

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



MONITOROVÁNÍ ŘEZNÉHO PROCESU

MONITORING OF THE CUTTING PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

JAN VESELÝ

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veselý** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **438610**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Monitorování řezného procesu

Název bakalářské práce anglicky:

The monitoring of cutting proces

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Parametry řezného procesu i kvality obrobené plochy
3. Experimentální měření
4. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vítězslav Rázek CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení o samostatném zpracování bakalářské práce:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma *Monitorování řezného procesu* vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:.....

Podpis:.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za odborné vedení mé práce, za poskytnutí odborných a cenných rad a zejména za ochotný a vstřícný přístup a trpělivost, se kterou jsem se u něho vždy setkal. Poděkovat bych chtěl také rodině za podporu po celou dobu studia.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje monitorování řezného procesu. První část práce je zaměřena na teoretický rozbor řezných materiálů, základy procesu řezání, řezné síly, třísky, plastické deformace, teploty při obrábění a kvality povrchu. Druhá část práce je zaměřena na experimentální měření na universálním hrotovém soustruhu za použití ubíracího soustružnického nože s VBD ze slinutého karbidu, obráběna byla slitina titanu Ti6Al4V. Experimentální měření obsahuje tři části: utváření třísky, velikosti složek řezných sil a dosaženou kvalitu povrchu.

KLÍČOVÁ SLOVA: řezná síla, tříska, kvalita povrchu, řezná rychlost, posuv, hloubka řezu.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the monitoring of the cutting process. The first part of this thesis is focused on theoretical analysis of cutting materials, fundamentals of cutting process, cutting forces, chips, plastic deformation, temperatures during machining and surface quality. The second part of the thesis is focused on experimental measurement on a universal center lathe using a cutting turning tool with VBD of indexable carbide, titanium alloy Ti6Al4V was machined. The experimental measurement consists of three parts: chip formation, sizes of cutting forces and the surface quality achieved.

KAYWORDS: Cutting force, chip, surface quality, cutting speed, feed, cutting depth.

Seznam použitých zkratk a symbolů:

<u>Symbol</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Význam</u>
Al ₂ O ₃	-	Oxid hlinitý
a _p	[mm]	Hloubka třísky
CA	-	Čistá oxidická keramika
CM	-	Směsná keramika
CN	-	Neoxidická keramika
Co	-	Kobalt
CVD	-	Chemické povlakování
D	[mm]	Průměr
F	[N]	Síla
f	[mm/ot]	Posuv
F _c	[N]	Řezná síla
F _f	[N]	Posuvová síla
F _p	[N]	Pasivní síla
KBN	-	Kubický nitrid boru
l _n	[mm]	Vyhodnocovaná délka
l _r	[mm]	Základní délka (referenční)
l _t	[mm]	Celková délka
Mk	[N.m]	Kroutící moment
Mk _b	[N.m]	Kroutící moment vyvolaná brzdou
Mo	-	Molybden
NbC	-	Karbid niobu
P _c	[W]	Řezný výkon
P _f	-	Základní rovina
P _o	-	Ortogonální rovina
P ₀	[W]	Výkon motoru naprázdno
P _{už}	[W]	Užitný výkon
PVD	-	Fyzikální povlakování
Q	[J]	Celkové teplo
Q _n	[J]	Teplo odvedené nástrojem
Q _o	[J]	Teplo odvedené obrobkem
Q _{pe}	[J]	Teplo vzniklé v oblasti plastické deformace

Q_α	[J]	Teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje
Q_γ	[J]	Teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje
Ra	[μm]	Střední aritmetická úchylka drsnosti
Rm	Mpa	Mez pevnosti
Rmax	[μm]	Maximální výška profilu
RO	-	Rychlořezná ocel
Rp0,2	-	Smluvní mez kluzu
Rq	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka profilu
Si ₃ N ₄	-	Nitrid křemíku
SK	-	Slinuté karbidy
TaC	-	Karbid tantalu
TiC	-	Karbid titanu
TiCN	-	Karbonitrid titanu
TiN	-	Nitrid titanu
V	-	Vanad
VBD	-	Vyměnitelná břitová destička
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
W	-	Wolfram
W	-	Objemový součinitel třisek
WC	-	Karbid wolframu
α	[°]	Úhel hřbetu
β	[°]	Úhel břitu
γ	[°]	Úhel čela
ε_r	[°]	Úhel špičky
κ_r	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
κ_r'	[°]	Úhel nastavení vedlejšího ostří

Obsah

1. ÚVOD	9
2. ŘEZNÝ PROCES	10
2.1 Monitorování řezného procesu	10
2.2 Třískové obrábění	10
3. ŘEZNÉ MATERIÁLY	11
3.1 Požadavky na vlastnosti řezného materiálu	12
3.2 Nástrojová ocel	14
3.3 Rychlořezná ocel.....	15
3.4 Slinuté karbidy	16
3.5 Cermety.....	20
3.6 Řezná keramika.....	20
3.7 Kubický nitrid boru - KBN	21
3.8 Polykrystalický diamant	22
4. ZÁKLADY PROCESU ŘEZÁNÍ	22
4.1 Plochy a úhly řezného klínu.....	23
4.2 Plastická deformace	25
4.3 Tvary třísek	25
5. ŘEZNÉ SÍLY	27
5.1 Přímá metoda měření	28
5.2 Nepřímá metoda měření.....	30
6. TEPLA A TEPLOTA PŘI OBRÁBĚNÍ	31
7. PARAMETRY ŘEZNÉHO PROCESU	33
7.1 Dosahované parametry IT a Ra	35
7.2 Kvalita povrchu při obrábění	35
7.3 Přehled parametrů:	37
8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
8.1 Popis pracoviště	39
8.2 Utváření třísky	42
8.3 Měření složek řezných sil	46
8.4 Drsnost povrchu	51
Závěr:	58
Použitá literatura:.....	60

1. ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá tématem monitorování řezného procesu. Je rozdělena na dvě základní části, a to část teoretickou a část experimentální. V teoretické části se práce věnuje základnímu seznámení s monitorováním řezného procesu, třískovému obrábění, dále jsou představeny řezné materiály, kde bude kladen důraz především na slinuté karbidy. Další část práce pojednává o základech procesu řezání, kde je uvedena problematika geometrie nástroje, plastická deformace a utváření třísek. Následuje kapitola o řezných silách a jejich měření pomocí přímé a nepřímé metody. Závěr teoretické části je věnován kapitole o vzniku tepla a teplotě při obrábění a poslední oblast teoretické části pojednává o parametrech řezného procesu.

Druhá část této bakalářské práce se věnuje experimentálnímu měření. Hlavním cílem tohoto měření a celé této práce je porovnání výsledků naměřených hodnot a jejich interpretace pro zadané řezné podmínky. Jako řezný materiál bude použita vyměnitelná břitová destička ze slinutého karbidu a polotovarem bude slitina titanu. Experimentální měření bude probíhat na universálním hrotovém soustruhu. Tento experiment zahrnuje celkem tři části. První část se zabývá třískami, druhá část práce se věnuje složkám řezných sil a třetí část práce sleduje dosahované parametry kvality povrchu.

Problematika monitorování řezného procesu je stále aktuálním tématem, neboť na vhodné řezné podmínky je stále kladen větší důraz, aby se dosáhlo maximální hospodárnosti a produktivity výroby.

2. ŘEZNÝ PROCES

Řezný proces je daná technologická činnost, při které dochází k přeměně polotovaru na hotový, nebo před hotovený výrobek požadovaného tvaru, rozměrové přesnosti a kvality povrchu [1], [2].

V tomto smyslu je řezání ztrátové oddělování materiálu, při kterém dochází k ovlivnění materiálu ve vrstvě řezu určité šířky a hloubky. Jedná se například o metody třískového obrábění, řezání plamenem, laserovým paprskem a vodním paprskem [3].

V závislosti na technologii oddělování materiálu můžeme řezný proces rozdělit na souvislý (soustružení, vrtání, vyvrtávání), nesouvislý (obrážení, hoblování) a cyklický (frézování, broušení). Skutečný řezný proces je ovlivněn pracovními podmínkami, které ovlivňují celý proces a jeho výsledek. Jde například o materiál obrobku, řezný materiál a geometrie nástroje, kvalitu a provedení břítu, řezné podmínky, řezné prostředí apod. [4], [5].

2.1 Monitorování řezného procesu

Monitorování řezného procesu je činnost, při které se pozorovatel snaží změřit a zaznamenat požadované charakteristiky řezného, v našem případě obráběcího, procesu a z těchto získaných hodnot následně vyhodnotit cílová data. Monitorované charakteristiky jsou například řezné síly, výkon řezání, teplo a teplota při obrábění, opotřebení nástroje, trvanlivost břítu ostří a další [4].

2.2 Třískové obrábění

Při procesu třískového obrábění dochází k přeměně výchozího polotovaru na požadovaný tvar, požadovanou přesnost a drsnost povrchu finálního obrobku odebráním jednotlivých třísek řezným nástrojem. Třískové obrábění můžeme rozdělit na ruční a strojní. Dále do této skupiny patří i řezání, pilování, zaškrabávání, vrtání, řezání závitů, soustružení, frézování, obrážení, hoblování, protahování a broušení. Obrábění je tedy záležitostí kontrolovaného odchodu třísky. Obrábění je dáno soustavou obráběcí stroj, obráběcí nástroj a obrobek [1], [3], [6].

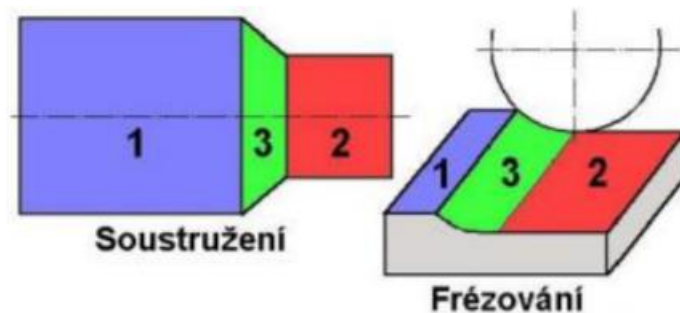
U všech metod třískového obrábění je kladen důraz:

- Tvar břitu nástroje a tvorba třísky,
- vhodné síly a teploty na břitu nástroje,
- odolnost nástroje oproti opotřebení [3], [6].

Polotovary je materiál, který se bude obrábět, polotovary dělíme na:

- Normalizované: tyče, plechy, trubky, dráty, válcované profily,
- nenormalizované: výkovky, vylisky, odlitky, svařence [3], [6].

Obrobek je výsledek obráběcího procesu a je to již obrobená, nebo částečně obrobená plocha (obr. 1). Je charakterizován rozměry a tvary jednotlivých obrobených ploch. Obrobek se skládá z obrobené, obráběné a přechodové plochy [1], [4].



Obrázek 1 Obrobek - základní plochy[9]

Na obrázku 1 jsou základní plochy obrobku:

- 1 – obráběná plocha,
- 2 – obrobená plocha,
- 3 – přechodová plocha [4].

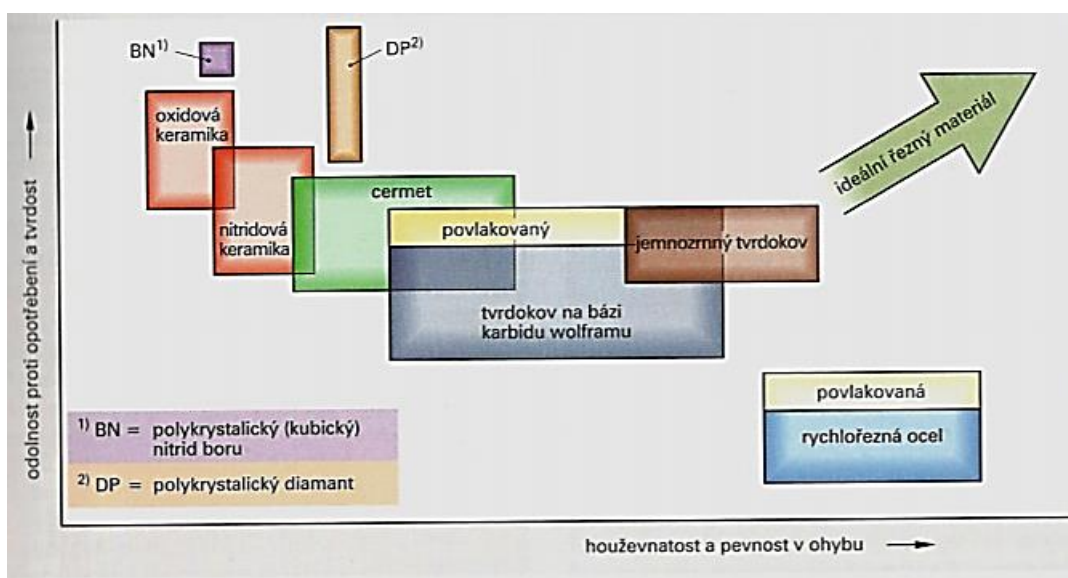
3. ŘEZNÉ MATERIÁLY

Řezný materiál je materiál břitu obráběcího nástroje. Vlastnosti materiálu mají zcela zásadní vliv na dosahovanou výkonost a trvanlivost nástroje (obr. 2). Během 20. století došlo k vývoji nových, produktivnějších materiálů. Zavedení rychlořezných ocelí a slinutých karbidů znamenala zlom ve schopnostech nástroje. Časy obráběcích operací byly několikanásobně zkráceny. V současné době dochází stále ke zlepšování a vývoji řezných materiálů, ale již není tak přelomový. A z tohoto důvodu jsou na řezný materiál kladeny velké požadavky [3], [7].

3.1 Požadavky na vlastnosti řezného materiálu

Pro řezný materiál s ideální řezivostí se vyžaduje:

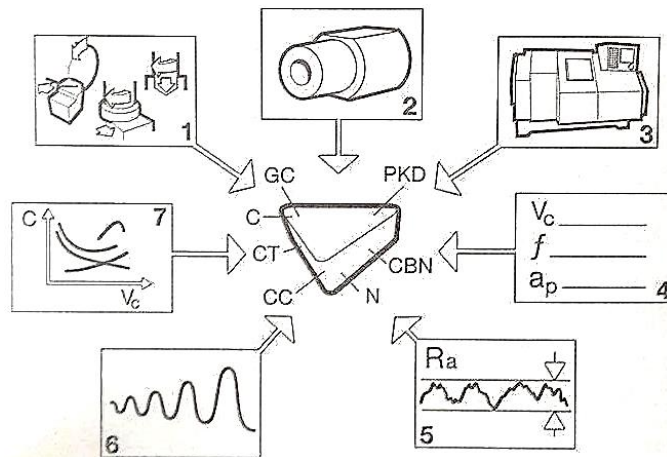
- Vysoká tvrdost a pevnost za vyšších pracovních teplot,
- vysoká houževnatost,
- chemická stálost,
- odolnost proti kolísání teploty,
- odolnost proti mechanickému opotřebení,
- snadná zpracovatelnost,
- dostupnost a přijatelná cena [3], [7].



Obrázek 2 Závislost tvrdosti a houževnatosti řezných materiálů [3]

„Volba řezného materiálu musí zohledňovat tyto základní faktory:

- 1 – druh operace,
- 2 – materiál obrobku,
- 3 – obráběcí stroj,
- 4 – řezné podmínky,
- 5 – požadovanou kvalitu povrchu,
- 6 – stabilitu technologie obrábění,
- 7 – náklady a hospodárnost.“ [6]



Obrázek 3 Faktory volby řezného materiálu[6]

Prozatím se nepodařilo vytvořit ideální řezný materiál, který by vyhovoval všem uvedeným požadavkům (obr. 3). Významný posun ve vývoji nástrojových materiálů k ideálním řezným vlastnostem představuje povlakování povrchu řezné části nástroje. Povlakováním lze získat nástroj s požadovanou houževnatostí a pevností, na kterém je nanesen tvrdý, otěruvzdorný a chemicky stálý povlak. Nejčastěji používaný materiál pro tvrdé povlaky je nitrid titanu (TiN), karbid titanu (TiC), karbonitrid titanu (TiCN) a oxid hlinitý (Al_2O_3). Povlakem se navyšuje jmenovitý rozměr nástroje [7], [8].

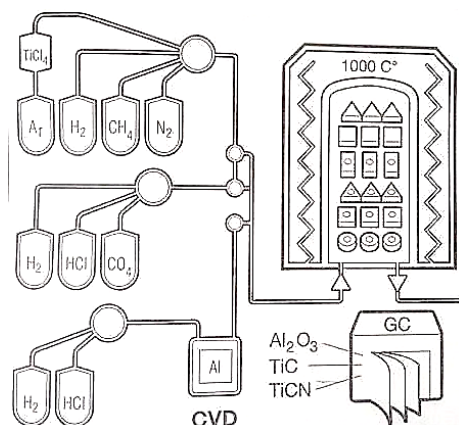
Povlakování přineslo největší přínos u vyměnitelných břitových destiček a monolitních nástrojů ze slinutých karbidů, dále potom u rychlořezné oceli a částečně i u řezné keramiky [8].

Povlakování provádíme za účelem zvýšení odolnosti proti otěru, tepelná izolaci, abychom zabránili oxidaci a difuzi, a v neposlední řadě k zabránění tvoření nárůstku na ostří. Tyto povlaky mají své charakteristické barvy, povlak může být tvořen jednou nebo několika vrstvami. Tloušťka jednotlivých vrstev bývá nejčastěji v rozmezí 2 až 15 μm [6].

