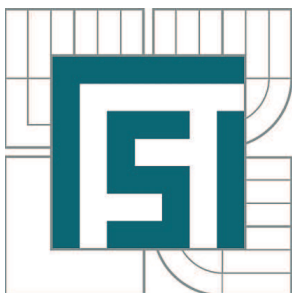


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ FRÉZOVÁNÍM

ON THE MILLING OF CERAMIC MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VÁCLAV RUDEL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Václav Rudel

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:

### **Obrábění keramických materiálů frézováním**

v anglickém jazyce:

### **On the milling of ceramic materials**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza oobrobitelnosti žáruvzdorných keramických materiálů frézováním.

Cíle diplomové práce:

1. Úvod
2. Rozbor vybraných materiálových a technologických keramických materiálů
3. Analýza oobrobitelnosti keramických materiálů frézováním, experimentální zkoušky
4. Diskuze výsledků
5. Závěry

Seznam odborné literatury:

1. BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. s. 112. ISBN 80-8075-013-0.
2. BARÁNEK, I., ŠANDORA, J.: Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212, ISBN 80-8075-013-0.
3. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Produktivní obrábění kovů. Švédsko CMSE. 1997. 300s.
4. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. (Přel. z: Modern Metal Sutting - A Practical Handbook. Překlad M. Kudela.), 1. vyd., Praha, Scientia, s.r.o.,1997. 857s., ed. J. Machač, J. Řasa, ISBN 91-97 22 99-4-6.
5. KOČMAN, K. Speciální technologie. Obrábění. 1. vyd. CERN Brno, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8.
6. WAGNER,F.-HÄRLE,P.-MAYER,S.-WAGNER,E. Technika a programování NC strojů. 1. vydání 1994, Praha, 88s., ISBN 80-901-657-5-3.
7. LEINVEBER,J., ŘASA, J., VÁVRA, P. Strojnické tabulky. 3. upravené a doplněné vydání. Scientia, 1999, Praha, 986s., ISBN 80-7183-164-6.
8. DRASTÍK, F. et al. Strojnická příručka. Svazky 1-2. Verlag Dashofer. 1. vyd., 2002, ISBN 80-86229-65-3.
9. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110 s. Praha, 2004, ISSN 1212-2572.
10. Shubin Ren, Xuanhui Qu, Jia Guo, Xinbo He, Mingli Qin, Xiaoyu Shen. Net-shape forming and properties of high volume fraction SiCp/Al composites. Journal of Alloys and Compounds (Impact Factor: 2.29). 01/2009; 484(1):pp. 256-262.
11. <http://www.seeifceramic.cz/pages/en/home-page.php>

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

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

V diplomové práci je zpracováno rozdělení keramických materiálů, jejich vazby a různé vlastnosti, které keramické materiály definují. Dále je popsán způsob výroby a zpracování keramických materiálů, včetně možností jak obrábět keramické materiály. Následně byl proveden experiment, při kterém byl obráběn vzorek keramiky R-S67K frézováním. Při experimentu bylo měřeno silové zatížení, tyto síly byly nakonec vyhodnoceny.

### Klíčová slova

keramické materiály, výroba keramických materiálů, frézování, řezné síly, drsnost povrchu

## ABSTRACT

In the diploma thesis dividing of ceramic materials is made, their bonds and other attributions, which define ceramic materials. There is also described how ceramic materials are manufactured and the thesis is including information about machining ceramic materials. In the experimental part sample of ceramic material R-S67K was machined by milling. During the experiment cutting forces were measured and roughness of surface after finishing, these data were finally evaluated.

### Key words

ceramic material, manufacturing ceramic materials, milling, cutting forces, roughness of surface

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RUDEL, V. *Obrábění keramických materiálů frézováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 61 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Obrábění keramických materiálů frézováním** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

29. 5. 2015

-----  
Datum

-----  
Bc. Václav Rudel

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě SEEIF Ceramic a.s. za zapůjčení zkušebního vzorku a umožnění vypracování diplomové práce. Dále poděkování náleží kompetenčnímu centru Intemac Solutions s.r.o. Kuřim za možnost využití přístroje Alicona GF4.

Velké poděkování také náleží rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia a tvorbě diplomové práce.

---

**OBSAH**

Abstrakt .....	4
Prohlášení .....	5
Poděkování .....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Keramické materiály.....	10
1.1 Tradiční keramika.....	10
1.2 Technická keramika .....	10
1.2.1 Keramika oxidová .....	10
1.2.2 Keramika neoxidová.....	12
1.2.3 Keramika směsná .....	13
1.3 Struktura keramických materiálů .....	13
1.3.1 Vazby v keramických materiálech.....	14
1.3.2 Pohyb dislokací v keramických materiálech.....	14
1.3.3 Poruchy v keramických materiálech.....	15
1.4 Vlastnosti keramických materiálů .....	15
1.4.1 Elastické vlastnosti.....	15
1.4.2 Plastické vlastnosti.....	16
1.4.3 Creep .....	17
1.4.4 Pevnost.....	18
1.4.5 Křehkost.....	18
1.4.6 Tvrdost.....	19
1.5 Výroba keramických materiálů .....	19
1.5.1 Příprava směsi .....	19
1.5.2 Tvarování .....	19
1.5.3 Sušení.....	22
1.5.4 Tepelné zpracování - slinování .....	23
2 Obrábění keramických materiálů.....	24
2.1 Obrábění ultrazvukem .....	25
2.2 Otryskávání .....	25
2.3 Obrábění laserem.....	26
2.3 Broušení .....	26
2.4 Frézování, soustružení a vrtání .....	26
2.5 Frézování .....	27
2.5.1 Válcové frézování .....	27

---

---

2.5.2 Čelní frézování .....	28
3.1 Popis experimentu .....	29
3.2 Nástroj .....	30
3.3 Stroj .....	31
3.4 Vzorek keramiky .....	32
3.5 Měřidla použitá k vyhodnocení experimentu .....	33
3.5.1 Dynamometr .....	33
3.5.2 Alicona InfiniteFocus GF4 .....	33
3.6 Vyhodnocení experimentu .....	34
3.6.1 Vyhodnocení silového působení .....	34
3.7 Další zpracování silových výsledků experimentu .....	40
3.7.1 Vliv rostoucí posuvové rychlosti .....	40
3.7.2 Vliv rostoucí řezné rychlosti .....	42
3.8 Drsnost povrchu obrobeného povrchu vzorku .....	44
3.8.1 Vliv posuvové rychlosti na drsnost povrchu .....	45
3.8.2 Vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu .....	47
3.9 Tříska a opotřebení břitové destičky .....	50
3.10 Řezný výkon a měrný řezný odpor .....	51
3.10.1 Řezný výkon .....	51
3.10.2 Měrný řezný odpor .....	52
4 Diskuse .....	54
Závěr .....	55
Seznam použitých zdrojů .....	56
Seznam použitých symbolů a zkratek .....	59
Seznam příloh .....	61

## ÚVOD

Mezi keramické materiály je možné řadit takové materiály, které jsou anorganického a nekovového charakteru a jsou vázány kovalentními, iontovými nebo iontově-kovalentními vazbami. Keramické materiály jsou využívány pro široké spektrum výrobků. Od tradičních keramických materiálů jako jsou cihly, dlaždice, sanitární keramika a další běžné výrobky, až po pokročilou technickou keramiku, která je využívána v průmyslu především z důvodů její žáruvzdornosti, odolnosti proti působení chemikálií, odolnosti proti opotřebení, tvrdosti a dalším jedinečným vlastnostem. Moderní výrobky z technické keramiky již mají i vysokou pevnost nejen v tlaku, ale i v tahu a ohybu, a proto dochází k velkému rozvoji technické keramiky. Například již byl vyvinut spalovací motor, kde byly z převážné části použity keramické materiály jako konstrukčního materiálu. Výroba z keramických materiálů je náročná především z energetického hlediska z důvodu sušení a tepelného zpracování po vytvarování výrobku do požadovaného tvaru.

Se stále rostoucími požadavky na keramické výrobky se mění i způsoby jejich konečného zpracování, kdy se začíná prosazovat i obrábění. Keramické materiály se velice těžce obrábí, což je způsobeno vysokou tvrdostí a tím, že jsou výrobky z keramických materiálů velice křehké. Obvykle se obrábí broušením, ale je možné používat i další způsoby konvenčního obrábění jako je frézování, soustružení nebo vrtání. Dále se používají nekonvenční metody jako obrábění ultrazvukem nebo laserem.

Cílem práce je zhodnotit obrobiteľnosť žáruvzdorného keramického materiálu R-S67K, který zapůjčila firma SEEIF Ceramic a.s. Jedná se o vysocehlinitý šamot, který byl frézován vyměnitelnou břitovou destičkou z polykrystalického diamantu. Při frézování byly měřeny řezné síly, které působily při obrábění. Dále byly změřeny parametry drsnosti povrchu a opotřebení vyměnitelné břitové destičky.

# 1 KERAMICKÉ MATERIÁLY

Keramika je anorganického původu a může obsahovat nekovové i kovové materiály, které jsou obvykle vázané kovalentními vazbami, iontovými vazbami nebo jejich kombinací tedy iontově-kovalentními vazbami. Chemické složení je vysoce proměnlivé od jednoduchých dvousložkových sloučenin až po vysoce složité fáze. Základními vlastnostmi keramických materiálů je vysoká tvrdost, pevnost v tlaku, odolnost proti vysokým teplotám a tuhost, ale jako nevýhoda keramických materiálů se jeví nízká pevnost v ohybu a křehkost. Keramické materiály vykazují relativně nízkou hustotu oproti jiným konstrukčním materiálům, ale na druhou stranu jsou špatně obrobitelné a náchylné k šíření trhlin. Dalšími vlastnostmi keramických materiálů je nízká elektrická vodivost a až na výjimky jsou keramické materiály diamagnetické nebo paramagnetické. Je několik způsobů jak dělit keramické materiály do kategorií např. dle struktury, fázového a chemického složení nebo dle pórovitosti. Je také možné dělit keramiku dle využití na keramiku žáruvzdornou, stavební nebo technickou a tradiční [1, 2, 3, 4].

## 1.1 Tradiční keramika

První vzniklá keramika byla právě keramika tradiční, na jejíž výrobu se používá křemene, živce, kaolínu, jílu a dalších materiálů. Keramickou strukturu v tradiční keramice z uvedených materiálů tvoří oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ , který je zároveň žáruvzdorný. Z živců je především využíván draselný živec  $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ , ze kterého při vypálení vznikne skelná složka. Jílů (hydratovaný křemičitan hlinitý  $\text{Al}_4(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$  a další oxidy různých kovů) je využíváno jako pojiva před samotným vypalováním, aby bylo možné směs vytvarovat do požadovaného tvaru [1, 3, 4].

## 1.2 Technická keramika

Keramika, která je používána pro náročnější aplikace, je též nazývána konstrukční. Vstupní materiály již obvykle nejsou volně dostupné, ale jedná se o syntetické látky. Výhody technické keramiky jsou vysoká pevnost v tlaku, chemická odolnost, odolnost proti opotřebení a žáruvzdornost. Díky složitému zpracování pokročilých materiálů použitých pro výrobu dochází k výraznému rozvoji až ve druhé polovině 20. století. Technická keramika je dále rozdělována na keramiku oxidovou, neoxidovou a směsnou [1, 3].

### 1.2.1 Keramika oxidová

Oxidická keramika je tvořena jedním druhem oxidu, ale může být obsažena jedna nebo více fází. Je také možné přidávat malé množství příměsí jiných oxidů pro zlepšení vlastností konečného výrobku a zároveň není možné zabezpečit 100 % čistotu vstupních materiálů. Jedná se o nejvíce zastoupený druh technické keramiky. Kromě výše zmíněných vlastností obecných pro technickou keramiku, keramika oxidová vyniká výbornou schopností izolovat elektrický proud. Nejčastěji se můžeme setkat s keramikou, kde je základním materiálem oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo oxid zirkoničitý  $\text{ZrO}_2$ . Dále se používají oxidy na bázi hořčíku, berylia, titanu a dalších prvků [3, 4, 5].

**Keramické materiály na základě  $\text{Al}_2\text{O}_3$** 

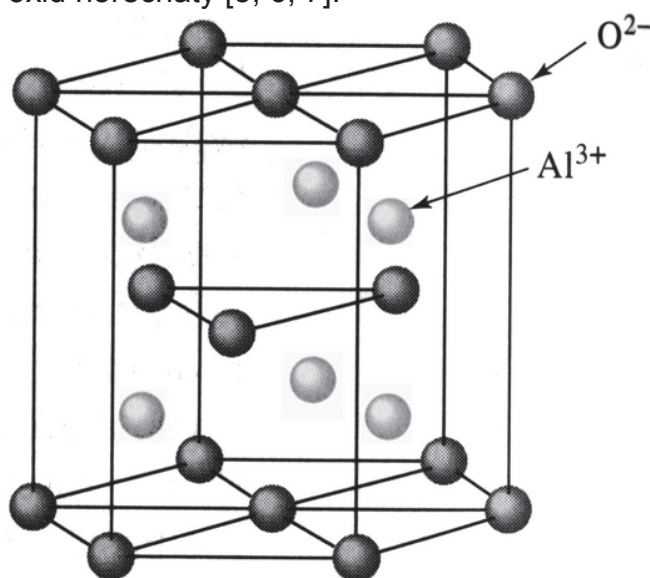
Také je nazývána jako keramika korundová. Obvykle je používána fáze s hexagonální strukturou označovaný jako  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \alpha$ . Má obvyklé vlastnosti keramických materiálů jako je vysoká žáruvzdornost, pevnost, tvrdost a odolnost proti taveninám kovů a různým chemickým látkám. Tyto vlastnosti si zachovává i do oblasti teplot okolo 1 000 °C a teplota tání korundové keramiky je 2 050 °C. To je způsobeno iontovými vazbami mezi atomy hliníku a kyslíku. Korundová keramika je vyráběna v rozmezí 80 - nad 99 % hmotnosti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Vlastnosti se s rostoucím obsahem mění, jak je vidět z tabulky 1.1 [7].

Tab. 1.1 Vlastnosti keramiky na základě obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [7].

Veličina	Jednotka	Obsah $\text{Al}_2\text{O}_3$			
		80 – 86 hm. %	87-95 hm. %	96-99 hm. %	nad 99 hm. %
Hustota	[g.cm <sup>-3</sup> ]	3,5 - 3,6	3,6 - 3,7	3,7 - 3,8	3,8 - 3,9
Youngův modul pružnosti v tahu	[GPa]	200	300	400	400
Pevnost v ohybu	[MPa]	200	250	280	300
Pevnost v tlaku	[MPa]	2000	2000	2000	3000
Pevnost v tahu	[MPa]	120	130	140	150
Tvrdost dle Vickerse HV	[-]	1500	1500	1600	1700
Koeficient délkové teplotní roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]	6	7	7,5	8
Teplná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	10 - 16	14 - 24	16 - 28	19 - 30

Všechny mechanické vlastnosti se zlepšují s rostoucím obsahem oxidu hlinitého, stejně tak roste tvrdost, tepelná vodivost a koeficient délkové teplotní roztažnosti [7].

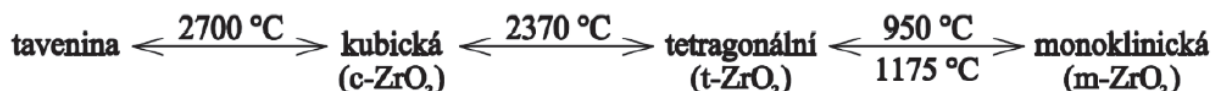
Keramické materiály na základě oxidu hlinitého jsou slinovány za pomoci tekuté nebo pevné fáze. Volba závisí na objemu ostatních látek ve směsi. Konstrukční keramika, která obsahuje menší obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je slinována mastkem, kaolinem nebo uhličitany vápníku nebo hořčíku. Při obsahu nad 99 % je slinování prováděno za pomoci oxidů hořečnatého, nebo jiných hořčíkových sloučenin, které se za zvýšené teploty přemění na oxid hořečnatý [3, 6, 7].



Obr. 1.1 Krystalická struktura oxidu hlinitého [18].

### Keramické materiály na základě $ZrO_2$

Vlastnosti oxidické konstrukční keramiky na bázi oxidu zirkoničitého jsou značně ovlivňovány fázovými přeměnami hlavního stavebního prvku, které jsou na obrázku 1.2. Tyto přeměny jsou závislé na teplotě. Oxid zirkoničitý postupně přechází z kubické mřížky na tetragonální a následně do monoklinické krystalové mřížky. Právě tato poslední přeměna má největší význam a to z toho důvodu, že se značně podobá martenzitické přeměně oceli. Tato změna je doprovázena značnou změnou tvaru a objemu zrn. Tato přeměna dále probíhá bezdifúzně a ne izotermicky [3, 6, 7].



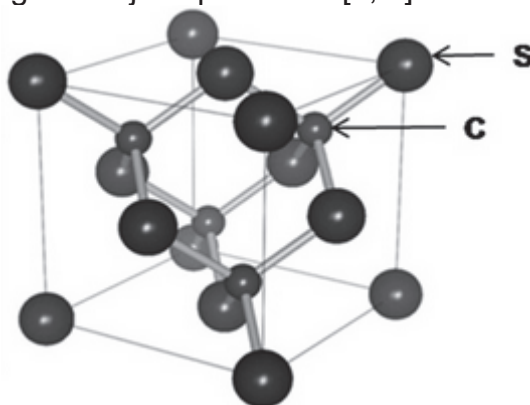
Obr. 1.2 Fáze přeměny oxidu zirkoničitého [7].

### 1.2.2 Keramika neoxidová

Vývoj neoxidové keramiky byl započat v důsledku potřeby získat takové materiály, které budou schopné dosáhnout vyšších teplot a přitom si zachovat své mechanické vlastnosti. Z materiálů používaných pro neoxidickou keramiku to jsou především různé karbidy, nitridy, boridy a silicidy. Technologické zpracování těchto sloučenin na keramiku je složitější z důvodu, že je nutné zabránit oxidaci materiálů za vysokých teplot při výrobě (je nutné slinovat za redukční atmosféry nebo ve vakuu). Z toho plyne i určité omezení pro využití materiálů v praxi, kdy není možné neoxidové keramiky využít tam, kde by za vysokých teplot byly vystaveny oxidační atmosféře. Dále při výrobě je nutné zohlednit, že některé sloučeniny jako SiC nebo BN se při zahřátí na vysokou teplotu samovolně nezhutňují (nedochází ke slinování) a je nutné využít slinování reakčního nebo slinování tlakového [3, 6, 20].

### Keramické materiály na základě SiC

Nejrozšířenější karbidický materiál pro přípravu keramiky. Má kubickou strukturu, obdobnou jaká je v diamantu, ale ve struktuře není pouze uhlík a 50 % uhlíku je nahrazeno křemíkem. Pro vysokou tvrdost je využíván často jako brusný materiál. Tento materiál je možné použít jako prášek, anebo ve formě nástroje kde je vázán organickou nebo anorganickou sloučeninou (je možné i využití ve formě pasty kde je karbid křemíku vázán pomocí polymeru). Karbid křemíku je velice dobrý vodič tepla dále má a malou teplotní roztažnost, takže je vysoce odolný proti změnám teploty. Elektrickou energii vede jako polovodič [5, 6].



Obr. 1.3 Krystalická struktura karbidu křemíku [19].

### **Keramické materiály na základě $\text{Si}_3\text{N}_4$**

Moderní keramický materiál, který patří do oblasti nitridů. Nitridy obecně mají vysokou odolnost proti vysokým teplotám. Samotný nitrid křemíku má hexagonální strukturu. K jeho vlastnostem patří dobrá tepelná vodivost a malé tepelná roztažnost, což dohromady dává odolnost proti změnám teploty (podobně jako karbid křemíku). Je poměrně křehký, ale pokud je odstraněna skelná fáze je možné zvýšit lomovou houževnatost, díky vláknům, které prorůstají strukturou. Nitrid křemíku je využíván jako nástrojový materiál, vybavení do sléváren a také se objevil diesellový motor, celý sestavený z dílů vyrobených z  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (adiabatický motor, který není třeba chladit) [5, 6, 7].



Obr. 1.4 Hybridní keramický motor [21].

### **1.2.3 Keramika směsná**

Jak už název uvádí, jedná se o směs buď jedné oxidické keramiky a jedné neoxidické nebo směs dvou oxidických materiálů. Často je využíváno karbidu nebo nitridu titanu na zvýšení odolnosti proti vysokým teplotám a zvýšení mechanických vlastností. Relativně novou směsnou keramikou je Sialon ( $\text{Si} - \text{Al} - \text{O} - \text{N}$ ), který je z hlediska svých vlastností podobný nitridu křemíku, ale z větší odolností proti zvýšeným teplotám a je proto využíván na plynové turbíny, které jsou vysoce teplotně namáhány [2, 3, 6].

### **1.3 Struktura keramických materiálů**

Keramika je obvykle tvořena krystalickou strukturou, která může být doplněna skelnou strukturou. Samotná krystalická struktura je výrazně ovlivněna typem vazeb, které jsou utvořeny mezi atomy. Vyskytují se dva druhy vazeb a to vazba kovalentní a iontová nebo je možná i kombinace obou typů vazeb tedy vazbou iontově-kovalentní, která je pro keramické materiály typická [1, 3].

### 1.3.1 Vazby v keramických materiálech

Kovalentní vazbu u keramických materiálů tvoří obvykle dva nekovové prvky ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Tento druh vazby vzniká tak, že atomy sdílejí elektrony ve svých elektronových obalech. Tato vazba je určená i směrově (dochází k vytváření různých druhů sítí) a nedochází k tak velkému přiblížení atomů jako u iontové vazby. Typickými vlastnostmi materiálů s kovalentní vazbou je vysoká chemická odolnost, tvrdost a elektronová vodivost. Naopak tyto materiály dosahují nízkých hodnot tepelné roztažnosti a minimální tvárnosti [1, 23].

Iontovou vazbu tvoří obvykle kovový prvek s kyslíkem nebo dalšími nekovovými prvky ( $\text{ZrO}$ ,  $\text{MgO}$ ). Tato vazba je tvořena elektrostatickými silami působícími mezi opačně nabitými ionty dvou prvků, proto mají materiály s iontovou vazbou vysokou hustotu (opačně nabité atomy jsou přitaženy velkými silami k sobě na velmi malou vzdálenost). Dalšími vlastnostmi materiálů s iontovou vazbou je velká tepelná roztažnost, nízká iontová vodivost a špatná tvárnost [1, 23].

Nejčastěji se v keramických materiálech vyskytuje kombinace obou vazeb a to vazba iontově-kovalentní. Množství zastoupení vazeb v daném keramickém materiálu je dána elektronegativitou jednotlivých prvků zastoupených ve struktuře. Zároveň poměr určuje typ krystalické struktury. V tabulce 1.2 jsou uvedeny poměry zastoupení iontové nebo kovalentní vazby v některých keramických materiálech [1].

Tab. 1.2 Podíl iontové a kovalentní vazby ve vybraných keramických materiálech [1].

Keramický materiál	Rozdíl elektronegativit prvků	Iontový charakter	Kovalentní charakter
$\text{MgO}$	3	77 %	23 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2	63 %	37 %
$\text{Si}_3\text{N}_4$	1,2	30 %	70 %
$\text{SiC}$	0,7	11 %	89 %

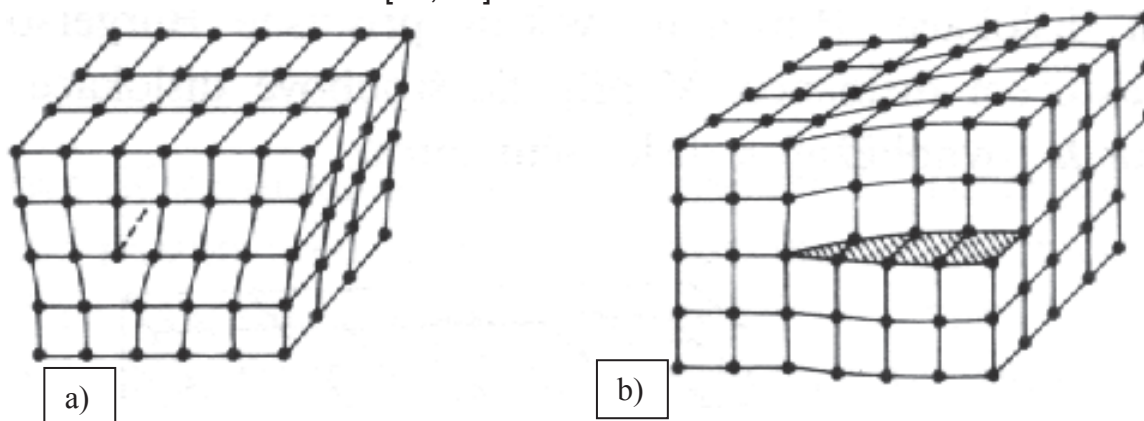
### 1.3.2 Pohyb dislokací v keramických materiálech

Typ vazby dále ovlivňuje pohyby dislokací v materiálech. Kovalentní i iontová vazba má jak již bylo zmíněno nízkou hodnotu tvárnosti, což je způsobeno právě velice omezeným pohybem dislokací v těchto materiálech. Tato vlastnost výrazně snižuje mechanické vlastnosti keramických materiálů a tak omezuje jejich využití jako materiálu pro vysoce namáhané konstrukční prvky. Malá pohyblivost dislokací je způsobena v materiálech s kovalentní vazbou tím, že pro pohyb dislokace je nutné přerušit směrově orientované vazby. Přerušením těchto vazeb vznikají vysoká P-N (Peierlsovo – Nabarrovo) napětí téměř na úrovni pevnosti materiálu. Proto nedochází k téměř žádné plastické deformaci, ale rovnou ke křehkému lomu součástí. Dále je možná zhoršená manévrovatelnost dislokací v materiálech s jednoduchou iontovou mřížkou ( $\text{MgO}$ ). Zde jsou napětí P-N podobná jako u kovů, ale není splněna podmínka pěti nezávislých skluzových systémů, a proto dochází k jevu, že monokrystaly jsou tvárné, ale polykrystaly již tvárné nejsou. Ve většině keramických materiálů dochází ke kombinaci obou případů [24].

