazení celé pece.

Pro výpal korundové keramiky se používá elektrických pecí (obr. 23). Vypalování probíhá při teplotě 1600 °C.



Obrázek 23: Elektrická vypalovací pec



Obrázek 24: Oboustranná bruska PETER WOLTERS s diamantovými kotouči

Korundová keramika se po výpalu dále opracovává a brousí (obr. 24). Bruska je vybavena dvěma diamantovými kotouči (vrchní a spodní). Do unašeče se vloží kroužek (obrobek). Horní brousící kolo se otáčí proti směru otáčení obrobku a zároveň se v unašeči otáčí výrobek.

Po tomto procesu se výrobky vkládají na 10 min. do kyseliny dusičné na proplach, následuje oplach vodou a sušení. Tímto procesem se odstraní z povrchu keramiky zbytky kovů, které by se mohli při výrobě dostat na povrch výrobku. Takto se neproplachuje každý výrobek, proplachuje se pouze na přání zákazníka.

2.1.2 Výrobky a materiály

Kordierit je materiál na bázi aluminium-magnezium-silikátů, který se vyznačuje mimořádně nízkou teplotní délkovou roztažností, vysokou odolností proti tepelným šokům a nízkou teplotní vodivostí. Díky jeho mimořádným fyzikálním vlastnostem se používá kordierit na výrobu dílů pro aplikace v elektrotepelných zařízeních a pro řadu konstrukčních dílů, které jsou tepelně namáhané a vystavené náhlým změnám teploty. Mezi hlavní výrobky společnosti Pureceram, které plně využívají potenciál kordieritových materiálů, patří např. držáky topných těles či nosiče topných spirál (obr. 25).



Obrázek 25: Součástka topné spirály

Korund je materiál s vysokým obsahem oxidu hlinitého a vyznačuje se výbornými mechanickými vlastnostmi, především vysokou mechanickou pevností i při vysokých teplotách. Díky tomu nachází korund uplatnění především při výrobě extrémně namáhaných konstrukčních dílů ve strojírenském průmyslu. Korund je materiál s výbornými elektroizolačními vlastnostmi a vysokou tepelnou vodivostí a je žáruvzdorný.

Kromě výjimečných mechanických vlastností se korund vyznačuje také vysokou odolností proti korozivnímu působení agresivních látek, je vysoce otěruvzdorný a zcela hygienicky a zdravotně nezávadný. Korundové materiály lze pokovovat a tvrdě spájet s kovovými armaturami. Jednou z hlavních oblastí tvorby je proto výroba technické keramiky pro strojírenství, čerpací techniku či textilní průmysl, ale i pro použití v zařízeních potravinářského průmyslu, pro zdravotnické přístroje, vakuová i vysokotlaká

zařízení. Ve firmě se dále vyrábí například korundové leštěné technické destičky, tělesa pro elektronky, kluzné kroužky, trysky, otěruvzdorné destičky, balistické destičky či podložky.

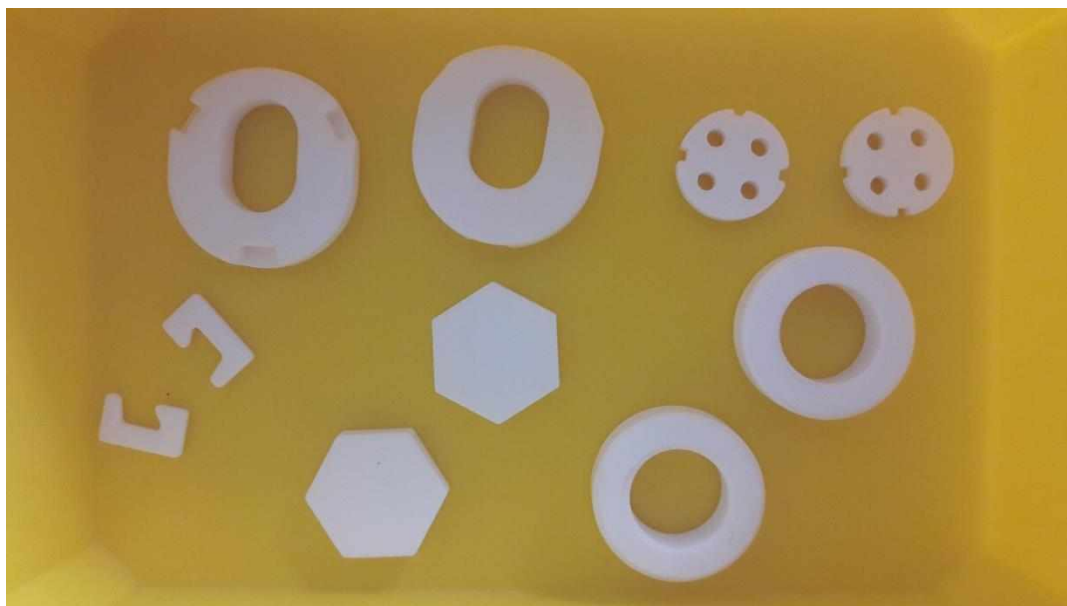
Pro výrobu otěruvzdorných destiček se s úspěchem používá právě korundová keramika s obsahem 92 % Al_2O_3 . Pro některé aplikace lze použít i materiál s obsahem 96 % Al_2O_3 . Korundové otěruvzdorné destičky nacházejí uplatnění hlavně tam, kde je nutná ochrana ploch před otěrem vysoce abrazivními materiály. Keramika dokonale chrání konstrukce před poškozením, například v případě různých dopravníků či násypek. Korundové otěruvzdorné destičky současně brání kontaminaci surovin zejména železem, k čemuž běžně dochází právě u různých dopravníků, zásobníků či dopravních systémů ve sklářském průmyslu.

