



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV PLASTIFIKÁTORU NA TECHNOLOGII ZPRACOVÁNÍ A VLASTNOSTI SLINOVANÉHO KERAMICKÉHO MATERIÁLU NA BÁZI SIC

ON THE INFLUENCE OF PLASTICIZER AT THE TECHNOLOGY OF
PROCESSING AND PROPERTIES OF THE SINTERED SIC CERAMICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jan Skokan

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Skokan

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv plastifikátoru na technologii zpracování a vlastnosti slinovaného keramického materiálu na bázi SiC

v anglickém jazyce:

On the influence of plasticizer at the technology of processing and properties of the sintered SiC ceramics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vliv plastifikátoru na technologii zpracování a vlastnosti slinovaného keramického materiálu na bázi SiC, jeho dalšího zpracování, včetně experimentálních zkoušek.

Cíle diplomové práce:

Úvod

1. Teoretický rozbor problému účinku plastifikátoru na technologii zpracování a vlastnosti slinovaného keramického materiálu na bázi SiC
2. Specifikace laboratorních a experimentálních zkoušek
3. Experimentální zkoušky
4. Diskuze výsledků
5. Závěry

Vliv plastifikátoru na technologii zpracování a vlastnosti slinovaného keramického materiálu na bázi SiC, jeho dalšího zpracování, včetně experimentálních zkoušek.

Seznam odborné literatury:

Teti, R. Machining of Composite Materials CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 2, 2002, pp. 611-634

Davim J. Paulo. Diamond tool performance in machining metal-matrix composites

Journal of Materials Processing Technology, Volume 128, Issues 1-3, 6 October 2002, pp.100-105

M El-Gallab, M Sklad. Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites part III: comprehensive tool wear models. Journal of Materials Processing Technology, Volume 101, Issues 1-3, 14 April 2000, Pages 10-20

LIN, G.Y. and LEI, T.C. Microstructure, Mechanical Properties and Thermal Shock Behaviour of Al₂O₃+ZrO₂+SiCw Composites. Ceramics International. Vol. 24, 1998, pp. 313-326.

Schrader, G.F., Elshennawy A.K., Doyle, L.E. Manufacturing processes and materials. [vid. 20. listopadu 2014]. Dostupné na World WideWeb: <http://books.google.cz/books?id=Nz2wXvmkAF0C&pg=PT214&dq=metal+casting+materials+isbn&hl=cs&ei=bnLJTSD1Mir1sgbtoejqBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CEgQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false>

Caroline J.E Andrewesa., Hsi-Yung Fenga, W.M Laub. Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts. Journal of Materials Processing Technology. Volume 102, Issues 1-3, 15 May 2000, Pages 25-29

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá mírou ovlivnění vlastností a technologie obrábění úpravou základního složení granulátu při výrobě technické keramiky. Je popsána série experimentů, které se aplikují na jednotlivé fáze výroby. Granuláty, jejichž složení se liší použitým plastifikátorem, patří mezi tzv. RTP (ready-to-press) materiály. Cílem práce je doporučit granuláty RTP pro další zkoumání vedoucí k jejich zařazení do portfolia firmy.

Klíčová slova

technická keramika, karbid křemíku, RTP materiál, ready-to-press, slinování, obrábění

ABSTRACT

This master's thesis deals with an influence of physical properties and machining technology at adjustment to the basic composition granules and production of technical ceramics. Selected series of experiments have been applied to the different phases of production. Composition of the granules vary according to the used plasticizer and ranks to RTP (ready-to-press) materials. The goal of this thesis is recommendation to the production of RTP granules and next experiments.

Key words

Technical ceramic, silicon carbid, RTP material, ready-to-press, sintering, machining

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKOKAN, J. *Vliv plastifikátoru na technologii zpracování a vlastnosti slinovaného keramického materiálu na bázi SiC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 91 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv plastifikátoru na technologii zpracování a vlastnosti slinovaného keramického materiálu na bázi SiC** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jan Skokan

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat prof. Ing. Miroslavu Piškovi, CSc. za cenné rady a připomínky spojené s vypracováním této práce.

OBSAH

Obsah	8
Úvod.....	10
1 Technická keramika	12
1.1 Historie	12
1.2 Druhy technické keramiky	12
1.3 Vlastnosti technické keramiky	13
1.3.1 Mechanické vlastnosti.....	16
1.3.2 Tvrdost	19
1.3.3 Termomechanické vlastnosti	20
1.3.4 Koroze.....	22
1.3.5 Opatření a tribologie	23
1.4 Vlastnosti karbidu křemíku SiC	26
1.4.1 SiSiC – křemíkem infiltrovaný karbid křemíku	26
1.4.2 SSiC – slinovaný karbid křemíku	27
1.5 Výroba technické keramiky	29
1.5.1 Surový materiál a aditiva	29
1.5.2 Příprava surového materiálu a granulátu	29
1.5.3 Formování materiálu.....	30
1.5.4 Od formování k výpalu	33
1.5.5 Rozměry a smrštění	37
1.5.6 Obrábění.....	38
1.5.7 Charakteristika povrchu	43
1.6 Aplikace keramických materiálů.....	45
1.6.1 Textilní průmysl.....	45
1.6.2 Zpracování kovů	45
1.6.3 Ochrana proti opotřebení ve strojírenských závodech.....	49
1.6.4 Chemické, energetické a environmentální technologie	49
1.6.5 Elektronika.....	51
1.6.6 Balistická ochrana.....	52
1.6.7 Automobilní průmysl.....	52
1.6.8 Zdravotnické aplikace	53
2 Vliv plastifikátoru na SSiC a SiSiC	55
2.1 Návrh experimentálních zkoušek	55
2.1.1 Lisování	55

ÚST FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List	9
-------------	-----------------	------	---

2.1.2	Sušení.....	55
2.1.3	Zelené obrábění.....	55
2.1.4	slinování.....	55
2.1.5	Keramografie	55
2.2	Výroba a experimentální zkoušky.....	56
2.2.1	Příprava substrátů	56
2.2.2	Lisování	59
2.2.3	Vytvrzování a zkoksování	61
2.2.4	Zelené obrábění.....	63
2.2.5	Slinování	75
2.2.6	Keramografie	80
3	Shrnutí a diskuze výsledků	85
	Závěr	87
	Seznam použitých zdrojů.....	89
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	91

ÚVOD

Keramické materiály se řadí mezi neorganické a nekovové látky. Obecně se tvoří ze surové hmoty za normálních podmínek a své specifické vlastnosti získávají až vysokoteplotním výpalem.

S keramickým materiálem se dnes lze setkat ve většině odvětví. Počínaje keramickými nádobami v domácnosti, přes komponenty v elektrotechnice, konstrukční a dělicí materiál v technických oborech až po aplikace ve zdravotnictví jako biokompatibilní a inertní materiál.

Tato práce se zabývá technickou keramikou. Ta se od tradiční keramiky liší základním složením, které není založeno na jílu, ale převážně na oxidech, karbidech a dalších materiálových skupinách. Díky tomu poskytuje veliké spektrum vlastností, které lze ovlivnit při přípravě základního složení a umožňuje aplikaci i v nejnáročnějších podmínkách. Jako příklad lze uvést těsnicí a kluzná hřídelová ložiska, trysky a prvky turbín v elektrárnách, balistická a tepelná ochrana. Miniaturizace v elektronických obvodech není založena pouze na křemíku jako polovodiči, nýbrž také na keramických substrátech, které umožňují návrh kompaktních obvodů.

Dnešní výrobky z technické keramiky jsou často dražší než kovové. Musí se však zvažovat ekonomická výhodnost celého systému obsahujícího některý z keramických materiálů. Toto řešení má výhodu v minimální potřebě údržby, oprav a díky minimálnímu opotřebení.



Obr.1 Příklady výrobku z technické keramiky [1].

Cesta ke konečnému výrobku začíná přípravou prášku, který se poté lisuje, tepelně předzpracovává, obrábí v zeleném stavu, slinuje a obrábí na konečný rozměr. Pro umožnění slisování prášku se přidává plastifikátor. Běžně se využívá škrobů, ty je nutné

následně zkoksovat a získat tak anorganický materiál. Zkoksování probíhá za vysoké teploty po dobu několika hodin, což není z ekonomického a časového hlediska příznivé.

Pro zlepšení a zrychlení výrobního procesu se snahy výrobců ubírají směrem odstranění nebo alespoň omezení fáze zkoksování. Toho lze dosáhnout volbou alternativního plastifikátoru. Na dalších stránkách této práce bude proveden rozbor aplikací těchto materiálů na bázi akrylových pryskyřic a PVA/PEG. Dále určení míry, jakou ovlivní výrobní proces a vlastnosti materiálu. Na základě zjištěných skutečností bude rozhodnuto o vhodnosti materiálů pro výrobu ve firmě CeramTec Czech Republic.

V úvodních kapitolách práce se vyskytují některé pojmy, které budou podrobně vysvětleny dále, pro pochopení problematiky se zde uvádí alespoň stručné vysvětlení [2]:

- zelené těleso – těleso tvořené slisovaným základním materiálem, které stále obsahuje organické složky,
- zelené obrábění – obrábění tělesa v zeleném stavu,
- zkoksování – proces výroby, při kterém dojde k přeměně organických látek v anorganické, konkrétně v uhlík.

1 TECHNICKÁ KERAMIKA

1.1 Historie

Výrobky z keramiky provázejí člověka již od pravěku. Nejstarší nálezy figur z keramiky vytvrzené v ohni archeologové datují do období před 24 000 lety. První manufaktury vznikly v Mezopotámii a Indii před 14 000 lety a v Evropě vznikly první použitelné keramické nádoby před 8 000 lety [2,3].

Až do konce středověku se při tavbě kovů využívalo pecí vytvořených pískovcem s kaolinitovým nebo křemičitým pojivem. Základním kamenem průmyslové revoluce se stal objev žáruvzdorných materiálů okolo roku 1550, čímž vznikly podmínky vhodné pro tavení kovů a skel i v průmyslovém měřítku [2,3].

Průmyslová keramika nalezla obrovské uplatnění v chemickém průmyslu, kde se využívalo kyselinám odolné kameniny a porcelánu jako jediné ochrany proti korozi. V 19. století se hybnou silou průmyslového vývoje stala elektro-keramika, kdy byly vytvořeny základy elektrických izolátorů na bázi porcelánu. Objev elektrické žárovky v polovině 19. století poprvé zaznamenal použití keramického materiálu na poli technologickém [2,3].

Potřeba materiálu, který by se vlivem vysokofrekvenčního elektromagnetického pole nezahříval (v rádiovém vysílání) vedlo k vytvoření steatitu a forsteritu. Spolu s nimi vznikaly další keramické materiály, jako oxidy titanu, perovskit (piezoelektrické vlastnosti), magnetické oxidické materiály (tvrdé a měkké ferity), a další, které našly své uplatnění v elektrotechnice (senzory, filtry, polovodiče,...). Teoretické úvahy jsou odvozeny z výzkumů Heisenberga, Heitlera, Londase, Hartreho, Focka a dalších [2,3].

S rozvojem spalovacích motorů vznikly zapalovací svíčky vyrobené ze slinovaného alumina (Al_2O_3). Poptávku po tomto materiálu také zvýšila potřeba odolných materiálů v mikro-elektronice, např. pro substráty a pouzdra [3].

Zatímco termomechanické vlastnosti alumina již byly dostatečně popsány, jeho mechanické vlastnosti teprve čekaly na objevení, proto se stanovily základy lomové mechaniky [2].

Oxidy zirkonu a hliníku se používaly jako první konstrukční keramické materiály. Vlastnosti plynoucí z kovalentních vazeb materiálů na základě křemíku (SiC , SiN , SiAlON ,...) byly objeveny v 60. letech 19. století a jejich výzkum stále pokračuje [2,3].

Pro porozumění vztahu mezi mikrostrukturou materiálu a způsobem tváření vzniklo několik matematických metod a počítačových simulací, které doplňují poznatky z lomové mechaniky. Paralelně s teoretickým výzkumem probíhá i výzkum praktický, kdy se upravují stávající či zavádí zcela nové procesy tváření, slinování a obrábění. Vývoj těchto materiálů postupuje velmi rychle dopředu, postupy používané před deseti lety dnes nevyhovují a původní výrobky by dnes nebyly aplikovatelné. Jedním z nových výrobních postupů materiálu na základě SiC se zabývá i tato práce.

1.2 Druhy technické keramiky

Technickou keramiku lze rozdělit do tří základních skupin dle mineralogického a chemického složení. A to na křemičitou, oxidickou a neoxidickou.

Křemičitá keramika zastupuje největší část keramických produktů. Jako nosná matrice se využívá jílu a kaolínu, zdrojem křemíku je mastek a živec. Pro dosažení speciálních vlastností se do směsi přidává alumina a zirkon. slinováním dochází ke vzniku skleněné fáze (do 20 %) spolu s fází krystalickou. Do této skupiny spadá porcelán, steatit, cordierit a mullit [1,2].

Vzhledem k použití přírodních materiálu a nízkým teplotám zpracování představuje křemičitá keramika nejlevnější variantu. Využití našla v tepelném inženýrství, jako elektrické izolátory, katalyzátory a převážně jako žáruvzdorný materiál [1,2].

Do *oxidické keramiky* se řadí většina jedno-fázových a jedno-komponentních oxidů kovů. Skleněná fáze se téměř nevyskytuje. Velmi dobré vlastnosti jsou způsobeny vysokými slinovacími teplotami a precizní přípravou surového syntetického prášku. Tuto skupinu lze dále rozdělit na podskupiny s jedno-materiálovým systémem a s více-materiálovým systémem, u kterého se rozlišuje míchaná a disperzní keramika. Do první skupiny se řadí např. oxidy hliníku, hořčíku a dioxid zirkonu. Titanát hliníku a olovo-zirkon-titanát spadají do míchané keramiky, disperzní pak zastupuje oxid hlinitý zesílený oxidem zirkoničitým [2].

Neoxidická keramika obvykle obsahuje vysoký podíl kovalentních vazeb, čímž je umožněno použití za velmi vysokých teplot spolu s vysokou korozní a otěrovou odolností. Řadí se sem sloučeniny boru, uhlíku (ne však amorfního grafitu), dusíku a křemíku. Mezi nejdůležitější zástupce se řadí karbidy křemíku a boru, dále nitridy křemíku, hliníku a boru [1,2].

Někdy se jako čtvrtý druh označuje *piezo-keramika*. Tento materiál se vyznačuje generováním elektrického náboje při zatížení nebo naopak změnou svého objemu pod vlivem elektrického proudu [2].

Dle velikosti zrn v mikrostruktuře se rozlišuje keramika *jemná* (angl.: fine) a *hrubá* (angl.: coarse). Pro zařazení materiálu do jemné keramiky musí jeho mikrostrukturní komponenty být menší než 0,1mm v průměru. Tuto podmínku splňuje porcelán, nástěnné obklady, umělecká keramika, abrazivní a technická keramika [2,3].

1.3 Vlastnosti technické keramiky

Vlastností, kterých dosahuje technická keramika, v mnoha případech konvenční materiály nemohou dosáhnout. Mezi nejvýznamnější vlastnosti společné všem zástupcům technické keramiky patří [1,2,3]:

- nízká hustota,
- vysoká tvrdost,
- vysoká mechanická pevnost,
- rozměrová stálost,
- odolnost proti opotřebení,
- korozivzdornost,
- odolnost vůči povětrnostním vlivům,
- vysoká provozní teplota,

- nízká nebo vysoká tepelná vodivost (dle druhu materiálu),
- dobré elektroizolační vlastnosti,
- dielektrické a feroelektrické vlastnosti.

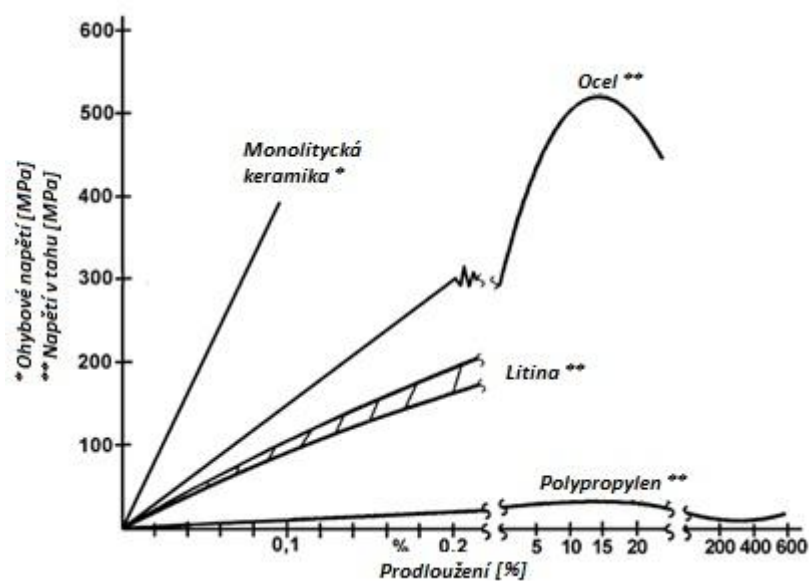
Následující tabulka porovnává některé důležité vlastnosti keramických materiálů s materiály kovovými a s polymery:

Tab.1 Porovnání vlastností keramiky, kovů a polymerů [2].

	Keramika	Kovy	Polymery
<i>Tvrdost</i>			
<i>Modul elasticity</i>			
<i>Vysokoteplotní pevnost</i>			
<i>Tepelná roztažnost</i>			
<i>Kujnost</i>			
<i>Odolnost proti korozi</i>			
<i>Odolnost proti opotřebení</i>			
<i>Elektrická vodivost</i>			
<i>Hustota</i>			
<i>Tepelná vodivost</i>			
 Tendence k vysokým hodnotám		 Tendence k nízkým hodnotám	

Směr šipky určuje zlepšení (vzhůru) nebo zhoršení (dolů) vlastností oproti typickým hodnotám. Šířka šipky indikuje „sílu“ zlepšení.

Při mechanických aplikacích jsou důležité deformační vlastnosti materiálu, obr.2 porovnává vzorky z ocele, Al_2O_3 a termoplastu. Znevýhodnění keramiky oproti kovům spočívá v minimálním prodloužení před lomem, kombinovanému se značně nižší lomovou houževnatostí. Kov má oproti keramice horší rozměrovou stabilitu obzvláště při vysokých teplotách [1,2,3].



Obr.2 Deformační chování vybraných materiálů [2].

Tab.2 Srovnání typických mechanických charakteristik zástupců keramických materiálů s konstrukční ocelí a šedou litinou [2].

Vlastnosti materiálů		Porcelán	Stearit	Oxid hlinitý	Oxid zirkoničitý	Nitrid křemíku			SiAlON	Karbíd křemíku			Nízkouhlíková ocel	Litina
				($\geq 99\%$)	PSZ	SSN	HPsN	RBsN		SSiC	RSiC	SiSiC		
Hustota	g/cm ³	2.3	2.7	3.94	6	3.3	3.4	2.5	3	3.15	2.8	3.12	7.85	7.3
Pevnost v ohybu (25°C)	MPa	110	140	520	1000	1000	900	330	355	600	120	450	300 - 450	95 - 170
Pevnost v ohybu (1000°C)	MPa	-	-	-	-	-	-	300	355	650	130	450	-	-
Modul pružnosti	GPa	70	110	360	210	330	800	180	231	450	280	350	200 - 210	70 - 130
Lomová houževnatost	MNm ^{-3/2}	-	-	5.5	> 8	8.5	8.5	4	2.2	5	3	5	140	-
Lineární koef. teplotní roztažnosti	10 ⁻⁶ K ⁻¹	8	8.5	8	5	3.5	3.28	3	3	4.8	4.8	4.8	10	12
Weidbullův modul	m	-	-	> 10	> 15	> 10	> 10	> 10	15	> 10	-	> 10	-	-

1.3.1 Mechanické vlastnosti

Hustota

V porovnání s kovy dosahuje hustota keramických materiálů o 30-80% nižších hodnot a tím umožňuje značnou úsporu váhy. Hustota výrazně ovlivňuje vlastnosti materiálu, proto by se u hotového výrobku neměla lišit od teoretické hodnoty a nesmí se tvořit gradienty hustoty v tělese [2].

Velký podíl porosity vede ke snížení celkové hustoty výrobku a zvyšuje jeho odolnost proti tepelnému šoku [1].

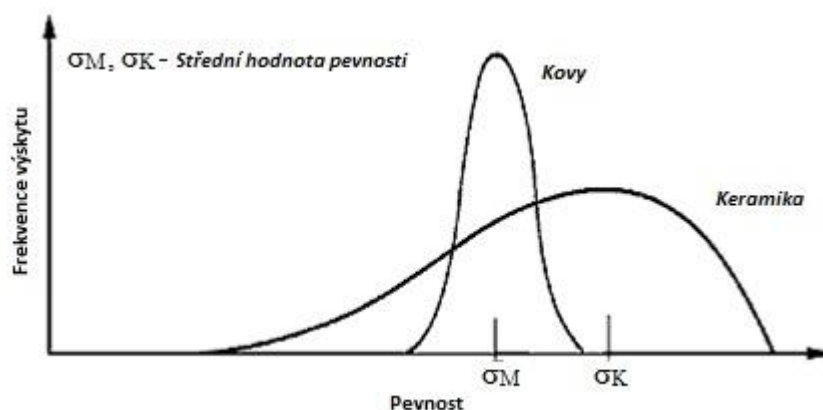
Pórovitost

Zpravidla keramické materiály nemají otevřené póry, jsou plynotěsné. Ale vzhledem k zvýšení tepelné odolnosti materiálu díky porositě se v některých aplikacích jeví jako nezbytné. Tvoření pórů také zvyšuje povrch tělesa, což může být u některých aplikací vyžadováno. [2].

Umělé generování porosity se provádí úpravou surového materiálu přidáním příměsí nebo vhodnou volbou základní směsi. Velikost pórů poté dosahuje několika nm až μm [1,2].

Mechanická pevnost

Mechanická pevnost σ [MPa] se u keramických materiálů těžko určuje, jelikož závisí na mnoha proměnných. Hodnoty, dostupné v literatuře, se získávají statistickou analýzou. Ovlivňuje ji složení materiálu, velikost zrn a příměsí, produkční podmínky i samotný výrobní proces. Nejslabší model, rozložení defektů a kritický defekt (samotný může způsobit fatální selhání) určují spolehlivost součásti. Proto rozptyl hodnot pevnosti mezi jednotlivými výrobními dávkami může být mnohem větší než v jedné dávce. Frekvenci výskytu jednotlivých hodnot pevností materiálu ukazuje obr.3, (σ_M – střední hodnota pevností kovu, σ_K – střední hodnota pevností keramiky) [1,2,3,4].

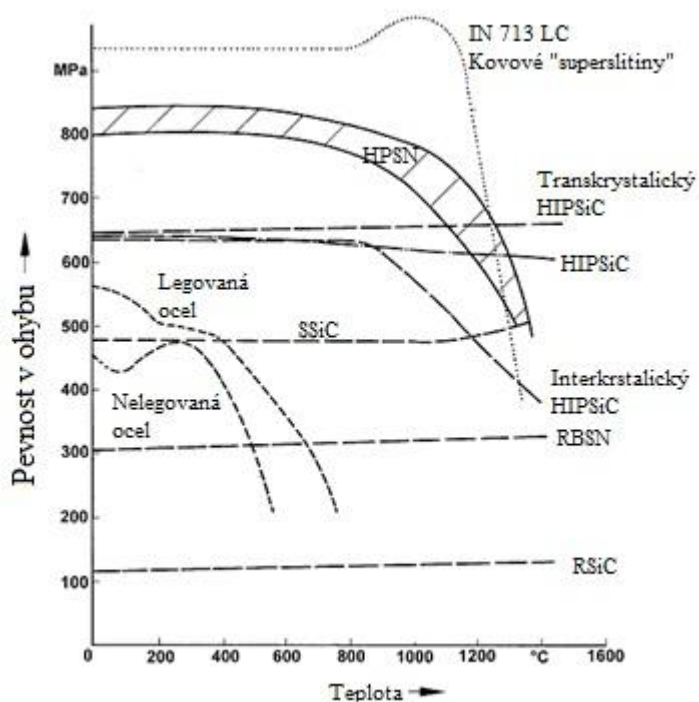


Obr.3 Rozložení mechanické pevnosti v rámci dávek [2].

Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu nejvíce ovlivňuje celkovou pevnost výrobku a tak i jeho konstrukční návrh. Rozměry, tvar, povrch (typ jeho opracování) a nehomogenity ve struktuře vzniklé výrobním procesem ji ovlivňují [1].

Pevnost technické keramiky za vysokých teplot předčí i vlastnosti kovových super-slitin, patrné z diagramu na obr.4. Výhodná je proto jejich aplikace ve vysokoteplotních procesech [2].



Obr.4 Vliv teploty na pevnost v ohybu vybraných keramických a kovových materiálů [2].

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku dosahuje 5krát až 10krát vyšších hodnot než pevnost v ohybu. Vady v mikrostruktuře na ni nemají výrazný dopad. Pokud to konstrukce celku umožňuje, měl by být keramický díl umístěn tak, aby jeho namáhání mělo tlakový charakter [2].

Pevnost v tahu

Jelikož pevnost v tahu dosahuje hodnot až o 20% nižších než pevnost v ohybu a materiál má tendenci ke křehkému lomu, neměl by se tento způsob namáhání uvažovat nebo ho co nejvíce minimalizovat, za předpokladu precizních propočtů a návrhů [2].

Součinitel intenzity napětí

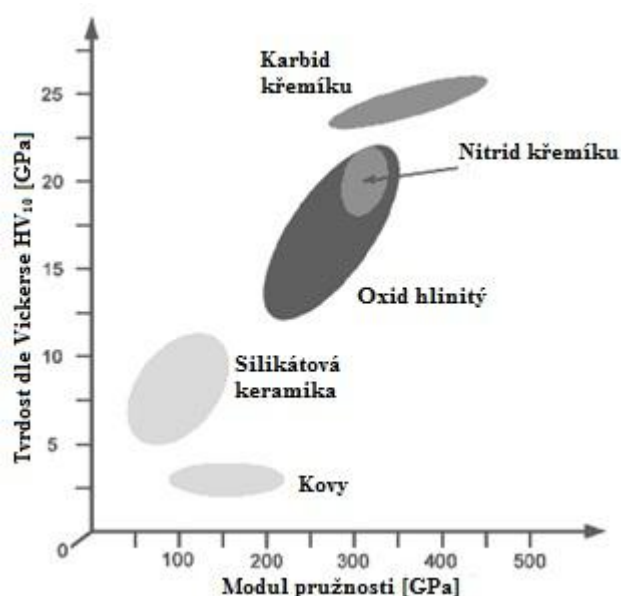
Poškození keramických materiálů probíhá pod mechanismem křehkého lomu. Plastické deformace lze dosáhnout pouze při teplotách měknutí materiálu. Součinitel intenzity napětí

KI- pochází z lomové mechaniky a předpovídá chování křehkých materiálů s ohledem na šíření trhliny [2].

Kritický součinitel intenzity napětí KIC [$MPa/m^{1/2}$] udává míru citlivosti materiálu k lomu nebo ke křehkému chování. Růst trhliny nezávisí pouze na velikosti zatížení, ale i na velikosti defektu. Při dosažení kritické hodnoty KIC dochází k selhání dílu [2,4].

Modul pružnosti

Ve srovnání s kovy dosahují moduly pružnosti E [GPa] mnohem vyšších hodnot, znázorněné na obr.5. Toto vede pouze k přibližné 50-70% elastické deformaci než jaké dosahují kovy. Při kombinaci kovů a keramiky v jednom tělese musí být tuhost keramiky brána na zřetel [1,2].