Za rostoucí teploty keramických materiálů (stejně jako u dalších materiálů) dochází k poklesu P-N napětí a tím roste tvárnost. Keramické materiály, ale se stávají tvárnými až téměř při dosažení teploty tavení [24].

### 1.3.3 Poruchy v keramických materiálech

V keramických materiálech se vyskytují bodové, čárové a plošné poruchy materiálu (též nazývané dislokace). Bodové poruchy vznikají buď jako vakance (chybějící atom), intersticiální (uzavřené atomy mimo svoji polohu v krystalické mřížce) atomy nebo ionty. Dále se mohou vyskytovat atomy jiné látky uzavřené v krystalické struktuře. Bodové poruchy krystalické mřížky nejsou příliš významné, protože jsou obvykle izolovány v malém prostoru. Nejvýznamnější jsou poruchy čárové, které umožňují plastickou deformaci materiálu. Čárové poruchy jsou buď šroubové, hranové nebo jejich kombinace. Hranové poruchy vznikají tak, že v některých místech přebývá řada atomů. Šroubové poruchy vznikají tak, že roviny kolmé k dislokační čáře tvoří šroubovou plochu. Plošné poruchy materiálu mají vliv především na hranicích zrn [12, 24].



Obr. 1.5 a) Hranová b) šroubová porucha materiálu [25].

## 1.4 Vlastnosti keramických materiálů

Keramické materiály mají rozdílné vlastnosti, které jsou závislé na samotném chemickém složení a jeho čistotě, krystalické struktuře a na způsobu jakým je keramický materiál zpracován. Celé výrobky z keramiky jsou z hlediska vlastností homogenní, přestože jednotlivé krystaly mají své vlastnosti rozdílné a i vlastnosti jednotlivého krystalu v různých směrech jsou odlišné. To, že vlastnosti konečného výrobku jsou ve všech směrech stejné, je způsobeno tím, že je ve výrobku rozloženo velké množství nahodile rozmístěných krystalů. Další vlastností keramiky je, to že je pórovitá a to způsobuje, že v některých místech je uzavřen vzduch, tedy materiál, který nemá žádnou pevnost ani hmotnost. Obecnými a velice důležitými vlastnostmi keramických materiálů je vysoká tvrdost, žáruvzdornost, odolnost proti otěru i proti chemikáliím, naopak nejsou odolné v tahu a ohybu (dochází ke křehkému lomu). Co se týče elektrických vlastností, keramické materiály jsou obvykle izolanty, ale není to pravidlem a mohou se vyskytovat keramické materiály, které jsou piezoelektrické, polovodivé nebo pyroelektrické. Podobně jako elektrická vodivost i pro vodivost tepelnou jsou keramické materiály obvykle izolanty, ale existují i takové, které teplo vedou jako kovy [3, 23].

### 1.4.1 Elastické vlastnosti

Pokud jsou keramické materiály vystaveny krátkodobému a relativně malému silovému působení chovají se dle Hookova zákona (prodloužení je přímo úměrné zatěžujícímu napětí), tedy elasticky a po odlehčení se vrací do svého původního

tvary bez poškození. Poměrné prodloužení (nebo zkrácení) v dané ose můžeme vypočítat dle vztahů 1.1 až 1.3 [5, 12].

$$\varepsilon_x = [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \cdot E^{-1} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_y = [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] \cdot E^{-1} \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_z = [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \cdot E^{-1} \quad (1.3)$$

kde:  $\varepsilon_{x,y,z}$  [-] - poměrné prodloužení,  
 $\sigma_{x,y,z}$  [Mpa] - normálové napětí v dané ose,  
 $\mu$  [-] - součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo),  
 $E$  [GPa] - Youngův modul pružnosti v tahu [5].

Modul pružnosti je pro keramické materiály značně odlišný, pro běžný porcelán je hodnota přibližně 70 GPa, naopak slinuté karbidické keramiky mohou dosahovat hodnot až 500 GPa. Široký interval hodnot modulu pružnosti u keramických materiálů je způsoben tím, že modul pružnosti ovlivňuje samotné složení keramického materiálu, dále jeho mikrostruktura (uspořádání, podílové zastoupení jednotlivých fází). Pro dvoufázové systémy (jednoho druhu keramického materiálu a pórů) je možné určit modul pružnosti dle empirického vztahu 1.4. Keramické materiály dosahují hodnot Poissonova čísla v rozmezí od 0,17 do 0,36 [5, 12].

$$E = E_0(1 - aV_p + bV_p^2) \quad [\text{GPa}] \quad (1.4)$$

kde:  $E_0$  [GPa] - modul pružnosti keramického materiálu bez pórů,  
 $V_p$  [-] - objemové množství pórů,  
 $a, b$  [-] - součinitelé tvaru pórů [5].

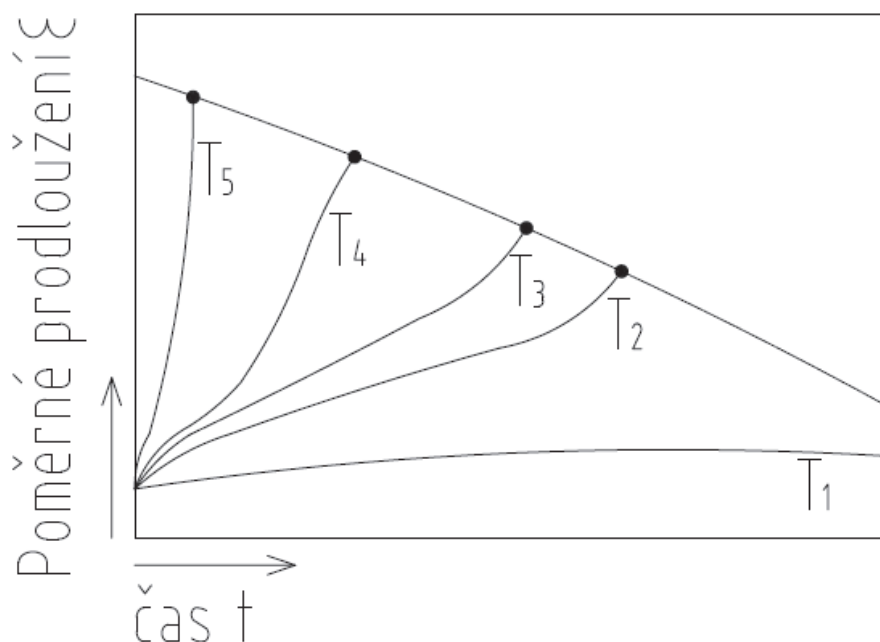
#### 1.4.2 Plastické vlastnosti

Za normálních teplot je keramika obvykle tvrdá křehká, ale mohou nastat případy, kdy tomu tak není ani za normálních teplot. Za zvýšených teplot dochází k plastickému chování keramických materiálů. Za normálních teplot je možné dosáhnout plastického chování keramických materiálů, kdy dochází k deformaci pouze minimálního množství materiálu relativně vysokým zatížením, toto je splněno při měření mikrotvrdosti, kdy po diamantovém indentoru zůstane otisk v materiálu [5, 12].

Pokud je deformován pouze jednotlivý krystal keramického materiálu, dochází ke skluzu částí krystalu. Tyto skluzy se vnikají tak, že dochází k přesmykání, které ještě ulehčují čárové dislokace v krystalu. Dále může vznikat plastická deformace jednotlivého krystalu dvojčatěním. Velikost možné plastické deformace je značně ovlivňována pohyblivostí a manévrovatelností dislokací v materiálu [5, 12].

### 1.4.3 Creep

Creep (pomalé tečení) je vlastně plastické deformování materiálu, které je ale obvykle prováděno za zvýšených teplot. Jedná se o velice důležitou charakteristiku pro keramické materiály (keramika může být zkoušena za teplot nad 1 000 °C), a proto bude pro creep věnována jedna samostatná kapitola. Creep se vyznačuje tím, že k němu dochází při dlouhodobém zatížení (při namáhání, které nedosahuje meze kluzu materiálu) za zvýšené teploty. Výstupem z těchto zkoušek je taková znalost o materiálu, že je známo za jakou dobu při dané teplotě a zatížení dojde ke stanovenému prodloužení zkušebního vzorku. Této znalosti můžeme využít při navrhování žáruvzdorných keramických výrobků [5, 12].



Obr. 1.6 Tečení materiálu za různých teplot [5].

Křivky tečení materiálu zatíženého stejným zatížením, ale při jiné teplotě jsou vyobrazeny na obrázku 1.6. Po počátečním pružném prodloužení následuje fáze, kdy rychlost tečení pomalu klesá. V poslední fázi dochází ke zvýšení rychlosti, což je způsobeno ztenčením průřezu zatěžovaného vzorku a dále také vlivem dutin, které se objevují ve vzorku. K porušení vzorku, ale může dojít již ve druhém stádiu tečení [5, 26].

$$\dot{\varepsilon} = k \cdot \sigma^n \cdot e^{-\frac{T_0}{T}} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (1.5)$$

kde:  $\dot{\varepsilon}$   $[\text{s}^{-1}]$  - rychlost poměrného prodloužení,  
 $T$   $[\text{°K}]$  - absolutní teplota,  
 $k$   $[-]$  - konstanta  
 $T_0$   $[-]$  - konstanta [5].

Rychlost deformování vzorku je možné ze vztahu 1.5, ze kterého je patrné, že zmíněná rychlost roste se zvyšujícím se napětím a teplotou. Creep se u keramických

materiálů objevuje při dosažení poloviční teploty než je teplota tání daného keramického materiálu [5].

#### 1.4.4 Pevnost

Deformace keramických materiálů probíhá do té doby, než se objeví křehký lom v materiálu. Křehký lom se objevuje, protože se netvoří žádná plastická deformace viditelná pouhým okem. Prvotní porušení keramických materiálů se objevuje na jejich povrchu. Toto porušení je často vyvoláno tahovými napětími. Odolnost keramických materiálů je v tahu významně nižší než v tlaku (až 10x nižší v tahu). Materiály používané pro izolaci mají pevnost v tahu na úrovni 10 MPa, tradiční keramické výrobky dosahují pevnosti v tlaku až 150 MPa. Pro vysoce čisté keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) s velikostí zrn v řádu  $\mu\text{m}$  je možné dosáhnout výrazně vyšších pevností i v ohybu a to až 600 Mpa. Dále se vyskytují speciální keramické materiály s pevností v tahu až 1 000 MPa [12, 27].

Pevnost keramických materiálů je ovlivňována mnoha faktory například póry, trhlinami, velikostí zrn a inkluzemi. Pro keramické materiály je z pohledu pevnosti velice důležitý faktor pórovitosti, kdy existence pórů zmenšuje průřez a dále působí jako koncentrátor napětí [5, 12].

V tabulce 1.3 jsou uvedeny materiálové charakteristiky některých keramických materiálů.

Tab. 1.3 Vybrané keramické materiály a jejich pevnost [3].

Materiál	E	$R_m$ (v tlaku)	$R_m$ (v ohybu)
	[GPa]	[MPa]	[MPa]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	400 - 410	3000	350 - 400
SiC	410 - 480	2000	250 - 400
$\text{Si}_3\text{N}_4$	200 - 310	1200	700 - 800
$\text{ZrO}_2$	150 - 200	2000	100 - 200

#### 1.4.5 Křehkost

Fakt, že keramické materiály jsou křehké, je způsoben dvěma faktory, jeden je principiální a druhý vedlejší. Principiální křehkost keramických materiálů je způsobena tím, že přechodová teplota keramiky je vyšší než běžná teplota. Pokud tento jev nastává, tak není materiál schopen se téměř vůbec plasticky deformovat a dochází ke křehkému lomu. Je tedy ztížena pohyblivost a manévrovatelnost dislokací. Dalším vlivem je, že v materiálech vázané kovalentní a iontovou vazbou je zhoršené navázání mřížek na hranicích zrn, což má za následek, že pevnost mezi zrny je snížena. Vedlejšími příčinami jsou obecně nehomogenity v materiálu, špatné slinutí a tím další oslabení vazeb na hranicích zrn nebo existence skelné fáze. Dále se vyskytují póry a trhliny. Vedlejší příčiny jsou obvykle důvodem k porušení u tradiční keramiky, u technické keramiky je tento jev již značně omezen, ale stále se může vyskytovat [5, 12].

### 1.4.6 Tvrdost

Obecná definice tvrdosti materiálu je, že tvrdost je odpor materiálu před vnikáním cizího objektu do materiálu. Je velké množství metod pro měření tvrdosti, které jsou vhodné pro různé materiály. Pro měření tvrdosti jsou vhodné následující metody: Rockwell, Vickers a Knoop. Tvrdost keramiky dosahuje na Mohsově stupnici hodnot 8 – 9 pro technickou oxidickou keramiku a 9 – 9,5 pro keramiku neoxidickou. Po diamantu, který má tvrdost 10 se jedná o nejtvrďší materiály, jaké se vyskytují [3, 5].

## 1.5 Výroba keramických materiálů

Nejobvyklejší způsob výroby keramiky je použití práškové směsi a její následné slinování za vysoké teploty. Slinováním dochází také ke zhutnění směsi (snížení obsahu pórů). Vzhledem k působení vysokých teplot může dojít ke změně vlastností a výsledný výrobek může mít jiné vlastnosti než vstupní surovina. Pro tradiční keramiku jsou jako krystalické fáze typické přírodní materiály. Naopak pro pokročilé technické keramické materiály jsou využívány materiály, které není možné v přírodě nalézt. Výroba keramických materiálů je složena z několika kroků. Prvotním krokem je příprava směsi, pokračuje se vytvarováním do požadovaného tvaru a poté je výrobek dehydratován. Konečnou úpravou je zpravidla nějaký druh tepelného zpracování, kdy nejčastěji se využívá vypalování u tradiční keramiky a slinování u keramiky technické [1, 2, 5].

### 1.5.1 Příprava směsi

Výsledná kvalita a také technologie výroby keramických materiálů je značně závislá na kvalitě vstupních surovin. Vlastnosti, které se sledují u vstupních surovin pro keramické materiály, jsou např. chemické složení, velikost, tvar a povrch zrn. Přírodní materiály jsou obvykle značně rozdílné, a proto je nutné vlastnosti vstupních materiálů sledovat. Příprava směsi obvykle probíhá tak, že materiály jsou smíchány a namlety naráz. Je nutné používat takové mlecí kameny, aby nedocházelo k jejich porušování a tím přimíchávání nežádoucích příměsí do mleté směsi. Pro snížení pórovitosti je vhodné mít rozdílně velké částice, a to z toho důvodu, že při vytvarování dojde k vyplnění volných prostorů mezi většími částicemi, částicemi menšími. Mísení může probíhat bez přimíchání kapaliny (obvykle voda), nebo v suspenzi. V případě mísení s vodou je nutné tuto vodu po promísení odstranit např. rozprašováním. Výsledkem je čistý granulát, ve kterém jsou smíchané všechny materiály [5].

### 1.5.2 Tvarování

Tvarování začíná aglomerací, jehož podstata je v tom, že do směsi keramických prášků se přidávají další látky. Jsou přidávány takové látky, aby bylo možné vytvořit ze suchého prášku požadovaný tvar výsledného výrobku a také usnadnit jeho tvarování a celkově zlepšit jeho vlastnosti. Přidávají se různá pojiva maziva a dále mohou být použita smáčedla. Tvarování může probíhat za tepla, ale také za studena (za normální teploty), které je používáno častěji. Nejčastěji se pro tvarování využívá různých druhů lisování popřípadě lití, vstřikování nebo vytlačování. Cílem tvarování je jednak vytvořit základní tvar keramického výrobku, zajistit jeho určitou hutnost a také zajistit, aby takto zpracovaný polotovár získal dostatečnou pevnost pro manipulaci během výroby [1, 2, 4, 7].

Tab. 1.4 Metody pro tvarování keramiky [28].

Způsob tvarování	Metoda
Suché tvarování	Jednoosé lisování
	Izostatické lisování
Mokrý tvarování	Metody přímé konsolidace
	Tape casting
	Suspenní lití
Plastické tvarování	Injekční vstřikování
	Vytlačování
	Přetlačování a válcování
Tvarování bez forem	Stereolitografie
	Direct jel printing
	3D printing
	Robocasting
	Fused deposition

### Lisování

Pro lisování se obvykle používá suchých případně polosuchých směsí (vlhkost do 15 %), ale mohou se lisovat i směsi mokré. Rozhodnutí jaký způsob (suchá nebo mokrá směs) se použije, závisí na druhu zpracovávaného materiálu. Suchých směsí se využívá pro lisování běžných keramických výrobků, jako jsou např. dlaždice. Maximální tlak používaný pro běžné jednosměrné lisování je až 200 MPa. Vlastnosti lisovaných výrobků nejsou homogenní, což je způsobeno třením mezi stěnami formy a keramickým materiálem. Pro zlepšení vlastností se dále používá oboustranného nebo izostatického lisování (lisování ze všech stran). Dalšími používanými druhy lisování jsou přetokové, pístové a žárové lisování [4, 7, 24].

### Přetokové lisování

Pro přetokové lisování se používá otevřených kovových forem, jejichž hloubka je shodná s výslednou výškou vylisku. Používá se lisovacích tlaků v rozmezí 5 až 8 MPa. Je nutné zajistit dostatečnou pevnost vylisku pro jeho manipulaci. Vhodné pro tvarově složitější vylisky [7].

### Pístové lisování

Vhodné pro výrobu vylisků s minimálním obsahem vody. Pro vysokou kvalitu vylisku je nutné zajistit rovnoměrné rozložení směsi ve vylisku, proto je nutné sledovat násyp směsi do formy. Dalšími důležitými faktory pro pístové lisování je působení poměr výšky a průměru požití formy a působení lisovacích sil [7].

### Izostatické lisování

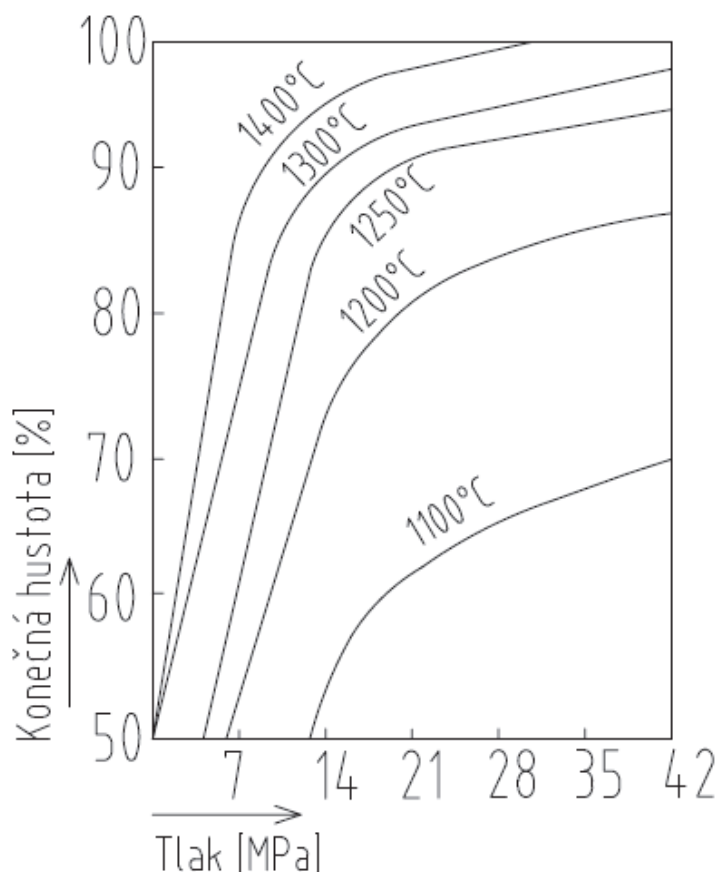
Pro tento způsob lisování se používá směsí, které mají nízký obsah vody a používá se velkých lisovacích tlaků v rozmezí 100 až 400 MPa. Izostatické lisování je výhodné, protože dochází k působení lisovací síly ve všech směrech. Tím dochází ke zlepšení výsledných vlastností, z důvodu zvýšení homogenity vylisku. Izostatické lisování může probíhat do suché nebo do mokré formy. Lisování do suché formy je vhodné pro menší vylisky, které jsou tvarově složitější. Mokřých forem se využívá na velké a tvarově jednoduché odlitky [7].

### Žárové lisování

Velice náročná a drahá metoda zpracování keramických materiálů, což je způsobeno tím, že se lisuje za velice vysokých teplot, které dosahují až 2 000 °C za použití ochranné atmosféry. Používá se lisovacích tlaků ve výši 40 až 60 MPa. Metoda vhodná pro technickou oxidovou nebo neoxidovou keramiku a díky slinování (dosahuje se vyšších teplot než při běžném slinování), které při žárovém lisování nastává, dochází ke zhutnění materiálu a dosahuje se objemové hmotnosti téměř stejné jako je hustota čistého materiálu [5, 7].

### Izostatické žárové lisování

Pro tento druh lisování se používá inertních plynů. Nejprve se vylisuje prvotní vylisek (obvykle pístovým nebo izostatickým způsobem), a takto připravený vylisek je možné ještě vypálit. Poté je uzavřen do pouzdra, kterým nemůže proniknout inertní plyn. Takto je poté uložen do nádoby s inertním plynem a vložen do pece. Plyn působí lisovacím tlakem. Takto vyrobený výrobek má objemovou hmotnost téměř shodnou s hustotou a také vysokou pevnost. Obvykle následují další úpravy výrobku, především jeho broušení. Slinování je ovlivňováno teplotou a tlakem viz obrázek 1.7 [5, 7].

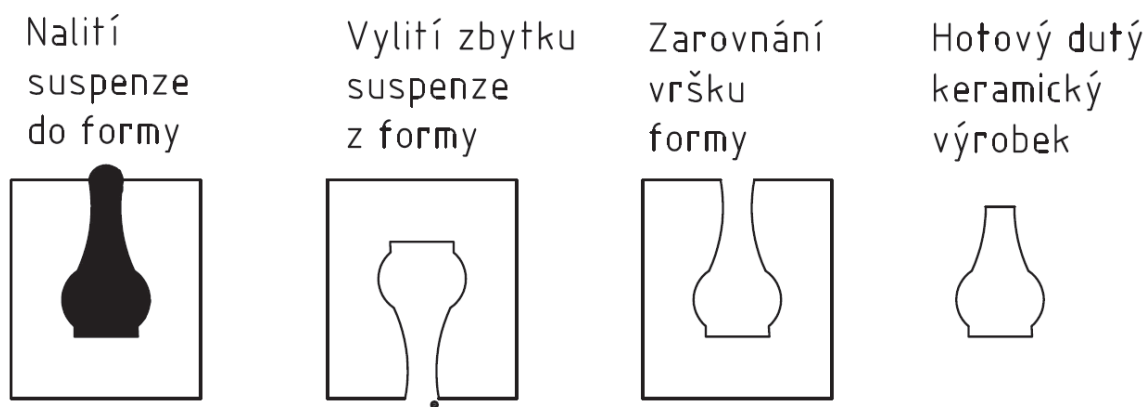


Obr. 1.7 Vliv teploty a tlaku na slinování  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [5].

### Suspenzní lití

Metoda suspenzního lití je vhodná pro tenkostěnné, složité a nesymetrické výrobky. Pro výrobu se používá sádrových forem. Jakmile je suspenze nalita do formy, forma nasaje část vody a tím se na rozhraní formy a směsi vytvoří slupka. Po určitém čase se vylije přebytečná suspenze z formy. Tenkostěnné výrobky je nutné nechat odsávat vodu několik minut a tlustostěnné výrobky i několik hodin. Výrobek se z formy vyjímá, až v okamžiku, kdy dosáhne dostatečné pevnosti, aby bylo

možné s výrobkem manipulovat. Postup výroby tenkostěnného výrobku je na obrázku 1.8 a plného dílu na obrázku 1.9 [1, 29].



