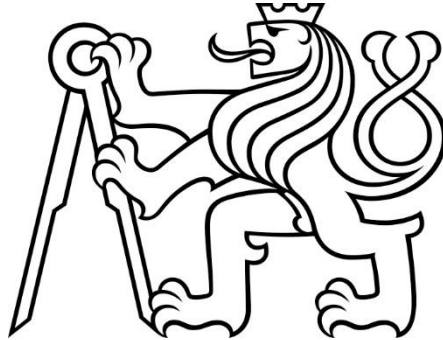


# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Řezivost nástrojů při obrábění slitin titanu frézováním**

**Cutting tool ability for milling of titanium**

Autor: **Bc. Ryszard Marek**

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.





## Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci s názvem „*Řezivost nástrojů při obrábění slitin titanu frézováním*“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Rázka, CSc. s použitím literatury, která je uvedena na konci této práce.

V Praze dne .....

.....

Bc. Ryszard Marek



Řezivost nástrojů při obrábění slitin titanu frézováním

Diplomová práce

Bc. Ryszard Marek



## **ANOTACE**

Předmětem této diplomové práce je srovnání pěti různých břitových destiček dle jejich řezivosti. Řezivost nástrojů byla hodnocena na základě experimentu provedeného technologií čelního frézování titanu za sucha v laboratořích ČVUT.

## **SUMMARY**

The subject of this thesis is a comparison of five different cutting inserts due to its cutting tool ability. There was made an experiment to compare the cutting tool ability at the laboratories of CTU. The technology used for the experiment was the dry milling of titanium alloy.



Řezivost nástrojů při obrábění slitin titanu frézováním

Diplomová práce

Bc. Ryszard Marek



## OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>1 ŘEZIVOST NÁSTROJE.....</b>	<b>17</b>
1.1 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY .....	18
1.2 INTENZITA OPOTŘEBENÍ BŘITU .....	20
1.3 VZTAH K DOSAHOVANÉ TEPLOTĚ ŘEZÁNÍ .....	22
1.4 DYNAMIKA PROCESU ŘEZÁNÍ .....	23
1.5 DRSNOST OBROBENÉHO POVRCHU .....	24
1.5.1 Výškové parametry .....	24
1.5.2 Délkové parametry .....	25
1.5.3 Tvarové parametry .....	25
1.6 DRUH A TVAR TVOŘÍCÍ SE TŘÍSKY.....	26
<b>2 TITAN A OBRÁBĚNÍ TITANU .....</b>	<b>29</b>
2.1 TITAN .....	29
2.2 SLITINY TITANU .....	29
2.3 HOŘLAVOST TITANU .....	30
2.4 OBRÁBĚNÍ TITANU.....	30
2.4.1 Frézování.....	31
2.4.2 Suché frézování.....	31
2.5 NÁSTROJE VHODNÉ PRO OBRÁBĚNÍ TITANU .....	31
2.5.1 Nástroje firmy Sandvik.....	31
2.5.2 Nástroje firmy Ceratizit.....	32
2.6 ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI OBRÁBĚNÍ TITANU.....	32
<b>3 PRAKTICKÁ ČÁST – FRÉZOVÁNÍ.....</b>	<b>33</b>
3.1 POUŽITÉ STROJE, PŘÍSTROJE A PŘÍSLUŠENSTVÍ .....	33
3.2 OBRÁBĚNÍ .....	34
3.3 POSTUP MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ .....	35
3.3.1 Síly.....	35
3.3.2 Drsnost.....	37
3.3.3 Třísky.....	38
3.3.4 Opotřebení vyměnitelné břitové destičky .....	39
<b>4 NAMĚŘENÉ HODNOTY A VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>41</b>
4.1 VBD č. 1 – RCKT-1204 MO-PM 4020 .....	41



4.1.1	Síly.....	41
4.1.2	Drsnosti.....	43
4.1.3	Třísky.....	45
4.1.4	Opotřebení.....	46
4.2	VBD č. 2 – RPHX 1204MOEN – 0 .....	47
4.2.1	Síly.....	47
4.2.2	Drsnosti.....	49
4.2.3	Třísky.....	51
4.2.4	Opotřebení.....	52
4.3	VBD č. 3 – RPHX 1204M4SN-F50.....	53
4.3.1	Síly.....	53
4.3.2	Drsnosti.....	55
4.3.3	Třísky.....	57
4.3.4	Opotřebení.....	58
4.4	VBD č. 4 – RPHX 1204M4EN-M32.....	59
4.4.1	Síly.....	59
4.4.2	Drsnosti.....	61
4.4.3	Třísky.....	62
4.4.4	Opotřebení.....	63
4.5	VBD č. 5 – RPHX 1204MOSN-M50 .....	64
4.5.1	Síly.....	64
4.5.2	Drsnosti.....	66
4.5.3	Třísky.....	68
4.5.4	Opotřebení.....	68
<b>5</b>	<b>SROVNÁNÍ ŘEZNÝCH DESTIČEK.....</b>	<b>71</b>
5.1	SROVNÁNÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ.....	71
5.2	SROVNÁNÍ DRSNOSTÍ .....	74
5.3	SROVNÁNÍ TŘÍSEK.....	75
5.4	SROVNÁNÍ ŘEZNÝCH DESTIČEK DLE OPOTŘEBENÍ .....	76
5.5	SROVNÁNÍ DLE BARVY DESTIČKY BĚHEM OBRÁBĚNÍ.....	77
<b>6</b>	<b>ZVĚTŠENÍ ŘEZNÉ RYCHLOSTI U VYBRANÝCH DESTIČEK .....</b>	<b>79</b>
6.1	VBD č. 1 – RCKT1204 MO-PM 4020 .....	79
6.1.1	Síly.....	80
6.1.2	Drsnosti.....	82
6.1.3	Třísky.....	83





6.1.4	Opotřebení.....	84
6.2	VBD č. 5 – RPHX 1204MOSN-M50 .....	85
6.2.1	Síly.....	85
6.2.2	Drsnosti.....	87
6.2.3	Třísky.....	89
6.2.4	Opotřebení.....	89
<b>7</b>	<b>SROVNÁNÍ VBD Č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020 A VBD Č. 5 RPHX 1204MOSN.....</b>	<b>91</b>
7.1	SROVNÁNÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ.....	91
7.2	SROVNÁNÍ DRSNOSTÍ .....	93
7.3	SROVNÁNÍ TŘÍSEK.....	94
7.4	SROVNÁNÍ DLE OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH DESTIČEK .....	94
7.5	SROVNÁNÍ DLE BARVY DESTIČKY BĚHEM OBRÁBĚNÍ.....	95
<b>8</b>	<b>ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU .....</b>	<b>97</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>99</b>



Řezivost nástrojů při obrábění slitin titanu frézováním

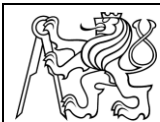
Diplomová práce

Bc. Ryszard Marek



## SEZNAM ZKRATEK

PVD	(Physical Vapour Deposition) - nanášení odpařením z pevné fáze
CVD	(Chemical Vapor Deposition) - chemická depozice z plynné fáze
T	trvanlivost nástroje
$v_c$	řezná rychlost
$c_v$	konstanta
m	exponent
$f_z$	posuv na zub
$f_{min}$	posuv na minutu
n	otáčky
$a_p$	hloubka třísky
$F_c$	řezná síla
$F_{CN}$	normálová složka řezné síly
$F_p$	pasivní složka řezné síly
Ra	střední aritmetická úchylka profilu
Rz	největší výška profilu
Rmax	maximální hloubka drsnosti
VBD	vyměnitelná břitová destička



Řezivost nástrojů při obrábění slitin titanu frézováním

Diplomová práce

Bc. Ryszard Marek



## Úvod

V dnešním světě plném vysoce kvalitních materiálů, je kladen důraz na jejich přesné tvary v určitých tolerancích. Pole tolerance se již u některých součástí blíží téměř k nevyrobitelným rozměrům, a proto je třeba dbát nejen na vývoj a vysokou kvalitu strojů, ale také nástrojů.

Tato diplomová práce je zaměřená právě na srovnání řezivosti nástrojů určených k obrábění velice tvrdých a houževnatých materiálů. Jedním z představitelů nejtvrdsích materiálů je titan a jeho slitiny. Využití slitin titanu je čím dál žádanější, a to z důvodu jejich vysoké pevnosti, houževnatosti a současně nízké hmotnosti. Mezi další kladné vlastnosti titanu patří jeho vysoká odolnost proti korozi a biokompatibilita. Z důvodu jeho velkého využití ať už v leteckém, či zdravotnickém průmyslu, je třeba najít správné nástroje pro jeho obrábění.

Některé firmy vyrábějí nástroje, které jsou předurčené k obrábění těchto těžko obrobitelných slitin. V této práci byl proveden experiment frézování, který prozkoumává řezivost těchto nástrojů a srovnává je mezi sebou. Pro experimentální zkoušky byly použity nástroje od firmy Sandvik a Ceratizit.

Ať už z ekologického nebo ekonomického důvodu, obecný trend obrábění s chladicími kapalinami pomalu klesá. I přesto, že výrobci nástrojů doporučují obrábění titanu s chladicí kapalinou, experiment popsáný v dalších řádkách, byl proveden bez ní, frézováním na sucho.

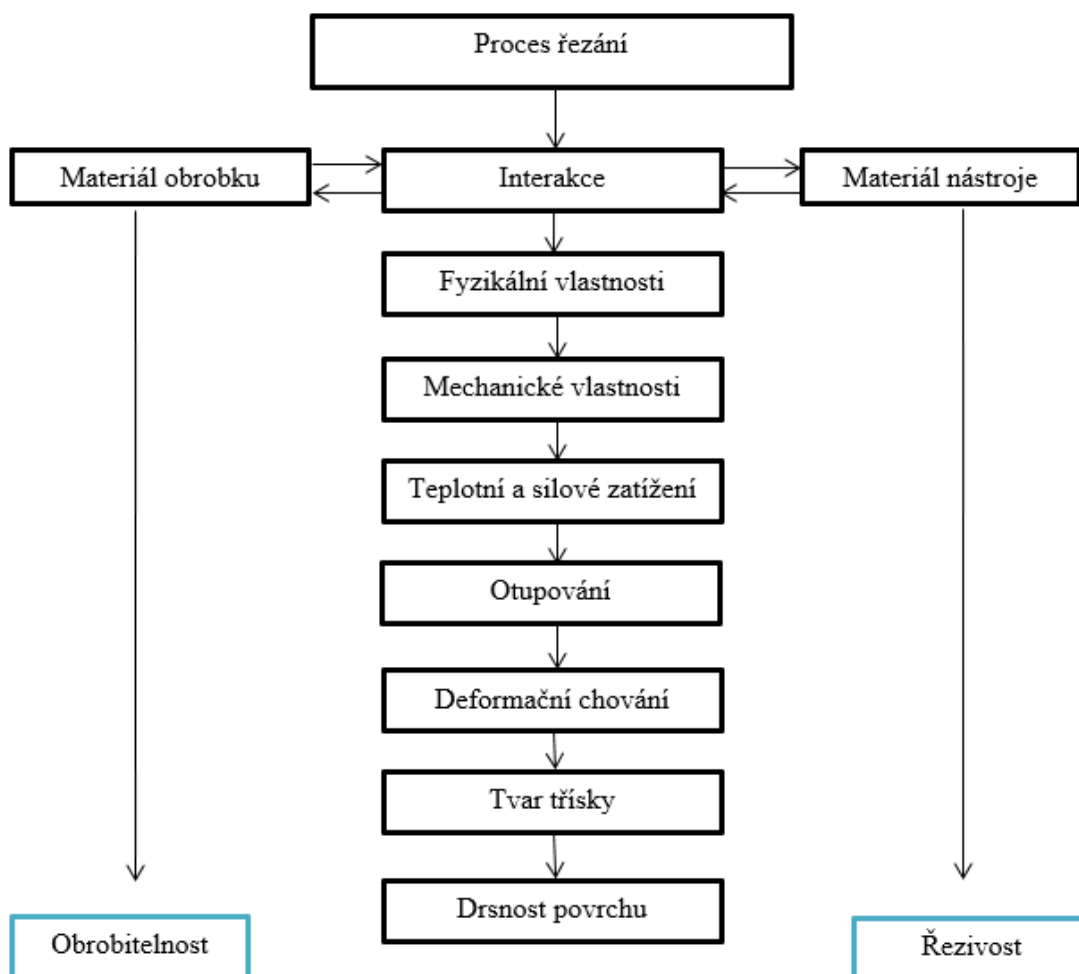
Cílem této diplomové práce tedy bylo hodnocení řezivosti nástrojů pro obrábění tvrdých materiálů.





## 1 Řezivost nástroje

Pojem řezivost nástroje lze definovat mnoha způsoby. Řezivost nástroje lze charakterizovat například jako vlastnost, která umožňuje nástroji efektivním způsobem odebrat třísku z obráběného materiálu. Další autor definuje řezivost jako schopnost nástroje obrábět konkrétním způsobem (technologii) daný obráběný materiál. Vzájemný vztah mezi řezivostí a obrobiteľností je znázorněn na Obr. 1. [1] [2]



Obr. 1 Vztah řezivosti a obrobiteľnosti [3]

Z výše uvedeného vyplývá, že řezivost úzce souvisí s materiálem nástroje, a tedy i s jeho fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, ale nejen s nimi. Další faktory, které ovlivňují řezivost jsou: metoda obrábění, geometrie nástroje, řezné podmínky, řezné prostředí a jiné. Tím, že proces řezání závisí i na obráběném materiálu, nelze říct, že se jedná o vlastnost absolutní. [1]



Řezivost i obrobitelnost lze z hlediska jejich charakteristik rozdělit na řezivost a obrobitelnost absolutní a relativní:

- absolutní řezivost (resp. obrobitelnost) je charakterizována funkčním vztahem mezi parametry, které s řezivostí (obrobitelností) souvisejí, nebo určitou velikostí dané veličiny charakterizující řezivost (obrobitelnost)
- relativní řezivost (resp. obrobitelnost) je charakterizována bezrozměrnými čísly, které udávají poměr velikostí určité veličiny, a sice poměr velikosti této veličiny vztahující se k danému materiálu nástroje, resp. obrobku a velikosti této veličiny odpovídající etalonovému materiálu nástroje, resp. obrobku. [2]

Hodnocení absolutní řezivosti (resp. obrobitelnosti) je možné provádět dle:

- intenzity opotřebení břitu (trvanlivost)
- vztahu k dosahované teplotě řezání
- silového zatížení (množství energie potřebné k odřezávání dané vrstvy materiálu)
- dosažené drsnosti obrobeného povrchu
- druhu a tvaru tvořící se třísky [4]

Hodnocení relativní řezivosti (resp. obrobitelnosti) lze hodnotit podle:

- indexu obrobitelnosti
- teplotního indexu
- indexu řezné rychlosti pro určitou teplotu
- silového indexu
- technologie (utváření třísek)
- kvality [4]

## 1.1 Nástrojové materiály

V dnešní době celosvětově rostou požadavky na nástrojové materiály, a to hlavně z důvodu vývoje konstrukčních materiálů, které následně je třeba obrábět. Dalším důvodem je vývoj nových obráběcích strojů, zejména s číslicovým řízením. [1]

Abychom byli schopni odebrat třísku a dosahovat požadovaných tvarů, rozměrů a jakosti, je nutné abychom použili řezný nástroj. Břit řezného nástroje musí být dostatečně houževnatý





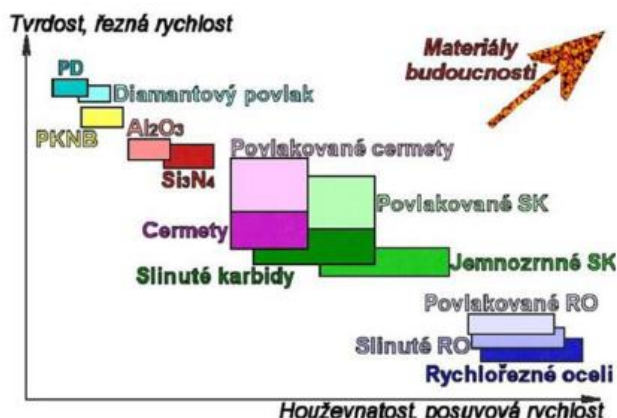
a také tvrdý. Tyto dvě vlastnosti si musí udržet i při zvýšených teplotách, které při obrábění vznikají. [5]

Trh už nabízí poměrně široký sortiment řezných nástrojů, od běžných nástrojových ocelí (zejména rychlořezných), přes slinuté karbidy (bez povlaků, nebo s otěruvzdornými povlaky), cermety, řeznou keramiku až po téměř nejtvrdší známý přírodní minerál diamant. [5]

Běžně využívané nástrojové materiály:

- **rychlořezné oceli** – Mají nejvyšší houževnatost, ale tvrdost je nízká, a tak jsou vhodné k takovému obrábění, kde dochází k rázům a používá se nízké řezné rychlosti. Často se jejich řezivost zvyšuje povlaky různého typu jako např. TiC a TiN [2][5]
- **slinuté karbidy (nepovlakované)** – Mají velmi vysoký modul pružnosti, ohybovou pevnost a lomovou houževnatost, a tedy jsou vhodné k obrábění vysokými posuvovými rychlostmi a pro těžké přerušované řezy. Nejsou však vhodné pro vyšší řezné rychlosti z důvodu nízké termochemické stability.
- **slinuté karbidy (povlakované)** – Povlak je termochemický stabilní a tvrdý a je tvořen karbidy, nitridy, oxidy anebo jejich kombinacemi. Díky této kombinaci karbidu s povlakem vznikají řezné materiály pro nejširší aplikaci při vysokých řezných i posuvových rychlostech.
- **cermety** – Používají se vyšší posuvové rychlosti, než u keramiky a však pro stejné řezné rychlosti jako u slinutých karbidů. Mají nižší tepelnou vodivost, což způsobuje plastické porušení břitu.
- **řezné keramiky** – Mají vysokou tvrdost za tepla a termochemickou stabilitu, ale nízkou houževnatost, z čehož plyne, že se využívají pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi a nízkými posuvovými rychlostmi.
- **kubické nitridy bóru** – Mají velmi vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Jsou však velmi drahé. Využívají se nejčastěji pro obrábění superslitin, kalených ocelí a litin.
- **syntetické diamanty** – Mají velmi vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení podobně jako kubické nitridy bóru. Své uplatnění však nacházejí při obrábění neželezných kovů, zejména keramiky a slitin na bázi hliníku. [5]

Každý materiál má jiné vlastnosti a jinou oblast použití. Nelze tedy určit jediný univerzální materiál, který by vyhovoval pro jakékoliv použití. Je proto důležité znát podrobně vlastnosti nástrojových materiálů a konkrétní oblast aplikace. Znázornění vlastností materiálů je na Obr. 2.



Obr. 2 Oblast použití řezných nástrojů v závislosti na tvrdosti a houževnatosti [5]

Nejpoužívanějším materiálem pro obrábění titanu je slinutý karbid, který je velmi tvrdý i při vysokých teplotách. Povlak nanesený na břitové destičky zvyšuje trvanlivost nástroje. Nejčastější povlaky, s jakými je možno se setkat jsou povlaky PVD a CVD. [7]

## 1.2 Intenzita opotřebení břitu

Intenzita opotřebení břitu se zkouší pomocí dlouhodobé zkoušky trvanlivosti, která je jen jedna a považuje se za základní zkoušku, podle které se posuzuje míra objektivnosti ostatních zkoušek obrobitelnosti. Tuto zkoušku lze využít i u posuzování řezivosti nástrojů a provádí se buď frézováním, nebo soustružením. Zkouška probíhá tak, že se mění řezné rychlosti za konstantních řezných podmínek až do optimálního otupení břitu. Následně se měří čas opotřebení na hřbetu nástroje a pak se stanoví odpovídající trvanlivost břitu pro každou řeznou rychlost. [4]

Když se sestrojí závislost trvanlivosti na řezné rychlosti v logaritmických souřadnicích, dochází k přímé závislosti těchto parametrů a je tedy možné stanovit index obrobitelnosti. [4]

Pomocí závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti ( $T - v_c$ ) a pomocí Taylorova vztahu lze jednoduše hodnotit řezivost nástroje. Obecně lze říct, že lepší řezivost vykazuje ten nástrojový materiál, který má vyšší hodnotu konstanty  $c_v$  a nižší hodnotu exponentu  $m$  viz Tab. 1. [1]

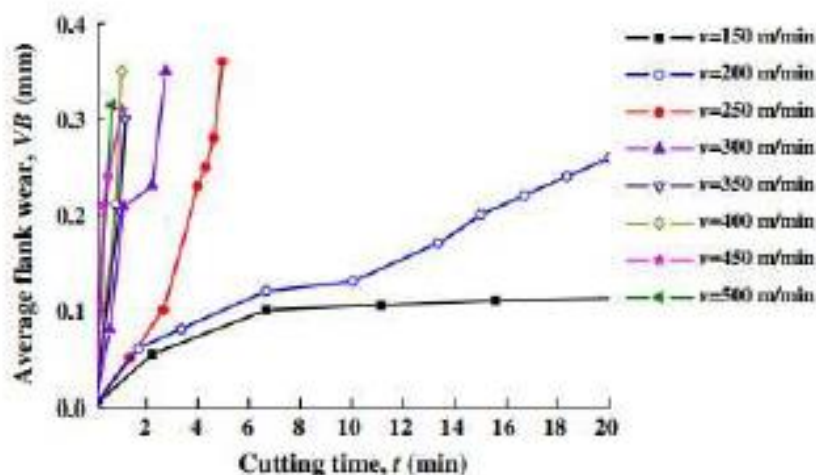
Tab. 1 Hodnoty exponentu  $m$  pro různé nástrojové materiály [1]

Materiál	Nástrojové oceli	Rychlořezné oceli	Slinuté karbidy	Řezná keramika
$m [-]$	$10 \div 8$ (až 6)	$8 \div 5$ (až 3)	$5,0 \div 2,5$ (až 2)	$2,5 \div 1,5$ (až 1,2)
$\alpha [^\circ]$	$84 \div 83$	$83 \div 79$	$79 \div 68$	$68 \div 56$



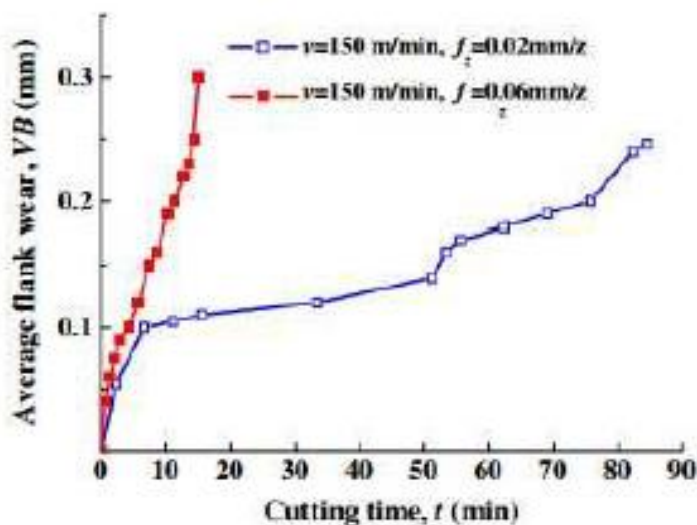
Na grafech níže (Obr. 3, 4) jsou zobrazeny závislosti míry opotřebení VB na řezné rychlosti a na posuvu u konkrétního experimentu, který byl proveden pomocí čelní válcové frézy o průměru 25 mm s vyměnitelnou břitovou destičkou s jakostí karbidu MP2500. [16]

Lze tedy vyčíst, že se stoupající hodnotou řezné rychlosti se zvyšuje i míra opotřebení. Ne jinak tomu je i u posuvu. Tedy s rostoucím posuvem se zvětšuje míra opotřebení. [16]



Obr. 3 Míra opotřebení v závislosti na čase a rychlosti [16]

Experiment prokazuje, že u řezné rychlosti  $v = 150$  m/min dojde k opotřebení 0,1 mm během 6 minut obrábění a následně se břit opotřebovává minimálně. Při zvýšení řezné rychlosti na  $v = 250$  m/min dochází k velkému opotřebení v mnohem kratším čase. K opotřebení 0,1 mm dojde v polovičním čase, tedy během 3 minutách.



Obr. 4 Míra opotřebení v závislosti na čase a posuvu [16]

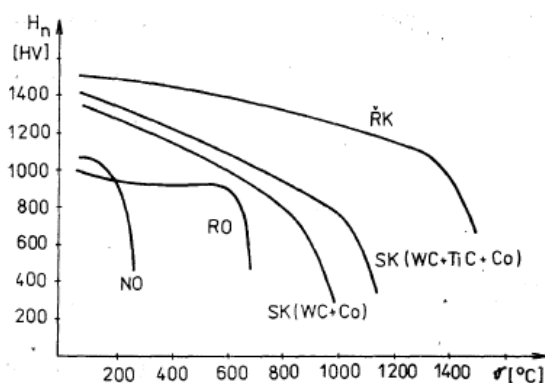


U posuvů je to podobné jako u řezných rychlostí. Při použití posuvu na zub 0,02 mm/z vidíme pozvolný růst opotřebení břitu nástroje. Tímto posuvem opotřebení 0,25 mm nástroj dosáhne po 80 minutách. Při posuvu 0,06 mm/z vidíme, že ke stejnému opotřebení břitu dojde mnohem rychleji, tedy již po 15 minutách. [16]

V důsledku vysokých řezných sil a tepla dochází ke kráterovým výlomkům podél břitu a tím i k rychlému opotřebení nástroje. [23]

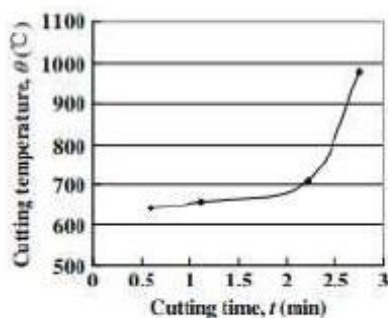
### 1.3 Vztah k dosahované teplotě řezání

Významným faktorem u řezivosti nástrojů je výše teploty, protože s jejím růstem dochází k významnému poklesu tvrdosti nástrojového materiálu viz Obr. 5, kde NO představuje nástrojovou ocel, RO – rychlořeznou ocel, SK – slinutý karbid a ŘK – řeznou keramiku. [2]



Obr. 5 Pokles tvrdosti řezného materiálu v závislosti na teplotě [2]

Graf níže (Obr. 6) představuje zvyšující se teplotu v závislosti na zvyšujících se řezných podmínkách. Jelikož titan má malou tepelnou vodivost, vzniká zde problém. Vznik největší teploty je zaznamenán v místě vstupu a výstupu břitu nástroje do materiálu. Se zvyšující se teplotou dochází také k většímu opotřebení nástroje. [16]

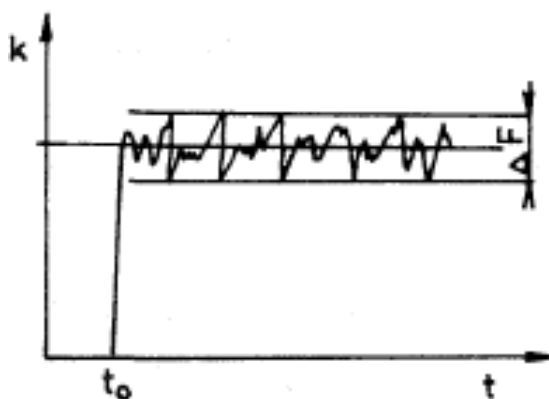


Obr. 6 Teplota řezu závisící na řezných podmínkách [16]



## 1.4 Dynamika procesu řezání

Aby mohlo dojít k řezání je potřeba, aby břit řezného nástroje překonal řezný odpor, který klade materiál. Řezná síla je dynamickým jevem a během obrábění její velikost kolísá (Obr. 7), a to i když se řezné podmínky nemění. Toto kmitání je následkem hned několika jevů, mezi které patří například určitá drsnost povrchu, a tedy nerovnoměrnost ubírání materiálu. Dále se mechanické vlastnosti liší v každé části materiálu a také se v každé části obrobku lehce mění mechanika vzniku třísky. [2]

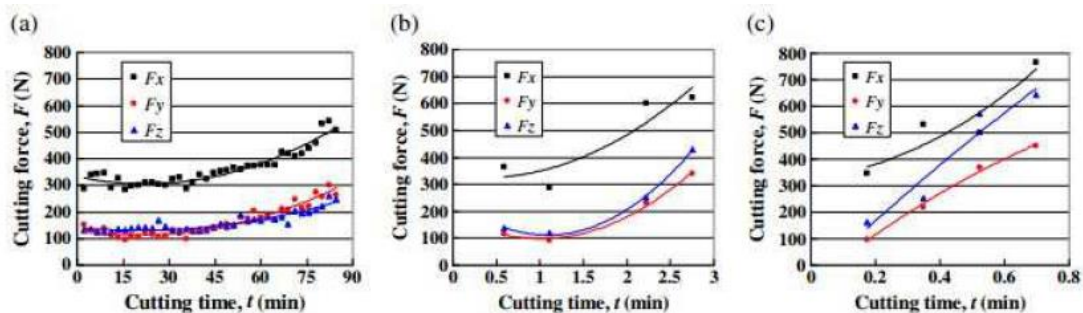


Obr. 7 Kolísání sil během obrábění [2]

Abychom mohli tyto síly srovnávat, je pohodlné tuto řeznou sílu převést na měrnou řeznou sílu, která je velikostí tangenciální složky řezné síly vztažená na jednotku plochy, tedy  $1 \text{ mm}^2$ . Měrná řezná síla závisí na obráběném materiálu (na jeho pevnosti, tvrdosti, houževnatosti a zpevňovací schopnosti), dále na tloušťce odřezávané vrstvy, řezné rychlosti, úhlu řezu, úhlu nastavení, úhlu hřbetu, úhlu sklonu ostří, poměru špičky, řezném prostředí, velikosti opotřebení břitu atd. Závislost této síly na řezné rychlosti je nemonotónní, ale mírně klesající. [2]

U titanu a jeho slitinách je třeba počítat s vysokými měrnými řeznými silami, které se pohybují kolem  $1300\text{--}1400 \text{ N/mm}^2$ . [15]

Lze uvažovat, že silové zatížení bude narůstat se zvyšující se řeznou rychlostí, hloubkou řezu a posuvem. Níže na grafech (Obr. 8) je tento nárůst znázorněn, kde síla  $F_x$  představuje řeznou sílu  $F_c$ . Nárůst je však ovlivněn tím, že se zvyšujícími parametry se nástroj více opotřebuje a je tedy zapotřebí větší síly k odebrání třísky. [16]



Obr. 8 Řezné síly v závislosti na čase a rychlosti [16]

Všechny tři grafy byly vytvořeny za konstantní hloubky řezu, která byla 1 mm a za konstantního posuvu na zub, který byl roven 0,02 mm na zub. Měnily se řezné rychlosti a to tak, že na grafu a je  $v_c = 150$  m/min, na b je  $v_c = 300$  m/min a na c je  $v_c = 450$  m/min. [16]

## 1.5 Drsnost obrobeného povrchu

Při použití jakékoliv metody obrábění vzniká na povrchu obrobené plochy určitá nerovnost, která má velký význam při funkci. Povrch je prostorový útvar, ve kterém se špatně posuzuje nerovnost. Řeší se to řezem útvaru rovinou kolmou k povrchu. Tím se získá profil, který následně lze přeměřovat. [4]

Velikost nerovností charakterizuje strukturu povrchu. Drsnost povrchu je tvořena složkou s nejmenší roztečí a značí se písmenkem R. Vlnitost povrchu je naopak tvořena největší roztečí nerovnosti a značí se písmenkem W. Existují tři základní parametry, na jejichž základě se hodnotí drsnost. Jsou to výškové parametry, délkové parametry a tvarové parametry. [4]

### 1.5.1 Výškové parametry

$R_p$  [ $\mu\text{m}$ ] – největší výška výstupku profilu  $Z_p$  v rozsahu základní délky

$R_v$  [ $\mu\text{m}$ ] – největší hloubka prohlubně profilu  $Z_v$  v rozsahu základní délky

$R_z$  [ $\mu\text{m}$ ] – největší výška profilu, která je tvořena součtem největší výšky profilu  $Z_p$  a největší hloubky profilu  $Z_v$  v rozsahu základní délky, měří se tak, že se zprůměruje absolutní hodnoty pěti maxim a pěti minim křivky profilu

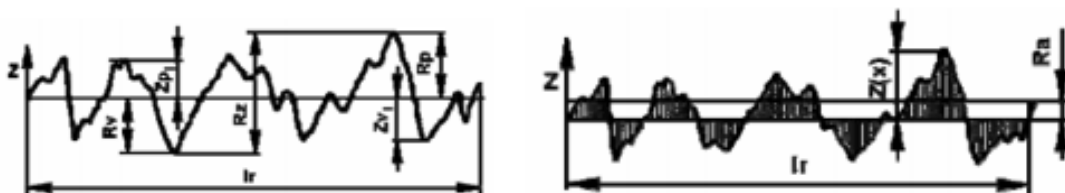
$R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] – střední aritmetická úchylka profilu, která je tvořena aritmetickým průměrem absolutních hodnot v rozsahu základní délky. Tato hodnota nevyovídá však přesně o drsnosti, protože  $R_a$  zanedbává extrémní výšky a hloubky, které jsou na malém úseku.



$R_q$  [ $\mu\text{m}$ ] – průměrná kvadratická úchylka profilu

$R_{\text{max}}$  [ $\mu\text{m}$ ] – maximální hloubka drsnosti neboli rozdíl mezi maximem a minimem profilu drsnosti

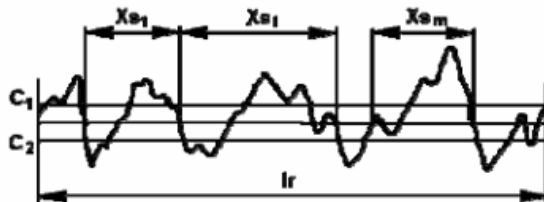
$R_{\text{mr}}$  [%] – materiálový poměr profilu [4]



Obr. 9 Znárodnění parametrů  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_z$ ,  $R_a$  [4]

### 1.5.2 Délkové parametry

$R_{\text{Sm}}$  [ $\mu\text{m}$ ] – průměrná vzdálenost prvků profilu. Jinými slovy – je to průměrná hodnota šířek  $X_s$  profilu v rozsahu základní délky, což je zobrazeno na Obr. 10. [4]



Obr. 10 Délkový parametr  $R_{\text{Sm}}$  [4]

### 1.5.3 Tvarové parametry

Tvarový parametr se využívá nejčastěji při hodnocení tribologických vlastností, dále při odrazu světla anebo při galvanickém pokovení. Tento parametr je průměrný kvadratický sklon profilu  $R_{\Delta q}$ , což je průměrná kvadratická hodnota sklonů  $dZ/dX$  v rozsahu základní délky.