Destičky jsou vyráběny o rozměrech 10 x 10 mm, 20 x 20 mm, 25 x 50 mm a 50 x 50 mm v tloušťkách od 1,5 do 20 mm. Další variantou jsou šestiúhelníkové destičky SH20 a SH32 s tloušťkou od 4 do 8 mm. Korundové destičky se nejčastěji dodávají nalepené na samolepicí fólii ve formátu 50 x 50 cm (obr. 26).



Obrázek 26: Korundové destičky

Z korundové keramiky s obsahem 96 – 99,7 % Al_2O_3 se vyrábí díly, které slouží například jako těsnicí destičky ventilů, sedla ucpávek, těsnicí kroužky či vodící destičky nití (obr. 27). Tyto technicky náročné keramické díly se musí nejdříve přesně vybrousit a poté funkční plochy naleštit. Drsnost leštěného povrchu R_a bývá v rozmezí 0,1 – 0,3 μm a závisí nejen na technice opracování, ale i na kvalitě použitého materiálu.



Obrázek 27: Těsnící a vodící destičky z korundu

2.2 Steatit s.r.o. Klenčí pod Čerchovem

Ryze česká společnost Steatit s.r.o. nabízí výrobu technické a elektrotechnické keramiky. Výrobky firmy se používají v mnoha průmyslových odvětvích v podnicích po celém světě, a to díky bohaté skladbě materiálů, kdy dokáží plně uspokojit veškeré požadavky zákazníka. Společnost poskytuje služby od návrhu, přes poradenství ohledně materiálů, až po konečnou realizaci samotného výrobku. Firma disponuje vlastní zkušebnou, kde na zkušebních trámcích provádí mechanické zkoušky keramiky [25].

2.2.1 Proces výroby

Hlavní rozdíl oproti malovýrobě Pureceram spol. s r.o. z Hradec Králové je v tom, že přípravu surovin pro výrobu si firma z 80 % provádí sama.

Ve velkých míchacích bubnech (obr. 28) se vyrábí keramická břečka. Tato břečka dále pokračuje do kalolisu, kde se vyrábí kalolisované placky. Placky dále pokračují do vakuolisu, kde se odvzdušní. Vyrobené těsto (obr. 29) pokračuje na proces tažení (obr. 30).

Další možností je, že keramická břečka pokračuje do rozprachové sušárny, kde dojde k rozprášení proti horkému vzduchu a vznikne granulát. Ten se používá pro lisování.



Obrázek 28: Míchačka pro míchání keramické břečky



Obrázek 29: Keramické těsto Kordierit



Obrázek 30: Svislé tažení keramického těsta

Pro úpravu výrobků před výpalem je používáno běžných obráběcích strojů jako jsou vrtačky, pily, automaty na řezání závitů atd. (obr. 31). Častou úpravou keramického povrchu je glazurování (obr. 32). Pro výpal firma používá plynové pece (obr. 33).



Obrázek 31: Obrábění závitů na kotoučové brusce



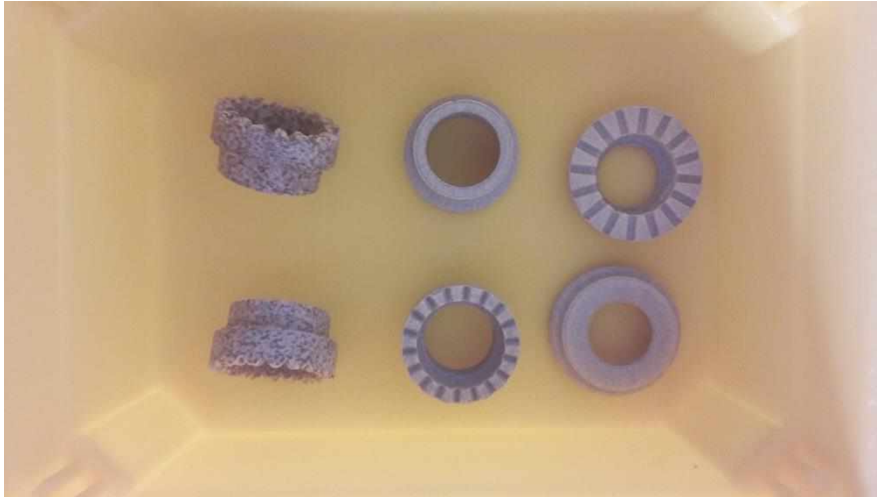
Obrázek 32: Aplikace glazury na podložky pod trafa



Obrázek 33: Výpal v plynových pecích

2.2.2 Výrobky a materiály

Pyrostatové výrobky, kam patří např. svařecí kroužky na jedno použití (obr. 34), které svým tvarem definují svár. Využívají se pro průmyslové odporové sváření větších konstrukcí a celků. Vyrábí se z pyrostatového prášku lisováním.



Obrázek 34: Keramické svařovací kroužky pro určení tvaru sváru z pyrostatu

Dalšími pyrostatovými výrobky jsou nosníky topných drátů (obr. 35), tentokrát vyráběné z pyrostatového těsta tažením. Jsou to buď jednotlivé výrobky, nebo více dílové sestavy držící topný drát, či spirálu. Používají se zejména do ohřívačů kapalin, dále v sušárnách, pro výrobu pecí a pro další průmyslové použití.



Obrázek 35: Nosník topných drátů z tažného pyrostatu

2.3 CeramTec Czech Republic s.r.o. Šumperk

CeramTec má průmyslovou historii, která sahá do roku 1903. V roce 1903 byl založen výrobní závod v německém Marktredwitzu. Původně se specializoval na výrobu porcelánu, později na průmyslovou keramiku, a nakonec na dnešní moderní keramiku. CeramTec Czech Republic s.r.o. jako součást mezinárodního koncernu CeramTec je dodavatelskou a prodejní organizací v oblasti vyspělých keramických výrobků se sídlem v Šumperku.