Povlakování se dělí na dvě základní technologie:

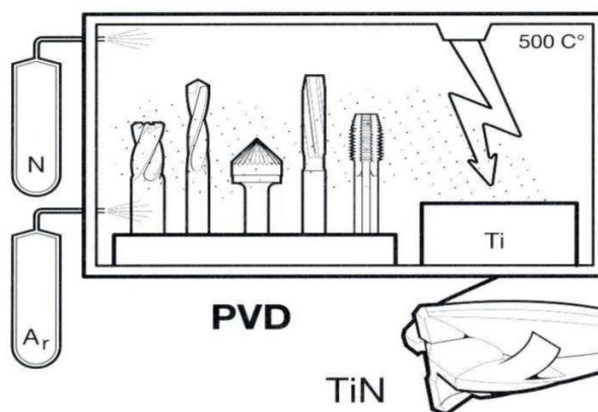
- Fyzikální povlakování (Physical Vapor Deposition – PVD),
- chemické povlakování (Chemical Vapor Deposition – CVD) [8].

Povlakování CVD – patří mezi průmyslově nejrozšířenější, je založeno na principu nanášení tenkých chemických vrstev a to formou chemické reakce různých plynů (obr. 4). Destičky se zahřejí přibližně na teplotu 1000°C. U karbidu titanu to jsou nejčastěji tyto plyny: vodík, chlorid titanu a metan. Při povlakování oxidem hlinitým se využívá chlorid hlinitý, nebo plynný dusík. U metody CVD lze snadno vytvářet vícevrstvé povlaky [6].



Obrázek 4 Technologie povlakování CVD [6].

Povlakování PVD – je proces, při kterém dochází k odpařování, odprášení nebo ionizaci materiálu. Jako příklad lze uvést čistý Titan a jeho reakce s vhodným plynem ve vakuové komoře (obr. 5). Teploty při této technologii jsou oproti metodě CVD téměř poloviční – 500°C. Nanášená tloušťka vrstvy bývá 3 až 5 μm. Tato technologie se hodí především na nanášení povlaků na tvarově složité a velmi ostré nástroje, nejčastěji na rychlořeznou ocel, monolitní a pájené nástroje ze slinutých karbidů - například frézy a vrtáky [6], [8].



Obrázek 5 Technologie povlakování PVD [6].

3.2 Nástrojová ocel

Dnes se již téměř v praxi nevyužívá, nástrojovou ocel nahrazují kvalitnější řezné materiály. V praxi běžně použito pro ruční náradí a měřidla.

Rozdělení nástrojové oceli:

- Nelegované oceli,
- legované oceli,
- vysokolegované oceli [8].

3.3 Rychlořezná ocel

Rychlořezné oceli (RO) nebo HSS (High Speed Steels) z vývojového hlediska jsou uzavřeny. A však vůči dnešnímu nástupu moderních nástrojových materiálů nejsou zanedbatelné a téměř nenahraditelné. Rychlořezná ocel má ze všech řezných materiálů nejvyšší houževnatost. Je snadno zpracovatelná běžnými technologiemi. Nástroje z RO můžeme vyrábět odléváním, kování, válcováním i třískovým obráběním. Rychlořezná ocel má příznivou pořizovací cenu. Nevýhodou je menší tvrdost a odolnost vůči opotřebení. Při teplotě 600°C dochází ke ztrátě pevnosti [7], [8].

Použití RO – rychlořezná ocel je považována za druhý nejpoužívanější řezný materiál. Tyto nástroje můžeme vhodně aplikovat na starších a méně tuhých obráběcích strojích, u kterých může být sklon ke chvění. Je to ovlivněno nízkou řeznou rychlostí, která bývá pod 60 m.min⁻¹. RO se nejčastěji využívá pro monolitní nástroje, a to i větších rozměrů jako jsou například protahovací trny, nástroje na výrobu ozubení, frézy, závitníky, kotoučové pily a tvarové nástroje [7], [8].

Chemické složení a vlastnosti:

- Oceli s převažujícím obsahem wolframu,
- oceli s převažujícím obsahem molybdenu,
- oceli komplexně legované prvky W + Mo a V [8].

Rychlořezné oceli jsou vysoce legované nástrojové oceli, které jsou v normě uvedené jako třída ocelí 19 8xx. Dosahovaná tvrdost je cca 60 až 68 HRC a pevnost v ohybu dosahuje 2700 až 4500 MPa. Vlastnosti RO jsou ovlivněny legujícími prvky [8].

Wolfram W – obsah v RO 6 až 18 %, je to základní legující prvek. Wolfram má za následek vytvoření tvrdých karbidů odolných proti opotřebení a pevný martenzit odolný vůči popouštění [8].

Molybden Mo – 0,7 až 10 % vlastnostmi podobný jako wolfram. Intenzita jeho využití je vyšší, a z toho důvodu se používá v menším procentuálním množství. Karbidy molybdenu jsou jemnější, a proto jsou ve struktuře jemněji rozloženy. Tím je zvýšena houževnatost u molybdenových ocelí. Omezeno teplotním zpracováním, které musí být přesně dodržované [8].

Vanad V – 1,3 až 4,3 %, v RO vytváří nejtvrďší karbidy a tím zvyšuje odolnost proti opotřebení. Což má ovšem na druhou stranu za následek, že klesá houževnatost a obrobiteľnosť [8].

Kobalt Co – 5 až 12 %, zvyšuje odolnost proti snížení odolnosti za zvýšených teplot [8].

Chrom Cr – 4 % z důvodu dostačené kalitelnosti a prokalitelnosti [8].

Sortiment rychlořezných ocelí:

Podle obsahu legujícího prvku se rychlořezné oceli rozdělují na wolframové a molybdenové. Podle obsahu dalších legujících prvků kobalt a vanad dělí na výkonné označované HSS a vysoce výkonné označované HSS-E. Sortiment rychlořezných ocelí je velmi široký. V příložené tabulce (tab. 1) jsou některé vybrané příklady ocelí [8].

Tabulka 1 Rychlořezné oceli - chemické složení a použití [8].

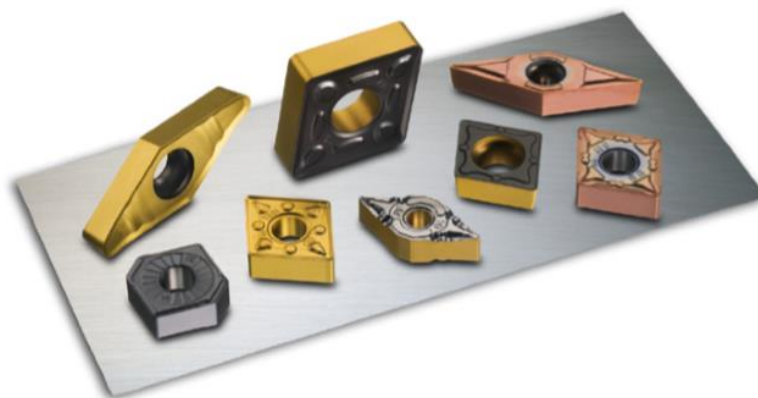
ČSN	EN ISO	W	Mo	V	Co	C	Vlastnosti, použití
19 824	HS 18-0-1	18.0	-	1.10	-	0.78	Soustružnické nože, frézy, výstružníky
19 820	HS 3-3-2	2.85	2.70	2.35	-	0.99	Úsporná ocel, komunální nářadí, pilové listy ručních pil
19 830	HS 6-5-2	6.30	4.95	1.90	-	0.84	Nejpoužívanější ocel pro všechny druhy nástrojů
-	HS 6-5-3	6.30	4.95	2.95	-	1.20	Nástroje se zvýšenou odolností proti opotřebení
19 852	HS 6-5-2-5	6.30	4.95	1.90	4.75	0.91	Frézy, vrtáky, závitníky pro nejvyšší namáhání
19 861	HS 10-4-3-10	9.50	3.55	3.25	10.0	1.28	Soustružnické nože a frézy pro nejvyšší výkony

Povlakováním nástrojů z rychlořezných ocelí dosáhneme částečného zlepšení vlastností řezného materiálu. Řezivost u RO má menší zlepšení jako povlak u slinutých karbidů. Obvyklé zvýšení trvanlivosti břítu se vyskytuje v oblastech 50 až 200%, řeznou rychlost je možné zvýšit v průměru o 10 až 20 %. Nanášení povlaku probíhá metodou PVD, protože jejich pracovní teplota je menší než popouštěcí teplota. Nejpoužívanější povlaky jsou TiN, TiAlN a TiCN [8].

3.4 Slinuté karbidy

Jak už vyplývá z názvu, jde o materiál obsahující tvrdé částice karbidů, které jsou vázané v pojivu. Vyrábějí se práškovou metalurgií z různých karbidů, karbidu wolframu (WC), karbidu titanu (TiC), karbid tantalu (TaC), karbid niobu (NbC) a z kovového pojiva nejčastěji kobaltu (Co). Velikost tvrdých částic se pohybuje v rozpětí 1 až 10 μm a jejich množství tvoří 80 až 95 % celkového objemu materiálu [6].

Slinuté karbidy (SK) mají vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Slinuté karbidy snázejí zahřátí břitů až na 900°C a mají vysokou pevnost v tlaku. Ve srovnání s rychlořeznou ocelí mají nižší houževnatost a menší tepelnou vodivost. V současnosti jsou slinuté karbidy nejvíce využívané řezné materiály, protože se dají aplikovat na širokou oblast operací. Na trhu se nejčastěji objevují jako vyměnitelné břitové destičky (dále VBD), (obr. 6), ale v současné době dochází také k rozvoji slinutých karbidů v podobě monolitních nástrojů [4], [7].



Obrázek 6 Ukázka VBD ze slinutého karbidu [6]

Chemické složení slinutých karbidů:

Slinutý karbid byl vytvořený německou firmou Krupp, a to v roce 1926. Ten byl vytvořený na jednoduché bázi dvousložkového karbidu WC + Co. Kvůli difuznímu opotřebení docházelo k rychlému tvoření žlábků na ploše čela nástroje, tím docházelo k ovlivnění trvanlivosti ostří, která byla velmi nízká. Odstranění těchto nežádoucích jevů došlo díky přidání karbidů (TiC, TaC a NbC) [7].

Kobalt obsažený v pojivu má zásadní vliv na houževnatost a jeho obsah v rozmezí od 6 do 20 %. Velmi důležitého pokroku se dosáhlo v 70. letech, kdy došlo k zmenšení zrna na 1 až 0,5 μm [7].

Slinuté karbidy můžeme rozdělit z hlediska použití do tří základních skupin:

- Skupina K: WC + Co,
- skupina P: WC + TiC + Co,
- skupina M: WC +TiC +TaC/NbC + Co [5].

Na trhu se objevuje velmi velké množství SK. Označování však může být u každého výrobce odlišné, tím dochází k horší orientaci a výběru vhodného typu. Proto byla přijata mezinárodní klasifikace třídění SK, která neobsahuje informace o chemickém složení, povlakování a výkonosti (tab. 2). Norma pouze doporučuje vhodnosti použití. Základní třídění do tří skupin P, M, K bylo doplněno o další tři skupiny N, S a H. Pro jednodušší orientaci byla každé skupině přiřazena barva [7], [8].

Tabulka 2 Přehled skupin slinutých karbidů [7]

Skupina	Podskupiny	Základní chemické složení	Efektivní aplikace pro obráběný materiál
P	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	WC (30÷82)% +TiC (8÷64)% +Co (5÷17)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou, plynulou třísku: Nelegovaná, nízkolegovaná a vysoce legovaná ocel, litá ocel, automatická ocel, nástrojová ocel, feritická a martenzitická korozivzdorná ocel.
M	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	WC (79÷84)% +TiC (5÷10)% +TaC.NbC (4÷7)% +Co (6÷15)%	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou a střední třísku: Austenitická a feriticko austenitická ocel, korozivzdorná, žáruvzdorná, žárovevná, nemagnetická a otěruvzdorná ocel.
K	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	WC (87÷92)% +Co (4÷12)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající krátkou, drobnou třísku: Nelegovaná i legovaná šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina.
N	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30		Slinuté karbidy pro obrábění neželezných materiálů: Slitiny mědi a hliníku, duroplasty, fibry, plasty s vlákninou, tvrdá guma.
S	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30		Slinuté karbidy pro obrábění: Žáruvzdorné slitiny na bázi Fe, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Titanu, Ti slitiny.
H	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30		Slinuté karbidy pro obrábění: Zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa, kalené oceli HRC 48÷60, tvrzené kokilové litiny HSh 55÷58

Povlakované slinuté karbidy

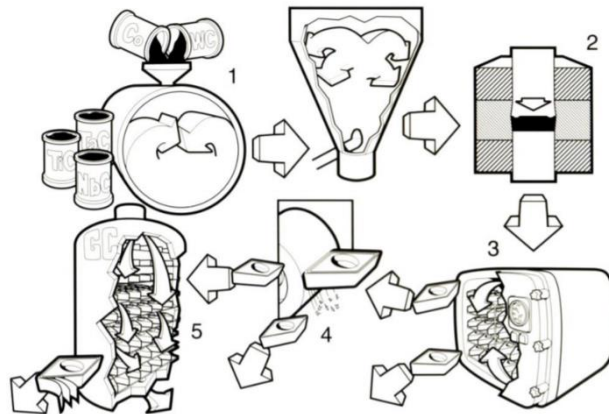
Povlakováním vyměnitelných břitových destiček dochází k zlepšení technických i ekonomických vlastností. K povlakování dochází nejčastěji metodou CVD. Řezná rychlost se může zvýšit o 200 až 300% [8].

Tabulka 3 Rozdělení slinutých karbidů [3]

Hlavní skupina	Použití	Vlastnosti
P pro materiály s dlouhou třískou, např. ocel, tepe- rovanou litinu	01 dokončování	↑ rostoucí tvrdost/ oděruvzdornost ↓ rostoucí houževnatost
	10 kopírovací	
	20 soustružení	
	30 soustružení	
	40 hrubování	
M pro materiály s dlouhou i krátkou třískou, např. nerezavějící nebo automatové oceli	10 dokončování	↑ rostoucí tvrdost/ oděruvzdornost ↓ rostoucí houževnatost
	20 kopírovací	
	30 soustružení	
	40 hrubování	
K pro materiály s krátkou třískou, např. litinu, neželezné kovy, kalenou ocel	01 dokončování	↑ rostoucí tvrdost/ oděruvzdornost ↓ rostoucí houževnatost
	10 kopírovací	
	20 soustružení	
30 hrubování		

Každá skupina slinutých karbidů se ještě dále dělí podle obsahu pojiva Co a chemických vlastností. Toto rozdělení je stanoveno normou podle ČSN ISO 513/1994. Každá skupina má danou barvu, a bere v úvahu daný obráběný materiál a typ třísky. Rozdělení vychází ze skutečných pracovních podmínek, rozdělení dle skupiny, čísla rozdělení, použití a vlastností (tab. 3). Vlastnosti jsou vyznačeny šipkami. Čím je toto číslo vyšší, tím máme nástroj s vyšší houževnatostí, ale naopak s menší odolností proti opotřebení [5].

Výroba slinutých karbidů – výrobu stručně popisuje obrázek 7



Obrázek 7 Výroba slinutých karbidů [6]

1. výroba prášku, 2. lisování polotovarů, 3. slinování, 4. tvarování polotovarů, 5. povlakování

3.5 Cermety

Cermet je jednotný název pro všechny tvrdé kov-keramické materiály, které obsahují nejčastěji tyto tvrdé částice TiC, TiCN, TiN v kovovém pojivu (Ni, Mo, Co). Jejich název vychází z počátečních zkratk CERamic - METal. V praxi je můžeme považovat jako slinuté karbidy na bázi titanu, na místo karbidů wolframu [6], [8].

Vlastnosti cermetů:

- Vysoká otěruvzdornost,
- vysoká teplotní odolnost a vysoká chemická stálost,
- vysoká odolnost proti opotřebení břitů,
- nízký sklon k vytváření nárůstků [3], [6], [8].

Oblast použití cermetů

Vyměnitelné břitové destičky pro soustružnické, frézovací, vystružovací a dokončovací operace s vysokou řeznou rychlostí [3].

3.6 Řezná keramika

Pod názvem řezná keramika se dnes na trhu uvádí několik materiálů s rozdílným chemickým složením, mikrostrukturou a povrchovou vrstvou. Vývoj v oblasti řezné keramiky byl zcela rozhodující pro její posunutí vpřed. Dnešní řezné keramické materiály jsou velmi tvrdé, vysokou tvrdost si zachovávají i za tepla, chemicky nereagují s obrobkem. Přes dosažený pokrok zůstává velmi úzké pole použití řezné keramiky. Používá se například k frézování a soustružení litin, žáruvzdorných slitin a kalených ocelí. Správné použití keramiky je závislé na podmínkách obrábění. Kam zahrnujeme dokonalou stabilitu upnutí, velmi výkonné a tuhé obráběcí stroje a řezné podmínky [6], [7].

Rozeznáváme dvě základní skupiny řezné keramiky:

- Na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 ,
- na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 [6], [7].

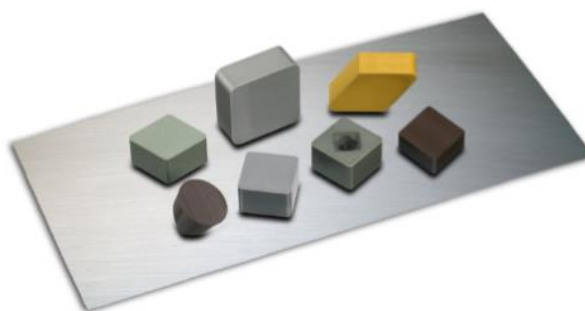
Čistá oxidická keramika CA – bílé nebo šedé barvy, je tvořena z 99 % oxidem Al_2O_3 . Má velmi vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení za tepla, teplotní odolnost až $1200^\circ C$. Tato řezná keramika má však nízkou houževnatost i odolnost proti teplotnímu rázu, to je dáno nízkou teplotní vodivostí. Při obrábění šedé litiny nebo konstrukčních ocelí bez přerušovaného řezu

dosahuje řezná rychlost až 1000 m/min. Houževnatost můžeme nepatrně zlepšit přidáním malého množství oxidu zirkoničitého [6], [7], [8].