Obr. 1.8 Výroba duté součásti suspenzním litím [1].



Obr. 1.9 Výroba plné součásti suspenzním litím [1].

### **Injekční vstřikování**

Podstatou vstřikování je, že do formy je za pomoci tlaku vstříknuta suspenze, ve které je obsažen keramický materiál. V okamžiku, kdy polotovár získá manipulační pevnost, je vytažen z formy. Po zformování je za zvýšené teploty odstraněno termoplastické pojivo a následuje slinování. Metoda injekčního vstřikování je vhodná pro výrobu velkého množství rozměrově menších a tvarově stejných výrobků. Používá se pro výrobu lopatek turbín, ventilů nebo biokeramických protéz. Nevýhodou je nutnost investovat velké finanční prostředky na pořízení strojů a forem [1].

### **Vytlačování**

Tvar výsledného výrobku je u vytlačování dosažen tak, že se vytlačuje směs pojiva a keramického prášku přes nástroj. Metoda používaná pro výrobu profilů, izolátorů pro elektrotechnický průmysl a jiných výrobků z technické keramiky [1].

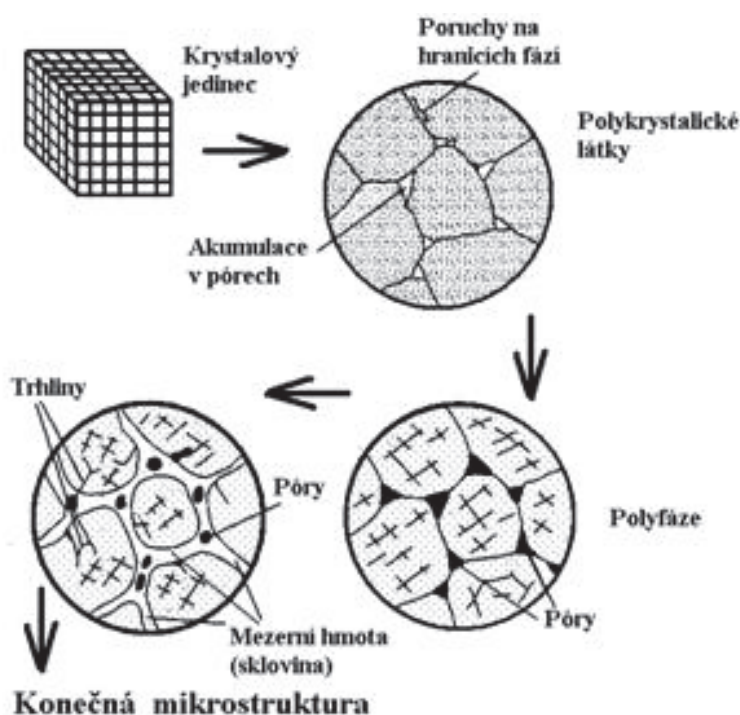
#### **1.5.3 Sušení**

Polotovary keramických výrobků se suší z důvodu snížení množství pojiva, které bylo do směsi přidáno, aby bylo možné výrobek vytvarovat. Teplota sušení je závislá na požitém pojivu ve směsi. Pokud je použita voda sušení probíhá při

teplotách do 100 °C, ale pokud je obsaženo nějaké pojivo, na bázi organického materiálu je teplota až 300 °C. Suší se po dobu 1 dne i déle, v závislosti na velikosti výrobku. Při sušení dochází k poklesu objemu polotovaru, dochází ke styku jednotlivých zrn keramického materiálu, což je způsobeno odpařováním pojiva z polotovaru. Při dosažení kritické dochází k nárůstu kapilárních sil, které způsobují smrštění polotovaru. Smršťování probíhá až do okamžiku, kdy dojde k doteku jednotlivých krystalů. Je nutné vysušit polotovar rovnoměrně, aby nevznikala tahová napětí. Při jejich vzniku dochází ke snížení pevnosti, kdy může nastat i porušení výrobku [1].

#### 1.5.4 Tepelné zpracování - slinování

Poslední částí řetězce při výrobě keramických výrobků je tepelné zpracování. Při slinování dochází k redukci velikosti pórů v materiálu. Tím dochází ke zpevnění a tak získává výrobek konečnou pevnost. Působením difúze mezi zrna dochází ke spojení jednotlivých zrn v jeden celek. Teploty pro slinování keramiky je v intervalu od 1 000 °C – 1 400 °C. Žáruvzdorné materiály a technickou keramiku je nutné slinovat za teplot vyšších a to až 1 700 °C. Doba slinování je obvykle značně dlouhá (v řádu desítek hodin). Toto je dáno tím, že je nutné dlouho výrobek nahřívat, poté následuje samotné slinování a pak velice pomalé ochlazování. Rychlost ochlazování není možné zvýšit, jinak by došlo ke vzniku nežádoucích napětí a tím ke snížení pevnosti [1, 4, 5, 29, 30].



Obr. 1.9 Princip slinování jak probíhá v mikrostrukturu materiálu [31].

---

## 2 OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Pro obrábění obecně je jedním z nejdůležitějších parametrů, který ovlivňuje průběh obrábění i výslednou kvalitu obrobku, je obrobitelnost materiálu. Obrobitelnost keramických materiálů je velice nízká, což je dáno především vysokou tvrdostí keramiky a tím odolností proti vnikání cizích těles do materiálu. Obrábění keramických materiálů je proto vysoce náročné na nástroje a je málo produktivní, a proto také velice drahé. Proto se keramické materiály zpracovávají rovnou do výsledných tvarů pomocí klasických metod zpracování keramických materiálů jako je např. vytlačování, suspenzní lití nebo lisování. Pokud je obrábění využíváno pak obvykle nějakým způsobem dokončovacího obrábění, kde typickým představitelem je broušení nebo nějakým z nekonvenčních způsobů obrábění jako je například obrábění laserem nebo ultrazvukem, které jsou obecně vhodnější než konvenční metody obrábění nástroji s definovanou geometrií. Problémem konvenčního způsobu obrábění je, že tvrdost nástroje musí být vyšší než obráběného materiálu, aby bylo vůbec možné vniknout nástrojem do obrobku a zahájit proces řezání. Pro konvenční metody (a i pro experimentální část byl použit) jsou obvykle používány nástroje z polykrystalického diamantu nebo kubického nitridu bóru. Vzhledem k vysoké tvrdosti keramiky, ale i u polykrystalického diamantu dochází k rychlému opotřebení břitu a to má velký vliv na zmíněnou produktivitu a cenu obrábění. Obecně je ale obrobitelnost jednotlivých keramických materiálů různá a závisí na materiálech použitých pro výrobu, na způsobu zpracování a poté na samotných řezných podmínkách [9, 10, 11].

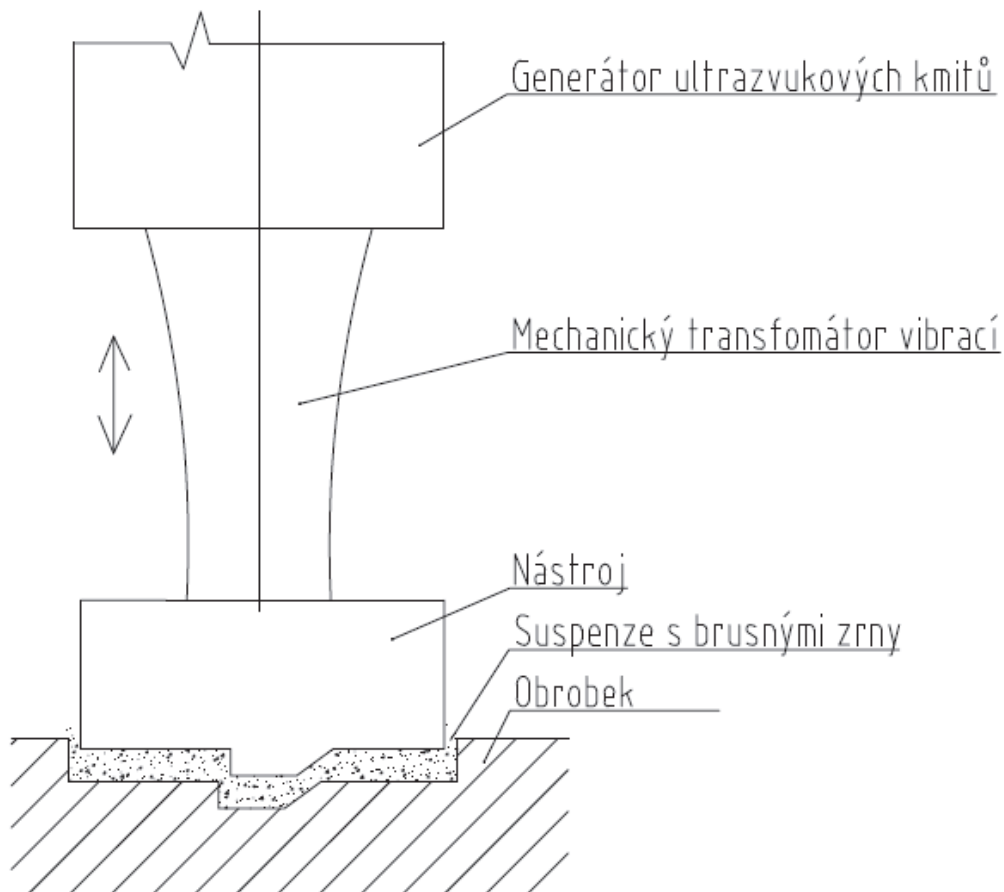
Společným znakem všech způsobů obrábění je, že je nutné v materiálu vytvořit minimálně jednu anebo větší množství prasklin a ty poté rozšiřovat v požadovaném směru. Povrch je tvořen soustavou lomových ploch, případně jednou lomovou plochou. Trhlinu v materiálu můžeme vytvořit pomocí silového působení do materiálu, nebo pomocí vysoce zkoncentrovaného energetického paprsku (laser). Pokud vytváříme trhlinu mechanicky, dochází k jejímu vzniku tak, že do materiálu je vtlačován hrot, nebo klín. Tyto nástroje nejsou nikdy dokonale ostré a mají nějaký poloměr zaoblení, a proto dochází v místě dotyku s obráběným materiálem ke vzniku kontaktní plošky, pomocí které se přenáší vzájemné silové působení. V těchto místech dochází k vysokým tlakovým zatížením, které ve směru do obráběného materiálu ustupují a naopak se mění v zatížení tahové. Kromě tlakových a tahových napětí se v materiálu vyskytuje i napětí smykové [12].

Prvotně dochází k pružné deformaci materiálu a při dosažení meze kluzu dochází k nevratným změnám v materiálu. Dochází ke vzniku trhlin a ty se dále šíří materiálem. Vzhledem ke složitosti krystalické mřížky, kterou mají keramické materiály je pro atomy ve struktuře těžké najít novou rovnovážnou polohu po silovém působení, toto způsobuje vysokou křehkost keramiky a tím rychlý vznik a šíření trhlin keramickými materiály [12].

Ke vzniku trhlin může docházet v některých případech až po jeho odlehčení, a to takovým způsobem, že dojde k narušení materiálu pod povrchem (plastické deformaci). Působením sil na obráběný materiál dochází k již zmíněným tlakovým silám, která zároveň brání k oddálení atomů od sebe a tím brání vzniku praskliny. Až po následném uvolnění dochází k nárůstu tahových napětí a tím k samotné tvorbě praskliny. Toto odpružení může vyvolat vylomení střepeň z povrchu materiálu [12].

## 2.1 Obrábění ultrazvukem

Jedná se o technologii podobnou broušení, ale nedochází ke smykovému napětí mezi nástrojem a obrobkem a také je jiný mechanismus působení abrazivního zrna na obráběný materiál. Podstatou obrábění ultrazvukem je vrhání abrazivních zrn vysokou rychlostí proti materiálu obrobku. Při nárazu se kinetická energie částice mění na deformační práci. Díky křehkosti keramiky stačí i malá zrna (disponující relativně malou kinetickou energií) k vytvoření trhlin, a pokud dojde ke spojení dvou (nebo více) trhlin vzniknou malé částice, které po následujícím nárazu další částice jsou vytrženy z materiálu. Nástrojová hlava není nijak tvarově omezena a je proto možné vytvářet různé otvory nebo zahloubení. Jako nástrojový materiál je obvykle použita ocel. Tento nástroj kmitá s frekvencí 10 až 20 kHz. Zrna jsou mezi materiálem a nástrojem a jsou ve formě suspenze, kdy jsou smíchána s lihem, benzínem nebo vodou. Přítomnost kapaliny ulehčuje pronikání energie do místa obrábění. Jako abrazivních zrna se využívá oxid hlinitý, karbid bóru, karbid křemíku nebo pro nejtvrďší materiály zrna diamantová. Velikost zrn je 10-100  $\mu\text{m}$  [12, 13].



Obr. 2.1 Obrábění ultrazvukem [12].

## 2.2 Otryskávání

Otryskávání je metoda obrábění, která je značně podobná obrábění ultrazvukem, ale na energii abrazivním zrnům místo generátoru kmitů dodává vrhací zařízení. Otryskávání se využívá jako k vrtání otvorů dělení materiálů, ale také k méně náročnému opracování jako je zdrsnění povrchu nebo jeho dekorace. Používanými

materiály jsou oxid hlinitý, karbid křemíku, nebo pouze křemenný písek (z tohoto materiálu pochází rozšířený název „pískování“). Velikost částic se pohybuje od 10  $\mu\text{m}$  až po jednotky mm. Toto má samozřejmě vliv i na výslednou přesnost opracování i na kvalitu povrchu [12].

## 2.3 Obrábění laserem

Laser je vhodný pro obrábění, pokud je materiál schopen pohlcovat světelnou energii. Dále je důležitá také tepelná vodivost a odrazivost materiálu určeného pro obrábění laserem. Čím více materiál pohltí záření a čím horší má tepelnou vodivost a odrazivost tím je vhodnější ke zpracování laserem [12].

Laserem je možné vytvořit lokální poškození tak, že laserem je zkoncentrována energie do jednoho místa tak, že dojde k tavení a poté k následnému odpařování materiálu. Na obvodu paprsku dochází k tavení materiálu (díky nižší koncentraci energie) a uprostřed laserového paprsku k jeho odpařování. Laseru se využívá pro vrtání otvorů nebo na řezání. Obvykle se používá pulzních laserů, kdy každý pulz v případě vrtání malých otvorů vytvoří otvor o hloubce a průměru přibližně desetiny mm. Velké otvory jsou vytvářeny tak, že laser tvoří dráhu o průměru otvoru. Vyšší přesnosti otvoru se dosáhne případně následným lapováním otvoru. Dále se lasery využívají na tvorbu rýh na povrchu materiálu. Charakteristickými vlastnostmi laserů je vlnová délka, jmenovitý výkon a pracovní režim [12].

## 2.3 Broušení

Broušení je jednou z dokončovacích metod obrábění. Kdy působením abrazivních zrn na materiál dochází k oddělování malých třísek z povrchu obrobku. Brusná zrna jsou umístěna v brusném nástroji náhodně, a tedy výsledný nástroj nemá definovanou geometrii. Brusný kotouč je k obrobku přitlačován a zároveň vykonává posuvný pohyb. Jako brusné nástroje pro keramické materiály je využíváno diamantu, karbidu křemíku nebo oxidu hlinitého. Zrna mívají velikost od jednotek do několika stovek  $\mu\text{m}$  v závislosti na požadavcích na výslednou kvalitu povrchu. Zrna bývají obvykle pevně spojena (vázané brusivo), ale někdy se využívají i zrna volná ve formě suspenze (zrna v kapalině). Při broušení jsou brusná zrna vtlačována do obráběného materiálu, po kterém se smýkají a odvalují. V místě kontaktu jsou vysoká napětí a může docházet také k plastickým deformacím (mikroskopický rozsah). Oddělování materiálu dochází tak, že zrna vylamují a vytrhávají malé částice, po odlehčení může docházet k odprýskávání malých částic. Nejdůležitějšími parametry broušení je měrný výkon broušení, objemová účinnost nástroje a měrná energie broušení [12].

## 2.4 Frézování, soustružení a vrtání

Keramické materiály je možné obrábět i konvenčními metodami obrábění, ale je nutné používat nástroje na bázi polykrystalického diamantu případně kubického nitridu bóru. Pro zvýšení trvanlivosti nástrojů a zkrácení doby obrábění je vhodné využít především laseru na přípravu obrobku z keramického materiálu a poté pouze

dokončit některou z konvenčních metod obrábění. Vzhledem k vysoké křehkosti dochází při vnikání nástroje do keramiky k tvorbě trhlin v materiálu, takto narušený materiál se vylamuje a odprýskává od povrchu. Je nutné při obrábění keramiky obrábět nižšími posuvovými rychlostmi, protože dochází k vysokému nárůstu řezných sil a bylo by možné následné porušení obrobku. Tříška vzniká obdobným způsobem jako při broušení keramických materiálů [12].

## 2.5 Frézování

Frézování probíhá rotačním nástrojem, který koná hlavní řezný pohyb. Posuvový pohyb obvykle vykonává obráběná součást a obvykle je v záběru několik zubů frézy. Tvoří se tříška, která má proměnlivou tloušťku [17].

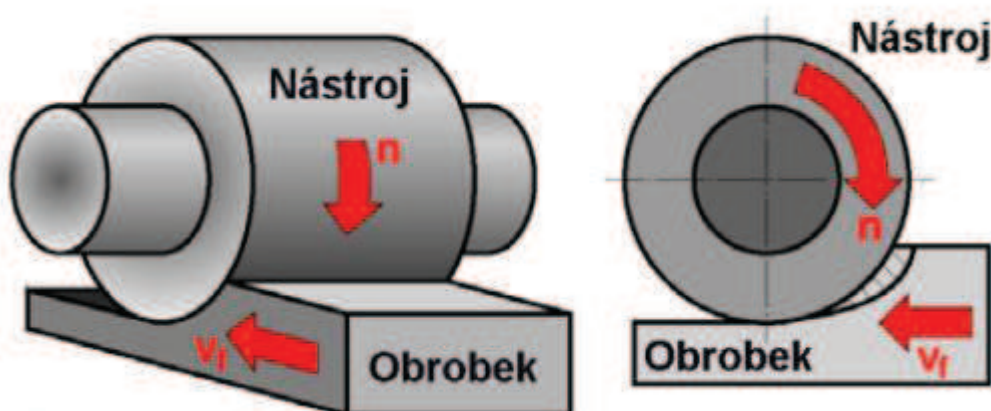
Frézování obecně se rozděluje dle nástrojů na frézování válcové a čelní. Z těchto základních druhů vychází další druhy jako je frézování okružní a planetové. Další rozdělení je možné dle pohybů frézy a obrobku na sousledné a nesousledné [17].

### 2.5.1 Válcové frézování

Válcové frézování, probíhá frézou ve tvaru válce, kdy jsou zuby vytvořeny jen po obvodu nástroje. Používají se především válcové a tvarové frézy. Hloubka vrstvy odebírané frézou se nastavuje kolmo na posuvovou složku pohybu [17].

#### Sousledné frézování

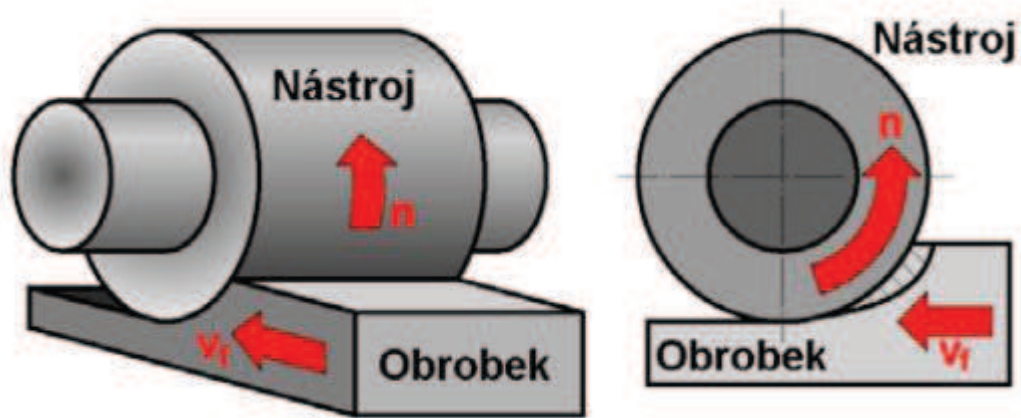
Nástroj rotuje ve směru posuvu obrobku a tříška začíná na maximálním průřezu a postupně se zmenšuje až na nulovou tloušťku. Výsledná plocha tvořená frézou vzniká při výstupu frézy z materiálu. Pro sousledné frézování je nutné vymezit vůli mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje. Sousledné frézování je na obrázku 2.2 [17].



Obr. 2.2 Válcové sousledné frézování [17].

#### Nesousledné frézování

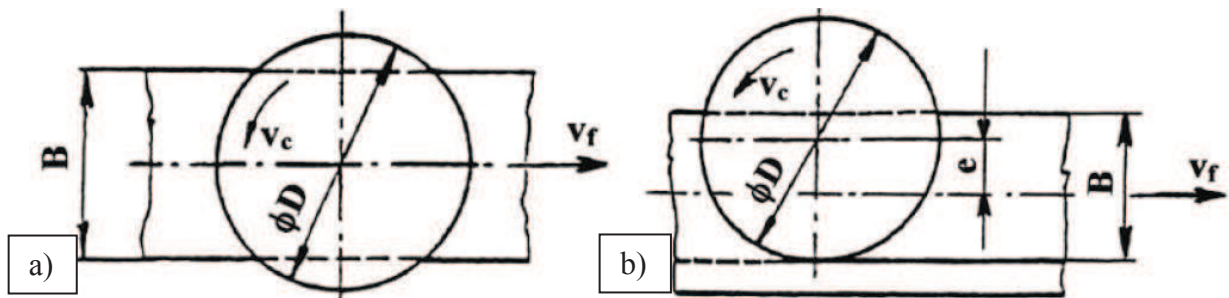
Probíhá opačně než sousledné frézování. Nástroj koná rotační pohyb proti směru posuvového pohybu obrobku a tím je tvořena výsledná plocha při vstupu frézy do materiálu. Tříška postupně narůstá od nulové tloušťky, do maxima viz obrázek 2.3 [17].



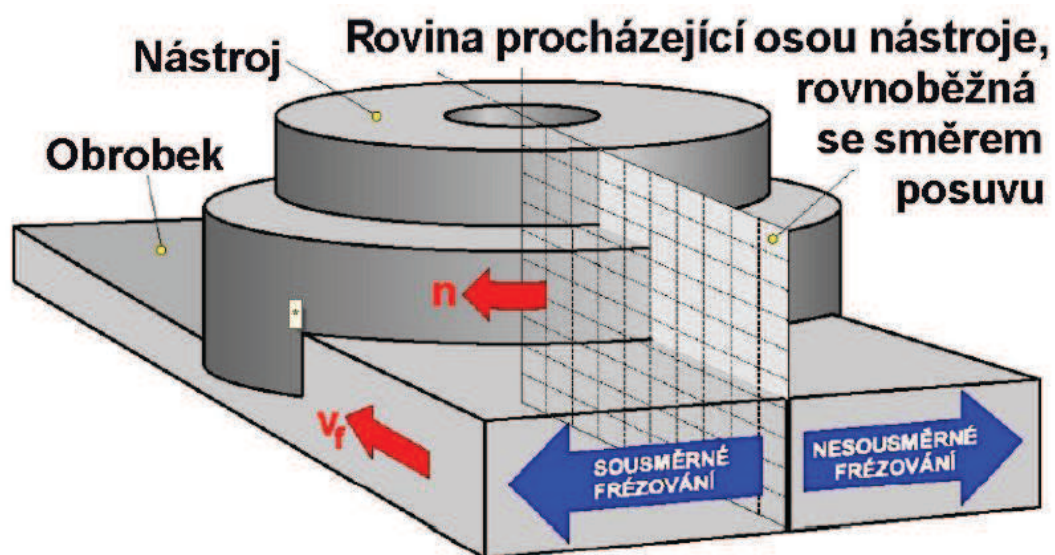
Obr. 2.3 Válcové nesousledné frézování [17].

### 2.5.2 Čelní frézování

Čelní fréza má zuby vytvořeny jak na obvodu, tak na čele a hlavní osa je kolmá na směr posuvové rychlosti. Při symetrickém čelním frézování je osa nástroje shodná, s osou symetrie obráběné plochy viz obrázek 2.4 [17].



Obr. 2.4 a) Čelní symetrické frézování b) Čelní nesymetrické frézování [17].