Faktory ovlivňující drsnost povrchu při obrábění jsou následující:

- tuhost a přesnost nástroje (s tím jsou spojené vibrace)
- obráběný materiál
- metoda obrábění
- geometrie řezného nástroje včetně jeho opotřebení
- řezné parametry: řezná rychlost, posuv a hloubka řezu
- použití a druh chladicí kapaliny [17]



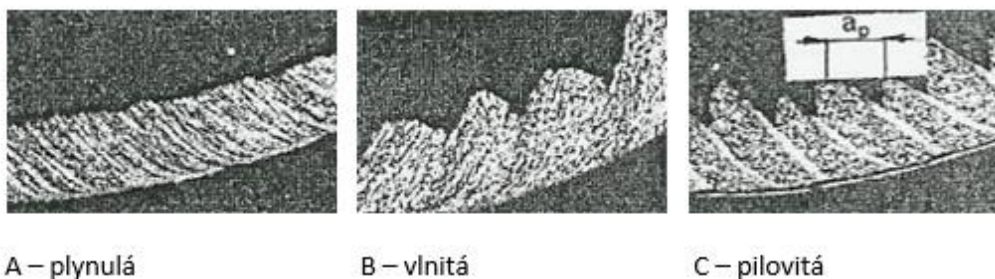
U titanu platí, že jeho povrch je často kvalitní, a to z toho důvodu, že během obrábění nedochází, nebo dochází jen minimálně, k tvorbě nárůstku na nástroji. Frézováním titanu je běžné dosáhnout drsnosti povrchu  $1,6 \mu\text{m}$ . Za určitých řezných podmínek během dokončovacích operací, je možné dosáhnout i drsnosti  $0,5 \mu\text{m}$  a menších. [11]

## 1.6 Druh a tvar tvořící se třísky

Tříška vzniká v důsledku vnikání břitu řezného nástroje do obrobku. U většiny technických materiálů dochází k plastické deformaci přímo u břitu řezného nástroje, kde vzniká tříška tvářená. Tato tříška vzniká nejčastěji u obrábění kovů. U obrábění materiálů jako je keramika, některé plasty, dřevo a podobně nedochází k plastické deformaci a vzniká tříška netvářená. [2]

Třísku tvářenou dále je možné rozdělovat na třísku elementární, pokud při kluzu v deformační oblasti dojde k porušení kohezni pevnosti a tříška jednoduše odletuje, a třísku soudržnou. Tříška soudržná se ještě dělí na třísku plynulou, která je nežádoucí, jelikož se často namotává na nástroj a třísku článkovitou, která je určitým přechodem mezi třískou plynulou a elementární. [2]

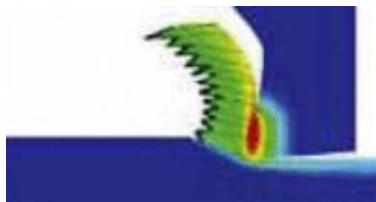
Další dělení je dle hran třísky. Zde se dělí na plynulou, vlnitou a pilovitou třísku viz Obr. 11.



Obr. 11 Plynulá, vlnitá, pilovitá tříška [13]

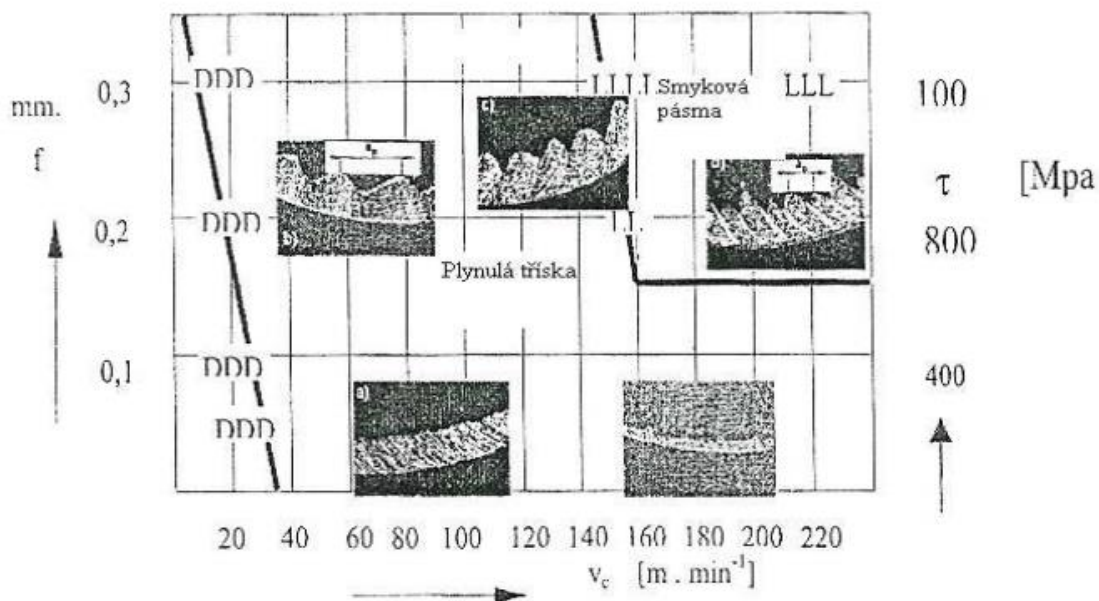
Při obrábění titanu nejčastěji dochází ke vzniku třísky nesouvislé, tedy článkovité což vede ke zjednodušené manipulaci s třískou během obrábění. Vznik třísky je doprovázen vznikem smykových pásem, které jsou zobrazená na Obr. 12. Jinými slovy dochází k termoplastické smykové nestabilitě, která se projevuje odpeňováním předcházejícího deformačního zpevnění. [12]





Obr. 12 Vznik smykových pásem u obrábění titanu [12]

Jak je patrné z Obr. 12, ke smykovým pásmům dochází u větších řezných rychlostí a větších posuvů, kde jedna hrana třísky je pilovitá. U nižších řezných rychlostí za vysokých posuvů dochází k vlnitému tvaru třísky. U nižších posuvů tříška je plynulá nezávisle na rychlosti (Obr. 13). [13]



Obr. 13 Tvar třísek v závislosti na posuvu a řezné rychlosti [13]

Další možnosti hodnocení třísky je samotné její zbarvení, které je závislé na velikosti řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu. Pro větší životnost nástroje by barva třísky neměla být tmavší než světle hnědá. Jestliže upravíme řezné podmínky tak, že barva bude tmavší až do modra, razantně se zvýší opotřebení nástroje. [14]





## 2 Titan a obrábění titanu

### 2.1 Titan

Titan patří mezi nerozšířenější kovy v zemské kůře. Tento kov se vyskytuje ve různých sloučeninách jako např. rutil, anatas, brookit ( $\text{TiO}_2$ ), perovskit ( $\text{CaTiO}_3$ ) nebo ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ). Podobu některých sloučenin lze vidět na Obr. 14. [21]



Obr. 14 Zleva Rutil ( $\text{TiO}_2$ ), perovskit ( $\text{CaTiO}_3$ ) ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ) [19] [20]

Způsob výroby čistého titanu byl objeven teprve kolem roku 1950. K dosažení čistého kovu nejprve je potřeba vyrobit chlorid titaničitý, který lze dále zpracovávat redukcí pomocí hořčíku nebo sodíku. Tento proces musí být prováděn v ochranné inertní atmosféře, aby nedocházelo k znečištění kovu. [21]

Čistý titan má vyšší bod tání nežli ocel, konkrétně  $1665\text{ }^\circ\text{C}$ . Hustota titanu je téměř poloviční ve srovnání s ocelí, tedy  $4\,540\text{ kg/m}^3$ . Jednou z velkých předností je jeho velká odolnost proti korozi. [21]

Titan je polymorfní kov, což znamená, že má v tuhém stavu více krystalových mřížek. Do mezní teploty  $882 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  má titan šesterečnou (hexagonální) těsně uspořádanou mřížku (HCP). Tuto fázi nazýváme  $\alpha$ -titan nebo  $\alpha$ -fáze titanu. Nad mezní teplotou se titan mění na  $\beta$ -titan nebo také  $\beta$ -fázi titanu, která má krychlovou prostorově středěnou mřížku (BCC). Tato fáze se drží až do teploty tání. [21]

### 2.2 Slitiny titanu

Ve většině případů je čistý kov pro strojírenskou praxi nepoužitelný. Není tomu jinak ani u titanu, kde se využívá převážně jeho slitin s prvky jako jsou hliník (Al), chrom (Cr), křemík (Si), molybden (Mo), vanad (V), niob (Nb) a mnohé další. Tyto legující prvky zlepšují vlastnosti jako je např. svařitelnost, tvářitelnost, žárupevnost. [21]



Výsledné složení závisí na použití legujících prvků, které mají rozpustnost v jednotlivých fázích a tím ovlivňují jejich transformaci.

Dle jejich vlivu na teplotu fázové přeměny  $\alpha$  nebo  $\beta$  je dělíme na:

- $\alpha$  stabilizátory – O, C, N, Al. Zvyšují teplotu fázové přeměny a tím stabilizují tuhý roztok  $\alpha$ . V případě nekovů O, C a N je potřeba dávat pozor na jejich koncentraci a držet jí na minimu, neboť zvyšuje tvrdost a křehkost slitiny.
- $\beta$  stabilizátory – Nb, Ta, Mo, V, Cu, Fe, Cr, Ni, Mn, Co, Si. Snižují teplotu fázové přeměny a tím stabilizují i tuhý roztok  $\beta$ . Při dostatečné koncentraci prvků Nb, Ta, Mo a V může tuhý roztok  $\beta$  zůstat i při pokojové teplotě jako stabilní fáze. Při použití legur Cu, Fe, Cr, Ni, Mn, Co a Si se roztok  $\beta$  rozpadne eutektickou přeměnou. [22]

Nejpoužívanější slitinou titanu v leteckém průmyslu je Ti-6Al-4V. [23]

### 2.3 Hořlavost titanu

Titan není zdraví škodlivým materiálem. Avšak k jednomu riziku během obrábění dochází. Jedná se o potenciální vznícení třísky. K tomu může dojít během odběru velmi tenké třísky, která následně reaguje s atmosférou. Ke vznícení třísky může také dojít při použití vysokých řezných rychlostí bez použití chlazení. Nejčastěji k hoření třísky dochází při broušení titanu za sucha, je ale možné, že za určitých podmínek dojde ke vznícení třísky i u operací jako jsou soustružení, či frézování. [11]

### 2.4 Obrábění titanu

Obrábění obecně lze charakterizovat jako technologický proces, při kterém dochází k tvorbě nového povrchu obrobku určitého tvaru, rozměru a jakosti odebráním částic materiálu. [1]

Obrábění titanu a jeho slitin není jednoduchý technologický proces. Mezi hlavní důvody, proč tomu tak je, patří vysoké řezné teploty, chemická reaktivita, relativně nízký modul pružnosti a nízká tepelná vodivost. [11]

Při obrábění titanu vznikají větší řezné síly, než při odpovídající aplikaci obrábění oceli podobné tvrdosti. Souvisí to s tím, že povrchová vrstva obrobené části titanu vykazuje větší tvrdost než původní materiál. Vyšší řezný odpor generuje podstatně vyšší tepelné namáhání nástroje a v důsledku nižší tepelné vodivosti si i samotné třísky dále udržují teplo, čímž je nástroj ještě více namáhán. [23]



### 2.4.1 Frézování

Frézování je proces, při kterém dochází k odběru materiálu pomocí rotujícího nástroje. Tento proces je aplikován u velkosériové výroby, u malosériové výroby i u kusové výroby. Frézovat lze titan různých rozměrů a různých tvarů s určitou drsností povrchu a v tolerancích odpovídajících standardům v leteckém průmyslu. [11]

Frézování titanu představuje určité výzvy. Mezi ty největší patří překonání tvorby otřepů na obráběném materiálu a vysoké opotřebenění nástroje, které v pokročilém stádiu může vést až k nedodržení rozměrových tolerancí. Další problémy během frézování titanu představují vysoké teploty, průhyb tenkých polotovarů a vznik velkého tření. [11]

### 2.4.2 Suché frézování

Během obrábění titanu je doporučeno používat chlazení, a to hned z několika důvodů. Chlazení zvyšuje životnost nástroje, zlepšuje drsnost obrobeného povrchu, minimalizuje vznik nárůstku, a snižuje zbytkové napětí v materiálu. Nejpoužívanější chladicí kapaliny jsou na bázi oleje anebo vody. Chlazení zvyšuje životnost nástroje až o 300 %. [11]

Na druhou stranu obrábění za sucha také představuje určité výhody. Jednou z nich je ekologičnost výroby, chladicí kapaliny totiž představují nevhodný odpad výroby. Během obrábění s chladicí kapalinou dochází také ke vzniku výparů, které mohou být až zdraví škodlivé. Další výhodou je snižování nákladů a ekonomičnost výroby. [11] [16]

## 2.5 Nástroje vhodné pro obrábění titanu

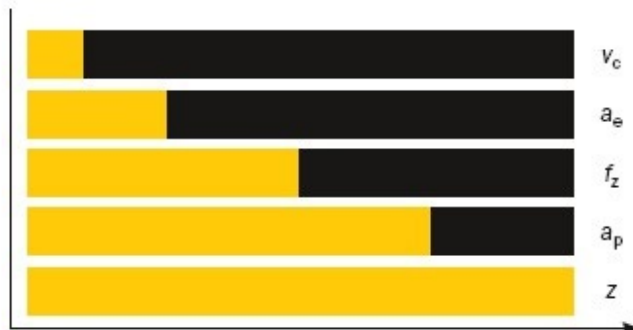
Titan je velice špatný vodič tepla a také tím, že je tvrdý je nesnadné ho obrábět. Proto při frézování je důležité, aby nástroj byl ostrý, byly nastavené správné řezné parametry a tvořila se ideální tříska. Nejpoužívanějším materiálem pro obrábění titanu je slinutý karbid, který je velmi tvrdý i při vyšších teplotách. Povlak na břitových destičkách zvyšuje trvanlivost nástroje. [6] [7]

### 2.5.1 Nástroje firmy Sandvik

Firma Sandvik doporučuje pro frézování titanu karbidové třídy břitových destiček, jak s CVD, nebo PVD povlakem, tak destičky bez povlaků. Firma také uvádí, že obrábění titanu vyžaduje stroje s vysokou tuhostí a vysokým výkonem a vysokým krouticím momentem při nízkých otáčkách. Nejběžnějšími typy opotřebenění nástroje jsou opotřebenění ve tvaru vrubu a vylamování ostří. Vznik velkého množství tepla má za následek omezení řezné rychlosti. Vliv řezných



podmínek na životnost nástroje lze vidět na Obr. 15, kde žlutá barva představuje životnost nástroje a černá snížení životnosti nástroje v důsledku zvýšení řezných parametrů. [9]



Obr. 15 Vliv řezných podmínek na životnost nástroje [9]

### 2.5.2 Nástroje firmy Ceratizit

Osmdesát procent nástrojů vyrobených firmou Ceratizit má PVD, nebo CVD povlak. Firma Ceratizit doporučuje použití CVD povlaků pro obrábění za sucha. Povlaky PVD jsou doporučené pro přerušované řezy. [10]

Firma vyrábí také nástroje pro obrábění titanu, které mají speciální geometrii břitu, které redukuje otřesy a vibrace, a tím umožňují dosažení lepší kvality povrchu. Tyto nástroje také dopomáhají k dosažení menších řezných sil a jsou velmi otěruvzdorné, což vede k dlouhé životnosti nástroje. [10]

## 2.6 Řezné podmínky při obrábění titanu

Hodnoty běžných posuvů během frézování titanu se pohybují v rozmezí od 0,2 do 0,5 mm na zub, aby nedošlo k přetížení řezného nástroje a frézky. Menší posuvy jsou vhodné pro dosažení lepší drsnosti povrchu. [11]

Hloubka řezu se běžně pohybuje od 0,25 do 0,5 mm pro lehké řezy. U hloubky řezů 1 až 1,5 mm dochází k většímu opotřebení nástroje. U hloubek řezů v rozmezí od 1,5 do 3,8 mm již dochází k velké zátěži nástroje, což vede k rychlému opotřebení. Nejčastěji se volí hloubku řezu do 1,3mm. [11]

Řezná rychlost je hlavním parametrem při obrábění titanu a je třeba ji věnovat prvořadou pozornost. Při vysokých rychlostech dochází k přehřátí a rychlému opotřebení nástroje. Doporučené hodnoty řezných rychlostí u nástroje by neměly být překročeny. Je lepší začínat od menších řezných rychlostí. [11]



### 3 Praktická část – frézování

Praktická část byla provedena v laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na Českém vysokém učení technickém v Praze.

#### 3.1 Použité stroje, přístroje a příslušenství

Podle zadání diplomové práce, byla obráběná slitina titanu na vertikální konzolové frézce FV 25 CNC A (Obr. 16) s řídicím systémem Heidenhain. Fréza (Obr. 17) s vyměnitelnými břitovými destičkami měla průměr 63 mm. Experiment byl prováděn pěti různými destičkami (Obr. 18). Údaje každé destičky jsou zobrazeny v Tab. 1. Na pracovní stůl stroje byl připevněn dynamometr (Obr. 19) od firmy Kistler, který snímal řezné síly ve třech osách. Na dynamometr byl upnut obráběný materiál pomocí šroubů a upínek. Slitina titanu byla ve tvaru kváдру (Obr. 20) o délkových rozměrech 120 mm a 36 mm a výšce 55 mm. Pro následné vyhodnocení drsnosti byl použit profilometr MarSurf PS10 (Obr. 21). Opotřebení nástroje a třísky byly hodnoceny pod digitálním mikroskopem značky VHX (Obr. 22).



Obr. 16 Konzolová frézka  
FV 25 CNC A



Obr. 18 Břitové destičky



Obr. 21 Profilometr  
MarSurf PS 10



Obr. 19 Dynamometr



Obr. 17 Frézka  
s vyměnitelnými  
destičkami



Obr. 20 Obráběný  
materiál – titan



Obr. 22 VHX Mikroskop



Jak již bylo poznamenáno, v Tab. 2 jsou uvedené destičky použité v experimentu a základní informace o nich. Čtyři druhy destiček byly používány jako zcela nové. VBD č. 2 byla vyrobena firmou Ceratizit a následně na ČVUT upravená, aby úhel čela byl 0 °.

Tab. 2 Břitové destičky použité v experimentu

Číslo	Označení destičky	Výrobce	Úhel čela [°]	Útvařeč	Povlak
1	RCKT-1204 MO-PM 4020	SANDVIK	18	ANO	ANO
2	RPHX 1204MOEN - 0	CERATIZIT/ ČVUT	0	-	BEZ
3	RPHX 1204M4SN	CERATIZIT	18	F50	PVD
4	RPHX 1204M4EN	CERATIZIT	9	M32	PVD
5	RPHX 1204MOSN	CERATIZIT	13,5	M50	PVD

I přesto, že firma Sandvik doporučuje u frézování titanu vždy použít řeznou kapalinu, v tomto experimentu obrábění bude provedeno bez ní. Ani destičky od firmy Ceratizit nebudou aplikované zcela v doporučeném prostředí. Firma Ceratizit totiž doporučuje pro obrábění za sucha použít nástroje s povlakem CVD. Jelikož řezy byly přerušované, tak v souladu s doporučením firmy byly použité nástroje s PVD povlakem.

### 3.2 Obrábění

Na samotném začátku obrábění bylo třeba zvolit řezné podmínky. Nejdříve byla zvolena hloubka třísky  $a_p$  na 1 mm. Ta byla zvolena tak, aby v případě ulomení břitové destičky nedošlo ke kontaktu mezi frézou a obráběným materiálem. Následovala volba posuvů. Byly zvoleny posuvy 0,05 mm/z, 0,1 mm/z, 0,15 mm/z a 0,2 mm/z. Poslední co bylo třeba zvolit byla řezná rychlost, která má největší vliv na opotřebení nástroje. Pro první část experimentu byly zvolené řezné rychlosti 50 m/min, 100 m/min a 150 m/min. Pro druhou část experimentu řezná rychlost byla navýšená na 200 m/min a 250 m/min. Na základě těchto zvolených řezných podmínek byly vypočteny otáčky stroje a posuvy převedeny na mm/min.

Poté následovalo upnutí všech částí potřebných k měření a obrábění. Byl vytvořen jednoduchý program v řídicím systému stroje Heidenhain, ve kterém byly použité vypočítané otáčky. Tento program se skládal ze čtyř úseků, každý s jinou hodnotou posuvu. Břitová destička byla vždy upnutá do frézy pouze jedna, a to z důvodu, aby v záběru byl pouze jeden zub, což usnadňuje vyhodnocení. Pootočení destičky bylo zaznamenáváno, a to z důvodu orientace při pozdějším





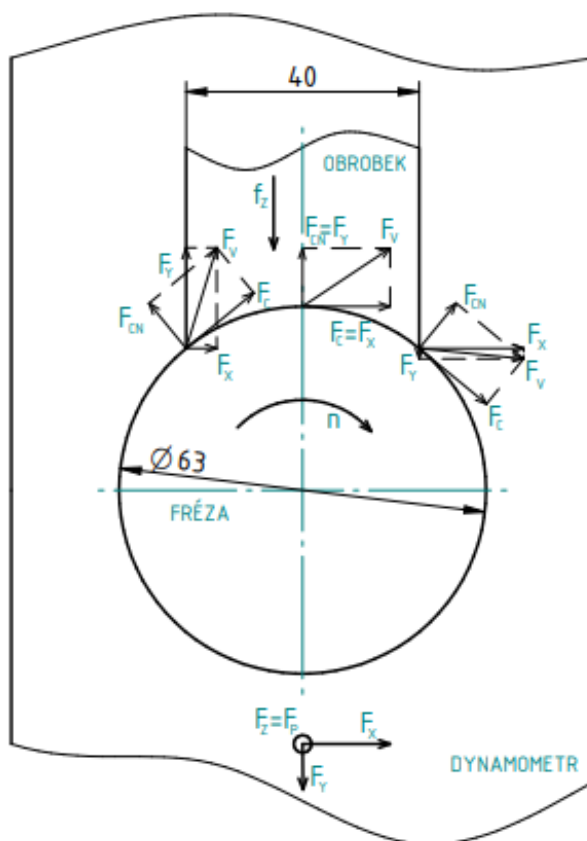
posuzování opotřebení. Následovalo samotné obrábění, během kterého byly odebírány třísky pro vyhodnocení.

### 3.3 Postup měření a vyhodnocení

#### 3.3.1 Síly

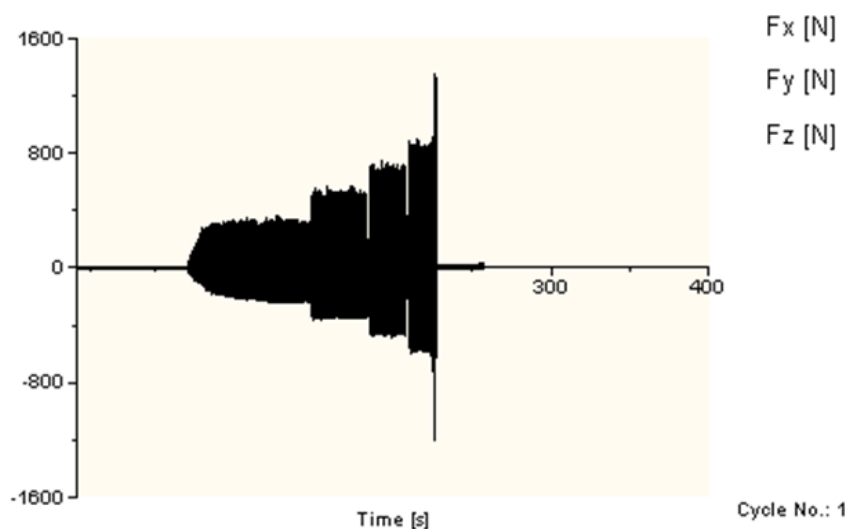
Dynamometr měřil průběh sil ve svém souřadnicovém systému, konkrétně  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Z Obr. 23 je patrné, že síla  $F_x$  odpovídá hlavní složce řezné síly právě uprostřed záběru, kde ji lze považovat za sílu  $F_c$ . Síla  $F_y$  je rovná normálové složce řezné síly také ve středu záběru, a tedy ji lze označit za složku  $F_{CN}$ . Síla  $F_z$  je pasivní složkou řezné síly a je tedy rovná  $F_p$ .

Když nástroj nezabírá přesně v ose obrobku, pak  $F_x \neq F_c$  a  $F_y \neq F_{CN}$ . Pro získání normálové a řezné síly je nutno aplikovat výpočet pomocí výsledné síly  $F_v$ .



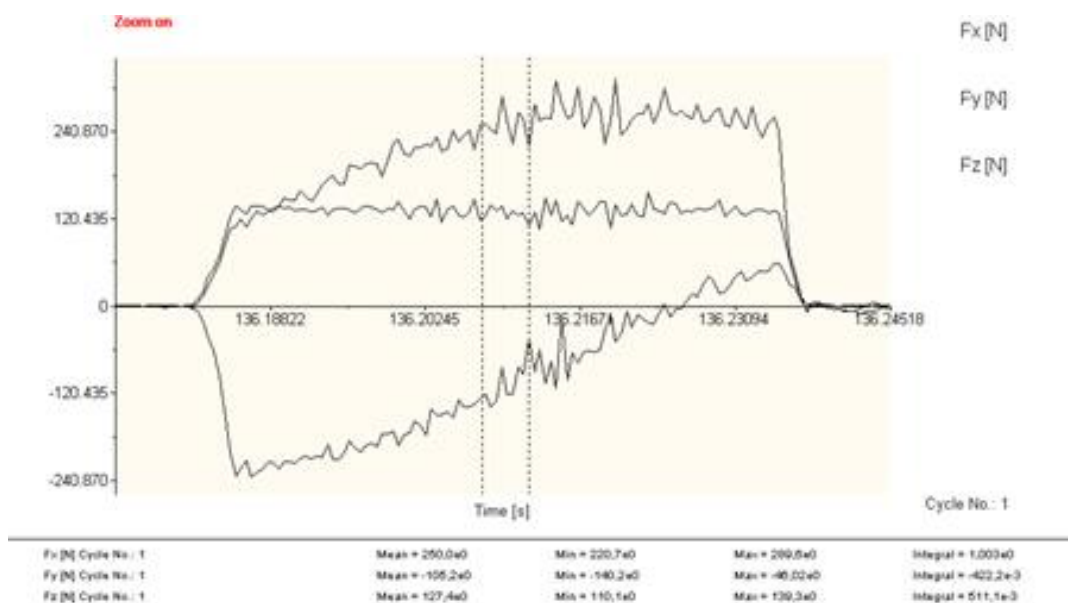
Obr. 23 Rozklad sil během obrábění

Na Obr. 24, je zobrazen průběh sil naměřený dynamometrem. Různé hodnoty sil v podobě schodů vznikly změnou rychlosti posuvu během jednoho obrábění.



Obr. 24 Vyhodnocení měření dynamometru

Protože  $F_{CN} = F_Y$  a  $F_C = F_X$  právě v ose nástroje, bylo možné změřit hodnotu sil bez jakéhokoliv přepočtu. Na Obr. 25 je zobrazen přibližný průběh sil záběru jednoho zubu a také vyhodnocená oblast, která se nachází přesně kolem středu záběru zubu. Okraje vyhodnocované oblasti byly zvolené bez výpočtu.



Obr. 25 Vyhodnocení sil působících na jeden zub

Jak jde vidět v Tab. 3, síla  $F_C$  byla vyhodnocena u deseti zubů pro každý posuv a každou řeznou rychlost a z nich byl vypočten průměr. Tabulka pouze znázorňuje, jakým způsobem bylo dosaženo průměrných hodnot a jsou v ní znázorněné síly  $F_C$  pouze pro destičku č. 1.

Tab. 3 Průměrná hodnota  $F_c$  u břitové destičky č. 1

Číslo Měření $F_c$	$v_c = 50$ [m/min]				$v_c = 100$ [m/min]				$v_c = 150$ [m/min]			
	$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
	$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
1	339	484	633	765	338	525	624	763	341	522	624	762
2	343	512	652	743	328	501	645	745	358	508	634	757
3	362	488	631	745	322	487	618	778	341	485	660	782
4	353	498	636	763	345	521	651	794	350	501	656	767
5	368	512	608	757	344	509	651	769	352	513	621	741
6	336	490	636	756	328	489	638	780	356	481	638	772
7	351	507	610	764	344	518	650	785	364	526	656	757
8	352	488	631	760	334	513	622	793	371	526	621	755
9	355	483	648	755	331	493	627	755	352	523	630	761
10	358	506	642	755	335	496	317	792	353	535	650	768
<b>Průměr</b>	<b>352</b>	<b>497</b>	<b>633</b>	<b>756</b>	<b>335</b>	<b>505</b>	<b>604</b>	<b>775</b>	<b>354</b>	<b>512</b>	<b>639</b>	<b>762</b>

Tyto vypočtené průměrné hodnoty byly zapsány do tabulky naměřených sil a dále vyhodnoceny v grafech.

Vyhodnocování pro každý nástroj zvlášť probíhalo ve dvou grafech. První graf znázorňuje závislost řezné síly na posuvu na zub pro jednotlivé řezné rychlosti. Druhý graf představuje závislost řezné síly na řezné rychlosti pro jednotlivé posuvy. Body vynesené do grafů, byly propojené mocninou funkcí, pro číselné znázornění závislosti.

Následné srovnání nástrojů probíhalo v grafech, které znázorňovaly řezné síly pro konkrétní posuv, nebo řeznou sílu. Cílem tohoto srovnání bylo zjistit, který nástroj potřebuje větší sílu pro vniknutí do materiálu.

### 3.3.2 Drsnost

Jak je uvedené v teoretické části diplomové práce, drsnost obrobeného povrchu lze hodnotit dle výškových parametrů, délkových parametrů a tvarových parametrů. V této práci hodnocení drsnosti probíhá pouze dle některých výškových parametrů.

Měření drsnosti probíhalo pomocí digitálního profilometru MarSurf PS10. Profilometr byl vždy umístěn do vodorovné polohy, s hrotem na obráběné ploše. Následně probíhalo samotné měření profilu, během kterého přístroj sám vyhodnotil největší výšky profilů  $R_z$ , střední



aritmetické úchytky profilů  $R_a$  a maximální hloubky drsností  $R_{max}$ . Toto měření bylo provedeno po každém obrábění, tedy pro každou destičku, řeznou rychlost a posuv.

Po zaznamenání hodnot naměřených profilometrem následovalo vyhodnocení, které probíhalo pomocí grafů. Jak pro střední aritmetickou úchytku profilu, tak pro největší výšky profilu i pro maximální hloubky drsností byly vždy vytvořené dva grafy. Jeden představuje závislost dané drsnosti na posuvu a druhý na řezné rychlosti. Tyto grafy jsou popsány pro každou destičku zvlášť.

Následné srovnání drsností obrobeného povrchu titanu, probíhalo v grafech střední aritmetické úchytky profilu v závislosti na řezné rychlosti a na posuvu. Ke srovnání byla vybrána střední aritmetická úchytky profilu právě proto, že je nejčastěji používána.

### 3.3.3 Třísky

Třísky byly odebrány během obrábění každé destičky pro každý posuv a řeznou rychlost. Následně bylo provedeno jejich ohodnocení a srovnání. Vybrané třísky a třísky, na kterých bylo spálení viditelné pouhým okem, byly následně přezkoumané pod mikroskopem.

Z teoretické části je patrné, že během obrábění titanu dochází k tvorbě tvářené, soudržné třísky a to plynulé, nebo článkovité. Také je důležité ohodnotit hrany třísky po obrábění, které mohou být plynulé, vlnité, nebo pilovité. Bylo také hodnoceno zbarvení třísek, a to podle čtyř skupin.: Třísky bez změny barvy, což znamená, že barva třísky je stejná jako barva neobrobeného titanu. Dále třísky se světle hnědým zbarvením, s hnědým zbarvením a modré třísky. Celkové ohodnocení třísky bylo provedeno dle tří kritérií, a to dle soudržnosti třísky, hrany třísky a barvy třísky. Názorné zobrazení kritérií je v Tab. 4.

Tab. 4 Kritéria pro hodnocení třísky

Soudržnost třísky	Hrana třísky	Barva třísky
<ul style="list-style-type: none"><li>• plynulá (nepřerušovaná)</li><li>• článkovitá</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• plynulá</li><li>• vlnitá</li><li>• pilovitá</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• bez změny barvy</li><li>• světle hnědá</li><li>• hnědá</li><li>• modrá</li></ul>

Obrázky třísek použité v diplomové práci jsou zmenšené z důvodu přehlednosti při srovnávání. To však nijak neomezuje detailní zobrazení jednotlivých stran třísek. Symbol  $\updownarrow$  u některých obrázků znamená, že tříska byla vyfocena z druhé strany.



### 3.3.4 Opotřebení vyměnitelné břitové destičky

Jak bylo uvedeno v teoretické části intenzita opotřebení břitu se zkouší pomocí dlouhodobé zkoušky trvanlivosti, považuje se za základní zkoušku, podle které se posuzuje míra objektivit ostatních zkoušek na obrobitelnost či řezivost. Zkoušky trvanlivosti a hodnocení řezivosti dle podrobného sledování intenzity opotřebení břitu nebylo předmětem této diplomové práce. I přesto opotřebení nástroje bylo sledováno.

Každá VBD byla po každém řezu prozkoumána pod mikroskopem a následně vyhodnocená. Vyhodnocení probíhalo ve dvou pohledech na nástroj. Jeden pohled byl na hřbet nástroje a druhý na čelo nástroje. Hodnocení bylo provedeno pouze slově, a to tak, že se srovnala míra opotřebení destiček po obrábění při různých řezných parametrech. Hodnoceno bylo opotřebení povlaku a opotřebení břitu.

Srovnání probíhalo pouze na vizuálním posouzení.

Stejně jako obrázky třísek, i obrázky jednotlivých destiček jsou zmenšené z důvodu přehlednosti při srovnávání.