S více než stoletou zkušeností s vývojem a výrobou je CeramTec předním dodavatelem pokročilé keramiky a konstrukčních dílů těchto materiálů, pro použití v široké oblasti aplikací. Současné portfolio pokrývá více než 10 000 různých produktů a širokou škálu keramických materiálů. Na celém světě působí ve firmě více než 3 500 zaměstnanců [3, 26].

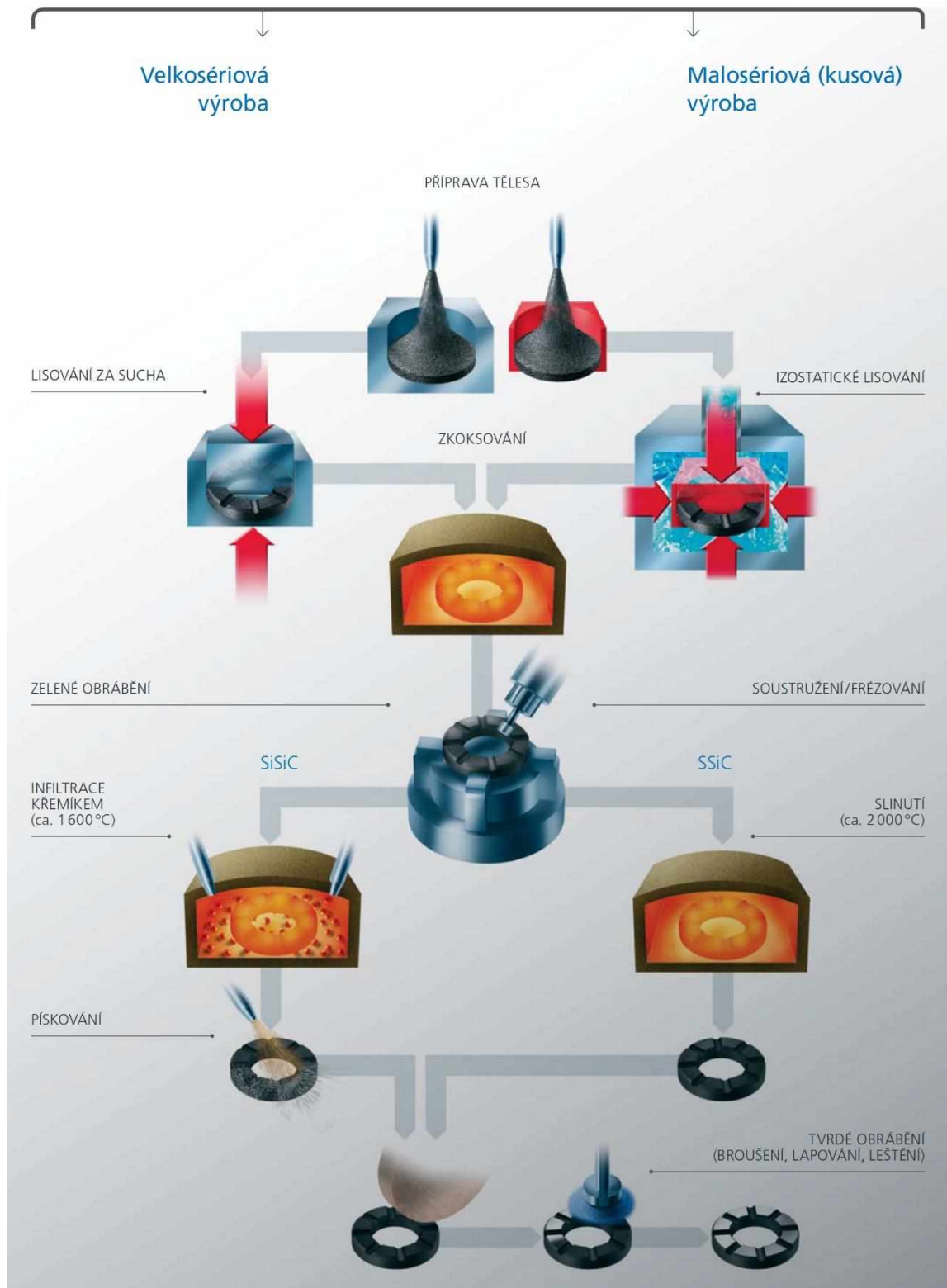
2.3.1 Proces výroby

Proces výroby se nijak neliší od ostatních podniků, jen je zde vše více zautomatizováno. Firma se zaměřuje na výrobu velkých výrobků a tomu odpovídá i mohutnost strojů. Obecně se zde keramika vyrábí tak, že při pokojové teplotě se surová hmota složená převážně z keramického prášku a pojiva formuje do polotuhého polotovaru, který stále není schopen nést jakékoli zatížení. Potom zhoustne za vzniku tvrdé pevné látky během procesu známého jako slinování, čímž se získají typické vlastnosti materiálu.

Na obrázku 36 je vidět proces leštění oxidové keramiky (Al_2O_3). Leštění probíhá již po výpalu a dosahuje se tím vysoké přesnosti styčných ploch. Postup výroby karbidu křemíku je nejlépe vidět na obrázku 37.



Obrázek 36: Leštění oxidové keramiky po výpalu



Obrázek 37: Postup výroby z karbidu křemíku [26]

2.3.2 Výrobky a materiály

Uzavírací a regulační těsnění (obr. 38) vyrobené z keramiky téměř zcela nahrazují konvenční těsnění i u dvouramenných vodovodních baterií. Přesně broušené a leštěné keramické těsnící kroužky zajišťují dlouhou životnost a optimální těsnící schopnost.



