

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A  
METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Energetická náročnost řezného procesu  
Energetic consumption of the cutting process

AUTOR: Jakub VOŠTA

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Vítězslav RÁZEK, CSc.

PRAHA 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vošta** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **456800**  
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:

**Energetická náročnost řezného procesu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Energetic consumption of the cutting process**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Možnosti monitorování řezného procesu
3. Realizace experimentálních měření
4. Zhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

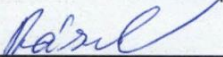
**Ing. Vítězslav Rázek, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**


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

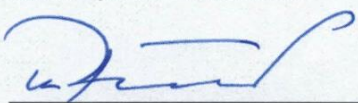
Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Vítězslav Rázek, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
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.

16.4.2019  
Datum převzetí zadání

Vošta  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá rozбором problematiky řezného procesu a energetickou náročností obrábění při různých řezných podmínkách. Práce popisuje jednotlivé podmínky ovlivňující řezný proces, jejich vliv na potřebné množství energie a způsoby monitorování. V experimentální části bylo provedeno měření řezných sil a příkonu při broušení materiálu Inconel 713 LC za různých řezných podmínek.

## Klíčová slova

Řezný proces, energetická náročnost, řezné síly, příkon, obrábění, broušení

## Annotation

This bachelor's thesis is focused on the analysis of cutting process and energetic demands of machining at different cutting conditions. The work describes various conditions influencing the cutting process, their influence on the necessary amount of energy and methods of monitoring. In the experimental part, the measurement of cutting forces and input power was performed during grinding of Inconel 713 LC material under various cutting conditions.

## Keywords

Cutting process, energetic demands, cutting forces, power input, machining, grinding

## Poděkování

Rád bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc., za cenné rady, četné konzultace a odborné vedení při zpracovávání této práce.

## Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Řezný proces.....	10
2.1.	Dělení řezného procesu.....	10
2.1.1.	Dělení řezného procesu podle odebírání materiálu.....	10
2.1.2.	Dělení řezného procesu podle polohy ostří vůči směru řezného pohybu.....	11
2.1.3.	Dělení řezného procesu podle plynulosti.....	11
2.2.	Plastická deformace.....	11
3.	Energetická náročnost.....	13
3.1.	Řezné síly.....	13
3.1.1.	Empirické vyjádření řezných sil.....	15
3.1.2.	Vyjádření řezných sil pomocí měrné řezné síly.....	15
3.2.	Práce.....	15
3.3.	Výkon a příkon.....	16
3.4.	Teplo.....	17
4.	Podmínky ovlivňující energetickou náročnost.....	20
4.1.	Vliv obráběného materiálu.....	20
4.2.	Řezné prostředí.....	22
4.3.	Nástroje.....	23
4.3.1.	Nástrojová geometrie.....	24
5.	Monitorování řezného procesu.....	26
5.1.	Metoda přímého měření.....	26
5.1.1.	Rozdělení dynamometrů.....	27
5.2.	Metoda nepřímého měření.....	28
6.	Experimentální část.....	30
6.1.	Návrh experimentu.....	30
6.2.	Popis měření.....	31

6.3. Pracoviště .....	33
6.4. Ekvivalentní hloubka třísky .....	36
7. Řezné síly.....	38
7.1. Výkon.....	42
8. Řezný příkon.....	43
9. Závěr .....	46
10. Seznam použité literatury .....	48
11. Seznam obrázků.....	50
12. Seznam tabulek.....	51



## 1. Úvod

Technologie obrábění zaujímá ve světě strojírenství poměrně důležitou roli. S obráběnými součástmi se setkáváme každý den a mají celou škálu využití. Nebýt obráběných součástí, jen těžko bychom vyráběli elektřinu nebo mohli pohodlně cestovat auty a letadly.

Průmysl zaměřený na výrobu součástí pomocí obrábění má za úkol, stejně jako ostatní druhy průmyslu, především co nejvíce vydělávat. Ve snaze o maximalizaci zisku se pokouší podniky vyrábět co největší množství kusů za co nejmenší výrobní náklady.

Snižování výrobních nákladů souvisí převážně s hledáním optimální trvanlivosti. Z určené trvanlivosti dokážeme pomocí Taylorova vztahu určit ideální řeznou rychlost, hloubku řezu a posuv. Po zvolení řezných podmínek se však může objevit problém.

Existuje velké množství obráběcích strojů, které se liší přesností výroby, způsobem použití nebo automatizací. Každý ze strojů má ale limitující faktor ve svém výkonu. Pokud zvolíme řezné podmínky vyžadující větší výkon, než na jaký je náš stroj dimenzován, tak naši součást nevyrobíme.

Hlavním cílem této bakalářské práce je proto rozebrat problém energetické náročnosti, popsat faktory ovlivňující požadovaný výkon řezného procesu a jakými způsoby je možné řezný proces monitorovat. V praktické části je pak zpracováno měření příkonu a řezných sil během broušení za různých řezných podmínek.

## 2. Řezný proces

Obrábění můžeme definovat jako technologický proces, při kterém dochází k zajištění požadovaného tvaru, rozměrů a jakosti povrchu obrobku odebíráním částí materiálu mechanickými či elektro-chemickými metodami. K obrábění dochází v soustavě obráběcí stroj – rezný nástroj – obrobek. Odebíraná část, zvaná přídavek, je část materiálu mezi obráběnou a obrobenou plochou obrobku. K úběru přídavku dochází působením rezného procesu. [1]

Řezný proces, též zvaný řezání, je základní operací obrábění. Můžeme tak nazvat libovolný proces odebírající materiál. Různé druhy rezného procesu můžeme dělit podle několika kategorií.

### 2.1. Dělení rezného procesu

Podle způsobu odebírání materiálu dělíme řezání na mechanické a nekonvenční. V závislosti vzájemné polohy ostří vůči směru rezného pohybu rozlišujeme řezání volné (ortogonální) a řezání vázané. Dalším způsobem dělení rezného procesu je rozdělení na plynutý a přerušovaný. [2, 3]

#### 2.1.1. Dělení rezného procesu podle odebírání materiálu

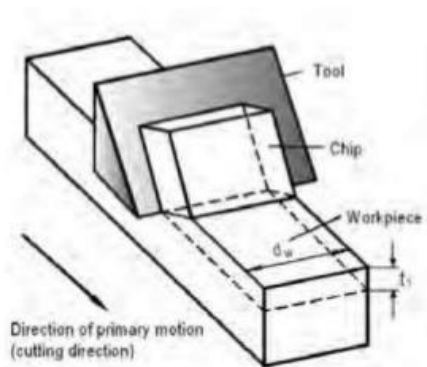
Mechanickým způsobem řezání rozumíme odebírání materiálu mechanickými metodami. Přídavek odebíráme působením břitu nástroje na obrobek. Pohybem nástroje vůči obrobku vzniká tříška, která dává celému způsobu obrábění svůj název – třískové obrábění. U kovových materiálů dochází k plastické deformaci a zpevnování obrobku, v materiálu obrobku zůstávají zbytková pnutí. Tento způsob je limitován mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu jako je pružnost a pevnost.