## 4 Naměřené hodnoty a vyhodnocení

### 4.1 VBD č. 1 – RCKT-1204 MO-PM 4020

Kruhová vyměnitelná břitová destička RCKT-1204 MO-PM 4020 byla vyrobena firmou Sandvik s úhlem čela 18°, s útvařečem a povlakem.

Během obrábění titanu destičkou RCKT-1204 MO-PM 4020 bylo zaznamenáno mírné namotávání třísky na frézu. Byla vyzorována závislost namotávání třísky na posuvu, kdežto řezná rychlost na tento jev neměla vliv. Čím byl menší posuv, tím více se tříška namotávala. U posuvu 0,2 mm/z už nedocházelo k téměř žádnému namotávání.

Řezná rychlost ale vliv měla na nažhavení destičky, a tedy na teplotu, která nebyla v tomto experimentu měřena. U řezných rychlostí 100 m/min a 150 m/min byla vyzorována světle oranžová barva destičky.

#### 4.1.1 Síly

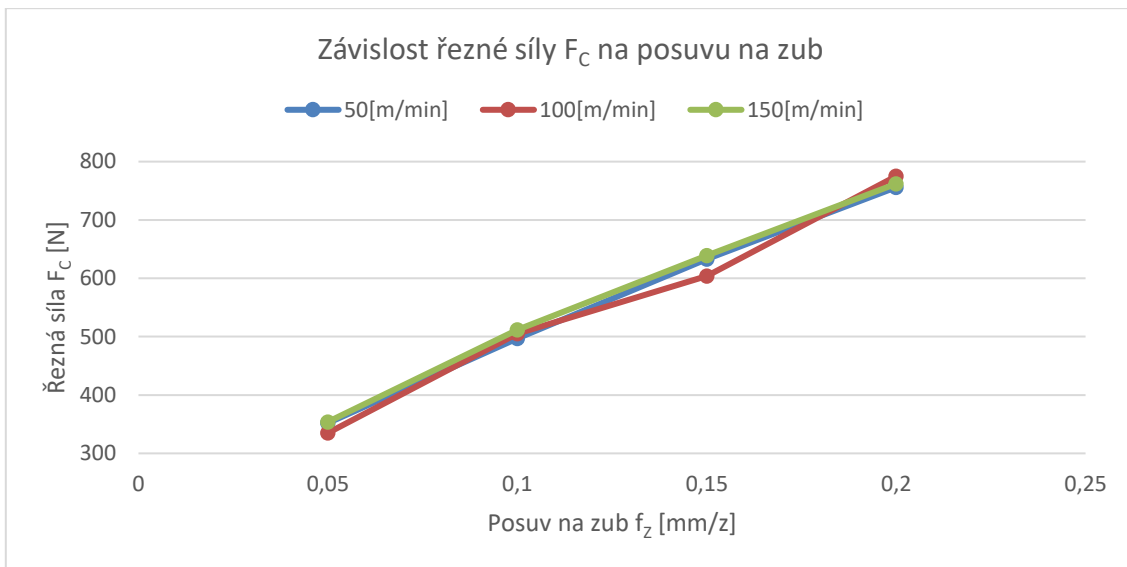
Tab. 5 Naměřené hodnoty sil – RCKT-1204 MO-PM 4020

Řezné podmínky:		$v_c = 50$ [m/min]				$v_c = 100$ [m/min]				$v_c = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Síly	$F_c$ [N]	352	497	633	756	335	505	604	775	354	512	639	762
	$F_{cN}$ [N]	266	297	328	361	250	328	341	479	224	305	287	401
	$F_p$ [N]	316	359	421	451	307	379	407	457	328	394	422	469

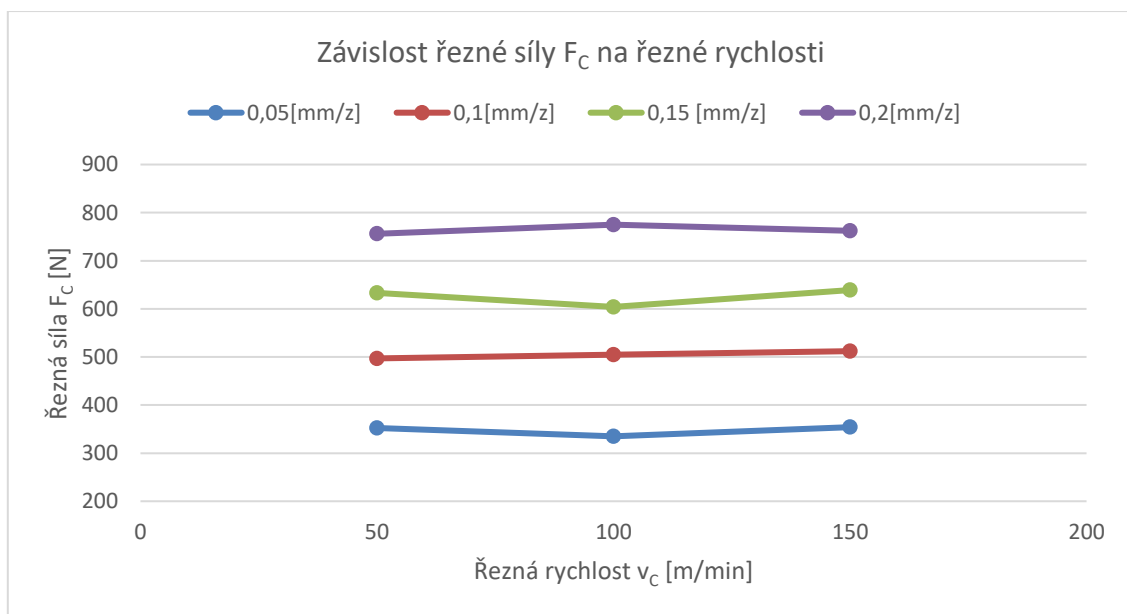
Jak je patrné z naměřených hodnot sil (Tab. 5), největší je síla řezná, což se shoduje s literaturou. Pasivní síly jsou vysoké, a to z důvodu použití kruhové břitové destičky, která má velký poloměr, což způsobuje odtlačování nástroje od materiálu, a tedy vzrůst pasivní síly.

Z naměřených sil lze sestavit grafy. Ty nejvýznamnější budou vykazovat závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$  a řezné rychlosti  $v_c$ .

Na prvním grafu (Obr. 26) je vidět, že čím je větší posuv, tím větší jsou síly. Toto platí pro všechny řezné rychlosti. Řezná rychlost  $v_c=100$  m/min, kolísá více než jiné řezné rychlosti.

Obr. 26 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub

Na druhém grafu [Obr. 27] je znázorněná závislost řezné síly na řezné rychlosti pro různé posuvy. Vidíme, že s rostoucí řeznou rychlostí zůstávají síly téměř konstantní.

Obr. 27 Závislost řezné síly  $F_c$  na řezné rychlosti

Z obou grafů je patrné, že řezné síly se nemění rovnoměrně. Je také vidět, že změna posuvu má daleko větší vliv na změnu řezné síly než změna řezné rychlosti. Křivky v grafu byly proložené mocninnou funkcí pro lepší srovnání. V Tab. 6 lze vidět, že funkce závislosti na posuvu je téměř stejná pro všechny tři řezné rychlosti, a sice rostoucí. Hodnota exponentu se liší o necelých 6 %. Z funkce závislosti na rychlosti je patrné, že exponent je velmi nízký, u posuvu 0,05 mm/z dokonce záporný.





Tab. 6 Funkce závislosti břitové destičky RCKT-1204 MO-PM 4020

Funkce závislosti na posuvu		Funkce závislosti na rychlosti	
Rychlost [m/min]	Rovnice	Posuv [mm/z]	Rovnice
50	$F_C = 1803 \cdot f_z^{0,55}$	0,05	$F_C = 351 \cdot v_C^{-0,003}$
100	$F_C = 1921 \cdot f_z^{0,58}$	0,1	$F_C = 447 \cdot v_C^{0,03}$
150	$F_C = 1827 \cdot f_z^{0,55}$	0,15	$F_C = 624 \cdot v_C^{0,001}$
		0,2	$F_C = 729 \cdot v_C^{0,01}$

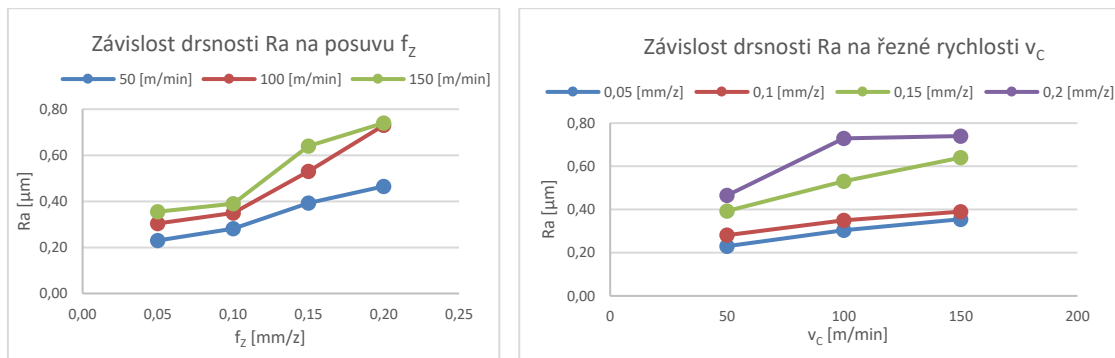
#### 4.1.2 Drsnosti

Z naměřených hodnot drsností (Tab. 7) je patrné, že střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ , největší výška profilu  $R_z$  a maximální hloubka drsnosti  $R_{max}$  se obecně zvyšují s rostoucím posuvem, a s rostoucí rychlostí. Že drsnost roste s posuvem je vcelku logické, protože dochází k větším rozestupům mezi dvěma záběry a tedy pozůstalý vroubek musí mít větší výšku. Drsnost roste i se stoupající řeznou rychlostí, což může být způsobené různými faktory. Roli může hrát zvýšená teplota, která může mít za následek vznik nárůstku, který pak zanechává nerovnoměrný povrch. S rostoucí řeznou rychlostí dochází ke vzniku větších vibrací, což také může nést zhoršení konečné drsnosti povrchu.

Tab. 7 Naměřené hodnoty drsností – RCKT-1204 MO-PM 4020

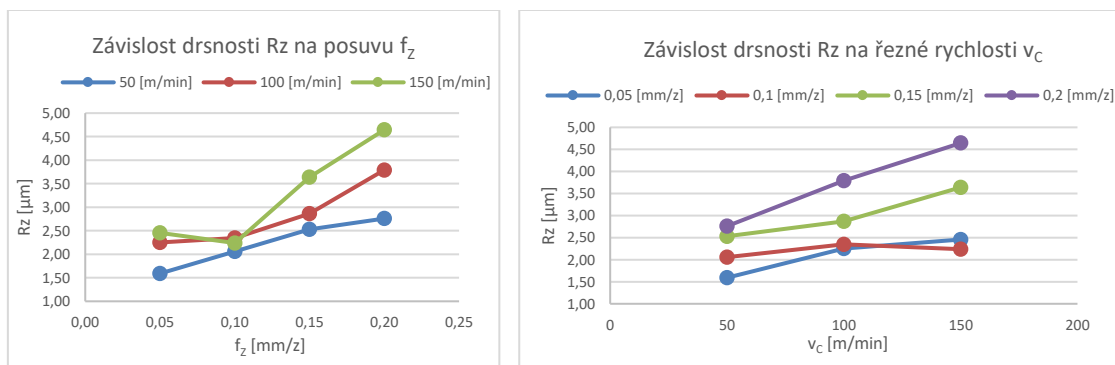
Řezné podmínky:		$v_C = 50$ [m/min]				$v_C = 100$ [m/min]				$v_C = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_P = 1$ [mm]				$a_P = 1$ [mm]				$a_P = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Drsnosti	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,23	0,28	0,39	0,47	0,30	0,35	0,53	0,73	0,36	0,39	0,64	0,74
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,59	2,06	2,53	2,76	2,25	2,35	2,87	3,79	2,46	2,24	3,64	4,64
	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,40	2,43	3,32	3,88	2,74	2,43	3,55	4,08	3,09	3,10	4,20	5,31

Na levém grafu (Obr. 28) lze vidět, že drsnost  $R_a$  při řezné rychlosti 50 m/min roste lineárněji, než ostatní rychlosti. Řezné rychlosti 100 m/min a 150 m/min zaznamenávají největší rozdíl v drsnosti mezi posuvy 0,1 mm/z a 0,15 mm/z. Z pravého grafu je patrné, že závislost drsnosti  $R_a$  na řezné síle roste téměř lineárně. Při posuvu 0,2 mm/z je růst drsnosti  $R_a$  nelineární a pro řeznou rychlost 100 m/min a 200 m/min je drsnost obrobeného povrchu téměř stejná.



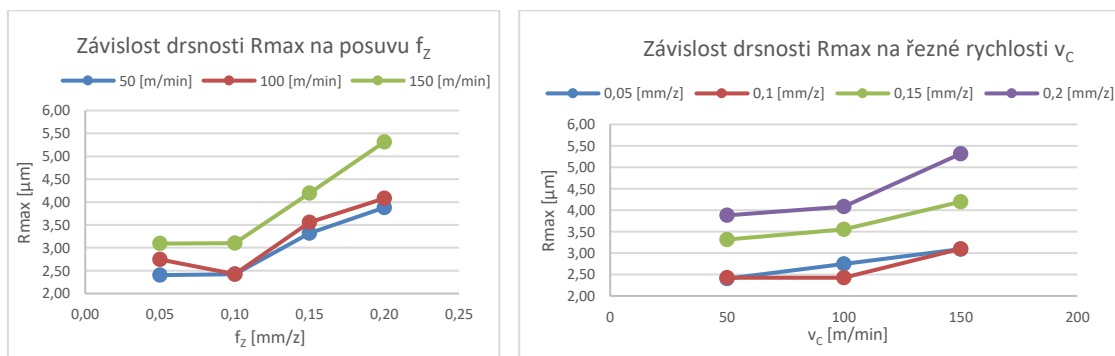
Obr. 28 Závislosti drsnosti Ra na posuvu a řezné rychlosti

Drsnost Rz u řezné rychlosti 150 m/min při posuvu 0,1 mm/z je menší, než při posuvu 0,05 mm/z, což je v rozporu s rychlostmi 50 m/min a 100 m/min. Naopak u řezné rychlosti 150 m/min dosahujeme lepší drsnosti Rz u posuvu 0,1 mm/z než 0,05 mm/z. Pro ostatní řezné rychlosti a posuvy platí, že s rostoucí hodnotou řezných parametrů, roste drsnost Rz. Obr. 29.



Obr. 29 Závislosti drsnosti Rz na posuvu a řezné rychlosti

Největší hodnoty Rmax bylo dosaženo u řezné rychlosti 150 m/min, při posuvu 0,2 mm/z. Zajímavostí je, že drsnost Rmax vzrostla mezi hodnotami 100 m/min a 150 m/min o 18 %, zatímco mezi hodnotami 50 m/min a 100 m/min pouze o 5,7 %. Pro všechny řezné rychlosti při posuvech 0,05 mm/z a 0,1 mm/z je hodnota drsnosti Rmax téměř stejná. Obr. 30.

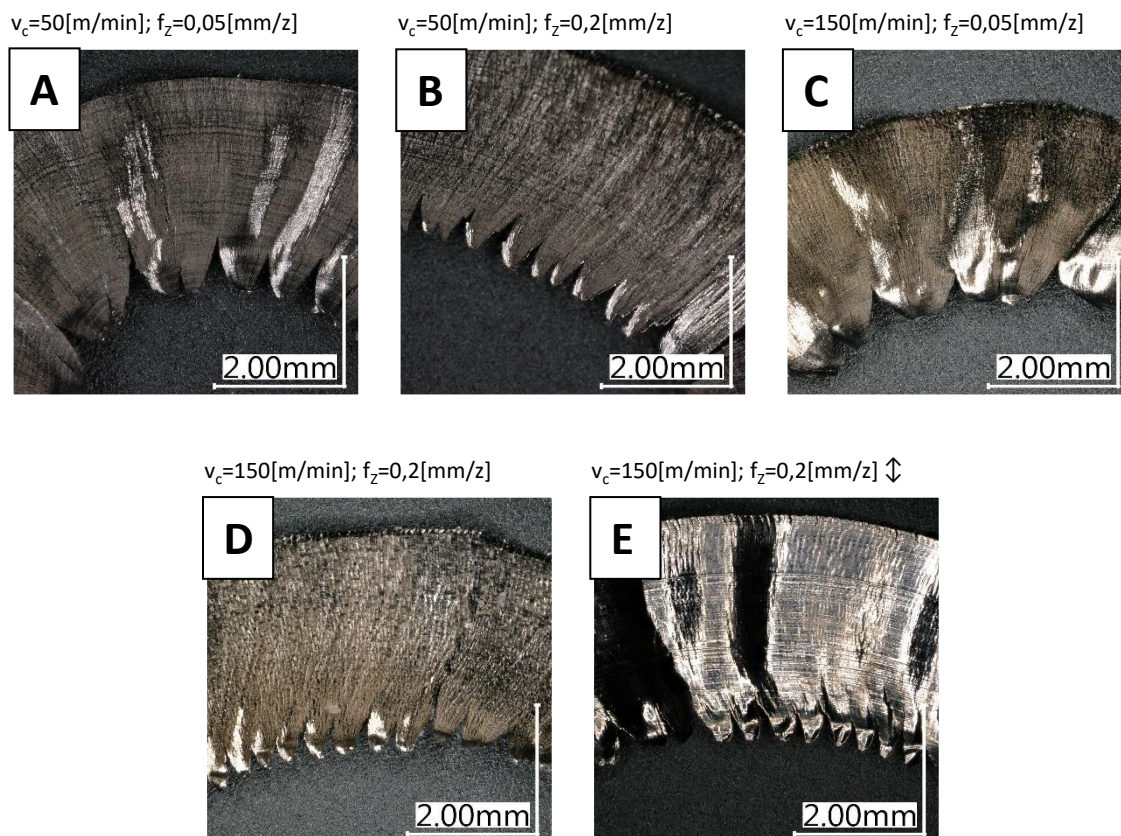


Obr. 30 Závislosti drsnosti Rmax na posuvu a řezné rychlosti



### 4.1.3 Třísky

Jak je patrné z fotografií (Obr. 31), potvrdilo se, že hrana třísky titanu má pilkovitý nebo vlnovitý tvar. Při menších posuvech bylo zaznamenáno mírné namotávání se třísky na frézu, a tedy tříska byla částečně nepřerušovaná. U větších posuvů tříska byla článkovitá a nedocházelo téměř k žádnému namotávání. Hrana třísky byla více ovlivněna posuvem než řeznou rychlostí. U posuvů 0,05 mm/z lze vidět, že hrana třísky je vlnitá. U posuvů 0,2 mm/z už je patrný náznak pilovitého tvaru. Barva třísky při obrábění břitovou destičkou RCKT-1204 MO-PM 4020 se se zvyšováním řezné rychlosti mění do hněda. Při řezné rychlosti 150 m/min lze zaznamenat již světle hnědou barvu. Na Obr. E je zobrazena druhá strana třísky, na které nevidíme ani náznak hnědé barvy, z čehož lze odvodit, že povrch obráběného materiálu není spálen.

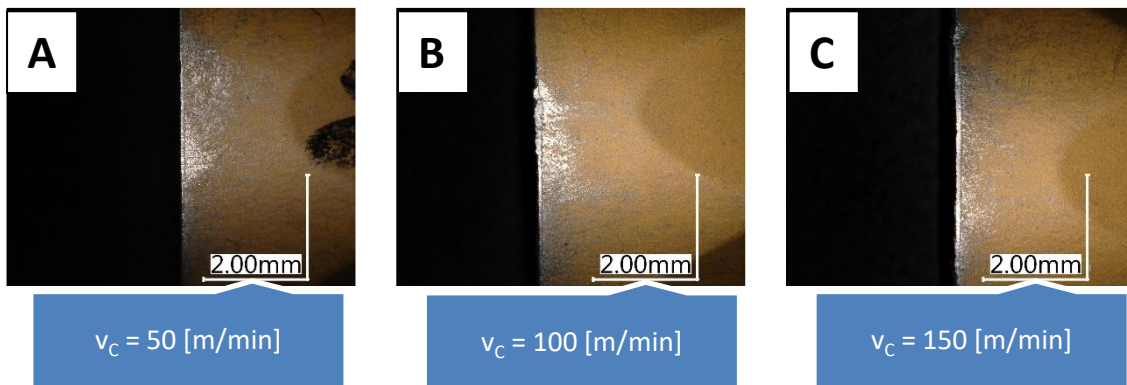


Obr. 31 Hodnocení třísky RCKT-1204 MO-PM 4020



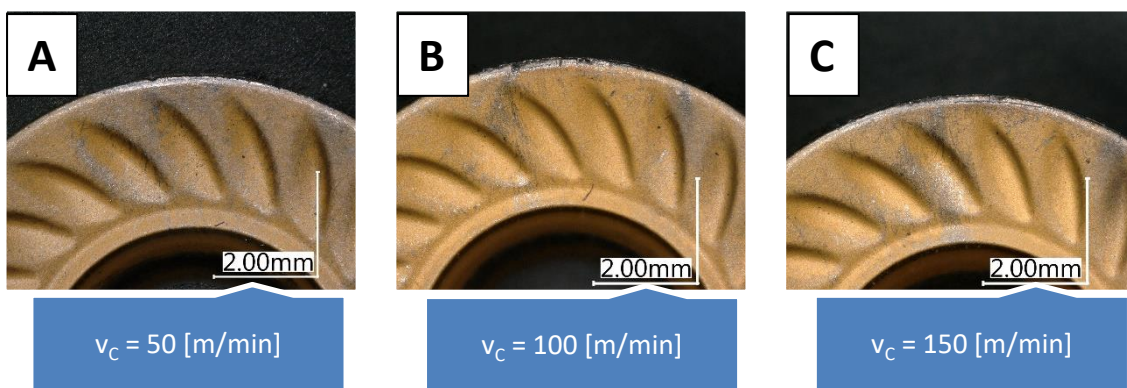
#### 4.1.4 Opotřebení

Níže na Obr. 32 je zobrazeno opotřebení hřbetu břitových destiček v závislosti na řezné rychlosti. Je patrné, že došlo k částečnému setření povlaku. Rádus břitu je také opotřeben, avšak opotřebení je natolik malé, že ho nešlo změřit.



Obr. 32 Opotřebení hřbetu nástroje – RCKT-1204 MO-PM 4020

Ke stejnému poškození vrstvy povlaku došlo na hřbetu i na čele (Obr. 33). Podle důkladného prozkoumání řezných destiček pod mikroskopem není možné určit, která destička byla opotřebená více.



Obr. 33 Opotřebení čela nástroje – RCKT-1204 MO-PM 4020



## 4.2 VBD č. 2 – RPHX 1204MOEN – 0

Kruhová vyměnitelná břitová destička RPHX 1204MOEN – 0 byla upravená na ČVUT a byl jí stanoven úhel čela  $0^\circ$ , byla bez povlaku a byla leštěná.

Během obrábění titanu destičkou RPHX 1204MOEN - 0 s nulovým úhlem čela byla vyzorována závislost posuvu na namotávání se třísky na frézu. S rostoucím posuvem docházelo k větší lámavosti třísky. U posuvu 0,2 mm/z, se už tříška odlamovala a nedocházelo k namotávání.

Destička u všech řezných rychlostí zachovala stejnou barvu a nijak nerudla.

### 4.2.1 Síly

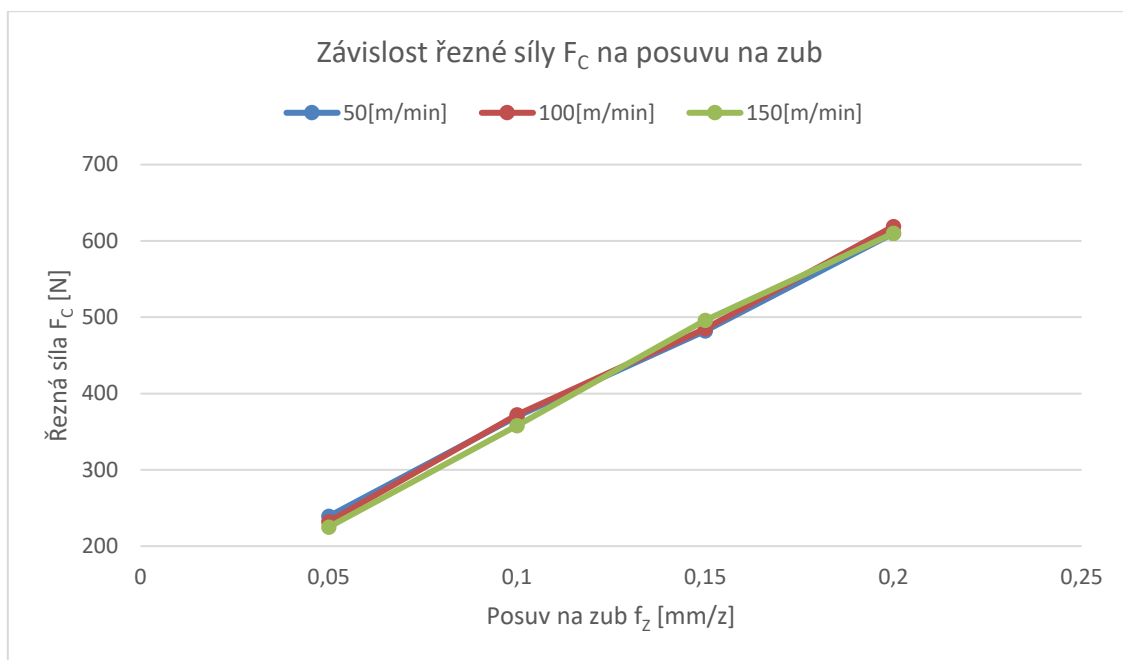
Tab. 8 Naměřené hodnoty sil – RPHX 1204MOEN – 0

Řezné podmínky:		$v_c = 50$ [m/min]				$v_c = 100$ [m/min]				$v_c = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Síly	$F_c$ [N]	239	370	482	610	232	372	485	619	225	358	496	610
	$F_{CN}$ [N]	98	134	159	165	106	141	218	156	97	158	203	231
	$F_p$ [N]	142	179	200	226	139	178	186	236	124	145	193	238

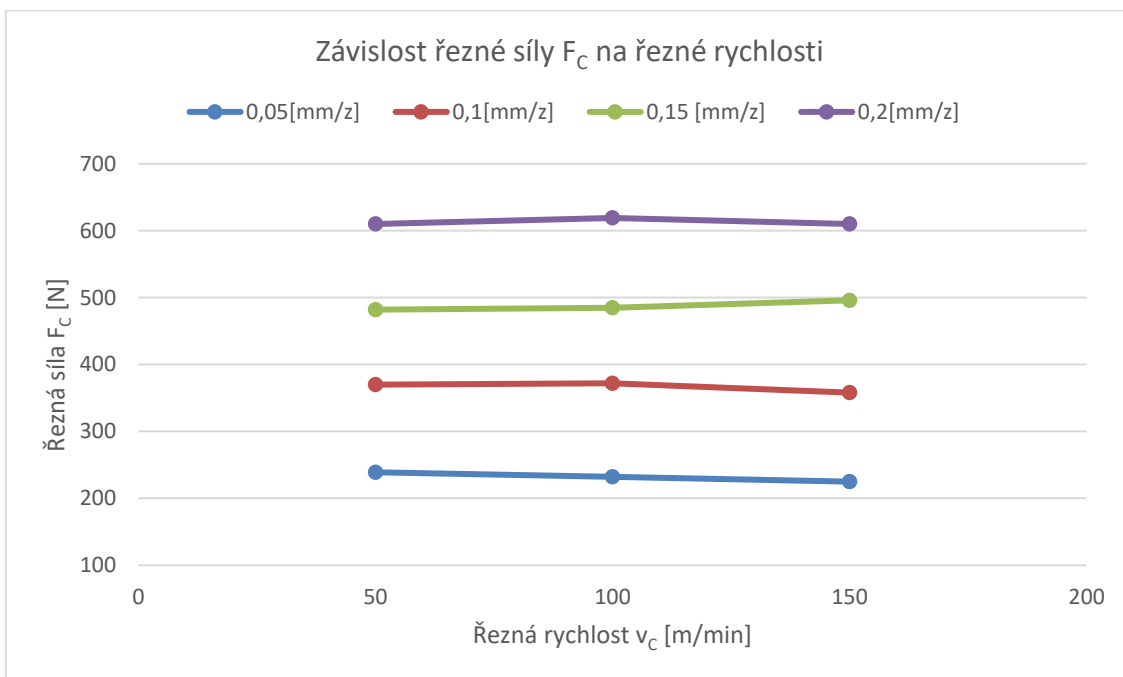
Také u druhé břitové destičky se potvrdilo, že ze všech naměřených hodnot sil (Tab. 8) je největší síla řezná.

Z naměřených sil byly sestaveny grafy, které vykazují závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$  a řezné rychlosti  $v_c$ .

Z prvního grafu (Obr. 34) lze vyčíst, že síly jsou téměř identické pro každý posuv nezávisle na řezné rychlosti a hlavně, že síly s rostoucím posuvem také rostou. Při navýšení posuvu o 100 % z 0,1 mm/z na 0,2 mm/z došlo ke zvýšení řezné síly přibližně o 40 %.

Obr. 34 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub

Na druhém grafu (Obr. 35) je znázorněná závislost řezné síly na řezné rychlosti pro různé posuvy. Vidíme, že s rostoucí řeznou rychlostí zůstávají síly téměř konstantní. Zatímco u obrábění posuvem 0,05 mm/z se řezné síly pohybovaly kolem 230N, u obrábění posuvem 0,2 mm/z byly přibližně 615 N.

Obr. 35 Závislost řezné síly  $F_c$  na řezné rychlosti



Křivky obou grafů byly proloženy mocninnou funkcí pro lepší srovnání. V Tab. 9 lze vidět, že funkce závislosti na posuvu je téměř stejná pro všechny tři řezné rychlosti. Hodnota exponentu se liší o 9 %, což je relativně málo. Z funkce závislosti na rychlosti je patrné, že exponent je velmi nízký, u posuvů 0,05 a 0,1 mm/z dokonce záporný.

Tab. 9 Funkce závislosti břitové destičky RPHX 1204MOEN - 0

Funkce závislosti na posuvu		Funkce závislosti na rychlosti	
Rychlost [m/min]	Rovnice	Posuv [mm/z]	Rovnice
50	$F_C = 1744 \cdot f_z^{0,66}$	0,05	$F_C = 295 \cdot v_C^{-0,05}$
100	$F_C = 1866 \cdot f_z^{0,70}$	0,1	$F_C = 412 \cdot v_C^{-0,03}$
150	$F_C = 1939 \cdot f_z^{0,72}$	0,15	$F_C = 437 \cdot v_C^{0,02}$
		0,2	$F_C = 606 \cdot v_C^{0,002}$

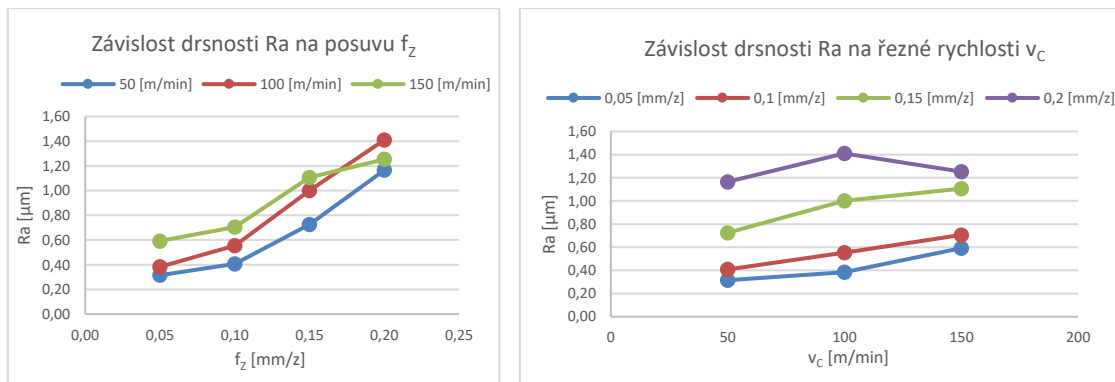
#### 4.2.2 Drsnosti

I u druhé destičky se potvrdilo, že střední aritmetická úchylna profilu  $R_a$ , největší výška profilu  $R_z$  i maximální hloubka drsnosti  $R_{max}$  se obecně zvyšují s rostoucím posuvem a s rostoucí rychlostí. Viz Tab. 10

Tab. 10 Naměřené hodnoty drsností – RPHX 1204MOEN – 0

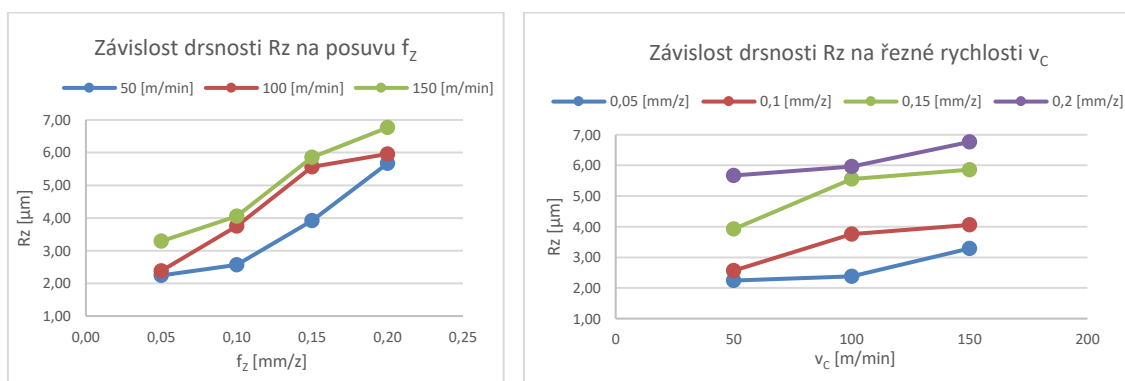
Řezné podmínky:	$v_c = 50$ [m/min]				$v_c = 100$ [m/min]				$v_c = 150$ [m/min]				
	$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]				
	$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Drsnosti	$R_a$ [μm]	0,32	0,41	0,73	1,17	0,38	0,55	1,00	1,41	0,59	0,71	1,11	1,25
	$R_z$ [μm]	2,24	2,57	3,92	5,67	2,38	3,76	5,56	5,96	3,29	4,06	5,86	6,77
	$R_{max}$ [μm]	2,33	2,81	4,26	6,20	3,29	4,24	5,97	6,45	3,49	4,99	6,32	7,43

Na prvním grafu (Obr. 36) lze zaznamenat, že u všech řezných rychlostí křivky drsnosti  $R_a$  v závislosti na posuvu mají exponenciální závislost. Tuto závislost narušuje pouze drsnost obrobené plochy při posuvu 0,2 mm/z, kde je  $R_a$  nižší, než při rychlosti 100 m/min. U posuvu 0,2 mm/z také došlo k poklesu drsnosti při navýšení řezné rychlosti z 100 m/min na 150 m/min.