Obrázek 38: Těsnící kroužky do vodovodních baterií z Al_2O_3

Těsnící kroužky vyrobené z keramiky se vyznačují složitými tvary a vysokou přesností povrchu pro definovaný průtok vody a jemně nastavitelné úrovně teploty. Přesnost leštěných těsnících ploch je porovnán s broušenými a nebroušenými plochami v tabulce č 8.

Tabulka 8: Technické vlastnosti a tolerance Ceramdisc®

Hrubé součásti	
Obecná tolerance	$\pm 0,8 \%$
Minimální tolerance	$\pm 0,1 \text{ mm}$
Broušené díly	
Tloušťka	$\pm 0,05 \text{ mm}$
R_a	$\geq 0,6 \mu\text{m}$
Rovinnost	$2 - 5 \mu\text{m}$
Leštěné díly	
Tloušťka	$+ 0,03 \text{ mm} / - 0,05 \text{ mm}$
R_a	$0,1 - 0,3 \mu\text{m}$
Povrchová kontaktní plocha podle požadavků	$50 - 80 \%$
Rovinnost	$< 0,6 \mu\text{m}$

Neoxidová keramika – karbid křemíku (SiSiC/SSiC) se chová téměř jako diamant. Nejde jen o nejlehčí, ale také o nejtvrďší keramický materiál, který má vynikající tepelnou vodivost, nízkou tepelnou roztažnost a je velice odolný proti kyselinám a luhům.

Z karbidu křemíku pro průmyslové využití se vyrábí keramické těsnicí kroužky (obr. 39), axiální ložiska a radiální ložiska zajišťují vysoce spolehlivý provoz a dlouhou životnost všude tam, kde jsou čerpány kapaliny nebo stlačen plyn.

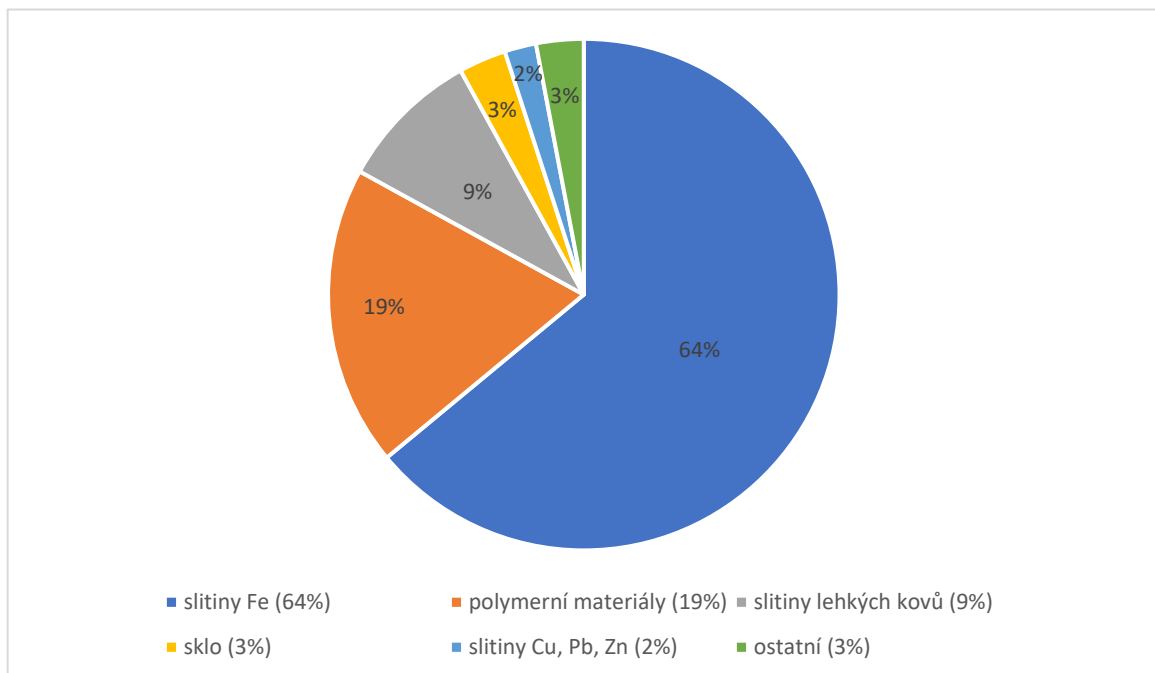


Obrázek 39: Těsnicí kroužky z karbidu křemíku

3 Komparace keramiky a dalších technických materiálů

Komparace je zaměřena především na kompozity, polymery a slitiny kovů. První materiálová skupina, na kterou bude soustředěna pozornost jsou kompozity. Kompozity jsou složeny ze dvou a více složek. Základní složkou soustavy je spojitá fáze zvaná matrice (objemová část) a vyztužující složkou zvanou disperze (vlákna, kuličky, whiskery atd.). Kompozity obsahují různé skupiny technických materiálů od kovů, polymerů až po keramiku. Kovové materiály se skládají z kovových prvků (Fe, Cu, Al, Au atd.). Není možné vyrobit čistý kov a vždy se jedná o slitiny více kovů, nebo kovu a nekovu. Příměsi v kovu jsou buď nečistoty nebo se přidávají záměrně, aby se zlepšily zejména mechanické vlastnosti. Tomuto záměrnému přidávání příměsí se říká legování. Kovy mají různorodé fyzikální a mechanické vlastnosti, proto budou uvedeny vlastnosti, které jsou společné pro všechny kovy. Jsou to tvárnost (kujnost), elektrická a tepelná vodivost a kovový lesk, odrazivost viditelného záření.