Směsná keramika CM – černé barvy, vzniká přidáním kovové fáze 20 až 40 % TiC nebo TiN k čisté keramice. Tím získá vyšší odolnost proti teplotnímu šoku a zlepší se její teplotní vodivost a zvýší se houževnatost. To umožňuje obrábění s částečně přerušovaným řezem i použití řezné kapaliny. Houževnatost však není srovnatelná s houževnatostí slinutého karbidu [6], [7], [8].

Vyztužená keramika – zelené barvy, nazývá se též řezná keramika zesílená viskerem. Tyto viskery jsou z karbidu křemíku, mají průměr pouze 1 μm a délku více než 20 μm a přidávají se v obsahu kolem 30 %. Výsledky tohoto vyztužení je několikanásobné zvýšení houževnatosti, pevnosti v tahu a odolnosti proti teplotnímu šoku. Dále se zvýší tvrdost za tepla a odolnost proti opotřebení [6], [7], [8].

Neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku CN – je naprosto rozdílný keramický dvoufázový materiál, tvořený nitridem křemíku Si_3N_4 uloženým v pojivu. Tento materiál je bezkonkurenční pro obrábění šedé litiny s odebíráním velkého objemu třísky. Materiál má velmi vysokou houževnatost při zachování vysoké tvrdosti, umožňuje obrábění s přerušovaným řezem a proměnlivé hloubky řezu [6], [7].

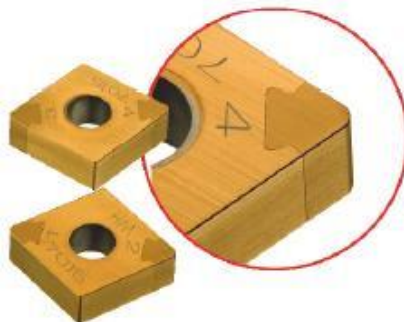


Obrázek 8 Ukázka VBD z řezné keramiky [6]

3.7 Kubický nitrid boru - KBN

Kubický nitrid boru je druhý nejtvrdší řezný materiál hned po diamantu. KBN je materiál s extrémní tvrdostí, je použitelný do teploty 2 000°C, má vysokou pevnost za tepla, velmi vysokou odolnost proti opotřebení a dále vysokou chemickou stálost. Naopak má velmi nízkou houževnatost. KBN se používá jako zapájený hrot do VBD (obr. 9) a zbylá část VBD je vyrobena nejčastěji ze SK. To vede k úspoře drahého materiálu. Nástroj z KBN se

používá především pro dokončovací operace tvrdých materiálu s tvrdostí nad 48 HRC s požadavky na vysokou kvalitu povrchu a přesnost rozměru [3], [7].



Obrázek 9 Provedení VBD s hrotem z KBN [10].

3.8 Polykrystalický diamant

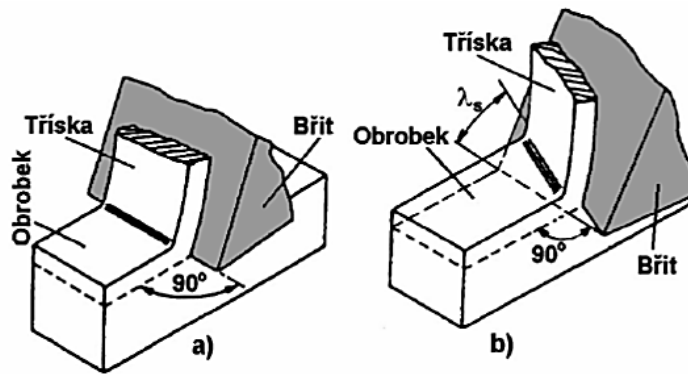
Je uměle vyráběný materiál. Řezný materiál s největší tvrdostí, z toho vyplývá vysoká odolnost proti abrasivnímu opotřebení a dobré třecí vlastnosti. Nevýhodou diamantu je vysoká křehkost a především afinita k železným a legujícím materiálům. Teplotní použitelnost diamantu je do 700°C. Vyrábí se slinováním polykrystalických zrn diamantu s kobaltovým pojivem. Dodává se jako celistvá VBD nebo jako tenká vrstva (až 1mm) na karbidové destičce (obr. 10). Používá se především pro obrábění neželezných materiálů a hliníkových slitin. Dále jako brousící nástroje pro broušení a řezání velmi tvrdých materiálů [3], [7].



Obrázek 10 VBD s povlakem diamantu [10]

4. ZÁKLADY PROCESU ŘEZÁNÍ

Přednostním výstupem jsou v praxi dosahované parametry již obrobeného povrchu. Při procesu řezání dochází k působení řezného nástroje na obrobek, tím dochází k vyvolání napětí v obráběné ploše, proti kterému klade materiál odpor. Z tohoto důvodu má pro nás velký význam rozlišování mechanismu vzniku a průběhu utváření třísky. Proces řezání můžeme realizovat podle dvou základních skupin řezání (obr. 11) - ortogonálního nebo vázaného řezání [1], [9].



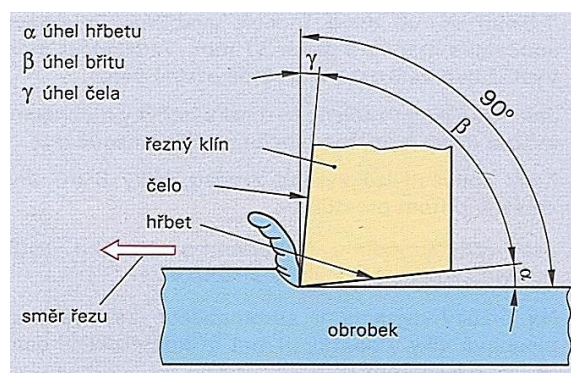
Obrázek 11 (a) Ortogonální řezání, (b) vázané řezání [1]

Ortogonální řezání – ostří je nastaveno kolmo na směr řezného pohybu. Jde o 2D problematiku, ke kterému dochází například při upichování, zapichování, hoblování a frézování s frézami s přímými zuby [1], [8].

Vázané řezání – řešíme ve 3D a dochází k němu při podélném soustružení, vrtání, frézování frézami s šikmým ozubením [1], [8].

4.1 Plochy a úhly řezného klínu

Řezný klín je tvořen plochou čela a plochou hřbetu (obr. 12). Úhel, který svírají tyto plochy, nazýváme úhel břitu β . Jeho velikost je dána vlastnostmi obráběného materiálu (tab. 4).



Obrázek 12 Plochy a úhly řezného klínu [3].

Úhel čela γ – tento úhel leží mezi plochou čela a kolmicí k obráběné ploše. Ovlivňuje především tvorbu třísky. Tento úhel musí mít alespoň minimální kladnou hodnotu, aby nedocházelo k velkému tření mezi nástrojem a obrobkem [3].

Úhel hřbetu α – leží mezi plochou hřbetu a obráběnou plochou, je nezbytný pro zmenšení tření mezi nástrojem a obrobkem. Jeho velikost musí umožňovat volné řezání nástroje [3].

Nejdůležitějším úhlem na řezném nástroji je úhel čela, ten ovlivňuje tvorbu třísky, životnost nástroje a řezné síly [3].

Tabulka 4 Úhly řezného klínu [3]

Úhel břitu β		Úhel čela γ		Úhel hřbetu α	
velký	malý	malý	velký	malý	větší
					
tvrdé materiály s větší pevností, např. vysoce legované oceli	měkké materiály, např. hliníkové slitiny	tvrdé a křehké materiály, při přerušovaném řezu a při hrubování	měkké materiály, při obrábění načisto (dokončování)	tvrdé materiály s krátkou třískou, např. vysoce legované oceli	měkké, plasticky tvárné materiály, např. plasty

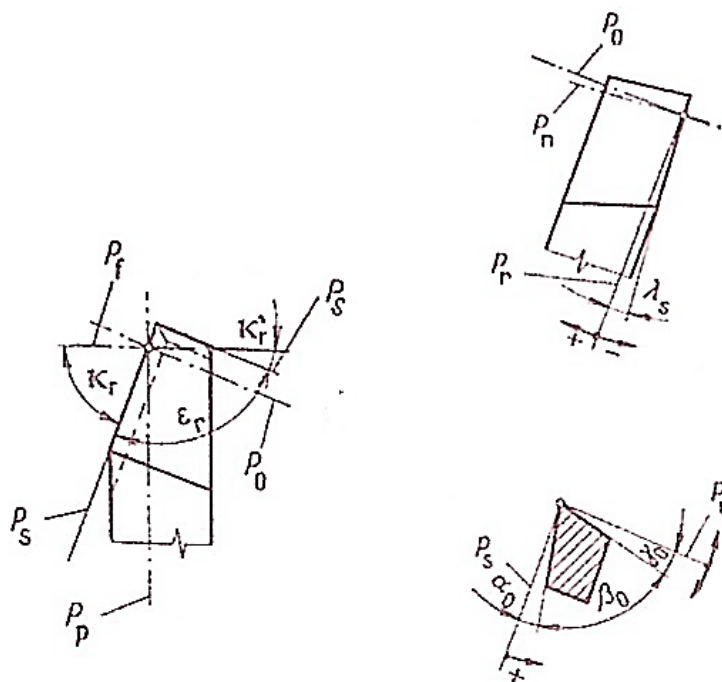
Detailní geometrie soustružnického nože:

Geometrii soustružnického nože můžeme vidět na (obr. 13). A to základní rozdělení do třech rovin [9].

Základní rovina P_f - v této rovině rozeznáváme úhel nastavení hlavního ostří κ_r , dále úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' a úhel špičky ϵ_r [9].

Ortogonální rovina P_o - v této rovině se nachází úhel hřbetu α_o , dále úhel břitu β_o a úhel čela γ_o [9].

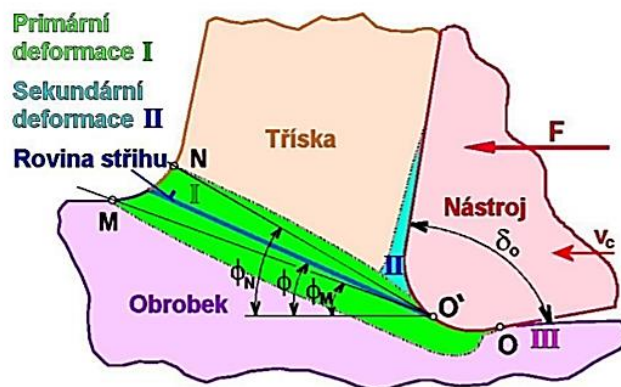
Rovina ostří - úhel sklonu hlavního ostří λ_s [9].



Obrázek 13 Geometrie soustružnického nože [9]

4.2 Plastická deformace

Pozorování plastické deformace v místě řezu je velmi složité, protože je ovlivněno mnoha prvky jako například: obráběným materiálem, chemickým složením, mechanickými a fyzikálními vlastnostmi a strukturou. Tyto faktory se navzájem propojují. Řezný nástroj vniká do obráběného materiálu pod určitou silou F a dochází k vzniku napětí, které vzniká nad i pod břitem nástroje, a tím dochází k pružné a plastické deformaci. Při překročení plastické deformace dojde k oddělení třísky. Plastickou deformaci můžeme rozdělit do třech tříd (obr. 14) [4], [8].



Obrázek 14 Plastická deformace - členění [12].

Primární plastická deformace I - v této oblasti materiál tzv. zpevňuje, při vyčerpání plasticity dojde ke kluzu materiálu. Velikost a tvar primární plastické oblasti je ovlivněna fyzikálními vlastnostmi materiálu, jako jsou deformační a zpevňovací schopnosti obráběného materiálu, řezná rychlost, úhel řezu a úhel čela. Poté dojde ke vzniku jednotlivých elementů třísek [4], [8].

Sekundární plastická deformace II - při oddělování materiálu vznikne síla mezi čelem nástroje a obrobkem, která vytváří deformaci obráběného materiálu na spodní straně třísky. Tato deformace má za následek adhezní opotřebení nástroje. Na nástroji dochází k vytváření nárůstku. [4], [8].

Terciální plastická deformace III - tato oblast je stanovena intenzitou a hloubkou deformace [4].

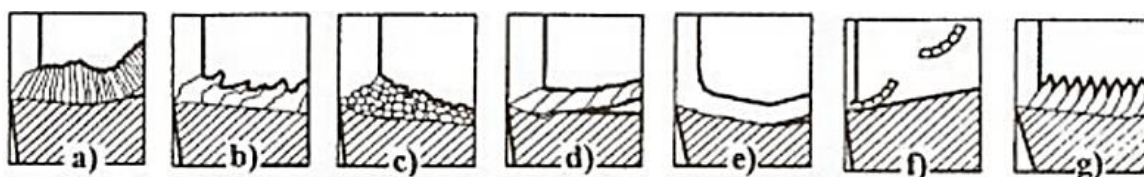
4.3 Tvary třísek

Třísky jsou vedlejší odpadní produkt při obrábění (obr 13). Jejich tvar vypovídá o průběhu procesu řezání (obr. 15). Tvarování a lámání třísek má opodstatněný dopad na lepší manipulovatelnosti při odvodu ze stroje. Třísky by měly zabírat co nejmenší objem ve stroji.

Tvar třísky má dále vliv na opotřebení a životnost řezného nástroje a kvalitu obrobeného povrchu. Vždy se snažíme dosáhnout elementární třísky [1], [4].

Vznik jednotlivých typů třísek ovlivňuje především:

- Druh obráběného materiálu,
- druh řezného nástroje,
- geometrie břitu,
- řezné podmínky,
- řezné prostředí [1], [4].



Obrázek 15 Druhy třísek a - plynulá článková tříska; b - plynulá lamelová tříska; c - tvářená elementární tříska; d - nepravidelně článková tříska; e - tvářená plynulá soudržná tříska; f - dělená segmentová tříska; g - plynulá segmentová tříska [4].

Třísky dále můžeme dělit podle vhodnosti a nevhodnosti jejich tvaru (obr. 16). Pro zlepšení dělení třísek se používají na čele VBD tzv. utvařeče třísek [8].

páskové třísky	smotané třísky	dlouhé šroubovitě třísky	
nevýhodné			
krátké šroubovitě válcové třísky	krátké šroubovitě kuželové třísky	spirálové třísky	drobivé třísky
výhodné			

Obrázek 16 Dělení třísek podle vhodnosti [12]

Objemový součinitel třísky

Jako výstupní odpadní produkt řezného procesu uvažujeme třísky, které by měly mít určité parametry z hlediska tvaru a rozměru. Především z důvodu manipulovatelnosti při vyjímání ze stroje a další přepravě na další zpracování. Takové požadavky jsou vyžadovány především u automatických obráběcích strojů. Tyto parametry jsou především ovlivněny vstupními řeznými podmínkami [4].

Pro objemový součinitel třísek W platí vztah

$$W = \frac{V_t}{V_m} [-] \quad (4.1)$$

kde

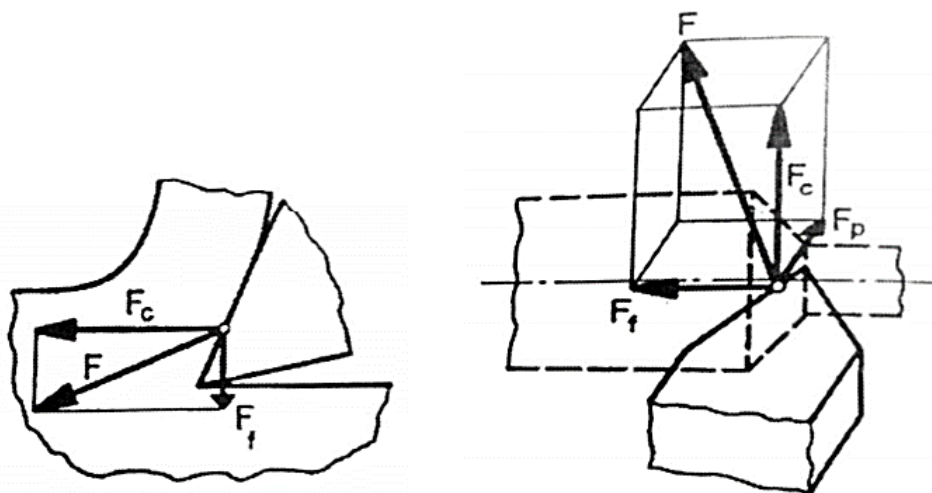
V_t – objem volně ložených třísek,

V_m – objem odebraného materiálu.

Například: objemový součinitel pro stužkovitou třísku činní 400 a pro elementární třísku je objemový součinitel v rozpětí 4 až 6. Čím je hodnota W nižší, tím je pro nás vhodnější [4].

5. ŘEZNÉ SÍLY

Řezná síla vzniká při působení řezného nástroje na obrobek. Na této silové soustavě můžeme optimalizovat řezné podmínky s ohledem na průběh obrábění. Při ortogonálním řezání se výsledná síla F skládá ze síly řezné F_c a ze síly posuvu F_f . Při podélném soustružení dochází k vázanému řezání a výsledná řezná síla se skládá ze tří složek (obr. 17), a to ze složky řezné F_c , síly posuvu F_f a pasivní složky F_p [4], [8].