Nekonvenční způsob řezání je souhrnné označení pro odebírání materiálu pomocí fyzikálních nebo chemických principů, případně kombinací obou těchto způsobů. Nekonvenční způsob není limitován mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu, ale vlastnostmi fyzikálními (např. elektrická či tepelná vodivost) a chemickým složením. [7]

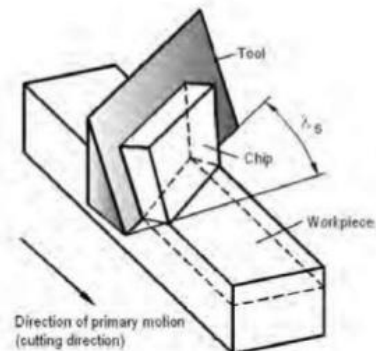
### 2.1.2. Dělení řezného procesu podle polohy ostří vůči směru řezného pohybu

Volným, případně ortogonálním, řezáním rozumíme způsob řezání, při kterém je ostří nástroje kolmé na směr řezného pohybu. K tomuto způsobu řezání dochází v rovině. Používá se například u zapichování, protahování. Princip je zobrazen na obrázku 1.

Vázané řezání se od volného liší tím, že úhel ostří vůči směru řezného pohybu je jiný než  $90^\circ$ . Tento způsob řezání se nerealizuje v rovině ale prostoru. Princip je zobrazen na obrázku 2.



1 Volné řezání [5]



2 Vázané řezání [5]

### 2.1.3. Dělení řezného procesu podle plynulosti

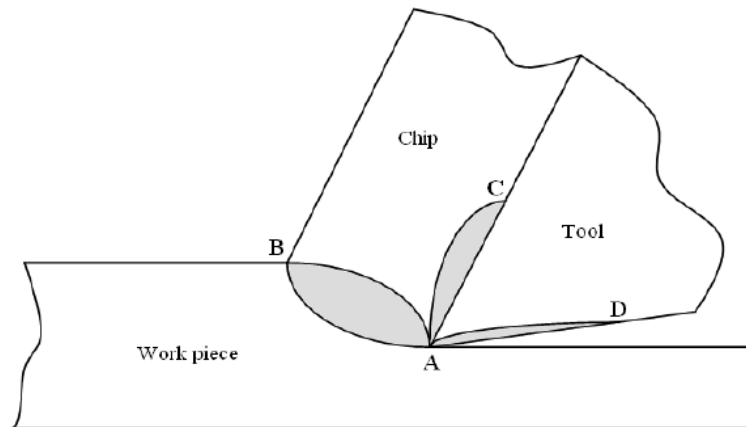
Plynulým, též kontinuálním, řezným procesem rozumíme řez, při kterém je břit nástroje po celou dobu v záběru. Mezi metody obrábění užívající kontinuální řez patří soustružení, vrtání nebo vyvrtávání. [3]

Přerušovaným, též diskontinuálním, řezným procesem rozumíme řez, při kterém není břit v záběru celou dobu obrábění, střídavě vchází a vychází ze záběru. Mezi metody obrábění využívající diskontinuální řez patří hoblování a obrážení či frézování.

## 2.2. Plastická deformace

Působením řezného procesu na materiál obrobku dochází ke změnám ve struktuře materiálu obrobku. Vnikáním břitu řezného nástroje silou  $F$  se v materiálu obrobku koncentruje napětí. Důsledkem tohoto napětí je vznik pružné a plastické deformace v obráběném materiálu. Po překročení meze pevnosti dojde k oddělení třísky. Oblast primární plastické deformace vzniká před a pod břitem nástroje, sekundární

v povrchových vrstvách na styku třísky a čela nástroje a v povrchové vrstvě obrobené plochy vzniká oblast terciální.



3 Oblasti plastických deformací [6]

Působením plastické deformace dochází k oddělení třísky od obrobku, mechanickému zatížení nástroje řeznými odpory a vzniku tepla. Tyto vlivy nemají jen vliv na opotřebení nástroje, ale také na třísku a obrobenou plochu. Dochází ke změnám struktury materiálu v povrchové vrstvě obrobené plochy a ke vzniku zbytkových napětí.

### 3. Energetická náročnost

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, působením řezného procesu dochází ke vzniku plastických deformací materiálu obrobku. K vzniku těchto deformací je třeba dodávat soustavě energii. Transformací dodané energie na sílu a jejím působením se koná práce. Nedochozí však jen k deformačním jevům, ale také k silovému působení.

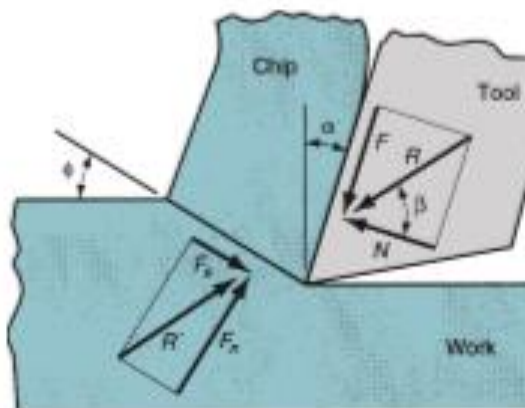
Správné pochopení silového působení řezného procesu nám pomůže pochopit mechanické namáhání soustavy obrábění. Z takto získaných údajů jsme schopni vyřešit pevnost a tuhost soustavy včetně zajištění stability řezného procesu a energetické účinnosti řezného procesu. Dále nám pomůže získat podklady potřebné pro určení dostačujícího příkonu obráběcího stroje nebo posouzení tepelného působení řezného procesu. Údaje o tepelném působení nám následně pomohou zjistit životnost řezného nástroje a posoudit celkovou ekonomickou bilanci obrábění.

#### 3.1. Řezné síly

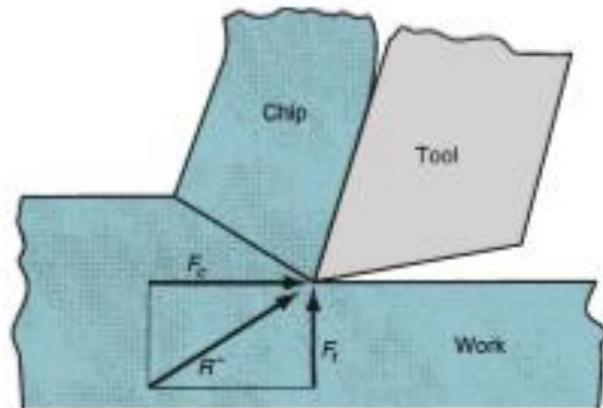
Řezný proces je realizován jako výsledek silové soustavy mezi nástrojem a obrobkem. Stroj dodává sílu obrábění  $F$ . Touto silou, též někdy zvanou jako síla řezání, je nástroj vtlačován do obrobku. Proti ní působí z obrobku řezný odpor  $R$  a způsobuje v obráběném materiálu napjatost. Pro odstranění materiálu musí síla řezání tento odpor překonat. Pro podmínku rovnováhy platí:

$$F = - R \quad [N] \quad (3.1)$$

Síla řezání je časově proměnlivá veličina a její okamžitá velikost  $F_{ok}$  kolísá i za konstantních řezných podmínek až o  $\pm 20\%$ . Ke kolísání dochází zejména díky změně mechanických vlastností obráběného materiálu během obrábění a mechanikou tvorby třísky. V případě měření dynamometrem je proto vhodné měření několikrát opakovat. [2, 4]



4 Síly při ortogonálním řezání [4]



5 Síly při vázaném řezání [4]

Síla řezání se dělí na sílu aktivní  $F_a$  a sílu pasivní  $F_p$ . Aktivní sílu  $F_a$  můžeme ještě rozdělit na sílu řeznou  $F_c$  a sílu posuvu  $F_f$ . Vzájemný poměr jednotlivých sil závisí především na geometrii nástroje a použité metodě obrábění. Pro velikost síly řezání platí:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \text{ [N]} \quad (3.2)$$

Řezná (tangenciální) síla  $F_c$  působí ve směru vektoru řezné rychlosti (ve směru hlavního pohybu na obráběcím stroji). Zpravidla má ze všech složek síly největší význam a je zásadní pro optimalizaci řezných podmínek. Například pro soustružení se podílí na celkovém příkonu až 99 %.