Využití několika druhů materiálů v praxi je ukázáno na demonstrativním příkladu, na jednom z nejužívanějších automobilů na českých silnicích, Škodě Octavii. Na grafu 1 je v jednotlivých procentech vidět zastoupení daných typů materiálů.



Graf 1: Hmotnostní zastoupení různých materiálů u osobního automobilu Škoda Octavia 1,9 TDI (74kW), rok výroby 2005 (získáno osobním sdělením technického oddělení firmy Škoda Auto, a.s.) [27]

Tabulka 9: Porovnání různých skupin materiálů [27]

Vlastnost	Kovy	Polymery	Skla	Keramika
Hustota	Nízká až vysoká	Velmi nízká	Nízká až střední	Nízká až vysoká
Tvárnost	Dobrá	Dobrá	Špatná	Špatná
Tvrdość	Nízká až vysoká	Nízká	Vysoká	Vysoká
Pevnost	Nízká až vysoká	Nízká	Nízká	Nízká až střední
El. Vodivost	Vysoká	Nízká	Nízká	Nízká
Tepelná vodivost	Vysoká	Nízká	Střední	Střední
Žáruvzdornost	Nízká až střední	Velmi nízká	Nízká až střední	Vysoká
Recyklovatelnost	Dobrá	Špatná	Dobrá	Dobrá

V dnešním konstrukčním materiálovém řešení stále převládají kovy, ale již nevyhovují náročnějším požadavkům, které vyžadují dosažení vyšších parametrů, spolehlivosti a životnosti konstrukcí, mechanické odolnosti a jiných specifických parametrů. Porovnání různých skupin materiálů je ukázáno v tabulce 9. Kovové materiály jsou často stále více nahrazovány kompozitní materiálovou skupinou. [28].

Tabulka 10: Vlastnosti některých používaných kovových matic pro kompozity [28]

Na bázi	Slitina	Měrná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [GPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Měrná pevnost $[R_m/\rho]$	Měrný modul pružnosti $[E/\rho]$	Tažnost A [%]
Al	AlCu4Mg	2770	0,490	70	0,177	25,3	15
	AlZn4Mg1	2720	0,380	70	0,140	25,7	10
	AlMgSi	2700	0,320	70	0,118	25,9	10
Mg	MgLi8	1500	0,220	40	0,146	26,6	16
	MgZn6Zr	1800	0,340	45	0,191	25,0	12
	MgAl3Zn	1800	0,427	45	0,233	25,0	10
Ti	TiAl6V4	4430	0,910	112	0,20	25,3	13
	TiV13Cr11Al13	4510	0,880	116	0,19	25,7	15
	TiMo11Zr5Sn5	5060	1,370	105	0,27	20,7	11
Ni	HastelloyX	8950	0,85	240	0,09	26,8	37
	Udimet	7950	1,52-2,33	220	0,18-0,29	27,8	-
	Superslitiny	8300	1,5	192	0,18	23,1	16

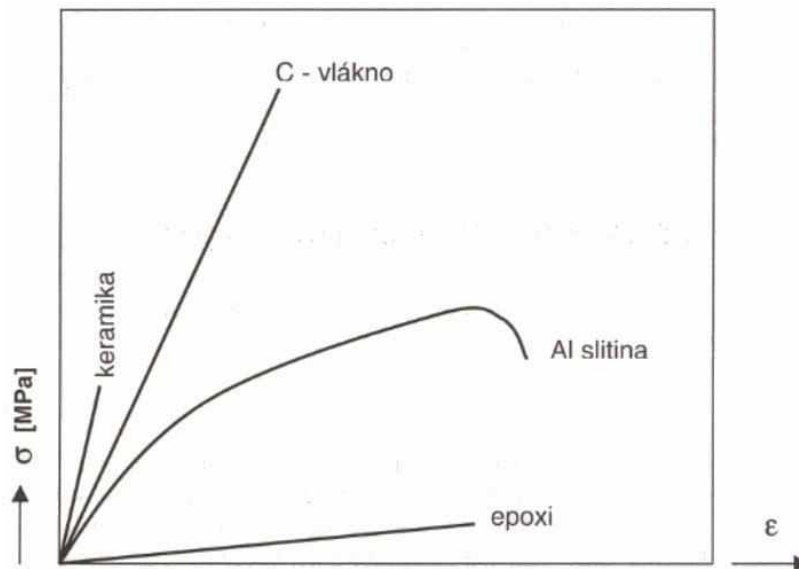
Tabulka 11: Vlastnosti některých termoplastů pro matrice kompozitu [28]

Název	Zkratka	Měrná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [Mpa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Teplota tání T_m [°C]	Teplota skelného přechodu T_g [°C]	Vlastnosti
Polyamid 6	PA6	1130	70-85	1,2-1,4	220	40	Navlhavý
Polyamid 66	PA66	1140	77-84	1,6-2,0	265	65	Navlhavý Větší tepelná odolnost
Polyamid 12	PA12	1020	45-60	1,5-1,8	175	20	Málo navlhavý, nízká tepelná odolnost
Polyethylen s vysokou hustotou	PE-HD	950	25-34	0,7-1,7	130	-120	Použitelný do teploty kolem 80 °C
Polyethylen s nízkou hustotou	PE-LD	920	8-28	0,1-1,1	110	-120	Použitelný do teploty kolem 80 °C
Polypropylen	PP	920	30-38	1,1-1,3	160	-24	Křehne při nízkých teplotách
Polyimid	PI	1420	75-95	3,2		265	Vysoká tepelná odolnost
Polykarbonát	PC	1200	56-72	2,1-2,4	220	114	Vyšší tepelná odolnost
Polyetereterketon	PEEK	1320	70-103	2,25	288	185	Vysoká tepelná odolnost, výborná chemická odolnost
Polystyren	PS	1050	36-65	2,3-3,3		90	