Obr.5 Závislost tvrdosti a modulu pružnosti vybraných materiálů [2].

Příčná kontrakce

Příčná kontrakce ν [-], známá také jako Poissonova konstanta, vyjadřuje závislost mezi příčným zúžením a podélným prodloužením [2].

Pro keramické materiály typicky nabývá hodnot $\nu=0,18-0,3$ [2].

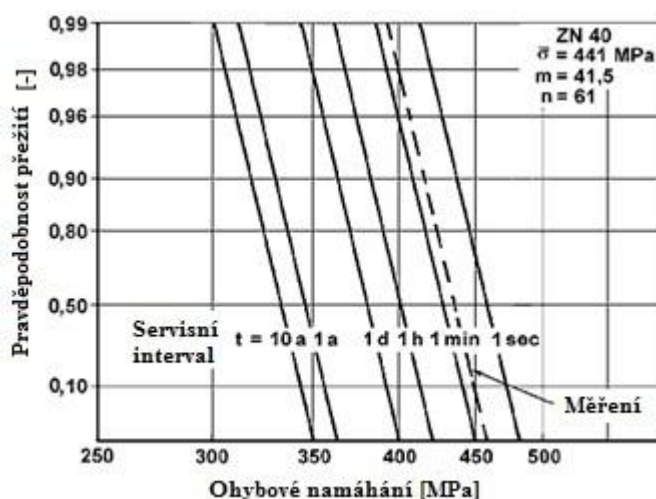
Modul pružnosti ve smyku

Veličina modul pružnosti ve smyku G [GPa] charakterizuje změnu tvaru tělesa při zatížení pouze smykovým namáháním. U keramických materiálů může dosahovat až $1/3$ modulu pružnosti E [2].

Růst trhliny

Pro správné navržení keramické komponenty se musí uvažovat maximální zatížení a doba trvání tohoto zatížení. Selhání často způsobí jeden defekt, který leží na nebo v blízkosti povrchu. V případě, že zatížení tělesa nedosahuje kritického napětí, které se uvažovalo při návrhu, a obzvláště v přítomnosti vody či vlhkého vzduchu v okolním prostředí, trhlina roste velice pomalu, následně šíření zrychluje až do lomu. Toto chování se označuje jako subkritické šíření trhliny nebo také únavové šíření trhliny a je popsáno lineárně-elastickou lomovou mechanikou [1,2].

Subkritické šíření trhliny lze znázornit pomocí SPT-diagramu (S = strength – pevnost; P = probability - pravděpodobnost; T = time – čas), který je závislostí pravděpodobnosti přežití a ohybového namáhání. SPT-diagram je výstupem analýzy časově závislého porušování a jeho příklad pro oxidy zirkonu ukazuje obr.6 [2,5].



Obr.6 SPT-diagram pro oxid zirkonu [2].

Creep

U kovů při dlouhodobém statickém zatížení dochází k plastické deformaci. Ta se ještě znásobí při vysokých teplotách a limituje tak použitelnost těchto materiálů, dochází ke creepu (=tečení) materiálu. U keramického materiálu se s touto vlastností můžeme setkat také, avšak při teplotách pod 1000°C je velmi malá. Creepové prodloužení již o pár procent však může vést k selhání keramického dílu. Dochází k tvorbě creepové porosity a mikrotrhlin, to způsobí homogenní šíření poškození v celém objemu zatíženého tělesa. Důsledkem je změna některých fyzikálních vlastností. Ovlivňuje jej způsob namáhání, chemická vazba i charakteristiky mikrostruktury [2].

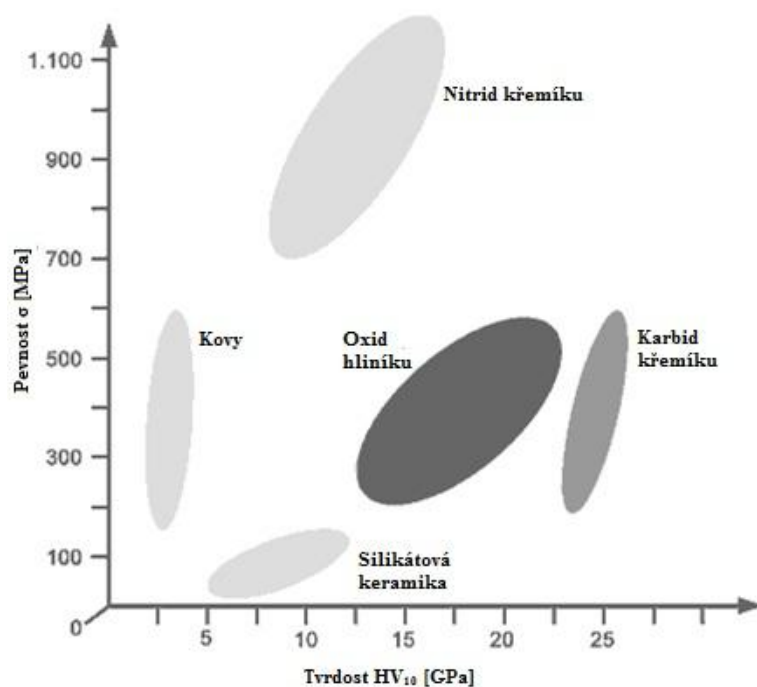
1.3.2 Tvrdost

Tvrdost materiálu implikuje odolnost materiálu vůči deformaci a spojuje se s vysokým modulem elasticity. Vysoká tvrdost technické keramiky pozitivně ovlivňuje jeho odolnost vůči otěru. Obr.7 ukazuje diagram závislosti tvrdosti a pevnosti vybraných materiálů [2].

Vysoká tvrdost u keramiky je vykoupena nedostatkem plastické deformace, která by mohla absorbovat koncentraci namáhání. Dochází k selhání součásti bez předchozího varování [1].

Nejčastěji se měří metodou dle Vickerse, dále dle Knoop a Rockwella [2].

Pro nejtvrďší keramické materiály však lze použít pouze metody dle Vickerse a Knoop. Další metody používají nedostatečnou sílu nebo nevhodnou velikost měřícího zařízení pro aplikaci na materiály jako např. karbidy křemíku, jejichž tvrdost se blíží tvrdosti diamantu [3].



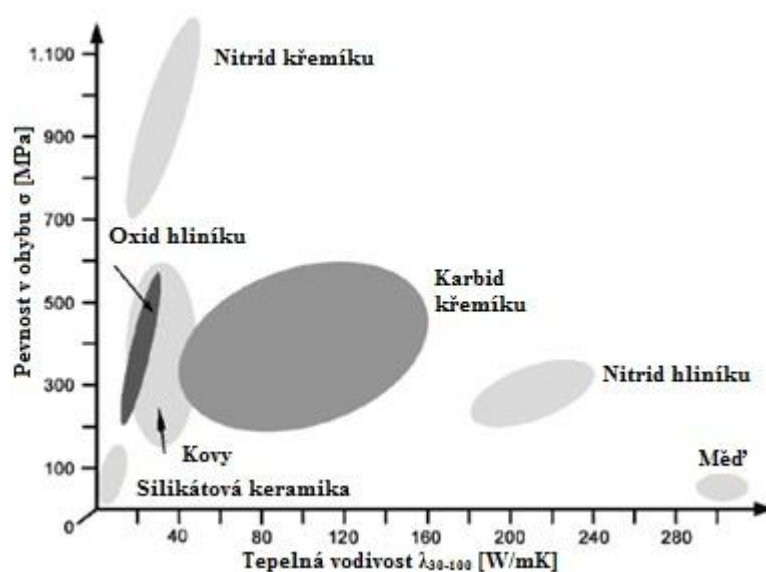
Obr.7 Závislost mezi mechanickou pevností a tvrdostí vybraných materiálů [2].

1.3.3 Termomechanické vlastnosti

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] keramických materiálů obecně dosahuje menších hodnot než u kovů jako ocel nebo měď, porovnání patrné v obr.8. Nýbrž materiály jako karbidy křemíku nebo nitridy hliníku se používají jako tepelné vodiče. A to díky jejich vysoké tepelné vodivosti v porovnání s dalšími elektrickými izolátory [2].

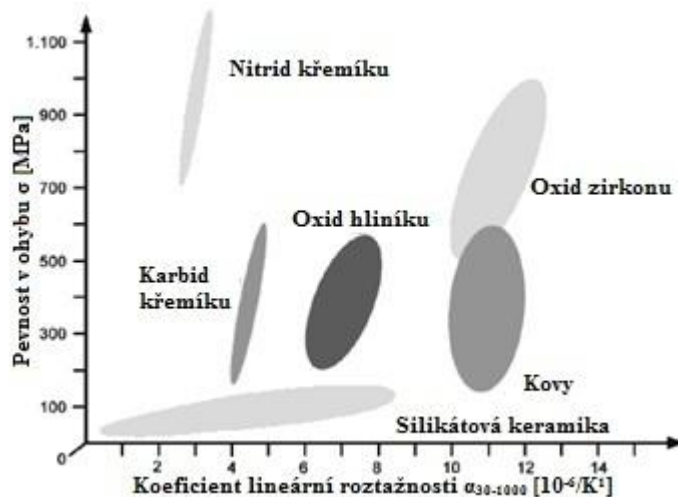
Jiné druhy keramiky se naopak využívají jako tepelné izolátory. Jejich nízká tepelná vodivost může být ještě snížena zvýšením porosity [1,3].



Obr.8 Závislost pevnosti v ohybu a tepelné vodivosti vybraných keramických a kovových materiálů [2].

Koeficient lineární roztažnosti

Koeficient lineární tepelné roztažnosti α [$10^{-6}/K^1$] technické keramiky nabývá obvykle nižších hodnot než ocel nebo šedá litina, výjimku tvoří oxid zirkonu, forsterit a oxid hořčíku. Porovnáním vybraných materiálů se zabývá obr.9 [2].



Obr.9 Závislost pevnosti v ohybu na koeficientu roztažnosti vybraných materiálů [2].

Odolnost vůči teplotním šokům

Náchylnost vůči teplotním šokům se vyskytuje u velkého množství keramických materiálů. To znamená, že prudká změna teploty může vést k fatálnímu selhání. Výjimkou jsou materiály na bázi karbidu křemíku, kordieritu nebo aluminum-titanátu [2].

Tato náchylnost vzniká v důsledku vnitřních mechanických napětí zapříčiněných teplotními gradienty a velmi křehkou povahou keramických materiálů. Vnitřní napětí u kovů vede k lokálním plastickým deformacím, zde však vzniká trhлина [1,2,3].

1.3.4 Koroze

Koroze se netýká pouze kovových materiálů, ale také keramických, skleněných i polymerních. Dochází při ní k reakci povrchu tělesa s okolním prostředím, kdy vznikají měřitelné změny v materiálu a dochází ke koroznímu opotřebení [1,2,3].

Poškození vzniká působením chemických látek a jejich reakcí, na rozdíl od mechanického opotřebení. Ve většině případů se s rozvojem koroze zvyšuje i míra abrazivního opotřebení.

Míra koroze je u keramických materiálů mnohonásobně menší než u kovů, proto se označují za korozivzdorné, a ovlivňuje ji mikrostruktura a chemické složení materiálu [2].

Existuje několik korozních mechanismů, které se vyskytují u keramických materiálů:

Povrchová a selektivní koroze

Odebírání materiálu z povrchu tělesa působením agresivních látek vede ke vzniku izotropního povrchu. Keramický materiál má obvykle heterogenní strukturu, která zabraňuje rovnoměrnému poškození povrchu [2].

Toto neplatí pro keramiku s velkým podílem skleněné fáze ve struktuře. Z tohoto důvodu korozivzdorný porcelán obsahuje kyselino-odolnou skleněnou fázi, avšak zásadité prostředí je pro ni velice nebezpečné [2].

Koroze sítí defektů

Heterogenní struktura většiny keramických materiálů způsobuje omezení nebo zastavení šíření koroze. V případě, že dojde k poškození povrchu ve formě trhlin nebo nežádoucích příměsí, může zde dojít k reprodukci korozního poškození až do selhání materiálu [2].

Koroze uvnitř materiálu

Při korozi uvnitř materiálu dochází k poškození jedné nebo více fází obsažených ve struktuře a které vyplňují prostor mezi zrny, např. skleněná fáze. Míra koroze závisí na náchylnosti jednotlivých fází [1,2].

Její míru lze redukovat omezením výskytu náchylných fází např. zvětšením velikosti zrn v mikrostruktuře, čímž se dosáhne zmenšení oblasti hranic mezi zrny [2].

Vedle korozních mechanismů lze rozlišit i tři korozní typy:

Koroze kapalné fáze

Koroze kapalné fáze je nejdůležitější typ pro aplikaci v konstrukci strojů a zařízení.

Odolnost vůči korozi způsobené kyselinami se liší u jednotlivých materiálů. Laboratorní porcelán, podobný laboratornímu sklu, je odolný, pokud nedojde k překročení teploty cca. 100°C. Oxidy hliníku vysoké čistoty (92%-99,5% Al_2O_3) mají výbornou odolnost vůči minerálním kyselinám, avšak za předpokladu současné odolnosti sekundární fáze (mezi hranicemi zrn). Neoxidické materiály však tuto vlastnost postrádají, jejich náchylnost dosahuje vyšší míry. Speciální pozici má karbid křemíku sycený křemíkem SiSiC díky infiltrované, kyselinám odolné, křemíkové fázi [1,2].

Oxidy hliníku mají také výbornou odolnost proti působení alkalických roztoků, ale alkalická tavenina je velmi poškozující. Neoxidické materiály reagují méně, avšak SiSiC , vzhledem k přítomnosti křemíkové fáze, není možné použít vůbec [1,2].

Působením vody nebo vodní páry, obzvláště za zvýšeného tlaku, dochází ke značnému úbytku materiálu. Destilovaná voda dosahuje ještě vyšších korozivních účinků. Pouze u SiSiC se neprojevuje působení vody, s výjimkou velmi slabé reakce s vodou destilovanou [1,2,3].

Koroze v tavenině

Keramický materiál reaguje rozdílně v kontaktu s taveninou nekovovou anorganickou (taveniny oxidů, solí, skel) než s kovovou [2].

Reaktivnost nekovové taveniny závisí na mnoha faktorech, jako např. její viskozita, PH faktor, složení primární i sekundární fáze keramiky, smáčivost taveniny vůči keramice. Pro ověření vhodnosti použití keramiky v těchto taveninách se téměř vždy musí provádět testy [1,2].

Proti působení tavenin kovů lépe odolávají neoxidické keramiky. Vzhledem k minimální smáčivosti jsou nitridy křemíku a nitridy boru velmi odolné vůči většině tavenin kovů [2].

Koroze způsobená horkými plyny

Všechny oxidické materiály jsou korozně odolné na vzduchu i v oxidizující atmosféře až do teploty blízké jejich teplotě tavení [2].

Neoxidické materiály při teplotě nad 1200°C reagují s kyslíkem. Mnoho z nich, obzvláště karbidy křemíku SiC , vytváří tenkou ochrannou vrstvu oxidu (např. dioxid křemíku u SiC), která chrání materiál před šířením oxidace. Ke značnému rozvoji koroze dochází při překročení teploty 1420°C [1,2,3].

1.3.5 Opatření a tribologie

Opatření se definuje jako úbytek nebo přemístění materiálu z povrchu pevného tělesa v důsledku interakce s dalším tělesem nebo prostředím [1,2].

Opatření ovlivňuje životnost výrobku, a tím i funkčnost strojů a zařízení. Má velký ekonomický vliv. Zavedení keramických materiálů vedlo ke značnému zlepšení situace. Opatření lze vnímat jako element tribologie, vědní disciplíny zabývající se interakcemi povrchů v relativním pohybu [1,2].

Existuje několik mechanismů opotřebení, které se v praxi vyskytují v jejich různých kombinacích [1,2]:

- opotřebení posuvem povrchů po sobě,
- opotřebení odvalováním těles,
- eroze,
- kavitace.

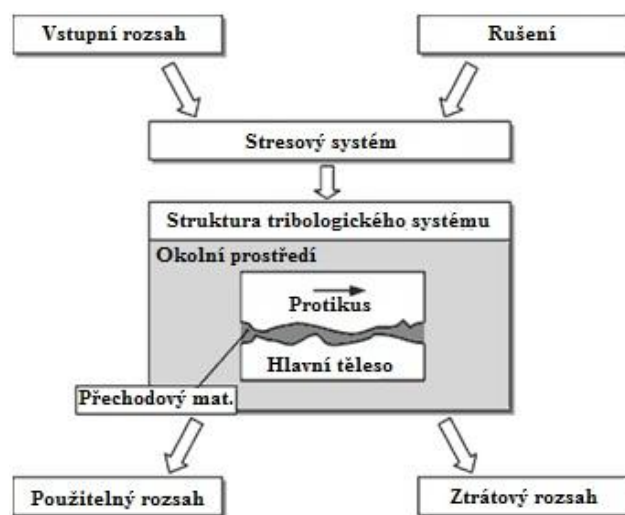
Tření

Tření vzniká jako reakce proti pohybu, součinitel tření $f [-]$ vyjadřuje poměr mezi třecí silou a normálovou silou působící těleso. Používá se k charakterizování translačního pohybu [2].

Tribologický systém

Zánik nebo nesprávné fungování tribologického systému vede ke zvýšení tření a vzniku opotřebení. Nezávisí pouze na vlastnostech jednotlivých materiálů, ale také na interakcích a rozsahu namáhání přítomných v celém systému. Opotřebení a tření tedy nejsou charakteristikami materiálu, ale celého systému [1,2,3].

Obr. 10 názorně zobrazuje tribologický systém, který se skládá ze čtyř základních elementů: hlavní těleso, protikus, přechodové těleso (materiál) a okolní prostředí. Začleněním stresového systému vznikne tření a následuje vznik opotřebení [2].



Obr.10 Znázornění tribologického systému [2].

Stresový systém ovlivňuje několik mechanických a technických parametrů jako normálová síla, rychlost, teplota, doba zatížení, mechanismus pohybu a proměnnost těchto faktorů v čase [1,2,3].

Tribologické systémy se rozdělují na uzavřené a otevřené. Ložiska a těsnění korespondují uzavřeným systémem. U otevřeného systému protikus nahrazuje těleso přechodové [2].

Abrazivní mechanismy

Abraze je zjednodušeně důsledkem stresového systému na element tribologického systému. Rozlišují se 4 základní mechanismy [1,2]:

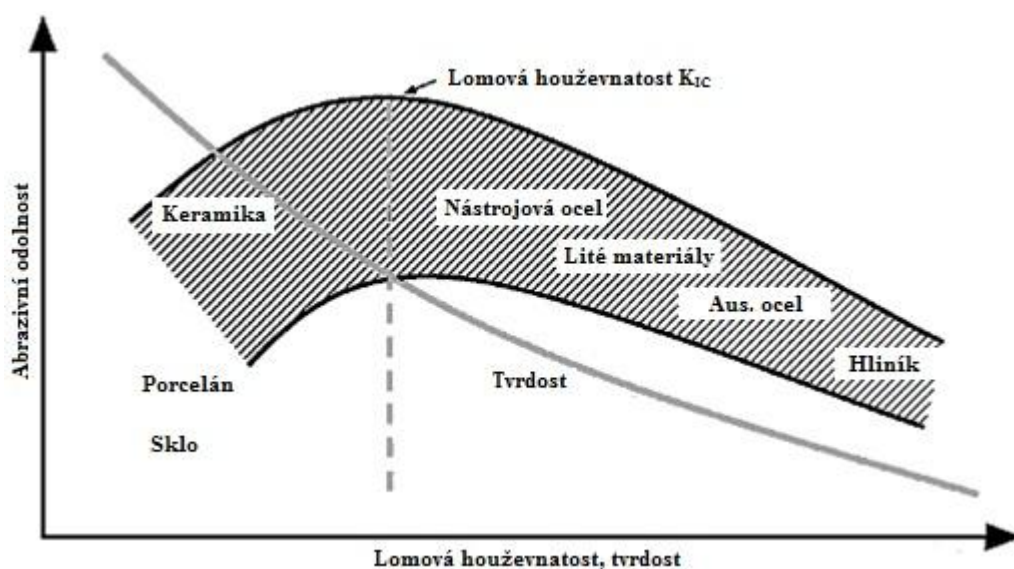
- adheze – hraniční vrstvy se tváří a oddělují vlivem kontaktu povrchů (mikro-sváry),
- abraze – úběr materiálu v podobě mikrotřísek,
- tribo-chemická reakce – přeměna tribologického namáhání v chemickou reakci,
- odlupování povrchu – únava a růst trhlin v důsledku cyklického namáhání.

Různé namáhání vede k různému mechanismu abraze a vliv má také tribologický systém [2].

Abrazivní odolnost

Keramické materiály se využívají ve velice namáhaných tribologických systémech, vděčí za to své abrazivní odolnosti, vysoké tvrdosti, vysokému modulu elasticity, odolnosti proti tlaku, nízké hustotě, minimální teplotní roztažnosti a odolnosti vůči vysokým teplotám a korozi [1,2,3].

Chování materiálu při opotřebení se odvíjí od chemických a termo-chemických vlastností opotřebení zabraňujícího materiálu. Abraze se uskutečňuje pomocí adhezních mechanismů a rozpadu povrchu, odolnost vůči abrazi předurčuje tvrdost a lomová houževnatost. Maximální odolnosti se dosahuje při optimální kombinaci tvrdosti a lomové houževnatosti, toto znázorňuje obr.11 [2].



Obr.11 Závislost odolnosti vůči abrazi R_V na tvrdosti a lomové houževnatosti [2].

Vzhledem k vysoké tvrdosti keramických materiálů, se abraze pohybuje na minimální úrovni. Dále mají tyto materiály pouze velmi malou tendenci k vytváření studených svarů

(na rozdíl od kovů), které vedou k adhezivnímu opotřebení, díky iontovým a kovalentním vazebným silám ve struktuře. Proto se adheze zanedbává [1].

Tribo-chemická reakce se vyskytuje vždy, avšak pouze ve velice malé míře. V uzavřených systémech nemůže být nikdy vyloučena obzvláště v přítomnosti pevného tělesa a kombinovaného tření [2].

Hlavní mechanismus opotřebení keramiky je odlupování povrchu, zejména pak u křehkých materiálů [1].

1.4 Vlastnosti karbidu křemíku SiC

Karbid křemíku SiC se řadí do neoxidických keramik, vyrábí se výhradně ze syntetických surových materiálů. Ty musí být velice jemnozrnné a během výpalu, který může přesahovat 2000 °C, nesmí přijít do kontaktu s kyslíkem [1,4].

Materiály na bázi SiC se liší svými vlastnostmi v závislosti na zpracování. Avšak existuje několik základních společných charakteristik [1,2,3,4]:

- velice vysoká tvrdost – tvrdší je pouze diamant, karbid bóru a kubický nitrid bóru,
- resistantní vůči korozi a oxidaci, i za vysokých teplot,
- vysoká odolnost proti opotřebení,
- vysoká pevnost, i za vysokých teplot,
- minimální tepelná roztažnost,
- dobrá odolnost vůči teplotním šokům,
- velmi vysoká tepelná vodivost (podobná hliníku),
- dobré tribologické vlastnosti,
- semipermeabilní vlastnosti (polovodiče),
- výborná odolnost vůči kyselým i zásaditým látkám.

Vedle zpracování ovlivňuje vlastnosti materiálu i mechanismus, jakým jsou k sobě zrna vázána. Vazba může být zprostředkována samotným materiálem nebo pomocí přídavné fáze [1].

Základní prášek se získává z uhlí a křemenných písků při teplotě 1600-2500°C. Surový materiál se shromažďuje kolem grafitového jádra, které se vlivem elektrického působení ohřívá na požadovanou teplotu. V pecích až 9 m dlouhých a 3 m vysokých dochází k tvorbě čistého SiC. Vyloučené nečistoty je poté nutné odstranit tryskáním a působením chemických látek [1,2,6].

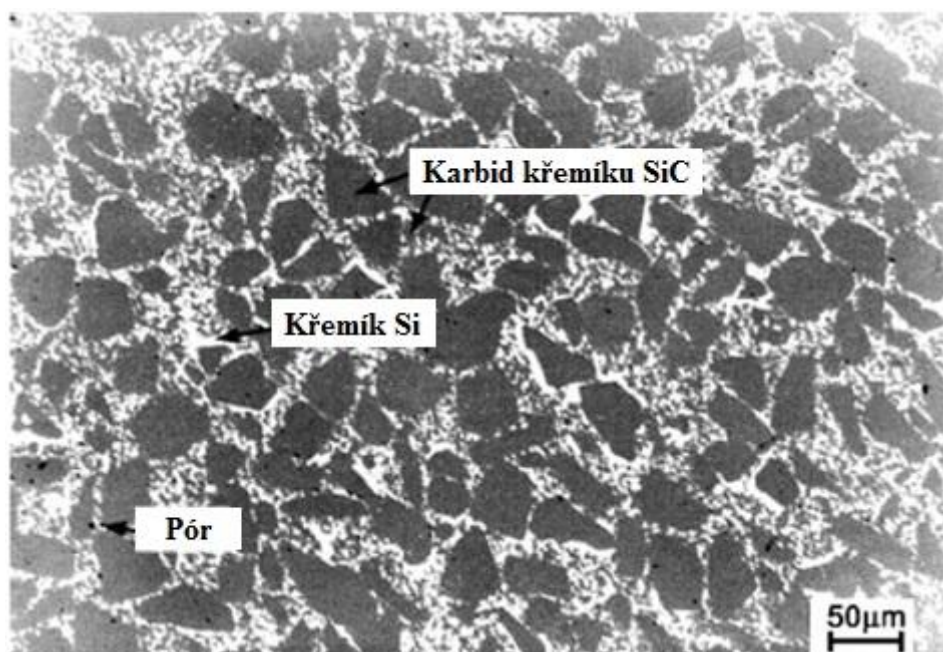
1.4.1 SiSiC – křemíkem infiltrovaný karbid křemíku

Reakčně vázaný SiSiC obsahuje 85-94% karbidu křemíku a současně 15-6% křemíku v kovové formě. Díky tomuto spojení se ve struktuře téměř nenachází zbytková porositata [1].

Toho se dosahuje infiltrováním součástí zformovaných z karbidu křemíku, uhlíku (grafit) a kovového křemíku. Při výpalu dochází k reakci mezi kapalným křemíkem a uhlíkem za vzniku karbidu křemíku, který následně spojuje zrna karbidu křemíku obsaženými v původním substrátu. Zbývající prostory (póry) jsou vyplněny kovovým křemíkem [1,3,4].

Výhoda oproti běžné práškové metalurgii spočívá v minimálním smrštění součástí během výpalu. Toto umožňuje vyrábět velké díly s velmi přesnými rozměry. Křemík v kovové formě je však limitujícím faktorem pro tepelné zatížení, neboť může dojít k překročení teploty tání, proto se SiSiC používá přibližně do 1380°C. Pod touto teplotou materiál vykazuje velmi vysokou pevnost a korozní odolnost (zejména v zásaditém prostředí) spolu s dobrou odolností vůči tepelným šokům a opotřebení [1,2].

Jeho vlastnosti ho předurčují pro aplikaci jako pecní součásti (nosníky, podpory, kolébky,...) a nejrůznější součástky pro spalování, přímé i nepřímé (vedení plamene, rekuperátory, a trysky). Vzhledem k odolnosti proti opotřebení a korozi se využívá pro výrobu ve strojírenství na náročné komponenty (kluzné těsnicí kroužky, ložiska,...). Obr.12 představuje jeho mikrostrukturu [1,2,4].