Obr. 36 Závislosti drsnosti Ra na posuvu a řezné rychlosti

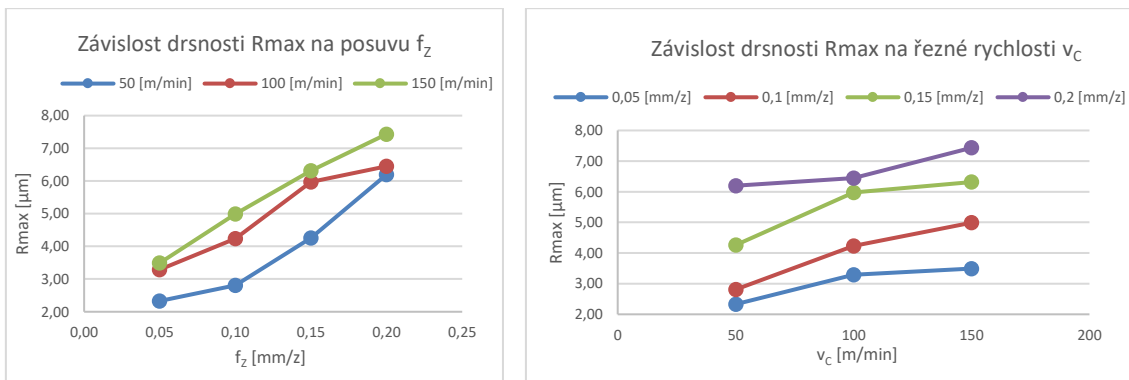
Na grafech drsností největší výšky profilu Rz (Obr. 37), při posuvech 0,1 mm/z a 0,15 mm/z je rozdíl mezi parametrem Rz pro řezné rychlosti 50 m/min a 100 m/min 31 %, zatímco při posuvech 0,05 mm/z a 0,2 mm/z je rozdíl v Rz pouze 5 %. Při řezné rychlosti 100 m/min byla zaznamenána téměř stejná hodnota drsnosti při posuvu 0,15 mm/z 0,2 mm/z.



Obr. 37 Závislosti drsnosti Rz na posuvu a řezné rychlosti

Graf, který zobrazuje největší výšku profilu Rmax (Obr. 38), představuje nejmenší rozdíl v drsnosti Rmax při posuvu 0,2 mm/z mezi rychlostmi 50 m/min a 100 m/min. Rozdíl tvoří pouze 4 %. U zbylých posuvů rozdíl je kolem 30 %. Naopak při srovnání řezných rychlostí 100 m/min a 150 m/min, nejmenší rozdíl v drsnosti Rmax je při posuvu 0,05 mm/z a tvoří necelých 6 %. U ostatních posuvů rozdíl je kolem 10 %. Nejmenší změnu v drsnosti Rmax lze zaznamenat na grafu vpravo při zvýšení řezné rychlosti z 50 m/min na 100 m/min u posuvu 0,2 mm/z.

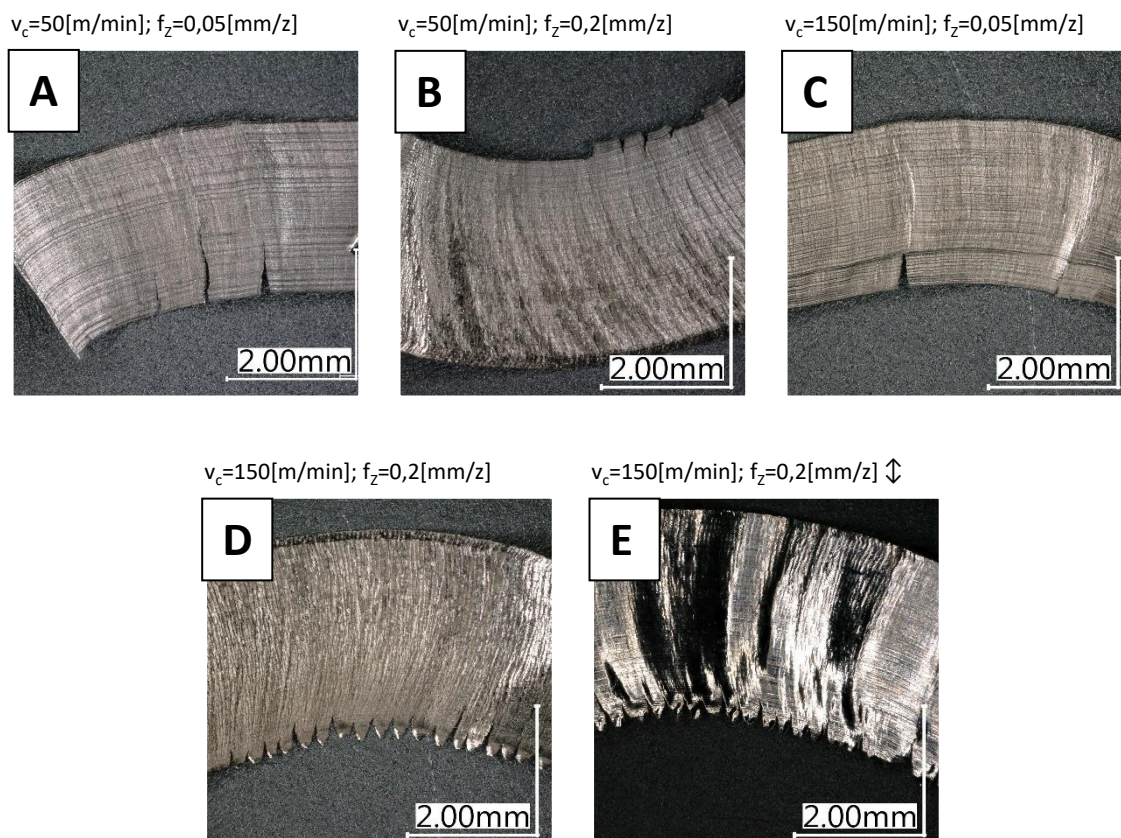




Obr. 38 Závislosti drsnosti  $R_{max}$  na posuvu a řezné rychlosti

### 4.2.3 Třísky

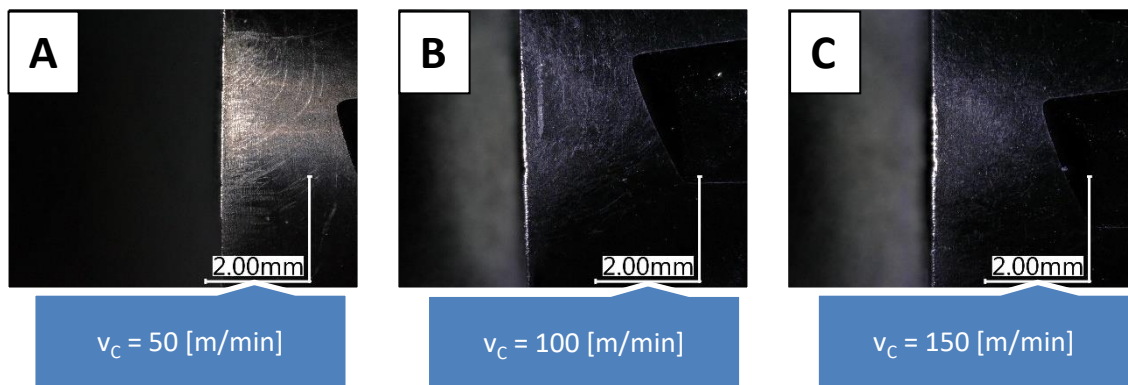
Třísky, které byly odebrány během obrábění titanu destičkou RPHX 1204MOEN - 0 lze vidět na Obr. 39. Při menších posuvech bylo zaznamenáno mírné namotávání se třísky na frézu, a tedy tříska byla částečně nepřerušovaná. U větších posuvů tříska byla článkovitá a nedocházelo téměř k žádnému namotávání. Na Obr 39 A a C, tedy u nižších posuvů vidíme, že tříska je plynulá. Na Obr. 39 B lze vidět jemný náznak vlnitosti. A na Obr. 39 D již vidíme pilovitý tvar hrany třísky. U řezné rychlosti 150  $\text{m/min}$  lze vyzorovat mírné zabarvení třísek do hněda. Na Obr. 39 E je druhá strana třísky, na které není ani náznak hnědé barvy.



Obr. 39 Hodnocení třísky RPHX 1204MOEN – 0

#### 4.2.4 Opotřebení

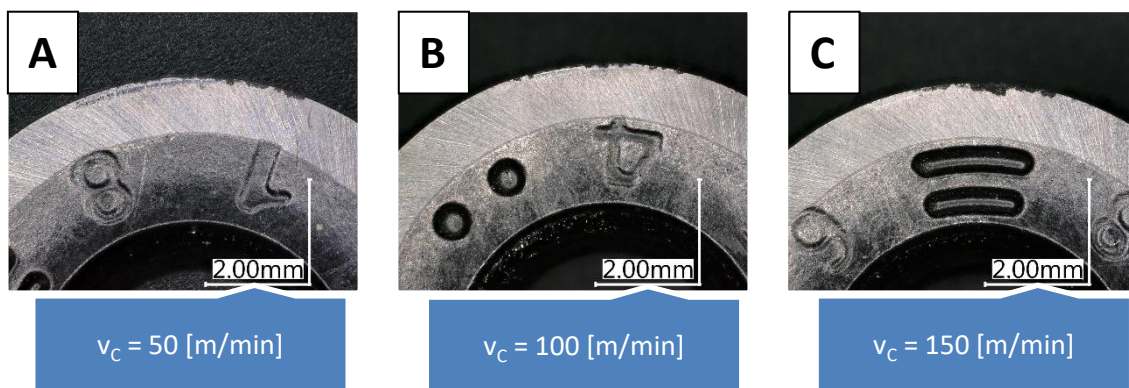
Snímek hřbetu nástroje (Obr. 40) pro řeznou rychlost 50 m/min byl pořízen s jiným osvětlením než snímky pro jiné řezné rychlosti. Tento fakt ale nemá vliv na posuzování opotřebení břitové destičky. Destička je bez povlaku, avšak mírné škrábance jsou nejvíce viditelné po obrábění řeznou rychlostí 50 m/min. Opotřebení ostří nástroje roste s řeznou rychlostí.



Obr. 40 Opotřebení hřbetu nástroje – RPHX 1204MOEN – 0



Břítová destička RPHX 1204MOEN - 0 má úhle čela  $0^\circ$  a i to může být důvodem lepší viditelnosti opotřebení. Stejně jako u hřbetu nástroje i u čela, je viditelná závislost opotřebení na řezné rychlosti. S rostoucí řeznou rychlostí roste opotřebení. Obr. 41.



Obr. 41 Opotřebení čela nástroje – RPHX 1204MOEN – 0

### 4.3 VBD č. 3 – RPHX 1204M4SN-F50

Kruhová vyměnitelná břítová destička RPHX 1204M4SN-F50 byla vyrobena firmou CERATIZIT, měla úhel čela  $18^\circ$ , utvařec F50, povlak PVD a byla zaoblená a zkosená.

Během obrábění titanu destičkou RPHX 1204M4SN-F50 tříška se nenamotávala na frézu téměř vůbec u žádných řezných rychlostí při žádných posuvech.

Barva destičky zůstala zachována při měnících se řezných rychlostech, a tedy nedocházelo k rozžhavení destičky natolik, aby to bylo viditelné okem.

#### 4.3.1 Síly

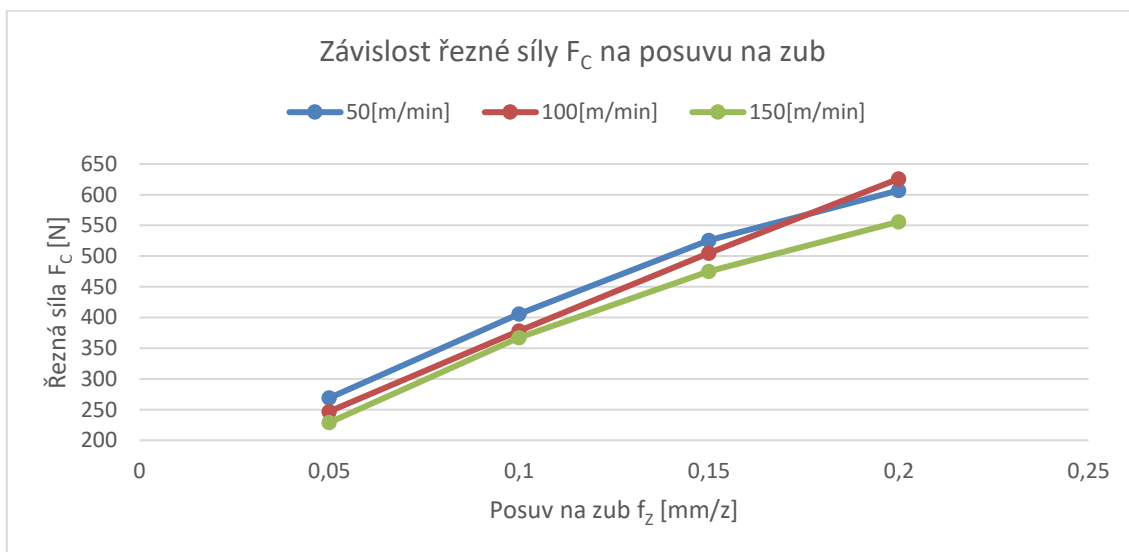
Tab. 11 Naměřené hodnoty sil – RPHX 1204M4SN-F50

Řezné podmínky:		$v_c = 50$ [m/min]				$v_c = 100$ [m/min]				$v_c = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Síly	$F_c$ [N]	269	406	526	607	247	378	505	626	229	367	475	556
	$F_{CN}$ [N]	183	215	215	238	136	168	283	235	116	161	229	240
	$F_p$ [N]	205	237	244	293	174	219	243	276	157	209	263	318



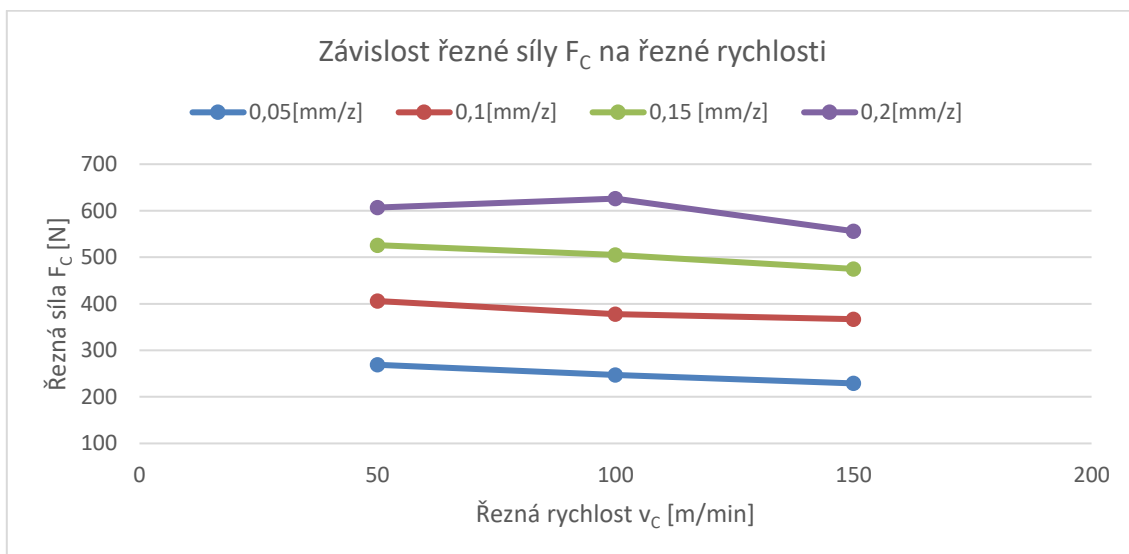
I třetí břitová destička prokázala, že největší síla ze všech je síla řezná (Tab. 11). Z velikosti naměřených sil byly sestavené grafy znázorňující závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$  a řezné rychlosti  $v_c$ .

U destičky RPHX 1204M4SN-F50 z prvního grafu (Obr. 42) lze zaznamenat silný nárůst řezných sil, při navyšování posuvu. Také si lze všimnout, že pro uvedené posuvy největší síla byla zaznamenána u řezné rychlosti 50 m/min a naopak nejmenší u 150 m/min.



Obr. 42 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub

Z druhého grafu (Obr. 43) lze vyčíst, že řezná síla s rostoucí řeznou rychlostí jasně klesá. Pouze u posuvu 0,2 mm/z mezi rychlostmi 50 m/min a 100 m/min došlo k mírnému růstu, což může být zapříčiněno tvorbou nárůstku během obrábění.



Obr. 43 Závislost řezné síly  $F_c$  na řezné rychlosti



V grafech lze zaznamenat, že změna posuvu má daleko větší vliv na změnu řezné síly, než změna řezné rychlosti. Křivky v grafu byly proloženy mocninnou funkcí pro lepší znázornění. V Tab. 12 lze vidět, že funkce závislosti na posuvu pro všechny tři řezné rychlosti si velmi podobají. Hodnota exponentu se liší o 11 %. Z funkce závislosti na rychlosti je patrné, že je exponent záporný, tedy, že křivky klesají.

Tab. 12 Funkce závislosti břitové destičky RPHX 1204M4SN-F50

Funkce závislosti na posuvu		Funkce závislosti na rychlosti	
Rychlost [m/min]	Rovnice	Posuv [mm/z]	Rovnice
50	$F_C = 1597 \cdot f_z^{0,60}$	0,05	$F_C = 474 \cdot v_C^{-0,14}$
100	$F_C = 1805 \cdot f_z^{0,68}$	0,1	$F_C = 583 \cdot v_C^{-0,09}$
150	$F_C = 1595 \cdot f_z^{0,64}$	0,15	$F_C = 749 \cdot v_C^{-0,09}$
		0,2	$F_C = 804 \cdot v_C^{-0,07}$

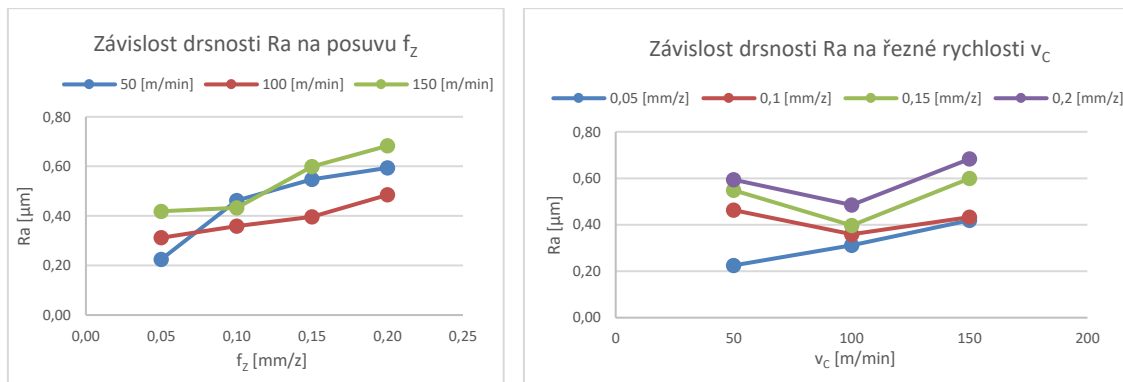
#### 4.3.2 Drsnosti

Také zde se potvrdilo, že střední aritmetická úchylna profilu  $R_a$ , největší výška profilu  $R_z$  imaximální hloubka drsnosti  $R_{max}$  se obecně zvyšují s rostoucím posuvem a s rostoucí rychlostí. Viz Tab. 13.

Tab. 13 Naměřené hodnoty drsností – RPHX 1204M4SN-F50

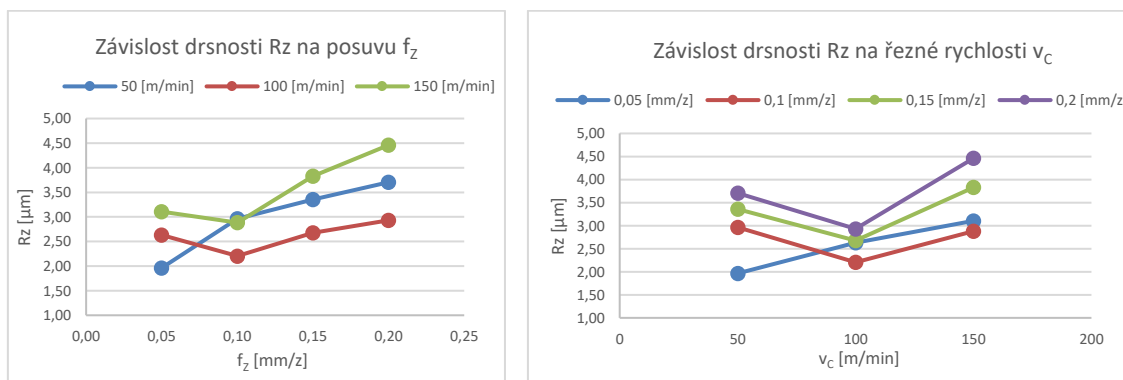
Řezné podmínky:		$v_C = 50$ [m/min]				$v_C = 100$ [m/min]				$v_C = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_P = 1$ [mm]				$a_P = 1$ [mm]				$a_P = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Drsnosti	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,23	0,46	0,55	0,59	0,31	0,36	0,40	0,49	0,42	0,43	0,599	0,68
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,96	2,96	3,36	3,71	2,63	2,21	2,68	2,93	3,10	2,88	3,828	4,46
	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,18	3,56	3,72	3,90	3,48	2,59	3,01	3,33	3,53	3,11	4,592	4,94

Z grafu (Obr. 44) lze vyčíst, že zde došlo k prudkému navýšení drsnosti  $R_a$  u řezné rychlosti 50 m/min. Při posuvu 0,1 mm/z je zde dokonce větší drsnost obrobeného povrchu než u řezných rychlostí 100 m/min a 150 m/min. Nejmenšího  $R_a$  dosahuje břitová destička u posuvu 0,05 mm/z a rychlosti 50 m/min. Naopak největší drsnosti  $R_a$  tato VBD dosahuje u řezné rychlosti 150 m/min a posuvu na zub 0,2.



Obr. 44 Závislosti drsnosti Ra na posuvu a řezné rychlosti

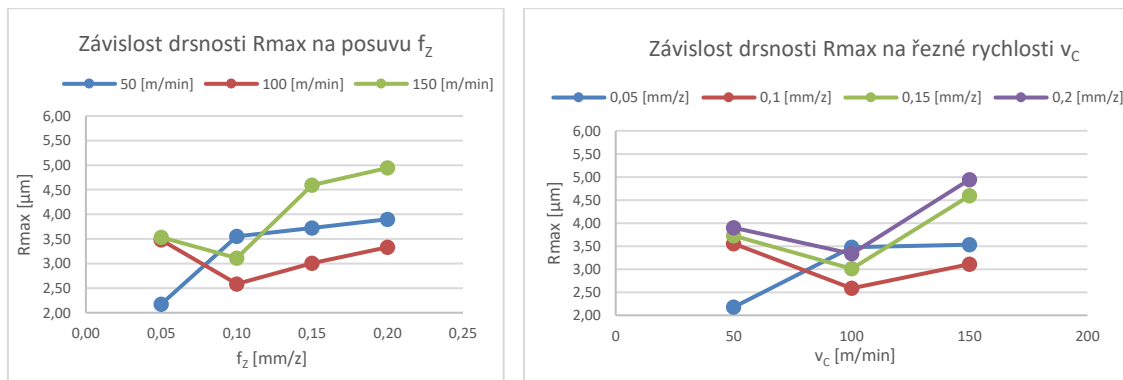
Stejný jev u rychlosti 50 m/min jako u aritmetické úchylky Ra lze pozorovat i při největší výšce profilu Rz (Obr. 45). Větší drsnosti Rz je tedy dosaženo u řezné rychlosti 50 m/min než u rychlosti 100 m/min při třech posuvech ze čtyř. Stejná drsnosti povrchu Rz bylo dosaženo při rychlosti 100 m/min jak při posuvu 0,05 mm/z tak 0,15 mm/z. U těžké řezné rychlosti nejmenší drsnost byla zaznamenána při posuvu na zub 0,1.



Obr. 45 Závislosti drsnosti Rz na posuvu a řezné rychlosti

Zatímco u aritmetické úchylky profilu Ra při posuvu 0,1 mm/z byla hodnota drsnosti u řezné rychlosti 50 m/min větší o 7 % než u řezné rychlosti 150 m/min. U největší výšky profilu Rz při stejných řezných parametrech tvořil rozdíl 3 %. Při maximální hloubce drsnosti  $R_{\text{max}}$  tvořil tento rozdíl 13 % (Obr. 46).



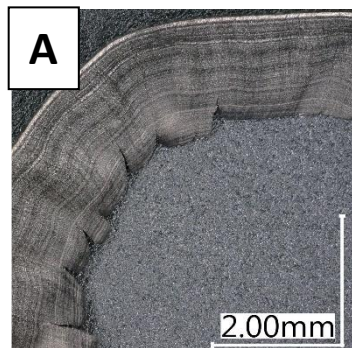


Obr. 46 Závislosti drsnosti Rmax na posuvu a řezné rychlosti

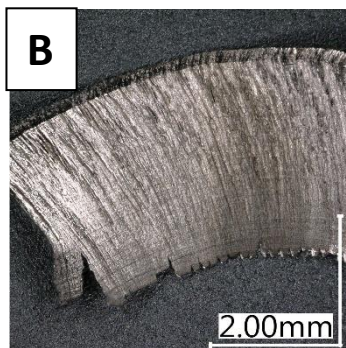
### 4.3.3 Třísky

Fotky třísek odebraných během obrábění titanu destičkou RPHX 1204M4SN-F50 lze vidět na Obr. 47. U všech zkoušených řezných podmínek tříska byla tvářená, soudržná, článkovitá. U posuvů 0,05 mm/z lze vidět lehký náznak vlnité hrany třísky. Během obrábění řeznými podmínkami zobrazenými nad Obr. 47 D lze vidět již pilovitý tvar hrany třísky. Barva třísky u řezné rychlosti 150 m/min je pouze nepatrně tmavší než u řezné rychlosti 50 m/min.

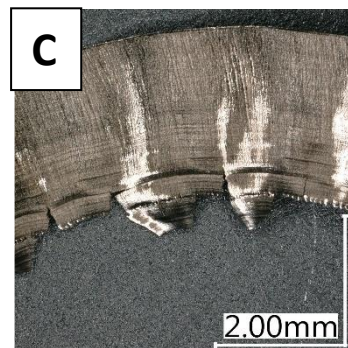
$v_c=50$ [m/min];  $f_z=0,05$ [mm/z]



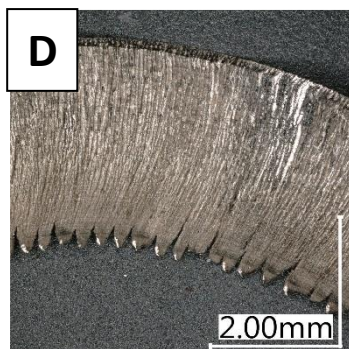
$v_c=50$ [m/min];  $f_z=0,2$ [mm/z]



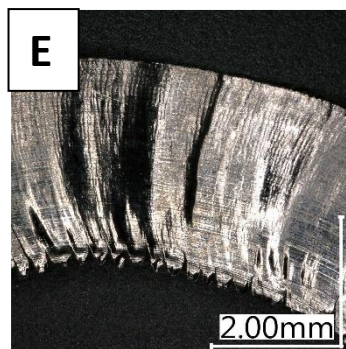
$v_c=150$ [m/min];  $f_z=0,05$ [mm/z]



$v_c=150$ [m/min];  $f_z=0,2$ [mm/z]



$v_c=150$ [m/min];  $f_z=0,2$ [mm/z] ↓



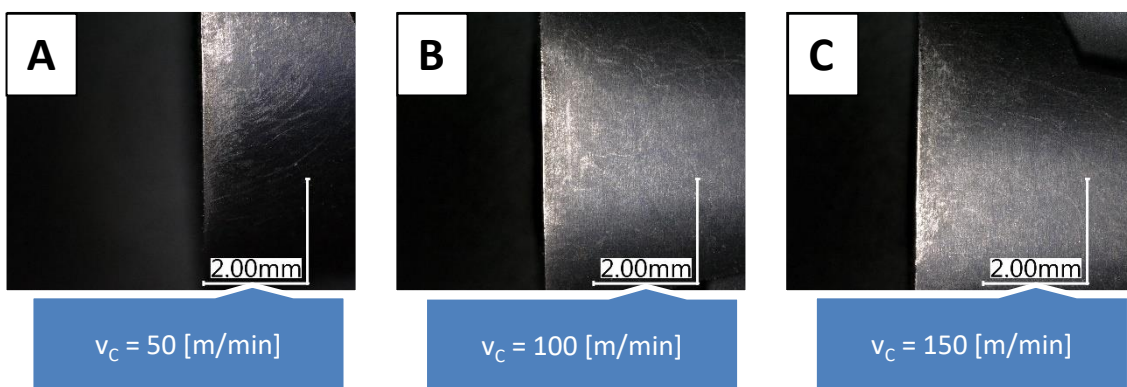
Obr. 47 Hodnocení třísky RPHX 1204M4SN-F50



Na Obr. 47 E je zobrazena druhá strana třísky bez jakéhokoliv náznaku hnědnutí.

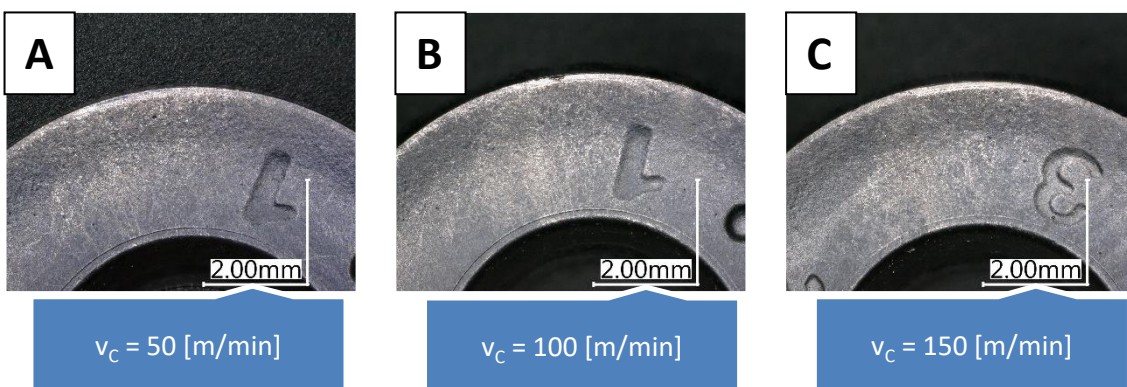
#### 4.3.4 Opotřebení

U břitové destičky RPHX 1204M4SN-F50 je viditelné mírné poškození v povlaku (Obr. 48). Nelze však určit závislost tohoto poškození na řezné rychlosti. U břitu nástroje lze vypočítat závislost na řezné rychlosti. S rostoucí řeznou rychlostí se opotřebení nástroje zvětšuje. I po obrábění řeznou rychlostí 150 m/min je poškození destičky jen v setinách mm.



Obr. 48 Opotřebení hřbetu nástroje – RPHX 1204M4SN-F50

Pohled na čelo nástroje znázorňuje opotřebení břitu ještě lépe. Zde, na Obr. 49 B lze vidět, že došlo i k vyštípnutí materiálu na břitu nástroje.



Obr. 49 Opotřebení čela nástroje – RPHX 1204M4SN-F50





#### 4.4 VBD č. 4 – RPHX 1204M4EN-M32

Kruhová vyměnitelná břitová destička RPHX RPHX 1204M4EN-M32 byla vyrobena firmou CERATIZIT, měla úhel čela 9°, utvařeč F32, povlak PVD a byla zaoblená.

Během obrábění titanu destičkou RPHX 1204M4EN-M32 byla vyzorována závislost namotávání se třísek na řezné rychlosti i na posuvu. U řezné rychlosti 50 m/min se třísky namotávaly velmi mírně. U vyšších řezných rychlostí již ne.

Barva destičky zůstala zachovaná při měnících se řezných rychlostech, a tedy nedocházelo k rozžhavení destičky natolik, aby to bylo viditelné okem.