Tabulka 12: Technická keramika a nekovová skla pro matrice kompozitu [28]

Název	Chemická značka	Měrná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Pevnost			Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Lomová houževnatost K_{Ic} [MPa.m ^{1/2}]	Maximální teplota použití [°C]
			V tahu [GPa]	V tlaku [GPa]	V ohybu [GPa]			
Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	3300-4000	0,2	0,35-2	0,28-0,4	350-420	3,5-5,0	1800
Nitrid křemíku	Si ₃ N ₄	2500-3300	0,1-0,9	~0,3	0,22-0,85	160-300	4,0-6,0	1500
Nitrid-oxidová keramika Sialon	Si ₄ Al ₂ -O ₂ N ₆	3000-3200			0,35-0,9	230-300	3,0-7,7	1500
Karbid křemíku	SiC	2200-3200	0,5	2	0,3-0,55	280-400	2,5-5,0	2100
Částečně stabilizovaný ZrO ₂	ZrO ₂ (PSZ)	5700-5800	0,12	0,76-6	0,6-1,5	200-250	6,0-9,5	1100
Polykrytalický tetragonální ZrO ₂	ZrO ₂ (TZP)	6000-6100	0,25-0,5		>2	200	15	1100
grafit	C	2200	0,070-0,14	0,2-0,6	0,0415	690		3650
A-sklo		2480		3,1		74	0,5	
E-sklo		2540		3,5		77		

V tabulce 10, 11 a 12 je porovnána měrná hmotnost, pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu u materiálů používaných pro matrice kompozitu. Je vidět, že s pevností v tahu jsou na tom nejlépe slitiny niklu a titanu. Matrice, respektive základní kámen kompozitu z keramiky je zajímavý z hlediska modulu pružnosti v tahu. Materiály s větším modulem pružnosti mají menší deformace při stejném napětí v tahu [29]. Na obrázku 40 je vidět, jaká je závislost napětí na poměrném prodloužení vybraných materiálů.



Obrázek 40: Křivky napětí - poměrné prodloužení kovové, polymerní a keramické matrice v porovnání s uhlíkovým vláknem [28]

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky, v jejichž veliké molekule (makromolekule) se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka. Představují tedy chemickou stavebnici, která umožňuje neobyčejnou proměnlivost struktur i vlastností výsledných látek. Syntetické polymery vyvinuté v první polovině 20. století umožnily rozvoj plastikářského průmyslu, gumárenství, výroby syntetických vláken, průmyslu folii a obalů, průmyslu nátěrových hmot a kompozitních materiálů, které ovlivnily vývoj od letectví až po sportovní výzbroj. Polymery jsou chemické látky, které vykazují díky svým obrovským molekulám neobvykle širokou škálu vlastností. Polymery se dělí na elastomery a plasty. Elastomer je vysoce elastický polymer, který lze za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Tato deformace je převážně vratná. Dominantní skupinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryže. Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu opakovaně vratná, nazýváme tyto polymery termoplasty. Pokud jde o změnu nevratnou, protože výsledkem je chemická reakce mezi molekulami většinou za zvýšené teploty, mluvíme o reaktoplastech (termosety, pryskyřice) [30].

Tabulka 13: Hodnoty pevností různých materiálů [31]

Materiál	Pevnost (MPa)	Materiál	Pevnost (MPa)
Al (99,5 %, vyžíhaný) ¹	70	Porcelán ¹	17
Cu (99,95 %, vyžíhaná) ¹	200	Porcelán ²	60
AlCu4Mg1 (vytvrzená) ¹	450	Porcelán ³	350
Ocel (0,2 % C, vyžíhaná) ¹	400	Korund (Al ₂ O ₃) ¹	200
TiAl6V4 (vytvrzená) ¹	1200	Korund (Al ₂ O ₃) ²	350
Vysoce pevná maraging ocel ¹	3000	Korund (Al ₂ O ₃) ³	2600
Polyethylen ¹	20	Karbid křemíku (SiC) ²	500
Polystyren ¹	40	Karbid křemíku (SiC) ³	3000
Polyvinylchlorid ¹	50	Polyamid-vlákna (Kevlar) ¹	3000
Polyamid 66 ¹	90	Sklo – vlákna ¹	2000
Styren-butadienový kaučuk ¹	25	Uhlík – vlákna ¹	3000
Sodno-vápenaté sklo ¹	70	Al ₂ O ₃ – vlákna ¹	1400
¹ pevnost v tahu, ² pevnost v ohybu, ³ pevnost v tlaku			

Tabulka 13 porovnává materiály z hlediska pevností. U houževnatých materiálů je pevnost v tahu a tlaku podobná. Ale jak je vidět z tabulky, pevnost v tahu a tlaku u keramických materiálů je rozdílná. Keramický materiál vévodí v pevnosti v tlaku a tomu je potřeba přizpůsobit aplikaci keramiky z hlediska pevnosti. U porovnání tažnosti a relativního prodloužení (tab. 14) vévodí polymery. Keramický materiál naopak bude použit všude tam, kde je prodloužení nežádoucí.