Posuvová síla  $F_f$  působí ve směru posuvu. Obvykle má velikost mezi 40 – 50 % řezné síly. Na celkovém příkonu se podílí jen minimálně. Hlavním důvodem je, že posuvová rychlost je ve srovnání s řeznou rychlostí velmi malá. Působí ve směru největší tuhosti obráběcí soustavy.

Pasivní síla  $F_p$  působí při řezání kolmo na obrobenou plochu. Vyskytuje se jen u vázaného řezání. Například pro soustružení je velikost této síly kolem 25 % řezné síly. Působí ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy, proto výrazně ovlivňuje přesnost obrobené plochy a chvění při obrábění. Může způsobovat ohyb obrobku. Například pro metodu broušení je pasivní síla největší.

Kromě geometrie nástroje má na velikosti a vzájemný poměr složek sil vliv také posuv, tloušťka obráběné vrstvy (hloubka řezu), řezná rychlost, stav otupění břítu, vlastnosti obráběného materiálu a řezné prostředí. Velikost jednotlivých složek síly řezání můžeme vyjádřit empiricky nebo pomocí měrné řezné síly. [2]

### 3.1.1. Empirické vyjádření řezných sil

Platí, že závislost řezné složky síly  $F_c$  na posuvu  $f$  má stoupající tendenci. Závislost řezné složky síly  $F_c$  na tloušťce obráběné vrstvy  $a_p$  má podobný průběh. Platí proto rovnice

$$F_c = C_{F_c} * a_p^{x_{F_c}} * f^{y_{F_c}} \quad [N] \quad (3.3)$$

$$F_f = C_{F_f} * a_p^{x_{F_f}} * f^{y_{F_f}} \quad [N] \quad (3.4)$$

$$F_p = C_{F_p} * a_p^{x_{F_p}} * f^{y_{F_p}} \quad [N] \quad (3.5)$$

Konstanty  $C_{F_c}$ ,  $C_{F_f}$ ,  $C_{F_p}$  jsou pro dané řezné podmínky a metodu obrábění zjištěné empiricky. Pro exponenty  $x_{F_c}$ ,  $x_{F_f}$ ,  $x_{F_p}$ ,  $y_{F_c}$ ,  $y_{F_f}$ ,  $y_{F_p}$  platí totéž. [2, 8]

### 3.1.2. Vyjádření řezných sil pomocí měrné řezné síly

Pro výpočet velikosti měrné řezné síly můžeme využít také výpočet přes měrnou řeznou sílu. Měrná řezná síla je řeznou silou na jednotku plochy řezu. Platí vztah

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{F_c}{b_D * h_D} \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad (3.6)$$

kde  $A_D$  [ $mm^{-2}$ ] je plocha řezu,  $b_D$  [ $mm$ ] je šířka odřezávané vrstvy a  $h_D$  [ $mm$ ] je tloušťka odřezávané vrstvy. Měrná řezná síla se také mění v závislosti na materiálu obrobku, posuvu nebo použité technologii obrábění. Můžeme ji tedy vyjádřit také rovnicemi

$$k_c = C_k * R_m \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad (3.7)$$

$$k_c = \frac{C_{kc}}{f^{u_{kc}}} \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad (3.8)$$

kde  $C_{kc}$ ,  $u_{kc}$  a  $C_k$  jsou konstanty,  $R_m$  je pevnost v tahu [ $N \cdot mm^{-2}$ ]. [2]

## 3.2. Práce

K narušení struktury a následnému odebrání materiálu obrobku je třeba dodávat do obráběcí soustavy energii. Velikost potřebné energie můžeme vyjádřit jako množství práce, které je třeba vykonat. Celkové množství práce potřebné k překonání deformací

obráběného materiálu se skládá z několika složek. Celkovou práci můžeme vyjádřit rovnicí

$$E = E_p + E_e + E_{t\check{c}} + E_{th} + E_d \quad [J] \quad (3.9)$$

kde  $E_p$  je práce potřebná k překonání plastické deformace v odřezávané vrstvě a pod břitem nástroje. Tvoří mezi 50 až 80 % celkové práce  $E$ . Práce potřebná k překonání elastické deformace  $E_e$  je 5–10 % celkové práce  $E$ . K překonání tření třísky na čele nástroje ( $E_{t\check{c}}$ ) a tření hřbetu nástroje po řezné ploše ( $E_{th}$ ) je třeba 20–40 % celkové práce  $E$ . Poslední složkou potřebné práce je práce disperzní  $E_d$ . Jedná se práci potřebnou k vytvoření nových povrchů, ze všech složek je nejmenší. Tvoří ji přibližně 1% celkové práce. [01]

Práci řezného procesu  $E_e$  můžeme vyjádřit také jiným způsobem. Jedná se o součet práce řezání a práce posuvu.

$$E_e = E_c + E_f \quad [J] \quad (3.10)$$

Práce řezání  $E_c$  je práci potřebnou k zajištění hlavního pohybu nezbytného pro odebrání požadovaného množství materiálu obrobku. Velikost potřebné práce řezání můžeme vypočítat z rovnice

$$E_c = \int_0^t F_c v_c dt \quad [J] \quad (3.11)$$

Práce posuvu  $E_f$  je práci potřebnou k zajištění posuvového pohybu nezbytného pro odebrání požadovaného množství materiálu obrobku. Posuvovou práci vyjádříme rovnicí

$$E_f = \int_0^t F_f v_f dt \quad [J] \quad (3.12)$$

### 3.3. Výkon a příkon

Díky znalosti množství vykonané práce jsem schopni zjistit výkon a následně příkon potřebný pro řezný proces. Celkový pracovní výkon  $P_e$  získáme součtem řezného ( $P_c$ ) a posuvového výkonu ( $P_f$ ).



$$P_e = P_c + P_f \quad [W] \quad (3.13)$$

$$P_c = \frac{E_c}{60} = \frac{F_c v_c}{60} \quad [W] \quad (3.14)$$

$$P_f = \frac{E_f}{60} = \frac{F_f v_f}{60} \quad [W] \quad (3.15)$$

Potřebný příkon obráběcího stroje  $P_0$  následně získáme z rovnice

$$P_0 = \frac{P_e}{\eta} \quad [W] \quad (3.16)$$

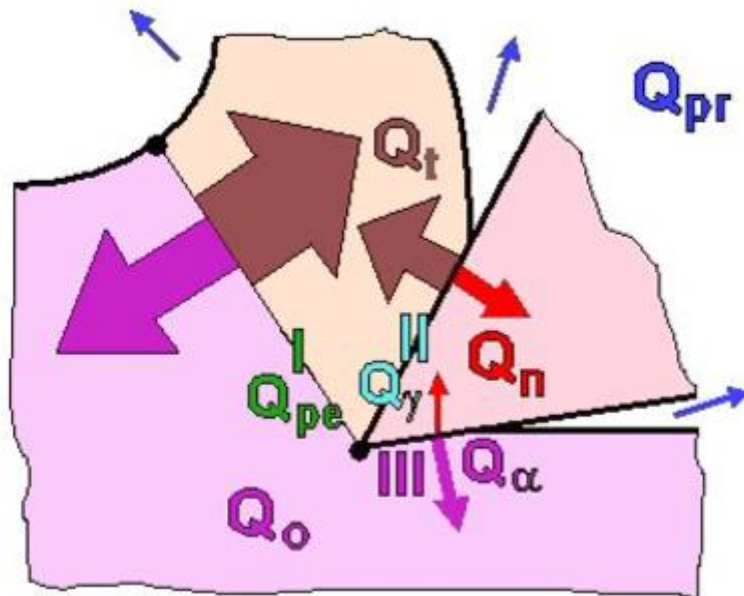
Kromě řezného výkonu  $P_c$  se můžeme setkat ještě s měrným řezným výkonem  $p_c$ . Měrný řezný výkon vyjadřuje nezbytný řezný výkon pro odebrání jednotkového množství obráběného materiálu za jednotku času. [1]