##### 4.4.1 Síly

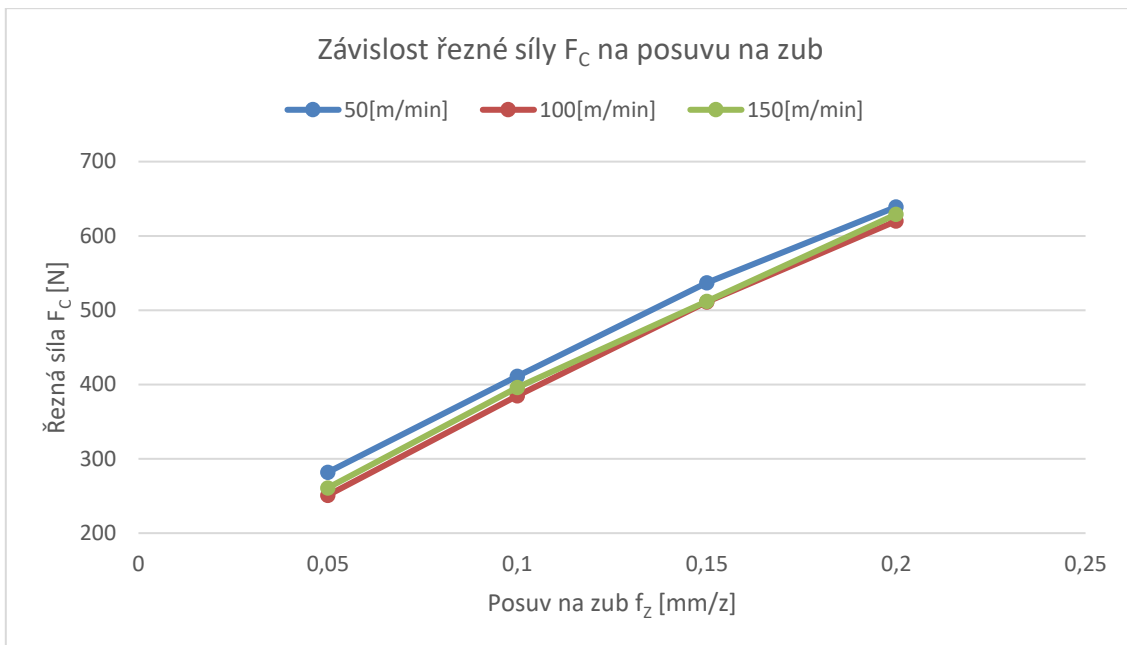
Tab. 14 Naměřené hodnoty sil – RPHX 1204M4EN-M32

Řezné podmínky:		$v_c = 50$ [m/min]				$v_c = 100$ [m/min]				$v_c = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Síly	$F_c$ [N]	282	411	537	639	251	385	511	620	261	396	512	629
	$F_{cN}$ [N]	148	169	199	256	145	193	171	244	151	196	217	255
	$F_p$ [N]	213	256	275	307	211	227	270	311	211	263	305	343

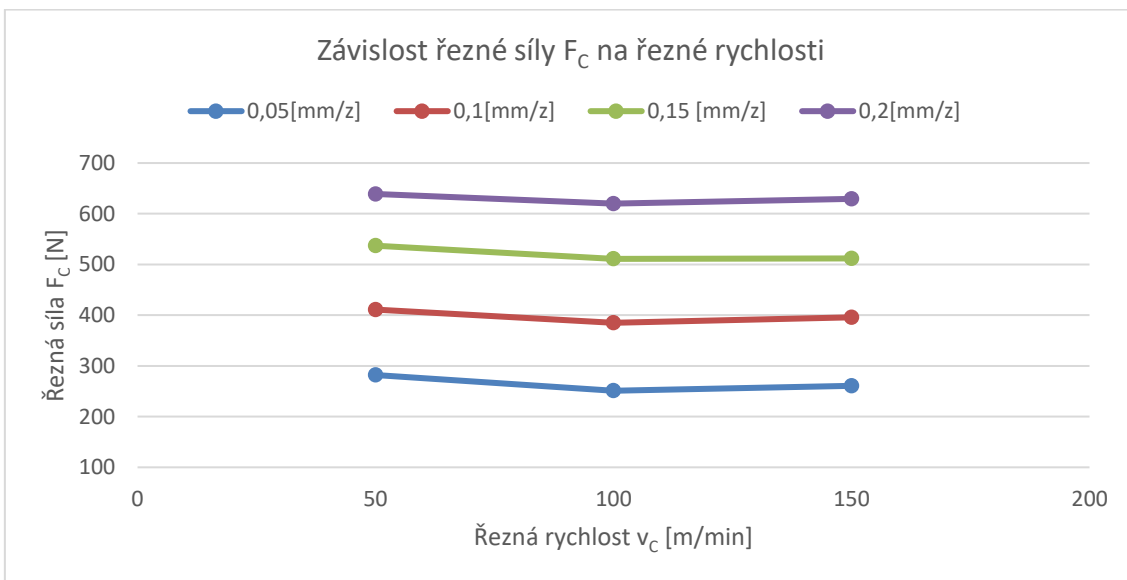
Z tabulky hodnot sil (Tab. 14) je vidět, že i u této břitové destičky největší síla je síla řezná. Pasivní síly dosahují téměř 75 % síly řezné, a to z důvodu použití kruhové vyměnitelné břitové destičky, která má velký poloměr, což způsobuje odtlačování nástroje od materiálu, a tedy vzrůst pasivní síly.

Z velikosti naměřených sil lze sestavit grafy. Ty nejvýznamnější budou vykazovat závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$  a řezné rychlosti  $v_c$ .

Z prvního grafu (Obr. 50) lze vyčíst, že síly se navyšují v závislosti na posuvu u všech řezných rychlostí. Rozdíly v silách v závislosti na řezné rychlosti pro konkrétní posuvy nejsou tak velké jako u předchozí destičky.

Obr. 50 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub

Z druhého grafu (Obr. 51) lze vyčíst, že řezná síla s rostoucí řeznou rychlostí mírně klesá. Když byl navýšen posuv o 100 % u řezné rychlosti 50 m/min, z 0,1 mm/z na 0,2 mm/z, došlo k navýšení řezné síly přibližně o 36 %, z 411 N na 639 N.

Obr. 51 Závislost řezné síly  $F_c$  na řezné rychlosti

Křivky u obou grafů byly proloženy mocninnou funkcí pro lepší zobrazení srovnání. V Tab. 15 lze vidět, že funkce závislosti na posuvu je téměř stejná pro všechny tři řezné rychlosti. Hodnota exponentu se liší o 9 %, což je relativně málo. Z funkce závislosti na rychlosti je patrné, že je exponent záporný, tedy, že křivky klesají.



Tab. 15 Funkce závislosti břitové destičky RPHX 1204M4EN-M32

Funkce závislosti na posuvu		Funkce závislosti na rychlosti	
Rychlost [m/min]	Rovnice	Posuv [mm/z]	Rovnice
50	$F_C = 1643 \cdot f_z^{0,59}$	0,05	$F_C = 381 \cdot v_C^{-0,08}$
100	$F_C = 1760 \cdot f_z^{0,65}$	0,1	$F_C = 476 \cdot v_C^{-0,04}$
150	$F_C = 1709 \cdot f_z^{0,63}$	0,15	$F_C = 640 \cdot v_C^{-0,05}$
		0,2	$F_C = 680 \cdot v_C^{-0,02}$

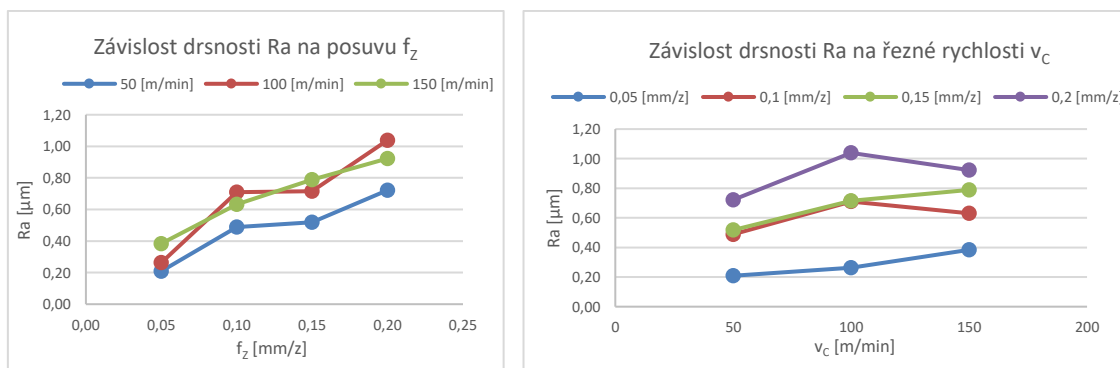
#### 4.4.2 Drsnosti

Ne jinak než u předchozích řezných destiček tomu bylo i u vyhodnocení drsnosti u destičky RPHX 1204M4EN-M32. I zde se potvrdilo, že jak střední aritmetická úchylnka profilu  $R_a$ , tak největší výška profilu  $R_z$  i maximální hloubka drsnosti  $R_{max}$  se obecně zvyšují jak s rostoucím posuvem, tak s rostoucí rychlostí. Tab. 16.

Tab. 16 Naměřené hodnoty drsností – RPHX 1204M4EN-M32

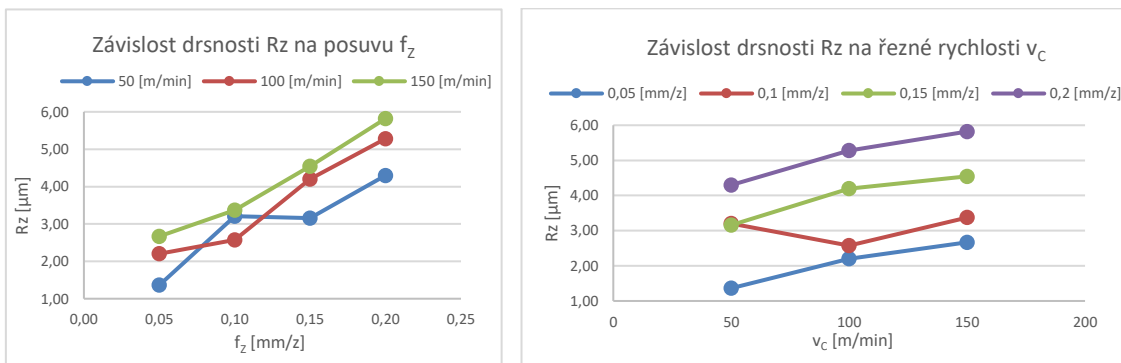
Řezné podmínky:		$v_C = 50$ [m/min]				$v_C = 100$ [m/min]				$v_C = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[m/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Drsnosti	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,21	0,49	0,52	0,72	0,26	0,71	0,72	1,04	0,38	0,63	0,79	0,92
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,36	3,21	3,16	4,30	2,20	2,58	4,20	5,28	2,67	3,37	4,55	5,82
	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,60	3,98	3,51	5,43	3,40	3,23	4,74	5,97	2,87	3,78	5,02	6,02

Jak je vidět z grafu (Obr. 52), největší hodnoty střední aritmetické úchylnky profilu  $R_a$  bylo dosaženo při posuvu na zub 0,2 a při řezné rychlosti 100 m/min. Změna posuvů z 0,1 mm/z na 0,15 mm/z nevykazovala žádný rozdíl v drsnosti  $R_a$  při řezných rychlostech 50 m/min a 100 m/min.

Obr. 52 Závislosti drsnosti  $R_a$  na posuvu a řezné rychlosti

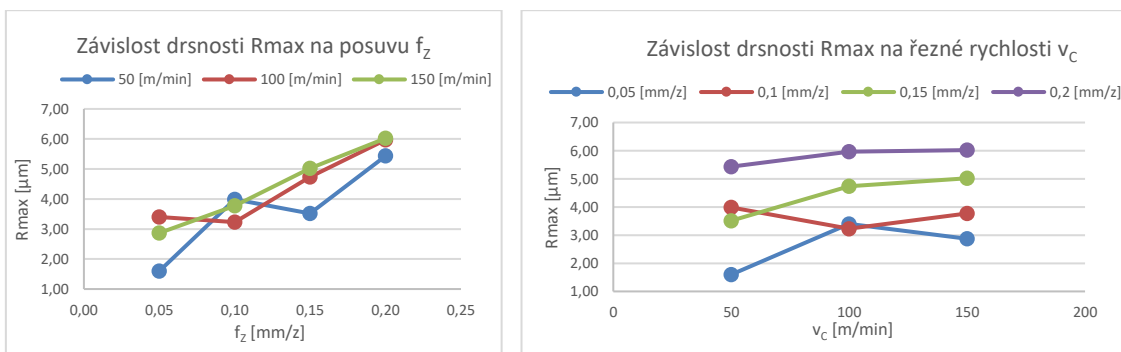


Větší hodnota největší výšky profilu Rz byla zaznamenána vždy u navýšení jednoho z řezných parametrů (Obr. 53), ať už u posuvu, nebo řezné rychlosti. Jediná výjimka se vyskytla během obrábění řeznou rychlostí 50 m/min, posuvem 0,1 mm/z.



Obr. 53 Závislosti drsnosti Rz na posuvu a řezné rychlosti

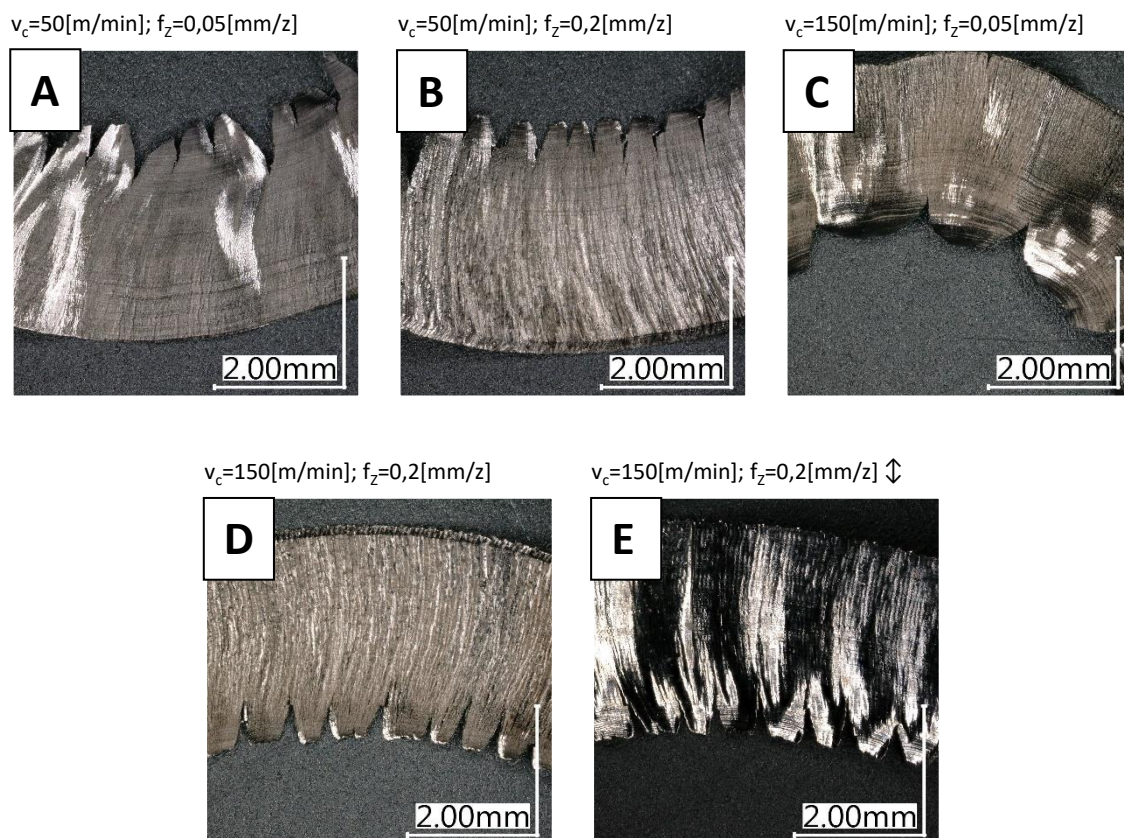
U maximální hloubky drsnosti Rmax, tomu bylo podobně jako u největší výšky profilu Ra. A sice, že hodnota drsnosti u posuvu 0,1 a řezné rychlosti 50 m/min byla větší, než u stejného posuvu a řezné rychlosti 100 m/min. U řezné rychlosti 100 m/min a posuvu 0,05 mm/z bylo dosažené větší drsnosti než u řezné rychlosti 150 m/min za stejného posuvu. Obr. 54.



Obr. 54 Závislosti drsnosti Rmax na posuvu a řezné rychlosti

#### 4.4.3 Třísky

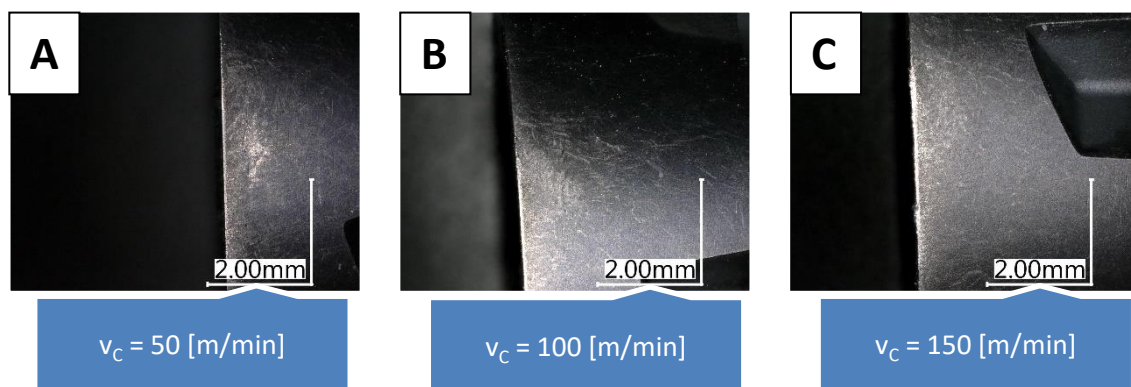
Třísky odebrané během obrábění kruhovou břitovou destičkou RPHX 1204M4EN-M32 za vybraných řezných podmínek lze vidět na Obr. 55. Lze zaznamenat, že u všech vybraných řezných rychlostí dochází k tvorbě třísky s hranou vlnitou až pilovitou. S rostoucím posuvem se rozměr vln zvyšoval. Vlnovitý ani pilovitý tvar není do špičky, na hraně se tvoří určitý lichoběžníkový tvar vln. Tento tvar je poněkud jiný než u obrábění předchozími břitovými destičkami. Barevně lze opět vyzorovat velmi mírné zabarvení do hněda u řezné rychlosti 150 m/min. Na Obr. 55 E lze vidět třísku z druhé strany. Opět na ní nevidíme žádné zabarvení.



Obr. 55 Hodnocení třísky RPHX 1204M4EN-M32

#### 4.4.4 Opotřebení

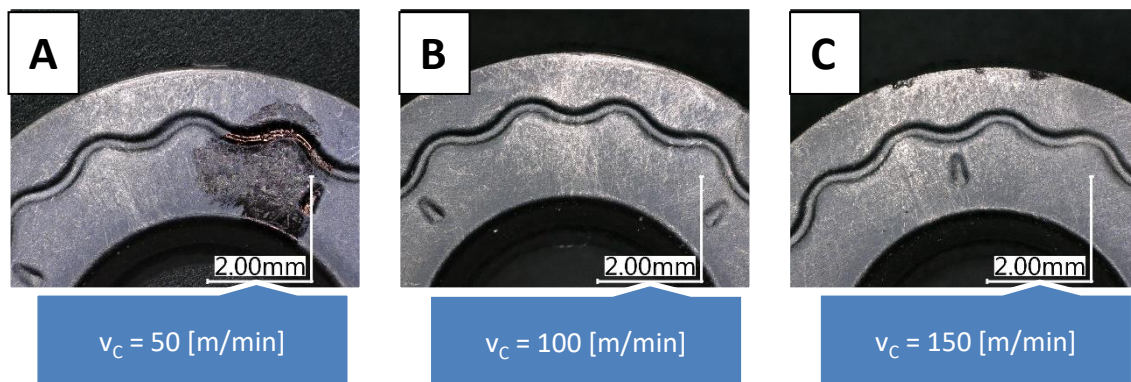
Povlak po obrábění břitovou destičkou RPHX 1204M4EN-M32 byl mírně poškozen. Nelze však určit závislost poškození povlaku na řezné rychlosti (Obr. 56). Jako nejvíce opotřeбенý břit nástroje se však jeví nástroj po obrábění řeznou rychlostí 150 m/min.



Obr. 56 Opotřebení hřbetu nástroje – RPHX 1204M4EN-M32



Jednoznačněji určit míru opotřebení lze u čela nástroje (Obr. 57). Opotřebení břitu se stupňuje s navyšováním řezné rychlosti. Na Obr. 57 C je možné zaznamenat kráterové výlomky břitu nástroje.



Obr. 57 Opotřebení čela nástroje – RPHX 1204M4EN-M32

#### 4.5 VBD č. 5 – RPHX 1204MOSN-M50

Kruhová vyměnitelná břitová destička RPHX 1204MOSN-M50 byla vyrobena firmou CERATIZIT, měla úhel čela 13,5°, utvářeč M50, povlak PVD, a byla zkosená a zaoblená.

Během obrábění titanu břitovou destičkou RPHX 1204MOSN-M50 bylo vypořádováno, že tříška se za níže uvedených řezných podmínek nikdy nenamotávala na frézu.

Barva této destičky zůstala zachována u všech zkoušených řezných rychlostí a neměnila se do rudé.

##### 4.5.1 Síly

Tab. 17 Naměřené hodnoty sil – RPHX 1204MOSN-M50

Řezné podmínky:		$v_c = 50$ [m/min]				$v_c = 100$ [m/min]				$v_c = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Síly	$F_c$ [N]	282	416	537	645	256	400	510	624	248	385	504	618
	$F_{CN}$ [N]	169	232	236	267	143	173	189	247	111	146	216	233
	$F_p$ [N]	205	282	296	325	217	245	275	285	176	216	291	305

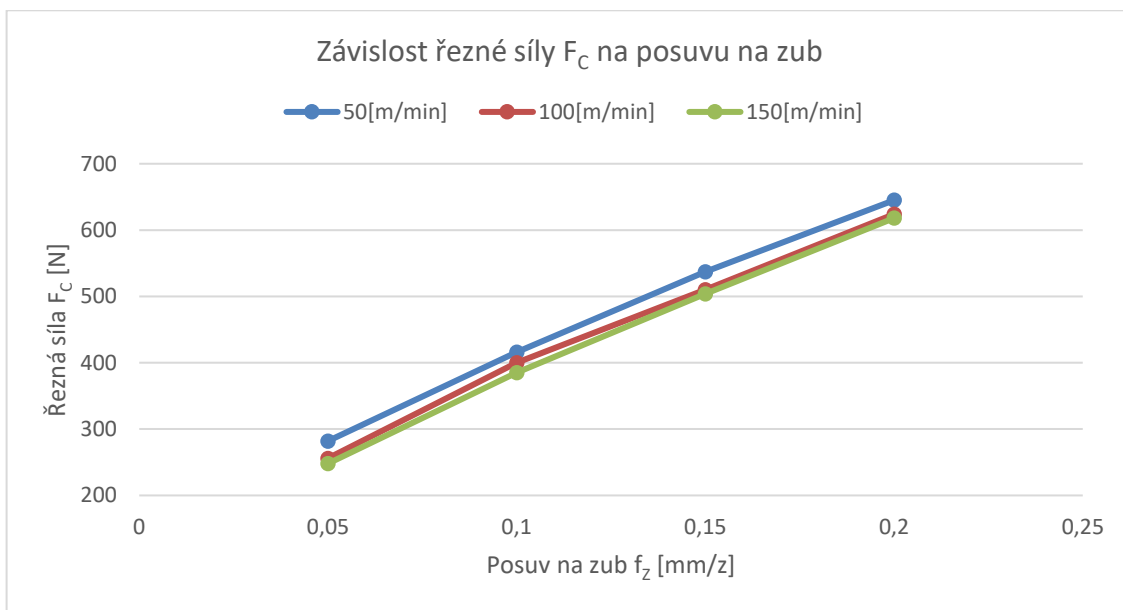




Řezná síla je největší ve srovnání s ostatními naměřenými silami (Tab. 17). Pasivní síly jsou vysoké, a to z důvodu použití kruhové břitové destičky, která má velký poloměr, což způsobuje odtlačování nástroje od materiálu, a tedy nárůst pasivní síly.

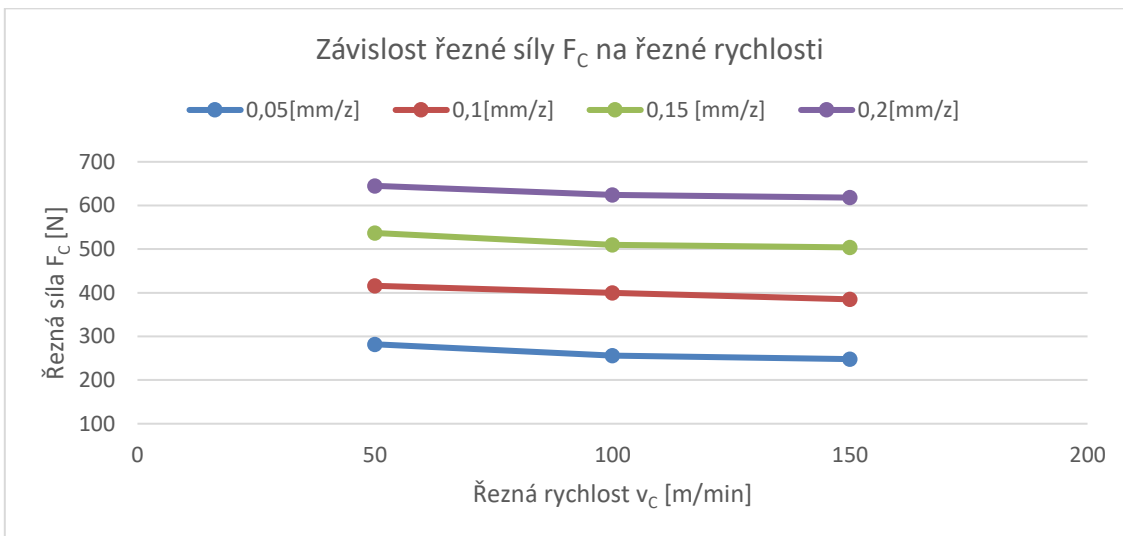
Z velikosti naměřených sil lze sestavit grafy. Ty nejvýznamnější budou vykazovat závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$  a řezné rychlosti  $v_c$ .

Z prvního grafu (Obr. 58) lze vyčíst, že síly se navyšují v závislosti na posuvu u všech řezných rychlostí.



Obr. 58 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub

Z druhého grafu (Obr. 59) lze vyčíst, že řezná síla s rostoucí řeznou rychlostí mírně klesá.



Obr. 59 Závislost řezné síly  $F_c$  na řezné rychlosti



Následně křivky v obou grafech byly proloženy mocninnou funkcí pro lepší srovnání. V Tab. 18 lze vidět, že funkce závislosti na posuvu je téměř stejná pro všechny tři řezné rychlosti. Hodnota exponentu se liší o 9 %. Z funkce závislosti na rychlosti je patrné, že je exponent záporný, tedy, že křivky klesají.

Tab. 18 Funkce závislosti břitové destičky RPHX 1204MOSN-M50

Funkce závislosti na posuvu		Funkce závislosti na rychlosti	
Rychlost [m/min]	Rovnice	Posuv [mm/z]	Rovnice
50	$F_C = 1666 \cdot f_z^{0,59}$	0,05	$F_C = 448 \cdot v_C^{-0,12}$
100	$F_C = 1730 \cdot f_z^{0,63}$	0,1	$F_C = 546 \cdot v_C^{-0,07}$
150	$F_C = 1760 \cdot f_z^{0,65}$	0,15	$F_C = 676 \cdot v_C^{-0,06}$
		0,2	$F_C = 752 \cdot v_C^{-0,04}$

#### 4.5.2 Drsnosti

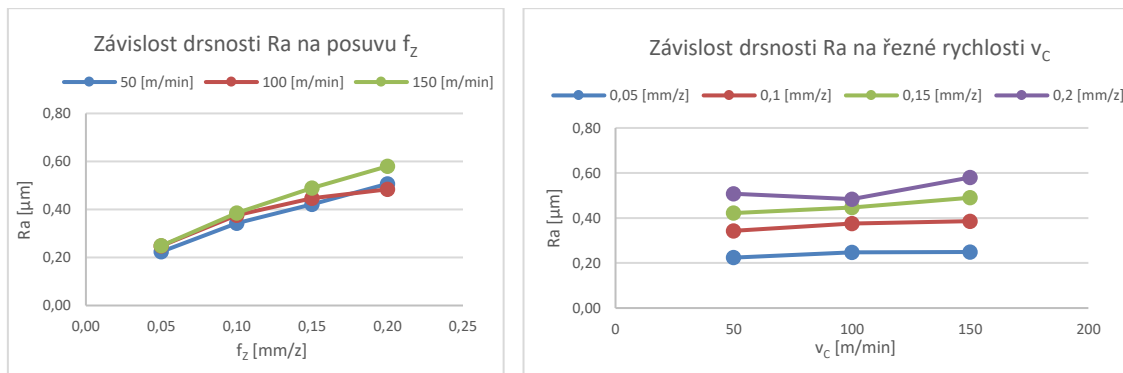
Jako u všech předchozích destiček i zde se potvrdilo, že střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ , největší výška profilu  $R_z$  i maximální hloubka drsnosti  $R_{max}$  se obecně zvyšují s rostoucím posuvem i s rostoucí rychlostí. U této destičky však došlo k nejmenším změnám v drsnosti obrobeného povrchu v závislosti na řezných parametrech. Tab. 19.

Tab. 19 Naměřené hodnoty drsností – RPHX 1204MOSN-M50

Řezné podmínky:		$v_C = 50$ [m/min]				$v_C = 100$ [m/min]				$v_C = 150$ [m/min]			
		$n = 253$ [1/s]				$n = 506$ [1/s]				$n = 759$ [1/s]			
		$a_P = 1$ [mm]				$a_P = 1$ [mm]				$a_P = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	13	26	39	52	26	52	78	104	39	78	117	156
Drsnosti	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,22	0,34	0,42	0,51	0,25	0,38	0,45	0,48	0,25	0,39	0,49	0,58
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,50	2,08	2,93	3,02	1,55	2,23	2,63	2,99	1,57	2,26	3,056	3,42
	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,85	2,32	3,60	5,15	1,92	2,50	3,94	4,18	1,70	2,51	3,778	3,76

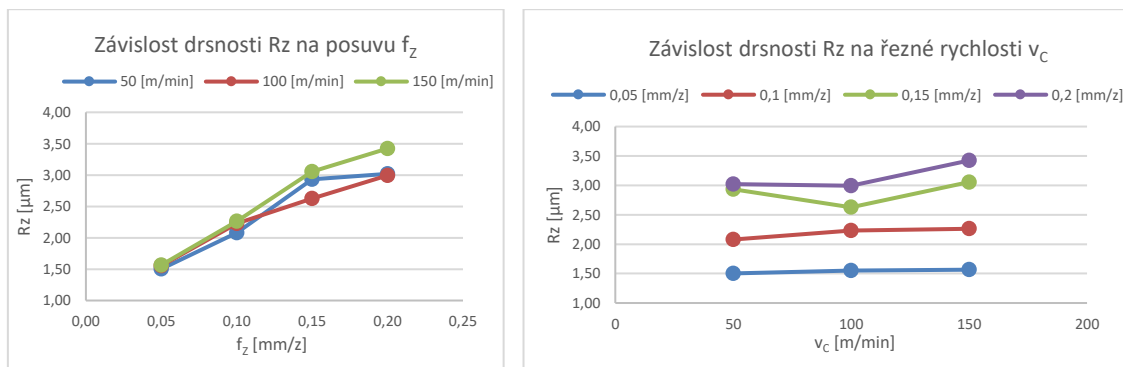
Destička RPHX 1204MOSN-M50 je jediná u které lze vyzorovat zvětšující se rozptýl hodnoty drsnosti v závislosti na řezné rychlosti. Zatímco u posuvu 0,05 mm/z mezi největší a nejmenší hodnotou drsnosti  $R_a$  je 12 %, tak u posuvu 0,1 mm/z je to 13 %, u posuvu 0,15 mm/z je to už 16 % a u posuvu 0,2 mm/z je nejvíce, tedy 18 %. Obr. 60.





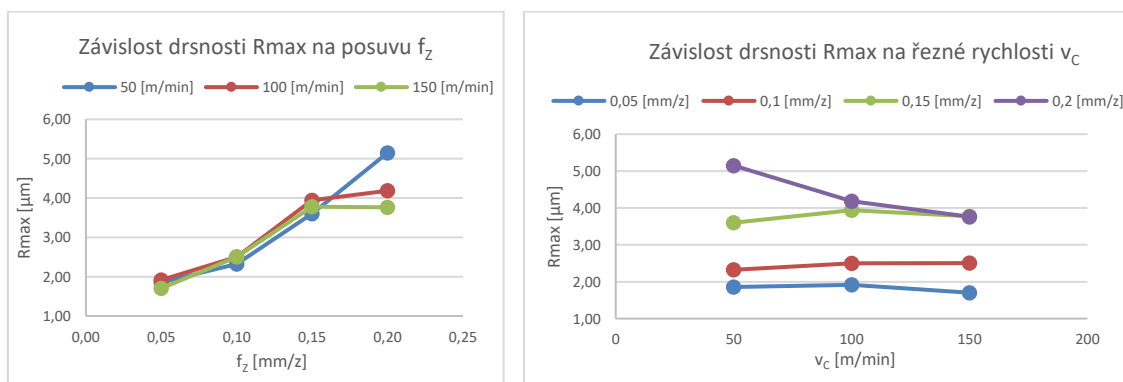
Obr. 60 Závislosti drsnosti Ra na posuvu a řezné rychlosti

U posuvu 0,15 mm/z a řezné rychlosti 50 m/min lze zaznamenat větší drsnost Rz obroběného povrchu, než u stejného posuvu, ale řezné rychlosti 100 m/min. Všechny tři řezné rychlosti dosáhly téměř stejné drsnosti Rz při posuvu 0,05 mm/z. Obr. 61.



Obr. 61 Závislosti drsnosti Rz na posuvu a řezné rychlosti

Mezi hodnotami posuvů 0,15 mm/z a 0,2 mm/z došlo k výraznému poklesu rozdílu v drsnosti Rmax u řezných rychlostí 100 m/min a 150 m/min. Největší drsnost Rmax byla zaznamenána u posuvu 0,2 mm/z při řezné rychlosti 50 m/min. Naopak nejmenší maximální hloubka drsnosti obroběného povrchu při posuvu 0,2 mm/z byla dosažena řeznou rychlostí 150 m/min. Obr. 62.