Obrázek 17 Síly při ortogonálním a vázaném řezání [8]

Řezná síla F_c – tato síla působí ve směru řezné rychlosti. Ze všech tří sil je největší a její podíl na celkovém příkonu činí téměř 99 % [8].

Síla posuvu F_f – jak již z názvu vyplývá, tak působí právě ve směru posuvu. Podle některé literatury tvoří obvykle 40 % velikosti řezné síly. Avšak její podíl na celkovém příkonu je velmi malý, protože rozdíl velikosti mezi řeznou rychlostí a rychlostí posuvu je velmi velký. Síla působí ve směru největší tuhosti stroje [8].

Pasivní síla F_p – působí kolmo na obrobenou plochu. Její velikost tvoří obvykle 25 % řezné síly. Tato síla působí ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy, což vede k ovlivnění celkové kvality povrchu [8].

Celkovou sílu F nám udává vztah

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [N] \quad (5.1)$$

5.1 Přímá metoda měření

Přímé měření síly se provádí pomocí dynamometrů. Tyto dynamometry jsou zapojené v soustavě stroj – nástroj - obrobek. Dynamometr musí během měření zaručit především nezávislost měřicí veličiny na vlastnostech měřicího stroje, dále pak měření veličiny s danou přesností, stálostí měřených hodnot v daném čase. Z těchto požadovaných vlastností musí dynamometr splňovat: tuhost, citlivost, stálost údajů, reprodukovatelnost údajů a vhodnou konstrukci dynamometru [8], [13].

Složení měřicí soustavy dynamometru:

Pružný člen – přenáší vnější zatížení, má za úkol překonávat změny jako jsou deformace a změna polohy [13].

Snímač – má za úkol přeměnit mechanickou sílu z pružného členu na analogický parametr měřicího stroje [13].

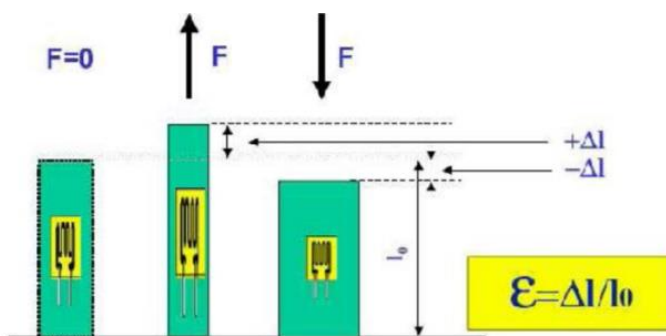
Přijímač – má za úkol zesílit, nebo naopak zeslabit sílu signálu a následně ji zaznamenat [14].

Dále můžeme dynamometry dělit podle počtu měřených složek síly řezání: jednosložkové, vícesložkové a pro měření krouticích momentů. Dále podle měřicí metody, respektive podle přenosu síly na měřicí zařízení. Jedná se o hydraulické, pneumatické,

mechanické, elektrické (ty mohou dále být indukční, kapacitní, odporové nebo piezoelektrické) nebo optické. A podle způsobu obrábění frézování, soustružení nebo vrtání [13].

Tenzometrické odporové snímače:

Tyto odporové snímače pracují na principu změny odporu na deformaci vodiče, nebo polovodiče (obr. 18). Odporový tenzometr je pevně spojený s deformačním elementem a dochází k deformaci obou členů. Vzniklá změna odporu daného vodiče je přímo úměrná vzniklé deformaci, která vznikne na deformačním členu v důsledku působící síly, nebo krouticího momentu. Při deformaci dochází ke změně délky nebo průřezu vodiče. Používané materiály pro tenzometrické snímače jsou buď kovové (drátkové, foliové, vrstvené), nebo polovodičové tenzometry (využívají piezorezistentních vlastností) [13].



Obrázek 18 Tenzometrické odporové snímače [22]

Piezoelektrické dynamometry:

Tyto dynamometry využívají pro snímání deformace piezoelektrického jevu, tj. vznik elektrického výboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Nejčastěji využívaný materiál pro tento dynamometr je křemen, dále materiály na bázi titaničitanu barnatého apod. Základem pro tento typ měření je destička vyříznuta z příslušného krystalu. Při zatížení je velikost náboje přímo úměrná velikosti síly. Nástroj je upnut do tělesa dynamometru, které se upne do vřetene stroje. Použití pro frézování, soustružení, vrtání nebo broušení [13].

5.2 Nepřímá metoda měření

Nepřímá metoda měření síly přímo vychází z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Řezný výkon pro řezání, je dán tímto vztahem

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60} \text{ [W]} \quad (5.2)$$

kde P_c – je řezný výkon ve W,

F_c – řezná síla v N,

v_c – řezná rychlost v m/min.

Z tohoto vztahu plyne, že nepřímým způsobem je možné zjistit pouze tangenciální složku síly řezání. Pro měření výkonu elektromotoru používáme nejčastěji wattmetry, které nám podávají přímý výsledek. Při stanovení tangenciální složky se vychází z užitého výkonu motoru, který je potřebný pro obrábění. Výkon motoru se měří naprázdno, a následně při zatížení [13].

Pro užitný výkon $P_{už}$ platí vztah

$$P_{už} = P_c - P_o \text{ [W]} \quad (5.3)$$

kde P_c – celkový výkon stroje [W],

P_o – výkon motoru naprázdno [W].

Jelikož tangenciální složka vychází ze vztahu 5.2, vypočteme sílu následujícím dosazením

$$F_c = \frac{P_{už}}{V_c} \cdot 60 \text{ [N]} \quad (5.4)$$

Výhoda nepřímé metody určení tangenciální síly je v jednoduchosti, není potřeba velmi drahá měřicí technika a je možné ji použít pro všechny metody obrábění. Primární nevýhodou je však nízká přesnost výsledku, který zanedbává ostatní vlivy ostatních parametrů [13].

Tangenciální sílu lze také stanovit z krouticího momentu M_k , která se využívá především při vrtání. Vycházíme z měření celkového výkonu, který je zaznamenáván. Poté se nástroj změří, aniž by byl v záběru. Následně se vřetenem zatěžuje mechanickou brzdou, dokud se nedosáhne stejné hodnoty jako při měření v záběru. Z podmínky rovnováhy točivého momentu vyplývá vztah

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (5.5)$$

kde M_{kb} – točivý moment vyvolaný mechanickou brzdou [N.m],

D – průměr nástroje nebo obrobku [mm],

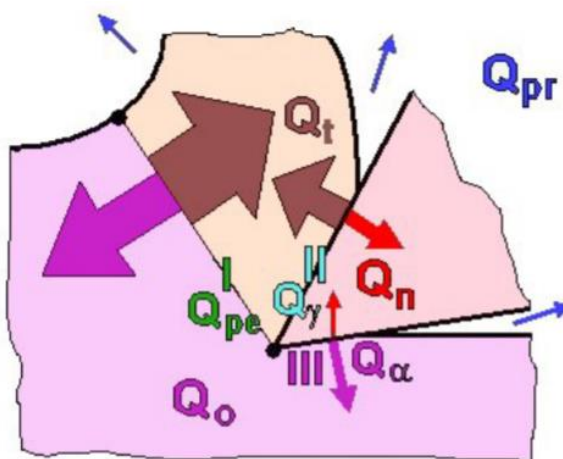
M_k – točivý moment od tangenciální složky síly obrábění [N.m].

Výhodou měření touto metodou je, že nedochází k ovlivnění momentu rozdílnou účinností obráběcího stroje při chodu na prázdko a při zatížení, ale je ovlivněno součinitelem tření na brzdě. Tato metoda není často využívána [13].

6. TEPLA A TEPLOTA PŘI OBRÁBĚNÍ

Ke vzniku tepla dochází přeměnou mechanické práce. Přeměňuje se 95 až 98 % mechanické práce na teplo. Tímto se zvyšuje teplota třísky, řezného nástroje, obrobku a řezného prostředí. Hlavními zdroji tepla jsou oblasti plastické deformace při utváření třísky, v oblasti tření třísky na čele nástroje a v oblasti tření hřbetu po obrobené ploše, popsáno výše. S velikostí teploty souvisí řezná rychlost. Se zvyšující se řeznou rychlostí je podíl tepla v třísce značně převyšující nad ostatními odváděnými podíly tepla. Důsledkem toho mohou odcházet třísky rozžhavené, a přitom se povrch obrobku téměř nezahřívá [4], [8], [9].

Vzniklé teplo zásadně ovlivňuje řezný proces. Dochází především k negativnímu ovlivnění vlastností řezného materiálu, například odpevnění. Dále dochází k mechanickému ovlivnění obráběného materiálu. Vzniklé teplo ovlivňuje petchování a zpevňování materiálu a v neposlední řadě dochází k ovlivnění tření na čele i hřbetu nástroje [8], [9].



Obrázek 19 Vznik a odvod tepla [14]

Při obrábění vzniká teplo (obr. 19) v oblasti plastické deformace I (Q_{pe}), v oblasti sekundární plastické deformace II (Q_γ - důsledek tření mezi čelem a hřbetem nástroje) a v oblasti terciální plastické deformace III (Q_α - důsledek tření mezi hřbetem a přechodovou plochou na obrobku). Toto vzniklé teplo je odváděno třískou Q_t , nástrojem Q_n , obrobkem Q_o a řezným prostředím Q_{pr} [9].

Jestliže musí vždy nastat teplotní bilance, tj. vzniklé množství tepla se musí rovnat teplu z místa řezu odvedenému, pak platí vztah tepelné bilance

$$Q = Fc \cdot Vc = Q_{pe} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad [J] \quad (6.1)$$

kde Q – celkové teplo [J],

Q_{pe} – teplo vzniklé v oblasti plastické deformace [J],

Q_γ – teplo vzniklé v oblasti tření třísky po čele nástroje [J],

Q_α – teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu nástroje po přechodové ploše [J],

Q_t – teplo odvedené třískou [J],

Q_o – teplo odvedené obrobkem [J],

Q_n – teplo odvedené nástrojem [J],

Q_{pr} – teplo odvedené řezným prostředím [J] [9].

Podíl jednotlivých složek je závislý na tepelné vodivosti materiálu obrobku, řezného nástroje, na řezných podmínkách, řezném prostředí a na geometrii nástroje. U řezného nástroje se rozlišují dvě základní teplotní pole. Pokud dochází k obrábění nízkými řeznými rychlostmi je maximální teplota na ostří řezného nástroje, špička nástroje. Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi je maximální teplota v určité vzdálenosti od ostří řezného nástroje, to je spjato s opotřebením nástroje [4], [8].

Měření teploty – k měření teploty lze využít mnoho metod například termoelektrický jev (termočláanky), změny elektrického odporu (termistory), tepelné zařízení (pyrometry, termovize, fotometrie), změny struktury (teploměrné křídly a barvy) [8], [9].

7. PARAMETRY ŘEZNÉHO PROCESU

Parametry řezného procesu můžeme nazvat také řezné podmínky. Vhodně zvolené řezné podmínky by měly zajistit dosažení optimálního průběhu procesu obrábění. Správně zvolené řezné podmínky zajišťují kvalitativní i kvantitativní požadavky na obrobenou součást. Nevhodně zvolené řezné podmínky mohou mít za následek zbytečné zvyšování nákladů na výrobu, nedosažení požadovaných kvalitativních i kvantitativních parametrů [4], [5].

Postup optimalizace řezných podmínek:

- Určení optimální trvanlivosti břitu nástroje,
- určení hloubky řezu,
- určení velikosti posuvu,
- určení řezné rychlosti [5].

Trvanlivost břitu nástroje – životnost i trvanlivost řezného nástroje má svou důležitost z ohledu ekonomického faktoru, z hlediska skladování a toku nástrojů ve výrobě. Trvanlivost nástroje je udána jako stanovená doba práce nástroje na jedno naostření do jeho otupení, při kterých je nástroj schopen zajistit požadované výsledky obrábění a udává se v minutách. Životnost nástroje je celková doba práce nástroje do jeho vyřazení. U VBD je roven počtu řezných hran u monolitních nástrojů například u RO je to počet přeastření plus jedna [4], [5], [23].

Opotřebení břitu – při obrábění dochází k opotřebování řezného nástroje. Jestliže opotřebení dosáhne stanovené hodnoty pro výměnu břitu, je břit vyměněn. Toto opotřebení ovlivňuje mnoho faktorů, například teplo a teplota při obrábění, mechanické a chemické vlastnosti obráběného materiálu a řezný nástroj. Důsledkem těchto faktorů jsou mechanismy opotřebení břitu, oěr (abrazivní, adhezni, difúzní a chemický), plastická deformace a křehký lom [4], [8].

Formy opotřebení řezného nástroje – pro možnost ovlivnění produktivity práce byla stanovena báze klasifikací typů opotřebení [1].

Opotřebení hřbetu – jedná se o abrazivní druh opotřebení, projevuje se právě na hřbetu nástroje, zasahuje plochy hřbetu hlavního i vedlejšího ostří, poloměru špičky a fazetce nástroje. Příliš velká hodnota tohoto opotřebení má za následek zhoršení dosahované kvality povrchu.

Opotřebení na čele nástroje – neboli opotřebení ve tvaru žlábků, je důsledkem difúzního a abrazivního opotřebení. Ke vzniku žlábků dochází částečně úběrem řezného materiálu

brousicím pochodem, ale zejména difúzí v místě břítu s nejvyšší teplotou. Mimořádně velké opotřebení může změnit geometrii břítu, ovlivnit tvar třísky a zeslabit břit [1].

Hloubka řezu a_p [mm] – hloubka odřezávané vrstvy je rozdíl mezi obráběnou a obrobenou plochou, závisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu. Velikost hloubky řezu musí být v souladu s tuhostí obráběcí soustavy. Z hlediska obrábění je hloubka třísky proměnlivá pro hrubovací, nebo dokončovací operace. Pokud je hloubka třísky příliš malá, dochází ke ztrátě kontroly nad utvářením třísky, k vibracím, nadměrnému vzniku tepla a nehospodárnosti obrábění. Pokud je naopak hloubka třísky příliš velká, dochází k vysoké spotřebě energie, lomu VBD a ke zvyšování řezných sil [4],[6].

Velikost posuvu f [mm/ot] – posuv je dráha nástroje, o kterou se posune za jednu otáčku obrobku. Jedná se o parametr, který má zásadní vliv na dosaženou kvalitu povrchu. Dále má zásadní vliv na utváření třísky. Příliš nízká rychlost posuvu má za následek vznik nevyhovujícího tvaru třísky, rychlé opotřebení nástroje, dochází tím také k vzniku nárůstků na nástroji a nehospodárnosti obrábění. Příliš velký posuv má naopak za následek ztrátu kontroly nad tvarem třísky, špatnou kvalitu povrchu, vysokou spotřebu energie, vysoké opotřebení nástroje a zasekávání třísek [5], [6].

Řezná rychlost v_c [m/min] – je rychlost, kterou se pohybuje obvod obrobku. Je nutné vzít v úvahu, že řezná rychlost zůstává stálá jen po dobu zachování velikosti otáček nebo průměru obrobku. Řezná rychlost společně s tvrdostí obráběného materiálu má zásadní vliv na životnost nástroje a potřebný výkon obráběcí soustavy. Se zvyšující se řeznou rychlostí narůstá teplota v místě řezu, a tím dochází k rychlejšímu opotřebení řezného nástroje. Vysoká řezná rychlost napomáhá utváření třísek u měkkých materiálů. Pokud je řezná rychlost příliš nízká, dochází k tvoření nárůstku na břítu, rychlejšímu otupení a snižování hospodárnosti výroby. Naopak pokud je daná řezná rychlost příliš vysoká, dochází k rychlému opotřebení hřbetu nástroje, což má za následek špatnou kvalitu povrchu, rychlejší opotřebení nástroje ve tvaru žlábků a plastickou deformaci [6].

7.1 Dosahované parametry IT a Ra

V tabulce (tab. 5) můžeme vidět základní přehled dosahovaných drsností povrchu R_a - střední aritmetická úchylka drsnosti a dosahovaného stupně přesnosti IT. Tyto hodnoty mají zásadní vliv na funkci, životnost, opotřebení a vlastnosti strojních součástí. Čím je hodnota parametru nižší, tím je obrobený povrch kvalitnější a přesnější [8].