Obr.12 Mikrostruktura SiSiC [2].

1.4.2 SSiC – slinovaný karbid křemíku

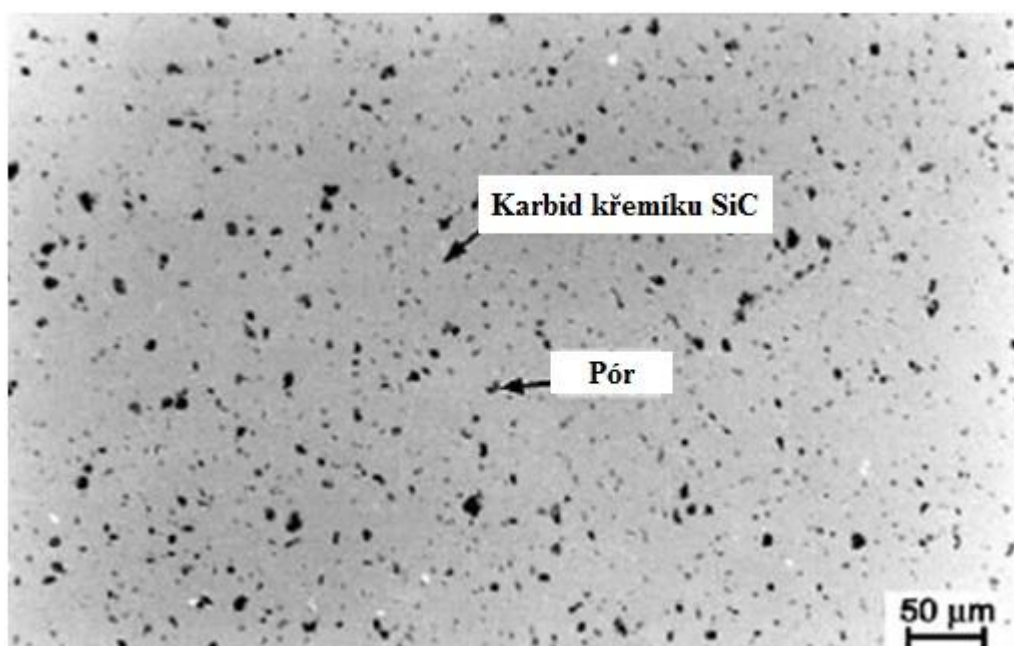
Beztlakově slinovaný SiC se vyrábí pomocí velmi jemného prášku karbidu křemíku se slinovacími aditivami. Zformovaná součást se slinuje při použití teplot 2000-2200°C v atmosféře inertního plynu. Lze vyrobit verzi s velikostí zrna menší než 5µm až do velikosti 1,5mm [1,2,4].

SSiC vyniká vysokou pevností a extrémně vysokou korozní odolností v kyselém i zásaditém prostředí. Tyto vlastnosti jsou zachovány i při dlouhodobém tepelném zatížení

při 1600°C. Tvrdost materiálu se blíží tvrdosti diamantu, velmi dobře vede teplo, výborně odolává tepelným šokům a opotřebení [2,3].

Výrobky z SSiC lze nalézt ve velmi náročných aplikacích, jako např. kluzné těsnicí kroužky v chemických pumpách, vysoko-teplotní spalovací trysky, součásti vysokoteplotních pecí nebo ložiskové vložky [1].

Tribologické vlastnosti lze zlepšit pomocí grafitových inkluzí. Jeho mikrostrukturu zobrazuje obr.13 [2].



Obr.13 Mikrostruktura SiC [2].

Tab.3 Vlastnosti slinutého karbidu křemíku SSiC [7].

	SSiC
Hustota ρ [g/cm ³]	3,12
Porezita P [%]	3
Pevnost v ohybu [MPa]	400
Pevnost v ohybu při 1200 °C [MPa]	400
Houževnatost [MPa.m ^{1/2}]	305
Modul elasticity E [GPa]	400
Tepelná vodivost λ [W/m.K]	100
Koeficient tepelné roztažnosti α [10 ⁻⁶ K]	4,0
Maximální aplikační teplota [°C]	1650

1.5 Výroba technické keramiky

Základní vlastnosti keramického materiálu závisí na výběru a přípravě surového materiálu a procesu zpracování [1].



Obr.14 Vlivy na mikrostrukturu [2].

1.5.1 Surový materiál a aditiva

Základní nároky na produkci a ekonomičnost výroby ovlivňují výběr vhodného základního materiálu a jeho přísad. Volba se provádí dle požadavků na typ materiálu, velikost zrn, čistotu a specifický povrch [1].

Dosažení žádaných vlastností a zlepšení parametrů výroby usnadňují přídavné substance. Rozložení fází v mikrostruktuře a čistotu ovlivňují anorganické slinovací podpory. Organické podpory pak zlepšují vlastnosti při formování. Kombinují se zkapalňovací činidla, plastifikátory a pojiva [2].

1.5.2 Příprava surového materiálu a granulátu

Každá technologie zformování součásti má jiné nároky na přípravu surového materiálu [1,2]:

- mazlavý materiál → odlévání,
- granuláty → lisování,
- tvárný materiál → protlačování.

Příprava granulátu

Pro dosažení nejlepších vlastností hotového keramického výrobku, musí být základní suroviny co nejjemnější, proto dochází k jejich několikanásobnému mletí. Jednotlivé látky však mnohdy nemohou dosáhnout stejných rozměrů částic a získá se tak rozměrově

nehomogenní směs. Průměry částic se pohybují v závislosti na požadavcích mezi 0,1 μm a 10 μm , ve výjimečných případech se rozměr může změnit na několik nanometrů až 50 μm . Prášek si poté při skladování, transportu nebo i přípravě neudrží rovnoměrné rozložení všech částí, dochází k usazování a odlučování. Do základního materiálu se ještě přimíchávají další organické přísady. Již při rozdílu velikostí částic v poměru 1:3 dochází k odměšování i při obyčejném míchání [1,2,3,6].

Pro zabránění těmto nežádoucím jevům se tyto směsi převádí na granulát. Existuje několik možných postupů [6]:

- z prášků – nabalováním (suché prášky) nebo lisováním (vlhké i suché prášky),
- z taveniny – válcování šupin, tabletování, granulování,
- ze suspenze – sušení rozprašováním, nabalování fluidní vrstvy.

Výhody plynoucí z použití granulátu místo prášku jsou zlepšení tečení, zvýšení sypné hustoty, zamezení odměšování, atd [1,2,6].

Pro materiály na bázi SiC se nejčastěji granulát připravuje za suspenze. Ta je atomizována proudem horkého vzduchu, jehož působením se vytváří sférické kapičky přesných rozměrů a které se ve stejném kroku suší. Rozměry jednotlivých granulek dosahují 400-500 μm a díky jejich sférickému tvaru se lépe chovají při následujícím lisování [1,2,3].

Pro zaručení nejlepších výsledků se granulát podrobuje laboratorním zkouškám. Fyzikálními zkouškami se zjišťuje distribuce velikostí, chemické složení a krystalová struktura. Díky difrakci rentgenových paprsků je možné přesně určit přítomné elementární látky v krystalové struktuře. Laserová difrakce napomáhá určit rozložení velikostí prachových částic a zjištění rozložení velikosti granulátu se provádí pomocí síťové analýzy [1,2,3].

1.5.3 Formování materiálu

Granuláty se formují do souvislého tvaru s dostatečnou pevností pro další manipulaci. Hmota v tomto stavu je v tzv. zeleném stavu [1].

Zelené těleso musí být dostatečně tuhé, aby mohlo být obráběno (tzv. zelené obrábění). Vzhledem ke skutečnosti, že ještě nedošlo k slinování, obrábění je snazší a ekonomičtější. Musí se však počítat se smrštěním [1,2].

Samotnou fázi formování tělesa provází vysoká náročnost. Vzhledem k přítomnosti nepříznivého gradientu hustoty odvislého od metody tvarování, který v zeleném tělese vytváří texturu. Ta se ještě násobí při výpalu a vede ke vzniku nepříznivých vnitřních pnutí a polí s odlišnými vlastnostmi. Mezi základní metody formování materiálu patří lisování, tváření a odlévání [1,2,3].

Lisování

Nejpoužívanější metodou je lisování, při něm hraje významnou roli rozměrová distribuce substrátu, neboť velké částice vyplňují dutinu lisu lépe než malé, ty jsou však nutné pro vyplnění volných míst a jemných tvarů [1,2].

Celý proces lisování probíhá formou „pokusu a omylu“, protože granulát obsahuje organické přísady, u kterých není možné zajistit uniformní chování, a k ovlivnění procesu dochází také v závislosti na aktuálním stavu okolního prostředí, jelikož v reálných výroбах lze jen velice těžko dosáhnout laboratorních podmínek zaručující stejnou kvalitu okolí stroje při každém lisování [9].

Velká pozornost se věnuje stlačitelnosti a slisovatelnosti granulátu. Množství pojiv v materiálu ovlivňuje jeho stlačitelnost, s jejich rostoucím podílem klesá. Zcela jiný průběh zhutňování má materiál s přidavkem lubrikantů. Při příliš příkrém nárůstu za poměrně nízkých tlaků vzniká riziko vzniku skrytých makroskopických defektů. Přílišné tření o stěny raznice se projeví drsným nebo zvrásněným povrchem výlisku a díky tření dochází ke ztrátám lisovací síly vedoucí k nerovnoměrnému rozložení tlaku v tělese [1,2,9].

Tvrdost a tvárnost granulátu ovlivňuje velikost síly, která se přenese přes materiál. Křehčí materiály mají v tomto ohledu lepší vlastnosti [9].

Při lisování keramického materiálu se vyskytují i elastické deformace granulátu. Přidávané pojivo je musí být schopné kompenzovat. Lze je odbourat také pomocí vhodné úpravy substrátu [1,2,3].

Při návrhu lisovacích sil se využívá diagramu síla-dráha, který podává vysvětlení o nerovnoměrném průběhu deformačního chování. Obecně platí, že ke každému nárůstu zhutňovací křivky musí být přiřaditelné znatelné zhutnění [9].

V praxi se využívá několika metod lisování popsanych níže.

Suché lisování

Suché nebo také axiální lisování se využívá pro masovou produkci přesných dílů. Sypký granulát se lisuje v kovových nebo karbidových raznicích odpovídajících tvaru žádaného výrobku. Nákladná výroba raznic je předurčuje k využití pouze v sériové výrobě [1,2].



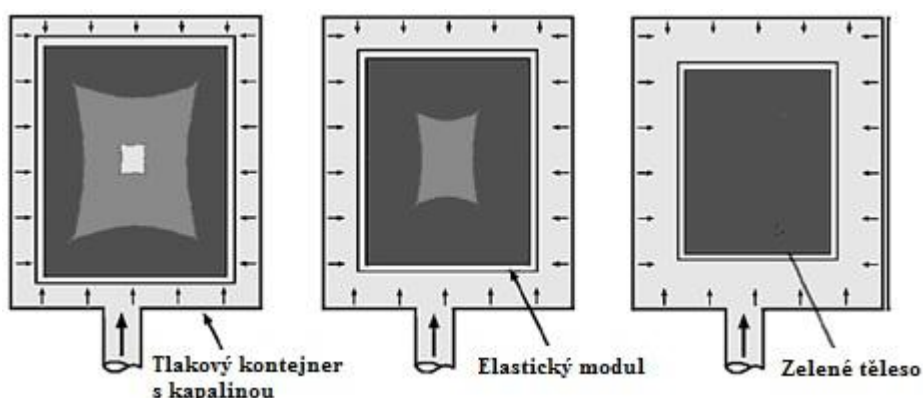
Obr.15 Postup axiálního lisování [2].

Tvary těles touto technologií mohou být jednoduché i komplexní. Díry a prohloubeniny však musí směřovat ve směru lisovací síly. Lze vyrobit výlisky o velikosti dlaždic až po velikost hlavičky sirky. Tloušťka nejtenčích disků nebo destiček dosahuje až 0,8 mm. V závislosti na velikosti zrn materiálu a jeho schopnosti vyplňovat dutiny lze vylisovat i ostré hrany a prolisy [1,2,3,9].

Lisovací tlak obvykle dosahuje hodnot 1500 barů. Změna objemu vůči výchozímu nestlačenému je 50-60 %. Zvýšením tlaku se nezvýší stlačení, neboť na rozdíl od kovů se zde vyskytuje pouze nepatrná možnost plastické deformace materiálu [1,2,3].

Izostatické lisování

Izostatické lisování se využívá pro výrobu stejnoměrně stlačených komponentů vhodných pro obrábění v zeleném stavu. Tvar výlisku určuje jednoduchá gumová forma [1].



Obr.16 Izostatické lisování s oblastmi různého stlačení (šedé zóny) [2].

Vhodnou volbou se jeví při výrobě prototypů a malých sérií. Pro výrobu některých produktů jako zapalovací svíčky, svářecí trysky či malé písty může být celý postup lisování automatizován [1,2].

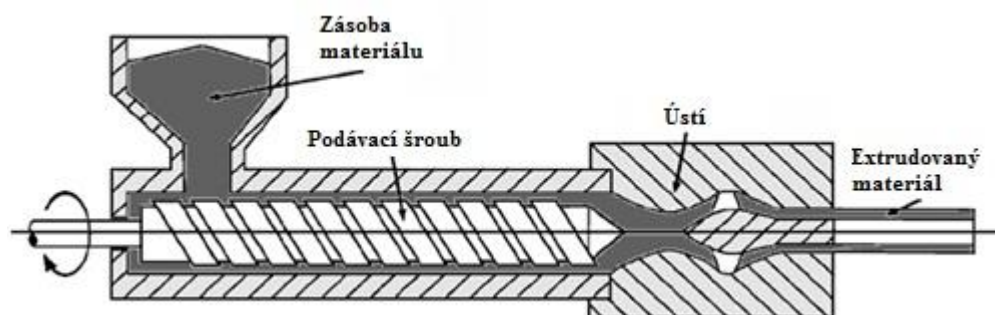
Vlhké lisování

Základní princip se shoduje se suchým lisováním avšak při tomto způsobu se využívá substrát, který dosahuje vlhkosti 10-15 %. Tím se výrazně zlepši jeho schopnost zabíhání a dosáhne se rovnoměrnějšího rozložení tlaku při lisování. Technologie dovoluje lisování tvarových prvků jako závitů, zápichy a díry i mimo směr axiální tlakové síly [2].

Nevýhoda vlhkého lisování spočívá v omezení míry komprese oproti suchému lisování. V některých případech je nutné výlisek před slinováním ještě sušit [2].

Extrudování

Při extrudování se vstupní hmota stlačuje a protlačuje skrz trysku, čímž se formuje nekonečný polotovar. K protlačování se používá pístových extrudovacích strojů nebo vakuových šroubových lisů [2,3].



Obr.17 Extrudování [3].

Extrudované výrobky mají formu trubic, tyčí či profilů, jejichž tvar závisí na tvaru trysky. Délku protlačku omezují tendence k jeho zvlnění [2,3].

Vstřikování

Vstřikováním keramického vstupního materiálu do formy vznikají komplexní produkty. Největší vstřikovací stroje mohou na jeden cyklus použít cca. 70 g materiálu. Výrobky se navrhují s co nejkonstantnější tloušťkou stěny, která může dosahovat až 12 mm [2,3].

Využití technologie limitují vysoké náklady na formy a složité výpaly používaných organických aditiv [2,3].

Lití břčky do formy

Metoda lití břčky nebo také šlikování spočívá v ulpívání materiálu na povrchu formy, která má schopnost odebírat z keramické břčky vlhkost, např. sádrová forma [2].

Metoda je vhodná pro výrobu dílů s komplexní geometrií. Mohou být vytvořeny i relativně rozměrné tenkostěnné či plné objekty. Při výrobě dutých tvarů se po vytvoření stěny žádané tloušťky nevyužitý tekutý materiál vylíje [1,2,3].

Pásové lití

Keramický materiál s organickými aditivami se nanáší na pohybující se ocelový pruh, proti směru jeho pohybu se žene horký vzduch, který vrstvu keramiky vysuší. Ta si v zeleném stavu díky speciálním aditivům zachovává pružnost. Tloušťka keramického plátu se pohybuje v rozmezí od 0,25 do 1,00 mm [2,3].

Materiál v zeleném stavu může být skladován nebo okamžitě zpracován. Využívá se stříhání, děrování, lisování a podobné metody. Hotové výrobky našly uplatnění ve výrobě substrátů, opláštění, kondenzátorů a vícevrstvých převodníků [2].

1.5.4 Od formování k výpalu

Spolu s permanentními aditivami a keramickým práškem zformované těleso obsahuje určitý podíl vlhkosti a často i organické plastifikátory, tmely, deflokulanty a další přísady. Aby se

předešlo poškození, musí být všechny nežádoucí látky ze zelného tělesa před slinováním odstraněny, a to odpařením nebo rozkladem [1].

Sušení

Vlhkost uzavřená ve zformovaném zeleném tělese vytváří tenký film vody na každé částici. Po odstranění tohoto filmu se částice přiblíží a dojde k smrštění objemu při sušení. Velikost smrštění je přímo úměrná míře vlhkosti tělesa, také závisí na velikosti zrn, surovém materiálu a předcházející technologii zpracování [2,3,8].

Průběh této operace se musí pečlivě sledovat, neboť vzniká riziko nerovnoměrného odstraňování zbytkové vlhkosti. To vede ke generování nežádoucích mechanických napětí v tělese [2].

U některých materiálů (např. na bázi jílových minerálů), při vytvoření deskových těles, dochází k rozdílnému smrštění ve směru délky a ve směru průřezu. Tím vzniká textura, na kterou se musí brát zřetel. Použitá technologie sušení se liší podle základního materiálu [2,3].

U metod zpracování granulátu jako suché lisování a vstřikování není tento krok nutný [1].

Vyhoření

Zelená tělesa vytvořená ze surového materiálu s dostatečnou plasticitou mají často dostačující odolnost vůči lomu. Ta však může být vylepšena přidáním vhodných přísad. Tyto přísady jsou však nezbytné pro neplastické surové materiály [2].

Před slinováním se musí ze zeleného tělesa všechny plastifikátory a tmely odstranit pomocí vyhoření. Aby nedošlo k poškození nebo nežádoucímu ovlivnění vlastností materiálu, aplikují se postupy v závislosti na teplotě, tlaku, atmosféře a čase [1,2,3].

Jednou variantou vyhoření je *zkoksování* neboli *zuhelnatění*. Využívá se např. při výrobě karbidu křemíku SiC. Princip spočívá ve změně organických přísad na uhlík, který zůstává ve struktuře zkoksovaného tělesa. Přidáním reaktantů při slinování dochází k reakci za vzniku keramické matrice [1,2,3].

Po odstranění organických přísad se v tělese nachází pouze slabé kohezní síly a manipulace s tělesem vyžaduje nesmírnou opatrnost v dalších procesech. Aby se předešlo poškození, pokud to výrobní postup umožňuje, kombinuje se vyhoření nebo zkoksování se slinováním bez dalších mezioperací [2,3].

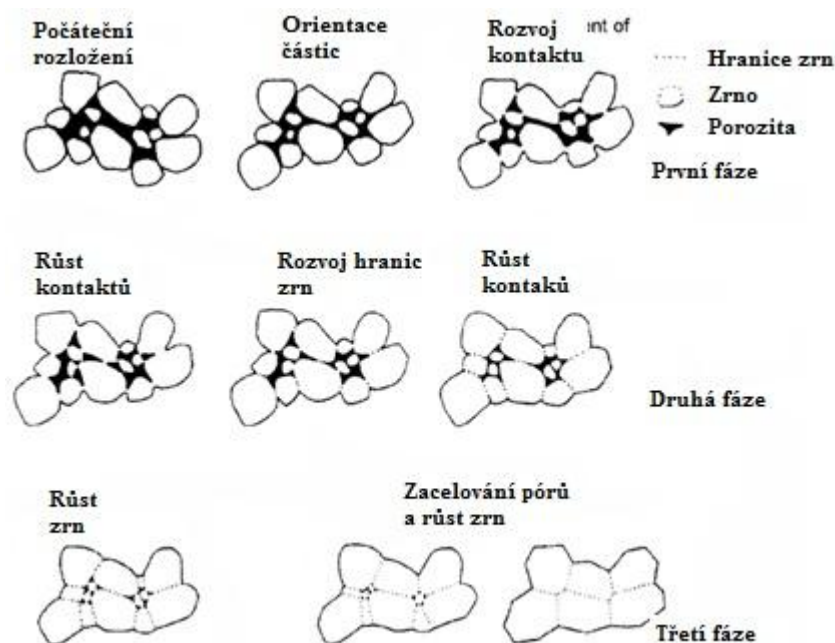
Předběžný výpal

Pro snížení rizika poškození zeleného tělesa po vyhoření/zkoksování lze do výrobního procesu zařadit fázi předběžného výpalu s malým smrštěním. Je vyžadováno, aby smrštění a pevnost tělesa po předběžném výpalu byly reprodukovatelné kvůli kontrole procesních parametrů [2].

Slinování

V zeleném tělese se nachází pouze velmi malé množství vazebných sil. Aby byl materiál schopen vyhovět všem požadavkům na něj kladených, musí dojít k vytvoření struktury se silnými a početnými vazbami. Toho se dosahuje při procesu slinování, při kterém vzniká samotný keramický materiál s iontovými a kovalentními vazbami. Jedná se o fyzikálně chemický proces, nesmí však být zaměňován s výpalem. Těleso složené z prášku či porézní těleso se při zachování tvaru zpevňuje tepelným působením a jednosložkovými reakcemi. Tyto děje pak mohou probíhat ve vakuu nebo za zvýšeného tlaku [1,2,3].

Během slinování probíhá mnoho reakcí, jejich pořadí a míru lze ovlivnit čistotou materiálu, zrnitostí, zhutněním a ochrannou atmosférou. Důležitou součástí procesu je velikost, průběh a gradient teploty, např. oxidická keramika potřebuje vyšší teplotu než keramika na bázi živce (porcelán), který obsahuje velký podíl skelné fáze [2,3].



Obr.18 Růst zrn v průběhu slinování [2].

V první fázi probíhající v materiálu dochází k vhodné orientaci a přiblížení zrn (zhuštění mřížky). Při jejich kontaktu dochází ke spojování hranic zrn a zvětšování kontaktních ploch. Spojování zrn pokračuje až do téměř úplného odstranění volných prostor (pórů), čímž končí druhá fáze. Ve třetí fázi je iniciován vznik vazebných sil, k jejich pevnosti přispívá i difuze mezi zrny [7].

Vzhledem k přiblížování a spojování zrn dochází ke změně celkového objemu tělesa, k smrštění. Míra smrštění se liší podle zvoleného materiálu i podle samotného postupu slinování. Pro dosažení požadovaných výsledků se musí přesně načasovat veškeré děje v peci, od změny tlaku a atmosféry až po sepnutí ohřevu [1].

Rozlišují se 3 základní typy slinování podle skupenství, při kterém probíhá [9]:

- slinování v tuhé fázi – teplota dosahuje 1200-2200°C, 70-80% teploty tavení materiálu,
- slinování v tekuté fázi – dochází k roztavení aditiv s nízkou teplotou tavení a vytvoření skelné fáze mezi zrna,
- slinování v plynné fázi.

Typické slinovací teploty pro různé materiály [2]:

- alumina $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 1250^\circ\text{C}$,
- quartz $\text{SiO}_2 \rightarrow 1300^\circ\text{C}$,
- steatit $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \rightarrow 1300^\circ\text{C}$,
- kordierit $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{Si}_5\text{AlO}_{18}) \rightarrow 1250\text{-}1350^\circ\text{C}$,
- oxid hlinitý $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 1600\text{-}1800^\circ\text{C}$,
- rekrytalizovaný SiC $\rightarrow 2300\text{-}2500^\circ\text{C}$,
- slinovaný karbid křemíku $\text{SiC} \rightarrow 1900^\circ\text{C}$,
- nitrid křemíku $\text{SiN} \rightarrow 1700^\circ\text{C}$.

Vzhledem k vysokým teplotám musí být vybavení vnitřního prostoru pece vysoce odolné. Často se jako vhodný materiál volí grafit ve formě desek, bloků a izolačních vat. Vedle vysokých nákladů na energii k výhřevu tvoří toto vybavení významný ekonomický faktor [1,2].

Slinování karbidu křemíku v pevné fázi (SSiC) probíhá za vyšších teplot než u slinování v plynné či kapalně fázi, jelikož je potřebná větší energie pro přeskupení prvků (volná místa, zrna SiC). Celá reakce také probíhá pomaleji. Transport prvků probíhá buď po hranicích zrn, nebo pomocí objemové difúze přes hmotu krystalů. Vzhledem k nižšímu difúznímu koeficientu přednostně probíhá po hranicích zrn [9].

Proces probíhá ve třech fázích [9]:

1. částice se vzájemně dotýkají a přeskupují se, nedochází ke smrštění, tvoří se první hranice zrn,
2. dochází ke smrštění, póry mají tvar kanálů,
3. dochází k růstu zrn, póry se uzavírají a zmenšují. Po ukončení fáze neexistují otevřené póry.

Pro dosažení menší energie na hranicích zrn se póry spojují, větší přitahují menší, a drží se na hranicích zrn a tím je deformují. Zmenšování pórů probíhá difúzní cestou. Nežádoucí, avšak v ději přítomné, je odtržení prázdných míst. Tím vznikají mezikrystalické póry, které se jen stěží zmenšují vzhledem k obtížnosti difúzních pochodů přes objem krystalu. Póry nejsou prázdné, nýbrž obsahují plyn, který pochází z pecní atmosféry, nebo se odštěpil ze samotného tělesa. Smršťováním pórů se tlak plynů zvyšuje a znesnadňuje jejich úplné vymizení a tím zůstane přítomna zbytková porozita v materiálu [2,9].

Granulát se připravuje ze submikronového prášku SiC a z malého množství bóru a uhlíku (méně než 1 hm.% bóru a přibližně 10 hm.% uhlíku). Bór se aplikuje v čisté formě nebo sloučenině a snižuje povrchovou energii za nízkých teplot, která brání zhutňování za vysokých teplot. Uhlík se přidává ve formě sazí nebo organické sloučeniny s vysokou výtěžností uhlíku [1,9].

Přídavek uhlíku se v materiálu chová jako pór, působí však pouze místně a nemá vliv na vazebné interakce mezi zrny. Při překročení rozpustnosti boru dochází k usazení nebo ke vzniku karbidu bóru na hranicích zrn. Zde se chová jako refrakterní materiál, nedochází k omezení pevnosti materiálu a mechanismus lomu zůstává mezikrystalický [9].

Lisování za tepla

Používá se pro výrobu dílců s hustotou blízkou teoretickému maximu. Při slinování působí na těleso neaxiální síla [2].

Izostatické lisování za tepla

Podobně jako u lisování za tepla dochází k vytvoření těles s maximální hustotou. Spolu s vysokou teplotou, která se blíží kritické teplotě pro vznik křemíkové skelné fáze, působí na zelené těleso i izostatický tlak plynu o velikosti až 3000 barů [2].

1.5.5 Rozměry a smrštění

Vzhledem k náročné obrobitelnosti slinovaných keramických materiálů se vyžaduje, aby se v zelené fázi výroby připravily rozměry tak, aby pominula nebo byla výrazně snížena nutnost jejich dalšího obrábění, pokud to umožňují požadované geometrické tolerance a drsnosti povrchu. Tímto se docílí úspory financí i času [1].