$$p_c = \frac{P_c}{Q} = \frac{P_c}{A_D v_c} \quad [J/mm^3] \quad (3.17)$$

### 3.4. Teplo

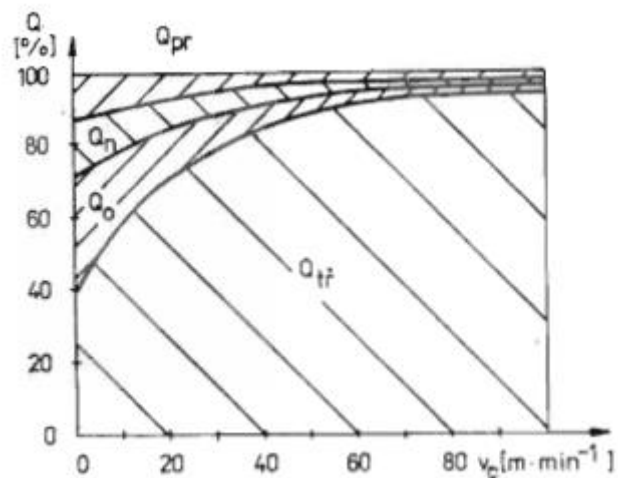
Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících řezný proces je teplo a teplota. Má vliv takřka na všechny obráběcí parametry. Rostoucí teplota ovlivňuje tvorbu třísky, má značný vliv na vlastnosti obráběného materiálu i nástroje. S ohledem na snižující se trvanlivost nástroje je třeba pro pokud možno co nejvýhodnější ekonomické výsledky volit vhodné hodnoty řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu. [3]

Práce řezného procesu při vzniku třísky je doprovázena vznikem tepla. To vzniká transformací mechanické práce, množství takto přeměněného tepla se pohybuje mezi 95 až 98 % mechanické práce. Vzniká v oblastech plastické deformace z několika různých důvodů. V oblasti primární plastické deformace vzniká teplo  $Q_{pe}$  v důsledku plastických a elastických deformací. Množství takto vzniklého tepla je nejvyšší. Teplo  $Q_\gamma$  vzniká v oblasti sekundární plastické deformace v důsledku tření mezi čelem nástroje a třískou. Obdobně vzniká teplo  $Q_\alpha$  v oblasti terciální plastické deformace, kde dochází k tření hlavního hřbetu nástroje o obrobenou plochu obrobku, je proto závislé zejména na velikosti úhlu hřbetu. [1]



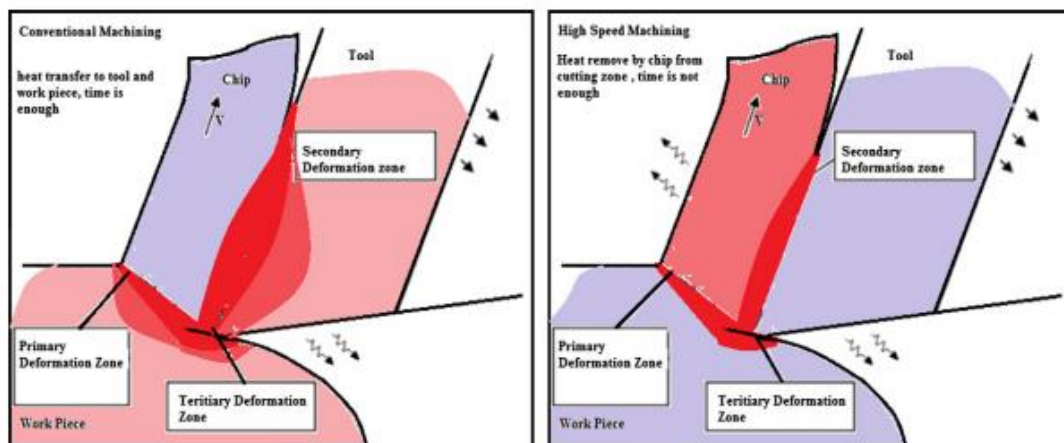
6 Vznik a odvod tepla [1]

Většina vzniklého tepla opouští obráběcí soustavu společně s třískou. Podíl takto vzniklého tepla  $Q_t$  se v závislosti na rostoucí řezné rychlosti ještě zvyšuje. Dále teplo přechází do nástroje ( $Q_n$ ), obrobku ( $Q_o$ ) a prostředí ( $Q_{pr}$ ). [2]



7 Podíl odvodu tepla v závislosti na řezné rychlosti [2]

Na obrázku 8 je ukázán rozdíl mezi zahříváním třísky, obrobku a nástroje během konvenčního a vysokorychlostního obrábění. Při nižších rychlostech je nejvyšší část tepla soustředěna v oblastech styku nástroje a obrobku a v oblastech plastických deformací. Naopak v části obrázku věnované vysokorychlostnímu obrábění je kromě míst styku obrobku a nástroje nejvyšší teplota v třísce. [10]



8 Odvod tepla při konvenčním a vysokorychlostním obrábění [9]

Tepelná bilance je jednou z možností, jak bilancovat energii. Předpoklad, že prostředí musí být v rovnováze nám říká, že množství tepla přivedeného do obráběcí soustavy se musí rovnat množství tepla obráběcí soustavou odevzdaného. Můžeme tedy celkové množství tepla vyjádřit rovnicí

$$Q = Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad [J] \quad (3.18)$$

Množství vzniklého tepla závisí na mnoha faktorech. Při množství tepla, které se přemění z mechanické práce můžeme provést zjednodušení a říci, že vzniklé teplo je rovno řezné práci. Můžeme si tedy vyjádřit množství vznikajícího tepla jako

$$Q = F_c * v_c \quad [J] \quad (3.19)$$

A následně po dosazení vztahů pro řeznou sílu dostaneme

$$Q = C_{F_c} * a_p^{x_{F_c}} * f^{y_{F_c}} * v_c = k_c * A_D * v_c \quad [J] \quad (3.20)$$

Zvyšováním řezné rychlosti se zvyšuje množství tepla. Nejdříve roste rychle, poté se nárůst zpomalí. Hlavním důvodem zpomalení nárůstu je klesající měrný řezný odpor, tím klesá i teplota v oblasti první plastické deformace. Naopak narůstá množství práce a tření na čele nástroje. Vzhledem k tomu, že exponenty  $x_{F_c}$  a  $y_{F_c}$  zpravidla bývají menší než 1, je množství tepla vzniklého zvyšováním posuvu a hloubky řezu menší než při zvyšování rychlosti. [1, 2]

## 4. Podmínky ovlivňující energetickou náročnost

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, množství energie potřebné k řeznému procesu je závislé na velikosti řezných sil a řezné rychlosti. Existuje však mnoho možností, jak ovlivnit nejen tyto parametry, ale také celkové množství potřebné energie. Správná volba řezných podmínek a obráběného materiálu nám může ušetřit nejen značné množství požadované energie, ale v konečném důsledku také úsporu finančních prostředků.