Obr. 2.5 Čelní symetrické frézování [17].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ROZBOR OBROBITELNOSTI KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Experiment byl proveden na vzorku keramického materiálu. Jedná se o žáruvzdorný vysoce hlinitý šamot pod obchodním označením R-S67K, jehož výrobcem je firma SEEIF Ceramic a.s.

#### 3.1 Popis experimentu

Stroj zvolený pro experimentální část byla vertikální frézka FB 32 V. Na stroji bylo provedeno celkem 9 měření. Prvních 5 měření bylo provedeno za konstantní řezné rychlosti a byla měněna posuvová rychlost. Zbylé 4 měření byly provedeny za konstantní posuvové rychlosti a naopak byla měněna rychlost řezná. Při každém měření byly měřeny síly ve 3 osách za pomoci dynamometru, kdy vzorek byl frézován čelně symetricky, šířka záběru ostří byla 1 mm. Výstupem z dynamometru bylo velké množství hodnot a pro další zpracování byly vybrány ty hodnoty, kdy bylo dosaženo maximálního průřezu třísky (blíže v kapitole 3.10.2). Následně byly změřeny charakteristiky profilu ofrézovaných ploch a tyto charakteristiky byly dále zpracovány. Pro měření charakteristik profilu byl použit měřicí mikroskop GF4 jehož výrobcem je firma Alicona. Dále po samotném experimentu bylo změřeno opotřebení vyměnitelné břitové destičky na hřbetu a na čele a nafocena tříska.



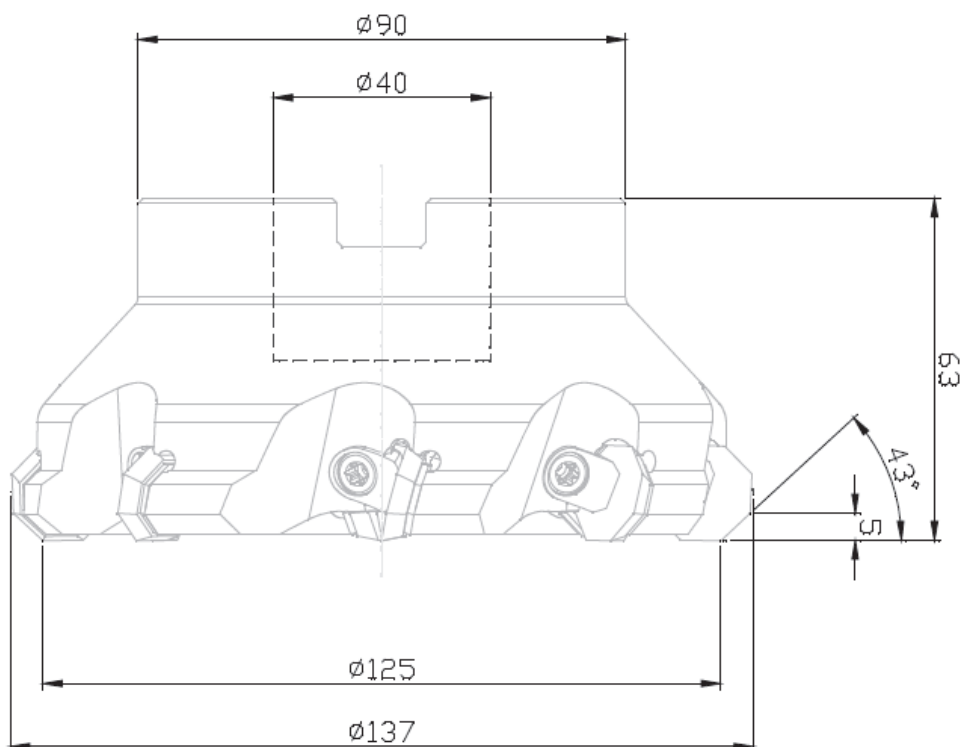
Obr. 3.1 Upnutí obrobku.

Tab. 3.1 Parametry obrábění.

Číslo měření	$a_p$	$v_c$	$v_f$	Frekvence snímání
[-]	[mm]	[m/min]	[mm/min]	[Hz]
1	1	87,96	10	100
2	1	87,96	20	100
3	1	87,96	40	100
4	1	87,96	63	100
5	1	87,96	80	100
6	1	109,96	63	50
7	1	131,55	63	50
8	1	176,71	63	50
9	1	219,91	63	50

### 3.2 Nástroj

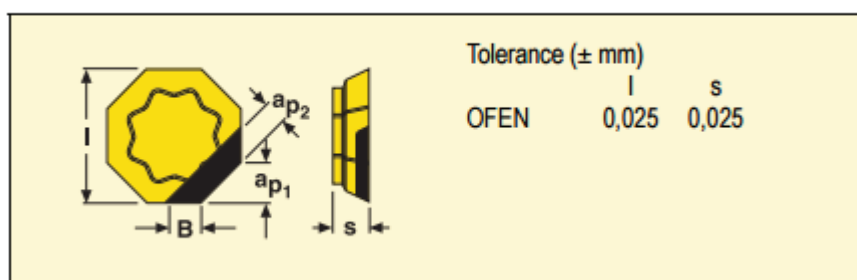
Nástrojem pro obrábění byla čelní válcová fréza s označením R220.43-0125-07W s jedinou vyměnitelnou destičkou OFEN 070405FN-M09 PCD20, materiálem vyměnitelné břitové destičky je polykrystalický diamant. Výrobce je firma SECO. Válcová fréza včetně rozměrů je na obrázku 3.2, vyměnitelná břitová destička na obrázku 3.3 a její parametry na obrázku 3.4.



Obr. 3.2 Válcová fréza [14].



Obr. 3.3 Vyměnitelná břitová destička [16].

**OFEN**

Velikost	Rozměry v mm				
	l	s	B	$a_{p1}$	$a_{p2}$
07	17,95	4,76	1,7	5,5	2

Obr. 3.4 Parametry vyměnitelné břitové destičky [15].

**3.3 Stroj**

Strojem pro obrábění keramického materiálu byla vertikální frézka FB 32 V, která byla vyrobena ve firmě TOS Kuřim. Parametry frézky jsou v tabulce 3.2.

Tab. 3.2 Parametry frézky FB 32 V [33].

Délka pracovní plochy stolu	1400 mm
Šířka pracovní plochy stolu	450 mm
Plocha stolu	320 x 1250 mm
Podélný posuv	950 mm
Svislý posuv	450 mm
Příčný posuv	320 mm
Otáčky vřetena	28 - 1400 $\text{min}^{-1}$
Hmotnost stroje	3800 kg



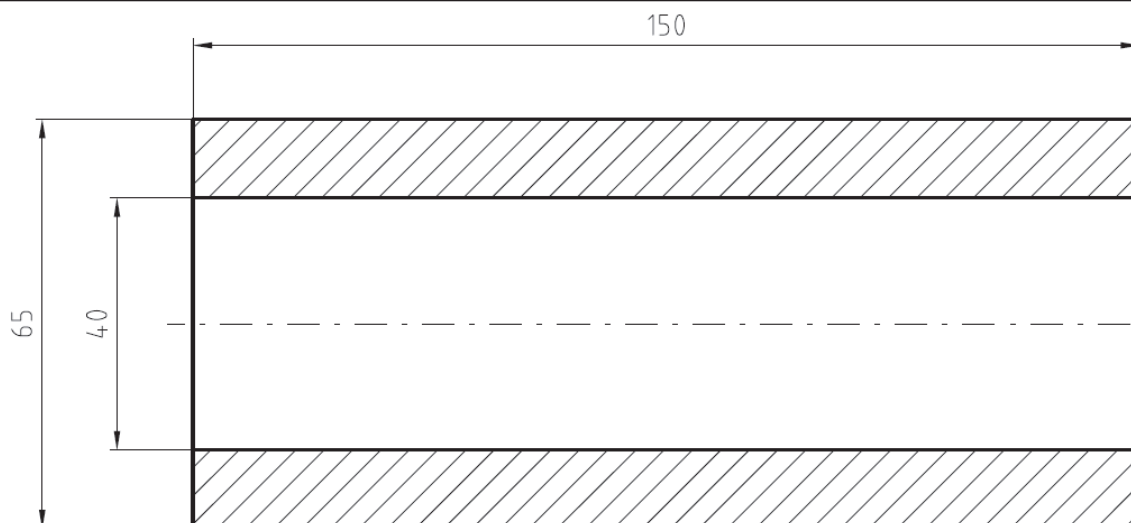
Obr. 3.5 Frézka FB 32 V.

### 3.4 Vzorek keramiky

Pro experiment byla zapůjčena trubka z materiálu R-S67K. Jedná se o výrobek firmy SEEIF Ceramic a.s. určený pro vysoce náročné odlévání kovů. Základem je vysocehlinitý šamot, vlastnosti tohoto materiálu jdou v tabulce 3.3. Tento materiál je vysoce pevný, odolný proti otěru, žáruvzdorný a odolný proti pronikání tekutého kovu. Společnost SEEIF Ceramic a.s. vyrábí z materiálu R-S67K kompletní lící systémy a speciální tvarovky dle požadavků zákazníka.

Tab. 3.3 Vlastnosti materiálu R-S67K [8].

Vlastnosti	Garantovaná hodnota	Norma
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	min. 67 %	EN 955-2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	max. 2 %	EN 955-2
Žáruvzdornost	min. 1750 °C	EN 993-12
Objemová hmotnost	min. 2300 kg/m <sup>3</sup>	EN 993-1
Zdánlivá pórovitost	25%	EN 993-1
Teplota použití	max. 1760 %	-

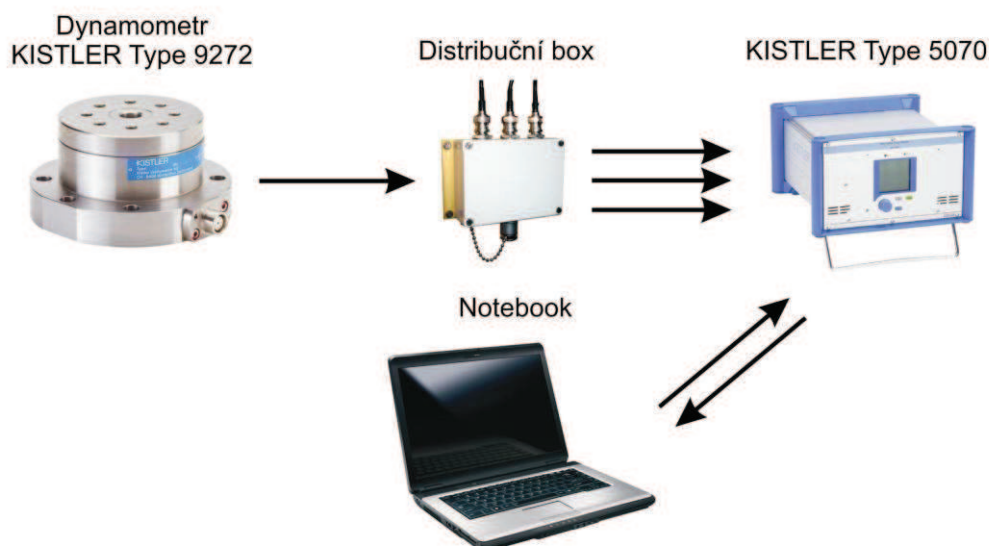


Obr. 3.6 Rozměry obráběného vzorku.

### 3.5 Měřidla použitá k vyhodnocení experimentu

#### 3.5.1 Dynamometr

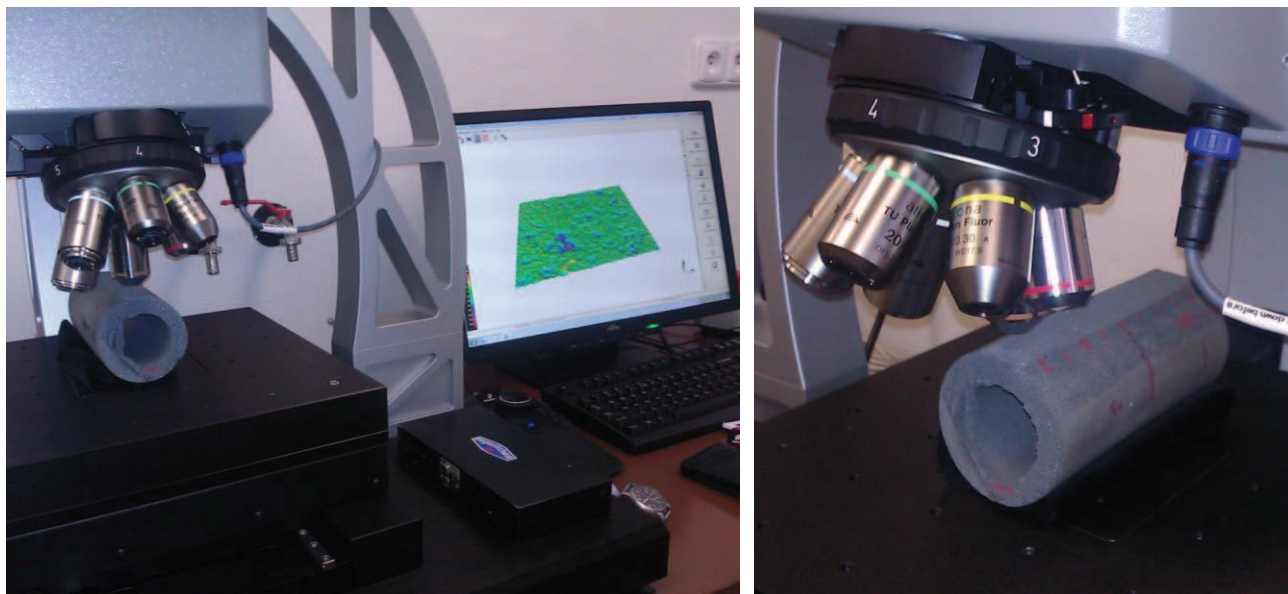
Pro experiment byl využit piezoelektrický dynamometr od firmy Kistler typ 9272, který byl umístěn mezi svěrákem a stolem frézky. Silové zatížení bylo snímáno v osách x, y a z. Snímací frekvence se lišila a byla 50 nebo 100 Hz. Naměřené hodnoty byly přes kabely odeslány do distribučního boxu. Dále bylo nutné signály zesílit v zesilovači také od firmy Kistler s typovým označením 5070. Poté byly signály přeneseny do počítače a v programu Dynoware proběhlo prvotní zpracování a takto upravená data byla uložena v textovém souboru.



Obr. 3.7 Schematické znázornění měřící aparatury Kistler [22].

#### 3.5.2 Alicona InfiniteFocus GF4

Parametry povrchu byly měřeny na bezdotykovém měřícím mikroskopu Alicona InfiniteFocus GF4 viz obrázek 3.7. V software byla naměřená data dále zpracována a kromě parametrů drsnosti Ra a Rz, byla určena měřená délka a materiálový podíl.



Obr. 3.8 Měřicí mikroskop Alicona.GF4

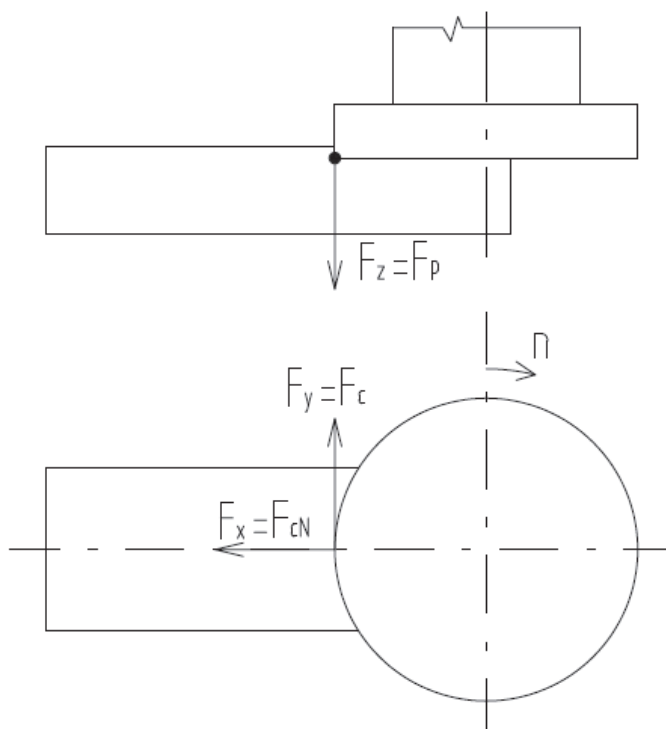
### 3.6 Vyhodnocení experimentu

#### 3.6.1 Vyhodnocení silového působení

Za pomoci dynamometru byly měřeny síly v osách x, y a z, tedy byly měřeny síly  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Po změření jednotlivých sil byly jejich průběhy zpracovány v programu Dynoware a převedeny do textových souborů. Další zpracování naměřených dat probíhalo pomocí programu Microsoft Excel. Byly vybrány maximální hodnoty silového zatížení nástroje (toho bylo dosaženo při maximálním průřezu třísky, tento jev nastával v ose frézované plochy), z takto vybraných dat byly zpracovány grafy průběhů řezné síly, kolmé řezné síly a pasivní síly. Jednotlivé síly jsou znázorněny na obrázku 3.8.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \sqrt{F_{cN}^2 + F_c^2 + F_p^2} \quad [\text{N}] \quad (3.1)$$

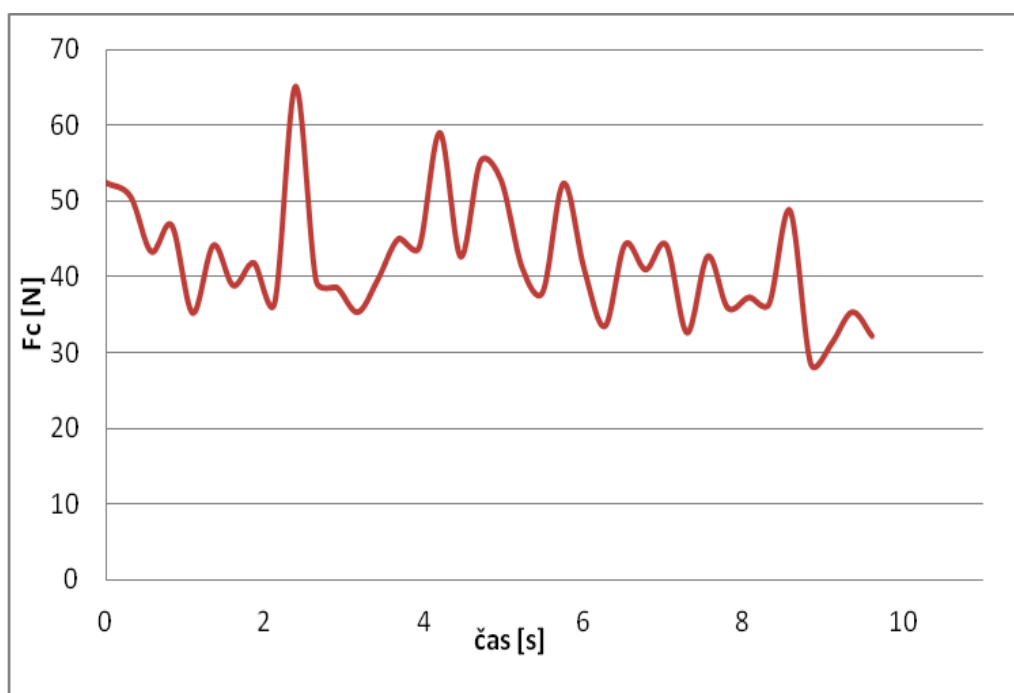
kde:	F	[N]	-	celková řezná síla,
	$F_x$	[N]	-	síla naměřená v ose x,
	$F_y$	[N]	-	síla naměřená v ose y,
	$F_z$	[N]	-	síla naměřená v ose z,
	$F_{cN}$	[N]	-	kolmá řezná síla,
	$F_c$	[N]	-	řezná síla,
	$F_p$	[N]	-	pasivní síla [11].



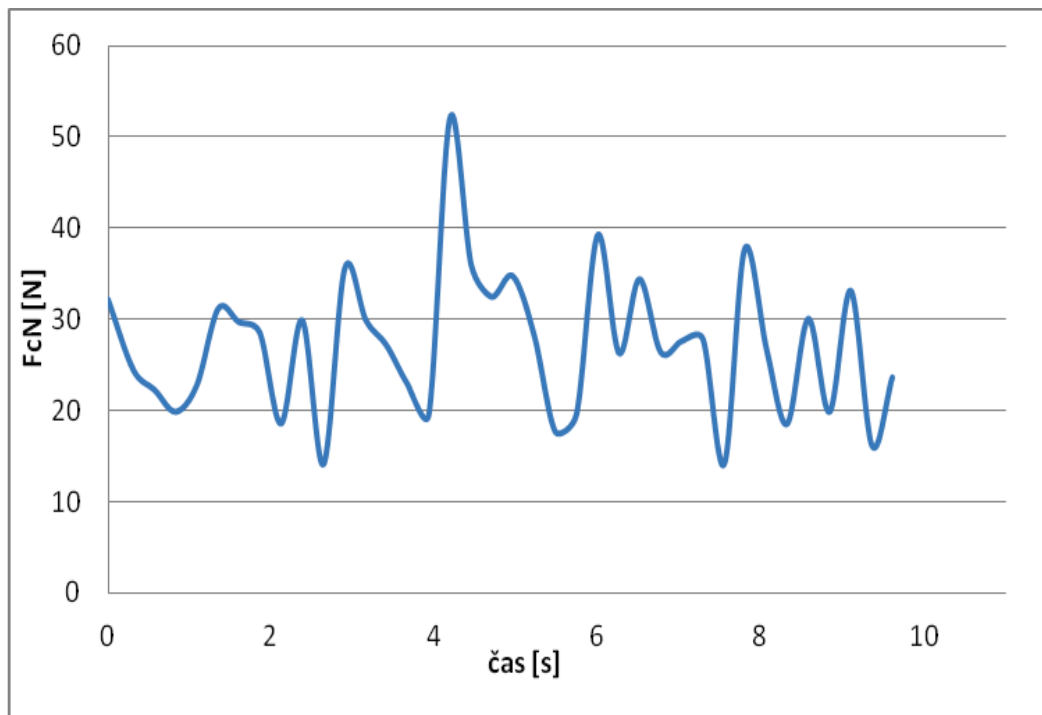
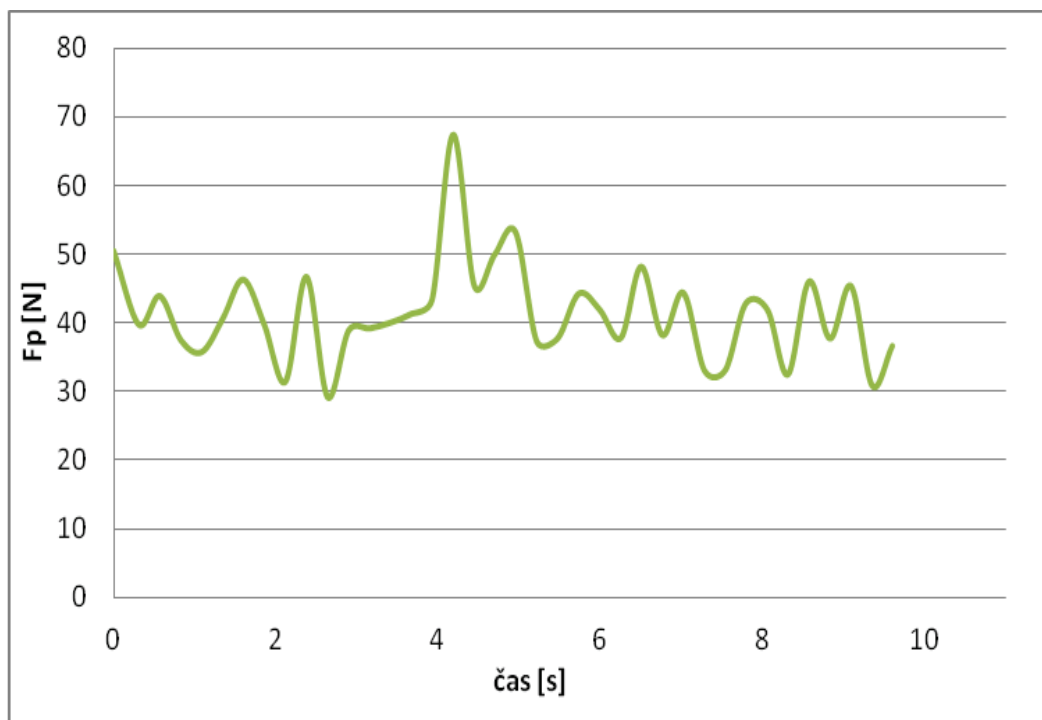
Obr. 3.9 Jednotlivé síly působící na vyměnitelnou břitovou destičku při maximálním průřezu třísky.