Složitost dosažení přesných rozměrů základů konečného výrobku při obrábění v zeleném stavu spočívá v základní vlastnosti, kterou mají téměř všechny keramické materiály. A to redukci objemu neboli smrštění. Míra smrštění závisí na použitém postupu výroby, typu materiálu i přípravě základních granulátů a způsobuje ho úbytek vlhkosti a redukce aditiv při sušení, zkoksování a vypalování [1].

Vlastní keramický materiál vzniká až procesy probíhajícími při slinování. Působení vysokých teplot vede k redukci povrchu částic a tím k ucelení mikrostruktury. Při tom dochází k difúznímu procesu mezi zrny, tvorbě kapalné fáze a změnám fází [1].

Z těchto důvodů musí být formy či raznice rozměrově naddimenzovány. Znalost procesu smrštění a schopnost jeho reprodukce je nezbytná pro tvorbu přesných výrobků [1].

Tab.4 Míra smrštění vybraných materiálů [2].

Materiál	Smrštění
Infiltrovaný karbid křemíku SiSiC	0%
slinovaný karbid křemíku SiSiC	18-20%
Kordierit $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	3-8%
Aluminový porcelán Al_2O_3	13-16%
Oxidy hliníku Al_2O_3	17-20%
Oxidy zirkonu ZrO_2	25-32%

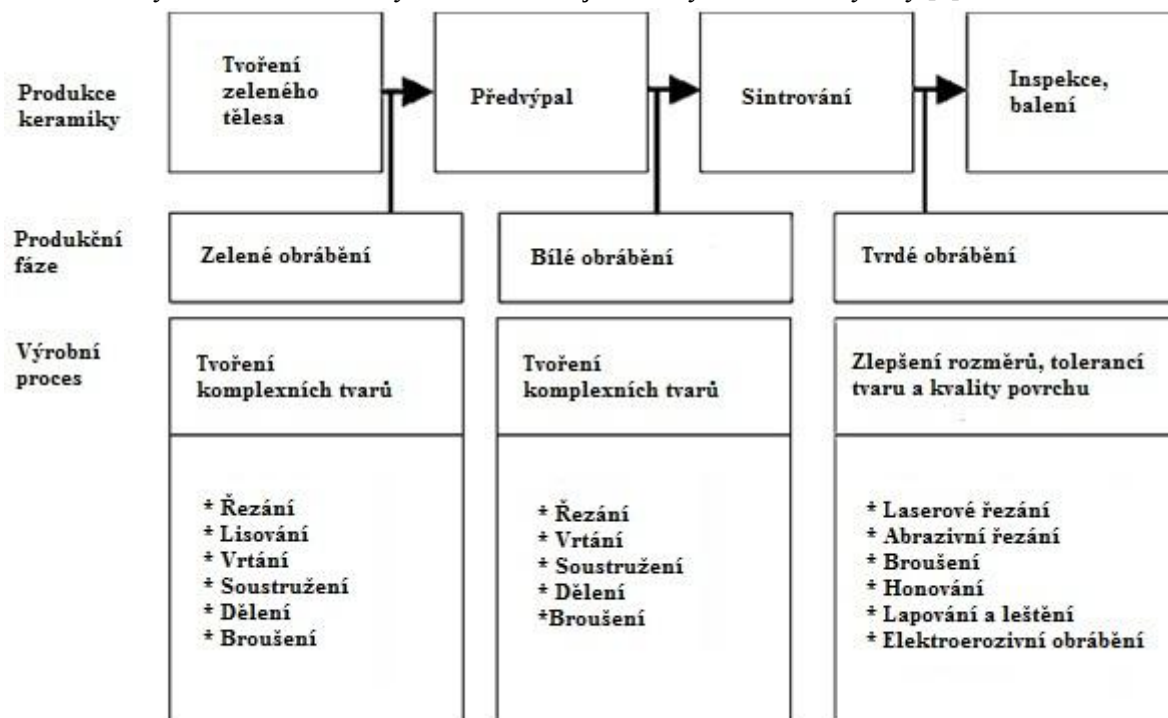
Karbid křemíku syčený křemíkem SiSiC dosahuje nulového smrštění. Materiál tvořený karbidem křemíku se smršťuje, do tělesa se však infiltruje čistý křemík, který reaguje s přítomným uhlíkem a vytváří další karbid křemíku, čímž se smrštění kompenzuje [1,2,9].

Na rozdíl od kovových materiálů, se všechny rozměry navrhují s co nejširšími možnými tolerančními poli za účelem zamezení nárůstu nákladů na dodatečné obrábění. Přesné tolerance se používají pouze v nezbytných případech, aby nedošlo k omezení funkce dílu [1].

1.5.6 Obrábění

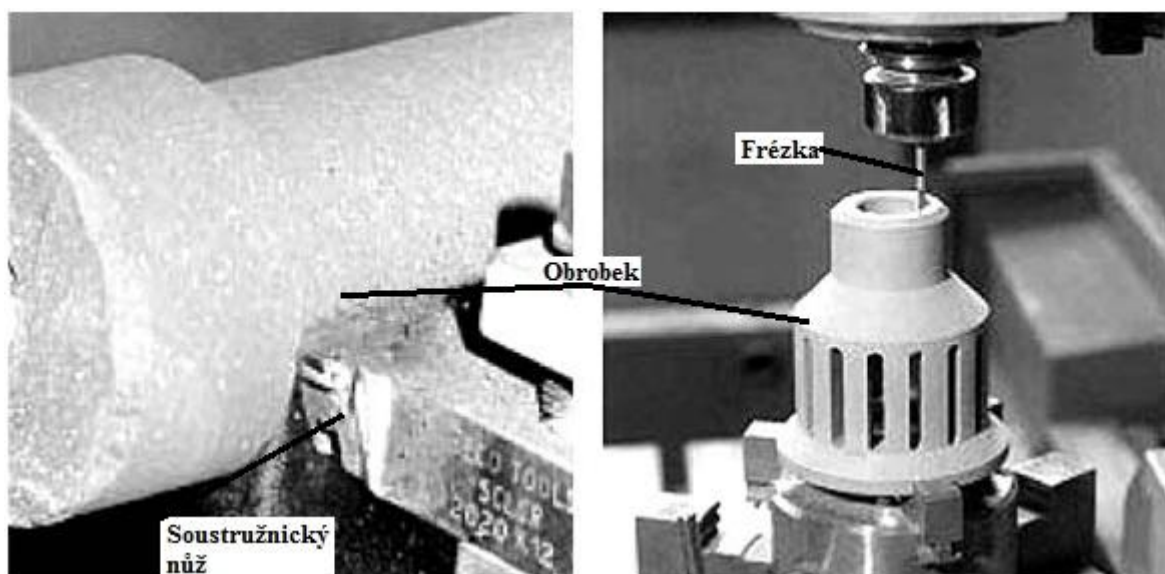
Během přípravy hotového výrobku dochází k obrábění v několika fázích. Rozlišuje se obrábění zelené, bílé a tvrdé. Toto dělení je závislé na složení materiálu, kdy pro materiál obsahující organické složky se aplikuje zelené obrábění, pro materiál bez organických složek avšak neslinutý bílé a pro slinutý keramický materiál tvrdé. Jednotlivými variantami obrábění se práce zabývá dále [1].

Tab.5 Metody obrábění keramických materiálů v jednotlivých stádiích výroby [2].



Zelené obrábění

Zelené obrábění probíhá na vysušených tělesech, které stále obsahují organické složky. Aplikuje se v kusové či malosériové výrobě. Také se využívá k vytváření geometrií, které nelze lisovat, jako díry a otvory ve směru rozdílném od směru lisovací síly [1].



Obr.19 Zelené obrábění komponenty [2].

slinované keramické výrobky mají vysokou tvrdost a vyžadují drahé broušení diamantovými nástroji ke splnění požadavků na přesnost. Pro omezení vzniku defektů se

aplikují pouze malé řezné rychlosti a síly kvůli křehkému chování materiálu, čímž se generují dlouhé výrobní časy. Pro vylepšení situace došlo k rozvoji různých procesů obrábění, např. ultrazvukové, elektro-erozivní, laserové, elektro-chemické, atd. Často však zůstává limitováno na broušení, frézování a soustružení s diamantovými nástroji. Jeden z přístupů spočívá v návrhu pojiva, které umožní vytvoření tělesa s lepší obrobitelností, dále s využitím fyzikálního modelování definovat potřebnou geometrii nástroje, čímž se dosáhne vytvoření tělesa obrobitelného v zeleném stavu bez iniciace vzniku trhlin na nebo pod jeho povrchem [1,2,3].

Zelené obrábění u karbidu křemíku spočívá v zavedení slabších vrstev, které odkloní šíření trhliny, stále však poskytujících dostatečnou soudržnost. Vhodná volba plastifikátoru či pojiva způsobí menší vrubovou citlivost, vylepší lomovou tuhost materiálu a poskytne dostatečnou pevnost zeleného těla i při menším objemu. Předpokládá se, že tvorba třísky se iniciuje křehkým lomem založeným na lomovém napětí, které je funkcí hydrostatického tlaku a Von Misesova namáhání. Teplo vznikající při obrábění se generuje vlivem plastické deformace materiálu a hlavně třením v kontaktu povrchů obrobku a nástroje. Předpokládá se, že koeficient tření karbidu křemíku dosahuje hodnoty 0,2 [1,11].

Hloubka řezu také ovlivňuje časovou náročnost obrábění. Blok z karbidu křemíku unese řezné síly vznikající při maximální axiální hloubce řezu 22,5 mm, při posuvu na otáčku 0,06 mm a otáčkami nástroje 3000 1/min. Při použití vysokých řezných hloubek dojde k významné redukci produkčního času a tím i ovlivnění nákladů na zelené obrábění [11].

Zelené obrábění generuje velmi jemné, prachu podobné, piliny. Síly měřené při obrábění tak dosahují velmi nízkých hodnot. Odvod prachu při obrábění lze ovlivnit vhodnou volbou úhlu šroubovice nástroje, 5-ti osé CNC obrábění se tak stává vhodnou variantou. Používá se nástrojů s vyměnitelnou břitovou destičkou s lepeným či pájeným diamantovým břitem nebo nástroje s galvanicky vázaným diamantem [1,2].

Bílé obrábění

Bílé obrábění se aplikuje ve fázi výroby po zkoksování, těleso již neobsahuje organické příměsi. Jeho pevnost závisí na slabých vazebných silách. Vhodné je pro výrobu prototypů i pro sériovou výrobu [2].

Při obrábění se dosahuje vysokého úběru materiálu s relativně malým opotřebením nástroje s keramickým nebo diamantovým povlakem [1].

Tvrdé obrábění

Tvrdé obrábění, také nazývané finální obrábění, přichází na řadu po slinování, kdy se v tělese již nachází pouze keramické fáze. Vzhledem k vysoké tvrdosti a pevnosti hotového materiálu se obrábí pouze plochy, které nesplňují rozměrové požadavky po lisování a po předchozích formách obrábění, nebo se vyžadují přesné úpravy povrchů [1,2].

Nároky na úzká toleranční pole velmi přesných rozměrů a rozličnost drsností povrchů vyžaduje použití moderních nástrojů. Téměř výhradně se používají diamantové brusné kotouče. Syntetický diamant se do nástroje umísťuje pomocí pryskyřičné, kovové nebo keramické vazby [1,2,3].

Tab.6 Přehled metod obrábění s pužívanými nástroji a účelem použití [2].

Metoda	Materiál nástroje	Účel
Broušení	Mechanicky vázané zrno, vlhké, diamantové brusné kotouče	Hrubé nebo jemné obrábění. Výroba funkčních povrchů při splnění požadovaných tolerancí a kvality povrchu.
Řezání	Mechanicky vázané zrno, vlhké, diamantové řezné a brusné kotouče	Oddělení polotovarů
Honování	Mechanicky uvolněné zrno, vlhké, diamantový honovací trn	Zlepšení rozměrové přesnosti a kvality povrchu (např. kluzné povrchy)
Lapování, leštění	Mechanicky uvolněné zrno, vlhké, diamantová lapovací směs	Zlepšení rozměrové přesnosti a kvality povrchu (např. těsnící povrchy)
Ultrazvukové lapování	Mechanicky uvolněné zrno, vlhké; diamantová lapovací směs	Hloubení, gravírování
Řezání vodním paprskem	Mechanicky uvolněné zrno, vlhké	Řezání
Tryskání	Mechanicky uvolněný štěrk, suché	Odstranění měkkých oblastí na povrchu, hrubování povrchu
Elektroerozivní obrábění	Elektrické; měděná, wolframová nebo grafitová elektroda	Komplexní tvary, téměř výhradně u SiSiC
Zpracování laserem	Tepelné; CO ₂ laser	Hloubení, oddělování, řezání

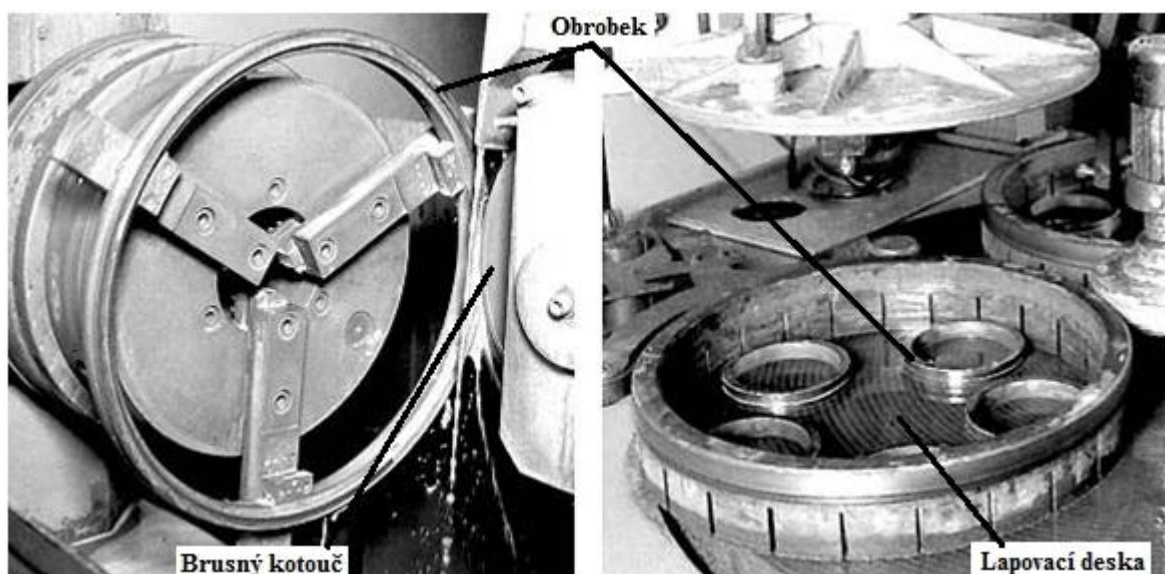
Broušení se dostává největší pozornosti. Jelikož tento proces ovlivňuje mnoho faktorů, bere se velká zřetel na výběr vhodných brusných nástrojů, jejich složení, tvrdost a velikost zrn [1].

Při broušení dochází k úběru materiálu pomocí zrn brusného kotouče, který se pohybuje v příslušném směru paralelně s povrchem obrobku. Zrna kotouče, obvykle diamantová, způsobují v povrchu tělesa mikrotrhliny, křehký lom nebo plastický tok materiálu, tím dochází k separaci keramických částic. V plastické oblasti existují dva systémy šíření trhlin, mediálně-radiální a laterální trhliny. První zmíněný systém se obvykle spojuje s pevnostní degradací materiálu, druhý pak s úběrem materiálu [12].

Z mnoha průzkumů založených na laboratorních pokusech vyplývá, že se pro křehké materiály nejlepších výsledků dosáhne pomocí křehkého lomu. Návrh brusného nástroje i podmínek obrábění by měl být zaměřen na dosažení právě tohoto lomového mechanismu [2].

Pro dosažení super hladkých a přesných povrchů a povrchů bez defektů, např. u kluzných ložisek, se po broušení do výrobního procesu zařazuje *lapování* a *leštění*. Hlavním parametrem, který ovlivňuje výsledek, je tlak a relativní rychlost, s jakými se obrábí. Jako abrazivní materiál se převážně využívá diamantových, ceriových (CeO_x) nebo zirkoniových suspenzí. Při využití diamantové suspenze má navýšení jednotlivých vstupních parametrů (tlak, relativní rychlost) podobný efekt. Při použití cerie nebo zirkonia pro obrobení nitridu křemíku navýšení tlaku má výrazný efekt, avšak navýšení rychlosti ne. Tyto rozdíly způsobují mechanismy úběru materiálu. Použití diamantových suspenzí využívá mechanických procesů, u cerie a zirkonia dochází k chemicko-mechanické interakci. Při obrábění karbidů křemíku vzhledem k výjimečné míře úběru materiálu je nejvhodnější volbou použití diamantových suspenzí [1,2,3,13].

Pro dosažení žádaných charakteristik povrchu lze aplikovat různé metody leštění. Konvenční leštění spočívá v použití leštících emulzí s hrubým zrnem za vysokých tlaků. Dochází však ke vzniku povrchových a podpovrchových defektů. Při ultra jemném leštění se vytvoří zrcadlový povrch. Oproti konvenčnímu leštění se využívá jemnějších a měkčích zrn v emulzi v kombinaci s malým přitlačným tlakem. Pro zabránění vzniku škrábanců na povrchu materiálu se aplikuje abrazivní materiál měkčí než obráběný materiál při mechanicko-chemickém leštění. Úběr materiálu lze srovnávat s běžně volenými abrazivy (tvrdší než obrobek), jelikož působením tlaku spolu s pohybem abraziva iniciuje chemickou reakci mezi leštícími a leštěnými zrny. V kontaktních bodech tak vznikají vysoké teploty a tlaky, po reakci se reakční produkt odebere měkkým abrazivem [2,13,14].

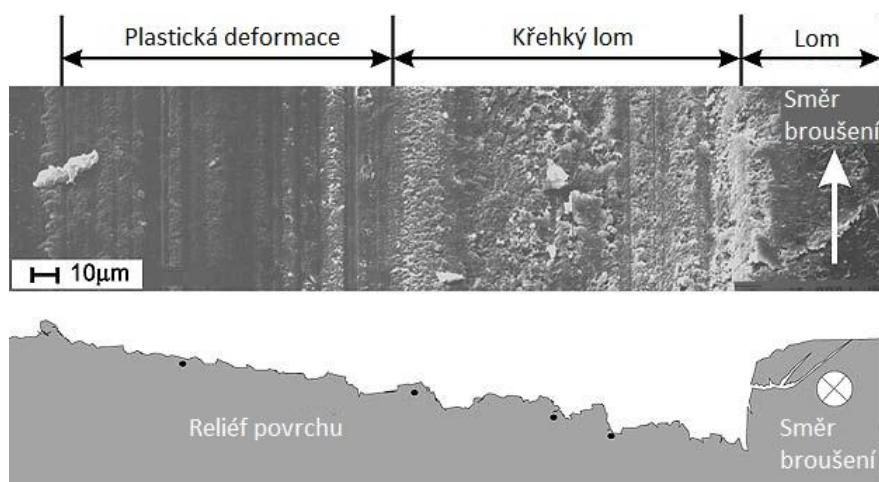


Obr.20 Tvrdé obrábění: vlevo broušení, vpravo lapování [2].

1.5.7 Charakteristika povrchu

Broušený povrch

Obr.21 zachycuje stopy po obrábění. Jsou jasně patrné mechanismy, jakými se materiál odděluje, a to plastická deformace, křehký lom a dolomení. V oblasti dolomení se mikrotrhliny šíří axiálně, radiálně i laterálně. V oblastech, kde působí brusný kotouč, se mikrotrhliny šíří pouze ve směru úběru materiálu [1,2].

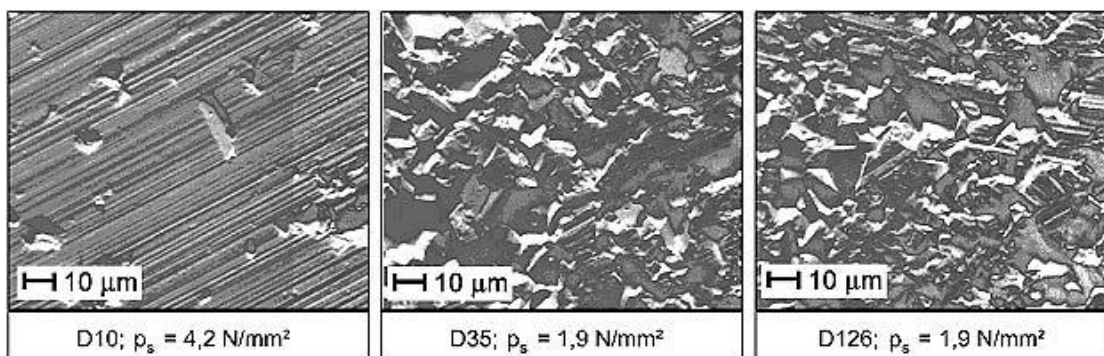


Obr.21 Broušený povrch (materiál - SiN) [2].

Honovaný povrch

Při honování dochází ke kontaktu brusného nástroje s velkou plochou povrchu. Řezná rychlost je ve srovnání s broušením menší, čímž dochází k menšímu generování tepla v oblastech řezu a tím i menšímu tepelnému namáhání nástroje i obrobku. Povrch po honování nenesie žádné známky tepelně iniciovaných trhlin ani natavení povrchu [1,2].

Hloubka průniku řezných zrn a řezná rychlost určují, zda dojde ke křehkému nebo tvárnému oddělení materiálu. S rostoucí řeznou rychlostí pozitivně roste míra křehkého mechanismu, avšak s negativním dopadem na kvalitu povrchu kvůli zvýšené tendenci k tvorbě trhlin vedoucích k lomu a odlupování materiálu [2].



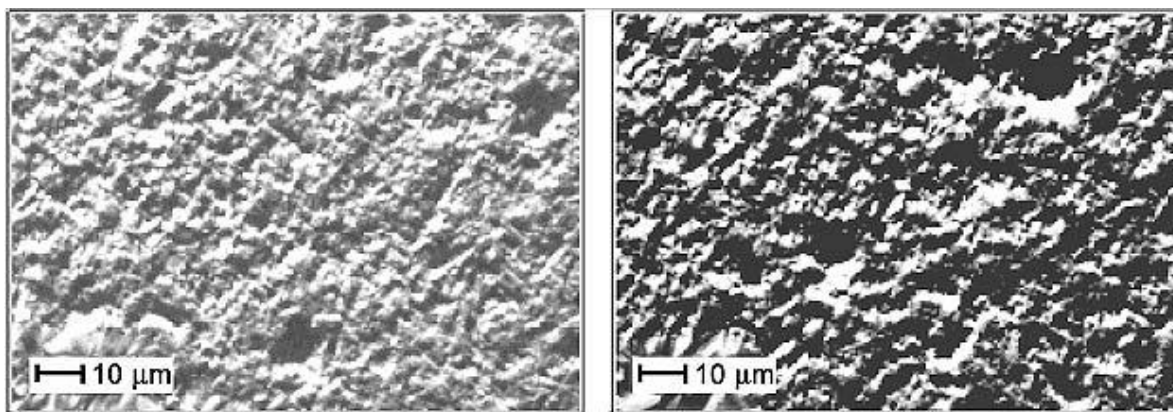
Obr.22 Honovaný povrch (D – velikost brusných zrn; p_s – kontaktní tlak; Al₂O₃) [2].

Lapovaný povrch

Při lapování nejsou abrazivní zrna pevně spojena s nástrojem, nýbrž se na něho nanášejí ve formě směsi jako lapovací pasta nebo emulze [3].

Dochází k velmi malému úběru materiálu, proto se lapování využívá ke zlepšení vlastností povrchu nebo zvýšení geometrické přesnosti. Téměř izotropní textura povrchu nese neuspořádané škrábance, homogenně rozležené dutiny a izolované interkrystalické povrchové lomy. Tento povrch často nachází výhodu ve svých tribologických i optických vlastnostech [1,2].

Samotný mechanismus úběru materiálu spočívá v dočasném ukotvení brusných zrn v nástroji, který koná vířivý pohyb, a který následně vytváří v obrobku škrábance. S ohledem na mikrostrukturu obrobku a volbu zrnitosti brusného média lze dosáhnout velmi dobrých vlastností povrchu (rozměrová přesnost do 1 $\mu\text{m}/\text{m}$, rovinnost a rovnoběžnost do 0,2 μm a drsnost povrchu R_a menší než 0,3 μm) [2,13].

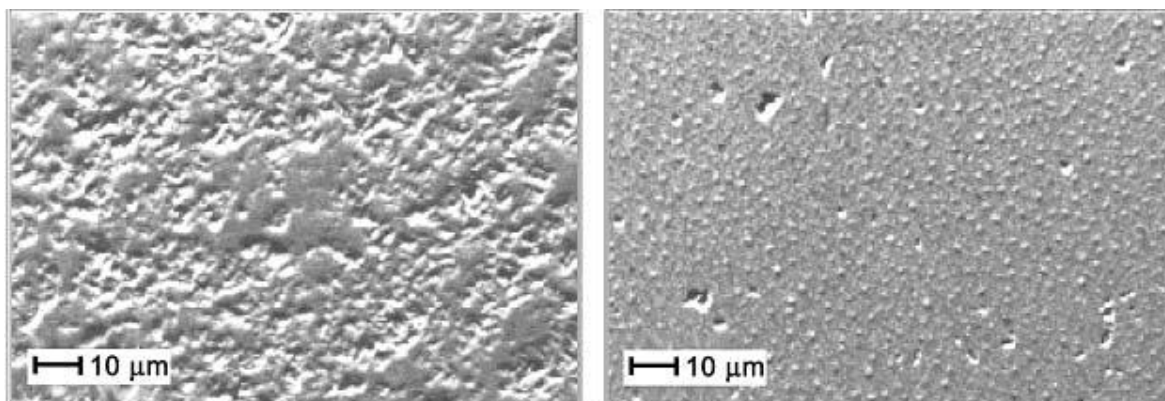


Obr.23 Lapovaný povrch (zrnitost pasty F180 a F800; SiC) [2].

Leštěný povrch

Obdobně jako u lapování se využívá velmi jemných brusných zrn, avšak při leštění nejsou volná, ale jsou vložena do tkaniny leštícího kotouče. Jejich pohyb vůči obrobku tak není náhodný, materiál je odebírán v neměnném směru. Tím se docílí vysoce kvalitního, opticky reflexního povrchu [2,3].

Leštěný povrch se charakterizuje hladkými oblastmi a dutinami, závislými na době leštění a velikosti abrazivních zrn [2].



Obr.24 Leštěný povrch (velikost leštících zrn $9\mu\text{m}$ a $0,25\mu\text{m}$) [2].

1.6 Aplikace keramických materiálů

1.6.1 Textilní průmysl

Přibližně před 40 lety výrobci příze začali nahrazovat vedení vláken ve svých strojích vedením z ocele potaženým keramickým materiálem kvůli snížení opotřebení. Vzhledem k vysoké rychlosti průchozího vlákna docházelo k velkému opotřebení. Různé lubrikační prostředky byly používány pro snížení toho fenoménu, avšak následně vyvstala nutnost dodatečného čištění příze znečištěné mazivy [2,3].

Použitím keramických materiálů se zvýšila životnost dílu až desetkrát a došlo k odstranění maziv, která by mohla znečistit vlákno. Moderní textilní průmysl často zpracovává nekonečná syntetická vlákna. Pro dosažení jejich nejvyšší kvality se využívá keramických třecích a napínacích disků pro vyhlazení povrchu vláken a úpravu jejich průřezu [2,3].