### 4.1. Vliv obráběného materiálu

Mezi parametry, které většinou při obrábění změnit nemůžeme patří volba obráběného materiálu. Z kapitoly o řezných silách je patrné, že obráběný materiál patří mezi důležité faktory pro výpočet měrné řezné síly  $k_c$ , a tím tedy také k celkovému množství řezné síly.

Souhrn vlastností popisujících vhodnost materiálu ke zpracování pomocí třískové obrábění nazýváme obrobiteľností. Velice výrazně ovlivňuje nastavení řezných podmínek u všech metod třískového obrábění. Obrobiteľnost se skládá zejména z

- Mikrostruktury materiálu
- Velikosti zrna
- Tepelného zpracování
- Chemických vlastností
- Fyzikálních vlastností
- Způsobu výroby
- Tvrdosti
- Geometrii nástroje a druhu nástrojového materiálu

Vlastností patřících do obrobiteľnosti je mnoho a nedá se objektivně určit, který materiál je nejlepší. Proto se obrobiteľnost materiálu určuje převážně jen v porovnání s jinými druhy materiálů. Důležité je, že při porovnávání materiálů může dojít, jen pokud porovnávám materiály obráběné stejným nástrojem za stejných podmínek. Kritérium, podle kterého materiály porovnávám si můžu zvolit, může jím tak být třeba teplota řezání nebo velikost řezné rychlosti při zvolené trvanlivost. [1]

Z hlediska obrobiteľnosti jsou materiály rozděleny do několika skupin. V každé skupině je jeden z materiálů zvolen jako etalon obrobiteľnosti. Vůči tomuto materiálu jsou

následně ostatní materiály porovnávány indexem obrobiteľnosti. V rovnici se porovnává řezná rychlost obrábění materiálu při trvanlivosti nástroje 15 minut s řeznou rychlostí při obrábění etalonu za stejné trvanlivosti.

$$i_o = \frac{v_{c15}}{v_{c15 \text{ etalonu}}} \quad [-] \quad (4.1)$$

Tabulka 1 Rozdělení materiálů dle obrobiteľnosti

Označení skupiny	Materiály skupiny
a	litiny
b	oceli
c	těžké neželezné kovy
d	lehké neželezné kovy
e	elastické hmoty
f	přírodní nerostné hmoty
g	vrstvené hmoty
h	pryže
v	tvrzené litiny

Mikrostruktura materiálu značí strukturu krystalů a zrn. Kovy s podobnou mikrostrukturou budou mít podobné vlastnosti z hlediska obrobiteľnosti. Velikost a struktura zrn mají značný efekt na výslednou obrobiteľnost. Kovy s malými zrny a nezdeformovanou strukturou se zpravidla nechají snadno řezat, jsou však velice poddajné. Potřebné množství energie je nižší než u kovů s velkými zrny. Tvrdost kovu souvisí s velikostí zrn a obecně se užívá jako ukazatel obrobiteľnosti. Samotná struktura je pak závislá na způsobu zpracování kovu. [11]

K dosažení požadovaných vlastností často dochází k sérii ohřívání a chlazení materiálu. Tyto tepelné zpracování mohou mít za důsledek snížení křehkosti, odstranění napětí nebo dosažení vyšší pevnosti. Dochází ke změně struktury materiálu a tím se také mění množství energie potřebné pro řezný proces. Vliv tepelného zpracování je závislý na zvoleném materiálu, protože například žhání tvrdých ocelí obrobiteľnost zlepšuje, tak měkkých ocelí naopak zhoršuje.

Největší vliv na obrobiteľnosť má chemické složení materiálu. S rostoucím podílem uhlíku se zvyšuje opotřebení otěrem, malý podíl naopak zvyšuje opotřebení adhezní. To má za následek především tvorbu nárůstku. Kromě uhlíku mají značný vliv na obrobiteľnosť také legující prvky. Tyto prvky mohou mít pozitivní i negativní vliv. [11]

Mezi legující prvky zvyšující opotřebení otěrem patří převážně karbidotvorné prvky jako chrom, molybden, wolfram nebo titan. Kromě karbidotvorných prvků zvyšují opotřebení otěrem také fosfor a dusík, které snižují houževnatost materiálu. Kromě toho se titan, spolu s vanadem a hliníkem používá jako přísada při očkování ocelí. Tím dochází ke zjemňování zrn a oceli se stávají houževnatější a obrobiteľnosť se stává obtížnější. Kyslík vytváří nekovové směsky a abrasivní vměstky, které obrobiteľnosť zvyšují.

Naopak mezi prospěšné legující prvky patří olovo, síra nebo mangan. Olovo díky své nízké teplotě tavení snižuje tření mezi třískou a nástrojem, navíc zlepšuje dělení třísky. Mangan a vápník tvoří spolu se sírou měkké sulfidy zlepšující obrobiteľnosť a dělení třísek. Tyto vlastnosti jsou způsobeny převážně sírou, u které mají už velmi malé podíly ve složení materiálu velký vliv na obrobiteľnosť. [12]

#### 4.2. Řezné prostředí

Obrábění se vždy bude odehrávat v určitém řezném prostředí. Historicky se obrábělo jen v prostředí tvořeném vzduchem. Postupným vývojem a modernizací dovolovaly stroje zvyšovat řezné rychlosti. V tu chvíli se objevil problém, protože s rychlostí se zvyšovaly také teploty. Ty měly neblahý vliv zejména na řezné nástroje, protože s rostoucí teplotou ztrácela nástrojová ocel své vlastnosti. Kromě vývoje nových materiálů se problém s vysokou teplotou začal řešit také chlazením pomocí kapalin.

První studii o použití řezných kapalin publikoval W. H. Northcott roku 1868 ve své knize „A treatise on lathes and turning“. V roce 1906 ukázal F. W. Taylor, že použitím roztoku uhličitanu sodného a vody dokáže zvýšit řeznou rychlost o 30 – 40 %. To vedlo k rozšíření řezných kapalin a jejich následnému vývoji. [13]

Hlavním účelem používání řezných kapalin je snížení řezné teploty odvodem tepla, redukce tření mezi nástrojem a obrobkem, prodloužení životnosti nástroje, zvýšení účinnosti a zlepšení kvality povrchu. Z hlediska energetické náročnosti jsou nejdůležitější aspekty snížení teploty a redukce tření. Zatímco snížení teploty nám dovolí zvýšit

rychlost a tím také potřebu energie, tak snížení tření naopak množství potřebné energie snižuje.

Schopnost odvádění tepla z místa řezu nazýváme chladícím účinkem. Tuto schopnost má každé médium, které smáčí povrch obráběného materiálu a nástroje, pokud je mezi nimi tepelný rozdíl. Odvod tepla je realizován tím, že řezné médium obklopuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá část vzniklého tepla.