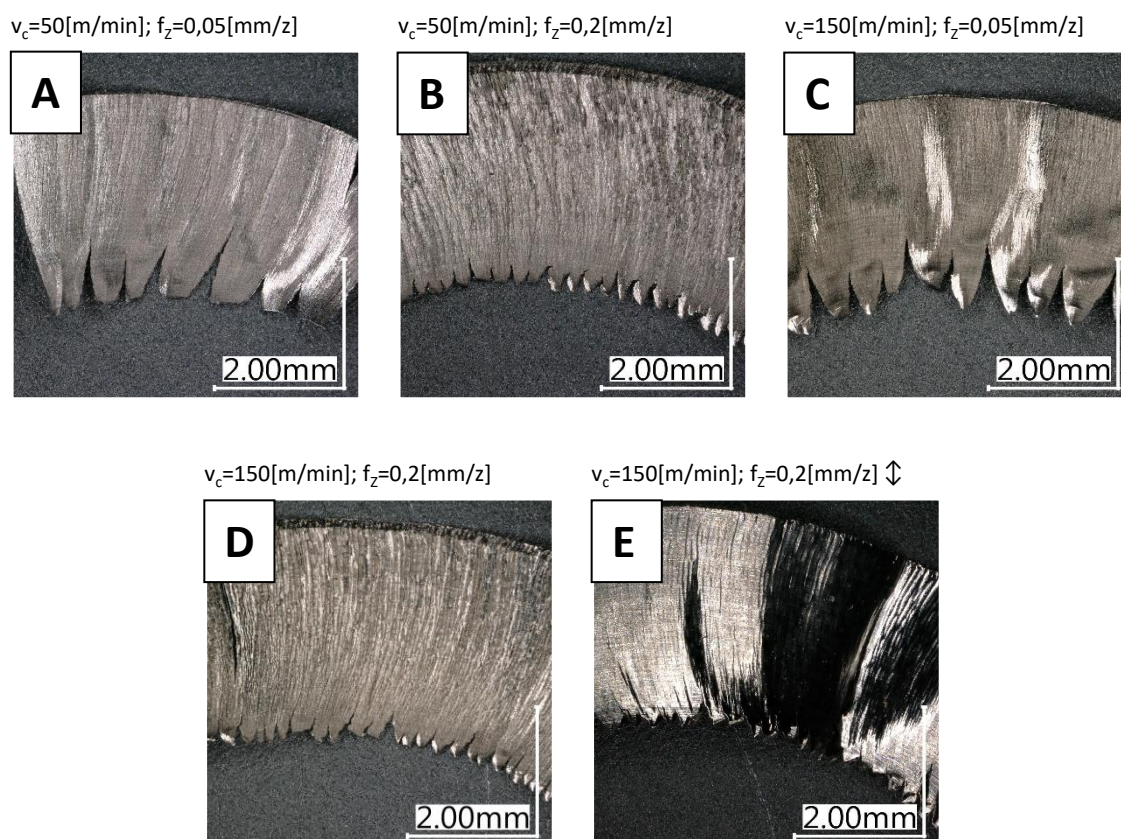


Obr. 62 Závislosti drsnosti Rmax na posuvu a řezné rychlosti



### 4.5.3 Třísky

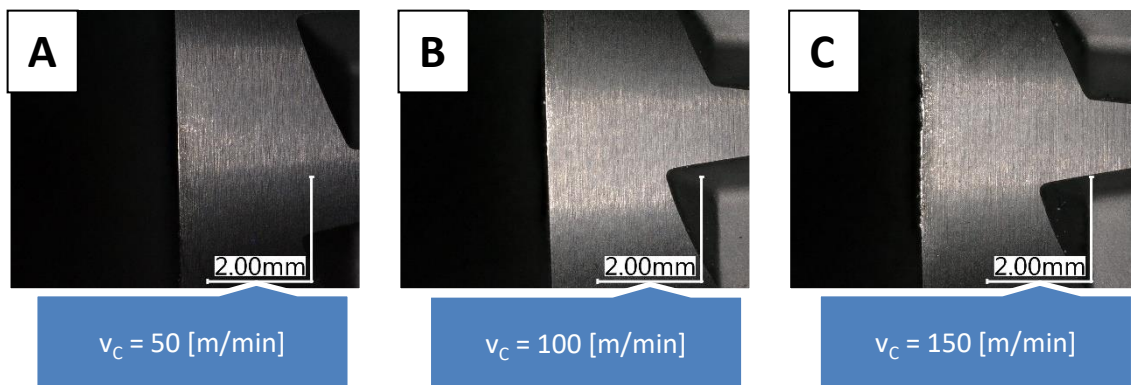
Na Obr. 63 jsou třísky odebrané za určitých řezných podmínek během obrábění titanu destičkou RPHX 1204MOSN-M50. Tříška se nikdy nenamotávala na frézu a byla tedy článkovitá. Tvar hrany třísky se téměř neměnil s rostoucím posuvem. U nižších posuvu byly vlny hrany větší. U vyšších posuvů naopak rozměry zoubků u pilovitého tvaru hrany byly malé. Tříška u řezných rychlostí 50 m/min je stejná, jako u neobrobeného titanu. Této barvě se blíží i tříška odebrána během obrábění rychlostí 150 m/min. Na Obr. 63 E je zobrazena druhá strana třísky, bez jakéhokoliv barevného zabarvení.



Obr. 63 Hodnocení třísky RPHX 1204MOSN-M50

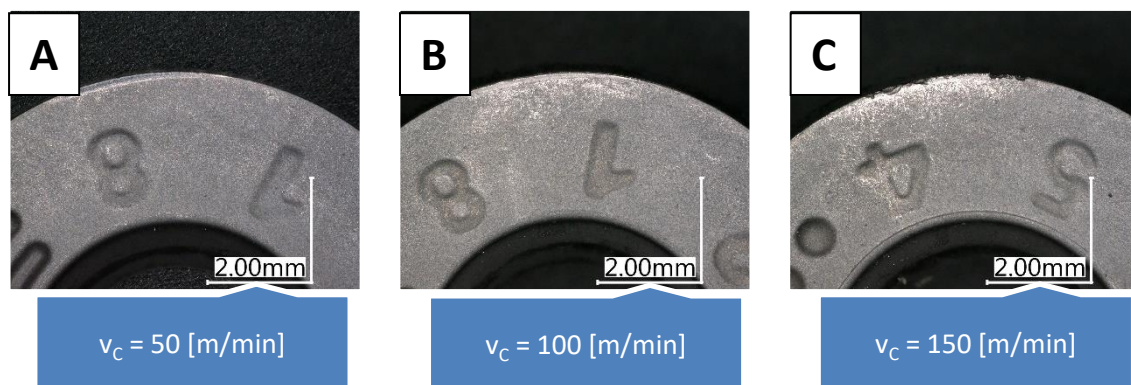
### 4.5.4 Opotřebení

U destičky RPHX 1204MOSN-M50 lze vidět, že k opotřebení povlaku hřbetu téměř nedošlo. Opotřebení břitu po obrábění řeznou rychlostí 50 m/min téměř nedošlo. Během obrábění řeznou rychlostí 100 m/min došlo k mírnému opotřebení a však naměřit ho nebylo možné. Opotřebení po obrábění řeznou rychlostí 150 m/min již bylo viditelné holým okem. Obr. 64.



Obr. 64 Opatřebení hřbetu nástroje – RPHX 1204MOSN-M50

Z Obr. 65 C je patrné, že došlo k částečnému vylámaní břitu při obrábění řeznou rychlostí 150 m/min. Opatřebení se stupňuje se zvyšující se řeznou rychlostí.



Obr. 65 Opatřebení čela nástroje – RPHX 1204MOSN-M50





## 5 Srovnání řezných destiček

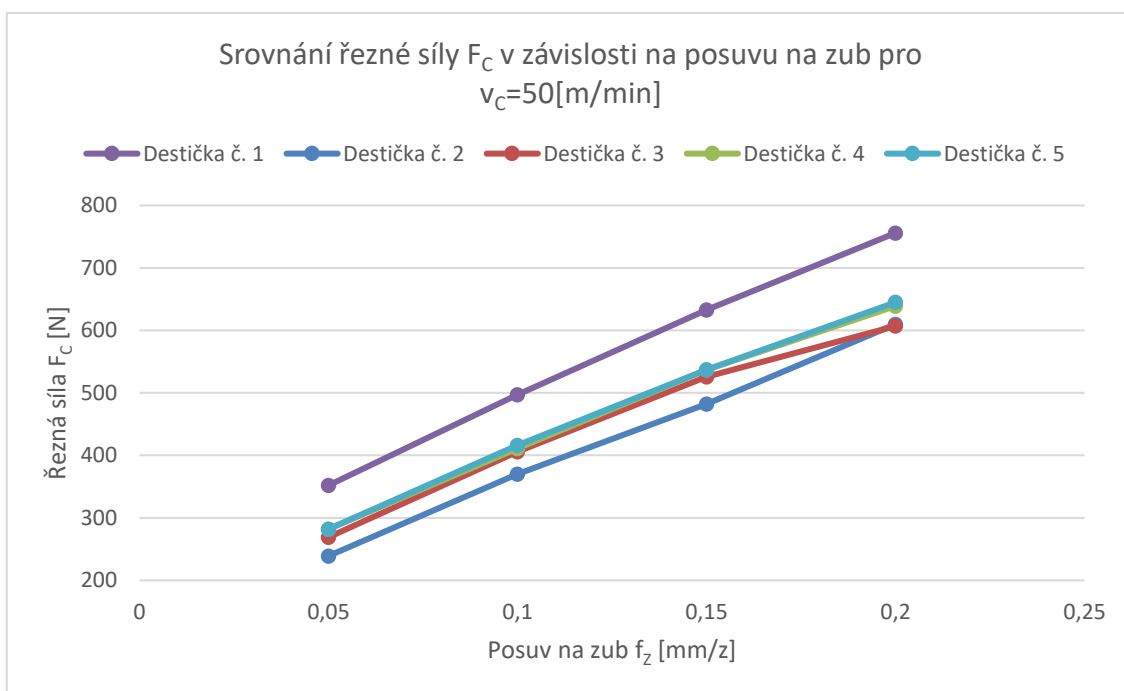
Po rozboru jednotlivých destiček z hlediska sílových účinků, drsností obrobeného povrchu, tvořící se třísky a opotřebení břitových destiček bylo provedeno srovnání těchto nástrojů, a to ze dvou hlavních důvodů.

- 1/ Aby bylo možné posoudit, která vyměnitelná břitová destička na co je vhodnější.
- 2/ Aby bylo možné určit dvě břitové destičky, které se budou zkoušet ještě za vyšších řezných rychlostí.

### 5.1 Srovnání sílových účinků

Srovnání sílových účinků probíhalo pomocí grafů, ze kterých lze nejjednodušeji vyčíst, jak velké síly k vniknutí do materiálu potřebovaly zkoušené břitové destičky.

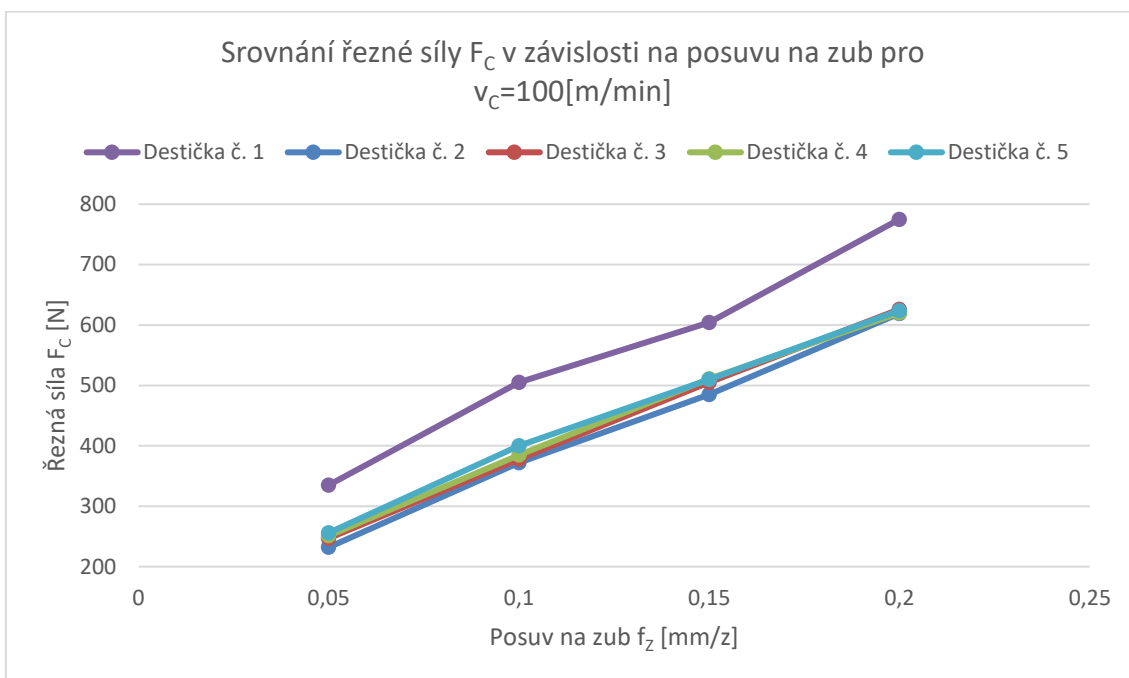
Následující tři grafy představují závislost řezné síly na posuvu na zub pro pět různých destiček. Každý graf je pro jinou řeznou rychlost. Pro všechny tři řezné rychlosti výsledky vycházejí podobně. Největší síly k překonání řezného odporu potřebuje VBD č. 1 od firmy Sandvik – RCKT-1204 MO-PM 4020. Další čtyři destičky od firmy Ceratizit jsou si velmi podobné, avšak nejmenší síly k překonání řezného odporu potřebuje VBD č. 2 RPHX 1204MOEN – 0.



Obr. 66 Srovnání destiček dle sil

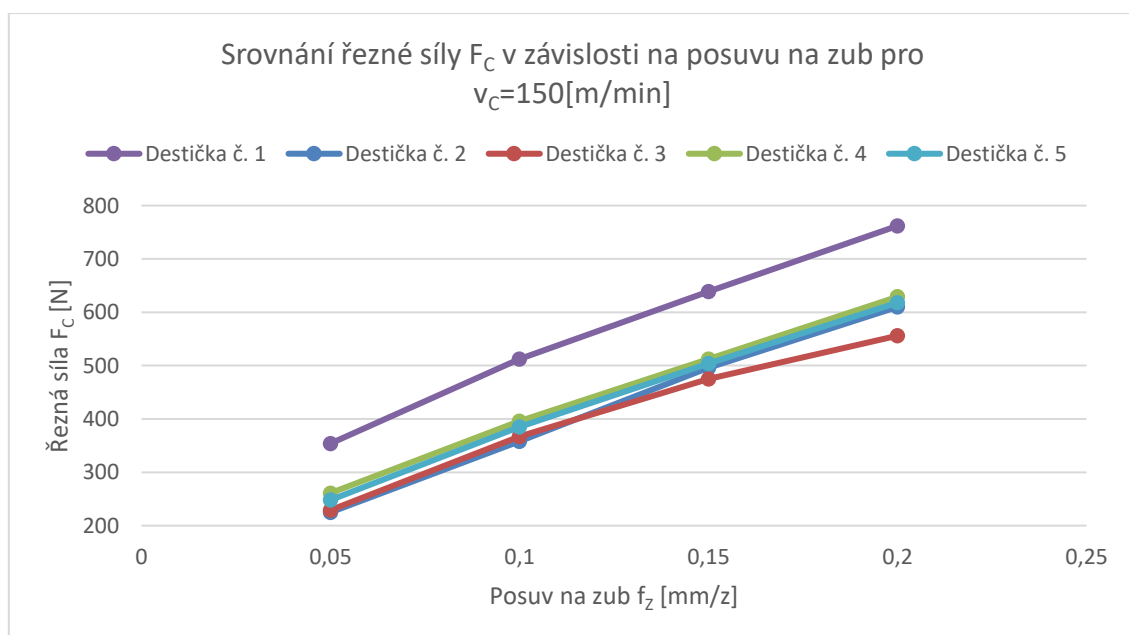


Rozptyl řezných sil břitových destiček od firmy Ceratizit se pohybuje kolem 7 %, zatímco břitová destička od firmy Sandvik překonává o 20 % vyšší síly.



Obr. 67 Srovnání destiček dle sil

Z těchto tří grafů je také patrné, že rozdíl v řezných silách mezi břitovou destičkou č. 1 a ostatními se s rostoucí řeznou rychlostí navyšuje. Zatímco u řezné rychlosti 50 m/min tvořil rozdíl průměrně 17 %, u řezné rychlosti 150 m/min tvořil již 24 %.

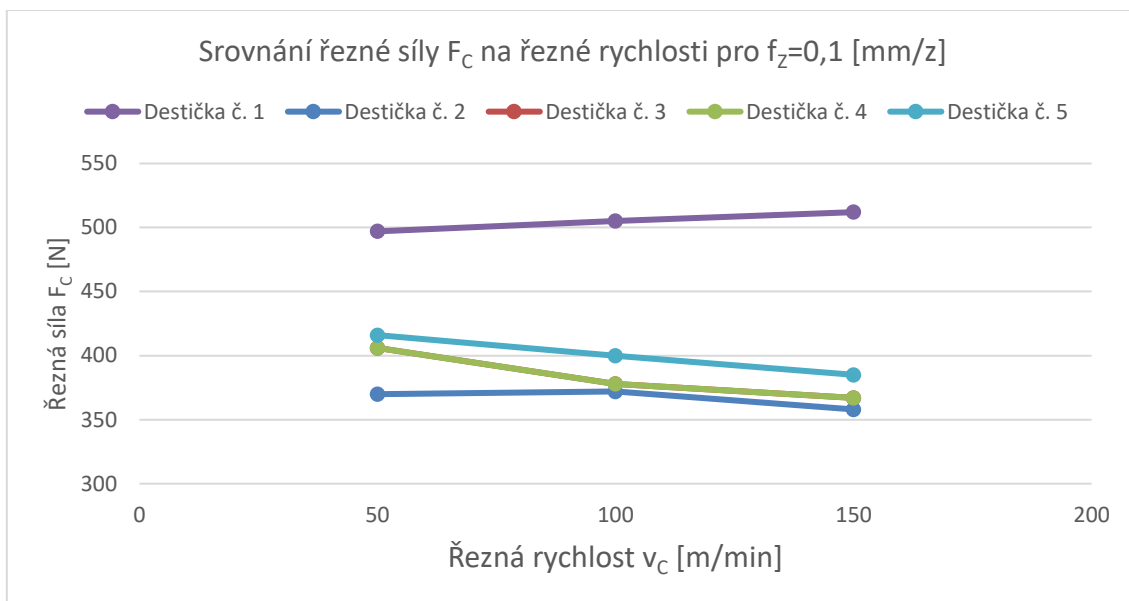


Obr. 68 Srovnání destiček dle sil



Následující graf (Obr. 69) představuje závislost řezné síly na řezné rychlosti pro jednotlivé destičky. Je zde znázorněn pouze jeden graf, a to pro posuv 0,1 mm/z. Grafy pro posuvy 0,05 mm/z, 0,15 mm/z a 0,2 mm/z zde nejsou zobrazeny, jelikož všechny jsou si velmi podobné. Srovnání bylo tedy provedeno pouze na tomto konkrétním grafu.

Jednoznačně největší síly k překonání řezného odporu jsou zapotřebí u destičky č. 1 od firmy Sandvik RCKT-1204 MO-PM 4020. Další čtyři destičky od firmy Ceratizit jsou si velmi podobné, avšak nejmenší síly k překonání řezného odporu potřebuje VBD č. 2 RPHX 1204MOEN – 0. Nejrovnoměrnější pokles řezné síly vykazuje VBD č. 8 RPHX 1204MOSN



Obr. 69 Srovnání destiček dle sil

Srovnání břitových destiček jasně poukázalo, že VBD od firmy Sandvik vykazuje o dost větší řezné síly než destičky od firmy Ceratizit. Destičky od firmy Ceratizit jsou si podobné a však nejrovnoměrnější průběh sil vykazuje VBD č. 8 RPHX 1204MOSN.

Ze silového hlediska pro další pokračování experimentu a zvyšování řezné rychlosti byly vybrány dvě destičky. VBD č. 1 od firmy Sandvik – RCKT1204 MO-PM 4020, která vykazuje zřetelně vyšší řezné síly, ve srovnání s jinými destičkami. A VBD č. 5 od firmy Ceratizit – RPHX 1204MOSN, která vykazuje nejrovnoměrnější průběh sil v závislosti na posuvech a řezných rychlostech.



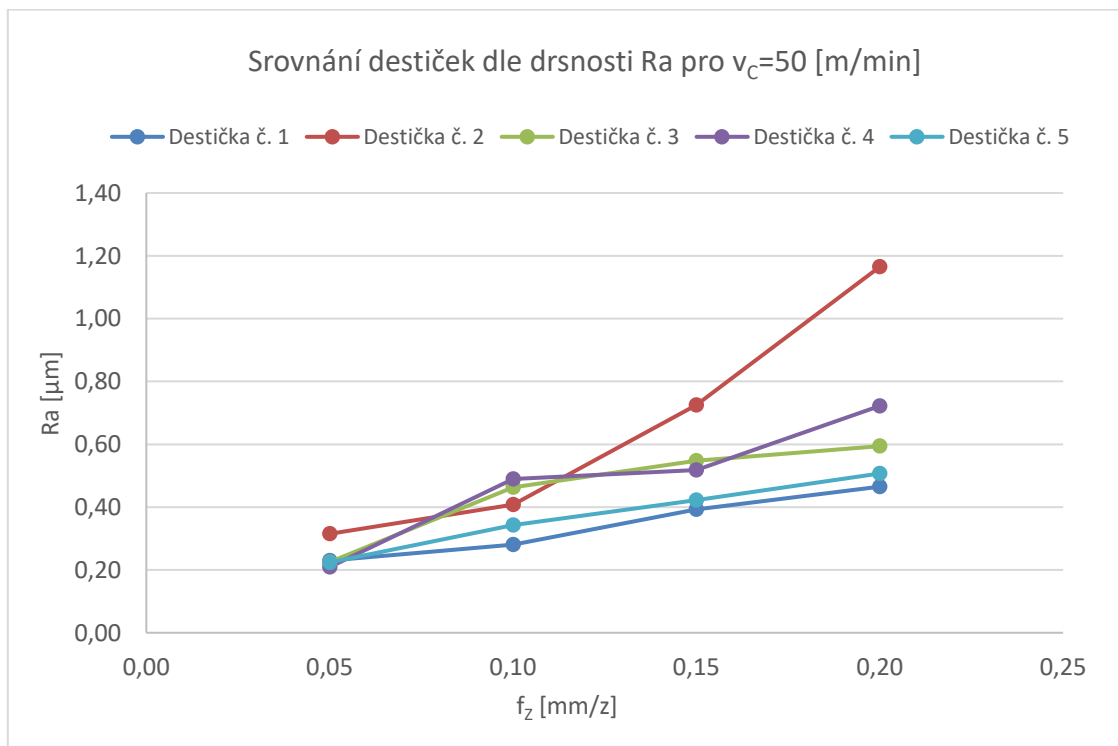


## 5.2 Srovnání drsností

Srovnání řezných destiček dle drsnosti obrobeného povrchu bylo provedeno v grafech. Byly vytvořeny tři grafy pro střední aritmetickou úchylku profilu  $R_a$ , tři grafy pro největší výšku profilu  $R_z$  a tři pro maximální hloubku drsnosti  $R_{max}$ . První graf pro každou drsnost byl sestaven z hodnot po obrábění řeznou rychlostí 50 m/min, druhý 100 m/min a třetí 150 m/min. Veškeré tyto drsnosti jsou závislé na posuvu.

Všech devět vzniklých grafů je si velmi podobných. Pro popis a hodnocení rozdílů drsností pro jednotlivé břitové destičky byl vybrán graf pro řeznou rychlost 50 m/min, kde je zobrazen průběh aritmetické úchylky profilu  $R_a$ .

Z grafu níže (Obr. 70) lze vyčíst, že největší drsnosti  $R_a$  dosahuje VBD č. 2 RPHX 1204MOEN – 0 při posuvu 0,2 mm/z. U této destičky došlo k největšímu opotřebení, což může souviset s následnou zanechanou vysokou hodnotou drsnosti povrchu. Naopak nejmenší drsnost povrchu u všech posuvů, kromě 0,05 mm/z, byla zaznamenána u břitové destičky č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020. Větší hodnoty drsností o necelých 20 % byly zaznamenány u břitové destičky č. 8 RPHX 1204MOSN. Nejmenší drsnosti celkově bylo dosaženo u obrábění řeznou rychlostí 50 m/min, posuvem 0,05 mm/z, břitovou destičkou č. 3 RPHX 1204M4SN.



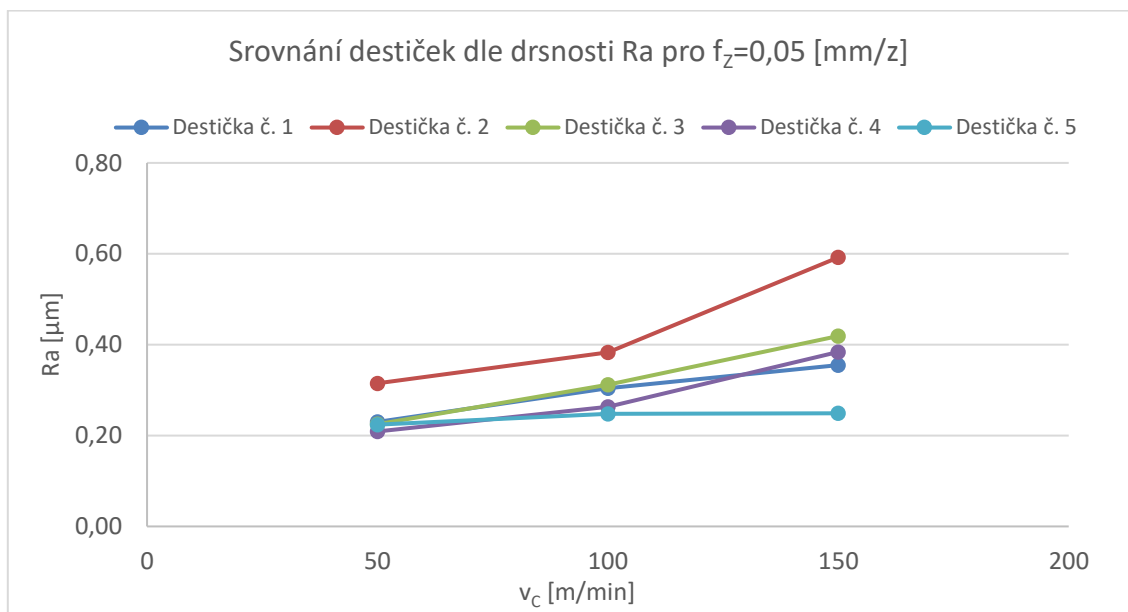
Obr. 70 Srovnání destiček dle drsnosti obrobené plochy





Analogicky bylo provedeno srovnání řezných destiček dle drsností po obrábění titanu v závislosti na řezné rychlosti při posuvu 0,05 mm/z. I zde pro srovnání byly použity hodnoty střední aritmetické úchyly  $R_a$ .

Z grafu Obr. 71 lze vyčíst, že závislost drsností  $R_a$  na řezné rychlosti je jiná pro každou břitovou destičku. Nejméně závislá je VBD č. 8 RPHX 1204MOSN. Naopak nejvíce závislá je břitová VBD č. 2 RPHX 1204MOEN – 0.



Obr. 71 Srovnání destiček dle drsnosti obrobené plochy

Obrobená plocha materiálu břitovou destičkou č. 2 RPHX 1204MOEN – 0 vykazuje největší drsnost povrchu. Proto tato VBD byla vybrána pro pokračování v experimentu. Jako druhá destička byla vybrána č. 8 RPHX 1204MOSN, a to z důvodu nejmenší závislosti drsnosti na řezné rychlosti a nejrovnoměrnějšímu nárůstu drsnosti vůči posuvu.

### 5.3 Srovnání třísek

Srovnání jednotlivých třísek lze vidět v Tab. 20. Z hlediska soudržnosti třísky se nejlépe jeví dvě destičky, VBD č. 3 RPHX 1204M4SN a č. 8 RPHX 1204MOSN. U těchto destiček se tříska nenamotávala na frézu. Naopak hned při obrábění se odlamovala a lze tedy tu třísku ohodnotit vždy jako článkovitou. Podle vzhledu hrany třísky se od všech odlišovala destička č. 2 RPHX 1204MOEN - 0, u které při posuvech 0,05 mm/z docházelo k tvorbě plynulé hrany třísky. U ostatních destiček docházelo k tvorbě vlnovité nebo pilovité hrany třísky. U hodnocení změny v barevnosti třísky se nejvíce odlišovala VBD č. 8 RPHX 1204MOSN, u které nebyl téměř žádný náznak hnědnutí třísky.



Tab. 20 Srovnání třísek

Srovnání třísky A = $v_c=50$ [m/min]; $f_z=0,05$ [mm/z] B = $v_c=50$ [m/min]; $f_z=0,2$ [mm/z] C = $v_c=150$ [m/min]; $f_z=0,05$ [mm/z] D = $v_c=150$ [m/min]; $f_z=0,2$ [mm/z]		RCKT-1204 MO-PM 4020				RPHX 1204MOEN-0				RPHX 1204M4SN				RPHX 1204M4EN				RPHX 1204MOSN			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Soudržnost třísky	nepřerušovaná	X		X		X		X						X		X					
	člankovitá		X		X		X		X	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X
Hrana třísky	plynulá					X		X													
	vlnitá	X		X			X			X		X		X		X		X		X	
	pilovitá		X		X				X	X		X		X		X		X		X	
Barva třísky	bez změny barvy	X	X			X	X			X	X			X	X			X	X		
	světle hnědá			X	X			X	X			X	X			X	X				
	hnědá																				
	modrá																				

Do dalšího pokračování experimentu by bylo vhodné vybrat destičku č. 8 RPHX 1204MOSN. Bude zajímavé zjistit, zda zvyšování řezné rychlosti ovlivní barevnost třísky. Břítová destička č. 2 RPHX 1204MOEN - 0 vykazuje plynulou hranu třísky při nižších posuvech. Bylo by tedy zajímavé, zdali by tato hrana třísky byla i u větších řezných rychlostí.

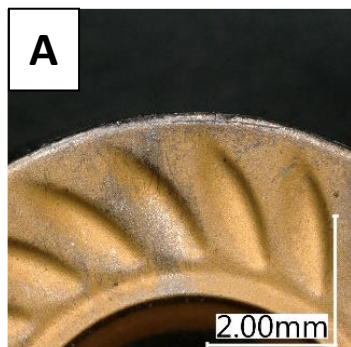
#### 5.4 Srovnání řezných destiček dle opotřebení

Opotřebení bylo sledováno během celého experimentu. Nejčastěji bylo vyzorována malá závislost opotřebení povlaku na řezné rychlosti. Naopak, mechanické opotřebení břitu se zvyšovalo s řeznou rychlostí. U řezné rychlosti 150 m/min docházelo již u některých nástrojů ke kráterovým výlomkům částí břitů.

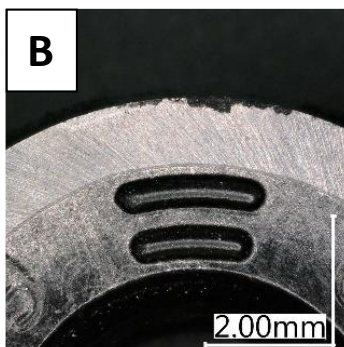
Srovnání břitů z pohledu na čela břítových destiček lze vidět níže (Obr. 72). Všechny tyto obrázky vznikly po obrábění řeznou rychlostí 150 m/min. Je patrné, že k největšímu opotřebení povlaku došlo u destičky č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020. Břit byl nejvíce opotřebený u břítové destičky č. 2 RPHX 1204MOEN - 0. Nejmenší známky opotřebení projevovala destička č. 3 RPHX 1204M4SN-F50.



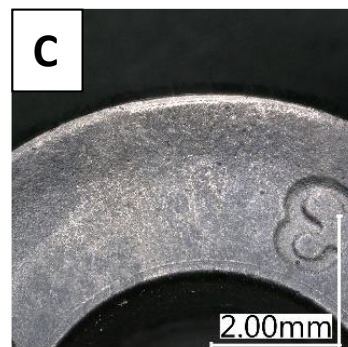
RCKT-1204 MO-PM 4020



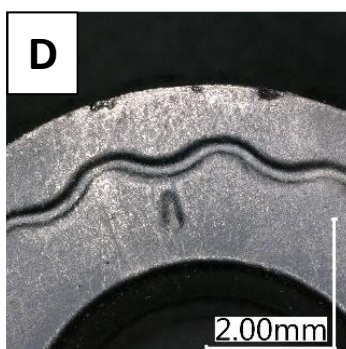
RPHX 1204MOEN-0



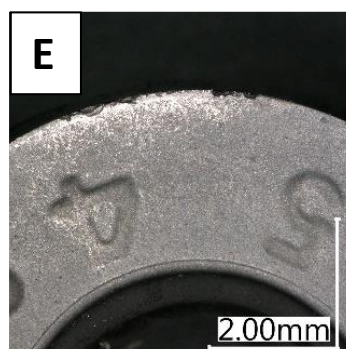
RPHX 1204M4SN-F50



RPHX 1204M4EN-M32



RPHX 1204MOSN-M50

*Obr. 72 Srovnání opotřebení*

V další části experimentu by bylo nejvhodnější dále prozkoumávat nejvíce a nejméně opotřeбенý nástroj, jak z hlediska opotřebení břitu nástroje, tak povlaku. Jedná se tedy o břitové destičky č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020, č. 2 RPHX 1204MOEN-0 a č. 3 RPHX 1204M4SN-F50.

## 5.5 Srovnání dle barvy destičky během obrábění

Jediná VBD, která se výrazně lišila od ostatních v barvě během obrábění, byla destička č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020 (Tab. 21). Zatímco u rychlosti 100 m/min tato VBD měla světle oranžovou barvu, u obrábění rychlostí 150 m/min barva destičky již byla oranžová. Lze tedy říct, že u této VBD dochází k větším teplotám, a proto se tato destička žhaví. U ostatních destiček změna barvy destičky nebyla zaznamenána.



Tab. 21 Barva destičky během obrábění

Barva destičky během obrábění	RCKT-1204 MO-PM 4020			RPHX 1204MOEN-0			RPHX 1204M4SN			RPHX 1204M4EN			RPHX 1204MOSN		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
Barva	Původní	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Oranžová		X	X											
	Rudá														

Z hlediska barvy destičky během obrábění bude zajímavé v další části experimentu prozkoumat destičku od firmy Sandvik a srovnat jí s nějakou jinou destičkou od firmy Ceratizit.



## 6 Zvětšení řezné rychlosti u vybraných destiček

Výběr destiček je znázorněn v Tab. 22. Pro další prozkoumání je vhodná destička č. 1 RCKT1204 MO-PM 4020 od firmy Sandvik, a břitové destičky č. 2 RPHX 1204MOEN - 0 a č. 5 RPHX 1204MOSN-M50 od firmy Ceratizit. Tyto tři destičky byly vybrány po důkladném zhodnocení a srovnání pěti destiček na základě působících sílových účinků během obrábění, drsnosti obrobené plochy, třísek, opotřebení břitové destičky a barvy destičky během obrábění. Pro pokračování v experimentu bylo však nutné vybrat pouze dva nástroje. Jelikož sledování sílových účinků má největší význam, VBD RPHX 1204MOEN-0 byla vyřazena z pokračování v experimentu.