Zde jako alternativní materiál pro disky figuruje polyuretan, ten má příznivější pořizovací náklady, avšak jeho životnost dosahuje pouhých pár měsíců na rozdíl od několikaletého servisního intervalu keramiky [3].

1.6.2 Zpracování kovů

Tváření neželezných kovových vláken

Žádné moderní fungující společenství se dnes neobejde bez elektrické energie a komunikačních kanálů. Dodávky těchto nezbytností jsou realizovány rozsáhlým systémem kabelových sítí [2].

Od vysokého napětí, přes telekomunikační vedení až po nejjemnější dráty v elektrotechnice, vše ve vysoké míře obsahuje měď a její slitiny. Všechny možné varianty drátů začínají stejně, v tavenině, která se odlévá na pruty navíjené na buben a jejich následné tažení do nejrůznějších průměrů [3].

Při výrobě prutů dosahuje teplota až 800°C . Tuto teplotu hravě zvládají keramické materiály a zaručují dlouhou, bezporuchovou funkci. Proto se využívají pro vedení při pohybu surového drátu. Keramický materiál navíc nereaguje s částečně dokončeným produktem, na rozdíl od kovů, u nich dále hrozí poškození ochranných povlaků a následný kolaps [2,3].

Hotové dráty se dodávají navinuté na jádře nebo bez jádra jako cívka. Při druhé variantě se drát navíjí na keramické bubny, které přesně určí parametry vinutí a následně se vyjímají [3].

Obrábění s keramickými řeznými destičkami

Soustružení, frézování a vrtání jsou základními metodami zpracování produktů ve strojírenské výrobě. Proces obrábění mění neobrobený vstupní materiál na obrobek, který se následně připraví k instalaci [3].

Jako nástroj pro odebrání materiálu lze použít nože s keramickými řeznými destičkami. Ty zaručují nejvyšší možné obráběcí rychlosti při zachování maximální produktivity a ekonomičnosti [1].

První destičky vyrobené z aluminy se začaly používat v roce 1957 a sloužily k vysoce-výkonnému dokončovacímu obrábění litiny. V následujících letech se mezi řezné materiály zařadily i ostatní typy keramik (cermety, SiN, SiAlON,...). Pro další zlepšení vlastností keramických řezných materiálů se mohou povlakovat (např. materiály na bázi křemíku). Každý typ se hodí pro jinou aplikaci, jako např. vysoce-výkonné obrábění litin i tvrzených ocelí [3].

Oxidická keramika, která využívá aluminy s částicemi oxidu zirkonu jako prvkem pro zvýšení tuhosti, je preferována pro soustružení a drážkování za uniformních podmínek [3].

Materiály jako TiCN (zástupce směsné keramiky) se vyznačují výbornou tvrdostí i za vysokých teplot. Díky tomu se volí jako nejvhodnější aplikace pro finišování při soustružení [2,3].

Materiály s křemičitým základem, hlavně SiN a α/β SiAlON, které obsahují ve struktuře částice jehlicovitého tvaru z Si₃N₄ nebo zrna SiAlON, dosahují výjimečné tuhosti při zachování výborné odolnosti proti opotřebení. Využívají se pro vysoce-výkonné finišování při soustružení a frézování litiny, a to dokonce i za velmi nepříznivých a drsných podmínek [2,3,15].

Polykrystalický nitrid bóru se vyznačuje jednou z nejvyšších tvrdostí mezi syntetickými materiály a výjimečnou odolností proti opotřebení. Díky své rozměrové stabilitě a kvalitě zpracovávaného povrchu se využívají při vysoce-výkonném soustružení [3,15].

Povlaky obsahující aluminu Al₂O₃ a/nebo nitridy uhlíku-titanu se obecně skládají z několika vrstev zvyšujících odolnost proti opotřebení a snižují tření během obrábění. Toto napomáhá ještě vylepšit již tak excelentní vlastnosti keramických řezných destiček [3].

Konvenční materiály, jako nástrojová ocel, nemohou dosáhnout řezných podmínek jako ty keramické, kdy řezná rychlost může překročit i 1000 m/min. Toto omezení vyplývá z jejich menší teplotní pevnosti. Jelikož do keramické destičky nepřechází žádné teplo, není nutné použití chladicích kapalin a veškeré generované teplo odchází spolu s třískou. Materiály s vysokou tvrdostí vyžadují vysoký čas na obrobení a často je lze obrábět pouze broušením. Keramika opět přináší lepší vlastnosti a lze tak přistoupit k soustružení těchto materiálů [2,3,15].



Obr.25 Vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky [1].

Keramické materiály ve svařovací technice

Sváření vystupuje jako jeden z procesů spojování materiálů. Část stroje, která se přímo účastní zpracování materiálu, přichází do kontaktu s extrémními podmínkami, které způsobují významné mechanické namáhání materiálu [3].

Díky svým vynikajícím vlastnostem, mnohokrát zmiňovaných na předchozích stránkách této práce, keramika našla své uplatnění i v této oblasti. Speciálně tři její druhy: alumina pro plazmové hořáky, oxid zirkonu stabilizovaný ytriem pro svařovací piny a nitrid křemíku pro svařovací kladky, svařovací piny nebo plynové trysky pro MIG a MAG svařování [3,15].

Použití těchto vysoce-výkonných materiálů přináší následující výhody: delší životnost nástroje, redukce celkových výrobních časů, nárůst času provozu stroje, zamezení studeným odstavením, zlepšení kvality svarového spoje [3].



Obr.26 Keramická plynová tryska pro sváření v ochranné atmosféře [1].

Keramické materiály ve slévárenství

Agresivní taveniny, teploty přesahující 1000 °C a rozdíly teploty ve stovkách stupňů. Pro zajištění kontrolovatelnosti procesu, systémové dostupnosti a maximální čistoty taveniny není možné použít většinu běžných materiálů. Keramické materiály jsou výjimkou, např. titanát aluminový (alumina s oxidem titanu). Speciální technologie reakčního slinování zajišťuje mikrostrukturu s mikropóry a trhlinkami, které propůjčují materiálu důležité vlastnosti jako: minimální tepelná vodivost a teplotní expanze, žádná nebo minimální smáčivost kovovými taveninami a další [3].

Tyto vlastnosti předurčují materiál pro použití při odlévání neželezných kovových slitin, např. vyrobených na základě hliníku, hořčíku, zinku, cínu, mosazi nebo zlata [3].

Titanát aluminový prokázal výjimečné vlastnosti při použití jako trysky a výfuky. Nepotřebuje předehřev a může přijít do přímého kontaktu s taveninou, což je v praktické aplikaci obrovskou výhodou oproti konvenčním materiálům. Díky velmi nízké tepelné vodivosti nedochází v tavenině ke vzniku velkého teplotního gradientu, čímž se dosáhne pomalejší solidifikace a úspory energie díky potřebě nižšího ohřevu taveniny [3].

Aplikace v kombinaci s kovovým materiálem

Mnohdy je použití keramického materiálu na celou komponentu finančně náročné nebo jejich vlastnosti nesplňují konkrétní požadavky. V aplikacích pro automobilní, letecký nebo vesmírný průmysl mnohdy použití křehkého materiálu není možné. Mnohdy ani supervýkonné slitiny nesplňují požadovaná kritéria. Kombinace kovu a keramiky je možným řešením [3].

U nejrůznějších ložisek či těsnění lze využít keramického materiálu pro funkční část, ta se zalisuje do kusu z vhodného kovu. Spolu tvoří jeden komponent kombinující vlastnosti obou materiálů tak, aby výrobek v dané aplikaci předčil svou jedno-materiálovou alternativu [1,2,3].

Úprava vlastností kovového materiálu lze i na strukturní rovině. Do taveniny kovu lze přidávat částice či vlákna keramiky, čímž vytvoří keramicko-kovový kompozit. Jako kovová fáze se běžně používají slitiny hliníku, titanu či hořčíku. Pro keramickou fázi se nejvíce osvědčila alumina a karbid křemíku [3].

Pro keramicko-kovové kompozity je často velmi obtížné zvolit vhodný obráběcí nástroj vzhledem k jeho výraznému opotřebení během obrábění. Selhání obráběcího nástroje vede při obrábění všech materiálů ke ztrátě geometrických tolerancí, poškození povrchu a nárůstu časů potřebných pro nastavení stroje. Polykrystalický diamant se proto doporučuje jako ideální volba [3,16,17,18].



Obr.27 Obložení válců spalovacích motorů z kovo-keramického kompozitu [1].

1.6.3 Ochrana proti opotřebení ve strojírenských závodech

Ekonomickou efektivnost strojírenské výroby ve velké míře ovlivňuje opotřebení a koroze strojních i jiných součástí. Největší dopad přitom mají na procesy pracující s abrazivními nebo agresivními materiály. Vedení vyrobená z technické keramiky omezují opotřebení a korozi v oblastech vystavených vysokému namáhání [2].

Opotřebení odolná keramika se aplikuje např. v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, v elektrárnách, v cement a beton zpracujícím průmyslu, v přípravě minerálních základních materiálů a mnoho dalších. Přináší výhodu v delších servisních intervalech a menším nárokům na údržbu [2,3].

Nejčastěji používaná je alumina díky korozní odolnosti, odolnosti proti opotřebení, teplotní stálosti, bioinertnosti a malé hustotě [2].

Konkrétních aplikací existuje velké množství, zde se předkládá pouze nepatrný vzorek: keramické vedení ve skluzech, v oscilačních dopravnících, v bubnových mlýnech, mixérech nebo kulových ventilech. Při použití v dopravnících metalurgického uhlí do vysokých pecí se servisní interval prodlužuje dvanáctkrát oproti ocelovému vedení. V pneumatických systémech se aplikuje obzvláště ve vysoce turbulentních oblastech jako ohyby, rozvody, zakončení potrubí nebo ventily a servisní interval dosahuje až desetinásobných hodnot ve srovnání s běžně užívanými materiály. V další aplikaci napomáhá při letní přípravě sportovců, keramické desky s výstupky simulují vlastnosti ledu při tréninku letů na lyžích, v zimě se nemusí odstraňovat, materiál snese i zatížení pod vrstvou ledu [3].

1.6.4 Chemické, energetické a environmentální technologie

Aplikace technického porcelánu zná každý chemik, vyrábí se z něj laboratorní nádobí a vybavení vysoké kvality. Dále se používá pro výrobu máčecích forem pro latex, vinyl a PVC např. při výrobě rukavic [1,2,3].

Keramická těsnění, ložiska a regulátory se hojně používají ve velkém množství odvětví, obzvláště v případech, kdy čerpadla a nejrůznější vedení musí odolávat abrazivním nebo agresivním médiím. Zde díky svým vlastnostem opět excelují nad běžnými materiály [3].

Termín keramický materiál má také psychologický efekt, obzvláště pokud je aplikován v běžně dostupných přístrojích, jako jsou mlýnky na kávu (např. ložiska a mlecí kameny) a podobné, nebo pokud se účastní některého výrobního postupu, např. viskózní potraviny (džemy, krémy, klobásy, atd.) zpracované na keramických mlecích nástrojích a transportované přes potrubí a čerpadla s keramickými ložisky a těsněními [1,3].

Speciální pozornost se musí věnovat, pokud ložiska běží bez maziva. V keramice nevznikají studené svary jako u kovů, proto nehrozí zadrhnutí, avšak některé typy keramiky nemusí unést teplotní výkyvy, když dojde k opětovnému zaplavení ložiska rozehrátého zvýšeným třením mazivem. Vhodnou volbu pro takovéto případy jsou karbidy křemíku SiC [3].

V běžném každodenním životě člověk přichází do styku s keramickým těsněním pokaždé, když použije pákovou vodovodní baterii. Mechanismus těsnění a míšení vody spočívá ve dvou keramických destičkách s velmi přesně zpracovanými povrchy, které po sobě kloužou. Přesnost jejich zpracování dosahuje takové míry, že při zkompletování systému, ve kterém se nepoužívá mazivo a nedochází k žádnému vyplavování (vlivem těsného kontaktu stykových ploch), se i po 2 milionech cyklů vyskytují zbytky lubrikační látky, která se vpravuje do pórů materiálu při finišování. Obzvláště u této aplikace je názorné, jakou odolnost mají použité keramické materiály [1,3].



Obr.28 Těsnění sanitárních zařízení [1].

V chemickém průmyslu mnoho pochodů probíhá za přítomnosti katalyzátorů, tedy látek, které umožňují nebo urychlují reakci. Pořízení katalyzátoru nese velké finanční zatížení, mnohdy se jedná o velmi vzácné materiály, proto existují snahy o jejich co největší úsporu. Zde opět vstupuje do hry keramika. Ta v tomto případě funguje jako nosné médium, na které se nanáší malá vrstva katalyzační látky. V motorové dopravní technice se kladou velké nároky na čistotu zplodin, zde se používá jemná keramická mřížka potažená platinou, která umožňuje reakci výfukových plynů mezi sebou pro jejich přeměnu na méně škodlivé látky [3].



Obr.29 Laboratorní nádobí [1].

1.6.5 Elektronika

Keramika velmi dobře izoluje proti elektrickému proudu, proto se z ní vyrábí izolační elementy v elektrických zařízeních, regulátorech a žárovkách. Také se používá na výrobu pojistek ve formě malých trubiček z aluminu naplněných plynem a zapojených do obvodu, v případě nebezpečí napěťového přetížení dojde k vytvoření obloukového výboje v plynu, čímž se nebezpečí odvrátí. Po uhasnutí výboje lze pojistku nadále používat [3].

Speciálně navržené kompozity keramiky s kovem se používají jako elektrické průchodky, multi-pinové konektory, koaxiální konektory, termální prvky, izolátory nebo průzory v odvětvích leteckého, zdravotnického, mikrovlnného a laserového průmyslu a v dalších [3,19,20].

Nejvýznamnější použití lze pak nalézt ve vesmírné technologii nebo v elektronových mikroskopech. Tyto komponenty jsou odolné vůči velmi hlubokému vakuu, použitelné v rozmezí teplot -273 až 450°C , odolávají tlaku až 1700 barů a také velmi korozivní a žíravé atmosféře [2,3,19].

Izolátory ze silikátové keramiky se používají při transportu vysokého napětí, přitom mohou být zatíženy vahou elektrického vedení dosahující až několika tun v tahu. V transformačních stanicích se naopak zatěžují tlakově. Podpurné systémy anténních systémů a jejich vedení se obvykle izolují keramickými prvky. Při tom může působit váha 1000 tun na izolátor velikosti listu papíru [3].

V dnešní době miniaturizace se snaží obzvláště výrobci elektroniky dosáhnout co nejmenších výrobků. I zde přišla na pomoc keramika. Používá se jako prvek montáže komponent nebo také jako substrát pro výrobu samotných obvodů. Na velmi tenké desky z keramiky se nanáší různými metodami dráhy z kovu, které vytváří budoucí obvod. Aby mohly být aplikovány na desku další komponenty je pro ně nutné připravit lože a otvory, vzhledem k tvrdosti materiálu se používá laserů. V pasivních komponentech jako kondenzátory, rezistory a induktory se používá keramický jader a těl. Tyto aplikace vedly ke zmenšení komponentů, které dříve měřily např. $2 \times 2 \times 4 \text{ mm}$ na pouhé $0,25 \times 0,25 \times 0,5 \text{ mm}$. Inteligentním kombinováním metalizovaných obvodů a miniaturních elektronických komponent (mnohdy vytvářených v rámci nanášení kovových drah) se dosáhlo vytvoření tří-rozměrných elektronických obvodů. Po ukončení slinovacího procesu tvoří celý obvod jeden komponent [3].

V některých materiálech nedochází k rovnoměrnému seřazení elektronů a tvoří nábojová centra, i když bez zatížení se jeví jako neutrální. Avšak při zatížení dojde k nepatrným pohybům v materiálu a dojde k polarizaci krystalu, která vede k produkci napětí. Takový materiál má tzv. piezoepekt. Naopak zatížení materiálu napětím vede ke změně jeho objemu. Těchto jevů se využívá u mnoha senzorů jako např. senzory pro aktivaci airbagů v automobilovém průmyslu. Při ukládání přesných optických dílů nebo optických kabelů se pro posuvy v řádu nanometrů využívá jevu zvětšení materiálu pod napětím [2,3].

1.6.6 Balistická ochrana

Pokročilé keramické materiály jako alumina nebo karbid křemíku hrají významnou roli v ochraně osob i vozidel. Vojenské i policejní složky využívají pláty založené na keramickém materiálu k ochraně vozidel proti projektilům a šrapnelům [1,3].

Keramika jako křehký materiál se nejeví jako vhodný prvek pro tuto aplikaci, avšak v kombinaci s dalšími materiály tvoří kompozit, který zachraňuje životy a je až o 50% lehčí, než ocelový pancíř. Dopad projektilu na keramiku způsobí deformaci jeho hrotu a následný rozpad na reziduální částice, keramická destička pohltí výraznou část energie za vzniku trhlin či své destrukce. Malé částice, které vzniknou a které mají menší kinetickou energii, se zastaví o další syntetické vrstvy kompozitu umístěnými za keramikou. Aplikovat je lze na pozemní vozidla, helikoptéry, lodě a mobilní kontejnery [3].

Při ochraně jednotlivce se osvědčilo nošení ochranných vest. Pro zvýšení komfortu při nošení a zvýšení ochrany se dnes vybavují monolitními keramickými pláty nebo skládanými keramickými elementy [3].



Obr.30 Keramické komponenty pro balistickou ochranu [1].

1.6.7 Automobilní průmysl

Ochrana životního prostředí a přírodních nerostných surovin, vysoký výkon a komfort jízdy spolu s nejvyššími bezpečnostními standarty, zaručení trvanlivosti a cenové dostupnosti tvoří základ politiky všech výrobců automobilů. Tyto parametry pomáhají naplnit keramické materiály [1,2,3].

V dopravě paliva dominuje alumina v součástkách čerpadel a v nejrůznějších senzorech. Karbid křemíku se využívá v rozvodech chladících kapalina jako těsnění. Oxid zirkonu, s tepelnou roztažností podobnou oceli, tvoří třecí ložiska bez nutnosti mazání i za

vysokých teplot. Nitrid křemíku našel své uplatnění v dynamických aplikacích, silikátová keramika jako součást katalyzátorů, piezokeramika v senzorech (spouštění airbagů, couvací ultrazvukové senzory) a aktuátorech (v systému ABS, ve vstřikovačích paliva). Vysoce-porézní vložky infiltrované v tavenině bloku motoru při jeho odlévání z hliníku tvoří kompozit keramiky s hliníkem pro funkční povrch válců motoru s nesrovnatelnými tribologickými vlastnostmi [1,2,3].

Použití keramických materiálů v automobilech každý den přibývá. A to díky jeho výborným vlastnostem, významné úspoře váhy a zvýšení bezpečnosti [1,2,3].

1.6.8 Zdravotnické aplikace

Vlivem zatěžování, úrazu nebo zdravotní anamnézy často dochází k nadměrnému poškození kloubů, které vede k omezením pohybu, bolestem a dalším problémům. Mnohdy lékař rozhodne o výměně části nebo celého kloubu. Ročně tuto proceduru podstoupí 1,5 milionů osob po celém světě [3].

Tvar umělého kloubu je odvozený z tvaru původního. Sestává ze sférické hlavy zapadající do šálkovité jamky. Na základě výzkumů byla navržena série standardních rozměrů kloubů. První náhrady se vyráběly z nerezové oceli v Anglii v roce 1940 a nahrazovala se pouze kulová část kloubu. Kontakt protézy s původní jamkou však způsoboval nepřipustnou míru opotřebení, proto záhy vznikly polyethylenové kloubní jamky. Lubrikační tekutinu generuje tělo přirozeně, avšak nadměrné opotřebení bylo stále problémem a tvořilo úbytek materiálu až 0,5 mm za rok. Náhrada kovové hlavice keramickou nabídla skutečné zlepšení. Moderní kloubní náhrady sestávají z keramické kulové hlavice (alumina, oxidická míšená keramika s hliníkem) nasazené na těle z titanu nebo kobalt-chromové oceli. Kloubní jamka se vyrábí z titanu nebo jeho slitin nebo kobalt-chromových slitin. Polyethylen s ultra-vysokou molekulární hmotností se běžně používá jako vložka. Párování keramika/kov není z tribologického hlediska stále ideální U párování keramika/keramika dochází k ročnímu opotřebení menšímu než 0,001 mm. Implantáty se dále povlakuji hydroxylapatitem, do kterého pronikají kostní buňky a tvoří pevný spoj mezi protézou a kostí, také se jím dosahuje rychlejšího spojení [1,2,3].



Obr.31 Kloubní náhrady [1].

I piezokeramika našla uplatnění v medicíně. Proměnné zatížení napětím vytvoří jejich oscilaci, která vede k vytvoření ultrazvukových vln. Ty se šíří různými tkáněmi různou rychlostí a vytvářejí tak změnu v odražených vlnách, díky které lze „zviditelnit“ jednotlivé struktury. Pomocí Dopplerovy sonografie lze zaznamenat proudění krve v cévách. Ultrazvukové vlny také pomáhají rozmělnění ledvinových a žlučových kamenů na rozměry, které dokáže tělo samo vyloučit [3].

Dentální keramika se vyrábí z oxidu zirkonu stabilizovaného yttriem nebo z transparentní aluminy. Jedná se o materiály, které musí být biokompatibilní, tuhé, hydrotermálně odolné, s minimálním opotřebením a s únosností mechanického zatížení dosahujícího až 1500 MPa. Keramika je díky možnosti ovlivnit zabarvení materiálu vhodná pro zubní náhrady, dále pro podpůrnou část můstků, korunky a plomby. Transparentní alumina se používá na výrobu rovinacích aparátů [2,3].

2 Vliv plastifikátoru na SSIC a SISIC

2.1 Návrh experimentálních zkoušek

Experimentální zkoušky mají za úkol zjistit chování a vlastnosti alternativních materiálů v jednotlivých fázích výroby. Dále je porovnat s originálním materiálem firmy CeramTec Czech Republic. Získané informace a závěry budou využity pro doporučení, případně zamítnutí dalších experimentů a zkoumání materiálů.

2.1.1 Lisování

Granulát se podrobí izostatickému lisování na stroji Diffenbacher Isomat NM110. Lisovací tlak se stanoví na základě lisování vzorků. S ohledem na vlhkost substrátu se stanoví přibližná hodnota lisovacího tlaku a od ní se odvodí tři zkušební tlaky, které se aplikují na vzorky. Na nich se poté měří lisovací hustota vztakovou metodou ve rtuti Hg. Tlak, který vytvoří kompaktní těleso s dostatečnou hustotou, se poté používá na lisování polotovarů. Pozornost se věnuje soudržnosti materiálu po odtížení a vyjmutí ze stroje.

2.1.2 Sušení

Po lisování je nutné polotovary z materiálu s akrylovou pryskyřicí vytvrdit. K vytvrzení dojde odstraněním nadbytečné vlhkosti a ztvrdnutím pryskyřice. Výrobce udává hodnoty pro sušení se využijí jako výchozí data. Na jejich základě se provede několik zkušebních sušení s různými parametry. Doba setrvání polotovarů v sušičce je stanovena na 90 min, teploty pro jednotlivé cykly jsou 90 °C, 105°C a 130°C.

Sledovat se bude chování materiálu při sušení, generování zápachu, apod.

Další parametry se dále testují při zeleném obrábění.

2.1.3 Zelené obrábění

Při zkouškách obrábění soustružením v zeleném stavu materiálu se porovná chování polotovaru a materiálu pro jednotlivé varianty vytvrzení z předchozího kroku s výchozím materiálem. Dále se provádí měření sil při soustružení s využitím dynamometru pro jednotlivé polotovary. Získaná data se analyzují a porovnávají.

2.1.4 slinování

Při slinování není možné provádět měření či pozorování v průběhu procesu, proto se zde pozornost věnuje pouze soudržnosti materiálu po ukončení procesu a případný výskyt trhlin.

2.1.5 Keramografie

Po ukončení slinovacího procesu se zkušebních vzorků vypreparuje řez a vytvoří se keramografický výbrus. U něho se hodnotí podíl zbývajících pórů, míra spojení zrn a případná přítomnost nežádoucích fází či nečistot.

2.2 Výroba a experimentální zkoušky

2.2.1 Příprava substrátů

Příprava substrátu přímo ovlivňuje veškeré následující operace a je vstupní fází pro základní prvky. Jednou z přísad je i plastifikátor a pojivo. Změna těchto látek vede k nutné změně celého výrobního postupu a právě analýza použití různých plastifikátorů a jejich schopnosti ovlivnit výrobní proces a vlastnosti materiálu je předmětem této práce.

Firma CeramTec používá jako základní pojivo pro výrobu slinovaného karbidu křemíku škrob. Alternativními zkoumanými variantami jsou plastifikátory na bázi akrylových pryskyřic a na bázi PVA/PEG (poli-vinyl alkohol/poli-etylen glykol). Pro přehlednost budou na následujících řádcích užívána jednoduchá interní označení jednotlivých substrátů (333, 341, 342 a 343).

333 – Rocar S1, originální granulát, vztažný

Základní granulát se škrobovým pojivem určený k výrobě slinovaného karbidu křemíku SiC vyráběný přímo firmou CeramTec

K přípravě prášku a dokonalému smísení všech jeho složek se využívá bubnový mlýn Dorst NM 110. Ze směsi výchozího prášku karbidu křemíku SiC, uhlíku C a dalších komponent se vyrábí granulát. K tomu slouží rozprašovací sušárna 100F-ASK 600.

Následující granuláty se řadí do kategorie RTP (ready-to-press), tzn. po dodání jsou okamžitě připravené k lisování bez nutnosti jakýkoliv úprav základní směsi. Jejich výrobcem není firma CeramTec, ale jsou dodávány externími dodavateli.

Vzhledem k těmto skutečnostem není možné popsat postup jejich výroby, jsou však známy základní ukazatele a vlastnosti, které poskytuje výrobce.

Tab.7 Základní charakteristiky substrátu a slinovaného tělesa materiálu 333 – Rocar S1 [1].

Granulát		slinované těleso	
Sypná hustota		slinovaná hustota	3,15 g/cm ³
Setřesná hustota		Smrštění při slinování	20 obj. %
Lisovací hustota při 1300 bar (dle ISO)		Tvrdost dle Vickerse HV 0,5	2300
Pevnost v zeleném stavu		Pevnost v tlaku	3500 MPa
Axiální tlak / smrštění při 1300 kg/cm ³		Pevnost v ohybu	410 MPa
Axiální tlak / smrštění při 1500 kg/cm ³		Modul pružnosti	430 GPa

341 – IHK 601/RTP T4.02

Ready-to-press granulát od výrobce *Industriekeramik Hochrhein* využívající jako plastifikátor akrylovou pryskyřici. Jako karbonizační pojivo obsahuje škrob. Použití tohoto substrátu slibuje zvýšení pevnosti v zeleném stavu, snížení rizika rozvoje trhlin a odštipků při zeleném obrábění a výborné vlastnosti při tečení v průběhu lisování. Lepší chování při lisování přispívá k delší životnosti zápusťek, dochází k omezení ulpívání materiálu na nástroji. To vše vede k rovnoměrnému rozložení tlaku a homogennímu rozložení hustoty v průřezu výlisku, čímž se pozitivně ovlivní chování při slinování a dochází k rovnoměrnému smrštění [21].

V granulátu jsou použity pouze materiály přívětivé k životnímu prostředí, při jejich spalování v peci nedochází ke vzniku toxických látek. Jeho čistota přispívá k prodloužení servisních intervalů pecního vybavení, obzvláště vakuových pump [21].