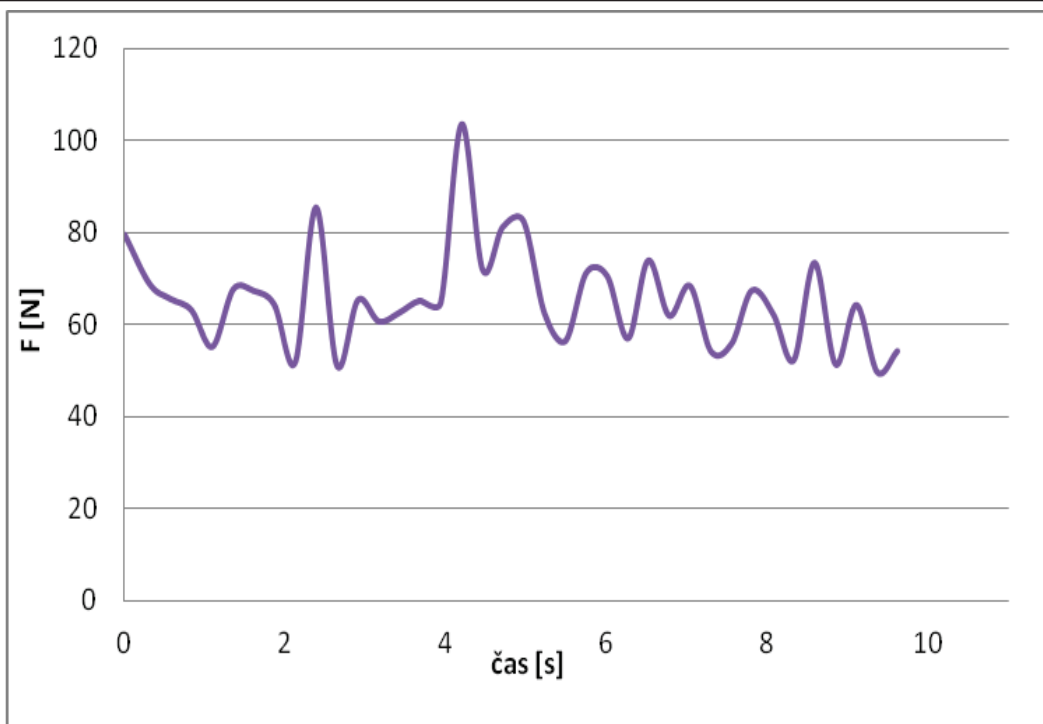
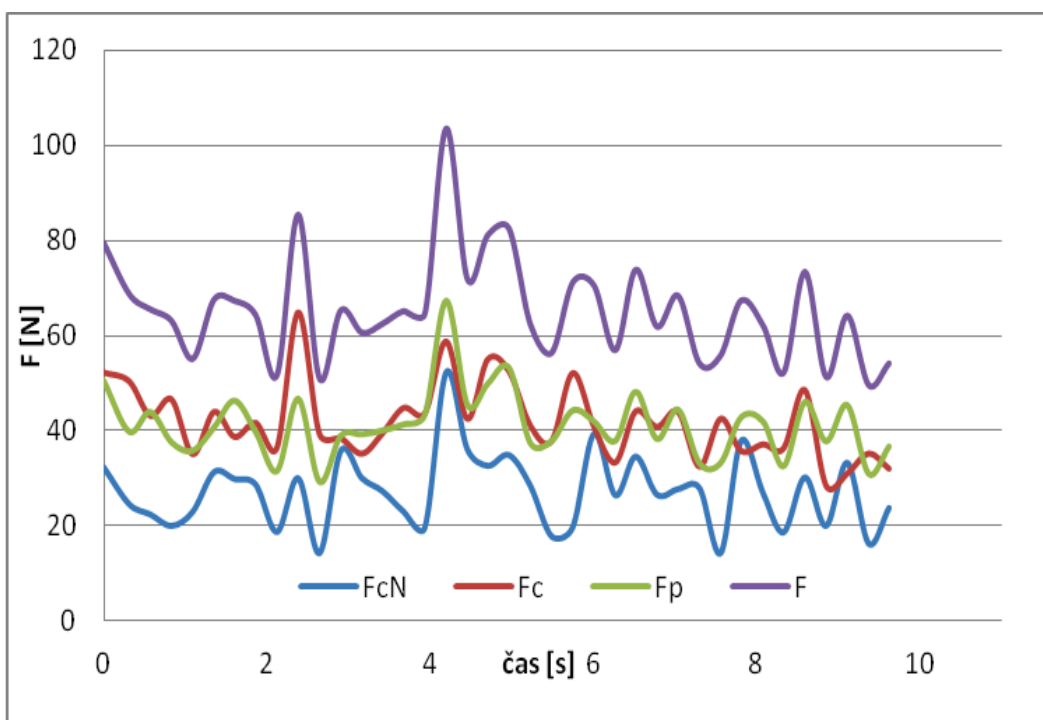
### Vliv posuvové rychlosti

Nejvyšší síly při konstantní řezné rychlosti 87,96 m/min bylo dosaženo při posuvové rychlosti 80 mm/min, tato hodnota byla i maximální posuvovou rychlostí jaké bylo při experimentálním měření použito. Celkově bylo využito právě 5 hodnot posuvové rychlosti v rozmezí 10 - 80 mm/min. Řezná a pasivní síla mají téměř stejné velikosti, a obě dosahují hodnot o cca třetinu vyšší než kolmá řezná síla. Ostatní výsledky silových zatížení jsou uvedeny v příloze 1.



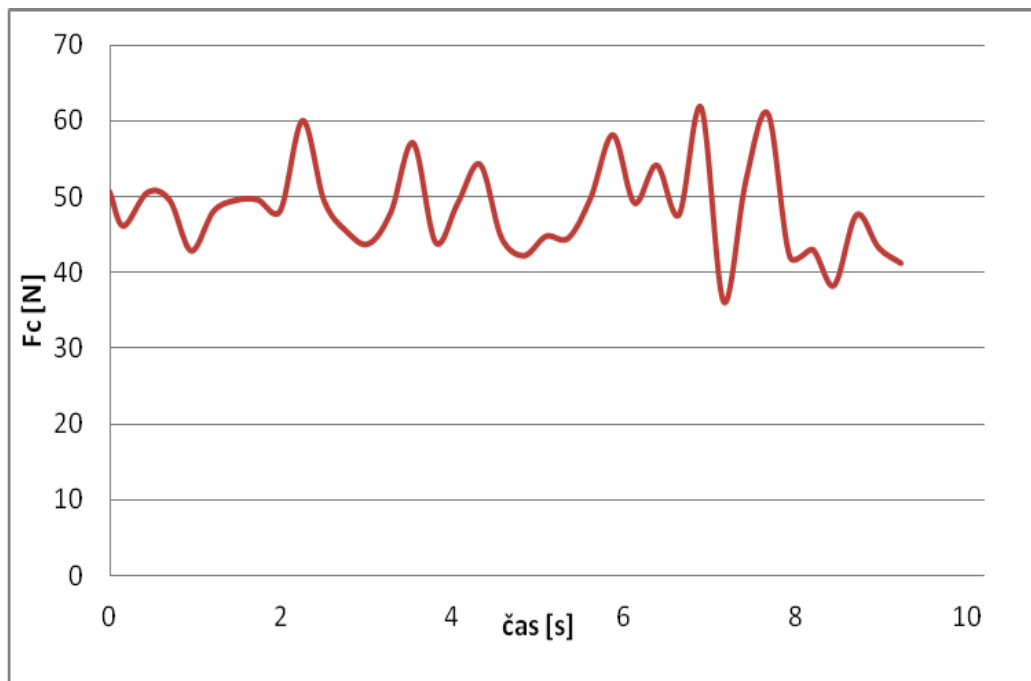
Obr. 3.10 Řezná síla při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 80$  mm/min.

Obr. 3.11 Kolmá řezná síla při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 80$  mm/min.Obr. 3.12 Pasivní síla při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 80$  mm/min.

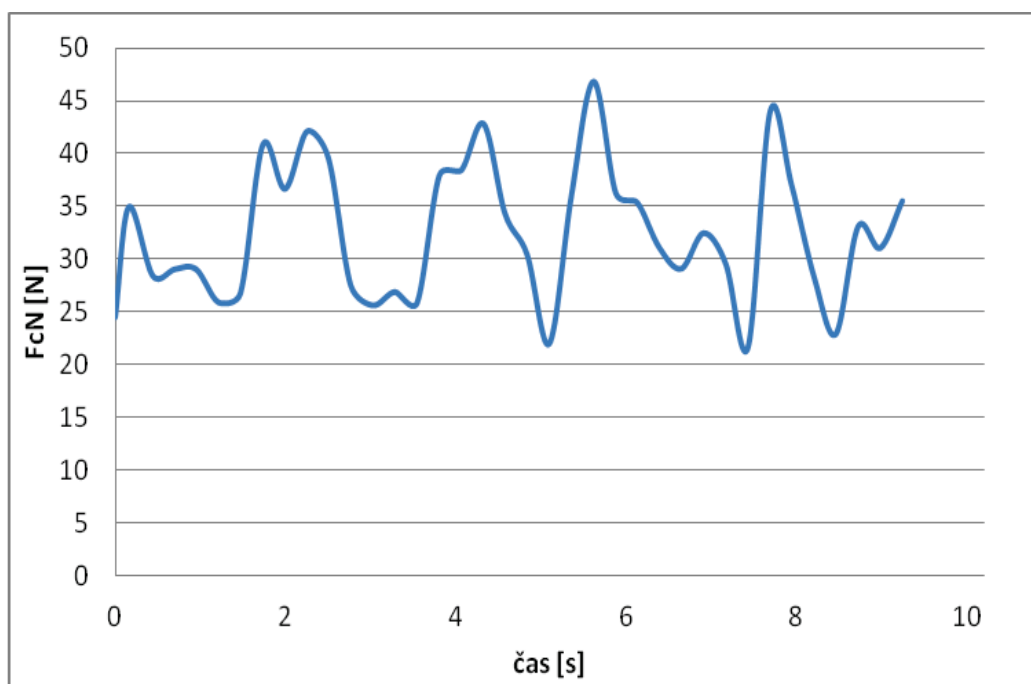
Obr. 3.13 Celková řezná síla při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 80$  mm/min.Obr. 3.14 Průběh všech sil při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 80$  mm/min.

### Vliv řezné rychlosti

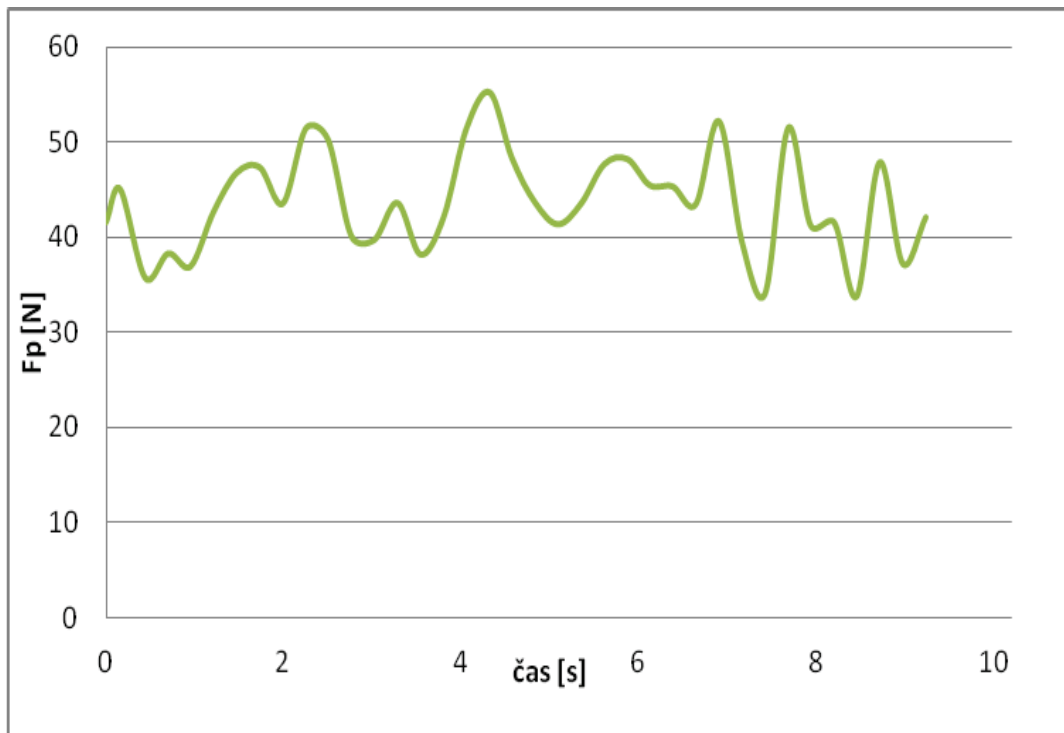
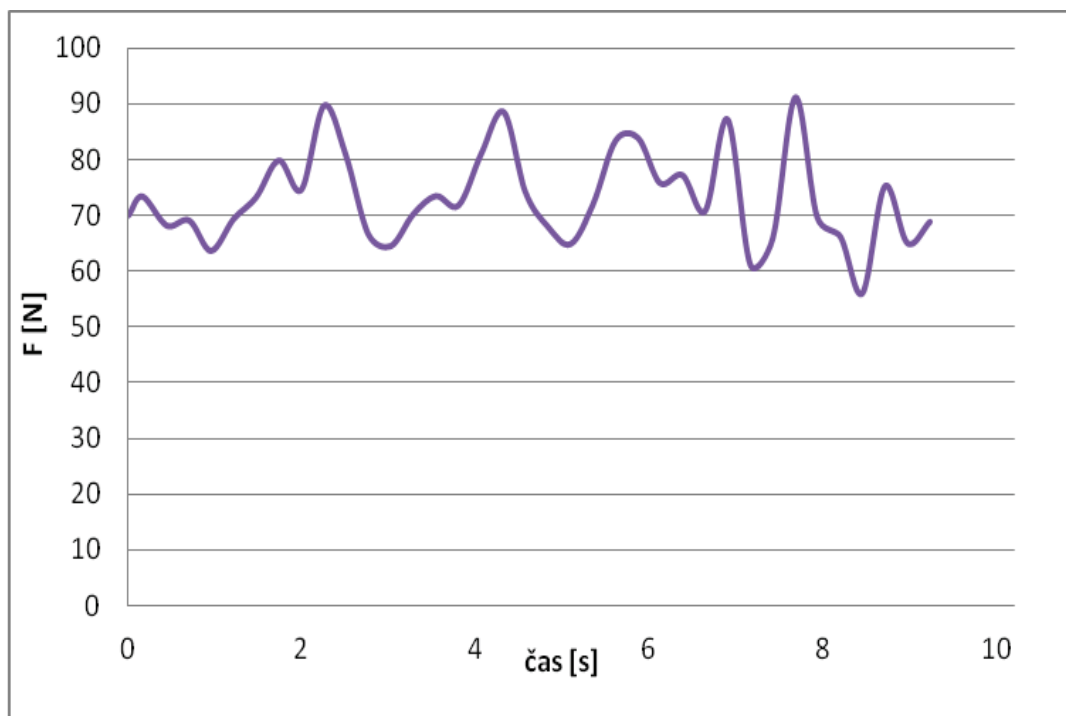
Při zkoumání vlivu řezné rychlosti bylo použito konstantní posuvové rychlosti 63 mm/min a řezná rychlost nabývala hodnot od 87,96 m/min do 219,91 mm/min. Maximální síly byly naměřeny při nejnižší řezné rychlosti 87,96 m/min. Pasivní a řezná síla opět dosahují přibližně stejných hodnot a kolmá řezná síla je přibližně o třetinu menší viz obrázky 3.15 až 3.19.

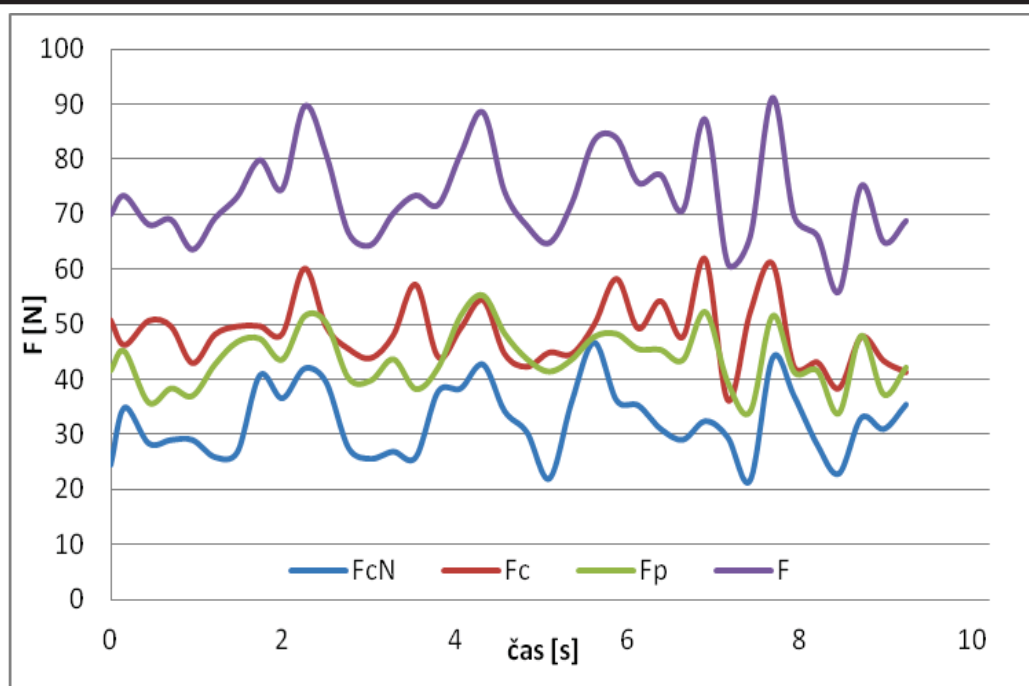


Obr. 3.15 Řezná síla při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 63$  mm/min.



Obr. 3.16 Kolmá řezná síla při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 63$  mm/min.

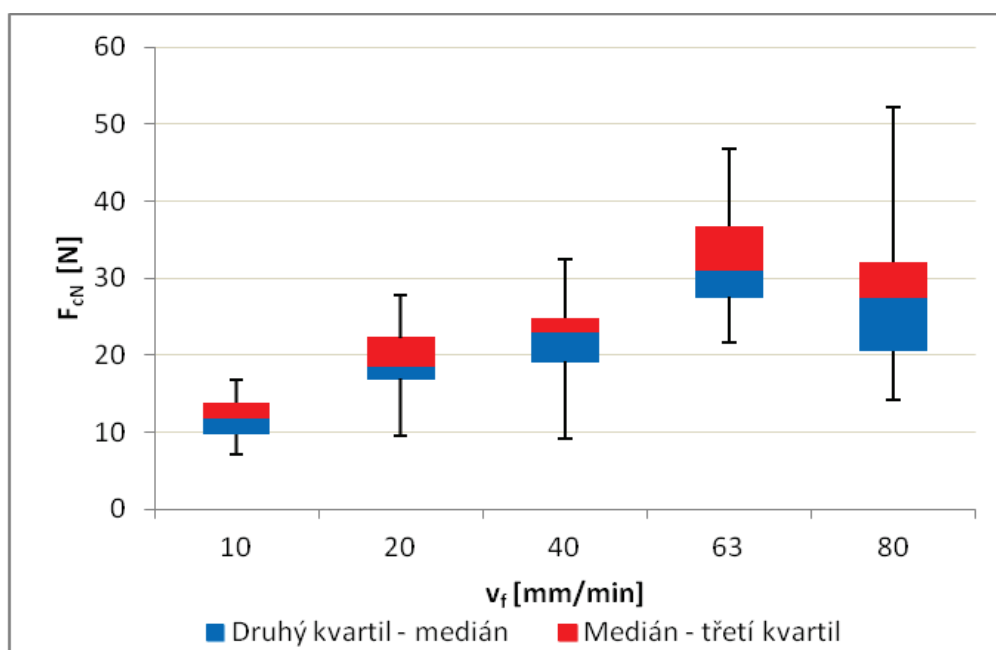
Obr. 3.17 Pasivní síla při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 63$  mm/min.Obr. 3.18 Celková řezná síla při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 63$  mm/min.

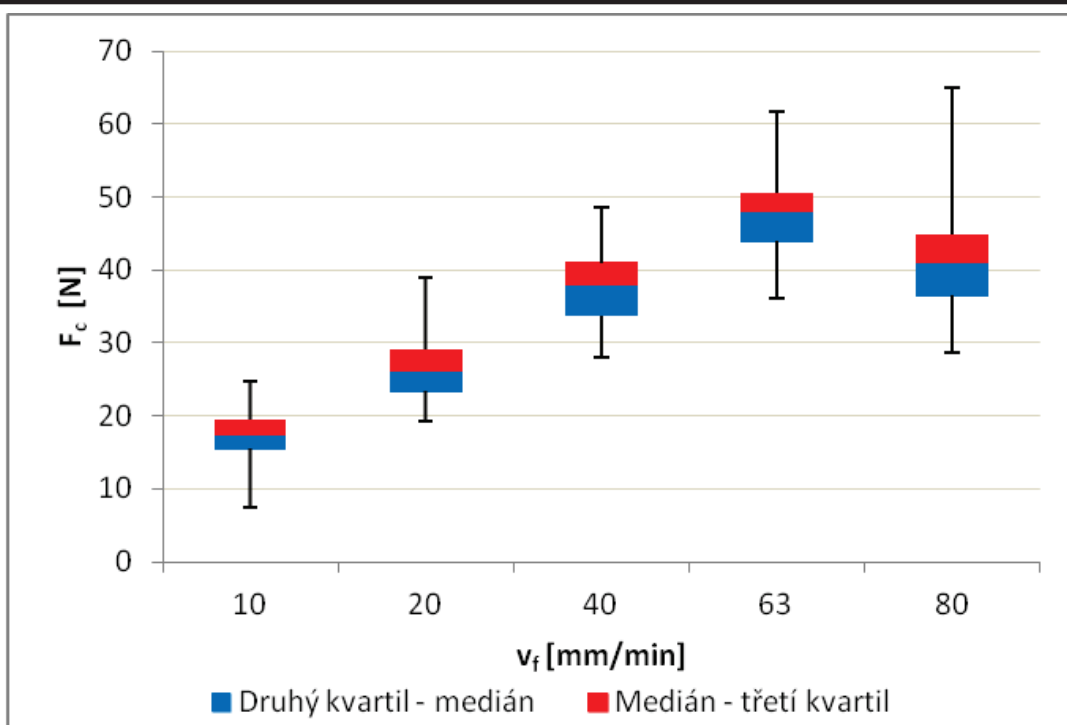
Obr. 3.19 Průběh všech sil při  $v_c = 87,96$  m/min a  $v_f = 63$  mm/min.

### 3.7 Další zpracování silových výsledků experimentu

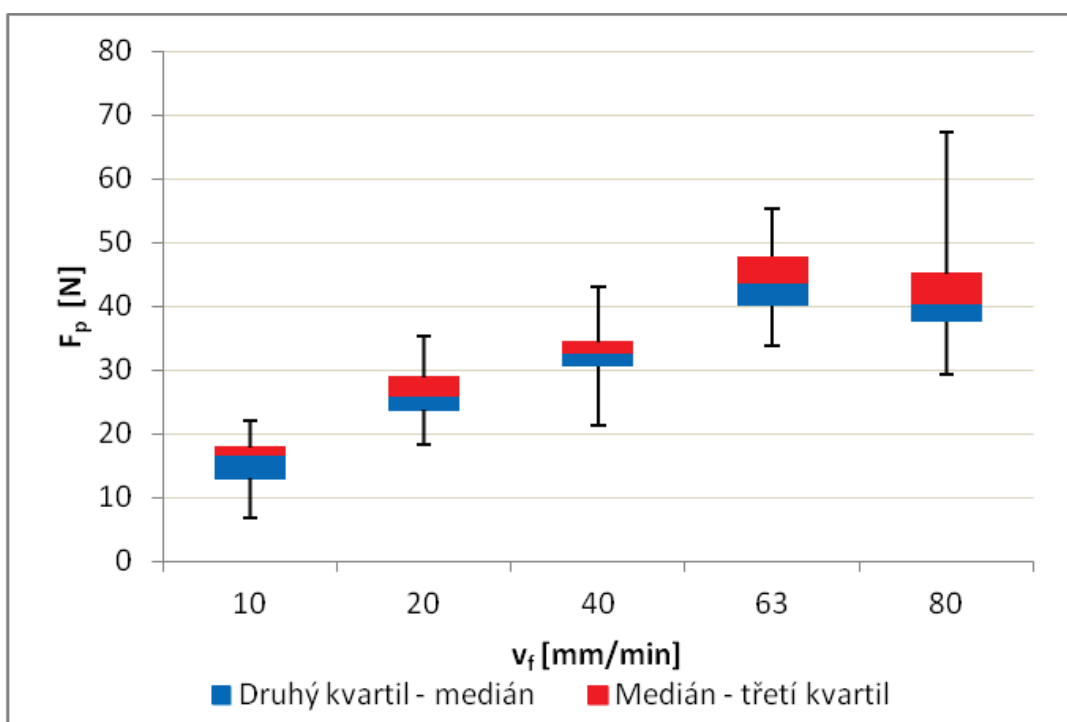
#### 3.7.1 Vliv rostoucí posuvové rychlosti

S rostoucí posuvovou rychlostí dochází i k postupnému nárůstu všech měřených sil. Nejvyšších hodnot dosahují všechny měřené síly při posuvové rychlosti  $v_f = 80$  mm/min, kdy maximální naměřená hodnota řezné síly se pohybuje okolo 65 N a maximální hodnota celkové řezné síly je přes 100 N. Naopak minimálních sil bylo dosaženo při  $v_f = 10$  mm/min a to hodnot  $F_c = 10$  N a  $F = 35$  N. Stejný trend můžeme pozorovat i u kolmé řezné síly a také u pasivní síly viz obrázky 3.20 – 3.23.