Tab. 22 Srovnání břitových destiček

Vyměnitelná břitová destička	RCKT-1204 MO-PM 4020	RPHX 1204MOEN - 0	RPHX 1204M4SN	RPHX 1204M4EN	RPHX 1204MOSN
Sílové účinky	X				X
Drsnosti obrobené plochy		X			X
Třísky během obrábění		X			X
Opotřebení břitové destičky	X	X	X		
Barva destičky během obrábění	X				

V dalším průběhu experimentu byly navyšované řezné rychlosti pro vybrané destičky. Opět byly měřené síly během obrábění, drsnost povrchu, dále byla prozkoumána odebíraná tříska apod mikroskopem také zjišťováno opotřebení.

### 6.1 VBD č. 1 – RCKT1204 MO-PM 4020

Během obrábění titanu vyměnitelnou břitovou destičkou RCKT-1204 MO-PM 4020 u řezných rychlostí 200 m/min a 250 m/min nebylo zaznamenáno žádné namotávání třísky na frézu.

U řezné rychlosti 200 m/min byla destička žhavá, zbarvení bylo oranžové až rudé. Když posuv byl téměř nulový docházelo k samovznícení až jiskření drobných třísek. Při obrábění s řeznou rychlostí 250 m/min byla VBD extrémně žhavá a při posuvu 0,05 mm/z již odprskávala hořící tříska. Některé třísky následně hořely v pracovním prostoru frézky. Experiment byl přerušen



a nedokončen z důvodu bezpečnosti. V pracovním prostoru stroje byly po tomto obrábění třísky, které shořely úplně a také ty, které zcela neshořely. Pro lepší znázornění byly odebrány oba druhy třísek viz Obr. 78.

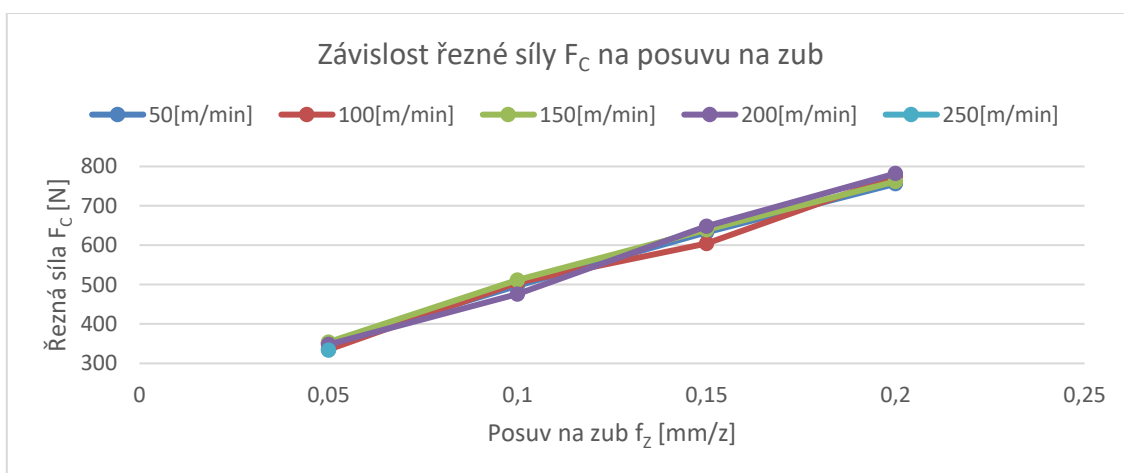
### 6.1.1 Síly

Tab. 23 Naměřené hodnoty sil – RCKT1204 MO-PM 4020

Řezné podmínky:		$v_c = 200$ [m/min]				$v_c = 250$ [m/min]			
		$n = 1012$ [1/s]				$n = 1265$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	52	104	156	208	63	126	189	252
Síly	$F_c$ [N]	348	476	648	782	334			
	$F_{cN}$ [N]	283	432	387	445	160			
	$F_p$ [N]	307	410	462	507	292			

I u vyšších rychlostí řezná síla zůstala největší ze všech měřených sil. Pasivní síla pro posuv 0,05 mm/z dosahuje hodnoty téměř 90 % síly řezné. S rostoucím posuvem se tento rozdíl zvyšuje. I pro vyšší rychlosti byly sestaveny grafy, které vykazují závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$  a řezné rychlosti  $v_c$ . V grafech jsou zobrazeny hodnoty i z předchozího měření při nižších řezných rychlostech. Tab. 23.

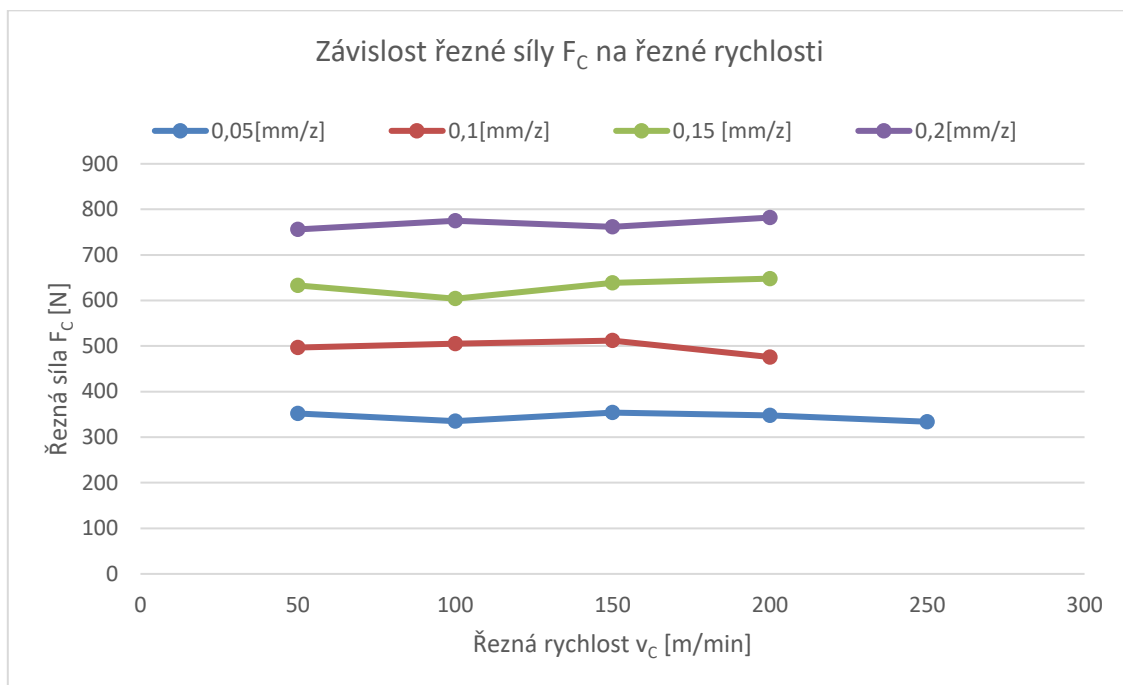
Z grafu (Obr. 73) lze opět vyčíst, že i u vyšší řezné rychlosti se síly navyšují v závislosti na posuvu. Při obrábění posuvem 0,1 mm/z bylo dosaženo nejmenší síly právě řeznou rychlostí 200 m/min. Je však nutno podotknout, že graf postrádá hodnoty, které nebyly naměřené z důvodu zahoření třísek.



Obr. 73 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub



Tento graf je také rozšířen o hodnoty řezné rychlosti 200 m/min a jednu hodnotu posuvu pro řeznou rychlost 250 m/min. Lze zde také vyčíst, že řezná síla s rostoucí řeznou rychlostí mírně klesá. I tento graf postrádá hodnoty, které nebyly naměřené z důvodu zahoření třísek. Obr. 74.



Obr. 74 Závislost řezné síly  $F_C$  na řezné rychlosti

Grafy jsou doplněné o získané hodnoty během obrábění při řezných rychlostech 200 m/min a 250 m/min. Křivky v grafu byly zase proloženy mocninou funkcí pro lepší srovnání. Tab. 24 ukazuje, že funkce závislosti na posuvu je téměř stejná pro čtyři řezné rychlosti a sice rostoucí. Hodnota exponentu se liší stále o 9 %. Z funkce závislosti na rychlosti je patrné, že je exponent záporný u posuvů 0,05 a 0,1 mm/z. Tímto měřením nebyla ověřena závislost posuvu pro řeznou rychlost 250 m/min z důvodu nedokončení experimentu.

Tab. 24 Funkce závislosti břitové destičky RCKT1204 MO-PM 4020

Funkce závislosti na posuvu		Funkce závislosti na rychlosti	
Rychlost [m/min]	Rovnice	Posuv [mm/z]	Rovnice
50	$F_C = 1803 \cdot f_z^{0,55}$	0,05	$F_C = 371 \cdot v_C^{-0,016}$
100	$F_C = 1921 \cdot f_z^{0,58}$	0,1	$F_C = 538 \cdot v_C^{-0,017}$
150	$F_C = 1827 \cdot f_z^{0,55}$	0,15	$F_C = 575 \cdot v_C^{0,02}$
200	$F_C = 1959 \cdot f_z^{0,58}$	0,2	$F_C = 705 \cdot v_C^{0,018}$



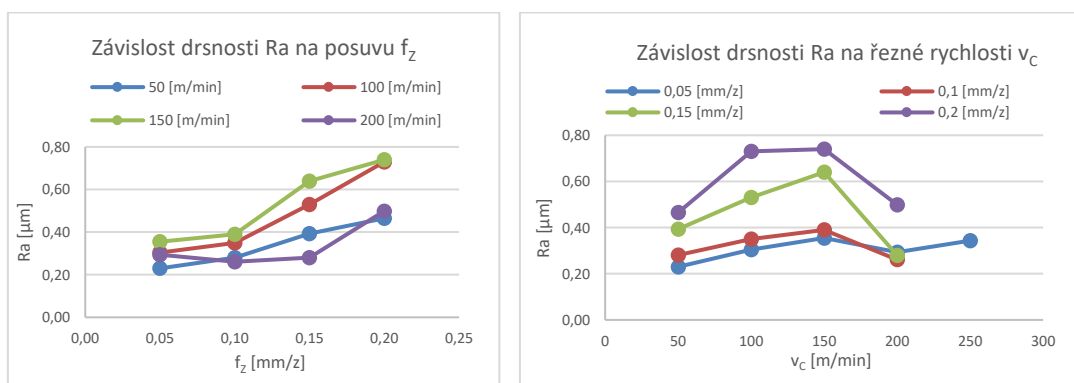
### 6.1.2 Drsnosti

I při rychlostech 200 m/min a 250 m/min byla měřená střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ , největší výška profilu  $R_z$  a maximální hloubka drsnosti  $R_{max}$ . V Tab. 25 jsou zobrazeny pouze hodnoty měření, kdežto grafy níže znázorňují i drsnosti naměřené v předchozí části experimentu. Hodnoty u řezné rychlosti 250 m/min s posuvy 0,1 mm/z, 0,15 mm/z a 0,2 mm/z nebyly naměřené z důvodu hořící třísky a celkového nedokončení experimentu.

Tab. 25 Naměřené hodnoty drsností – RCKT1204 MO-PM 4020

Řezné podmínky:		$v_c = 200$ [m/min]				$v_c = 250$ [m/min]			
		$n = 1012$ [1/s]				$n = 1265$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	52	104	156	208	63	126	189	252
Drsnosti	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,29	0,26	0,28	0,50	0,34			
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,12	2,11	2,11	3,03	2,45			
	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,48	2,67	2,87	3,43	2,78			

Střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$  u posuvů 0,1 mm/z a 0,15 mm/z je nejmenší pro řeznou rychlost 200 m/min. Během obrábění řeznou rychlostí 100 m/min a 150 m/min bylo dosaženo největší drsnosti  $R_a$  při všech posuvech. Se zvětšující se řeznou rychlostí drsnost již klesala. Při posuvu 0,15 mm/z byla drsnost  $R_a$  obrobeného povrchu nižší při řezné rychlosti 200 m/min než při 50 m/min. Obr. 75.



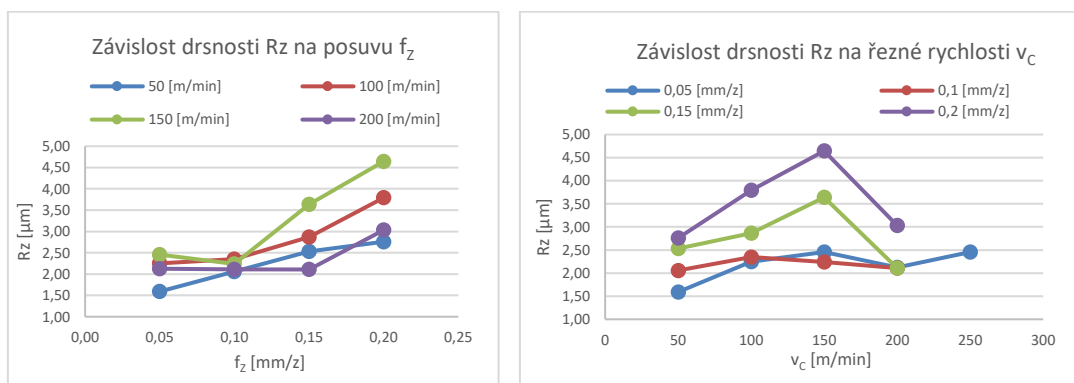
Obr. 75 Závislosti drsnosti  $R_a$  na posuvu a řezné rychlosti

Stejný pokles drsnosti u řezné rychlosti 200 m/min, který byl zajištěn u střední aritmetické úchylky profilu  $R_a$ , lze zaznamenat i u největší výšky profilu  $R_z$ . I zde u posuvu 0,15 mm/z došlo k obrobení povrchu s nejmenší drsností  $R_z$  právě u řezné rychlosti 200 m/min. Drsnost během



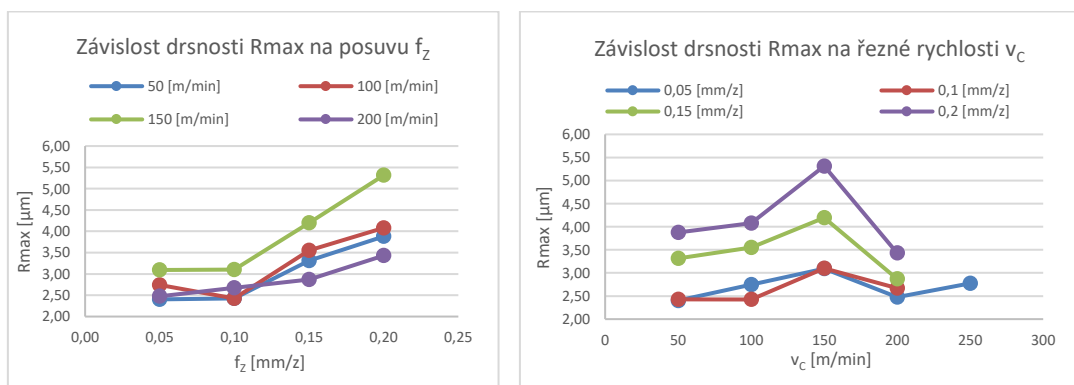


obrábění řeznou rychlostí 250 m/min byla naměřena pouze pro posuv 0,05 mm/z a měla hodnotu o 13 % vyšší než u obrábění řeznou rychlostí 250 m/min. Obr. 76.



Obr. 76 Závislosti drsnosti Rz na posuvu a řezné rychlosti

Také maximální hloubka drsnosti Rz u obrábění řeznou rychlostí 200 m/min byla nižší u posuvů 0,15 mm/z a 0,2 mm/z než u obrábění ostatními řeznými rychlostmi. Téměř stejná drsnost Rmax jako při obrábění řeznou rychlostí 250 m/min s posuvem 0,05 mm/z byla dosažena při obrábění řeznou rychlostí 200 m/min s posuvem 0,15 mm/z. Obr. 77.



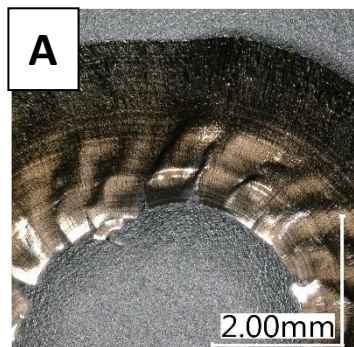
Obr. 77 Závislosti drsnosti Rmax na posuvu a řezné rychlosti

### 6.1.3 Třísky

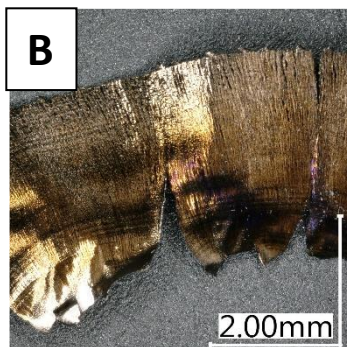
Na Obr. 78 jsou zobrazeny třísky odebrané během obrábění titanu břitovou destičkou RCKT1204 MO-PM4020. Jelikož experiment nebyl dokončen z důvodu zahoření třísek, třísky pro řeznou rychlost 250 m/min a posuv 0,2 nemohly být odebrány. Třísky byly článkovité a pilovité. U řezné rychlosti 200 m/min byly hnědé a u rychlosti 250 m/min modré. Na Obr. 78 E vidíme, že i z druhé strany modré třísky je spálení patrné, a tedy lze usuzovat, že i povrch neobrobeného materiálu bude silně tepelně ovlivněný až spálený. Na Obr. 78 C lze vidět třísku, která hořela. Tato tříska je velmi křehká, šedá barva znázorňuje popel. Na Obr. 78 F je spálená tříska z druhé strany.



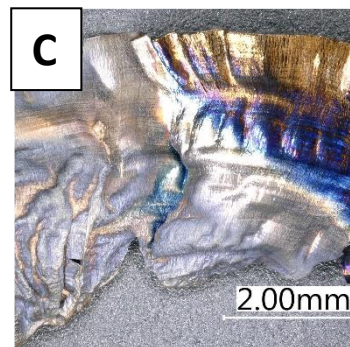
$v_c=200[\text{m/min}]$ ;  $f_z=0,05[\text{mm/z}]$



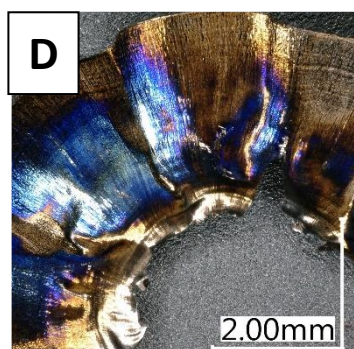
$v_c=200[\text{m/min}]$ ;  $f_z=0,2[\text{mm/z}]$



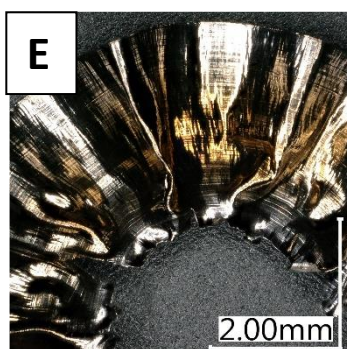
$v_c=250[\text{m/min}]$ ;  $f_z=0,05[\text{mm/z}]$



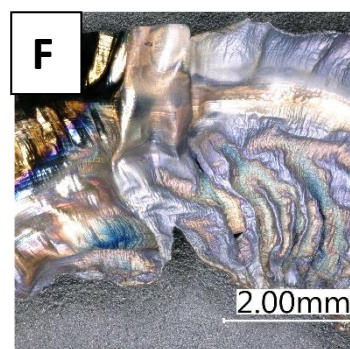
$v_c=250[\text{m/min}]$ ;  $f_z=0,05[\text{mm/z}]$



$v_c=250[\text{m/min}]$ ;  $f_z=0,05[\text{mm/z}] \updownarrow$



$v_c=250[\text{m/min}]$ ;  $f_z=0,05[\text{mm/z}] \updownarrow$



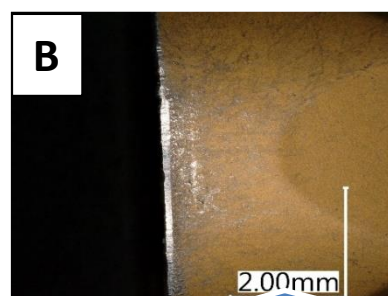
Obr. 78 Hodnocení třísky RCKT1204 MO-PM 4020

#### 6.1.4 Opatření

Povlak na destičce po frézování řeznou rychlostí 200 m/min je nerovnoměrně opotřebený. VBD vykazuje velké známky opotřebení jak na čele nástroje tak na hřbetě. Obr. 79.



$v_c = 200 [\text{m/min}]$



$v_c = 200 [\text{m/min}]$

Obr. 79 Opatření hřbetu a čela nástroje – RCKT1204 MO-PM 4020



## 6.2 VBD č. 5 – RPHX 1204MOSN-M50

Během obrábění titanu vyměnitelnou břitovou destičkou RPHX 1204MOSN-M50 bylo vyzorováno, že tříška se nikdy nenamotávala na frézu za níže uvedených řezných podmínek.

Při obrábění rychlosti 200 m/min byla vyzorována světle oranžová barva destičky. Při řezné rychlosti 250 m/min barva destičky již byla oranžová až rudá. Při malém posuvu docházelo ke vznícení tříšky a jiskření. Experiment však byl dokončen.

### 6.2.1 Síly

Tab. 26 Naměřené hodnoty sil – RPHX 1204MOSN-M50

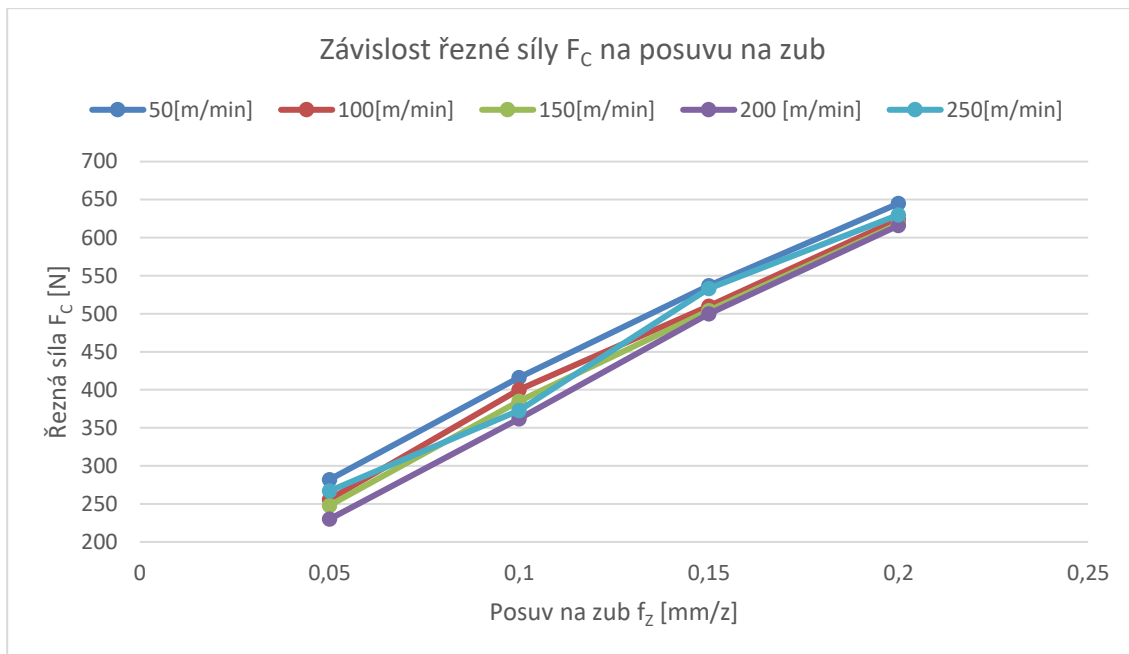
Řezné podmínky:		$v_c = 200$ [m/min]				$v_c = 250$ [m/min]			
		$n = 1012$ [1/s]				$n = 1265$ [1/s]			
		$a_p = 1$ [mm]				$a_p = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	52	104	156	208	63	126	189	252
Síly	$F_c$ [N]	230	362	500	616	267	373	533	630
	$F_{CN}$ [N]	106	175	190	129	160	274	375	586
	$F_p$ [N]	175	217	289	320	255	324	416	616

I u této VBD při vyšších řezných rychlostech je patrné, že největší ze všech měřených sil je síla řezná. Pasivní síla je o 25 až 40 % menší než síla řezná.

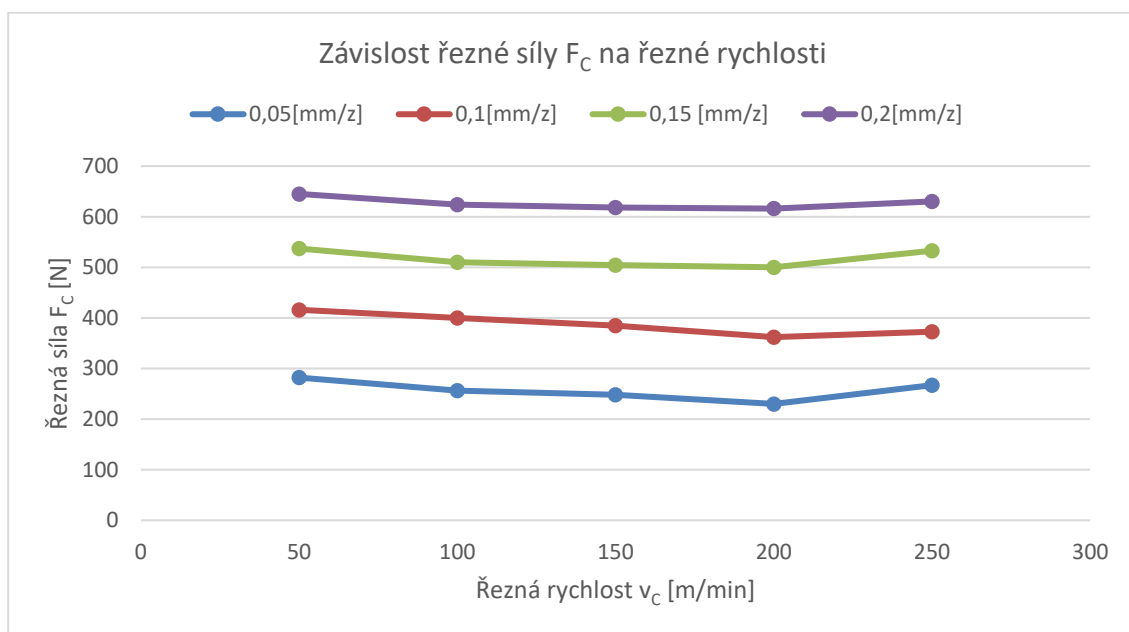
Z naměřených hodnot (Tab. 26) byly sestaveny grafy, které vykazovaly závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$  a řezné rychlosti  $v_c$ . V grafech jsou zobrazeny hodnoty  $i$  z předchozího měření za nižších řezných rychlostí.

Z prvního grafu (Obr. 80) lze opět vyčíst, že nejnižších sil u této destičky bylo dosaženo řeznou rychlostí 200 m/min. Při následném obrábění řeznou rychlostí 250 m/min došlo k navýšení sil.

Je zde také znázorněné, že čím větší posuv použijeme, tím menší vliv má řezná rychlost na výsledné řezné síly.

Obr. 80 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub

Z druhého grafu (Obr. 81) lze vyčíst, že řezná síla s rostoucí řeznou rychlostí mírně klesá, což je ve shodě s literaturou. Při hodnotě řezné rychlosti 200 m/min, ale začíná pozvolna stoupat.

Obr. 81 Závislost řezné síly  $F_c$  na řezné rychlosti

Grafy jsou doplněné o získané hodnoty během obrábění při řezných rychlostech 200 a 250 m/min. Křivky v grafu byly již tradičně proloženy mocninnou funkcí pro lepší srovnání. V Tab. 27 lze vidět, že funkce závislosti na posuvu je téměř stejná pro všech pět řezných rychlostí. Z funkce závislosti na rychlosti je patrné, že je exponent u všech posuvů záporný.



Tab. 27 Funkce závislosti břitové destičky RPHX 1204MOSN-M50

Funkce závislosti na posuvu		Funkce závislosti na rychlosti	
Rychlost [m/min]	Rovnice	Posuv [mm/z]	Rovnice
50	$F_C = 1666 \cdot f_z^{0,59}$	0,05	$F_C = 362 \cdot v_C^{-0,07}$
100	$F_C = 1730 \cdot f_z^{0,63}$	0,1	$F_C = 574 \cdot v_C^{-0,08}$
150	$F_C = 1760 \cdot f_z^{0,65}$	0,15	$F_C = 566 \cdot v_C^{-0,02}$
200	$F_C = 1923 \cdot f_z^{0,71}$	0,2	$F_C = 690 \cdot v_C^{-0,02}$
250	$F_C = 1715 \cdot f_z^{0,63}$		

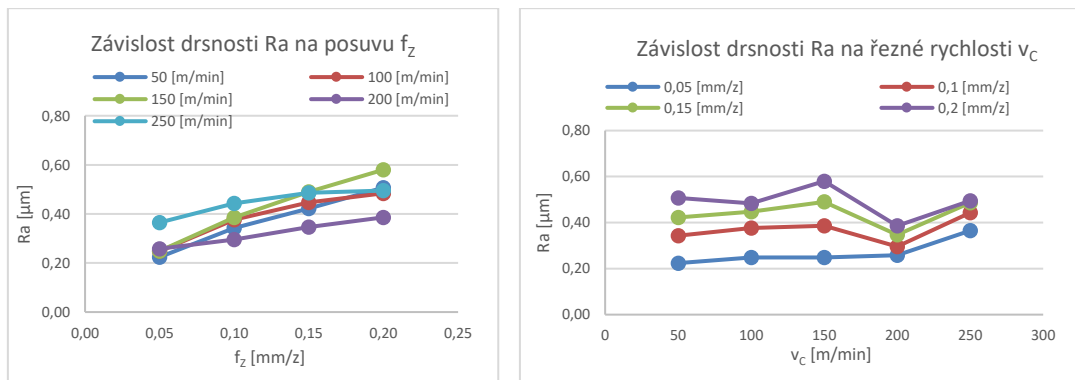
### 6.2.2 Drsnosti

U VBD RPHX 1204MOSN-M50, během obrábění vyššími řeznými rychlostmi, konkrétně 200 m/min a 250 m/min, byla měřená střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ , největší výška profilu  $R_z$  a maximální hloubka drsnosti  $R_{max}$ . V Tab. 28 jsou zase zobrazeny pouze hodnoty měření, kdežto grafy níže znázorňují i drsnosti naměřené v předchozí části experimentu.

Tab. 28 Naměřené hodnoty drsností – RPHX 1204MOSN-M50

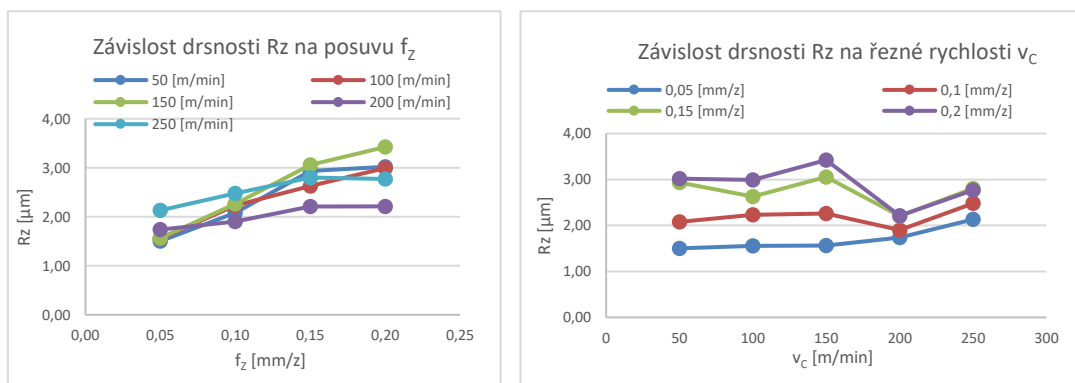
Řezné podmínky:		$v_C = 200$ [m/min]				$v_C = 250$ [m/min]			
		$n = 1012$ [1/s]				$n = 1265$ [1/s]			
		$a_P = 1$ [mm]				$a_P = 1$ [mm]			
Posuv	[mm/z]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	[mm/min]	52	104	156	208	63	126	189	252
Drsnosti	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,26	0,30	0,35	0,39	0,37	0,44	0,49	0,50
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,74	1,90	2,21	2,21	2,13	2,48	2,80	2,77
	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,90	2,19	2,64	2,49	2,57	2,94	3,22	3,52

Jak je patrné z grafu (Obr. 82) nejnižší hodnoty střední aritmetické úchylky profilu  $R_a$  u posuvů 0,1 mm/z, 0,15 mm/z a 0,2 mm/z bylo dosaženo řeznou rychlostí 200 m/m. Dále u řezné rychlosti 250 m/min se již drsnost povrchu zvětšovala. Zatímco rozdíl v drsnostech mezi obráběním řeznou rychlostí 150 m/min a 200 m/min tvořil průměrně 20 %. Rozdíl v drsnostech mezi obráběním řeznou rychlostí 200 m/min a 250 m/min tvořil 27 %.



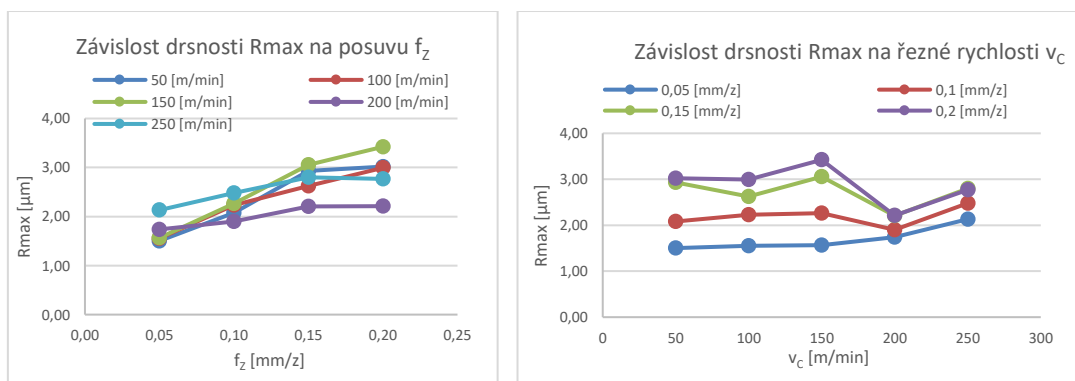
Obr. 82 Závislosti drsnosti Ra na posuvu a řezné rychlosti

I u největší výšky profilu Rz můžeme vidět prudký pokles drsnosti při navýšení řezné rychlosti ze 150 m/min na 200 m/min. Tento pokles byl největší u posuvu 0,2 mm/z. Naopak při posuvu 0,05 mm/z došlo k mírnému navýšení drsnosti Rz. Obr. 83.