Tab.10 ukazuje množství doprovodných prvků v substrátu. Tab.11 se poté zabývá jeho základními charakteristikami dle laboratorních zkoušek výrobce pro základní substrát i pro těleso po slinování.

Materiál je vhodný pro výrobu balistických plátů a brnění [21].

Tab.8 Chemická analýza doprovodných látek materiálu 341 – IKH 601/RTP T4.02 [21].

Prvek	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Na	K
Obsah [hm.%]	<0,05	<0,05	<0,02	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01

Tab.9 Základní charakteristiky substrátu a slinovaného tělesa materiálu 341 – IKH 601/RTP T4.02 [21].

Granulát		slinované těleso	
Sypná hustota	0,750 g/cm ³	slinovaná hustota	3,15 g/cm ³
Setřesná hustota	0,850 g/cm ³	Hmotnostní úbytek	10 %
Lisovací hustota při 1300 bar (dle ISO)	1,8 g/cm ³	Mikrostruktura (velikost zrn)	<10 μm
Pevnost v zeleném stavu	3 MPa	Tvrdost dle Knoop	2600
Axiální tlak / smrštění při 1300 kg/cm ³	1,75 g/cm ³ / 1,230 %	Pevnost v tlaku	2500 MPa
Axiální tlak / smrštění při 1500 kg/cm ³	1,80 g/cm ³ / 1,224 %	Pevnost v ohybu	400 MPa
Axiální tlak / smrštění při 1800 kg/cm ³	1,85 g/cm ³ / 1,222 %	Modul pružnosti	400 GPa

342 – IHK 604/RTP T4.05

Granulát s plastifikátorem z akrylové pryskyřice a škrobovým pojivem velice podobný granulátu 341. Stejný výrobce IKH slibuje i velice podobné vlastnosti při lisování, zeleném obrábění i slinování. Neliší se ani složením doprovodných prvků [21].

Liší se základními vlastnostmi granulátu, které však přináší stejné vlastnosti po slinování jako u 341. Substrát s těmito vlastnostmi je vhodný pro izostatické lisování komplexních obráběných součástí.

Tab.10 Základní charakteristiky substrátu a slinovaného tělesa materiálu 342 – IKH 604/RTP T4.05 [21].

Granulát		slinované těleso	
Sypná hustota	0,720 g/cm ³	slinovaná hustota	3,15 g/cm ³
Setřesná hustota	0,810 g/cm ³	Hmotnostní úbytek	10 %
Lisovací hustota při 1300 bar (dle ISO)	1,85 g/cm ³	Mikrostruktura (velikost zrn)	<10 μm
Pevnost v zeleném stavu	2 MPa	Tvrdost dle Knoopu	2600
Axiální tlak / smrštění při 1300 kg/cm ³	1,8 g/cm ³ / 1,350 %	Pevnost v tlaku	2500 MPa
Axiální tlak / smrštění při 1500 kg/cm ³	1,85 g/cm ³ / 1,230 %	Pevnost v ohybu	400 MPa
Axiální tlak / smrštění při 1800 kg/cm ³	1,88 g/cm ³ / 1,225 %	Modul pružnosti	400 GPa

343 – Starceram S rtp Grade SQ

Další zástupce RTP substrátu je od výrobce H.C.Starck Ceramics. Směs PVA a PEG zde figuruje jako plastifikátor a škrob jako pojivo.

Suché lisování a zelené obrábění se doporučuje jako ideální způsob zpracování. Tab.13 ukazuje množství doprovodných prvků k SiC. Tab.14 se zabývá charakteristikami granulátu a slinovaného tělesa [22].

Tab.11 Chemická analýza doprovodných látek materiálu 343 – Starceram S rtp Grade SQ [22].

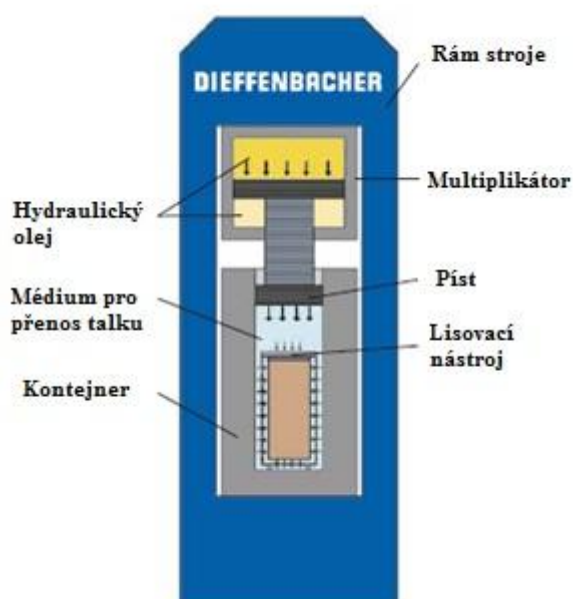
Prvek	C	B	O	Fe	Al	Ca
Obsah [hm. %]	32,5-33,5	0,45-0,6	<5	<0,05	<0,04	<0,01

Tab.12 Základní charakteristiky substrátu a slinovaného tělesa materiálu 343 – Starceram S rtp Grade SQ [22].

Granulát		slinované těleso	
Obsah částic větších než 200 μm	<2%	slinovaná hustota	3,13-3,18 g/cm^3
Obsah částic menších než 38 μm	<45%		
Hustota granulátu	0,7-0,85 g/cm^3		
Zelená hustota	1,8-1,9 g/cm^3		

2.2.2 Lisování

Granulát sám o sobě nedrží tvar, rozsypá se, je proto nutné jej ztuhnout. K tomu se využije izostatický lis Dieffenbacher Isomat NM 110. Obr. Xx znázorňuje schéma lisu.



Obr.32 Schéma izostatického lisu Dieffenbacher [23].

Granulát se nasype do uzavřeného gumového pytle, který se vloží do stroje a zaplaví pracovní kapalinou. Působením pístu na hladinu kapaliny v uzavřeném prostoru dojde k vyvození konstantní tlakové síly na celý povrch gumového pytle. Tím dojde ke slisování granulátu v kompaktní těleso.

Lisování proběhlo ve dvou cyklech. Druhý cyklus byl nutný z důvodu rozšíření zkoušek, neboť materiály 341 a 342 v dalším zpracování nesplnily požadované předpoklady a byly proto navrženy další zkoušky, viz. kapitola „Vytvrzování“ a „Zelené obrábění“ dále.

Druhý cyklus již však nezahrnuje materiál 343, jelikož se v průběhu zpracování práce změnil směr rozvoje firmy CeramTec a materiál 343 se přestal uvažovat jako vhodná varianta.

Pro přehlednost jsou použité lisovací tlaky a hustoty pro oba cykly zachyceny v tab.15. Materiál 333 jako vztažný materiál, který se lisuje neustále, byl lisován společně s polotovary zkušebních materiálů až při druhém cyklu.

Tab.13 Lisovací tlaky a lisovací hustoty pro jednotlivé materiály.

Materiál / cyklus lisování	Lisovací tlak [bar/t]	Lisovací hustota [g/cm³]	Vlhkost granulátu [%]
341 / 1	1000	1,889	0,48
	1200	1,880	0,48
	1300	1,879	0,48
	1400	1,876	0,48
342 / 1	1000	1,931	0,7
	1200	1,952	0,7
	1300	1,955	0,7
	1400	1,959	0,7
343 / 1	1000	1,931	0,44
	1200	1,895	0,44
	1300	1,902	0,44
	1400	1,909	0,44
341 / 2	1300	1,841	0,48
342 / 2	1300	1,953	0,7
333	1450	1,848	0,71

Granulát byl lisován na trn o průměru 50 mm, v gumovém pytli průměru 110 mm. Polotovary mají poté vnitřní průměr 50 mm, vnější průměr 83 mm a výšku 330 mm.

V průběhu lisování nebyly zaznamenány žádné rozdíly ve zkušebních materiálech v porovnání se vztažným materiálem. Po odtížení a vyjmutí z gumových pytlů polotovary držely tvar a nerozpádaly se.



Obr.33 Izostatický lis Diefenbacher.

2.2.3 Vytvrzování a zkoksování

Dalším krokem pro dosažení dostatečné pevnosti polotovarů umožňující zelené obrábění je vytvrzení materiálů obsahujících akrylovou pryskyřici (341 a 342) nebo zkoksování materiálů bez pryskyřice (333) nebo s PVA/PEG (343).

Vytvrzování polotovarů z prvního cyklu lisování proběhlo ve firmě CeramTec. Při použití doporučených parametrů však nedošlo k dostatečnému vytvrzení pryskyřice. Vytvrzení probíhalo za teploty 80 °C po dobu 60 min. Nedostatečná tuhost polotovaru vedla k velice špatnému chování při obrábění (viz. dále), materiál byl citelně mazlavý.

Pro lepší vytvrzení došlo v dalším vytvrzování k navýšení teploty na 120 °C s výdrží 60 min. Výsledné vytvrzení bylo dostatečné, avšak v průběhu procesu docházelo ke vzniku silného zápachu, který znemožňoval použití stávající sušící pece pro další pokusy. Aby bylo možné materiál vytvrzovat, musí se použít sušící pec s odtahem zplodin, tu poskytla Laboratoř filtračních procesů a proudění na FSI VUT v Brně.

Polotovary z druhého cyklu lisování se vytvrzovaly právě zde. Na základě předchozích pokusů byla navržena série vytvrzovacích cyklů s teplotami 90 °C, 105 °C a 130 °C, pokaždé s dobou vytvrzování 90 min.



Obr.34 Vnitřní prostor sušící pece na FSI VUT s vytvrzovanými polotovary (341 nahoře, 342 dole).

Pro každou teplotu se do pece naskládaly čtyři polotovary, dva z materiálu 341 a dva z 342.

Při vytvrzování na 90 °C nedocházelo ke generování žádného zápachu ani dýmu mimo oblast pece. Po vyjmutí byly polotovary vloženy do digestoře za účelem vychlazení.

Při zahřátí na 105°C již k tvorbě mírného zápachu docházelo, oblast pece byla vybavena igelitovým závěsem pro zabránění šíření zplodin do prostoru laboratoře. Po vyjmutí byl vnitřní prostor mírně zadýmen. Opět se využilo digestoře k dochlazení, během něhož byl hmatem cítit rozdíl v rychlostech chlazení obou materiálů.

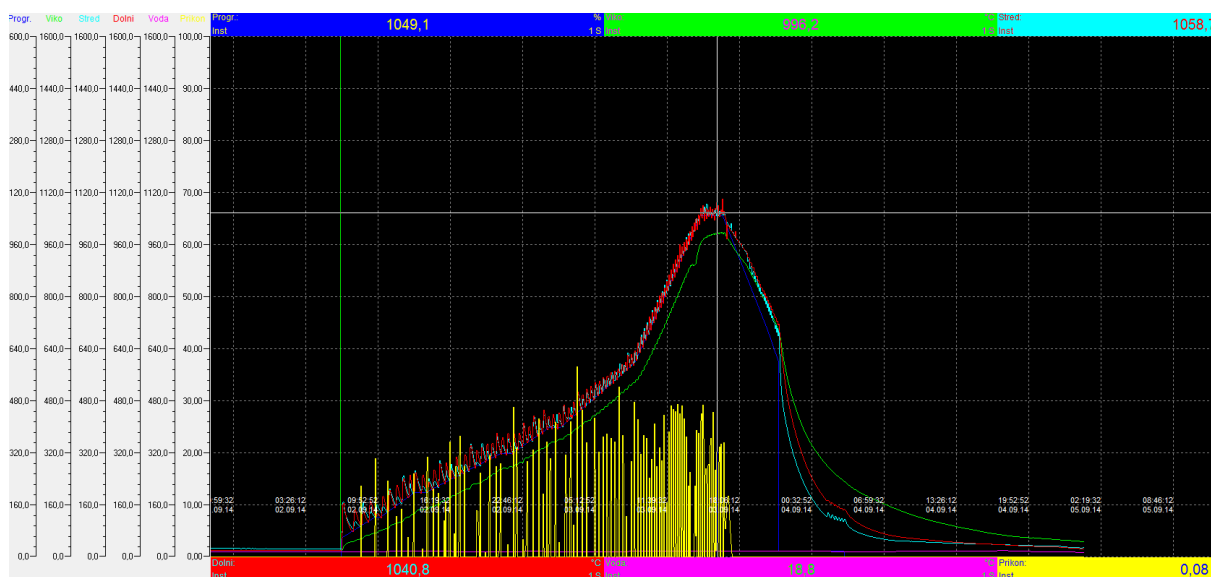
Teplota 130 °C již vedla k produkci zápachu i zadýmení, vše bylo odstraněno odtahem sušící pece. Po vyjmutí polotovarů pokračovalo jejich dýmení. Opět se využilo digestoře k dochlazení. Po aplikaci těchto podmínek se na povrchu polotovarů vyskytla tenká vrstvička materiálu (přibližně 0,25 mm), kterou lze snadno stírat, pod ní byl polotovar pevný a kompaktní.

Všechny tři vytvrzovací cykly vedly k úspěšnému vytvrzení materiálu. Tím bylo možné postoupit polotovary ke zkouškám při zeleném obrábění.

Materiál 333 a 343 neobsahuje složky, které se vytvrzují, ale je nutné je podrobit procesu zkoksování, kdy dojde k přeměně organických složek na uhlík. K tomu dochází v elektrické šachtové peci RRP 2,7/1100°C/160kW/JUMO vyráběné firmou ELSKLO.

Zkoksování materiálu 343 proběhlo za teploty 1050 °C a došlo k u něj hmotnostnímu úbytku v rozmezí 7,7080 % a 7,8961 %. Oproti chování materiálu 333 nebyla zaznamenána žádná změna.

Obr.35 znázorňuje teplotní křivku při zkoksování polotovaru z materiálu 333 a 343. Modrá křivka ukazuje naprogramovaný průběh, zelená, červená a bledě modrá poté zaznamenávají skutečné teploty, přičemž zelená se měří ve víku, červená u dna a bledě modrá na středu pece. Žlutá křivka zaznamenává příkon topných elementů.



Obr.35 Průběhy teplot při zkoksování materiálu 343.

2.2.4 Zelené obrábění

Chování materiálu v zeleném stavu je hlavní oblastí, kde se projeví změna plastifikátoru. Provedená pozorování zaměřená na porovnání chování jednotlivých materiálů proti materiálu 333 se provedla na soustruhu Trens SN 50 Classic s odměřovacím zařízením IAP2X Pearl ve firmě CeramTec. V další fázi zkoušek, již po vyřazení materiálu 343, se provedlo měření sil při soustružení materiálů 341, 342 a 333 na soustruhu SU 50 v dílně VUT FSI ÚST, k zaznamenávání dat se použila diagnostická technika KISTLER 5070A s programem DynoWare. Získané hodnoty byly zpracovány v softwaru Microsoft Excel.

V rámci firmy CeramTec Czech Republic se vnitřním předpisem nerozlišuje zelené a bílé obrábění, vše spadá do jednoho výrobního bloku. Toto značení bude zachováno i zde, proto se při zeleném obrábění materiálu 333 a 343 provádí obrábění tělesa v bílém stavu, tedy již bez organických složek.

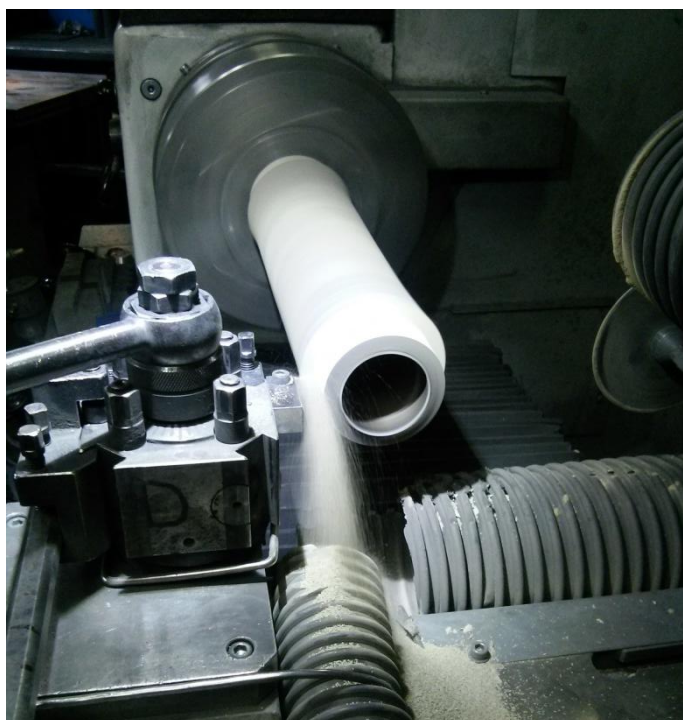
Obrábění zaměřené na chování materiálu

Příprava vzorků pro slinování vzorků z prvního lisovacího cyklu, na polotovarech materiálů 341 a 342 vysušených na 80 °C po dobu 60 min, spočívala v řezání na pásové pile. Materiál se mazal, nedařilo se provést řez bez rozlámání mezikruží. Při značení vzorků tužkou dochází k vtisku do povrchu, materiál byl příliš měkký.

Jelikož první vzorky byly nevhodné k obrábění, nastala nutnost nalisování dalších polotovarů a vytvoření série zkušebních vytvrzení materiálu.

Materiál 343 se při řezání na pásové pile chová stejně jako materiál 333. Jeví se mírně křehčí.

Polotovary materiálu 341, 342 a 333 z druhého lisovacího cyklu se podrobily zkouškám obrábění na soustruhu Trens SN 50, obr. xx. Z polotovarů se vyrobilo mezikruží s vnějším průměrem 73 mm, vnitřním průměrem 58 mm a výškou 20 mm.



Obr.36 Obrábění vnějšího průměru polotovaru v zeleném stavu.

K soustružení se využilo soustružnických nožů s pájenými břity ze syntetického diamantu.

Řezné podmínky:

- Posuv: střídání mezi posuvem na otáčku $f=0,05$ mm a $f=0,64$ mm
- Otáčky $n=355$ 1/min
- Maximální úběr materiálu $a_p=5$ mm, díky izostatickému lisování není vnější průměr konstantní a dochází k nesouososti vnějšího a vnitřního průměru v řádu jednotek milimetrů.

Postup výroby:

- obrobení dosedacích a upínacích ploch,
- upnutí do sklíčidel,
- soustružení vnějšího průměru na rozměr 73 mm,

- soustružení vnitřního průměru na rozměr 58 mm,
- zarovnání čela a definování nulového bodu,
- dělení polotovaru diamantovým brusným kotoučem – 4 řezy,
- poslední kus oddělen pomocí soustružnického nože s břitem 20°.

Změna velikosti posuvu z 0,05 mm na 0,64mm neměla na obrobený povrch žádný vliv ani u jednoho ze zkoušených materiálů.

U materiálu 333 po oddělení kroužku z polotovaru brusným kotoučem vzniknou ostré hrany, avšak hrany materiálů 341 a 342 se na vnitřním průměru při dělení oštípaly, obr.37. Odštipky lze poté ručně začistit na brusných kuželových přípravcích. Poslední kus se z polotovaru odděloval pomocí nože s 20° břitem, tím na kuse po oddělení zůstal materiál navíc, jehož odstraněním vznikne ostrá hrana. Pro vytvoření ostré hrany lze doporučit při obrábění na CNC stroji odpichování z vnitřní i vnější strany současně.



Obr.37 Vzniklé hrany materiálů 333, 341 a 342 při oddělení diamantovým brusným kotoučem.

Při samotném soustružení se materiál 341 i 342 zahříval více než materiál 333, docházelo také k tvorbě mírného zápachu, které způsobila přítomnost akrylové pryskyřice v materiálech 341 a 342. Teplota i zápach byly shodné pro oba materiály, avšak jejich míra rostla spolu s rostoucí vytvrzovací teplotou.

Po vyjmutí polotovarů ze stroje se porovnaly otisky čelistí sklíčidla. Pro nižší vytvrzovací teplotu byl výraznější než pro vyšší. Mezi materiály 341 a 342 nebyl zaznamenán rozdíl.

Opotřebení nástroje při obrábění materiálu 341 a 342 je výrazně menší, než při obrábění materiálu 333, u něhož vydrží nástroj maximálně na dva polotovary. Při obrobení šesti polotovarů z testovaných materiálů (tři 341 a tři 342) nebylo znatelné žádné opotřebení nástroje.

Při použití diamantového brusného kotoučku na dělení materiálu s pryskyřicí docházelo k jeho adhezivnímu zanášení (viz. obr.38). Hrozilo zastavení kotouče v obrobku, proto musel být průběžně čistěn.



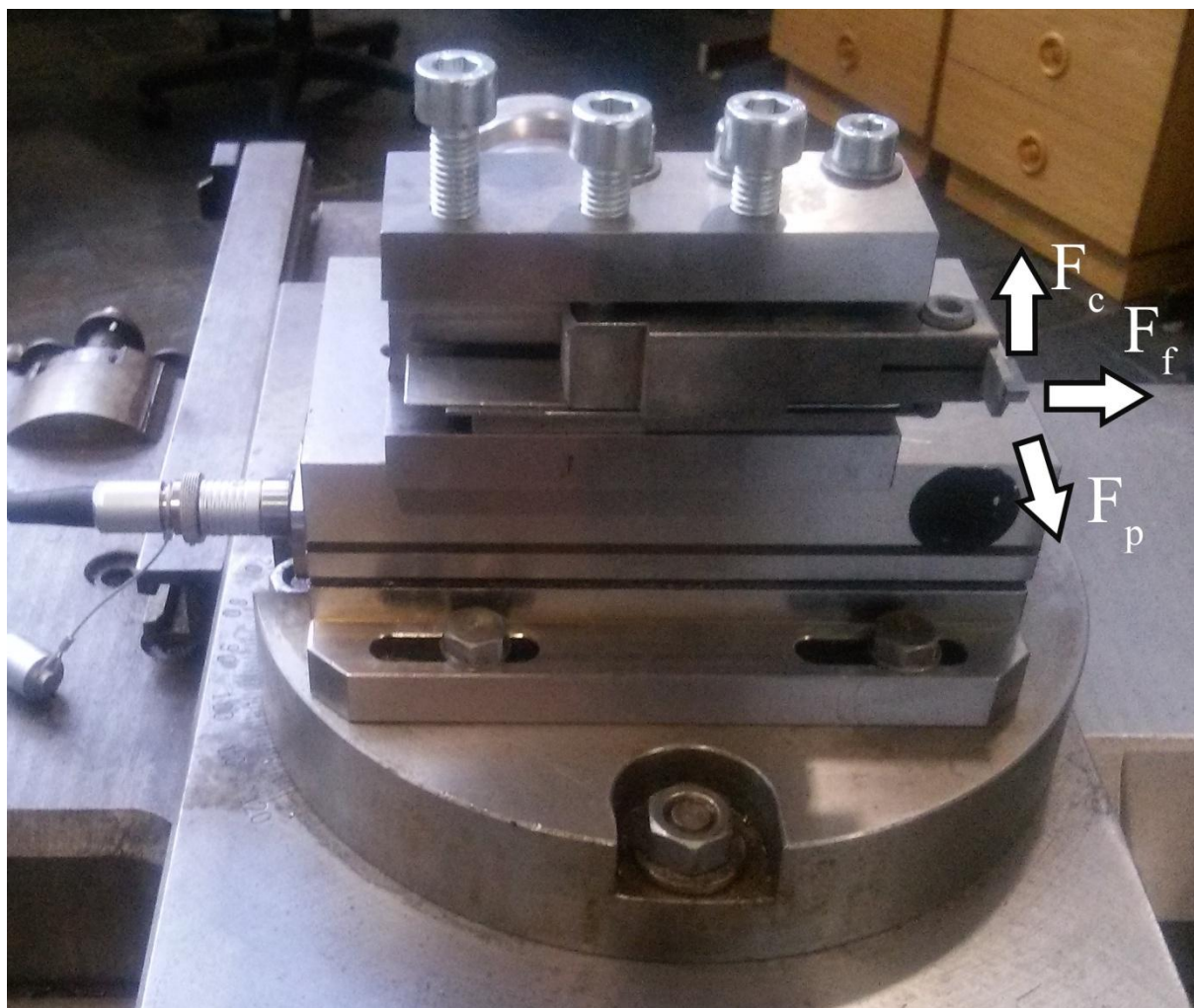
Obr.38 Brusný kotouček se syntetickým diamantem po řezání materiálu 341 a 342.

Povrch obrobku při podélném soustružení nebyl hladký. To zapříčinila malá tuhost polotovaru, který se působením soustružnického nože vychyloval. Podepření polotovaru koníkem by tuto situaci mohlo výrazně zlepšit, ale vzhledem k charakteru materiálu by hrozilo jeho poškození.

Soustružení zaměřené na měření sil při obrábění

Polotovary připravené k soustružení při zkouškách chování se využily i při měření sil při podélném soustružení. Pro zaručení porovnatelných výsledků se nejprve musely soustružit na totožné vnější průměry bez nerovností. Následně se soustružnický nůž upnul do stroje přes dynamometr, obr.39 zobrazuje použitý soustružnický nůž s definovanými směry jednotlivých sil v pohledu od vřetene. Parametry soustružení a zaznamenávání dat se nastavily následovně:

- posuv na otáčku $f=0,3$ mm,
- otáčky $n=350$ 1/min,
- úběr materiálu $a_p=3$ mm,
- délka soustruženého povrchu $l=10$ mm,
- frekvence snímání síly 1500 Hz.



Obr.39 Soustružnický nůž upnutý přes dynamometr se znázorněnými silami při soustružení.

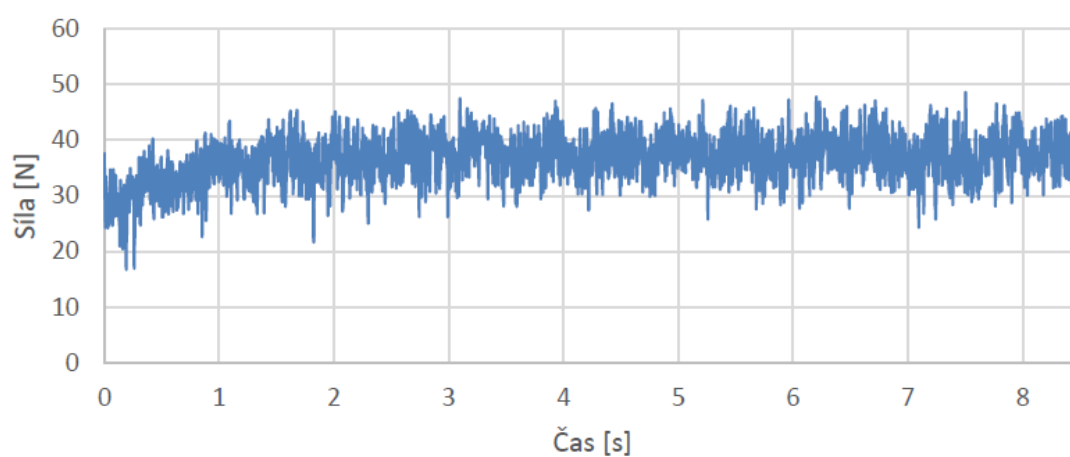
Při 4. upnutí polotovaru z materiálu 341 vytvrzovaného při teplotě 130 °C došlo k jeho prasknutí v místě upnutí, nadále byl však obrobitelný.