Tabulka 14: Hodnoty tažnosti A a relativních prodloužení při přetržení ϵ_u vybraných materiálů [31]

Materiál	A (%)	Materiál	ϵ_u (%)
Al (99,5 %, vyžíhaný)	30	polyethylen	100 – 600
Ocel (0,2 % C vyžíhaná)	20	Polyvinylchlorid	40 – 80
Ocel (0,8 % C, vyžíhaná)	10	Fenolformaldehydová pryskyřice	2
Ocel (0,8 % C, zušlechťená)	2	Kaučuky	100 – 1000
AlCu4Mg1 (vytvrzená)	5	Skla, keramika	< 1

Tabulka 15: Tvrdosti vybraných materiálů [31]

Materiál	Tvrdost	Materiál	Tvrdost
Al (99,5 %, vyžíhaný)	20 HB	Sodno-vápenné sklo	500 HV
AlCu4Mg1 (vytvrzená)	130 HB	Korund (Al ₂ O ₃)	2000 HK
Ocel (0,2 % C, vyžíhaná)	150 HB	Karbid křemíku (SiC)	2500 HK
Ocel (0,5 % C, kalená)	700 HV	Diamant	~7000 HK
Metody tvrdosti: HB – Brinellova, HV – Vickersova, HK – Knoopova			

Na závěr je uvedena tabulka 15, kde z hlediska tvrdosti dosahuje nejlepších výsledků keramika. Tvrdost je hlavní vlastností technické keramiky pro použití v praxi. Dalšími vlastnostmi jsou odolnost vůči abrazi a korozi, žáruvzdornost a jiné vlastnosti, které předurčují keramiku pro použití v náročných technických aplikacích.

3.1 Diskuze

V předchozí kapitole jsou uvedeny vlastnosti vybraných technických materiálů jako jsou slitiny kovů, polymery a keramika v jednotlivých tabulkách. Porovnávat materiály mezi sebou je dle použití dost nekorektní a zavádějící. Každý technický materiál má své uplatnění v praxi pro různé použití. Například pro pružné uložení motoru, kde se používají silentbloky, nenajde uplatnění keramika, která je tvrdá a křehká, ale pryž, která je pružná. Bude-li hledán tvrdý materiál, pryž své uplatnění nenajde, ale z tvrdých materiálů bude vybrán karbid křemíku z materiálové oblasti keramika. Pro vhodnou aplikaci jednotlivých druhů materiálu je nutné si stanovit počáteční vlastnosti výrobku. V tabulkách 10, 11 a 12 jsou vybrané druhy materiálu porovnány dle mechanických vlastností, a to pevnosti v tahu, pružnosti a měrné hmotnosti. Pevnost v tahu R_m u Si_3N_4 je až 900 MPa, u nejpevnějšího polymeru (tab. 11) polyetereterketon jen 103 MPa, kdežto u běžně používaných polymerů polyethylen a polypropylen je pevnost v tahu R_m jen zhruba okolo 30 MPa. Volba vhodného materiálu pro danou aplikaci je složitý proces, který nezávisí jen na mechanických vlastnostech, ale také na výrobních nákladech. V praxi je možno se setkat s mnoha materiály, které jsou nahrazovány materiály s lepšími vlastnostmi. Kovové materiály jsou dost často nahrazovány keramikou, a to nejen v high - end technologiích, ale také v běžném životě. Příkladem může být vodovodní baterie, kde je dnes už běžně využívána technická keramika pro těsnění a míchání teplé a studené vody, protože výrobky z Al_2O_3 dosahuje až $0,1\mu m$ drsnosti povrchu po vyleštění a tím styčné plochy keramiky vodu dostatečně utěsní. Keramika také nahrazuje kovy v textilním průmyslu, například vodička nití i pro její vyšší cenu. Důvodem je větší odolnost proti mechanickému poškození a tepelnému namáhání, a tudíž je její životnost vyšší. Cena za kus je vyšší, ale cena v porovnání s výdrží se několikanásobně sníží. Dalším příkladem, kde keramika nachází uplatnění, jsou např. čerpací stanice ropných věží, kde karbid křemíku nahrazuje kovová ložiska.

4 Didaktická pomůcka

Didaktická pomůcka ve formě vzorků uložených v kufříku (obr. 41) je sestavená z keramických prášků, keramického těsta (koláče), keramických výrobků před výpalem, keramických výrobků po výpalu a z finálních leštěných výrobků. Vzorky keramiky (materiál pro výrobu a výrobky) jsou Steatit, Kordierit, Korund, Pyrostat a Pyrostat tažný - u tohoto vzorku vzniká problém s uskladněním (při normální teplotě a vlhkosti tvrdne, pro výrobu je použito plastické těsto). Jednotlivé vlastnosti vzorků jsou uvedeny v tabulce 16. Z těchto surovin jsou za pomoci lisu nebo tažného stroje vyrobeny polotovary, které jsou velmi křehké, a proto jsou uloženy v bublinkové fólii. Pro použití při výuce je potřeba dbát zvýšené opatrnosti, polotovary se mohou velice snadno rozpadnout. Další fází, kterou polotovary prodělaly je výpal. Po výpalu jsou výrobky již tvrdé a snesou běžnou manipulaci. Posledními vzorky jsou výrobky leštěné, které po přiložení k sobě a vytlačení vzduchu vykazují soudržnost a těsnost.