Z hlediska energetické náročnosti je důležitější účinek mazací. Médium vytváří na povrchu obrobku a nástroje vrstvu bránící jejich přímému styku a tím snižuje tření a řezné síly. Kromě toho zlepšuje finální vlastnosti obrobene plochy. Má-li řezné médium vysokou afinitu ke kovu, může dojít ke vzniku mezního tření. Se zvyšující se řeznou rychlostí postupně ztrácí svoji účinnost, protože pohyb třísek zabraňuje médiu dosáhnoutí rozhraní mezi nástrojem a obrobkem. Vysoké teploty navíc mohou způsobovat i vypaření média dřív, než stihne působit. Nelze však říci, že média s mazacím účinkem nemají účinek chladící. Díky menšímu tření totiž vzniká méně tepla. [1]

Řezné kapaliny dělíme do 3 základních kategorií podle převažujícího účinku. Kapaliny na bázi olejů mají výrazný mazací účinek, voda a vodní roztoky mají převažující chladící účinek. Kompromisem mezi chladícím a mazacím účinkem jsou emulze, které tvoří až 80 % objemu používaných řezných kapalin. [1]

Kromě řezných kapalin se jako řezné prostředí může použít také prostředí plynné. Běžně se však plyny nepoužívají, protože mají relativně nízký chladící účinek a žádný mazací účinek. Jedním ze způsobů chlazení plynem je chlazení stlačeným oxidem uhličitým. Tento způsob obrábění je vhodný pro těžkoobrobitelné materiály, hlavní nevýhodou jsou ale vysoké náklady. Navíc musí docházet k dokonalému odsávání plynu a větrání na pracovišti.

Zvláštním způsobem je pak použití vzduchu jako plynného prostředí. Mluvíme pak o tzv. suchém obrábění. Některé studie prokázaly, že při vysokorychlostním obrábění se dá použitím suchého obrábění snížit celkové množství potřebné energie o 12 %. [14]

#### 4.3. Nástroje

V současné době existuje velké množství rozdílných obráběcích nástrojů. Pro každý ze způsobů obrábění existují speciální nástroje. Pro vrtání nebudu používat

soustružnický nůž nebo protahovací trn, ale vrták. I nástroje patřící do stejné skupiny, například soustružnické nože, se budou v mnohém lišit.

Konstrukcí se od sebe liší nástroje monolitní nebo s břitovými destičkami. Také nástroje s břitovými destičkami se od sebe budou lišit. Existují různé způsoby upínání, případně nutností podložky. Může navíc mít seřizovací prvky pro zajištění přesnějšího obrábění. Samotné vyměnitelné břitové destičky se liší tvarem, úhlem hřbetu, přesností nebo rozměry.

Materiál ze kterého je nástroj vyroben ovlivní, jaké řezné rychlosti mohou být během obrábění použity. Je to dáno zejména díky zvyšující teplotě. Pokud teplota přesáhne určitou hodnotu, tak materiál nástroje ztrácí své vlastnosti. Navíc ne všechny nástrojové materiály jsou vhodné k obrábění každého materiálu. Diamanty jsou afinní vůči železu, navíc oxidují už kolem teploty 700°C. Řezná keramika vyžaduje podložku, navíc na ní nelze vyrobit utvařecí třísky. Proto je vhodná k obrábění materiálů tvořící krátkou třísku. Vlastnosti obráběcích materiálů lze vylepšit povlakováním.

Dalším parametrem, kterým se jednotlivé obráběcí nástroje odlišují, je počet břitů. Existují nástroje jednobřité. Typickým představitelem jsou soustružnické nože. Pokud má nástroj více zubů, tak se jedná o nástroje vícebřité. Patří mezi ně pilové pásy nebo osově nástroje. Ne všechny osově nástroje ale musí být vícebřité. Dělové vrtáky nebo monolitní frézy, většinou hodně malých rozměrů, mají břit jen jeden. Výsledná hodnota řezných sil se u vícebřitých nástrojů rovná součtu sil všech působících zubů.

#### 4.3.1. Nástrojová geometrie

Asi nejdůležitějším parametrem nástrojů je nástrojová geometrie. Ovlivňuje velikosti a poměry mezi pasivní a řeznou silou, výslednou teplotu řezání. Kromě toho má také vliv na vlastnosti obrobeneé plochy a strukturu jejího povrchu. Volba geometrie závisí převážně na vlastnostech obráběného materiálu a řezných podmínkách. [3]

Z hlediska energetické náročnosti má velký vliv úhel nastavení ostří  $\kappa_r$ . Kromě tvaru třísky ovlivňuje vzájemný poměr mezi složkami řezné síly. Běžně se používá ve velikostech 45° – 90°, u některých typů soustružnických nožů se může objevit až hodnota 98°.

Dalším úhlem ovlivňujícím energetickou náročnost je ortogonální úhel čela  $\gamma_0$ . Ten ovlivňuje kromě mechanismu tvoření třísky také její odchod z místa řezu. Čím menší



úhel  $\gamma_0$  je, tím více dochází k přechování třísky a dochází ke zvětšení potřebné síly. Běžně se používají hodnoty v rozsahu  $-8^\circ$ -  $+8^\circ$ , extrémní hodnoty mohou být ale větší. Pro materiály s pevností v tahu  $R_m$  větší než  $850 \text{ MPa}$  se volí záporná velikost úhlu, pro méně pevné se volí kladné.

Úhel hřbetu  $\alpha_0$  ovlivňuje tření na hřbetě nástroje. Poslední částí nástroje ovlivňující velikost sil je poloměr zaoblení špičky  $r_\epsilon$ . Čím větší je hodnota zaoblení, tím víc se zvětší pasivní síla  $F_p$ . Zároveň zvyšuje trvanlivost nástroje a ovlivňuje výslednou strukturu obráběné plochy. [1]

## 5. Monitorování řezného procesu

Během výroby je vhodné optimalizovat řezné podmínky. Optimalizace nám pomůže prodloužit trvanlivost nástroje, zlepšit konečnou kvalitu obrobené plochy. Jsme také schopni vyrábět delší dobu a levněji. Pro správnou optimalizaci je třeba průběžně monitorovat obráběcí proces.



9 Dílčí subsystémy monitorování [15]

Je mnoho věcí, které můžeme monitorovat. Základní věcí je monitorování opotřebení a lomu břitu. Dále můžeme monitorovat házení nebo chvění. Z hlediska energetické náročnosti je pro nás nejdůležitější monitoring výkonu a řezných sil. Měření může být přímé nebo nepřímé. [15]

### 5.1. Metoda přímého měření

Monitorování přímou metodou spočívá v měření silových složek řezání a točivých momentů pomocí připojení měřících zařízení, dynamometru, do systému obrábění. Základním požadavkem na dynamometr je, aby dokázal naměřit veličiny nezávisle na vlastnostech stroje v záběru. Pro zaručení reprodukovatelnosti je také třeba, aby dokázal dynamometr sledovanou veličinu naměřit s co nejvyšší přesností a stálostí měření.

Dynamometry se skládají ze 3 složek. Pružný člen přebírá vznikající vnější zatížení a překonává změny vyvolané deformací a změnou polohy. Mechanickou změnu pružného členu mění na analogovou hodnotu snímač. Signál ze snímače zesiluje a zpracovává přijímač, který také zapisuje naměřené hodnoty. [16]

### 5.1.1. Rozdělení dynamometrů

Stejně tak jako se dělí do několika skupin obrábění a řezný proces, tak můžeme rozdělit také dynamometry. Existuje několik různých druhů dynamometrů, které se od sebe liší. Rozdělení dynamometrů můžeme provést do následujících skupin.

Jedním z možných rozdělení je podle počtu měřených složek. Jedná se o dynamometry jednosložkové, dvousložkové a třísložkové. Zároveň do této skupiny patří také dynamometry pro měření kroutících momentů.

Dynamometry můžeme rozdělit také podle technologie, při které se používá. Jedná se o dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání nebo broušení. Případně také existují dynamometry univerzální.