Pomocí dynamometru se změřily síly řezná F_c [N], posuvová F_f [N], a pomocná F_p [N] (jejich směry zachycuje obr.39), z nich se pomocí skládání vektorů určila zdrojová data pro určení celkové síly při soustružení. Ta zachycují diagramy na obr.40, obr.42, obr.44, obr.46, obr.48, obr.50 a obr.52. Získaná data byla zpracována v softwaru Microsoft Excel a získaly se hodnoty pro aritmetický průměr F_{ar} [N], a střední hodnotu F_m [N] celkové síly. Pro lepší charakterizování souboru dat se dále stanovily hodnoty pro směrodatnou odchylku s [N] a rozptyl s^2 [N].

Při soustružení se také pozornost věnovala odebranému materiálu. Jelikož se jedná o velice pórovitý materiál s výraznou náchylností k pohlcování vlhkosti, nesmí se použít chladicí kapalina. Odebraný materiál se při manipulaci rozsypal na jemný prášek. Pro nejnižší vytvrzovací teplotu se při promnutí mezi prsty mírně mazal.

Materiál 341 vytvrzený na 90 °C:Aritmetický průměr síly: $F_{ar}=36,5 \text{ N}$ Střední hodnota síly: $F_m=36,8 \text{ N}$ Směrodatná odchylka: $s=4,0 \text{ N}$ Rozptyl: $s^2=15,9 \text{ N}$

Zdrojová data:

**Celková obráběcí síla při soustružení materiálu 341
vytvrzeného při 90 °C**

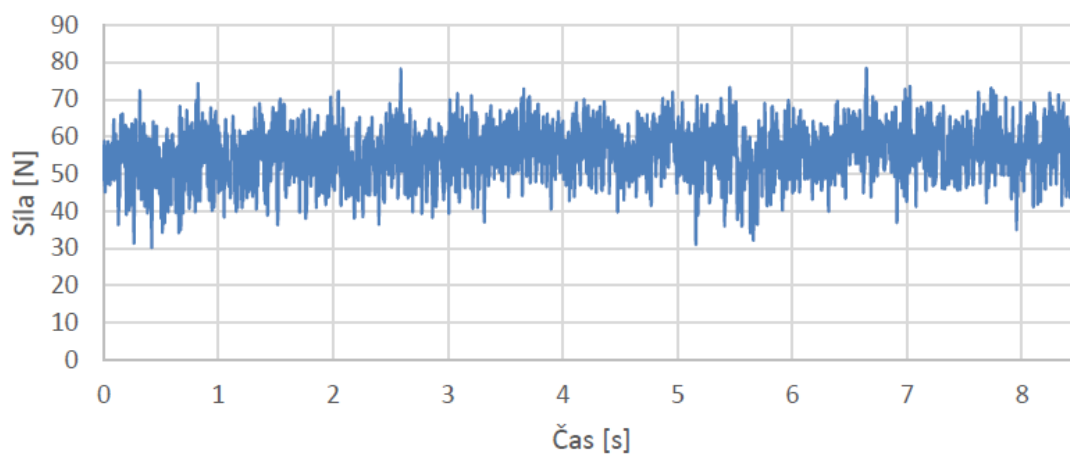
Obr.40 Diagram celkové obráběcí síly při soustružení materiálu 341 vytvrzeného při 90 °C.

Odebraný materiál:

Obr.41 Odebraný materiál při soustružení polotovaru z 341 vytvrzeného při 90 °C.

Materiál 342 vytvrzený na 90 °C:Aritmetický průměr síly: $F_{ar}=55,5 \text{ N}$ Střední hodnota síly: $F_m=55,9 \text{ N}$ Směrodatná odchylka: $s=6,8 \text{ N}$ Rozptyl: $s^2=46,9 \text{ N}$

Zdrojová data:

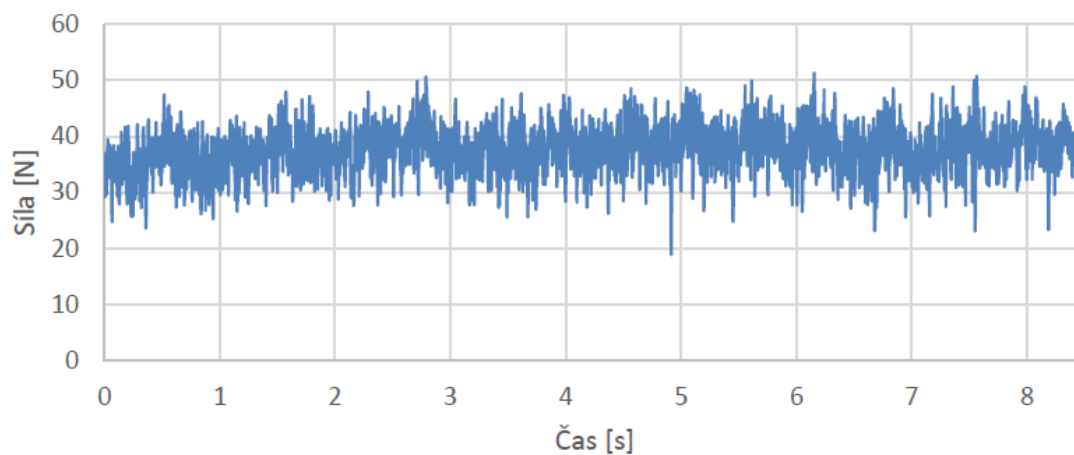
**Celková obráběcí síla při soustružení materiálu 342
vytvrzeného při 90 °C***Obr.42* Diagram celkové obráběcí síly při soustružení materiálu 342 vytvrzeného při 90 °C.

Odebraný materiál:

*Obr.43* Odebraný materiál při soustružení polotovaru z 342 vytvrzeného při 90 °C.

Materiál 341 vytvrzený na 105 °C:Aritmetický průměr síly: $F_{ar}=37,6 \text{ N}$ Střední hodnota síly: $F_m=37,7 \text{ N}$ Směrodatná odchylka: $s=4,0 \text{ N}$ Rozptyl: $s^2=16,1 \text{ N}$

Zdrojová data:

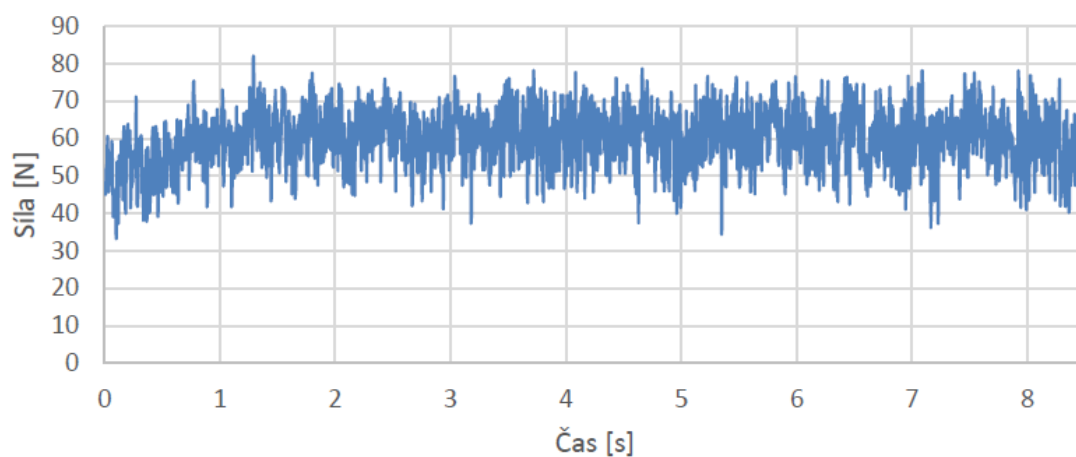
**Celková obráběcí síla při soustružení materiálu 341
vytvrzeného při 105 °C***Obr.44* Diagram celkové obráběcí síly při soustružení materiálu 341 vytvrzeného při 105 °C.

Odebraný materiál:

*Obr.45* Odebraný materiál při soustružení polotovaru z 341 vytvrzeného při 105 °C.

Materiál 342 vytvrzený na 105 °C:Aritmetický průměr síly: $F_{ar}=59,6 \text{ N}$ Střední hodnota síly: $F_m=59,9 \text{ N}$ Směrodatná odchylka: $s=7,8 \text{ N}$ Rozptyl: $s^2=51,3 \text{ N}$

Zdrojová data:

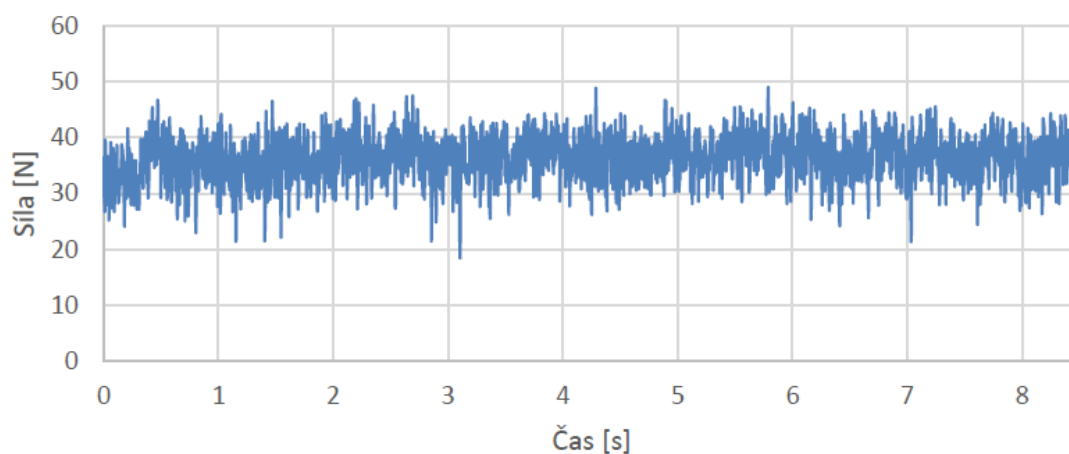
**Celková obráběcí síla při soustružení materiálu 342
vytvrzeného při 105 °C***Obr.46* Diagram celkové obráběcí síly při soustružení materiálu 342 vytvrzeného při 105 °C.

Odebraný materiál:

*Obr.47* Odebraný materiál při soustružení polotovaru z 342 vytvrzeného při 105 °C.

Materiál 341 vytvrzený na 130 °C:Aritmetický průměr síly: $F_{ar}=36,3 \text{ N}$ Střední hodnota síly: $F_m=36,4 \text{ N}$ Směrodatná odchylka: $s=3,7 \text{ N}$ Rozptyl: $s^2=13,9 \text{ N}$

Zdrojová data:

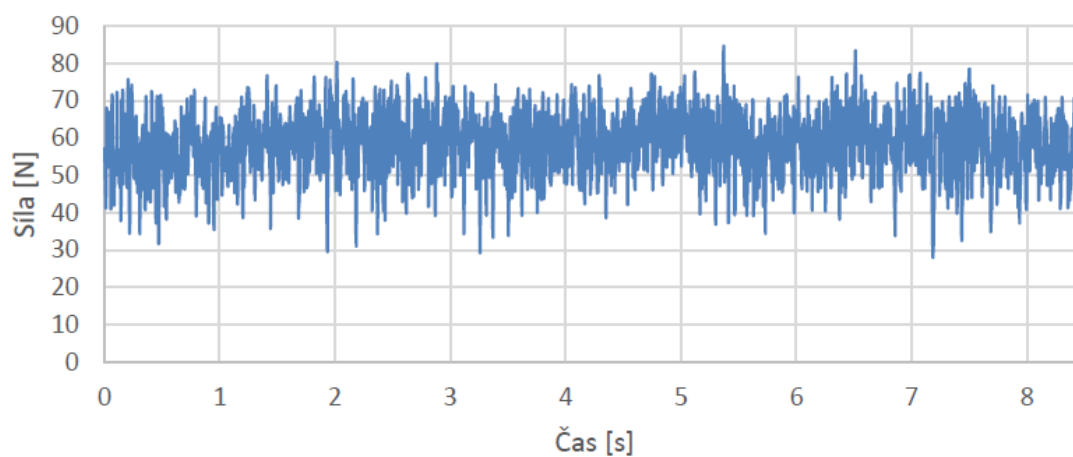
**Celková obráběcí síla při soustružení materiálu 341
vytvrzeného při 130 °C***Obr.48* Diagram celkové obráběcí síly při soustružení materiálu 341 vytvrzeného při 130 °C.

Odebraný materiál:

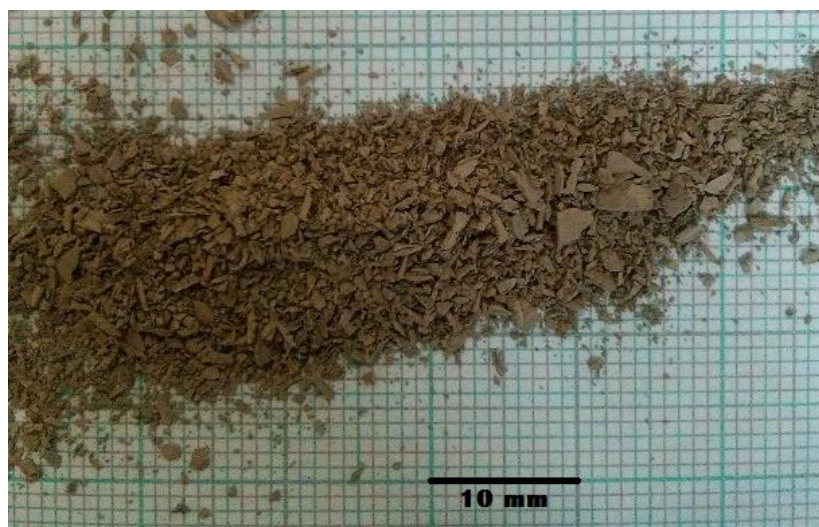
*Obr.49* Odebraný materiál při soustružení polotovaru z 341 vytvrzeného při 130 °C.

Materiál 342 vytvrzený na 130 °C:Aritmetický průměr síly: $F_{ar}=58,4 \text{ N}$ Střední hodnota síly: $F_m=58,8 \text{ N}$ Směrodatná odchylka: $s=7,9 \text{ N}$ Rozptyl: $s^2=61,6 \text{ N}$

Zdrojová data:

**Celková obráběcí síla při soustružení materiálu 342
vytvrzeného při 130°C***Obr.50* Diagram celkové obráběcí síly při soustružení materiálu 342 vytvrzeného při 130 °C.

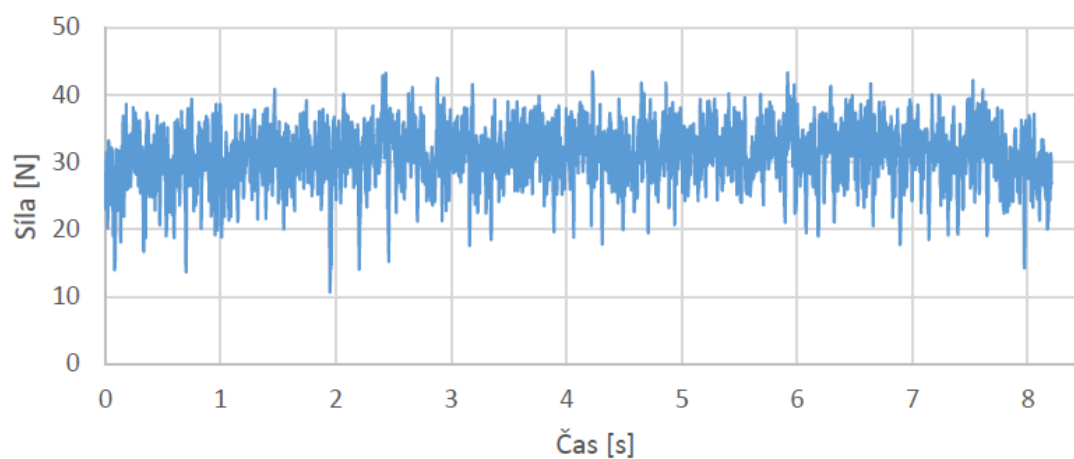
Odebraný materiál:

*Obr.51* Odebraný materiál při soustružení polotovaru z 342 vytvrzeného při 130 °C.

Materiál 333 zkoksovaný při 1050 °C:Aritmetický průměr síly: $F_{ar}=31,0$ NStřední hodnota síly: $F_m=31,4$ NSměrodatná odchylka: $s=4,2$ NRozptyl: $s^2=17,4$ N

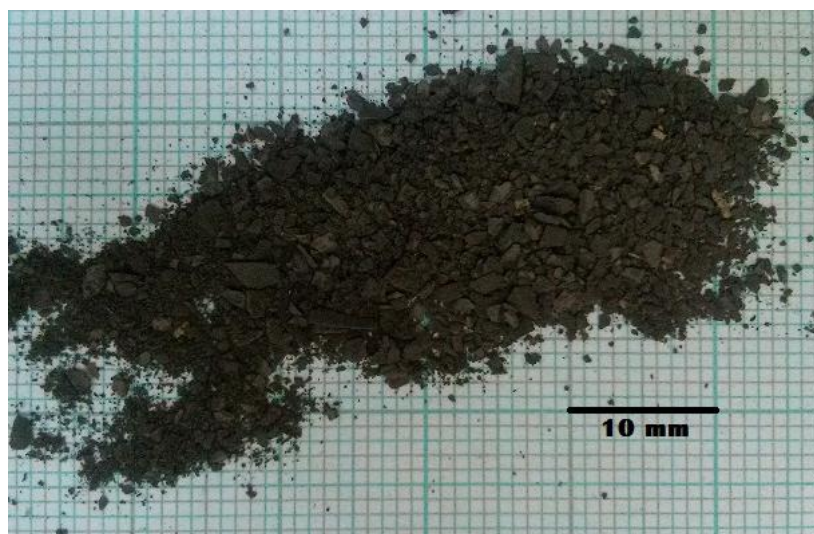
Zdrojová data:

Celková obráběcí síla při soustružení materiálu 333
zkoksovaného při 1050 °C



Obr.52 Diagram celkové obráběcí síly při soustružení materiálu 333 zkoksovaného při 1050 °C.

Odebraný materiál:



Obr.53 Odebraný materiál při soustružení polotovaru z 333 zkoksovaného při 1050 °C.

Příprava polotovarů spočívala v soustružení jejich vnějšího povrchu na konstantní průměr. K tomu se využilo břitové destičky s břitem ze syntetického diamantu. Jeden polotovar však byl pokusně opracován běžnou vyměnitelnou břitvou destičkou ze slinutého karbidu. S ní docházelo k rozpadu povrchu soustruženého povrchu, jeho kvalita by pro běžnou výrobu nebyla vyhovující a díky abrazivnímu účinku materiálu polotovaru se velice rychle opotřebí. Obr.54 porovnává povrchy pro oba nástroje.



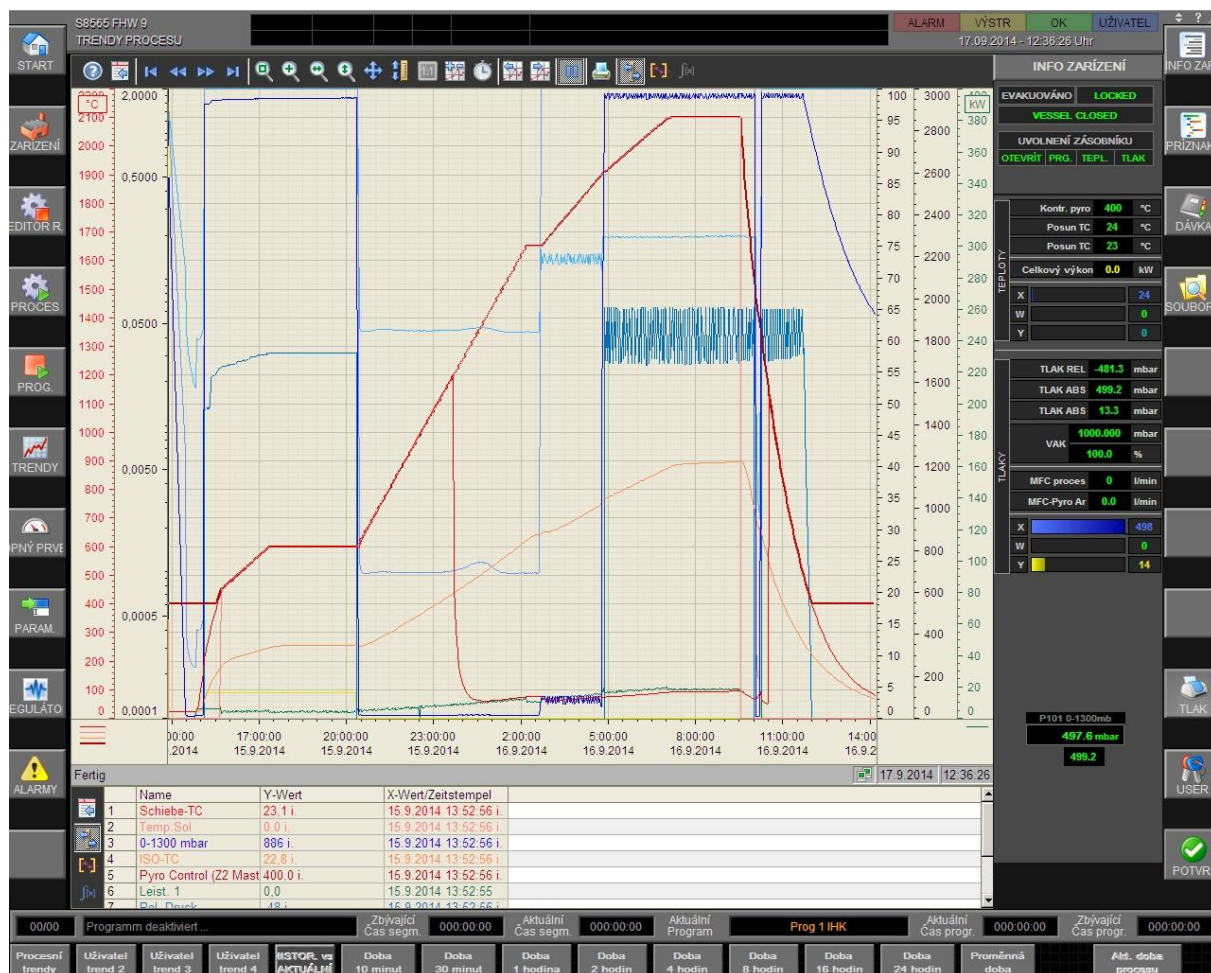
Obr.54 Srovnání povrchů obrobených VBD ze slinutých karbidů (vlevo) a ze syntetického diamantu (vpravo).

2.2.5 Slinování

Těleso po zeleném obrábění stále neobsahuje kovalentní a iontové vazby, které charakterizují keramické materiály. K jejich vytvoření dojde při slinování.

Pro vytvoření slinovaného karbidu křemíku SiC se využívá vakuové slinovací pece typu FHW 1250-SD/TS/AH výrobce FCT, konkrétně se jedná o pec FCT S 8240. Výchřev zajišťuje odporové topení z grafitových topných tyčí, díky němuž lze tepelně zpracovávat materiály až do teploty 2200 °C. Pecní atmosféru může mimo vakua tvořit také ochranný plyn, běžně dusík nebo argon. Výrobní proces je řízen řídicím softwarem Siemens S7/300, který ukazuje obr.55, zobrazené diagramy zaznamenávají průběh jednotlivých parametrů v průběhu procesu, jako např. výkon topení, teploty měřené pyrometry, tlak, stav atmosféry a mnoho dalších. Vzhledem k vysoké teplotě, musí být plášť chlazen, k tomu se využívá vody proudící kanály uvnitř stěn pece. Vnitřní stěny pece izolují grafitové desky a grafitová izolační vata, použitelný prostor pro vsázku má objem 650 l [24].

Dále je k dispozici laboratorní slinovací pec, která díky svým minimálním rozměrům nabízí lepší alternativu pro zkušební výpaly a zkušební cykly.



Obr.55 Řídicí program slinovací pece s diagramy průběhu slinování.

Zplodiny, které vznikají nelze přímo vypustit do atmosféry. Nízkoteplotní karbonizace v peci generuje uhlovodíky a další škodlivé látky. Pro jejich úpravu na ekologicky bezpečné látky se využívá zařízení na termické spalování zplodin (TNV, obr.56) dodané firmou Birk Wärmetechnischen GmbH. Jedná se o vertikální spalovací komoru, do které se pomocí flexibilních kovových hadic přivádí pecní zplodiny. Ty se na dně komory spalují. Pro ochlazení se ke spáleným plynům přimíchává čistý studený vzduch, teplota směsi poté dosahuje 250 °C a lze odvést do komína. [25]



Obr.56 Zařízení na termické spalování spalin .

Obrobky z jednotlivých materiálů vytvořené při zeleném obrábění, se vložily do laboratorní pece, jejíž vnitřní prostor byl doplněn o police z grafitových desek. Během slinování dochází ke smrštění kusů, proto se pokládají na grafitový papír, který snižuje tření a zabraňuje spojení materiálu s pecním vybavením.



Obr.57 Zkušební vzorky připravené k slinování (vlevo mat. 333, vpravo 341 a 342).

Následně byl spuštěn program dle obr.58. Po ukončení programu včetně vychlazení byly kusy vyjmuty a opticky zkontrolovány za účelem zjištění jejich popraskání.

C. segmentu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Krok postupu	Vakuum	Sintrování	Sintrování	Sintrování	Sintrování	Sintrování	Sintrování	Sintrování	Sintrování	Sintrování
Doba segmentu v min.	0060:00	0015:00	0600:00	0100:00	0180:00	0350:00	0030:00	0125:00	0004:00	0067:00
Teplota topení	0	415	450	600	600	1650	1650	1900	1906	2000
Výkon topení	0.00	6.00	6.00	15.00	20.00	20.00	25.00	30.00	30.00	30.00
OprFak topení	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	1.00	1.20
Skoková teplota	0	415	450	0	0	0	0	0	0	0
FC vyplachování/separac	0.0	0.0	8.0	8.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MFC vyplach. pyro Ar	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Relativní tlak	***	***	***	***	***	10	10	10	10	10
Absolutní tlak	0	0	0	0	2	2	2	10	10	10
Start. vakuum	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Test úniků	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vakuum	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐
Topení-TC	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Topení PYRO	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Výkon topení	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Skok topení	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Skok chlazení	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Volba plynu I12	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Volba plynu Ar	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒
Volba plynu He	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Separátory	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Relativní tlak	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
Absolutní tlak	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒
Vyplach. pyro	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☒
Přítok	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐
TIIV ZAP	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Odtah přes TIIV	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒
VOLÁNÍ PRAC. OBSLUHY	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
ZAPISOVAČ ZAP	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒

Obr.58 slinovací programu při výpalu v laboratorní peci.



Obr.59 slinovací pec FCT.



Obr.60 Vnitřní prostor laboratorní pece s narovnanými vzorky.

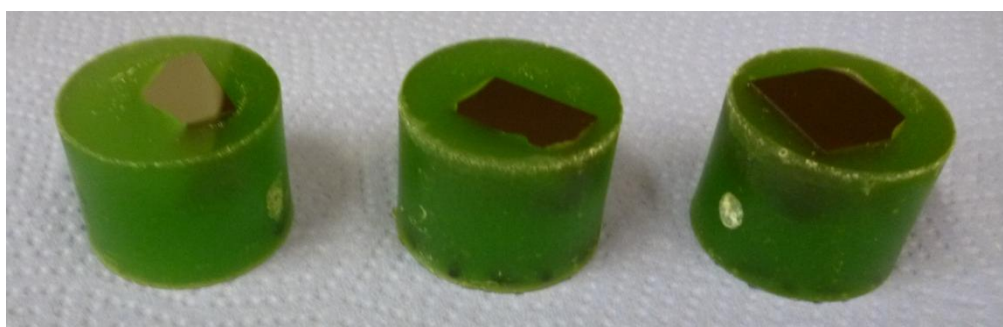
Při slinování dochází ke smrštění materiálu, míra smrštění pro materiál 341 je 23,0 %, 22,8 % pro 342, 22,5 % pro 343 a 21,1 % pro 333.