Tabulka 5 Dosahované parametry R_a a IT [11]

způsob obrábění	dosahovaná drsnost povrchu a přesnost		
	hrubování	obrábění na čisto	jemné obrábění
soustružení	$R_a = 12,5 - 100$ IT 11 - 14	$R_a = 1,6 - 12,5$ IT 9 - 11	$R_a = 0,2 - 1,6$ IT 5 - 8
frézování	$R_a = 6,3 - 25$ IT 10 - 13	$R_a = 1,6 - 6,3$ IT 7 - 13	$R_a = 0,8 - 1,6$ IT 7 - 8
vrtání a vyvrtávání	$R_a = 12,5 - 100$ IT 11 - 14	$R_a = 1,6 - 6,3$ IT 9 - 11	$R_a = 0,4 - 1,6$ IT 5 - 8
hoblování a obrážení	$R_a = 6,3 - 12,5$ IT 11 - 12	$R_a = 3,2 - 6,3$ IT 9 - 11	$R_a = 1,6 - 3,2$ IT 8 - 10
broušení	$R_a = 0,8 - 6,3$ IT 9 - 11	$R_a = 0,2 - 1,6$ IT 5 - 7	$R_a = 0,05 - 0,4$ IT 3 - 4

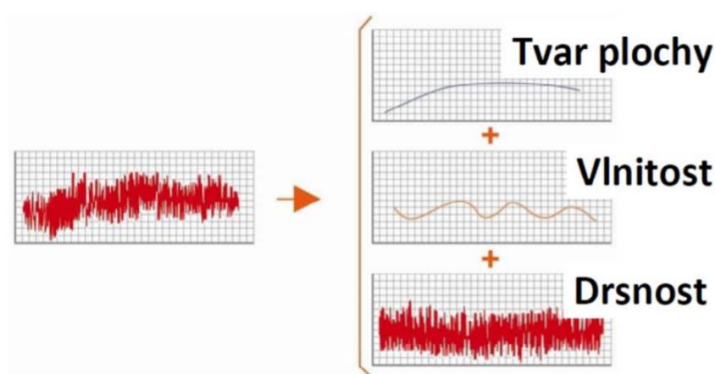
7.2 Kvalita povrchu při obrábění

V praxi nejsme schopni vytvořit dokonale přesný ani hladký povrch bez nerovností. Tyto nerovnosti vznikají podle použité metody výroby, použitého nástroje, stroje a okolních parametrů. Proto jsou v praxi kladeny velké nároky na funkční plochy součástí, a to konkrétně na rozměrovou, geometrickou i kvalitu povrchu. Vhodně předepsaná kvalita povrchu může prodloužit životnost i spolehlivost dané součásti. Ale naopak špatně zvolená kvalita povrchu může vést k poruše nebo zvýšení výrobních nákladů. Výsledná drsnost povrchu je způsobena stopami řezného nástroje. Druh a rozsah je závislý na geometrii řezného nástroje, fyzikálních a mechanických vlastnostech materiálu obrobku i nástroje, nevhodném odchodu třísky, opotřebení řezného nástroje a použití procesní kapaliny. Na výsledné drsnosti povrchu mají vliv také řezné podmínky. Především velikost posuvu a velikost řezné rychlosti je rozhodující. Dále drsnost ovlivňuje upnutí obrobku, nevhodným upnutím lze zanést do součásti deformace. Drsnost povrchu měříme pomocí drsnoměru [15], [16].

Obecný funkční povrch

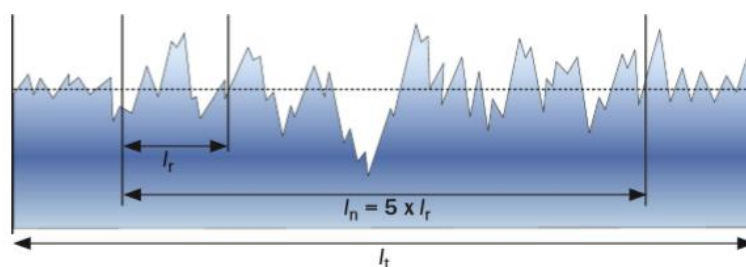
Obecný funkční povrch součásti se dělí na tři základní parametry (obr. 20), které odlišuje vlnová délka [16].

- P – profil tvaru plochy, vypočítá se ze základního souboru,
- W – profil vlnitosti, parametr vypočítaný z profilu vlnitosti,
- R – profil drsnosti, parametr R je odvozený z profilu P pomocí filtrace dat, kde dojde k potlačení dlouhovlnných složek. Parametr R je záměrně pozmeněn a je modifikací parametru P [19].



Obrázek 20 Obecný povrch a jeho rozdělení [16]

Při měření drsnosti povrchu se měření provádí na předepsaných referenčních délkách (obr. 21). Pokud referenční délka není předepsána na výkrese, je nutné, aby referenční délku stanovila obsluha přístroje. Základní délka: normalizovaná řada 0,08 – 0,25 – 0,8 – 2,5 – 8,0 [19].



Obrázek 21 Délka měření [19]

kde l_r – je základní (referenční) délka,

l_n – vyhodnocovaná délka (standardně je složena z pěti základních délek,

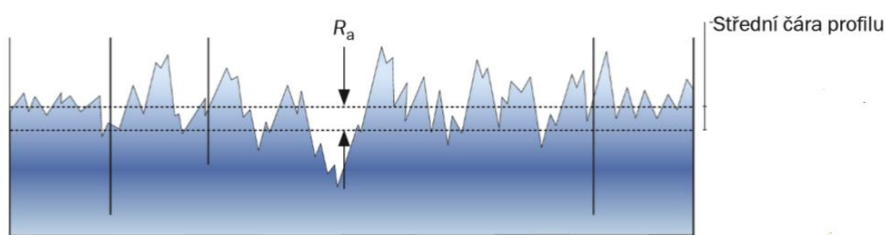
l_t – celková délka dráhy (skládá se z délky nájezdu, vyhodnocované délky a délky doběhu) [19].

7.3 Přehled parametrů:

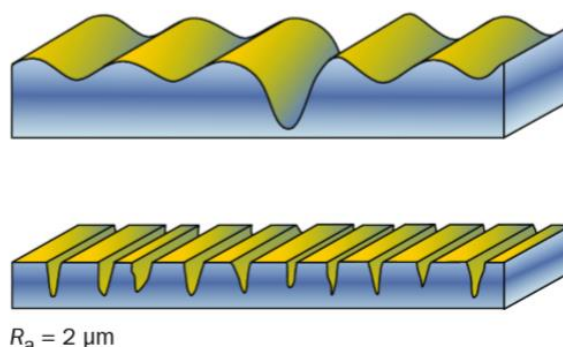
Amplitudové parametry:

Střední aritmetická úchylka drsnosti – R_a

Střední aritmetická odchylka je střední hodnota všech odchylek od střední čáry daného profilu na vyhodnocované délce profilu (obr. 22). Pomocí hodnoty R_a nelze určit, zda jde o výstupky, nebo prohlubně. Vypovídající schopnost parametru je nízká, jelikož neukazuje extrémní hodnoty výšky nebo hloubky odchylek [16], [19].



Obrázek 22 Vyhodnocení střední aritmetické odchylky [19]

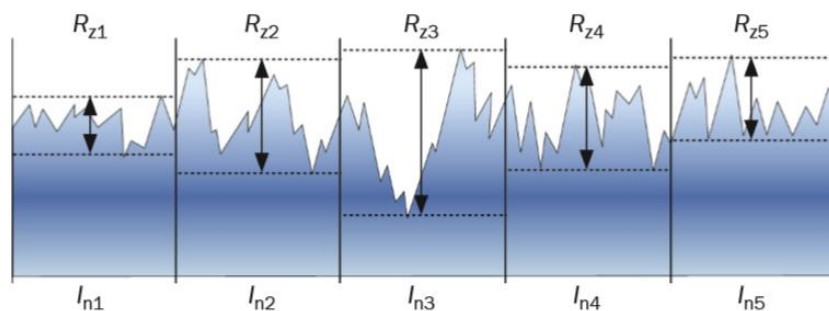


Obrázek 23 Vliv reálného profilu na parametru R_a [19]

Ačkoli se struktura povrchu může zdát velmi odlišná (obr. 23), ukazatel hodnoty R_a je pro oba povrchy stejná [19].

Maximální výška profilu – $R_z = R_{max}$

Parametr R_z udává největší průměrnou hodnotu jednotlivých výšek profilu (obr. 24). Maximální výška je stanovena z největší výšky výstupku a největší hloubky prohlubně profilu na základních délkách. Nejčastěji se jedná o pět, nebo deset základních délek, ale u nových moderních přístrojů se počet bodů může lišit [19], [20].



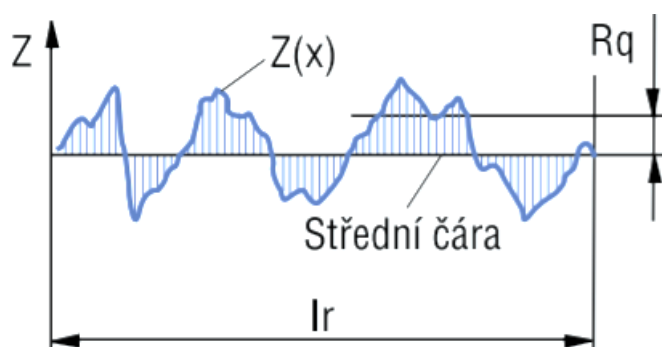
Obrázek 24 Maximální výška profilu [19]

Pak pro výpočet R_z platí vztah

$$R_z = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}{5} \text{ [}\mu\text{m]} \quad (7.1)$$

Průměrná kvadratická odchylka profilu – R_q

Parametr R_q je zajímavý především v praxi, protože ho lze využít pro výpočet velikosti obsahu prohlubně. Tímto lze stanovit velikost opotřebení součásti. Parametr R_q je citlivější na nevhodné výstupky a prohlubně (obr. 25). Vykazuje vyšší hodnoty než parametr R_a [17], [20].



Obrázek 25 Průměrná kvadratická odchylka profilu [18]

„Plošné a objemové parametry:

- **S_{mr}** nosný poměr v dané hloubce,
- **R_{sm}** průměrná šířka prvku profilu,
- **S_{ds}** hustota výstupků povrchu,
- **Std** směr textury povrchu,
- **Str** poměrný aspekt textury povrchu,
- **Sal** délka odpovídající nejrychlejšímu poklesu.“ [18]

„Funkční parametry:

- **S_{bi}** index únosnosti,
- **S_{ci}** index udržení kapaliny v jádře,
- **S_{vi}** index udržení kapaliny v prohlubních,
- **S_k** hloubka jádra drsnosti,
- **S_{pk}** redukovaná výška výstupku,
- **S_{vk}** redukovaná hloubka prohlubní.“ [18]

„Hybridní parametry:

- **S_{sc}** aritmetický průměr zakřivení výstupků povrchu,
- **S_{dq}** kvadratický sklon povrchu,
- **S_{dr}** poměrná rozvinutá styková plocha.“ [18]

8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce se zaměřuje na samotné měření a následné vyhodnocení zadaného experimentu. Experiment byl měřen na universálním hrotovém soustruhu s frekvenčním měničem pro přesné zadání požadované řezné rychlosti. Experimentální část má tři části: třísky, měření složek řezných sil a měření drsností povrchu.

Experimentální měření probíhalo za těchto zadaných parametrů:

Řezná rychlost v_c : 20, 30, 40, 50 m/min

Posuv na otáčku f : 0,04; 0,1; 0,15; 0,2 mm/ot

Hloubka třísky a_p : 0,3; 0,5; 1 mm

8.1 Popis pracoviště

Veškeré experimentální měření probíhalo na universálním hrotovém soustruhu **TOS Kuřim typ SU 50 1500** s frekvenčním řízením **YASKAWA typ VARISPEED 616G5** (obr. 26).



Obrázek 26 Universální hrotový soustruh TOS Kuřim

Pro tento zadaný experiment byl použit ubírací soustružnický nůž s **VBD CNMG 120404-PP** (obr. 27). Jedná se o VBD vyrobenou z SK třídy M. Podle značení ISO je možné z VBD stanovit tyto hodnoty. Jedná se o destičku ve tvaru kosoúhelníku, úhel špičky je 80° , úhel hřbetu je 0° , tolerance přesnosti, se kterou je destička vyrobena $\pm 0,130$ mm, provedení destičky, délku řezné hrany 12 mm, tloušťku destičky 4,76 mm, rádius špičky 0,4 mm, provedení ostří, provedení utvařeče třísky. Tyto parametry byly určeny pomocí katalogu Pramet.



Obrázek 27 Soustružnický ubírací nůž

Polotovarem pro experiment byla slitina titanu o průměru 110 mm délkou 135 mm (obr. 28), konkrétně se jednalo o slitinu titanu Ti6Al4V. Polotovár byl upnut pomocí tříčelistového sklíčidla.



Obrázek 28 Polotovar Ti6Al4V

Chemické složení Ti6Al4V

- obsah hliníku Al 6 %,
- vanadu V 4 %,
- uhlíku C 0,03 %,
- železa Fe 0,1 %,
- kyslíku O 0,15 %,
- dusíku N 0,01 %,
- vodíku H 0,003 %,
- zbytek obsahu chemického složení tvoří titan Ti [21].

Mechanické vlastnosti Ti6Al4V

- smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ 950 MPa,
- mez pevnosti R_m 1020 Mpa,
- tažnost 14 %,
- kontrakce 40 %,
- tvrdost podle Rockwella 33 HRC,
- modul pružnosti 199 GPa [21].

Nastavení jednotlivých posuvů (axiálních) - Pro zadané parametry posuvu byly pomocí návodné tabulky, která je součástí soustruhu, stanoveny jednotlivé parametry (tab. 6), které je nutno zařadit pro požadovaný axiální posuv.

Tabulka 6 Přiřazení parametrů k zadaným posuvům

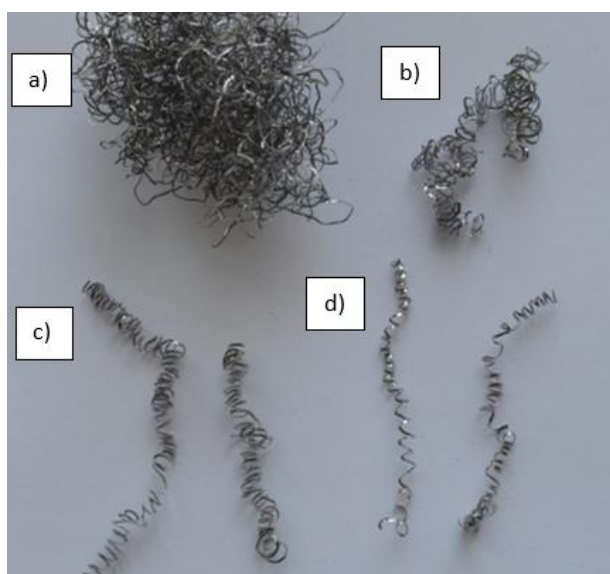
Posuv	f [mm/ot]	Kombinace
f_1	0,04	A1
f_2	0,1	B3
f_3	0,15	B6
f_4	0,2	C3

Zadaná řezná rychlost byla určena pomocí digitálního tachometru HT – 3100 od firmy ONO SOKKI.

8.2 Utváření třísky

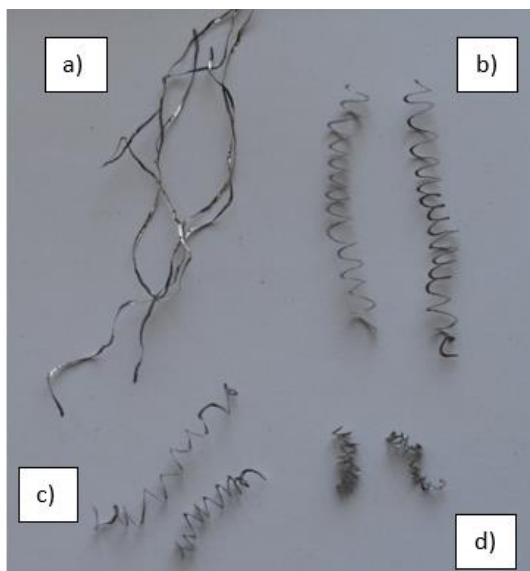
Vyhodnocení tvaru třísek bylo provedeno pro zadané parametry experimentu. Pro každý jednotlivý parametr bylo shromážděno několik třísek, které byly následně vyhodnoceny. Zde jsou přiloženy vybrané ukázky třísek pro vybrané zadané řezné podmínky (obr. 29 - 35).

Na obrázku 29 jsou zobrazeny vzniklé třísky po soustružení řeznou rychlostí 20 m/min, hloubkou řezu 0,3 mm a posuvy a) 0,04 mm/ot, b) 0,1 mm/ot, c) 0,15 mm/ot, d) 0,2 mm/ot. Posuvu a) odpovídá pásková (stužková) dlouhá smotaná tříška, posuvu b) odpovídá dlouhá kroucená pásková tříška, posuvům c) i d) odpovídá dlouhá šroubovití tříška. Všechny tyto vzniklé třísky jsou pro skladování třísek nevhodné.



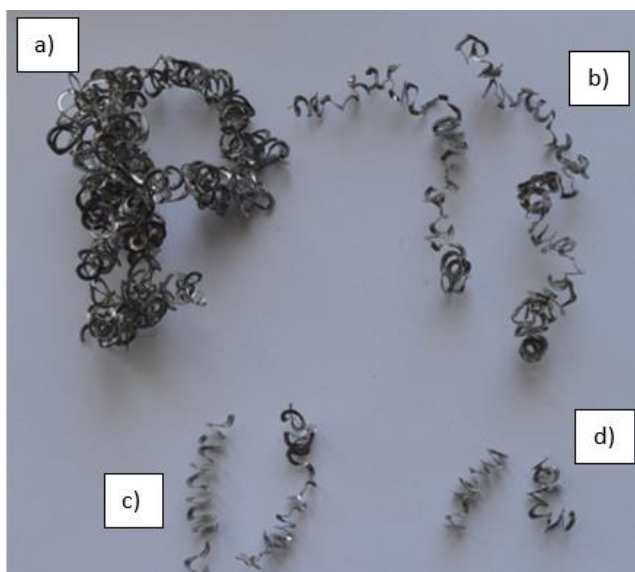
Obrázek 29 Třísky po soustružení

Na obrázku 30 jsou zdokumentovány třísky po soustružení řeznou rychlostí 20 m/min, hloubku řezu 0,5 mm a posuvy a) 0,04 mm/ot , b) 0,1 mm/ot, c) 0,15 mm/ot, d) 0,2 mm/ot. Posuvu a) odpovídá pásková dlouhá tříška, při posuvu b) i c) vznikla dlouhá šroubovitá (vinutá) tříška a pro posuv d) vznikla krátká šroubovitá tříška. Vhodný tvar třísky je pouze pro posuv d).