Obr. 83 Závislosti drsnosti Rz na posuvu a řezné rychlosti

Maximální hloubka drsnosti Rmax byla naměřená na obrobeném povrchu po obrábění řeznou rychlostí 150 m/min s posuvem 0,2 mm/z. Naopak nejmenší drsnost Rmax při stejném posuvu byla naměřená při 200 m/min. Obr. 84.



Obr. 84 Závislosti drsnosti Rmax na posuvu a řezné rychlosti

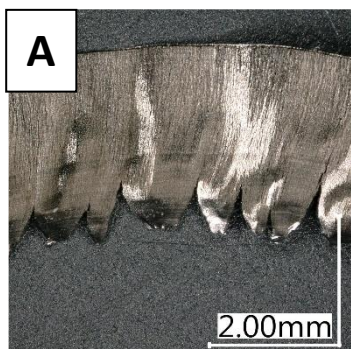




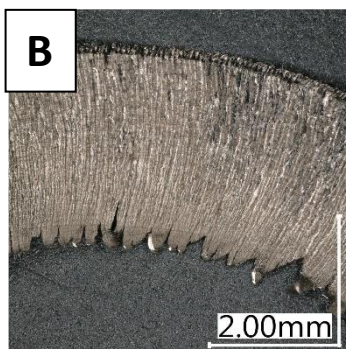
### 6.2.3 Třísky

Na Obr. 85 jsou zobrazeny třísky, které byly odebrány během obrábění titanu břitovou destičkou RPHX 1204MOSN-M50 za vyšších řezných rychlostí. Všechny třísky byly článkovité a nedocházelo k namotávání třísek na frézu. Třísky odebrané u posuvů 0,05m/min měly vlnitou hranu, kdežto třísky odebrané o posuvů 0,2 m/min měly hranu pilovitou. Třísky u řezných rychlostí 200 m/min neměly ještě ani světle hnědou barvu. Takle barva se začala poprvé vyskytovat u třísek odebraných za řezné rychlosti 250 m/min. Na Obr. 85 E lze vidět fotografii druhé strany třísky, na které je viditelná světle hnědá barva. Došlo tedy k propálení třísky až na druhou stranu.

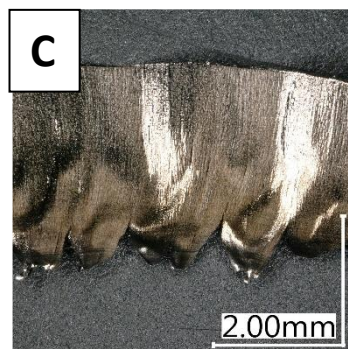
$v_c=200[m/min]$ ;  $f_z=0,05[mm/z]$



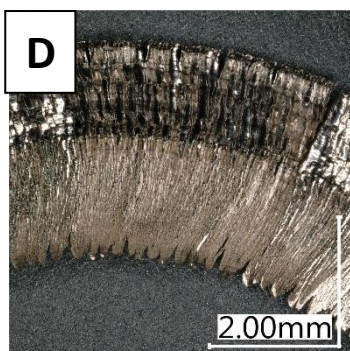
$v_c=200[m/min]$ ;  $f_z=0,2[mm/z]$



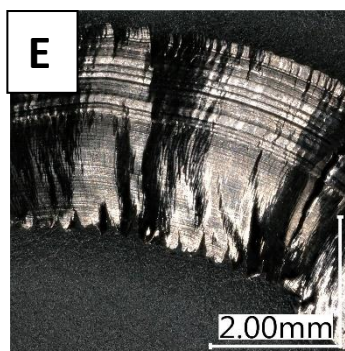
$v_c=250[m/min]$ ;  $f_z=0,05[mm/z]$



$v_c=250[m/min]$ ;  $f_z=0,2[mm/z]$



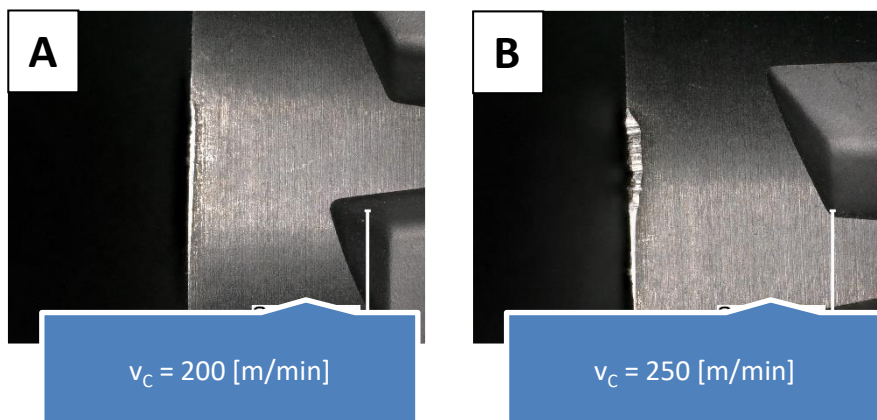
$v_c=250[m/min]$ ;  $f_z=0,2[mm/z]$  ↓



Obr. 85 Hodnocení třísky RPHX 1204MOSN-M50

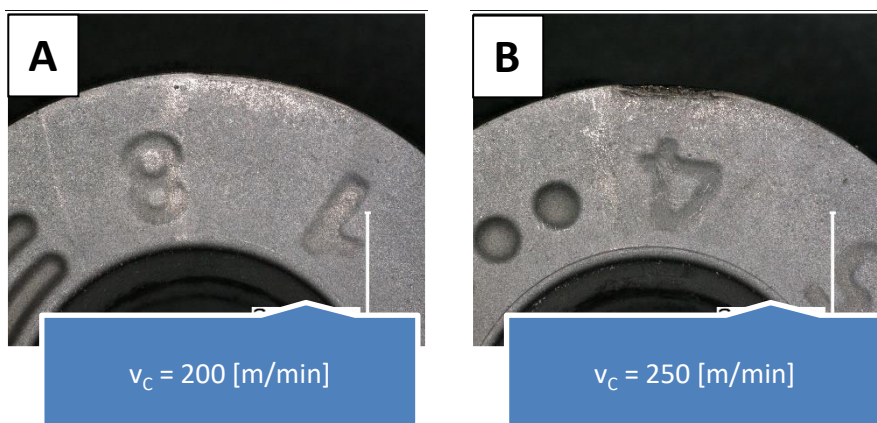
### 6.2.4 Opotřebení

Zatímco u destičky RPHX 1204MOSN-M50 během obrábění menšími řeznými rychlostmi byly zaznamenány malé známky opotřebení, u řezné rychlosti 250 m/min již bylo opotřebení znatelné. Obr. 86. Povlak však nevykazuje téměř žádné známky opotřebení.



*Obr. 86 Opatřebení hřbetu nástroje – RPHX 1204MOSN-M50*

Na Obr. 87 je pohled na čelo břitové destičky. Na čele je vidět poškození vrstvy povlaku.



*Obr. 87 Opatřebení čela nástroje – RPHX 1204MOSN-M50*





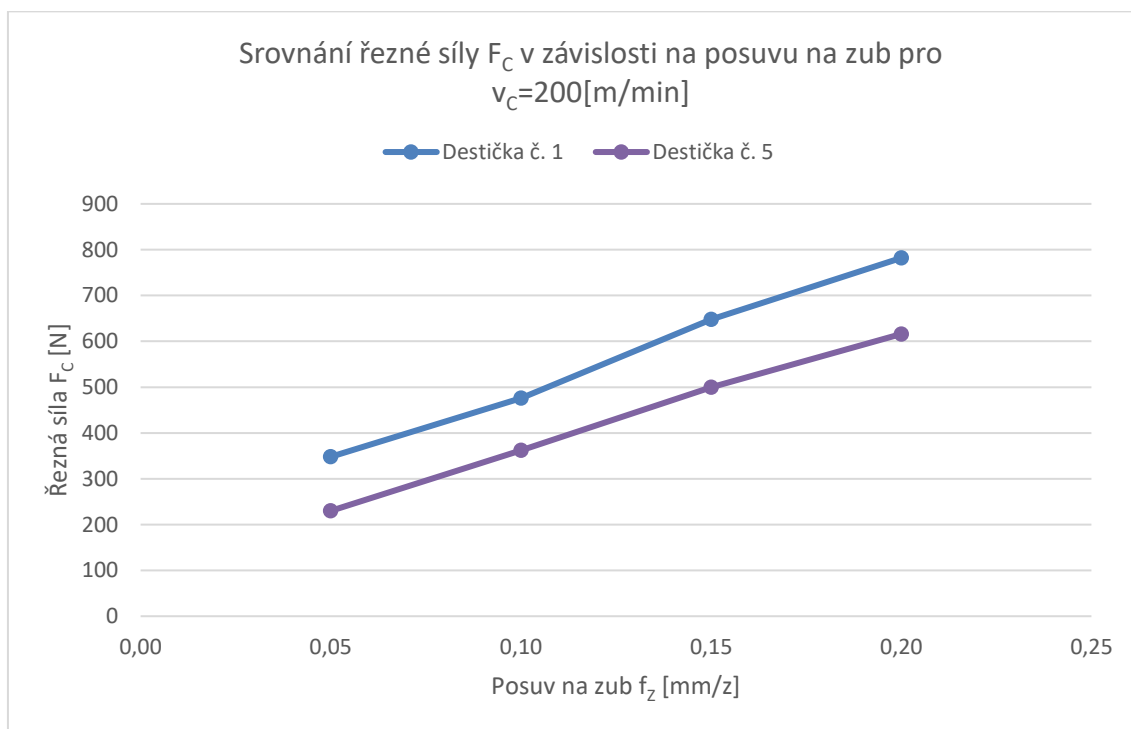
## 7 Srovnání VBD č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020 a VBD č. 5 RPHX 1204MOSN

Jednoznačné srovnání mezi těmito konkrétními destičkami bylo možné provést pouze pro řeznou rychlost 200 m/min. Srovnání pro řeznou rychlost 250 m/min šlo provést pouze tam, kde byl posuv 0,01 mm/z. U větších posuvů již experiment nebyl proveden a proto nedošlo k naměření potřebných dat.

### 7.1 Srovnání silových účinků

Na grafu Obr. 88 je srovnání destičky od firmy Sandvik s destičkou od firmy Ceratizit. Je zde patrné, že VBD č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020 i nadále potřebuje větší síly k překonání odporu materiálu než VBD č. 5 RPHX 1204MOSN. Jak první část experimentu prokázala, rozdíl se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšoval. Pro řeznou rychlost 50 m/min tvořil průměrně 17 %. Pro řeznou rychlost 150 m/min tvořil již 24 %. Teď lze vidět, že pro řeznou rychlost 200 m/min je rozdíl v silách mezi destičkami 26 %.

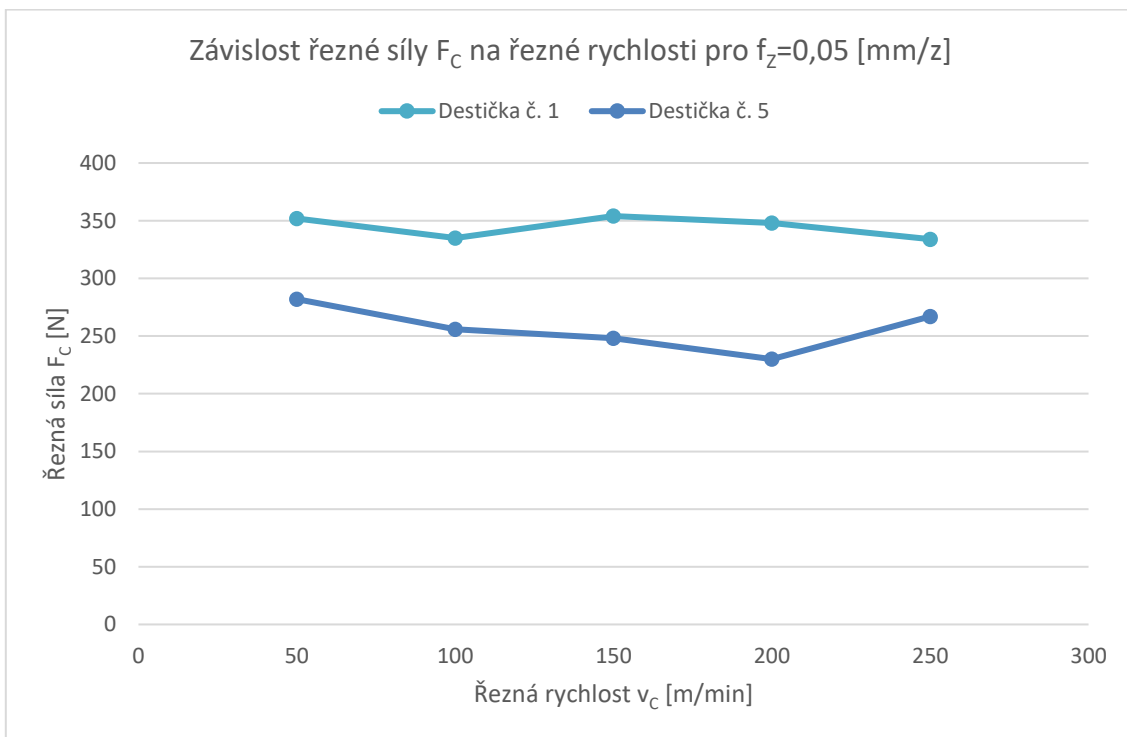
Kvůli nedokončení experimentu z důvodu bezpečnosti, řeznou rychlost 250 m/min již nelze srovnávat.



Obr. 88 Srovnání destiček dle sil



Závislost řezné síly  $F_c$  na řezné rychlosti lze sestavit právě pro posuv 0,05 mm/z, kde hodnoty sil pro břitovou destičku č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020 byly ještě naměřené, těsně před ukončením experimentu. Z grafu na Obr. 89 lze vyčíst, že každý nástroj se choval jinak při zvýšení rychlosti z 200 m/min na 250 m/min. Zatímco u břitové destičky č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020 došlo k mírnému poklesu sil, u nástroje č. 5 RPHX 1204MOSN došlo k prudkému vzrůstu této veličiny.



Obr. 89 Srovnání destiček dle sil

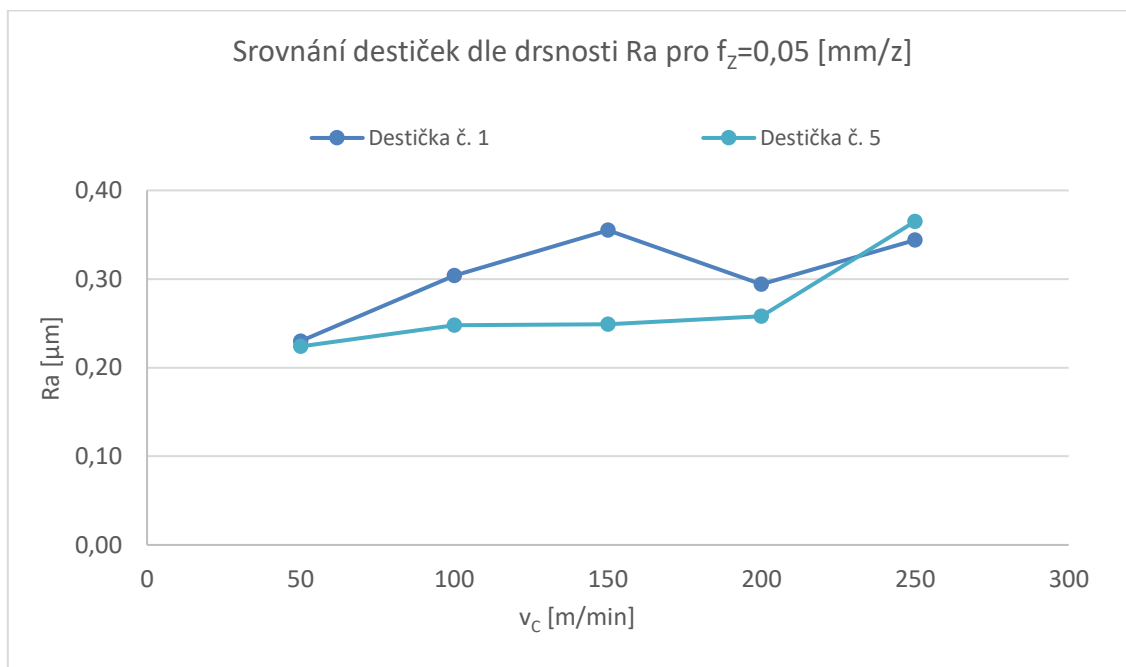
Bylo zjištěno, že řezná rychlost 200 m/min při obrábění titanu je limitní pro břitovou destičku č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020. Tato destička dosahovala hodnot sil 800 N při posuvu 0,2 mm/z. Břitová destička č. 5 RPHX 1204MOSN potřebovala nižší síly ke vniku do materiálu, konkrétně síly přesahující 600 N. U této destičky ani řezná rychlost 250 m/min nebyla limitem, i když při menších posuvech docházelo k mírnému jiskření.



## 7.2 Srovnání drsností

Pro srovnání drsností vybraných dvou destiček byla použita střední aritmetická úchylka profilů  $R_a$  v závislosti na řezné rychlosti pro posuv 0,05 mm/z.

Na grafu na Obr. 90 lze vidět, že rozdíl mezi VBD v drsnosti  $R_a$  obrobeného materiálu postupně narůstal až do řezné rychlosti 150 m/min, kde tvořil 35 %. Při dalším navýšení řezné rychlosti na 200 m/min se rozdíl zmenšil na 10 %. Stále větší drsnost vykazovala VBD č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020. Když řezná rychlost byla navýšená na 250 m/min, došlo k výraznému navýšení drsnosti titanu po obrábění břitovou destičkou č. 5 RPHX 1204MOSN a drsnost  $R_a$  byla vyšší o 8 % než drsnost po obrábění destičkou č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020.



Obr. 90 Srovnání destiček dle drsnosti obrobené plochy

Lze tedy říct, že pro dosažení menší drsnosti obrobeného povrchu za stejných řezných podmínek je vhodnější použít nástroj č. 5 RPHX 1204MOSN. Při řezné rychlosti 150 m/min a posuvu 0,05 mm/z bude dokonce drsnost nižší o 35 %, konkrétně 0,25  $\mu\text{m}$ , než u břitové destičky č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020.



### 7.3 Srovnání třísek

Tab. 29 přehledně uvádí, v čem se zásadně měnila tříška odebraná během obrábění těchto dvou destiček za extrémních řezných rychlostí.

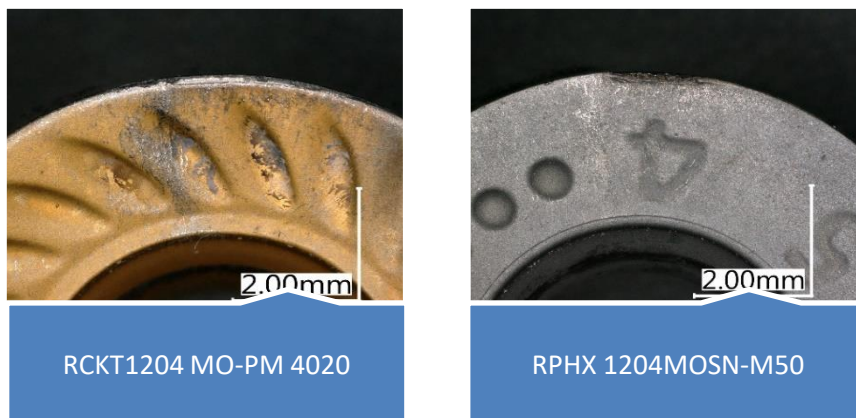
Tab. 29 Srovnání třísek

Srovnání třísky A = $v_c=200$ [m/min]; $f_z=0,05$ [mm/z] B = $v_c=200$ [m/min]; $f_z=0,2$ [mm/z] C = $v_c=250$ [m/min]; $f_z=0,05$ [mm/z] D = $v_c=250$ [m/min]; $f_z=0,2$ [mm/z]		RCKT-1204 MO-PM 4020				RPHX 1204MOSN			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Soudržnost třísky	nepřerušovaná								
	článkovitá	X	X	X		X	X	X	X
Hrana třísky	plynulá								
	vlnitá	X	X			X	X		
	pilovitá			X				X	X
Barva třísky	bez změny barvy					X	X		
	světle hnědá							X	X
	hnědá	X	X						
	modrá			X					

Zatímco soudržnost třísky a hrana třísky byla prakticky identická, k velkému rozdílu docházelo v barvě třísky. Je to způsobené většími silami, a tedy i teplotami při obrábění u břitové destičky č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020. Třísky po obrábění titanu touto destičkou byly šedě modré a některé úplně spálené. Třísky odebrané po obrábění titanu břitovou destičkou č. 5 RPHX 1204MOSN byly nanejvýš světle hnědé.

### 7.4 Srovnání dle opotřebení řezných destiček

Srovnání bylo provedeno na fotografiích vytvořených z pohledu na čelo nástroje (Obr. 91) po obrábění řeznou rychlostí 200 m/min. Je patrné, že k většímu opotřebení povlaku došlo u břitové destičky č. 1 RCKT1204 MO-PM 4020. Naopak břit nástroje byl více opotřeбенý u nástroje č. 5 RPHX 1204MOSN-M50.



Obr. 91 Srovnání opotřebení

Na základě zjištěného opotřebení těchto dvou nástrojů není možné vznést doporučení použití některého z nich při vysokých řezných rychlostech.

## 7.5 Srovnání dle barvy destičky během obrábění

Tab. 30 zobrazuje odstín barvy břitové destičky během obrábění titanu.

Tab. 30 Barva destičky během obrábění

Barva destičky během obrábění		RCKT-1204 MO-PM 4020					RPHX 1204MOSN				
		50	100	150	200	250	50	100	150	200	250
Řezna rychlost $v_c$ [m/min]		50	100	150	200	250	50	100	150	200	250
Barva	Původní	X					X	X	X		
	Oranžová		X	X						X	
	Rudá				X	X					X

Je zcela patrné, že při vyšších řezných rychlostech, konkrétně nad 150 m/min, dochází k výrazné změně barevnosti nástroje. Břitová destička č. 1 RCKT-1204 MO-PM 4020 při rychlostech nad 200 m/min vykazuje rudou barvu. Stejný odstín vykazuje břitová destička RPHX č. 5 1204MOSN až při rychlostech 250 m/min.





## 8 Závěrečné zhodnocení experimentu

Experiment byl rozdělen do dvou částí. V první části bylo obrábění provedeno všemi pěti břitovými nástroji (RCKT-1204 MO-PM 4020, RPHX 1204MOEN – 0, RPHX 1204M4SN, RPHX 1204M4EN, RPHX 1204MOSN) s určitými řeznými parametry. Ve druhé části experimentu bylo provedeno navýšení řezné rychlosti u dvou vybraných břitových destiček.

Srovnání všech pěti řezných destiček z hlediska řezných sil ukázalo, že VBD od firmy Sandvik potřebuje přibližně o 20 % větší sílu pro obrábění materiálu než destičky od firmy Ceratizit. Následující čtyři destičky, to znamená destičky od firmy Ceratizit, jsou si velmi podobné, avšak nejmenší sílu k překonání řezného odporu potřebuje VBD RPHX 1204MOEN – 0. Rozptyl řezných sil břitových destiček od firmy Ceratizit se pohybuje kolem 7 %. Pro řeznou rychlost 100 m/min a posuv 0,1 mm/z při hloubce záběru 1 mm vykazovaly břitové destičky od firmy Ceratizit síly v rozmezí od 372–400 N, zatímco břitová destička RCKT-1204 MO-PM 4020 vykazovala sílu 505 N. Bylo také vyzorováno, že rozdíl v silách mezi destičkou RCKT-1204 MO-PM 4020 a ostatními se navyšuje s rostoucí řeznou rychlostí. Potvrdilo se, že řezná síla se zvyšuje s rostoucím posuvem. Důkazem mohou být kladné hodnoty exponentů mocninné funkce získané v grafech závislosti řezné síly na posuvu, pohybující se kolem 0,6. Naopak řezná síla neprokazovala téměř žádnou závislost na řezné rychlosti a pokud ano, trend byl spíše klesající. Lépe to znázorňují exponenty z mocninných funkcí, které mají minimální záporné hodnoty blížící se k nule.

Srovnání naměřených hodnot drsností ukázalo, že největší hodnota střední aritmetické úchylky profilu byla téměř vždy dosažena břitovou destičkou RPHX 1204MOEN – 0. Největší hodnota byla dosažena při obrábění řeznou rychlostí 150 m/min při posuvu 0,2 mm/z a činila 1,25  $\mu\text{m}$ . U ostatních destiček hodnoty střední aritmetické úchylky profilu se pohybovaly v rozmezí od 0,2 do 0,7  $\mu\text{m}$ . Nejnižší drsnosti dosahovala VBD RCKT-1204 MO-PM 4020. Nejmenší závislost drsnosti na řezné rychlosti a nejrovnoměrnější nárůst drsností vůči posuvu byl zaznamenán u břitové destičky RPHX 1204MOSN.

Z hlediska soudržnosti třísky se nejlépe jeví dvě destičky, a to RPHX 1204M4SN a RPHX 1204MOSN. U těchto destiček se tříška nenamotávala na frézu. Naopak hned při obrábění se odlamovala a lze tedy tu třísku ohodnotit vždy jako článkovitou. Podle vzhledu hrany třísky se od všech odlišovala destička RPHX 1204MOEN – 0, u které při posuvech 0,05 mm/z docházelo k tvorbě plynulé hrany třísky. U ostatních destiček docházelo k tvorbě vlnovité nebo pilovité



hrany třísky. U hodnocení změny v barevnosti třísky se nejvíce odlišovala destička RPHX 1204MOSN, u které nebyl téměř žádný náznak hnědnutí.

Během experimentu bylo možné vyzorovat opotřebení povlaku u kterého se neprojevila veliká závislost na řezné rychlosti. A také opotřebení, které bylo přímo na řezné části břitu, a to už prokazovalo určitou závislost na řezné rychlosti. U řezné rychlosti 150 m/min docházelo u některých nástrojů ke kráterovému odlamování břitů. K největšímu opotřebení povlaku došlo u destičky RCKT-1204 MO-PM 4020. Břit byl nejvíce opotřeбенý u břitové destičky RPHX 1204MOEN-0. Nejmenší známky opotřebení se projevily na destičce RPHX 1204M4SN.

Ve srovnání dle barvy nástroje během obrábění se odlišovala pouze jedna VBD. Břitová destička RCKT-1204 MO-PM 4020 již při rychlosti 100 m/min a 150 m/min vykazovala světle oranžovou barvu. Lze tedy říct, že u této destičky dochází k větším teplotám, a proto tato VBD se žhaví. U ostatních destiček změna barvy destičky nebyla zaznamenána.

Ve druhé části experimentu byla navyšována řezná rychlost postupně na hodnoty 200 m/min a 250 m/min. Tento experiment byl proveden již pouze na dvou nástrojích. Konkrétně na břitové destičce firmy Sandvik RCKT-1204 MO-PM 4020 a břitové destičce firmy Ceratizit 1204MOSN. U destičky RCKT-1204 MO-PM 4020 při řezné rychlosti 250 m/min došlo k velkému nažhavení a prudce se oddělovaly hořící třísky. Z toho důvodu experiment nebyl dokončen. Drobné srovnání však proběhlo. VBD 1204MOSN-M50 byla při této rychlosti již také velmi žhavá, třísky však nehořely v takové míře jako u první destičky. Dle většiny způsobů na hodnocení řezivosti vyšla lépe ve vysokých řezných rychlostech VBD 1204MOSN-M50.





## 9 Závěr

Zadání diplomové práce bylo naplněno. Byl proveden rozbor zadané problematiky. V teoretické části je uvedena definice řezivosti nástroje a kritéria hodnocení řezivosti, tj.: intenzita opotřebení břitu, vztah k dosahované teplotě řezání, silové zatížení, dosažení drsnosti obrobeného povrchu a druh tvořící se třísky.

Před samotným experimentem po konzultaci s vedoucím diplomové práce byly zvoleny řezné podmínky pro obrábění slitiny titanu. Výběr nástrojů nebyl prováděn, jelikož srovnávání se uskutečňovalo na předem zadaných kruhových břitových destičkách. Firma Sandvik dodala k experimentu břitovou destičku RCKT-1204 MO-PM 4020 a firma Ceratizit dodala čtyři nástroje, a to: RPHX 1204MOEN – 0, RPHX 1204M4SN, RPHX 1204M4EN, RPHX 1204MOSN.

Dále, v laboratořích ČVUT, bylo provedeno samotné obrábění pomocí technologie frézování za sucha. Následovalo měření silových účinků a drsností obrobených ploch. Třísky odebrány během obrábění a opotřebení nástrojů byly prozkoumány pod mikroskopem. Byla také sledována barva břitových destiček v záběru.

Z těchto sledovaných hodnot bylo zjištěno, která VBD má lepší vlastnosti z hlediska řezivosti nástroje. Břitová destička firmy Sandvik RCKT-1204 MO-PM 4020 dosáhla nejnižší drsnosti obrobeného materiálu, ale na úkor sil potřebných k překonání řezného odporu. Je totiž zapotřebí o 20 % větších sil než u ostatních nástrojů. Tato VBD měla také tepelně ovlivněnou třísku už u nejmenších řezných rychlostí ve srovnání s jinými nástroji. V krátkém čase se žhavila. Břitová destička PHX 1204MOEN – 0 potřebovala nejmenší síly k obrobení materiálu, ale při tom dosáhla nejvyšších drsností obrobeného povrchu a opotřebení nástroje bylo nejprokazatelnější. Nejlépe z hlediska řezivosti nástroje se jevila břitová destička RPHX 1204MOSN, která při poměrně nízkých řezných silách vykazovala velmi dobrou kvalitu povrchu co se týče její drsnosti. Tento nástroj se jevil velmi dobře i z hlediska odebírané třísky, která nebyla nijak tepelně ovlivněná až do řezných rychlostí 200 m/min.

V případě pokračování experimentu bych doporučil věnovat pozornost opotřebení nástrojů a vyhodnocení trvanlivosti nástroje při dlouhodobých zkouškách.

V průběhu experimentu byly shledány dvě zajímavosti. Po celou dobu nedošlo k ulomení ani jedné břitové destičky a během obrábění řeznou rychlostí 250 m/min docházelo k zahoření některých titanových třísek.





## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění - 1. část*. [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Strojní inženýrství“ na I. stupni MS studijního programu. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003.
- [2] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. ČVUT, Praha, 1989.
- [3] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II: Určeno pro posl. 4. roč. fak. stroj.* Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1994. ISBN 80-7078-228-5.
- [4] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 9788024825335.
- [5] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2
- [6] DVOŘÁK, Luděk. *Nástroje pro náročný materiál. Mmspektrum*. [online]. 2017, s. 70. 170941. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-narocny-material-titan.html>
- [7] KYOCERA-SGSTOOL. *Picking the Right Tools for Machining Titanium. MRS Digital* [online]. ©2019 [cit. 27.06.2019]. Dostupné z: <https://www.kyocera-sgstool.eu/picking-the-right-tools-for-machining-titanium/>
- [8] IBRAHIM, G.A., CHE HARON C. H., GHANI J.A. Surface integrity of Ti-6Al-4V ELI when machined using coated carbide tools under dry condition. *Inflow: International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2009, roč. 4 č. 2, ISSN 191-196
- [9] SANDVIK. *Postup při frézování různých typů materiálů. Sandvik Coromant* [online]. ©2019 [cit. 27.06.2019]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/milling-different-materials.aspx>
- [10] CERATIZIT. *Cutting materials. Ceratizit S.A* [online]. ©2019 [cit. 27.06.2019]. Dostupné z: <https://www.ceratizit.com/en/products/metal-cutting/cutting-materials/>
- [11] FROES, F.H. *Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications*. Ohio: ASM International, 2015. ISBN 978-1-62708-079-8
- [12] Xichun L., Yi. *Hybrid Machining – Theory, Methods, and Case Studies*. Glasgow: Academic Press, 2018. ISBN 978-0-12-813059-9



- [13] BUMBÁLEK, Leoš. Deformační chování materiálu při řezání se zaměřením na přesné obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2003. ISBN: 80-7204-325-0.
- [14] Harvey, James A. *Machine Shop Trade Secrets – A Guide to Manufacturing Machine Shop Practices (2nd Edition) - 1. Work Fast*. South Norwalk: Industrial Pres, 2013. ISBN 978-0-8311-3477-8
- [15] TECHNICKÝ PORTÁL. Zvláštnosti třískového obrábění. *Business Media* [online]. ©2006 [cit. 27.06.2019]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/zvlastnosti-triskoveho-obrabeni\\_18016.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/zvlastnosti-triskoveho-obrabeni_18016.html)
- [16] PADEVĚD, Václav. *Obrábění titanových slitin*. Praha, 2017. Bakalářská práce. FS ČVUT v Praze. Vedoucí práce Zdeněk Pitrmuc.
- [17] HOCHENG, H. *Machining Technology for Composite Materials – Principles and Practice*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-030-0
- [18] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 80-719-6264-3.
- [19] JIRÁSEK, Jakub, Martin SIVEK a Petr LÁZNIČKA. *Ložiska nerostů*. Ostrava: Anagram, 2010. ISBN 80-01-03513-1.
- [20] IROCKS. The Arkenstone. [online]. ©2019 [cit. 27.06.2019]. Dostupné z: <https://www.irocks.com/minerals/specimen/44904>
- [21] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.
- [22] YENS, C. a M. PETERS. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. [Chichester: John Wiley] (distributor), 2003. ISBN 35-273-0534-3.
- [23] TSUPPORT. Problematika obrábění dílů pro letecký průmysl. *Www.t-support.cz* [online]. Praha: Technický týdeník, 2017 [cit. 27.06.2019]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/problematika-obrabeni-dilu-pro-letecky-prumysl-14>