Poslední rozdělení je podle způsobu přenosu síly působící z deformačního členu na člen signalizační. Dle tohoto rozdělení dělíme dynamometry na mechanické, hydraulické, pneumatické nebo elektrické. Elektrické se ještě dají rozdělit na systémy parametrické a generátorové.

Mechanické dynamometry fungují na principu přenášené síly mechanickým převodem na měřicí prvek. Velikost síly se určuje z deformace pružin, třmenů nebo vtlačováním kuličky do materiálu. Hlavním představitelem jsou třmenové dynamometry, které jsou schopny naměřit zatížení až do 10 000 N. Mezi největší přednosti patří jednoduchost a spolehlivost, mezi nevýhody patří závislost na teplotě. Kvůli velké setrvačnosti systémů se nedají použít na dynamická měření.

Hydraulické dynamometry přenáší účinky působící síly nebo momentu na píst. Pohyb pístu způsobí změnu tlaku v kapalině, která se následně odečte. Díky nízké citlivosti a požadavkům na dokonalé utěsnění se dnes moc nepoužívají.

Principem pneumatického dynamometru je měření změny tlaku nebo průtoku vzduchu v závislosti na změně průřezu trysky a klapky. Mají vysokou spolehlivost a citlivost, další výhodou jsou relativně nízké náklady na provoz.

Nejrozšířenější a nejvíce používané dynamometry jsou elektrické. Ty se rozdělují dle způsobu elektrické transformace na systémy parametrické a generátorové. Parametrické systémy jsou založeny na změně indukčnosti, kapacity nebo odporu. Generátorové pracují se vznikem napětí nebo proudu při deformaci jednotlivých elementů. Podstatou vzniku proudu nebo napětí může být mimo jiné piezoelektrický jev,

právě moderní piezoelektrické dynamometry jsou dnes velice často používány. Mezi největší výhody elektrických dynamometrů patří snadný přenos signálu, možnost odebírat signál rotujících a pohybujících se částí nebo čistota. [16]

## 5.2. Metoda nepřímého měření

Monitorování pomocí nepřímé metody je založeno na zjištění řezných sil z reakcí stroje během obrábění, převážně z množství odebíraného výkonu. Zjištění řezné síly se dá určit kromě monitorování výkonu také měřením kroutícího momentu.

Nepřímá metoda je velice jednoduchá a není potřebná žádná drahá měřicí technika jako jsou dynamometry. Dá se navíc použít pro libovolný způsob obrábění. Nevýhodou je, že je schopná měřit jen s omezenou přesností. Ta je způsobená měnící se účinností při běhu stroje naprázdno a při zatížení. Pomocí nepřímé metody lze určit jen tangenciální řeznou sílu, ostatní složky zanedbává.

Určení tangenciální řezné síly vychází z množství odebíraného užitého výkonu a dá se vyjádřit rovnicí

$$P_{už} = F_c * v_c \quad [W] \quad (5.1)$$

kde  $P_{už}$  je užitečný výkon ve Wattech,  $F_c$  je tangenciální řezná síla v Newtonech a  $v_c$  je řezná rychlost v metrech za sekundu.

Pro určení užitého výkonu je třeba nejprve změřit výkon při běhu stroje naprázdno  $P_o$ , poté určení celkového výkonu stroje při obrábění  $P_c$ . Výsledný užitečný výkon poté vypočítáme z rovnice

$$P_{už} = P_c - P_o \quad [W] \quad (5.2)$$

Z těchto rovnic si následně můžeme vyjádřit velikost tangenciální řezné síly rovnicí

$$F_c = \frac{P_c - P_o}{v_c} \quad [N] \quad (5.3)$$

Při vrtání můžeme pro určení tangenciální řezné síly také pomocí kroutícího momentu. Tato metoda spočívá změření výkonu při vrtání. Následně se vysune vrták ze záběru a dosáhne se stejných otáček i mimo záběr. Při dosažení požadovaných otáček se

začne vrták mechanicky brzdit až dosáhne měřící přístroj stejné hodnoty jako při obrábění. Z podmínky rovnováhy plyne rovnice

$$M_k = \frac{F_c * D}{2} = M_{kb} \text{ [N.m]} \quad (5.4)$$

Kde  $D$  je průměr nástroje,  $M_k$  je točivý moment tangenciální složky síly a  $M_{kb}$  je točivý moment vyvolaný mechanickou brzdou.

Výhodou měření podle točivého momentu je, že výsledek není ovlivňován rozdílnou účinností stroje při běhu naprázdno a při zatížení. Výsledek naopak ovlivňuje rozdílné tření při brždění. [16]

## 6. Experimentální část

Mezi metody obrábění používané nejdélejší dobu patří broušení. Už v pravěku se lidé pokoušeli brousit primitivními technikami kamení pro hroty svých zbraní a pracovních nástrojů. S postupem času docházelo k vývoji této metody až do podoby, kterou známe dnes. [21]

Broušení patří mezi abrazivní metody obrábění. Tato dokončovací metoda je charakteristická nedefinovanou nástrojovou geometrií a nepravidelným úběrem. Právě nedefinovaná nástrojová geometrie je důvodem, proč se energetická náročnost broušení těžce určuje početně. Existuje navíc velké množství podmínek, v podobě různých brusných kotoučů nebo obráběných materiálů, které značně ovlivňují množství potřebné energie. Z toho důvodu je třeba pro získání informací provádět experimentální měření.

Experimentální část této práce se zaměřuje na získání dat o řezných silách a potřebném příkonu při broušení za rozdílných řezných podmínek. Následně se naměřené hodnoty zpracují podle požadované řezné síly a podle potřebného příkonu stroje.

### 6.1. Návrh experimentu

Experiment probíhal broušením materiálu Inconel 713 LC. Zaznamenávání hodnot probíhalo přímou metodou monitorování, kdy se při broušení měřily hodnoty řezné síly a příkonu pomocí dynamometru Kistler 9265B. Hodnoty se zaznamenávaly do počítače pomocí softwaru DynoWare.



*10 Polotovar upnutý v dynamometru*

Během měření se pracovalo s různými reznými podmínkami. Změna rezných podmínek byla vyjádřena pomocí upravování posuvové rychlosti a tloušťky třísky. Po celou dobu se pracovalo s konstantním počtem otáček  $n = 2700 \text{ ot/min}$ . Velikost rezné rychlosti  $v_c$  se rovná 30 m/s.

Bylo provedeno měření pro hloubky třísky  $a_e$  od 0,01 mm do 0,7 mm a posuvy  $f$  od 100 mm/min do 1600 mm/min. Vzhledem k energetické náročnosti však nebyly naměřeny všechny možné kombinace. Pro malou hloubku řezu byly zvoleny vysoké hodnoty posuvů, naopak pro nejvyšší měřenou tloušťku třísky ( $a_p = 0,7 \text{ mm}$ ) byly použity jen posuvy  $f$  v rozmezí od 100 do 300 mm/min. Plán měření je zobrazen v tabulce 2.