Tabulka 16: Vlastnosti keramických materiálů, uložených v kufříku

Materiál	Objemová hmotnost [g/cm ³]	Otevřená pórovitost [%] obj.	Pevnost v ohybu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tepelná vodivost (20 – 100 °C) [W/m.K]	Relativní permitivita 48 Hz – 62 Hz	Vnitřní rezistivita (20 °C) [Ω.cm]
Steatit	2,4	0,5	85	80	1,4 – 1,8	5 – 7	10 ¹²
Kordierit	1,9 – 2	20	25 – 30		1,3 – 1,8	5 – 7	10 ¹²
Pyrostat tažný	2	12	20		1,6 – 1,8		10 ¹¹
Pyrostat lisovací	2	12	25		1,9 – 2		10 ¹¹
Korund	3,65 – 3,9	0	230 – 330	300 – 350	16 – 28	9	10 ¹⁴



Obrázek 41: Didaktická pomůcka pro výuku technické keramiky

Závěr

- Byla nastudována odborná literatura zabývající se keramikou, keramickými materiály a výrobou.
- Byla vypracována podrobná rešerše z oblasti technické keramiky.
 - Byl přinesen ucelený přehled keramiky dle použití, chemického složení, až po keramické suroviny.
 - Byly zpracovány jednotlivé vlastnosti keramických materiálů.
 - Byl popsán proces výroby keramiky.
- Byly získány informace o výrobě keramiky v praxi v České republice.
 - Bylo navštíveno několik výroben technické keramiky v ČR.
 - Byla domluvena a provedena exkurze ve výrobním provozu těchto firem.
 - Byly získány vzorky jednotlivých druhů materiálů, které tyto firmy používají.
 - Byly získány vzorky výrobků pro zpracování výukového materiálu.
- Byla provedena komparace keramiky s jednotlivými druhy materiálů.
 - Byla provedena komparace jednotlivých druhů materiálů používaných pro výrobu kompozitních materiálů.
 - Bylo provedeno srovnání tvrdostí a pevností vybraných druhů materiálů.
- Byla sestavena demonstrační didaktická pomůcka s jednotlivými vzorky keramických materiálů pro výuku technické keramiky.
 - Byly nastudovány vhodné možnosti ukládání získaných vzorků.
 - Byla zakoupena pomůcka „kufřík“ pro uložení keramických vzorků.
 - Keramické vzorky byly uloženy v „kufříku“ a připraveny pro výuku technické keramiky.

Seznam použité literatury

- [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] HANYKÝŘ, Vladimír a Jiří HAVRDA. *Speciální technologie keramiky I.* 2. přepr.vyd. Praha: VŠCHT, 1991. ISBN 80-7080-135-2.
- [3] *Ceramtec* [online]. [cit. 2020-04-04].
Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/downloads/tag/materials/>
- [4] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů.* Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [5] LACH, Vladimír. *Keramika.* 3. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0332-2.
- [6] HANYKÝŘ, Vladimír. *Technologie keramiky.* Hradec Králové: Vega, 2000. ISBN 80-900860-6-3.
- [7] GREGEROVÁ, Miroslava. *Petroarcheologie keramiky v historické minulosti Moravy a Slezska.* Brno: Masarykova univerzita, 2010. ISBN 978-80-210-5168-3.
- [8] GULEVIČ, Oleg a Václav KOUBA. *Technická keramika, glazury a keramické barvy: učební text pro 4. ročník středních průmyslových škol keramických.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969. Řada sklářské literatury.
- [9] HANYKÝŘ, Vladimír, Jiří HAVRDA a Zdeněk TRÁVNÍČEK. *Speciální technologie keramiky II.* Praha: VŠCHT, 1989. ISBN 80-7080-013-5.
- [10] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [11] POSPÍŠIL, Zdeněk a Aleš KOLLER. *Jemná keramika: Úvod a základy technologie.* Praha: SNTL, 1981.
- [12] NOVÁ, Ilona a Věra HÁJKOVÁ. *Porcelán a keramika pro 2. a 3. ročník SOU: učební text.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [13] REZEK, Jiří. *Stroje pro výrobu porcelánu.* Praha: Silikátový svaz, 2003. Učebnice pro střední odborné školy (Silikátový svaz). ISBN 80-903113-9-3.
- [14] HERAINOVÁ, Marcela. *Příprava pracovních směsí a tvarování keramických výrobků.* Praha: Silikátový svaz, 2003. Učebnice pro střední odborné školy (Silikátový svaz). ISBN 80-903113-8-5.
- [15] MACEK, Tomáš. *Keramika.* Brno: Computer Press, 2007. Tradiční řemesla (Computer Press). ISBN 978-80-251-1568-8.
- [16] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění.* Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [17] TICHÝ, Oldřich. *Tepelná technika pro keramiky.* Praha: Silikátová společnost České republiky, 2004. ISBN 80-02-01570-3.
- [18] TICHÝ, Oldřich. *Pálení keramiky.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [19] ŠNUPÁRKOVOU, Leonoa. Kcdoupe. www.kcdoupe.cz [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://www.kcdoupe.cz/cs/prakticke-informace-o-keramicke-tvorbe/vypal/vypal-keramiky/>
- [20] HERAINOVÁ, Marcela. *Sušení a výpal.* Praha: Silikátový svaz, 2003. Učebnice pro střední odborné školy (Silikátový svaz). ISBN 80-903113-7-7.

- [21] VALCHÁŘ, Jaroslav. *Sušení v chemickém průmyslu*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1967. Metody a pochody chemické technologie.
- [22] ŽÍLA, Karel. *Průvodce keramika*. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0920-1.
- [23] *Elektrické odporové pece* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6978784-Odporove-topne-clanky-elektricke-odporove-pece.html>
- [24] PURECERAM, spol. s r.o. <http://www.pureceram.com/> [online]. [cit. 2020-04-04].
- [25] Steatit s.r.o. <https://www.steatit.cz/> [online]. [cit. 2020-04-04].
- [26] CeramTec Czech Republic s.r.o. <https://www.ceramtec.cz/> [online]. [cit. 2020-04-04].
- [27] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [28] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
- [29] Modul pružnosti v tahu. *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Modul_pru%C5%BEnosti_v_tahu
- [30] WEISS, Viktorie a Elena STŘIHAVKOVÁ. *Polymery*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2014. ISBN 978-80-7414-738-8.
- [31] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.