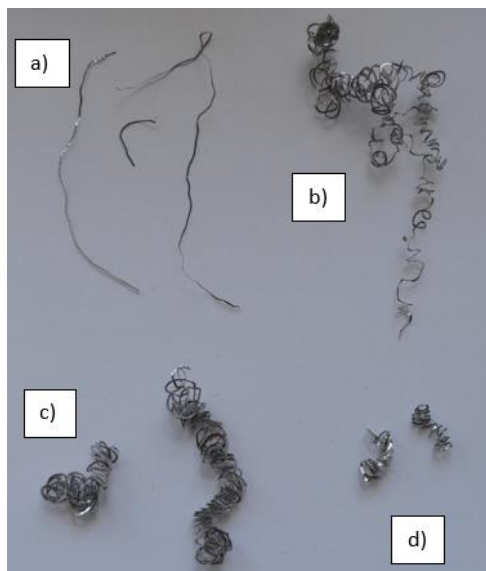
Obrázek 30 Třísky po soustružení

Obrázek 31 jsou zachyceny třísky po soustružení řeznou rychlostí 20 m/min, hloubku řezu 1 mm a posuvy a) 0,04 mm/ot , b) 0,1 mm/ot, c) 0,15 mm/ot, d) 0,2 mm/ot. K posuvům a) i b) patří dlouhá šroubovitá tříška, posuvy c) a d) vystihuje krátká šroubovitá tříška, která je pro praxi vhodná.



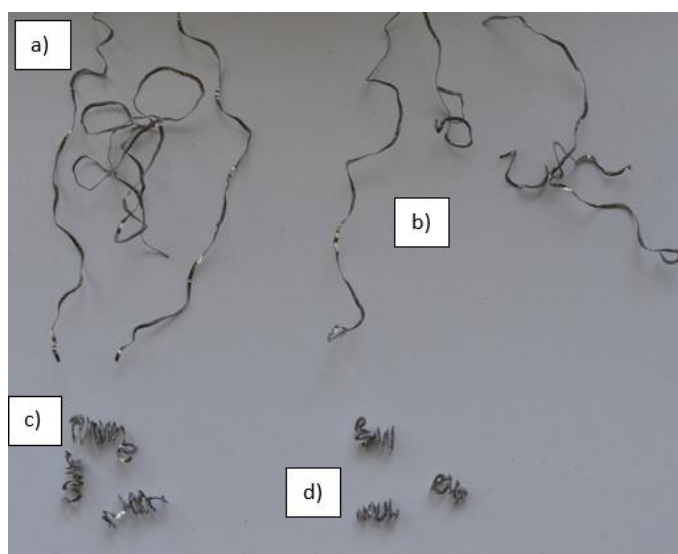
Obrázek 31 Třísky po soustružení

Na obrázku 32 jsou zobrazeny třísky po soustružení řeznou rychlostí 50 m/min, hloubkou řezu 0,3 mm a posuvy a) 0,04 mm/ot , b) 0,1 mm/ot, c) 0,15 mm/ot, d) 0,2 mm/ot. Při posuvu a) vznikla pásková (stužková) tříška, posuvu b) i c) odpovídá dlouhá šroubovitá tříška, posuvu d) odpovídá krátká šroubovitá tříška a pro skladování a další přepravu třísek je vhodná tříška posuvu d).



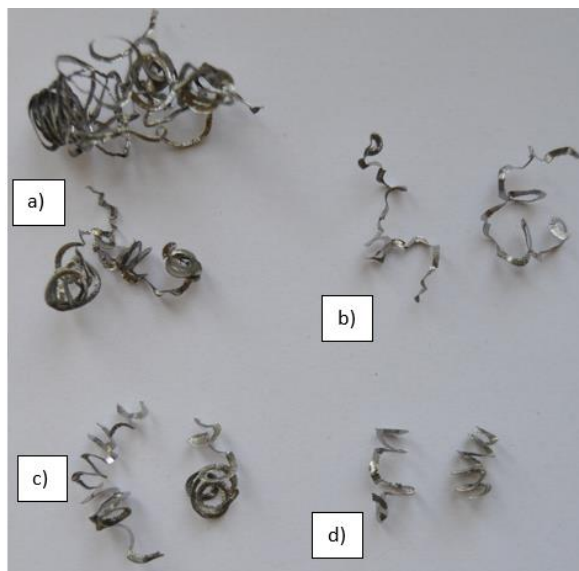
Obrázek 32 Vzniklé třísky po soustružení

Na obrázku 33 jsou k vidění třísky po soustružení řeznou rychlostí 50 m/min, hloubkou řezu 0,5 mm a posuvy a) 0,04 mm/ot , b) 0,1 mm/ot, c) 0,15 mm/ot, d) 0,2 mm/ot. Posuvu a), b) odpovídá pásková kroucená tříška, při posuvu c), d) vznikla krátká šroubovitá tříška a pro praxi je vhodná pávě tříška při posuvu c) a d).



Obrázek 33 Vzniklé třísky po soustružení

Na obrázku 34 se nachází třísky po soustružení řeznou rychlostí 50 m/min, hloubkou řezu 1 mm a posuvy a) 0,04 mm/ot , b) 0,1 mm/ot, c) 0,15 mm/ot, d) 0,2 mm/ot. Posuvu a) odpovídá pásková smotaná tříška, pro posuv b) odpovídá krátká kroucená tříška, při posuvu c), d) vznikla krátká šroubovitá tříška. Pro následné skladování a další přepravu třísek je vhodná tříška posuvů c), d).



Obrázek 34 Vzniklé třísky po soustružení

Vyhodnocení:

Vyhodnocení třísek vychází ze zadaných řezných podmínek, při kterých vznikly tyto třísky. Z této části experimentálního měření je patrné, že největší vliv na tvar třísky při obrábění má axiální posuv. Druhý parametr řezných podmínek, který ovlivňuje tvar třísky je řezná rychlost. Přičemž nejmenší vliv na tvar třísky má hloubka třísky, kdy dochází ke vzniku tenké nebo tlusté třísky.

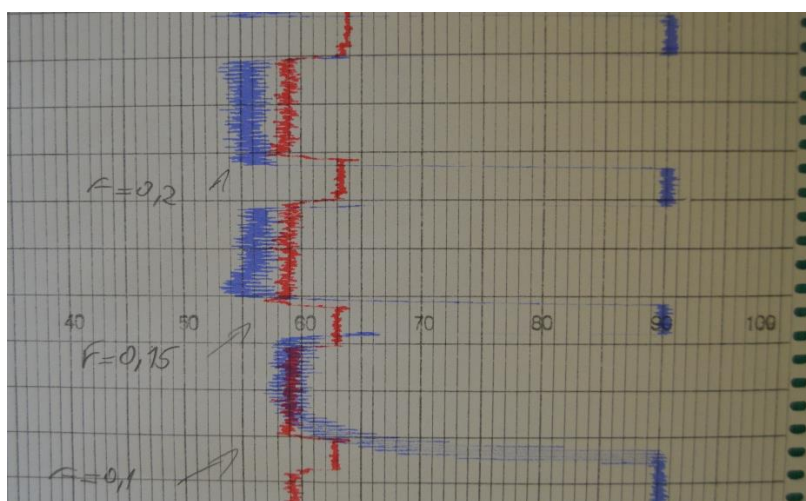
8.3 Měření složek řezných sil

Pro zadané parametry experimentu byly měřeny složky řezné síly F_c , posuvové síly F_f a pasivní síly F_p . Pro měření byl použit tenzometrický dynamometr. Na tento dynamometr byly připojeny dva zapisovače (obr. 35) pro získání záznamu průběhu síly. Prvním typem zapisovače byl, LINE RECORDER TZ 4100, který je schopen snímat jednu složku a zaznamenával složku F_c . Druhým typem zapisovače byl, LINE RECORDER TZ 5000, který je schopen zaznamenávat dvě složky - zaznamenával složku F_f a F_p . Nastavené zesílení bylo u všech přístrojů 20 mV/V, posuv papíru pro F_c – 1 mm/s a pro F_f i F_p – 5 cm/min.



Obrázek 35 Měřicí soustava pro měření sil

Ukázku záznamu pro $v_c = 20$ m/min, $a_p = 1$ mm (obr. 36), modrá barva složka F_f , červená barva složka F_p . Pro odečítání hodnot ze záznamu byla stanovena kalibrace, díky které bylo následně možné pouze odečítat pomocí pravítka hodnoty dané síly (tab. 7).



Obrázek 36 Ukázka záznamu naměřených sil

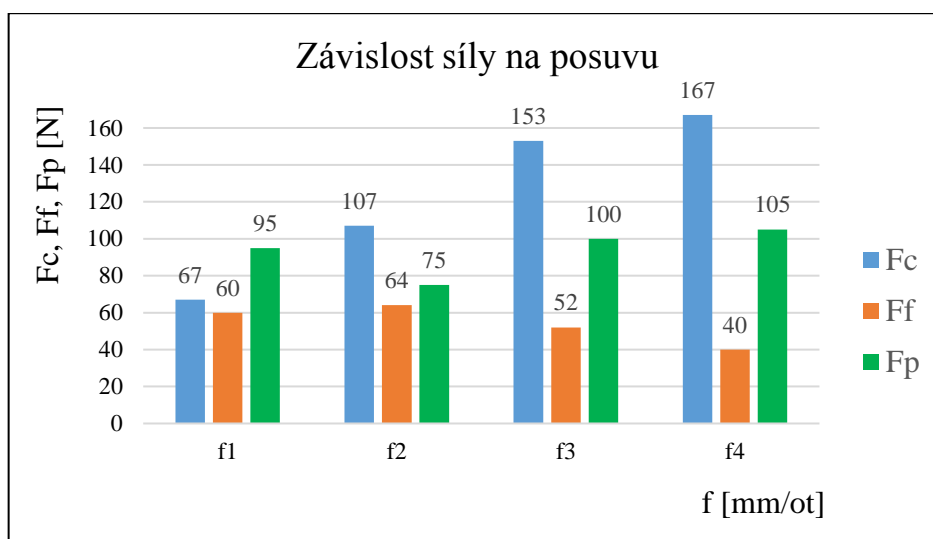
Tabulka 7 Naměřené složky řezné síly v [N]

$a_p = 0,3 \text{ mm}$				$a_p = 0,5 \text{ mm}$				$a_p = 1 \text{ mm}$			
$v_c = 20 \text{ m/min}$				$v_c = 20 \text{ m/min}$				$v_c = 20 \text{ m/min}$			
	F_c	F_f	F_p		F_c	F_f	F_p		F_c	F_f	F_p
f_1	67	60	95	f_1	107	140	88	f_1	220	312	50
f_2	107	64	75	f_2	187	148	95	f_2	353	352	60
f_3	153	52	100	f_3	240	132	100	f_3	453	350	65
f_4	167	40	105	f_4	293	108	110	f_4	580	340	68
$a_p = 0,3 \text{ mm}$				$a_p = 0,5 \text{ mm}$				$a_p = 1 \text{ mm}$			
$v_c = 30 \text{ m/min}$				$v_c = 30 \text{ m/min}$				$v_c = 30 \text{ m/min}$			
	F_c	F_f	F_p		F_c	F_f	F_p		F_c	F_f	F_p
f_1	67	52	85	f_1	120	142	80	f_1	227	336	50
f_2	67	60	90	f_2	187	144	90	f_2	373	380	55
f_3	93	56	95	f_3	240	128	100	f_3	467	364	53
f_4	140	56	110	f_4	280	116	108	f_4	586	344	60
$a_p = 0,3 \text{ mm}$				$a_p = 0,5 \text{ mm}$				$a_p = 1 \text{ mm}$			
$v_c = 40 \text{ m/min}$				$v_c = 40 \text{ m/min}$				$v_c = 40 \text{ m/min}$			
	F_c	F_f	F_p		F_c	F_f	F_p		F_c	F_f	F_p
f_1	60	56	90	f_1	100	152	85	f_1	213	348	58
f_2	87	56	93	f_2	120	152	93	f_2	373	384	60
f_3	107	58	100	f_3	233	134	100	f_3	467	368	63
f_4	127	48	105	f_4	267	118	115	f_4	567	344	70
$a_p = 0,3 \text{ mm}$				$a_p = 0,5 \text{ mm}$				$a_p = 1 \text{ mm}$			
$v_c = 50 \text{ m/min}$				$v_c = 50 \text{ m/min}$				$v_c = 50 \text{ m/min}$			
	F_c	F_f	F_p		F_c	F_f	F_p		F_c	F_f	F_p
f_1	67	60	85	f_1	100	134	78	f_1	213	356	73
f_2	93	58	93	f_2	113	140	93	f_2	347	376	70
f_3	107	52	100	f_3	213	120	100	f_3	427	360	85
f_4	140	50	110	f_4	267	104	115	f_4	533	356	110

V příložené tabulce 7 jsou uvedeny naměřené hodnoty jednotlivých složek celkové řezné síly. Naměřený rozsah složky F_c byl v rozpětí 60 až 586 N, naměřený rozsah složky F_f byl v rozpětí 40 až 380 N a rozsah složky F_p byl 50 až 115 N. Z tabulky je patrné, že hypotéza rozkladu celkové řezné síly, kdy složka F_f tvoří 40 % a složka F_p tvoří 25 % řezné síly, neplatí. Velikost jednotlivých složek je dána především řeznými podmínkami. Za určitých řezných podmínek, především za nízké řezné rychlosti, malé hloubky řezu a nízké rychlosti posuvu tvoří složka pasivní síly největší část celkové řezné síly, dále pak složka řezné síly a nejmenší část tvoří složka posuvu. Při těchto řezných podmínkách vznikají nejmenší síly. Naopak při velkých úběrech materiálu a vysokých rychlostech posuvu vznikají velké řezné síly. Největší velikost

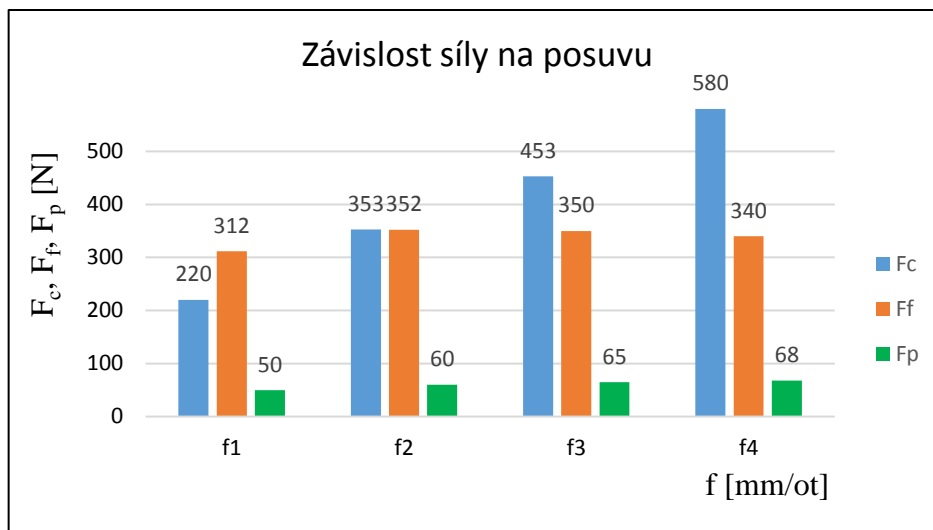
tvoří složka F_c , dále složka F_f a nejmenší složkou je F_p . Pro přehlednost a další ukázkou byly stanoveny některé grafické závislosti (obr. 37 – 40).

Pro první grafickou ukázkou byla vybrána velikost jednotlivých složek síly, pro $v_c = 20$ m/min, $a_p = 0,3$ mm a zadané posuvy $f_1 = 0,04$ mm/ot, $f_2 = 0,1$ mm/ot, $f_3 = 0,15$ mm/ot a $f_4 = 0,2$ mm/ot (obr. 37). Z obrázku je patrné, že čím je větší posuvová rychlost, tím roste F_c a F_p , ale naopak klesá složka F_f . Při takto malé hloubce a_p lze pozorovat, že hodnota F_p je velká, a dokonce pro posuv 0,04 mm/ot je tato složka největší.



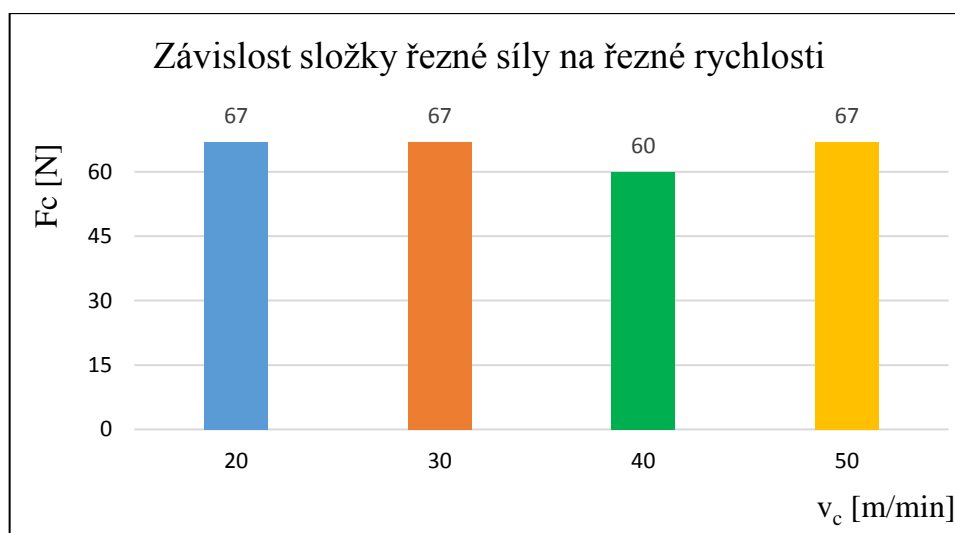
Obrázek 37 Závislost síly na posuvu při řezné rychlosti 20 m/min a hloubce třísky 0,3 mm

Pro rozdílnou skladbu jednotlivých složek síly je ukázána grafická závislost síly na posuvu pro $v_c = 20$ m/min, $a_p = 1$ mm a zadané posuvy $f_1 = 0,04$ mm/ot, $f_2 = 0,1$ mm/ot, $f_3 = 0,15$ mm/ot a $f_4 = 0,2$ mm/ot (obr. 38). Z obrázku je patrné, že při této hloubce řezu je F_p oproti F_c a F_f velmi malá. Zjevný je též nárůst složek F_c a F_f při $a_p = 1$ mm oproti $a_p = 0,3$ mm. V případě F_c přibližně o trojnásobek a F_f o šestnásobek. Velikost složky F_c roste s posuvem, naopak F_f klesá s výjimkou f_1 , zde je hodnota nejnižší.