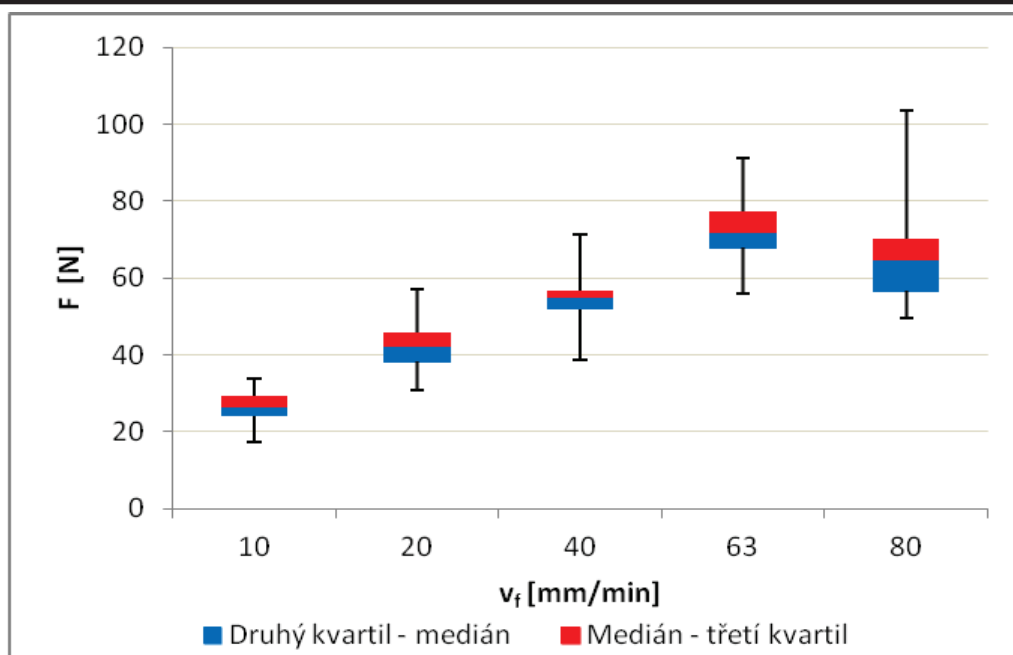
Obr. 3.20 Krabicové grafy pro průběhy kolmé řezné síly při konstantní řezné rychlosti  $v_c = 87,96$  m/min a proměnlivých posuvových rychlostech.



Obr. 3.21 Krabicové grafy pro průběh řezné síly při konstantní řezné rychlosti  $v_c = 87,96$  m/min a proměnlivých posuvových rychlostech.



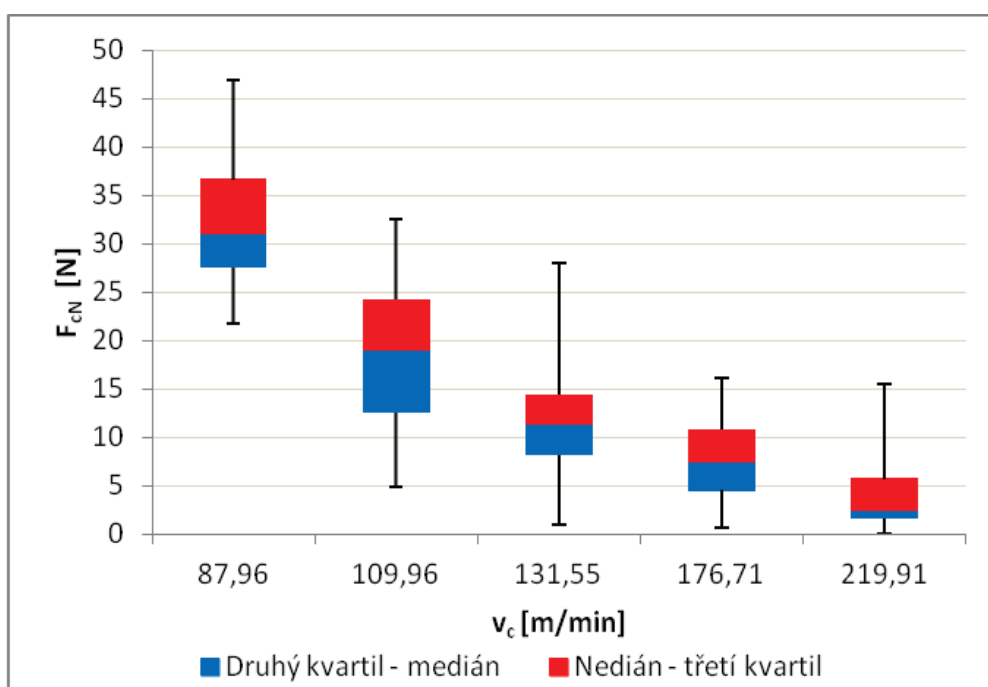
Obr. 3.22 Krabicové grafy pro průběhy pasivní síly při konstantní řezné rychlosti  $v_c = 87,96$  m/min a proměnlivých posuvových rychlostech.



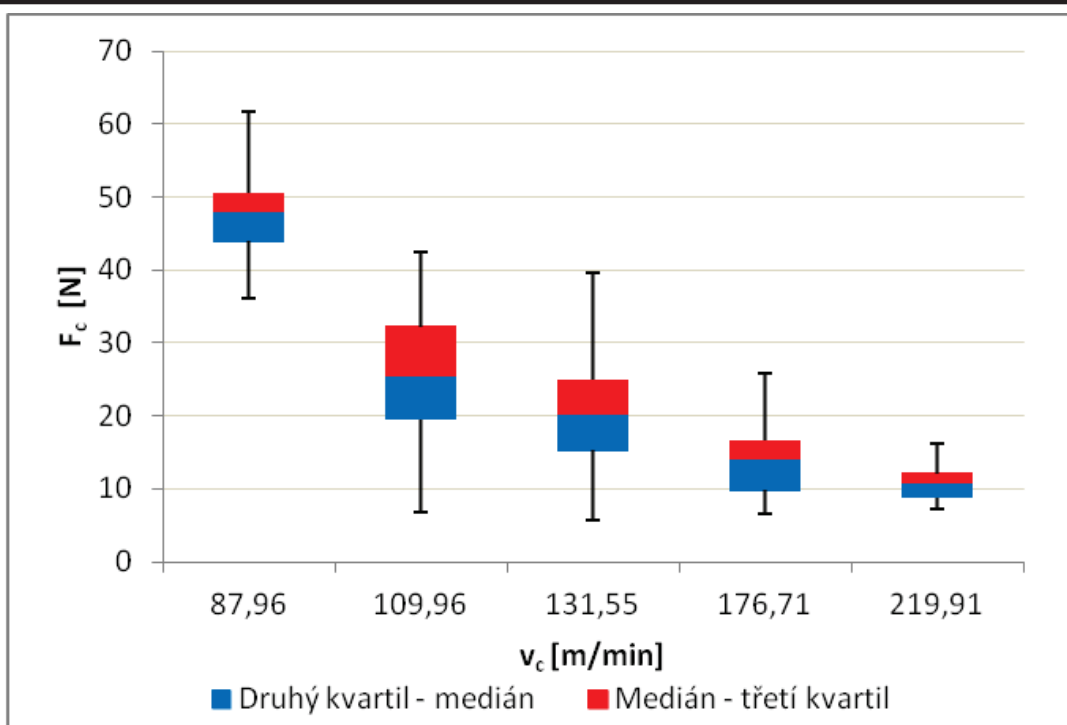
Obr. 3.23 Krabicové grafy pro průběhy výsledné řezné síly při konstantní řezné rychlosti  $v_c = 87,96$  m/min a proměnlivých posuvových rychlostech.

### 3.7.2 Vliv rostoucí řezné rychlosti

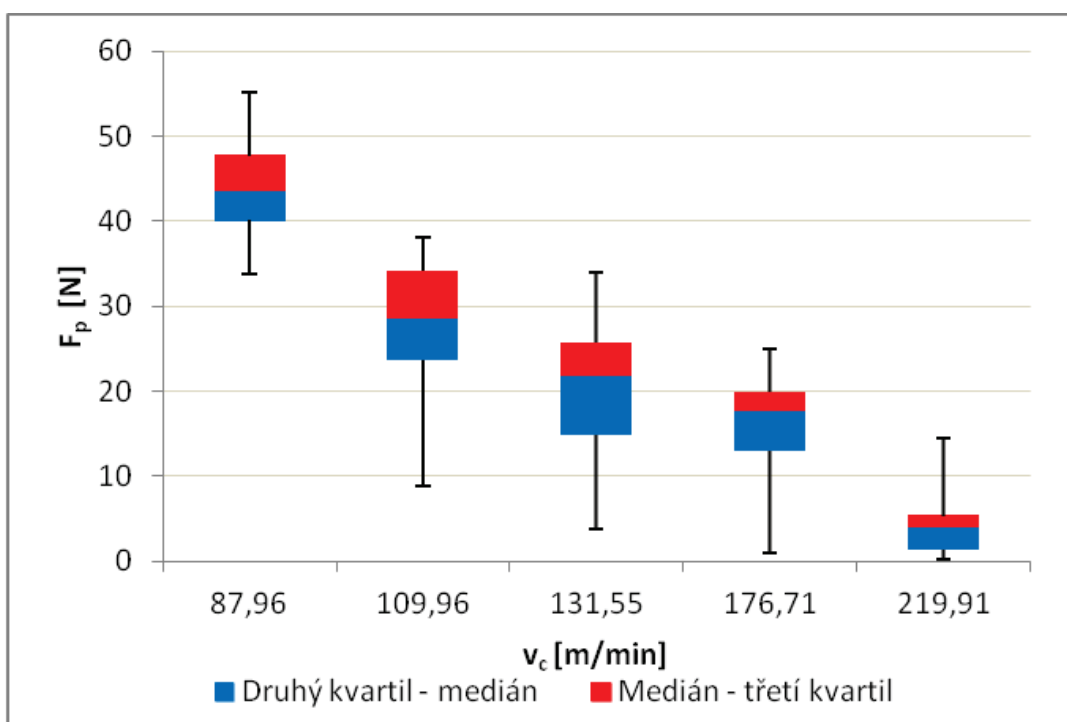
Z obrázků 3.24 – 3.27 vyplývá, že s rostoucí řeznou rychlostí dochází k celkovému poklesu silového zatížení nástroje. Maximální řezná síla  $F_c = 62$  N i celková řezná síla  $F = 91$  N je dosažena při minimální řezné rychlosti  $v_c = 87,96$  m/min. Naopak pokud je zvýšena řezná rychlost až na maximální hodnotu při experimentu  $v_c = 219,91$  m/min dochází k razantnímu poklesu řezné síly na  $F_c = 18$  N i celkové řezné síly na  $F = 24$  N. Obdobný vývoj nastává u všech měřených sil.



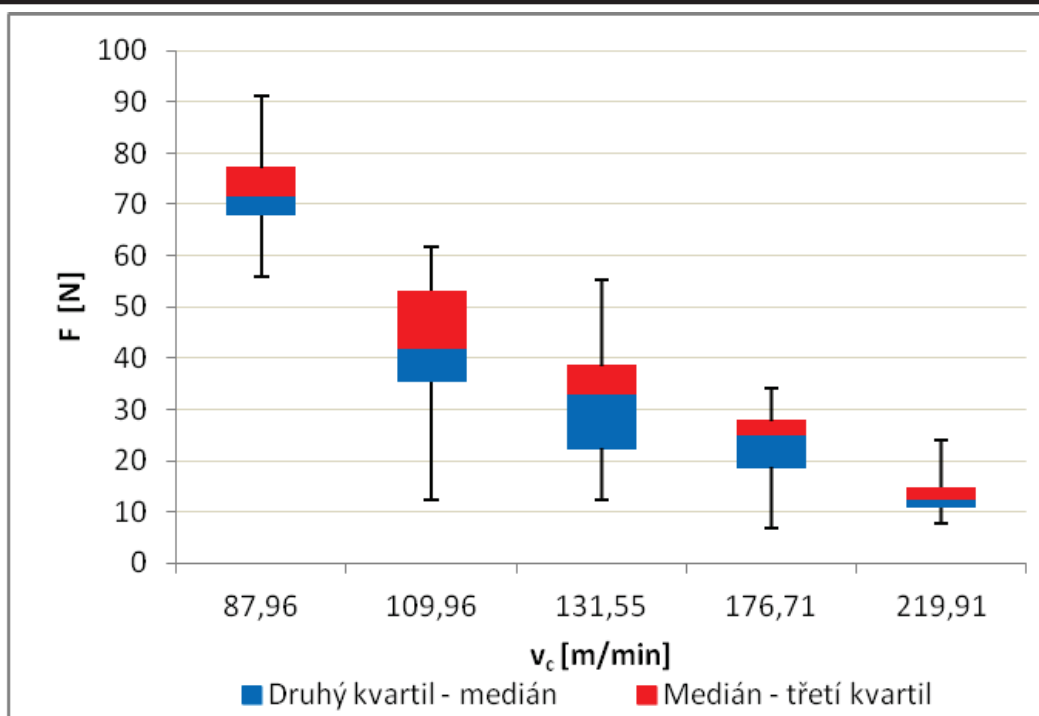
Obr. 3.24 Krabicové grafy pro průběhy kolmé řezné síly při konstantní posuvové rychlosti  $v_f = 63$  mm/min a proměnlivých řezných rychlostech.



Obr. 3.25 Krabicové grafy pro průběhy řezné síly při konstantní posuvové rychlosti  $v_f = 63$  mm/min a proměnlivých řezných rychlostech.



Obr. 3.26 Krabicové grafy pro průběhy pasivní síly při konstantní posuvové rychlosti  $v_f = 63$  mm/min a proměnlivých řezných rychlostech.



Obr. 3.27 Krabicové grafy pro průběhy výsledné řezné síly při konstantní posuvové rychlosti  $v_f = 63$  mm/min a proměnlivých řezných rychlostech.

### 3.8 Drsnost povrchu obrobeného povrchu vzorku

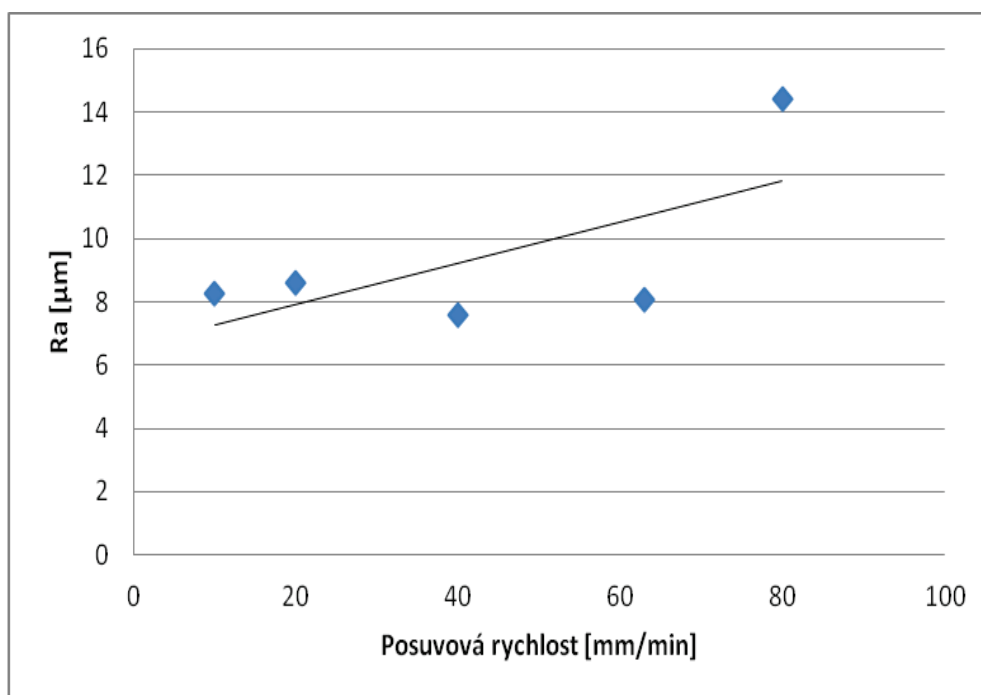
Drsnost povrchu byla měřena na stejné snímané délce, která byla 5,5734 mm pro všechna měření. Vyhodnocovaná délka byla o cca 0,5 mm kratší. Měření struktury povrchu probíhalo na středu obrobené plochy. Frézovaný povrch nebyl souvislý a nebylo možné nalézt stopy po nástroji. Toto je způsobeno samotnou strukturou keramického materiálu, ve kterém se vyskytují póry. Dalším důvodem je, že docházelo k lomu jednotlivých zrn keramického materiálu a také docházelo k šíření trhlin po hranicích zrn a tím k jejich vylamování. Z těchto důvodů je vysoce pravděpodobné, že by při měření v jiném místě mělo za následek značně odlišné výsledky parametrů drsnosti povrchu.

Tab. 3.4 Parametry Ra a Rz .

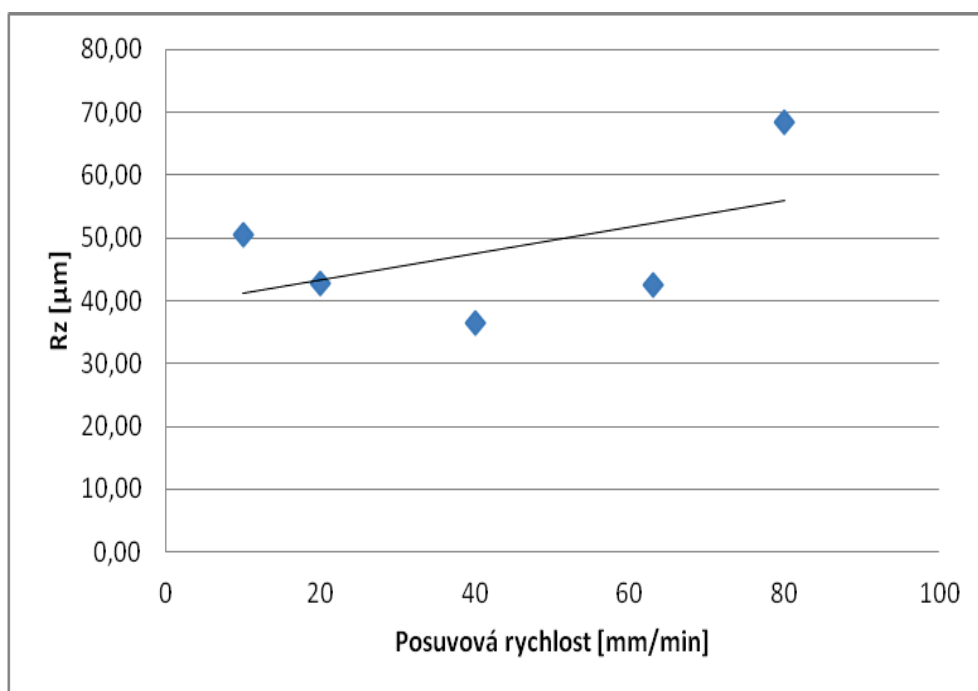
v <sub>c</sub>	v <sub>f</sub>	Ra	Rz
[m/min]	[mm/min]	[μm]	[μm]
87,96	10	8,26	50,50
87,96	20	8,59	42,70
87,96	40	7,57	36,36
87,96	63	8,04	42,51
87,96	80	14,42	68,31
109,96	63	7,28	39,30
131,55	63	8,96	51,14
176,71	63	9,02	49,42
219,91	63	12,22	58,67

### 3.8.1 Vliv posuvové rychlosti na drsnost povrchu

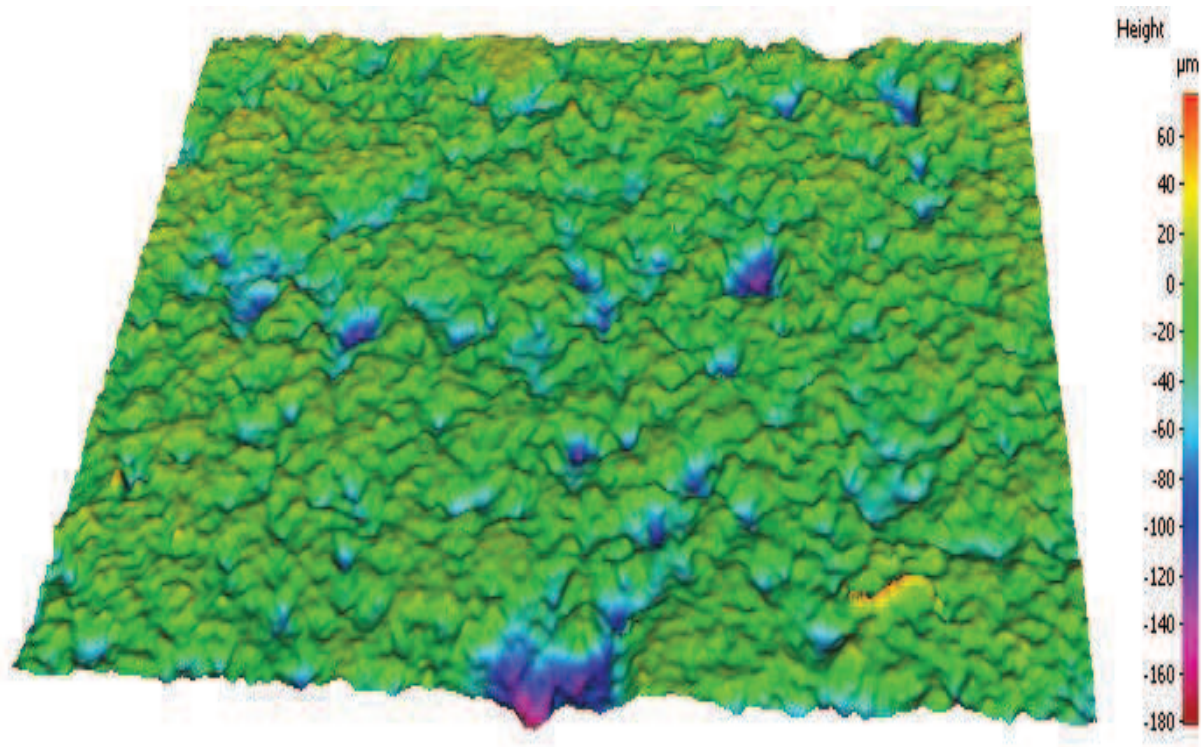
Dle obrázku 3.28 se drsnost povrchu pro posuvové rychlosti od 10 mm/min do 63 mm/min pohybovaly blízce okolo Ra 8 až maximální posuvová rychlost ve výši 80 mm/min znamenala navýšení na Ra 14. Obdobně je zřetelný nárůst i u parametru Rz, který je zobrazen na obrázku 3.29. Další obrázky 3.30 až 3.32 zobrazují vybrané části měrových protokolů pro  $v_f = 80$  mm/min a  $v_c = 87,96$  m/min. Na obrázku 3.33 je zobrazena Abbottova křivka, která zobrazuje materiálový podíl v závislosti na hloubce profilu, tato křivka byla vytvořena automaticky po změření v programu InfiniteFocus od firmy Alicona.