2.2.6 Keramografie

Keramografie se využívá pro zhodnocení vlastností materiálu a zviditelnění jeho mikrostruktury.

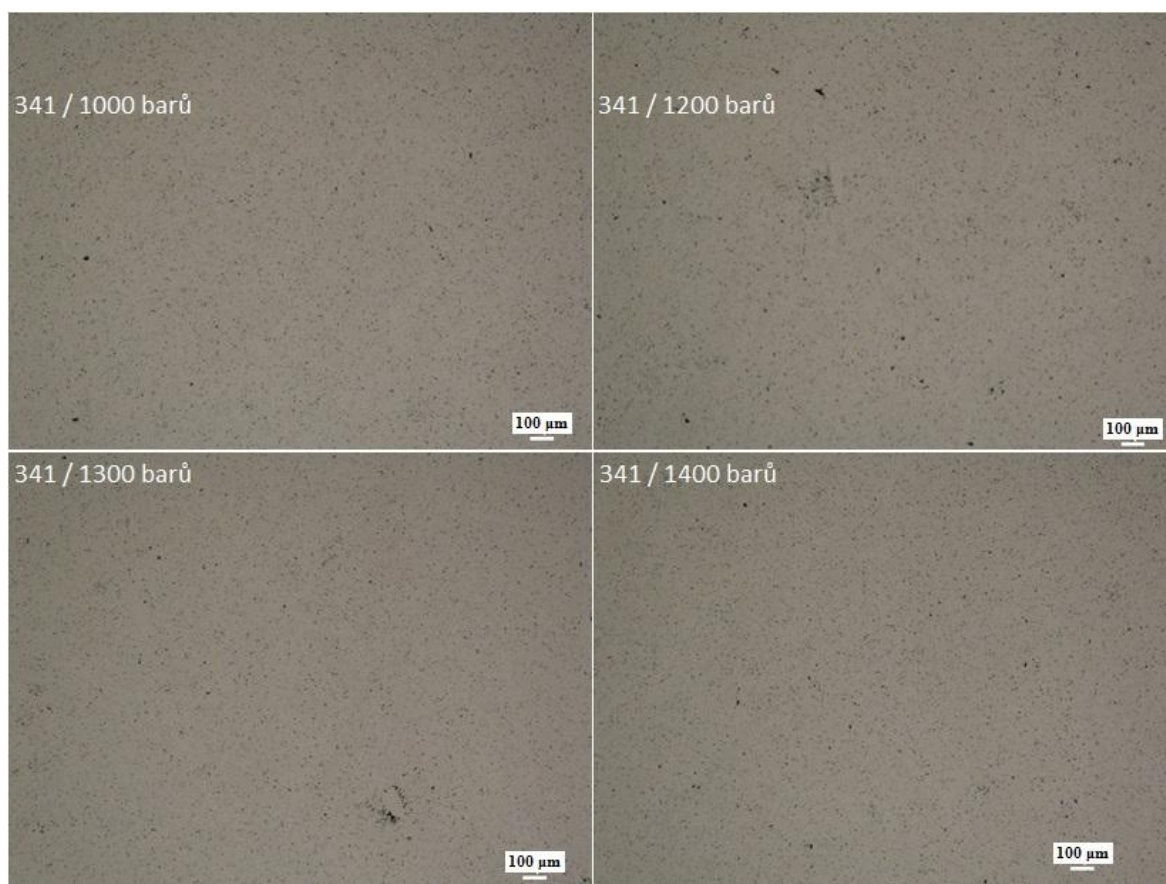
Postup tvorby keramografického vzorku:

- vytvoření keramických zlomků vhodných rozměrů pomocí pily s diamantovým kotoučem,
- umístění zlomku do formy, nejrovnější plocha orientována směrem ke dnu,
- vyplnění formy pryskyřicí,
- po ztvrdnutí pryskyřice se celek umístí do přípravku a brousí se diamantovou emulzí,
- po vyleštění je výbrus vhodný pro hodnocení povrchu a velikosti pórů a trhlin,
- mikrostruktura materiálu se zviditelňuje chemickou cestou.



Obr.61 Keramografické vzorky připravené k vyhodnocení.

Následující obrázky (obr.62 - obr.67) zobrazují keramografické výbrusy materiálů 341, 342 a 343 pro různé lisovací tlaky se zviditelněným povrchem a se zviditelněnou mikrostrukturou. Pro analýzu mikrostruktury se využilo materiálů lisovaných při 1400 barech, sušených při teplotě 95 °C a slinovaných při teplotě 2050 °C. Označení jednotlivých variant je ve formátu *materiál / lisovací tlak*. Jelikož se jedná o slinovaný karbid křemíku SSiC, ve struktuře se nachází pouze fáze karbidu křemíku SiC, která se na následujících obrázcích jeví šedivá. Tmavé body tvoří zbytková porozita.



Obr.62 Keramografické výbrusy materiálu 341 pro jednotlivé lisovací tlaky se zviditelněným povrchem.



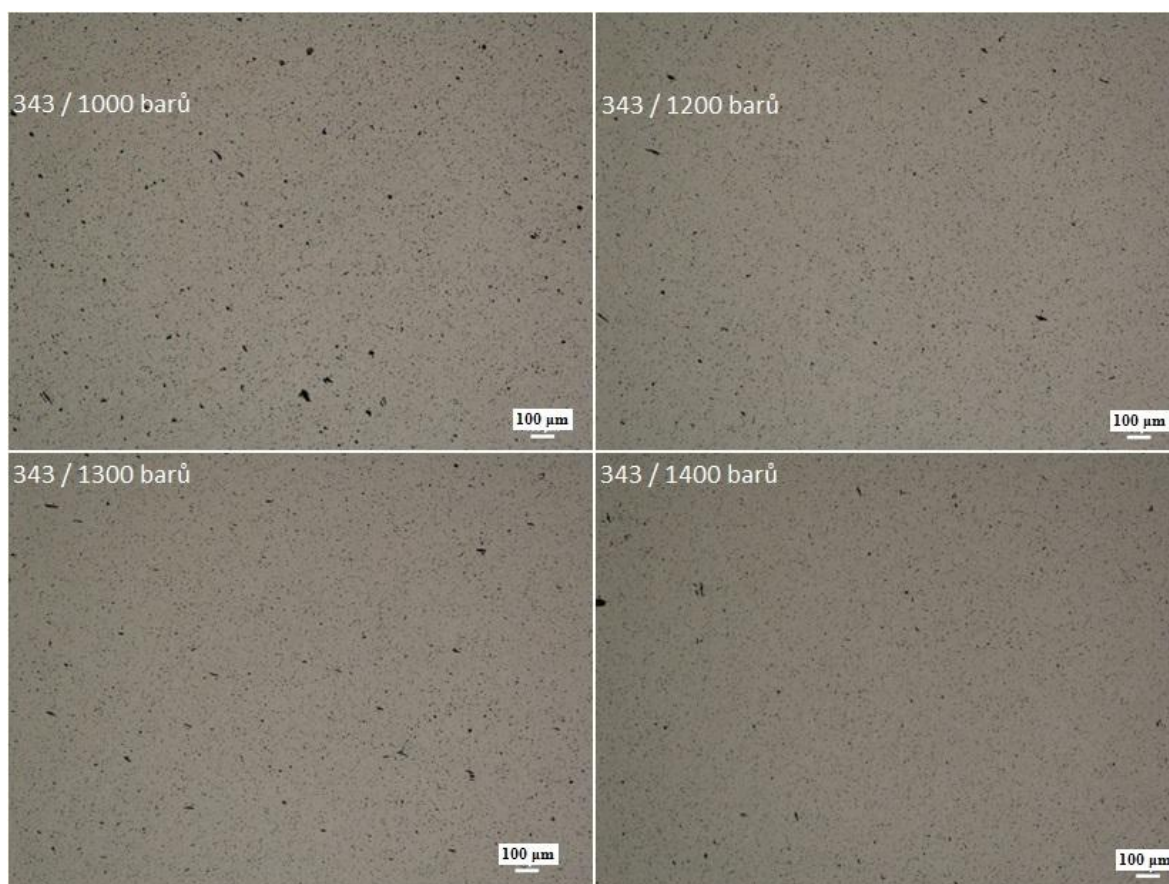
Obr.63 Mikrostruktura tělesa z materiálu 341.



Obr.64 Keramografické výbrusy materiálu 342 pro jednotlivé lisovací tlaky se zviditelněným povrchem.



Obr.65 Mikrostruktura tělesa z materiálu 342.



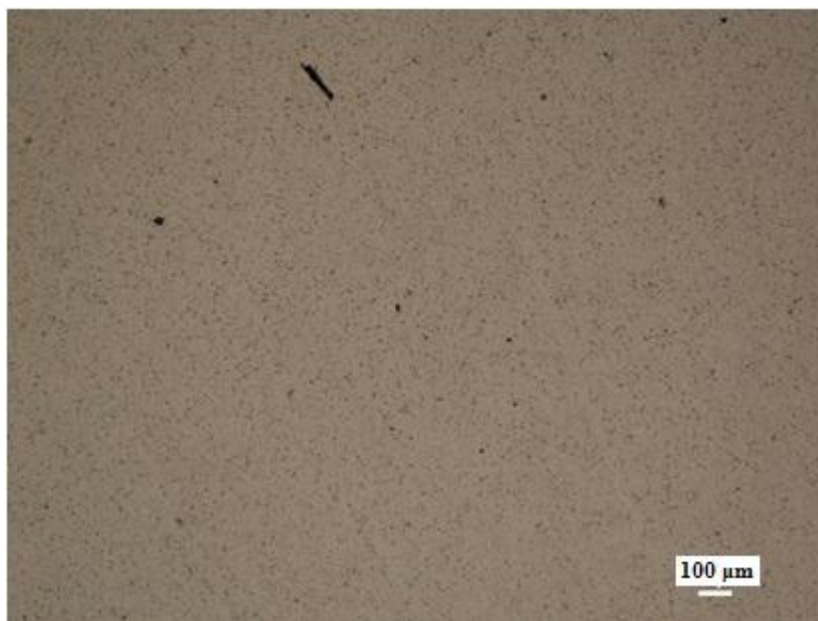
Obr.66 Keramografické výbrusy materiálu 343 pro jednotlivé lisovací tlaky se zviditelněným povrchem.



Obr.67 Mikrostruktura tělesa z materiálu 343.

Zbytkovou porositu ovlivňuje míra zhutnění granulátu, čím vyšší tlak se použije při lisování, tím menší a jemnější póry vzniknou. Tento jev je nejpatrnější na výbrusech materiálu 343, kdy i zběžným porovnáním výbrusů pro tlakovou hladinu 1000 barů a pro 1400 barů lze posoudit rozdíl ve zbytkové porositě, velikosti pórů a míře zhutnění.

Materiál 333 nebyl podroben zkouškám lisování s různými lisovacími tlaky, jeho chování je již známo. Na následujících obrázcích (obr.68 a obr.69) se zobrazuje jeho povrch a mikrostruktura při lisování na 1400 barů, zkoksování při teplotě 1050 °C a slinování při teplotě 2100 °C.



Obr.68 Keramografický výbrus materiálu 333 se zviditelněným povrchem.



Obr.69 Mikrostruktura tělesa z materiálu 333.

3 SHRNUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou shrnuty jednotlivé fáze výroby a experimentů a diskutovány jejich výsledky s přihlédnutím k materiálu 333 jako k etalonu. Budou také předvedeny výhody použití jednotlivých materiálů.

V průběhu vypracovávání této práce byl materiál 343 zhodnocen jako nevhodný a byl proto vyřazen. Z tohoto důvodu zde nebude uvažován.

Příprava granulátu

Granuláty 341a 341 jsou dodávány jako RTP (ready-to-press), jejich příprava či úprava tedy do výrobního procesu vůbec nevstupuje. Materiál 333 se však musí připravovat od základních složek, přes míšení a mletí až po stříkání granulátu. V této oblasti využití RTP substráty poskytují výhodu v úspoře výrobního času a je pro výrobu zboží ve firmě CeramTec plně vyhovující.

Lisování

Při lisování byla zkoumána soudržnost a lisovatelnost jednotlivých materiálů při různých lisovacích tlacích. Oba RTP materiály se při lisování chovaly totožně jako materiál 333, prokázaly dobrou soudržnost a pevnost při manipulaci.

Celkově došlo k nalisování pouze 4 polotovarů každého materiálu, není proto možné určit dlouhodobé výhody plynoucí z použití těchto materiálů. S přihlédnutím k informacím poskytnutým výrobcem se přínosem jeví lepší vlastnosti a menší opotřebení nástroje při lisování v pevných zápustkách (např. vyrobené z kovů nebo karbidů).

Vytvrzování a zkoksování

Pro první vytvrzovací zkoušky se použily parametry stanovené dodavatelem, tedy vytvrzovací teplota 80 °C po dobu 60 min. Výsledky však nebyly příznivé, materiál nebylo možné dále zpracovat bez poškození.

Druhá série vytvrzovacích zkoušek s různými teplotami (90, 105 a 130 °C) a výdrží na teplotě 90 min již přinesla příznivější výsledky. Polotovary získaly dostatečnou pevnost pro úspěšné obrábění. Aplikace různých vytvrzovacích teplot přinesla pouze minimální změnu v chování jednotlivých materiálů. Pro úspěšné vytvrzení a získání vhodných vlastností pro další fáze výroby postačí vytvrzení při 90 °C a čas 90 min.

Při změně rozměrů vytvrzovaného tělesa je nutné navrhnout vhodnou úpravu parametrů vytvrzování. Vzhledem k dostatečnému vytvrzení při 90 °C lze upravit pouze čas tak, aby bylo zaručeno dostatečné prohřátí v celém objemu polotovaru.

Materiál 333 je nutné před obráběním zkoksovat při teplotě 1050 °C, RTP materiály také musí projít zkoksováním pro odstranění organických sloučenin, avšak k tomu již dochází až v slinovací peci v kombinovaném slinovacím cyklu.

Materiály 341 a 342 mají oproti materiálu 333 výhodu v úspoře času díky kratší době zpracování výlisku před obráběním a díky použití teploty nižší o 93%.

Zelené obrábění

Experimenty při zeleném obrábění se zaměřily na zjištění chování polotovarů a materiálu při soustružení a na velikosti sil při soustružení.

Materiály RTP se při soustružení chovaly o něco hůře než materiál 333. Tuhost polotovaru nebyla dostatečná a pod působením nástroje došlo k vychylování, čímž došlo ke zhoršení povrchu. Přítomnost akrylové pryskyřice způsobila zanášení diamantového řezného kotouče používaného k dělení polotovaru, při použití soustružnických nožů s řeznou destičkou ze syntetického diamantu byla obrobitelnost totožná pro všechny materiály včetně 333.

Při dělení materiálu docházelo k tvorbě odštěpků v oblasti výstupu nástroje z polotovaru, vhodnou volbou nástroje a technologie dělení lze tento jev odstranit. Při použití technologie aplikované v tomto experimentu se musí obrobek pro odstranění odštěpků ručně dobrousit.

Při měření sil při soustružení se porovnávaly oba RTP materiály s materiálem 333, zároveň se také porovnávaly hodnoty sil pro jednotlivé varianty vytvrzovacích parametrů.

Pro materiál 341 se naměřily střední hodnoty síly 36,8 N, 37,7 N a 36,4 N (seřazeno podle rostoucí teploty vytvrzení). Hodnoty pro 342 byly 55,9 N, 59,9 N a 58,8 N. Přičemž u materiálu 333 byla určena střední hodnota síly na 31,3 N. Z hodnot je patrné, že vytvrzovací teplota výslednou sílu téměř neovlivní, proto doporučení používání vytvrzovací teploty 90 °C stále platí. Porovnáním sil pro jednotlivé materiály lze zjistit, že síla potřebná pro obrobení materiálu 333 je nejnižší, přítomnost akrylové pryskyřice v materiálu 341 potřebnou sílu ovlivňuje pouze minimálně, dochází k jejímu nepatrnému zvýšení. Materiál 342 však vyžaduje sílu téměř dvojnásobně vyšší.

Spolu s měřením obráběcích sil se sledovala i tvorba třísek. Pro všechny materiály odebraný materiál tvořil téměř totožné piliny, avšak u materiálů 341 a 342 byla patrně menší prašnost než u 333. Stroje ve firmě CeramTec jsou vybaveny odtahy prachu, ty postačují pro všechny zkoumané materiály.

Slinování

Vzorky vzniklé zeleným obráběním se slinovaly v slinovací peci. Zkoumala se schopnost materiálů projít celým procesem bez vzniku trhlin. Všechny materiály výpalem prošly bez poškození. Dále se stanovila míra smrštění jednotlivých materiálů. Materiál 341 se smrští průměrně o 23,0 %, 342 o 22,8 %. Smrštění materiálu 333 je 21.1 %.

Keramografie

Keramografické výbrusy se vytvořily za účelem zjištění mikrostruktury a potvrzení kompletní přeměny či redukce všech doprovodných látek. Oba materiály vykazují shodnou mikrostrukturu, která taktéž odpovídá mikrostruktuře materiálu 333. Jediným materiálem ve struktuře je karbid křemíku SiC. Míra zbytkových pórů dosahuje běžných hodnot pro slinovaný karbid křemíku SSiC. Rozdílné lisovací tlaky v rozmezí 1000 – 1400 barů ovlivní pórovitost materiálu, která s rostoucím tlakem klesá, avšak ani při použití nižších tlaků nedošlo ke vzniku jejímu nepřiměřenému rozvoji.

ZÁVĚR

Technická keramika se v dnešní době využívá stále více, lze se s ní setkat v nejnáročnějších podmínkách, zabezpečuje ekologický provoz strojů, aplikuje se v lékařství jako materiál pro nástroje a přístroje i jako materiál pro náhrady kloubů či zubů. Člověk se s ní setkává každý den, přitom si její přítomnost neovědomuje. V mnoha směrech ovlivňuje komfort lidského bytí. Povědomí o výhodách a aplikacích technické keramiky je však velice nízké, z tohoto důvodu se první část této práce zabývá teorií výroby a vlastností těchto materiálů obecně, bez omezení pouze na slinovaný karbid křemíku SSiC, který je předmětem zkoumání v praktické části práce.

Celý výzkum měl za úkol zjištění míry ovlivnění vlastností a průběhu výroby při aplikaci alternativních materiálů pro výrobu slinovaného karbidu křemíku SSiC a zajištění prvních kroků k zařazení materiálů RTP do portfolia firmy CeramTec Czech Republic.

Výroba a užití technické keramiky v praxi musí splňovat nejpřísnější kritéria. Na základě této práce proto nemohou být materiály uvolněny do výroby. Avšak zjištěné vlastnosti se využijí jako vstupní pozice pro jejich rozsáhlé testování vedoucí k možnému zařazení do výroby. Dalším krokem budou analýzy chování při dalších používaných metodách obrábění jako např. využití víceosých frézovacích center. Pro zařazení materiálů RTP od výrobce IHK do portfolia CeramTec Czech Republic musí být rovněž provedeny zkoušky mechanických, teplotních a elektrických parametrů dle příslušných norem. Při prokázání vhodnosti materiálu ke všem použitelným obráběcím metodám se musí ověřit všechny standardní materiálové vlastnosti, na základě kterých lze vystavit certifikáty pro zákazníky.

Materiály IHK 601/RTP T4.02, IHK 604/RTP T4.05 a částečně i StarCeram S rtp Grade SQ byly podrobeny porovnání s originálním materiálem Rocar S1. Proces výroby se rozdělil do kroků na přípravu substrátu, lisování, vytvrzení a zkoksování, zelené obrábění, slinování a keramografii. Vzhledem ke srovnatelné struktuře všech materiálů, vyplývající z keramografie, zkoumání míry ovlivnění při tvrdém obrábění již pozbylo významu.

Zhodnocení výsledků v jednotlivých fázích vykazovalo minimální nebo žádné změny vlastností a chování RTP substrátů oproti standardnímu materiálu.

Příprava základního granulátu se do výrobního systému s RTP materiály nezařazuje, neboť se dodávají již připravené. Tato skutečnost je výhodou oproti materiálu Rocar S1.

Při lisování se všechny materiály chovaly totožně. Polotovary nevykázaly změnu vlastností ani při různých lisovacích tlacích.

Vytvrzení RTP materiálů bylo provedeno v několika variantách. První cyklus vytvrzení nebyl úspěšný, parametry doporučené výrobcem granulátů nebyly postačující. V druhém cyklu vytvrzení proběhlo. Rozdílné vytvrzovací teploty neměly na vlastnosti polotovarů zásadní vliv.

Při zkouškách obrábění u materiálu IHK 604/RTP T4.05 (342) došlo k téměř dvojnásobnému nárůstu obráběcí síly při soustružení, která dosáhla 58,2 N oproti 31,4 N při obrábění materiálu Rocar S1 (333), materiál IHK 601/RTP T4.02 (341) s 36,8 N potřebnými pro obrábění výraznou změnu nevykázal. Při soustružení však docházelo k tvorbě odštipků na hranách, ty lze odstranit vhodnou úpravou technologie obrábění. Při dělení polotovarů diamantovým brusným kotoučem došlo k jeho nadměrnému zanášení, při důkladném čištění je však jeho použití možné.

Při slinování bylo dosaženo obdobného smrštění u všech materiálů. Míra smrštění pro RTP granuláty dosáhla mírně vyšších hodnot, avšak pouze v rozmezí 2 %, kdy pro vztažný materiál dosáhla hodnoty 21,1%, u zbývajících materiálů poté 23,0 % a 22,8 %. Vyšší smrštění bylo u materiálu IHK 604/RTP T4.05 (342).

Keramografické výbrusy vykazaly totožnou mikrostrukturu i povrch pro všechny zkoumané materiály.

Nesporná výhoda materiálů RTP spočívá v odstranění energeticky a časově náročného kroku zkoksování. Ten nahradila nutnost vytvrzení těchto materiálů, teplota k tomu potřebná je o 93% nižší (90 °C pro vytvrzení, 1050 °C pro zkoksování). Při přihlédnutí k charakteru těchto materiálů a definování vhodných obráběcích podmínek a postupů, lze předpokládat totožné nebo zlepšené chování při obrábění jako standardní materiál.

Na základě zjištěných skutečností lze materiály IHK601/RTP T4.02 a IHK 604/RTP T4.05 doporučit k dalšímu zkoumání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Podklady z firmy CeramTec Czech Republic
- [2] Verband der Keramischen Industrie e.V. *Brevier – Technische Keramik*. 3.vydání. Lauf: Fahner Verlag, 1999. 197 stran. ISBN 3-924158-36-3
- [3] Linsmeier, Klaus-Dieter. Technical Ceramics: The material of choice for the most demanding applications [online]. 2. Mnichov: Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 2010.Dostupné z: <http://www.ceramtec.cz/e-mail/downloads/tag/ceramic-manual/>
- [4] Slinování karbidu křemíku Příručka Norton
- [5] JIŘÍ, Witzany, Čejka TOMÁŠ a Ziegler RADEK. Vliv dynamického zetížení s vysokou frekvencí na snížení tuhosti prefabrikovaných stěnových systémů vícepodlažních budov. *Stavební obzor*. 2008, 17(4).
- [6] Nold, P. *Granulace – jednoduše a cenově výhodně*. Löbe, R., Müller, M. *Keramische Zeitschrift* 55 (2003)
- [7] Kriegsmann, Jochen. *Slinování v kapalně, pevné a plynné fázi na příkladu karbidu křemíku, část 1*. *Keramische Zeichnung* 9/10 2004
- [8] Orlovský, Imrich. *Technológia výroby keramického granulátu a vplyv procesu sušenia na jeho vlhkosť*. Skok, Peter
- [9] Klemm, U. Instrumentální zhutňování lisováním jako nástroj při vývoji keramických granulátů s optimalizovanou strukturou a vlastnostmi. Schoene, B., Friče, M., Nebelung, M.
- [10] Kriegsmann, Jochen. *Slinování v kapalně, pevné a plynné fázi na příkladu karbidu křemíku, část 2*. *Keramische Zeichnung* 56 9/10 2004 page 544-552
- [11] El-Wardany, T. *Otimum process parametrs to produce green ceramic complex parts* CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 58, 2009, pp. 109-112
- [12] Malkin, S., Hwang, T.W. *Grinding mechanisms for ceramics* CIRP Annals Vol.45/2/1996 Pages 569-580
- [13] Klocke, Fritz. *Removal mechanisms in polishing of silicon based advanced ceramics* CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 58, 2009, pp. 491-494
- [14] Komanduri, R. *On material removal in finishing of advanced ceramics and glasses*.
- [15] CeramTec. *CeramTec* [online]. Dostupné z: www.ceramtec.cz
- [16] El-Gallab, M. *Machining of Composite Materials* CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 2, 2002, pp. 611-634
- [17] El-Gallab, M., Sklad, M. *Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites part I: Tool performance*. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 83 1998, 20 March 1997, Pages 151-158
- [18] El-Gallab, M., Sklad, M. *Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites part II: workpiece surface integrity*. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 83 1998, 16 May 1997, Pages 277-285

ÚST FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List	90
-------------	-----------------	------	----

- [19] El-Gallab, M., Sklad, M. *Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites part III: comprehensive tool wear models*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 101 2000, 2 June 1998, Pages 10-20
- [20] Teti, R. *Machining of Composite Materials* CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 2, 2002, pp. 611-634
- [21] *Silicon carbide ready to press formulation*. Datasheet RTP IKH. Industriekeramik Hochrhein GmbH
- [22] *Starceram S rtp Grade SQ*. Datasheet rtp H.C.Starck. H.C. Starck Ceramics GmbH
- [23] *Isostat Pressanlagen*. Průvodce firmy Dieffenbacher.
- [24] *FCT S 8240*. Datasheet FCT pro slinovací pec FCT S 8240
- [25] *Zařízení na termické spalování zplodin*. TNV Beschreibung. Datasheet BIRK Wärmetechnische GmbH.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al_2O_3	Oxid hlinitý, Alumina
C	Uhlík
Hg	Rtuť
$\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{Si}_5\text{AlO}_{18})$	Kordierit
$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Steatit
SiAlON	Sialon
SiC	Karbid křemíku
SiN	Nitrid dusíku
SiO_2	Quartz
SiSiC	Karbid křemíku syčený křemíkem
SSiC	slinovaný karbid křemíku
α	Koeficient lineární teplotní roztažnosti
λ	Tepelná vodivost
ν	Příčná kontrakce = Poissonova konstanta
ρ	Hustota
σ	Mechanická pevnost, napjatost
E	Modul pružnosti
F_{ar}	Aritmetický průměr celkové síly při obrábění
F_{c}	Řezná síla při soustružení
F_{f}	Posuvová síla při soustružení
F_{m}	Střední hodnota celkové síly při obrábění
F_{p}	Pasivní síla při soustružení
K_{I}	Součinitel intenzity napětí
K_{IC}	Kritický součinitel intenzity napětí
PEG	Poly-Etylen-Glykol
PVA	Poly-Vinyl-Alkohol
RTP	Ready-to-press (= připraveno k lisování)
TNV	Zařízení pro termické spalování zplodin
s	Směrodatná odchylka
s^2	Rozptyl