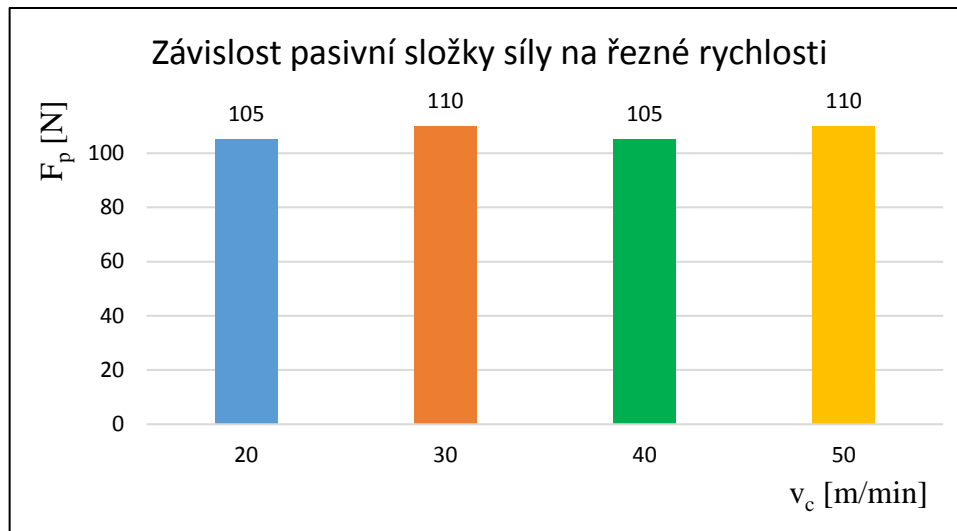


Obrázek 38 Závislost síly na posuvu při $v_c = 20 \text{ m/min}$ a $a_p = 1 \text{ mm}$

Porovnáním z hlediska řezné rychlosti (obr. 39 a 40) lze prohlásit, že řezná rychlost nemá zásadní vliv na změnu jednotlivých složek síly.



Obrázek 39 Závislost složky řezné síly na řezné rychlosti při $f = 0,04 \text{ mm/ot}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$



Obrázek 40 Závislost pasivní složky síly na řezné rychlosti při $f = 0,2 \text{ mm/ot}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$

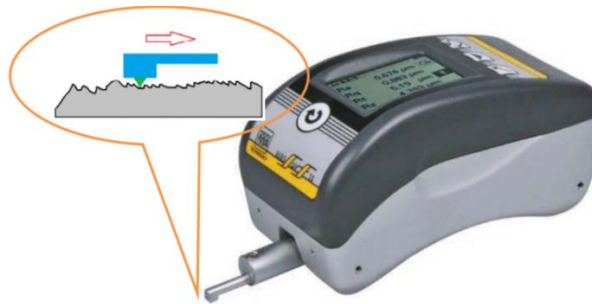
Na obrázku 40 můžeme vidět závislost pasivní složky síly na řezných rychlostech. Vidíme, že pro řeznou rychlost 20 a 40 m/min je výsledná velikost pasivní složky, taktéž velikosti F_p pro v_c 30 a 50 je stejná, ale celkově se liší o 5 N.

Vyhodnocení měření složek řezných sil:

Měřený rozsah jednotlivých složek byl: velikost rozpětí složky F_c byl 60 až 586 N, naměřený rozsah složky F_f byl 40 až 380 N a rozsah složky F_p byl 50 až 115 N. Z naměřených hodnot je patrné, že se nenaplnila hypotéza o celkovém složení řezné síly v poměru 1 : 0,4 : 0,25 jednotlivých složek F_c , F_f a F_p . Z měření vyplývá, že zásadní vliv na velikost jednotlivých složek mají řezné podmínky a nesmíme opomenout ani geometrii břitu. Největší vliv na velikost složky řezné síly F_c má hloubka třísky, se zvětšující se hloubkou třísky narůstá velikost složky řezné síly. Druhým parametrem, který ovlivňuje velikost složky řezné síly je posuv, s narůstající rychlostí posuvu se zvětšuje složka F_c . Naopak nejmenší vliv na velikost má řezná rychlost. Na velikosti složky posuvové síly má největší vliv také hloubka třísky, a velikost síly roste s hloubkou třísky. Naopak velikost F_f klesá se zvětšující se rychlostí posuvů, s výjimkou posuvu f_1 . Při změně řezné rychlosti dochází u složky F_f k odlišným naměřeným hodnotám. Pro pasivní složku platí, že s větší hodnotou hloubky třísky dochází ke zmenšení velikosti pasivní síly. Velikost F_p se zvětšuje se zvětšující se rychlostí posuvu.

8.4 Drsnost povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo provedeno pro zadané parametry experimentu. Byly měřeny tyto parametry drsnosti povrchu R_a , R_y , $R_z = R_{max}$ a R_q . Pro tyto parametry bylo provedeno měření v šesti bodech po obvodu obrobku. Z těchto šesti hodnot pro každý parametr byla vyřazena nejmenší a největší hodnota, dále byly stanoveny průměrné hodnoty a určena směrodatná odchylka. Výsledky naměřených a zpracovaných hodnot drsnosti povrchu jsou uvedeny v (tab. 7, 8, 9). Princip měření drsnoměrem je ukázán na (obr. 41). Pro měření byl použit drsnoměr SJ 201 MITUTOYO s nastavením $0,8 \times 5 \mu\text{m}$.



Obrázek 41 Princip měření drsnoměrem [16]

Z tohoto obrázku 41 je patrný princip měření. Diamantový hrot kopíruje povrch dané součásti, následně výsledek zpracovává mikropočítač, který zobrazí výsledek na display drsnoměru. Měření probíhá standardně na pěti základních délkách. Dále jsou uvedeny výsledky měření (tab. 7, 8, 9). Na ovlivnění výsledků může mít vliv narůstající opotřebení nástroje.

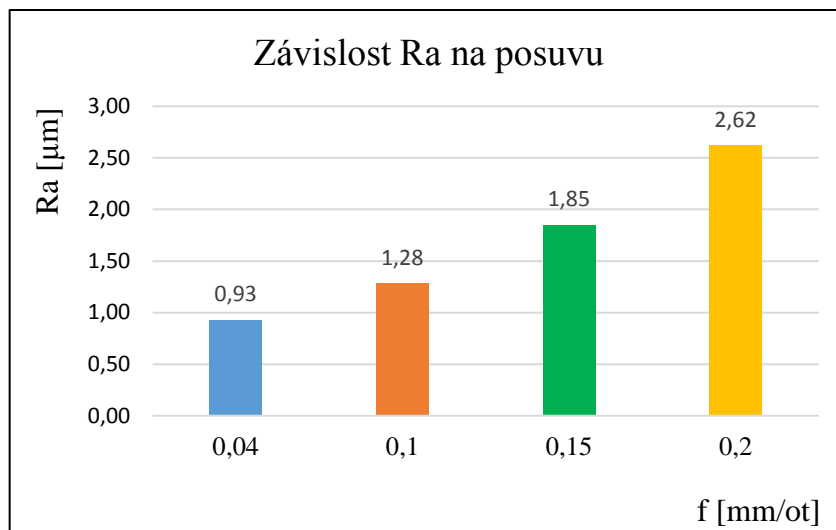
Opotřebení nástroje – v tomto experimentálním měření bylo opotřebení kontrolováno pouze vizuálně a nebylo měřeno žádnou jinou metodou. Při průběhu měření nebylo pozorováno extrémního nárůstu opotřebení. Stanovení velikosti opotřebení nebylo pro tuto práci zadáno, a proto se v práci neobjevuje.

Tabulka 8 Parametry drsnosti z hlediska posuvu, hodnoty v [μm]

f = 0,04 mm/ot v_c = 20 m/min, a_p = 0,3 mm						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	0,85	0,94	0,97	0,96	0,93	0,04
Rmax	5,08	5,04	5,60	5,45	5,29	0,21
Rq	1,08	1,15	1,18	1,12	1,13	0,03
f = 0,1 mm/ot v_c = 20 m/min, a_p = 0,3 mm						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	1,44	1,19	1,18	1,32	1,28	0,11
Rmax	7,62	6,22	6,82	6,79	6,86	0,50
Rq	1,76	1,43	1,42	1,6	1,55	0,14
f = 0,15 mm/ot v_c = 20 m/min, a_p = 0,3 mm						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	1,99	1,71	1,8	1,91	1,85	0,10
Rmax	9,16	8,99	8,76	8,77	8,92	0,15
Rq	2,39	2,08	2,17	2,3	2,24	0,11
f = 0,2 mm/ot v_c = 20 m/min, a_p = 0,3 mm						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	2,67	2,65	2,6	2,55	2,62	0,04
Rmax	11,29	10,81	11,43	11,66	11,3	0,28
Rq	3,04	3,05	2,98	2,95	3,01	0,04

Pro ukázkou naměřených hodnot z hlediska posuvu (tab. 8) byla vybrána řezná rychlost 20 m/min a hloubka třísky 0,3 mm. Z naměřených hodnot je patrné, že čím je hodnota posuvu větší, tím je dosažená horší kvalita povrchu. Dále je vidět, že směrodatná odchylka kromě posuvu $f = 0,1$ a $f = 0,15$ mm/ot je pro parametry Ra a Rq menší než $0,04 \mu\text{m}$, naopak směrodatná odchylka pro parametr Rmax je velká, největší hodnota směrodatné odchylky dosahuje až $0,50 \mu\text{m}$.

Závislost střední aritmetické odchylky profilu na axiálním posuvu zobrazuje obrázek 42. Grafická závislost je stanovená pro řeznou rychlost 20 m/min, hloubku třísky 0,3 mm a zadané axiální posuvy. Z této grafické závislosti vidíme dosahovanou kvalitu povrchu. Z této grafické závislosti lze stanovit závěr, pokud záleží na dosahované kvalitě povrchu, je vhodné používat nízké rychlosti posuvu, naopak pokud je potřeba odebrat co nejvíce materiálu a nezáleží na dosažené drsnosti povrchu, je vhodné používat vysoké posuvové rychlosti.



Obrázek 42 Závislost Ra na posuvu pro řeznou rychlost 20 m/min a hloubku třísky 0,3 mm

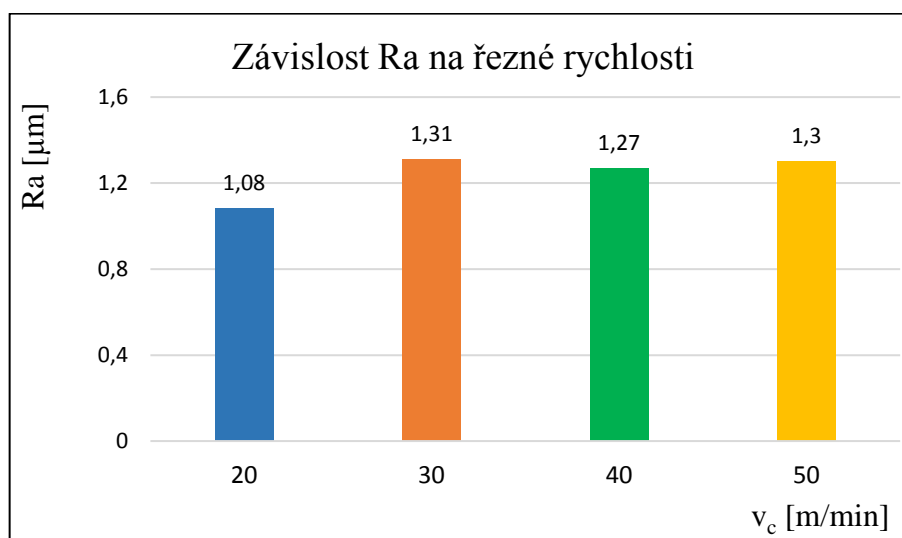
Tabulka 9 Naměřené hodnoty drsnosti v závislosti na v_c v [μm]

$v_c = 20$ m/min, $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ mm/ot						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	0,9	0,97	1,15	1,3	1,08	0,14
Rmax	8,75	4,91	5,7	6,1	6,37	1,29
Rq	1,09	1,21	1,39	1,76	1,36	0,23
$v_c = 30$ m/min, $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ mm/ot						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	1,35	1,37	1,28	1,25	1,31	0,05
Rmax	6,17	6,32	6,98	6,46	6,48	0,3
Rq	1,56	1,63	1,51	1,52	1,56	0,05
$v_c = 40$ m/min, $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ mm/ot						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	1,45	1,15	1,26	1,2	1,27	0,1
Rmax	7,75	7,05	7,56	6,77	7,28	0,35
Rq	1,73	1,38	1,57	1,54	1,56	0,11
$v_c = 50$ m/min, $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ mm/ot						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	1,3	1,27	1,35	1,26	1,3	0,03
Rmax	6,72	6,78	6,66	6,84	6,75	0,06
Rq	1,56	1,53	1,54	1,64	1,57	0,04

Naměřené hodnoty pro parametry Ra, Rq a Rmax pro řezné rychlosti 20, 30, 40 a 50 m/min (tab. 9). Směrodatná odchylka pro parametr Rmax o velikosti 1, 29 μm při řezné rychlosti 30 m/min vznikla nejspíše chybným měřením. Naopak nejmenší směrodatná odchylka

byla pro řeznou rychlost 50 m/min, kde hodnota je menší než 0,6 μm pro všechny tři měřené parametry.

Další obrázek popisuje závislost Ra na řezné rychlosti (obr. 43) představuje výsledné průměrné hodnoty pro jednotlivé řezné rychlosti při hloubce třísky 0,5 mm a posuvu 0,1 mm/ot. Je patrné, že nejnižší drsnost povrchu byla dosažena při nejnižší řezné rychlosti 20 m/min, naopak nejméně kvalitní drsnost povrchu byla dosažena při řezné rychlosti 30 m/min. Musíme však vzít v úvahu vyrovnanost hodnot pro řezné rychlosti 30, 40 a 50 m/min.



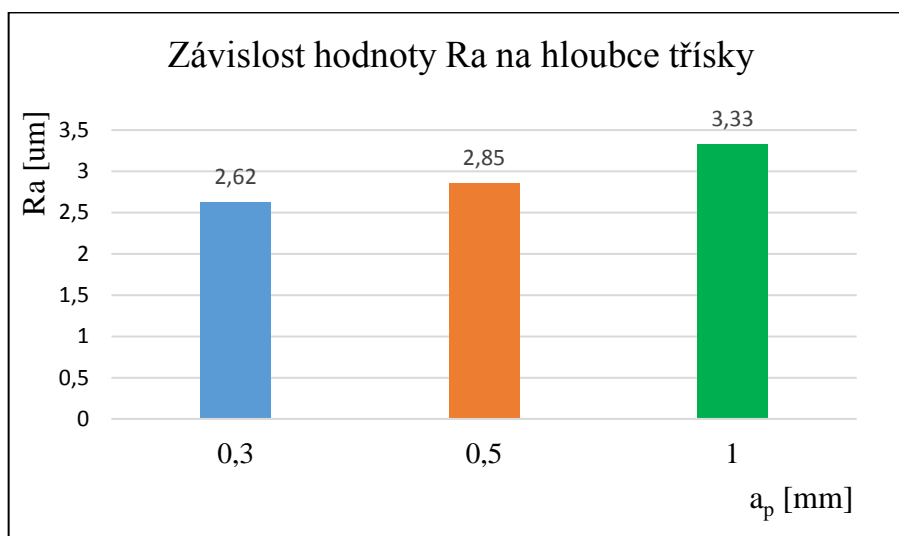
Obrázek 43 Závislost Ra na řezné rychlosti, pro posuv 0,1 mm/ot a hloubku třísky 0,5 mm

Tabulka 10 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu z hlediska hloubky třísky v [μm]

$a_p = 0,3$ mm, $v_c = 20$ m/min, $f = 0,2$ mm/ot						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	2,67	2,65	2,60	2,55	2,62	0,04
Rmax	11,29	10,81	11,43	11,66	11,30	0,28
Rq	3,04	3,05	2,98	2,95	3,01	0,04
$a_p = 0,5$ mm, $v_c = 20$ m/min, $f = 0,2$ mm/ot						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	3,01	3,19	2,50	2,68	2,85	0,27
Rmax	12,64	12,44	10,85	12,11	12,01	0,70
Rq	3,44	3,63	2,91	3,12	3,28	0,28
$a_p = 1$ mm, $v_c = 20$ m/min, $f = 0,2$ mm/ot						
Měření	1.	2.	3.	4.	Průměr	smě. odchylka
Ra	3,66	3,29	3,31	3,06	3,33	0,19
Rmax	14,40	12,79	13,95	12,99	13,53	0,60
Rq	4,10	3,67	3,80	3,56	3,78	0,18

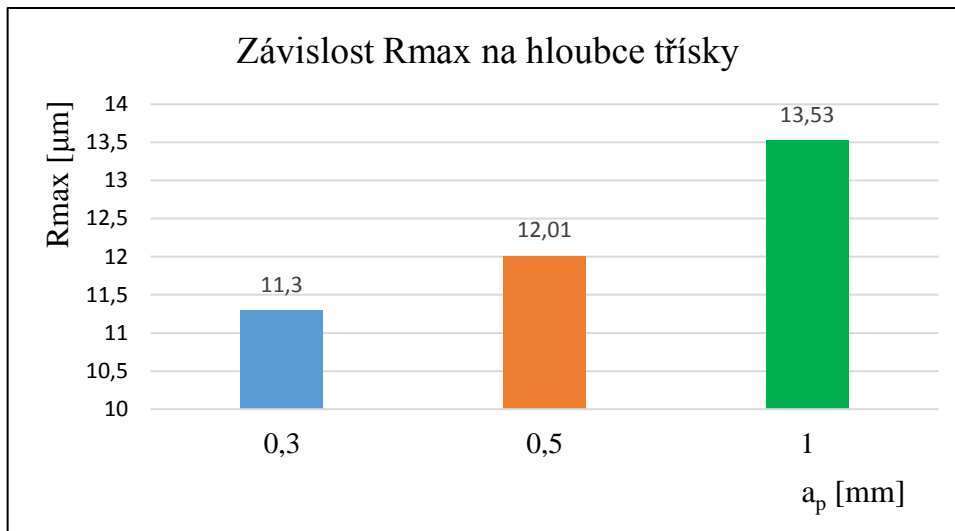
Vybrané naměřené hodnoty R_a , R_{max} a R_q z hlediska hloubky třísky ukazuje tabulka 10. Vybrané naměřené hodnoty jsou pro řeznou rychlost 20 m/min a posuv 0,2 mm/ot. Z těchto naměřených hodnot je patrné, že se zvětšující se hloubkou třísky klesá dosahovaná kvalita povrchu, tohoto lze využít především v hrubovacích operacích, kdy je snaha odebrat co nejvíce materiálu na úkor přesnosti a dosahované kvality povrchu.