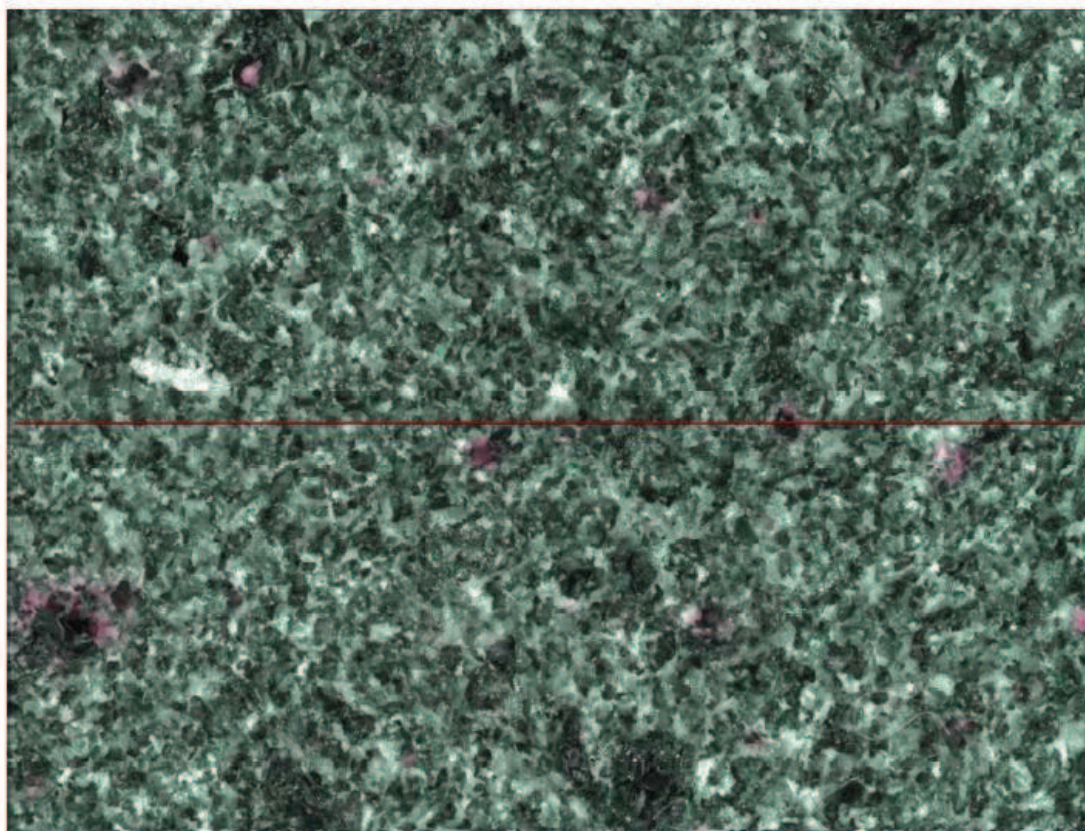
Obr. 3.28 Vliv posuvové rychlosti na parametr drsnosti Ra.



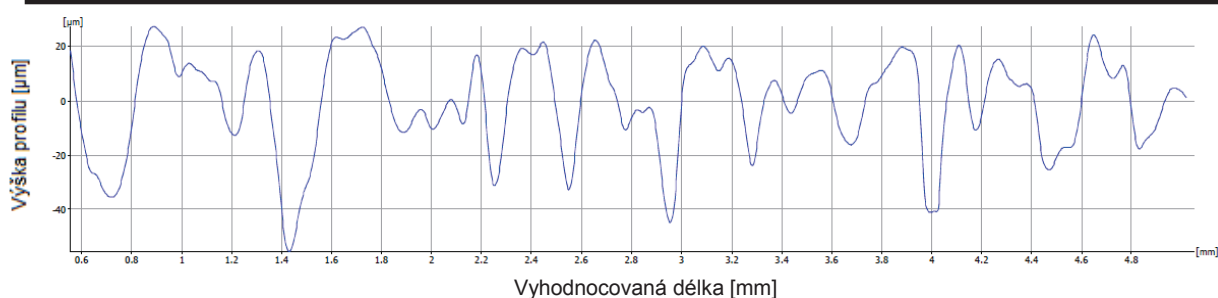
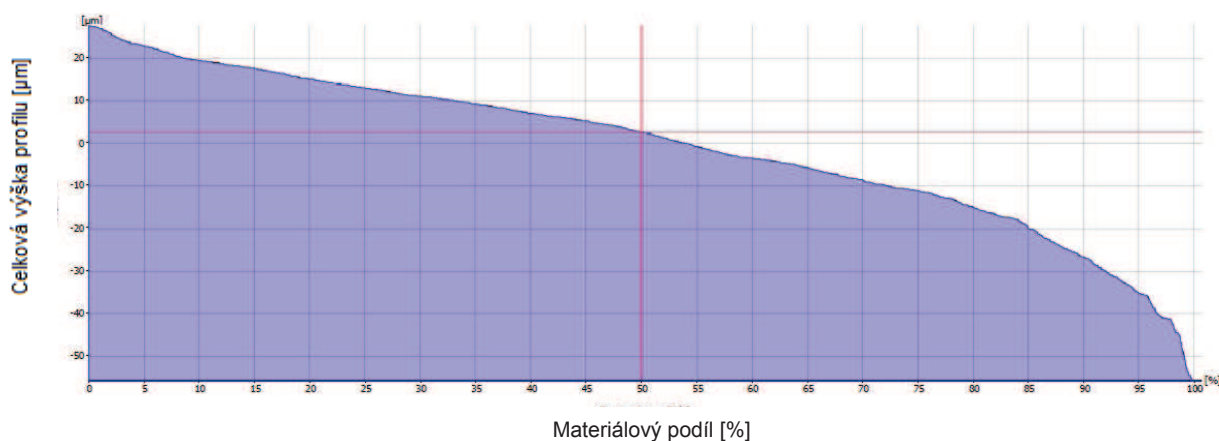
Obr. 3.29 Vliv posuvové rychlosti na parametr drsnosti Rz.



Obr. 3.30 Struktura povrchu při  $v_f = 80 \text{ mm/min}$  a  $v_c = 87,96 \text{ m/min}$ .

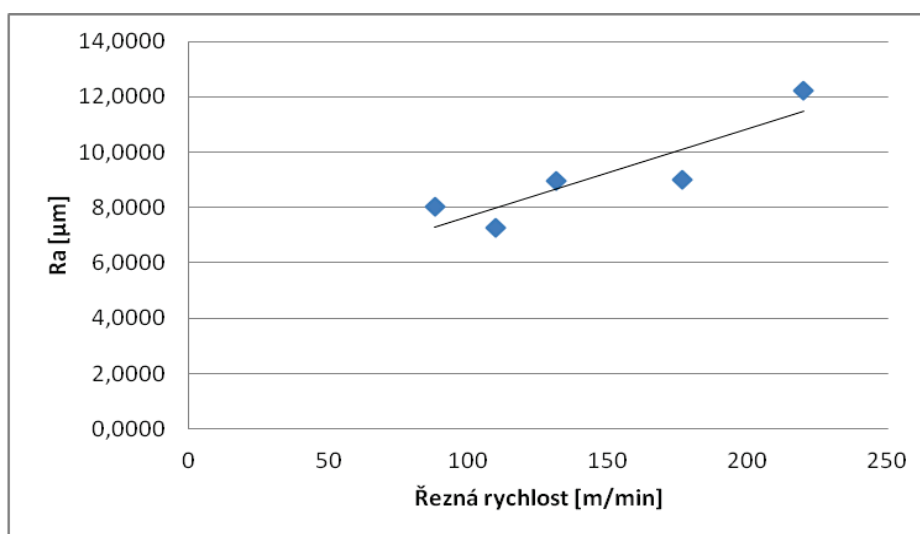


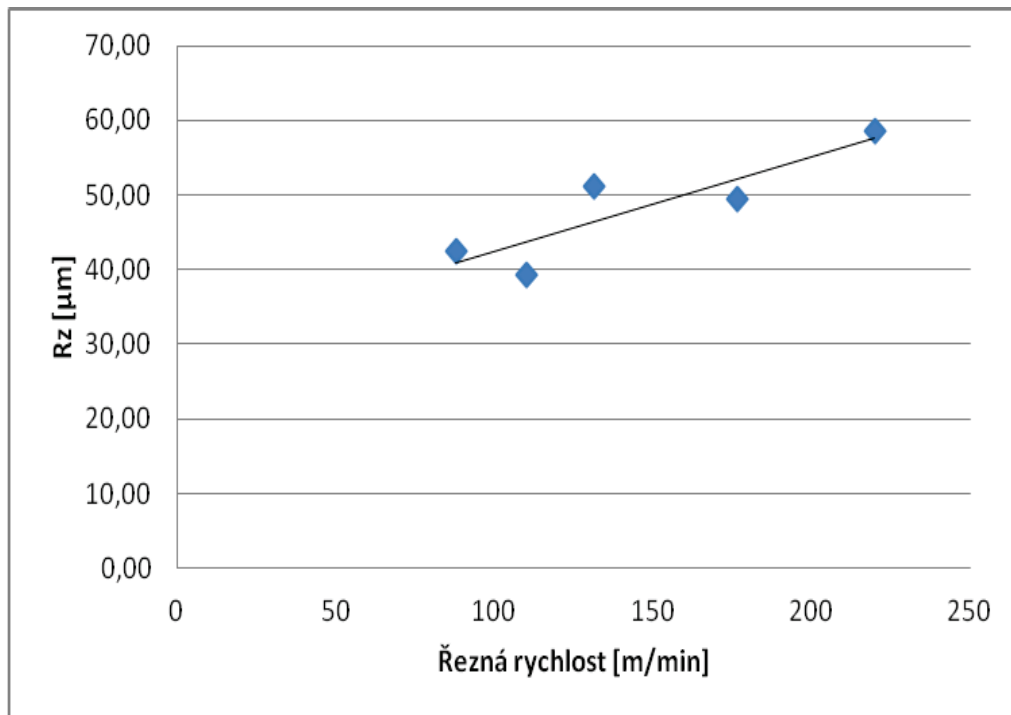
Obr. 3.31 Snímaný povrch při  $v_f = 80 \text{ mm/min}$  a  $v_c = 87,96 \text{ m/min}$ .


 Obr. 3.32 Měřená délka při  $v_f = 80$  mm/min a  $v_c = 87,96$  m/min.

 Obr. 3.33 Materiálový podíl při  $v_f = 80$  mm/min a  $v_c = 87,96$  m/min.

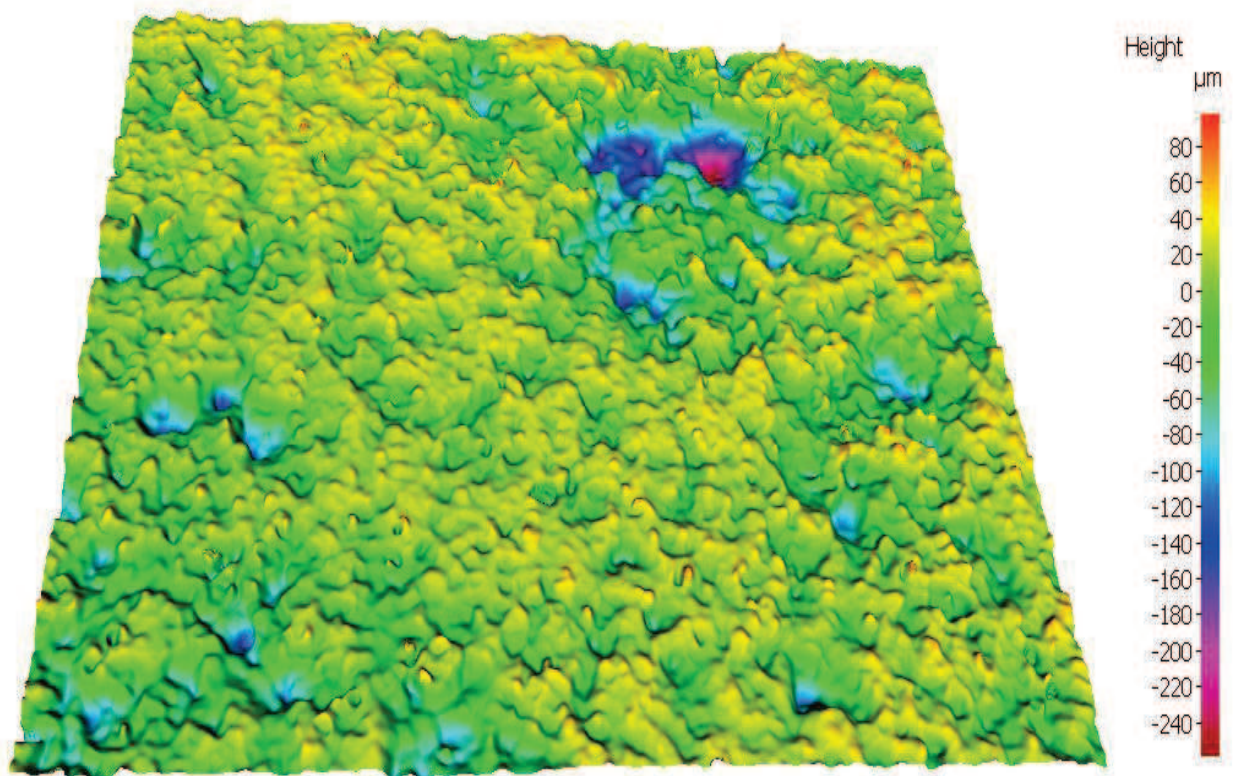
### 3.8.2 Vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu

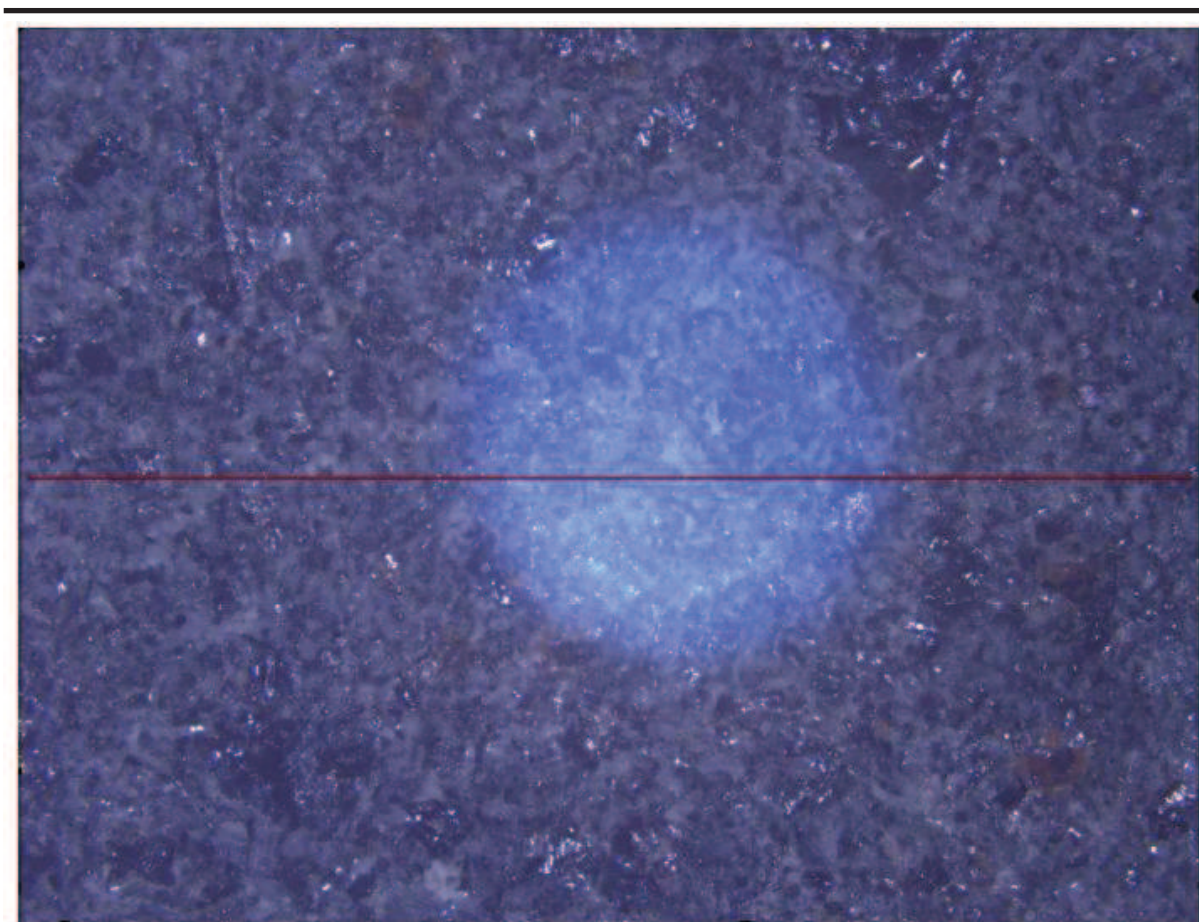
Pro zkoumání vlivu řezné rychlosti na kvalitu obráběného povrchu bylo opět použito 5 různých řezných rychlostí v intervalu  $v_c = 87,96$  až  $219,91$  m/min. Z naměřených hodnot byl sestaven graf závislosti na řezné rychlosti a daném parametru struktury povrchu. S rostoucí řeznou rychlostí je možné na obrázcích 3.34 a 3.35 pozorovat nárůst obou parametrů struktury povrchu  $R_a$  a  $R_z$ . Nejvyšších hodnot je dosaženo při maximální řezné rychlosti  $v_c = 219,91$  m/min. Na obrázcích 3.36 až 3.39 jsou zobrazeny obrázky z měrových protokolů pro  $v_f = 63$  mm/min a  $v_c = 219,91$  m/min, kdy byly vyhodnoceny maximální parametry struktury povrchu  $R_a$  a  $R_z$ .


 Obr. 3.34 Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti  $R_a$ .

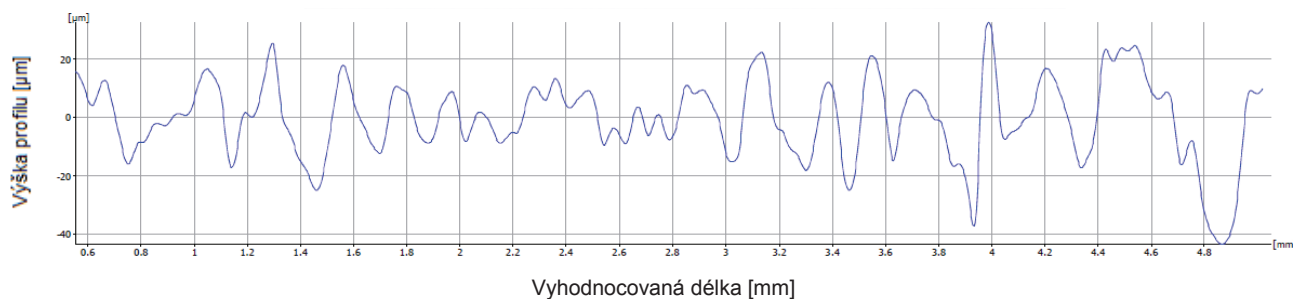


Obr. 3.35 Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Rz.

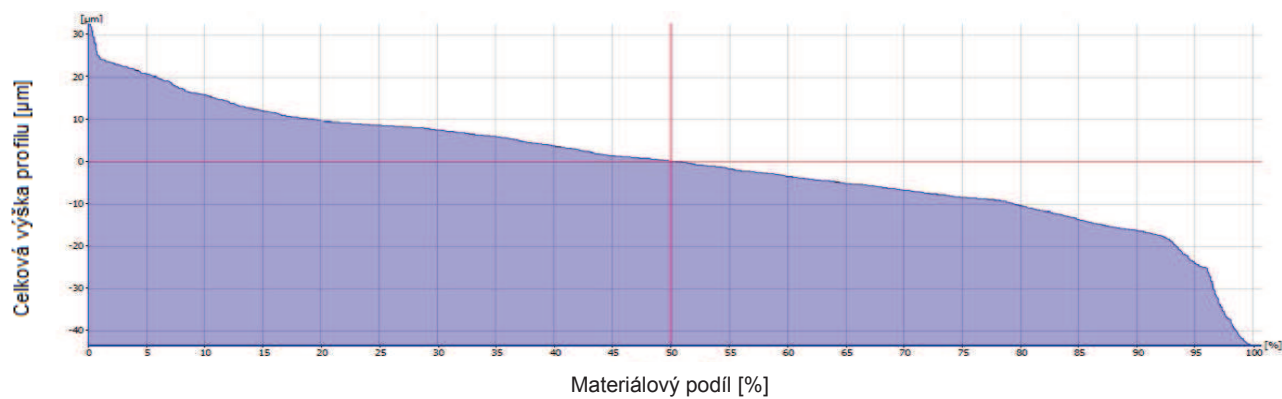
Obr. 3.36 Struktura povrchu při  $v_f = 63$  mm/min a  $v_c = 219,91$  m/min.



Obr. 3.37 Snímaný povrch při  $v_f = 63$  mm/min a  $v_c = 219,91$  m/min.



Obr. 3.38 Měřená délka při  $v_f = 63$  mm/min a  $v_c = 219,91$  m/min.

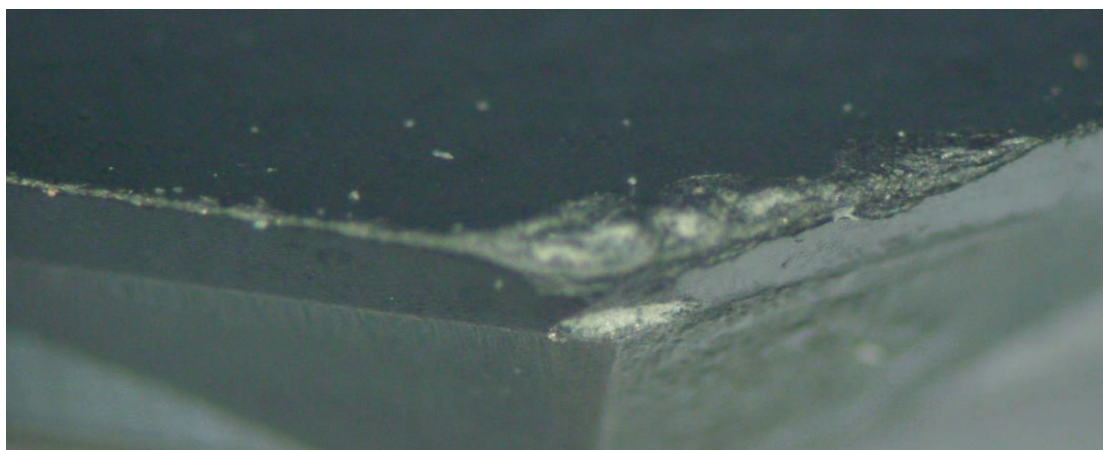


Obr. 3.39 Materiálový podíl při  $v_f = 63$  mm/min a  $v_c = 219,91$  m/min.

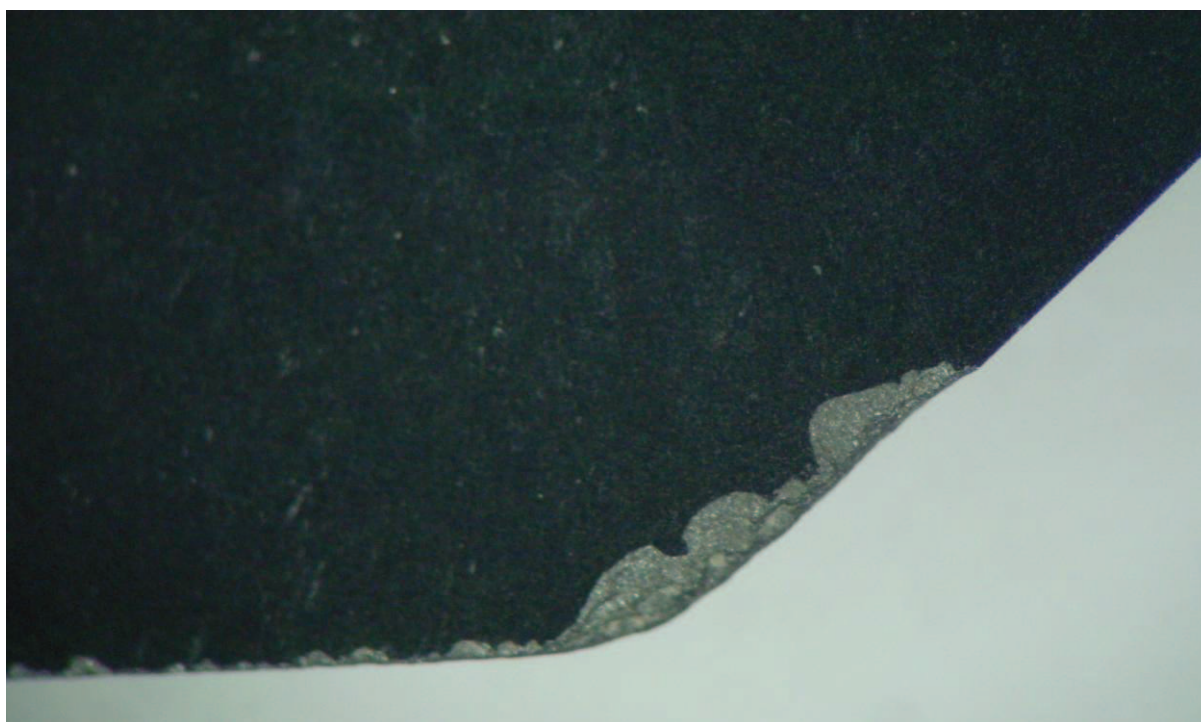
### 3.9 Tříska a opotřebení břitové destičky

Opotřebení vyměnitelné břitové destičky z polykrystalického diamantu bylo změřeno po dokončení experimentální části. Hodnota opotřebení VB na hřbetě činila 0,32 mm a v oblasti špičky 0,5 mm. Fotografie vyměnitelné břitové destičky jsou na obrázcích 3.40 a 3.41.