Závislost střední aritmetické odchylky profilu na hloubce třísky je uvedena na (obr. 44), při řezné rychlosti 20 m/min a posuvu 0,2 mm/ot. Z tohoto obrázku je patrné, že čím je hloubka třísky větší, tím je dosažena drsnost povrchu horší.



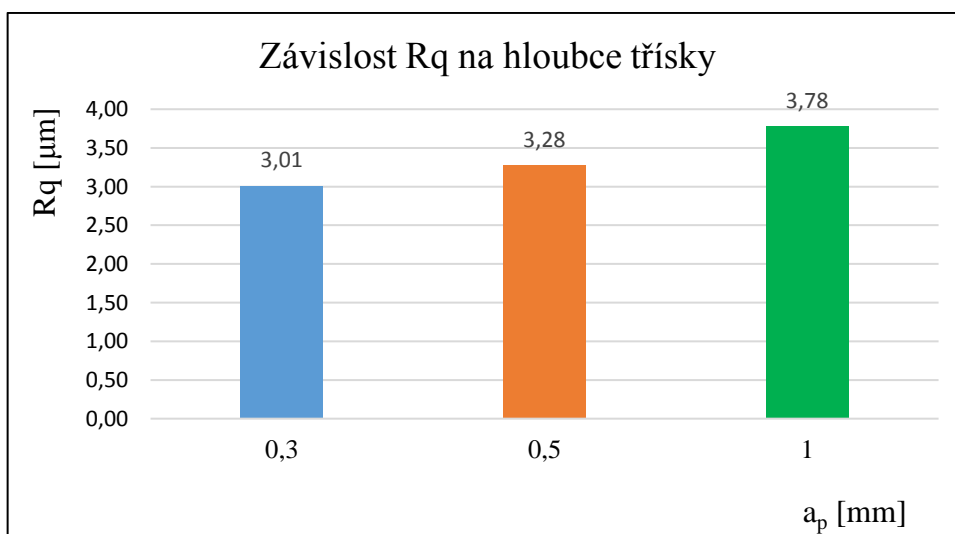
Obrázek 44 Závislost R_a na a_p při $v_c = 20$ m/min a $f = 0,2$ mm/ot

Grafická závislost na (obr. 45) popisuje maximální výšku profilu na hloubce třísky pro $v_c = 20$ m/min a posuvu 0,2 mm/ot. Z grafické závislosti je patrné, že maximální výška profilu se zvětšuje při zvětšování hloubky třísky. Tato skutečnost může být způsobena nedostatečnou tuhostí soustavy při obrábění.



Obrázek 45 Závislost Rmax na a_p při $v_c = 20$ m/min a $f = 0,2$ mm/ot

Závislost průměrné kvadratické odchylky na hloubce třísky pro řeznou rychlost 20 m/min a posuv 0,2 mm/ot je představena na obrázku 46. Z této grafické závislosti vyplývá, že s narůstající hloubkou třísky také narůstá průměrná kvadratická odchylka.



Obrázek 46 Závislost Rq na a_p při $v_c = 20$ m/min a $f = 0,2$ mm/ot

Vyhodnocení kvality povrchu:

V této části zabývající se kvalitou povrchu byly naměřeny rozsahy hodnot jednotlivých parametrů. Pro parametr Ra byl naměřený rozsah hodnot v rozmezí 0,52 až 3,66 μm . Pro parametr Rmax byl naměřen rozsah hodnot 3,92 až 15,28 μm . A pro parametr Rq byl naměřen rozsah hodnot 0,65 až 4,10 μm . Z těchto naměřených výsledků lze stanovit tento závěr, zásadní vliv na velikost jednotlivých hodnot parametrů Ra, Rmax a Rq mají řezné podmínky. Nejvyšší

hodnoty pro tyto parametry byly měřeny při nízkých posuvech, nejmenší hloubce třísky a nízkých řezných rychlostech. Naopak nejvyšší dosažené hodnoty pro parametry Ra, Rmax a Rq byly dosaženy při maximální hloubce třísky, nejvyšších posuvech a vysokých řezných rychlostech. Z tohoto měření vyplývá smysl daných řezných podmínek pro produktivitu práce. Kdy při hrubování je cílem maximální úběr materiálu v co možném nejkratším čase, bez ohledu na dosaženou kvalitu povrchu. Naopak u dokončovacích operací jsou podmínky voleny tak, aby bylo dosaženo požadované přesnosti i kvality povrchu.

Závěr:

V teoretické části této práce byla rozebrána následující problematika: řezné materiály, základy procesu řezání, řezné síly, teplo a teplota při obrábění, parametry řezného procesu a dosahovaná kvalita povrchu.

Hlavním cílem celé této bakalářské práce bylo experimentální měření a následné vyhodnocení dosažených výsledků. Byly vyhodnoceny třísky, složky řezné síly a dosažená kvalita povrchu. Měření proběhlo na universálním hrotovém soustruhu, řezný nástroj byl ze slinutého karbidu a byla obráběna slitina titanu Ti6AlV4.

Vyhodnocení třísek vychází ze zadaných řezných podmínek, za kterých vznikly tyto třísky. Z této části experimentálního měření je patrné, že největší vliv na tvar třísky při obrábění má axiální posuv. Druhý parametr řezných podmínek, který ovlivňuje tvar třísky je řezná rychlost. Nejmenší vliv na tvar třísky má hloubka třísky, kdy dochází ke vzniku tenké, nebo tlusté třísky.

Síly jednotlivých složek byly měřeny v těchto rozpětích: velikost rozpětí složky F_c 60 až 586 N, naměřený rozsah složky F_f 40 až 380 N a rozsah složky F_p 50 až 115 N. Z naměřených hodnot je patrné, že se nenaplnila hypotéza o celkovém složení řezné síly v poměru 1 : 0,4 : 0,25 jednotlivých složek F_c , F_f a F_p . Z měření vyplývá, že zásadní vliv na velikost jednotlivých složek mají řezné podmínky a nelze opomenout ani geometrii břitu. Největší vliv na velikost složky řezné síly F_c má hloubka třísky. Se zvětšující se hloubkou třísky narůstá velikost složky řezné síly. Druhým parametrem, který ovlivňuje velikost složky řezné síly je posuv, s narůstající rychlostí posuvu se zvětšuje složka F_c . Nejmenší vliv na velikost má naopak řezná rychlost. Na velikost složky posuvové síly má největší vliv také hloubka třísky, kdy velikost síly roste s hloubkou třísky. Velikost F_f klesá ovšem se zvětšující se rychlostí posuvů, s výjimkou posuvu f_1 . Při změně řezné rychlosti dochází u složky F_f k odlišně naměřeným hodnotám. Pro pasivní složku platí, že s větší hodnotou hloubky třísky dochází ke zmenšení velikosti pasivní síly. Velikost F_p se zvětšuje se zvětšující se rychlostí posuvu.

V části zabývající se kvalitou povrchu byly naměřeny rozsahy hodnot jednotlivých parametrů. Pro parametr R_a byl naměřený rozsah hodnot v rozmezí 0,52 až 3,66 μm . Pro parametr R_{max} byl naměřen rozsah hodnot 3,92 až 15,28 μm . A pro parametr R_q byl naměřen rozsah hodnot 0,65 až 4,10 μm . Z naměřených výsledků lze stanovit závěr, že zásadní vliv na velikost jednotlivých hodnot parametrů R_a , R_{max} a R_q mají řezné podmínky. Nejnižší hodnoty pro tyto parametry byly dosaženy při nízkých posuvech, nejmenší hloubce třísky a nízkých

řezných rychlostech. Naopak nejvyšší dosažené hodnoty pro parametry Ra, Rmax a Rq byly dosaženy při maximální hloubce třísky, nejvyšších posuvech a vysokých řezných rychlostech. Z tohoto měření vyplývá smysl daných řezných podmínek pro produktivitu práce, kdy při hrubování je cílem maximální úběr materiálu v co možném nejkratším čase bez ohledu na dosaženou kvalitu povrchu. U dokončovacích operací jsou ovšem podmínky voleny tak, aby bylo dosaženo požadované přesnosti i kvality povrchu.

Tato práce by mohla být dále rozšířena o další experimentální měření při odlišných řezných podmínkách a následném porovnání výsledků.

Použitá literatura:

- [1] Skripta *Technologie II: 1. díl* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [2] Skripta *Technologie II: 2. díl* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [3] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [4] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [5] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01864-6.
- [6] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [7] *Nástrojové materiály* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: http://u12134.fsfd.cvut.cz/podklady/ON/2013_1_Nastrojove_materialy.pdf
- [8] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2
- [9] HUMÁR, Antonín. *TECHNOLOGIE I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [10] *SANDVIK Coromant: Nástrojové materiály* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z http://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/introduction/pages/default.aspx
- [11] *Základy obrábění* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>
- [12] *ELUC: Veřejné lekce* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1816>
- [13] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012 [cit. 2017-05-19].

ISBN 9788024825335. Dostupné z:

http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf

[14] *UČÍME V PROSTORU: Soustružení* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z:

http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2677

[15] Drsnost obrobeného povrchu. *Tumlikovo: Metal Cutting Technologies* [online]. 2010

[cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>

[16] *Odborné vzdělávání s moderní technikou: Drsnost povrchu* [online]. 2010 [cit. 2017-

05-20]. Dostupné z: [http://files.ovmt.webnode.cz/200000030-](http://files.ovmt.webnode.cz/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf)

[3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf](http://files.ovmt.webnode.cz/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf)

[17] *DRSNOST POVRCHU: Parametry drsnosti povrchu dle DIN EN ISO* [online].

Teplice: HOMEL - ETAMIC [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [https://www.hommel-](https://www.hommel-etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf)

[etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf](https://www.hommel-etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf)

[18] *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. Brno [cit. 2017-05-20].

Dostupné z:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_tehnologii_obrabeni.pdf

[19] Měření jakosti povrchu. *Sandvik coromant* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z:

<http://www.sandvik.coromant.com/cs->

[cz/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx)

[20] ŠŇUPÁREK, Petr a Martin MAREK. *TECHNICKÁ DOKUMENTACE: Drsnost povrchu* [online]. In: . Ostrava [cit. 2017-05-23]. Dostupné z:

http://fei1.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/td/01-

[textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf)

[21] Titanium Alloy. *Arcam AB: CAD TO METAL* [online]. Švédsko [cit. 2017-05-23].

Dostupné z: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>

[22] Tenzometry: Sortiment. *HBM: Měřicí technika* [online]. Praha [cit. 2017-05-23].

Dostupné z: <http://www.hbm.cz/Aplikace/tenzometry.pdf>

[23] BILÍK, Oldřich a Jan MÁDL. *Trvanlivost břítu a provozní spolehlivost obráběcího nástroje*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2001. Strojírenská technologie. ISBN 80-7044-389-8.

Seznam použitých obrázků:

Obrázek 1 Obrobek - základní plochy[9]	11
Obrázek 2 Závislost tvrdosti a houževnatosti řezných materiálů [3]	12
Obrázek 3 Faktory volby řezného materiálu[6].....	13
Obrázek 4 Technologie povlakování CVD [6].....	14
Obrázek 5 Technologie povlakování PVD [6].	14
Obrázek 6 Ukázka VBD ze slinutého karbidu [6].....	17
Obrázek 7 Výroba slinutých karbidů [6]	19
Obrázek 8 Ukázka VBD z řezné keramiky [6].....	21
Obrázek 9 Provedení VBD s hrotem z KBN [10].	22
Obrázek 10 VBD s povlakem diamantu [10]	22
Obrázek 11 (a) Ortogonální řezání, (b) vázané řezání [1].....	23
Obrázek 12 Plochy a úhly řezného klínu [3].	23
Obrázek 13 Geometrie soustružnického nože [9].....	24
Obrázek 14 Plastická deformace - členění [12].....	25
Obrázek 15 Druhy třísek a - plynulá článkovitá tříška; b - plynulá lamelová tříška; c - tvářená elementární tříška; d - nepravidelně článkovitá tříška; e - tvářená plynulá soudržná tříška; f - dělená segmentová tříška; g - plynulá segmentová tříška [4].....	26
Obrázek 16 Dělení třísek podle vhodnosti [12].....	26
Obrázek 17 Síly při ortogonálním a vázaném řezání [8].....	27
Obrázek 18 Tenzometrické odporové snímače [22].....	29
Obrázek 19 Vznik a odvod tepla [14].....	31
Obrázek 20 Obecný povrch a jeho rozdělení [16].....	36
Obrázek 21 Délka měření [19]	36
Obrázek 22 Vyhodnocení střední aritmetické odchylky [19].....	37
Obrázek 23 Vliv reálného profilu na parametru Ra [19].....	37
Obrázek 24 Maximální výška profilu [19]	38
Obrázek 25 Průměrná kvadratická úchylka profilu [18]	38
Obrázek 26 Universální hrotový soustruh TOS Kuřim.....	40

Obrázek 27 Soustružnický ubírací nůž	40
Obrázek 28 Polotovar Ti6Al4V	41
Obrázek 29 Třísky po soustružení	42
Obrázek 30 Třísku po soustružení	43
Obrázek 31 Třísky po soustružení	43
Obrázek 32 Vzniklé třísky po soustružení	44
Obrázek 33 Vzniklé třísky po soustružení	44
Obrázek 34 Vzniklé třísky po soustružení	45
Obrázek 35 Měřicí soustava pro měření sil	46
Obrázek 36 Ukázka záznamu naměřených sil	46
Obrázek 37 Závislost síly na posuvu při řezné rychlosti 20 m/min a hloubce třísky 0,3 mm .	48
Obrázek 38 Závislost síly na posuvu při $v_c = 20$ m/min a $a_p = 1$ mm	49
Obrázek 39 Závislost složky řezné síly na řezné rychlosti při $f = 0,04$ mm/ot, $a_p = 0,3$ mm....	49
Obrázek 40 Závislost pasivní složky síly na řezné rychlosti při $f = 0,2$ mm/ot, $a_p = 0,3$ mm...	50
Obrázek 41 Princip měření drsnoměrem [16]	51
Obrázek 42 Závislost R_a na posuvu pro řeznou rychlost 20 m/min a hloubku třísky 0,3 mm	53
Obrázek 43 Závislost R_a na řezné rychlosti, pro posuv 0,1 mm/ot a hloubku třísky 0,5 mm..	54
Obrázek 44 Závislost R_a na a_p při $v_c = 20$ m/min a $f = 0,2$ mm/ot.....	55
Obrázek 45 Závislost R_{max} na a_p při $v_c = 20$ m/min a $f = 0,2$ mm/ot	56
Obrázek 46 Závislost R_q na a_p při $v_c = 20$ m/min a $f = 0,2$ mm/ot	56

Seznam použitých tabulek:

Tabulka 1 Rychlořezné oceli - chemické složení a použití [8].....	16
Tabulka 2 Přehled skupin slinutých karbidů [7].....	18
Tabulka 3 Rozdělení slinutých karbidů [3]	19
Tabulka 4 Úhly řezného klínu [3].....	24
Tabulka 5 Dosahované parametry R_a a IT [12]	35
Tabulka 6 Přiřazení parametrů k zadaným posuvům	42
Tabulka 7 Naměřené složky řezné síly v [N]	47
Tabulka 8 Parametry drsnosti z hlediska posuvu, hodnoty v [μ m]	52
Tabulka 9 Naměřené hodnoty drsnosti v závislosti na v_c v [μ m]	53
Tabulka 10 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu z hlediska hloubky třísky v [μ m]	54