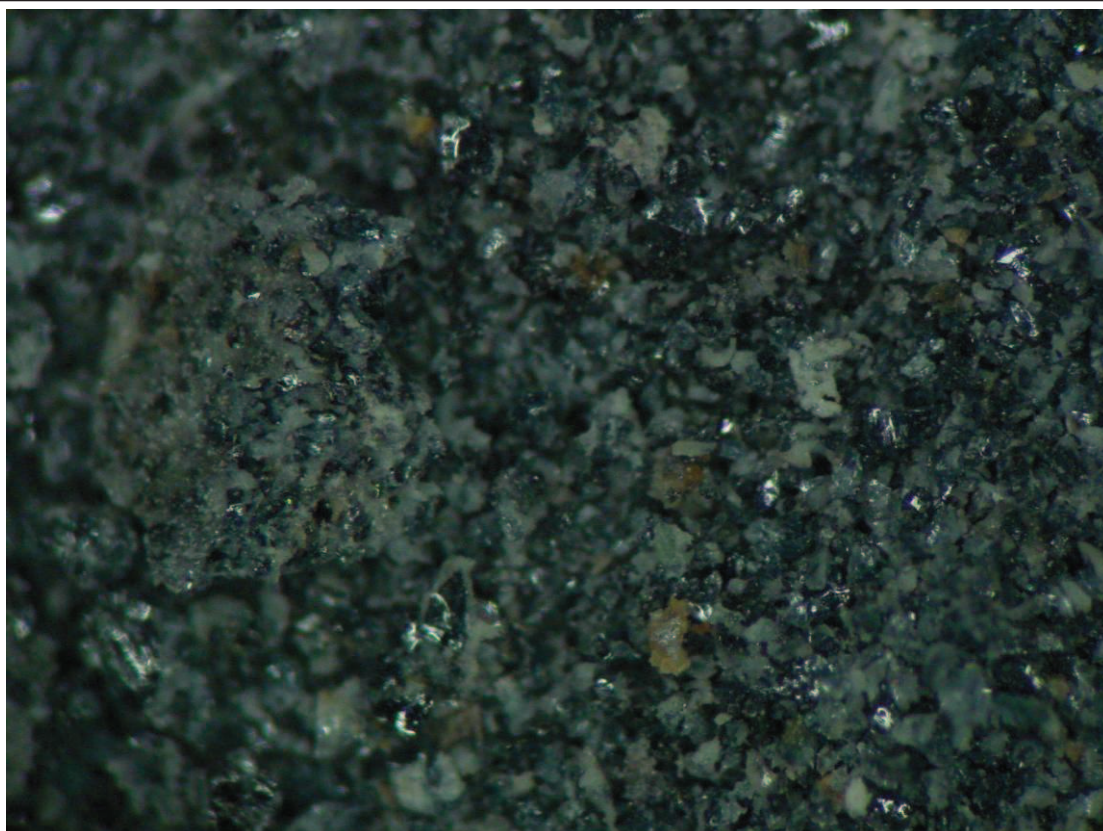
Třísky vznikající při obrábění keramického materiálu R-S67K měly formu černého prachu. Při zvětšení na mikroskopu je vidět jednotlivá zrna i větší množství stále spojených zrn. Vzhledem k tomu je tvar i velikost třísek různý viz obr. 3.42.



Obr. 3.40 Opotřebení na čele a špičce nástroje.



Obr. 3.41 Opotřebení na hřbetě nástroje.



Obr. 3.42 Třísky vzniklé při maximálním silové zatížení pro řezné podmínky  $v_f = 80$  mm/min a  $v_c = 87,96$  m/min.

### 3.10 Řezný výkon a měrný řezný odpor

#### 3.10.1 Řezný výkon

Řezný výkon byl vypočten dle vztahu 3.2, kdy byla pro výpočet maximální řezná síla, protože byly rozdílné jednotlivé řezné síly, tak jsou odlišné i jednotlivé vypočítané hodnoty řezných výkonů pro jednotlivé řezné podmínky viz tabulka 3.5.

Tab. 3.5 Hodnoty řezného výkonu.

$v_c$	$v_f$	$F_c$	$P_c$
[m/min]	[mm/min]	[N]	[W]
87,96	10	24,70	36,21
87,96	20	35,05	51,39
87,96	40	48,69	71,38
87,96	63	61,74	90,51
87,96	80	65,03	95,34
109,96	63	42,43	77,76
131,55	63	39,56	86,73
176,71	63	25,83	76,07
219,91	63	16,14	59,16

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [\text{W}] \quad (3.2)$$

kde:  $P_c$  [W] - řezný výkon,  
 $F_c$  [mm] - maximální řezná síla [11].

### 3.10.2 Měrný řezný odpor

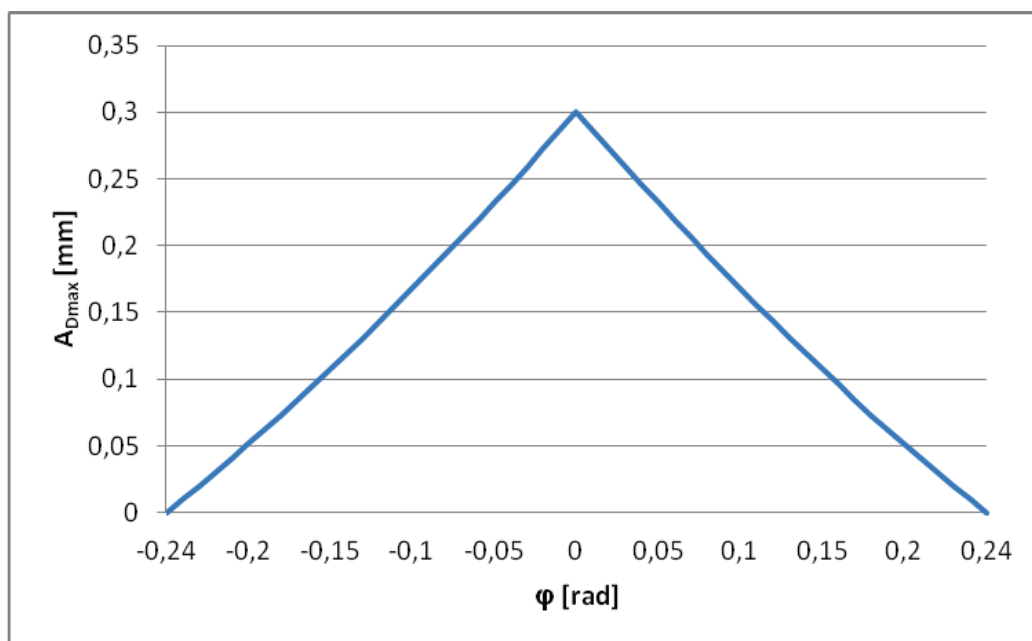
Měrný řezný odpor byl vypočten za pomoci vztahů 3.3 až 3.5. Maximální řezná síla byla určena z grafů. Maximální průřez třísky byl vypočten z posuvu na zub a šířce záběru ostří. Tloušťka třísky byla vypočtena z posuvu na zub a úhlu nastavení hlavního ostří. Posuv na zub byl vypočten ze vztahu 3.6.

#### Maximální průřez třísky:

$$A_{D_{\max}} = h_{D_{\max}} \cdot b_d = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_{\max} = f_z \cdot a_p \quad [\text{mm}^2] \quad (3.3)$$

kde:  $A_{D_{\max}}$  [mm<sup>2</sup>] - maximální průřez třísky,  
 $h_{D_{\max}}$  [mm] - maximální tloušťka třísky,  
 $b_d$  [mm] - jmenovitá šířka třísky,  
 $\varphi_{\max}$  [°] - úhel posuvového pohybu při maximální tloušťce třísky,  
 $f_z$  [mm] - posuv na zub,  
 $a_p$  [mm] - šířka záběru ostří [17].

Průřez třísky neměl konstantní hodnotu, ale od nuly narůstal až do podélné osy frézované plochy, kdy byl maximální a poté znovu klesal až k nule. Silová zatížení byla vybírána v okamžiku, kdy bylo dosaženo maximálního průřezu.



Obr. 3.43 Průřez třísky v závislosti na natočení nástroje při maximálním silové zatížení pro řezné podmínky  $v_f$  80 mm/min a  $v_c = 87,96$  m/min.

**Měrný řezný odpor:**

$$k_c = \frac{F_c}{A_{D_{\max}}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.4)$$

kde:  $k_c$   $[\text{N/mm}^2]$  - měrný řezný odpor materiálu [11].

**Maximální tloušťka třísky:**

$$h_{D_{\max}} = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_{\max} = f_z \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (3.5)$$

kde:  $\kappa_r$   $[\text{°}]$  - úhel nastavení hlavního ostří [11].

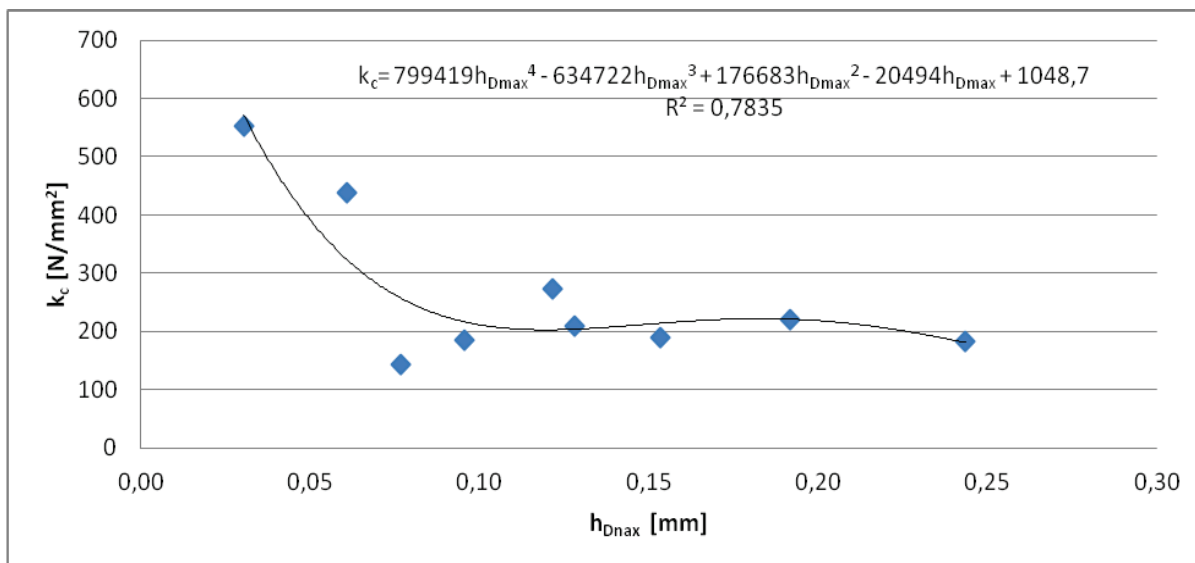
**Posuv na zub:**

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} \quad [\text{mm/zub}] \quad (3.6)$$

kde:  $v_f$   $[\text{mm/min}]$  - posuvová rychlost,  
 $n$   $[\text{min}^{-1}]$  - otáčky,  
 $z$   $[-]$  - počet zubů na fréze [32].

Tab. 3.4 Vypočtené hodnoty pro všechny řezné podmínky.

$a_p$	$n$	$v_c$	$v_f$	$F_c$	$f_z$	$A_{D_{\max}}$	$h_{D_{\max}}$	$k_c$
[mm]	$[\text{min}^{-1}]$	[m/min]	[mm/min]	[N]	[mm/zub]	$[\text{mm}^2]$	[mm]	$[\text{N/mm}^2]$
1	224	87,96	10	24,70	0,04	0,04	0,03	553,21
1	224	87,96	20	35,05	0,09	0,09	0,06	437,37
1	224	87,96	40	48,69	0,18	0,18	0,12	272,66
1	224	87,96	63	61,74	0,28	0,28	0,19	219,51
1	224	87,96	80	65,03	0,36	0,36	0,24	182,08
1	280	109,96	63	42,43	0,23	0,23	0,15	188,57
1	335	131,55	63	39,56	0,19	0,19	0,13	210,34
1	450	176,71	63	25,83	0,14	0,14	0,10	184,48
1	560	219,91	63	16,14	0,11	0,11	0,08	143,47



Obr. 3.44 Závislost měrného řezného odporu na tloušťce třísky.

---

## 4 DISKUSE

Ze silových působení, která byla naměřena za pomoci dynamometru, je možné pozorovat trend, že s rostoucí rychlostí posuvu dochází k rychlému nárůstu řezné síly. V kapitole 2.4 je tento fakt zmíněn a dle experimentálních výsledků je možné toto tvrzení jednoznačně potvrdit. Naopak zvyšováním řezné rychlosti dochází k poklesu řezné síly.

Dále po měření povrchu, byly vyhodnoceny protokoly a dle jejich výsledků, je možné říci, že s rostoucí řeznou rychlostí dochází ke snížení kvality povrchu, což potvrzují oba vyhodnocované parametry  $R_a$  i  $R_z$  (obrázky 3.34 a 3.35). Tento trend není možné jednoznačně potvrdit u rostoucí rychlosti posuvu (obrázky 3.28 a 3.29), ale je možné nárůst parametrů drsnosti také předpokládat.

Opotřebením vyměnitelné břitové destičky s břitem z polykrystalického diamantu bylo změřeno po experimentu a vzhledem k relativně malé ofrézované délce (150 mm) a hloubce záběru ostří 1 mm došlo k relativně velkému opotřebení (VB 0,5 mm v oblasti špičky a 0,32 mm na hřbetě). Opotřebením bylo způsobeno abrazivním působením třísek a dále byl vyštipován břit v důsledku vysoké tvrdosti obráběného materiálu.

Keramický materiál R-S67K by bylo frézováním vhodné obrábět vyššími řeznými rychlostmi a naopak nižšími rychlostmi posuvu pro dosažení co nejnižších řezných sil. Pro dosažení malých hodnot měrného řezného odporu je vhodné použít takových řezných podmínek, kdy bude maximální tloušťka třísky  $h_{Dmax} = 0,08$  mm a více.

## ZÁVĚR

Keramický materiál R-S67K jehož výrobcem je firma SEEIF Ceramic a.s. byl frézován jednou vyměnitelnou destičkou z polykrystalického diamantu, které byla upnuta ve frézovací hlavě. V celém průběhu experimentu byla použita konstantní hloubka záběru ostří 1 mm. Byly měněny pouze hodnoty posuvové a řezné rychlosti. Během experimentu byly měřeny řezné síly ve třech osách na dynamometru Kistler. Z naměřených hodnot byly vybrány takové síly, kdy bylo dosaženo maximálního průřezu třísky a tím i maximálních sil při obrábění.

Po experimentu byla změřena drsnost povrchu na stroji Alicona, vyhodnocení probíhalo na měřené délce 5,5734 mm. Bylo možné pozorovat závislost drsnosti povrchu mezi řeznou rychlostí a drsností povrchu, ale není jasná závislost drsnosti povrchu a rychlosti posuvu. Dále po experimentu bylo změřeno opotřebení vyměnitelné břitové destičky, která byla abrazivně opotřebena a také docházelo k vyštipování břitu v důsledku tvrdosti keramického materiálu R-S67K. Maximální řezný výkon nutný pro obrábění byl  $P_c = 95,34 \text{ W}$ .

---

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
2. SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 232 s. ISBN 978-80-7043-874-9.
3. JONŠTA, Zdeněk, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Technické materiály II*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2574-8.
4. JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
5. MÍŠEK, Bohumil, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Polymery, keramika, kompozity*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1993, 155 s. ISBN 80-214-0521-X.
6. MACEK, Karel. *Nauka o materiálu*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 209 s. ISBN 80-010-2543-8.
7. HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDÖRFER. *Technologie keramiky*. Vyd. 2., V Silikátovém svazu 1. Praha: Silikátový svaz, 2008, 387 s., [9] s. barev. obr. příl. ISBN 978-80-86821-48-1.
8. R-S67-K. SEEIF Ceramic, a.s. - Produkty pro slévárny oceli a litiny [online]. 2010 [vid. 2014-05-06]. Dostupné z: [http://www.seeifceramic.cz/media/mat\\_listy/z01/R-S67K.pdf](http://www.seeifceramic.cz/media/mat_listy/z01/R-S67K.pdf)
9. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
10. HUMÁR, Anton. ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. *Efektivní obrábění nových konstrukčních keramických materiálů: Habilitační práce v oboru „Strojírenská technologie“*. Brno: VUT Fakulta strojní, 1997, 99 s.
11. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
12. MENČÍK, Jaroslav. *Pevnost a lom skla a keramiky*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 389 s. Redakce literatury spotřebního průmyslu. ISBN 80-030-0205-2.
13. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
14. *ItemPreview. Seco Tools* [online]. 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://cadsearch.secotools.com/CadSearch/getDetail.aspx?Product%20no%20-%20global=00005694&lang=en-US&fileExists=t:t:&inchOrMetric=metric&edpNo=05694>
15. *FRÉZOVÁNÍ 1: Seco Tools* [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [https://www.secotools.com/CorpWeb/Service\\_Support/machining\\_navigator/CEE/Czech/Final\\_LR\\_Milling\\_1\\_CZ.pdf](https://www.secotools.com/CorpWeb/Service_Support/machining_navigator/CEE/Czech/Final_LR_Milling_1_CZ.pdf)

- 
16. *ItemPreview. Seco Tools* [online]. 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [https://www.store.secotools.com/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=10074&storeId=10221&productId=87010&langId=-1&parent\\_category\\_rn=201780&top\\_category=200702&backLink=CategoryDisplay%3fcatalogId%3d10074%26storeId%3d10221%26categoryId%3d201780%26langId%3d-1%26parent\\_category\\_rn%3d201780%26pageView%3d%26pageSize%3d15%26beginIndex%3d#tabs-productAttributes](https://www.store.secotools.com/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=10074&storeId=10221&productId=87010&langId=-1&parent_category_rn=201780&top_category=200702&backLink=CategoryDisplay%3fcatalogId%3d10074%26storeId%3d10221%26categoryId%3d201780%26langId%3d-1%26parent_category_rn%3d201780%26pageView%3d%26pageSize%3d15%26beginIndex%3d#tabs-productAttributes)
17. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138 s. [vid. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
18. *Structures of corundum* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://pixshark.com/corundum-structure.htm>
19. LOPEZ-ALVAREZ, Miriam, Julia SERRA, Alejandro DE a Pio GONZALEZ. Marine-Based Carbon and Silicon Carbide Scaffolds with Patterned Surface for Tissue Engineering Applications. *Advances in Ceramics - Electric and Magnetic Ceramics, Bioceramics, Ceramics and Environment*. InTech, 2011. DOI: 10.5772/22046. ISBN 978-953-307-350-7. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-ceramics-electric-and-magnetic-ceramics-bioceramics-ceramics-and-environment/marine-based-carbon-and-silicon-carbide-scaffolds-with-patterned-surface-for-tissue-engineering-appl>
20. GREGOROVÁ, Eva. *Technologie keramiky* [online]. 2007 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/sil/keramika/technologie\\_keramiky.html](http://old.vscht.cz/sil/keramika/technologie_keramiky.html)
21. *Keramický motor - sci-fi alebo realita?* [online]. 2007 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://auto.sme.sk/c/4045439/keramicky-motor-sci-fi-alebo-realita.html>
22. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
23. MATOUŠEK, Josef. *Anorganické nekovové materiály*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1992, 160 s. ISBN 80-708-0160-3.
24. *Nauka o materiálu II "Keramika"* [online]. 2008 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.scribub.com/limba/ceha-slovaca/Nauka-o-materilu-II-Keramika111316165.php>
25. IX. *PORUCHY KRYSTALOVÝCH STRUKTUR: Czech and Slovak Crystallographic Association* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/kryst/str09a.htm>
26. SCHOOL OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. *Ceramics School of Materials Science and Engineering* [online]. 2013 [vid. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.materials.unsw.edu.au/tutorials/online-tutorials/ceramics>
27. POKLUDA, Jaroslav. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: kovy, keramika, plasty*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1994, 385 s. ISBN 80-214-0575-9.
28. TRUNEC, M. Nové technologie tvarování pokročilé keramiky, její možnosti a rizika. *Silikátový zpravodaj*, 2004, vol. 2004, no. 1, p. 14 ( p.)ISSN: 1212- 3188.
-

- 
29. HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 2. uprav.vyd. Praha: SNTL, 1981, 516 s.
30. SOJKA, Jaroslav a Petra VÁŇOVÁ. *Základy progresivních konstrukčních materiálů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2578-6.
31. GREGEROVÁ, Miroslava. ÚSTAV GEOLOGICKÝCH VĚD, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA MU V BRNĚ, KOTLÁŘSKÁ 2, 61137 BRNO. *TECHNOLITOLOGIE* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://petrol.sci.muni.cz/Technolitologie/skripta/cesky/Technolitologie-skripta.htm>
32. SANDVIK *Coromant* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/formulas\\_and\\_definitions/the\\_milling\\_process/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/formulas_and_definitions/the_milling_process/pages/default.aspx)
33. *Martina Matalová – OK stroje: Frézka konzolová FB 32 V* [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://prodej-stroju.cz/?dt\\_portfolio=frezka-konzolova-fb-32-v](http://prodej-stroju.cz/?dt_portfolio=frezka-konzolova-fb-32-v)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
Al	-	Hliník
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Oxid hlinitý
Al <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	-	Hydratovaný křemičitan hlinitý
BN	-	Nitrid boritý
K <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .6SiO <sub>2</sub>	-	Draselný živec
MgO	-	Oxid hořečnatý
N	-	Dusík
O	-	Kyslík
Si	-	Křemík
SiC	-	Karbid křemíku
SiO <sub>2</sub>	-	Oxid křemičitý
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	-	Nitrid křemíku
ZrO <sub>2</sub>	-	Oxid zirkoničitý

Symbol	Jednotka	Popis
A <sub>Dmax</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	Maximální průřez třísky
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
E <sub>0</sub>	[MPa]	Modul pružnosti keramického materiálu bez pórů
F	[N]	Celková řezná síla
F <sub>c</sub>	[N]	Řezná síla
F <sub>cN</sub>	[N]	Kolmá řezná síla
F <sub>P</sub>	[N]	Pasivní síla
F <sub>x</sub>	[N]	Síla působící v ose x
F <sub>y</sub>	[N]	Síla působící v ose y
F <sub>z</sub>	[N]	Síla působící v ose z
P <sub>C</sub>	[W]	Řezný výkon
Ra	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	Výška nerovností profilu
R <sub>m</sub>	[MPa]	Mez pevnosti materiálu
T	[°K]	Absolutní teplota
T <sub>0</sub>	-	Konstanta
VB	[mm]	Opotřeбенí na hřbetě nástroje
V <sub>p</sub>	-	Objemové množství pórů

a	-	Součinitel tvaru pórů
a <sub>p</sub>	-	Šířka záběru ostří
b	-	Součinitel tvaru pórů
b <sub>D</sub>	[mm]	Jmenovitá šířka třísky
f <sub>z</sub>	[mm/zub]	Posuv na zub
h <sub>Dmax</sub>	[mm]	Maximální tloušťka třísky
k	-	Konstanta rychlost tečení materiálu
k <sub>C</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Měrný řezný odpor
n	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky za minutu
v <sub>c</sub>	[m/min]	Řezná rychlost
v <sub>f</sub>	[mm/min]	Posuvová rychlost
z	-	Počet zubů na fréze

---

$\varepsilon_{x,y,z}$	-	Poměrné prodloužení v dané ose
$\dot{\varepsilon}$	$[\text{s}^{-1}]$	Rychlost poměrného prodloužení
$\varphi_{\text{max}}$	$[\text{°}]$	Úhel posuvového pohybu při maximální tloušťce třísky
$\kappa_r$	$[\text{°}]$	Úhel nastavení hlavního ostří
$\sigma_{x,y,z}$	-	Normálové napětí v dané ose
$\mu$	-	Poissonovo číslo

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Průběhy sil pro další řezné podmínky
- Příloha 2 Vliv řezné rychlosti na kvalitu povrchu
- Příloha 3 Vliv rychlosti posuvu na kvalitu povrchu
- Příloha 4 Materiálový list R-S67-K