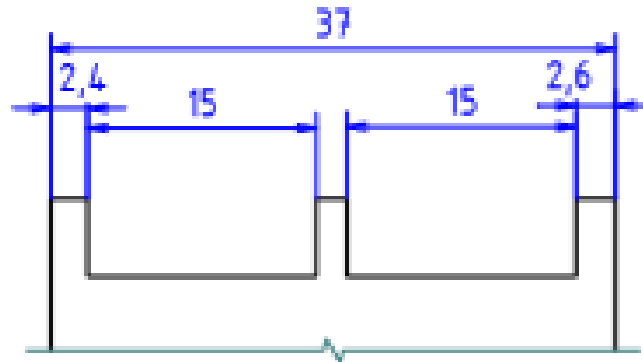
Tabulka 2 Plán experimentu

Plán experimentu								
	$v_f \text{ [mm/min]}$							
$a_e \text{ [mm]}$	/	100	200	300	400	800	1200	1600
0,01	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓
0,02	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓
0,03	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓
0,05	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓
0,1	-	-	-	-	✓	✓	-	-
0,2	-	-	-	✓	✓	-	-	-
0,3	-	-	-	✓	✓	-	-	-
0,7	✓	✓	✓	-	-	-	-	-

## 6.2. Popis měření

Měření probíhalo broušením ve 2 drážkách, převážně z důvodu šetření času a brusného kotouče. Šířka drážky byla 15 mm, měření v extrémních podmínkách za vysoké tloušťky třísky však probíhalo na okrajích obráběného materiálu, případně v místě mezi drážkami. To hlavně z důvodu vysokých sil a šetření kotouče. Z důvodu nestejných šířek obrábění je tedy nutné pro vyhodnocení přepočítat výsledné rezné síly a příkon na stejné

množství materiálu pomocí měrných jednotek, tj. měrné řezné síly a měrného řezného příkonu.

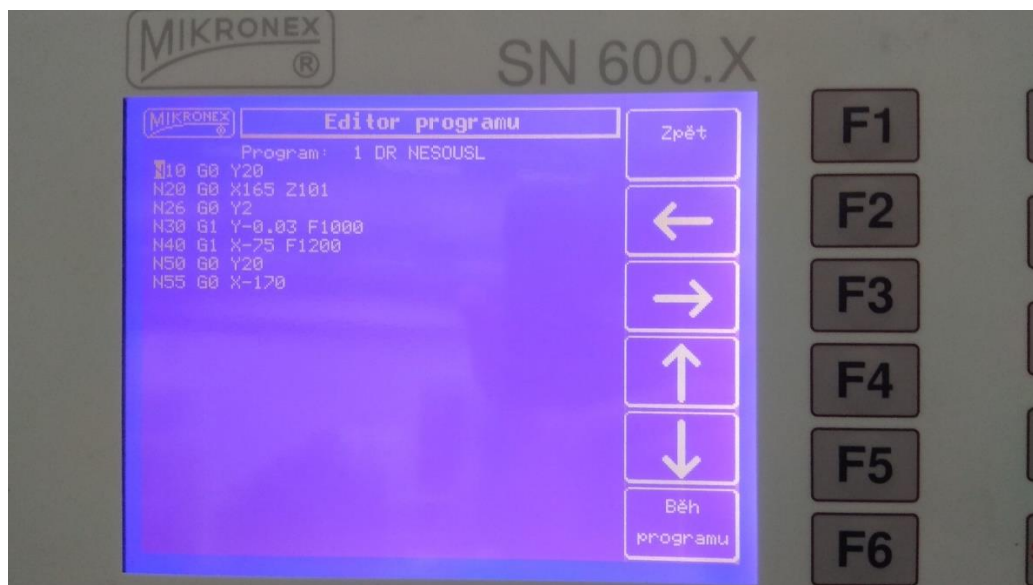


11 Schématické zobrazení umístění drážek

Měření probíhalo v opakujícím se cyklu skládajícím se z následujících operací

- Zarovnání obráběné plochy
- Orovnání kotouče
- Broušení drážky #1
- Orovnání kotouče
- Broušení drážky #2
- Orovnání kotouče
- Zarovnání plochy





12 Ukázka použitého NC kódu

### 6.3. Pracoviště

Celý experiment byl proveden pomocí brusky Mikronex BRH 20 CNC, brusného kotouče Tyrolit Strato Ultra 240x15x51 SU33A 702GG11V B1/40 a dynamometru Kistler 9265B. Obráběným materiálem byl Inconel 713 LC.



13 Zařízení na pracovišti

Bruska Mikronex BRH 20 CNC je číslicově řízenou bruskou určenou pro rovinné broušení obvodem nebo bokem brousícího kotouče. Omezujícím faktorem pro obrábění touto bruskou je maximální výkon hlavního motoru 2,2 kW. [17]



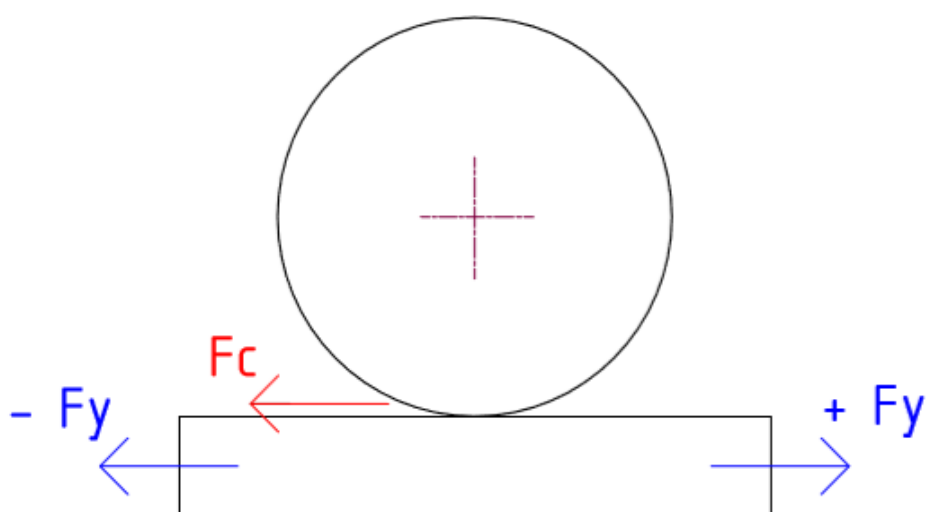
14 Ovládací panel brusky

Brusný kotouč Strato ultra od firmy Tyrolit je brusným kotoučem s keramickým pojivem určeným na rovinné a hloubkové broušení. Jedná se o kotouč používaný především v oblasti broušení turbín. Mezi výhody tohoto kotouče patří prodloužená trvanlivost díky optimalizované velikosti zrn a speciální spojovací matici. Složení kotouče také zvyšuje schopnost přijímat chladicí kapalinu a lépe tak odvádět teplo. Díky těmto vlastnostem udává výrobce, že se dá brousit až do rychlosti 63 m/s. Tato rychlost vede ke snížení potřebného strojního času. [18]



15 Brusný kotouč Strato Ultra

Dynamometr KISTLER 9265B je piezoelektrický dynamometr vhodný zejména pro soustružení a frézování. Jedná se o dynamometr s rozsahem až do 30 kN pro měření pasivní síly a s rozsahem  $\pm 15$  kN pro měření síly řezné. Dynamometr byl zapojen do zesilovače napětí a propojen kabelem s notebookem. V notebooku zaznamenával data software DynoWare. Souřadný systém dynamometru měl opačnou orientaci, než byla orientace obrábění, proto vychází naměřené hodnoty řezné síly záporně. Souřadný systém dynamometru a broušení je schematicky zobrazen na obrázku 16. [19]



16 Souřadný systém dynamometru

Obráběný materiál Inconel 713 LC patří mezi niklové superslitiny. Slitina je tvořena převážně niklem, který tvoří více než 75 % složení, mezi významné legující prvky patří chrom (9,3 %), hliník (6,5 %) a molybden (4,7 %). Tento materiál disponuje vysokou tepelnou odolností, odolností vůči únavovému poškození materiálu nebo odolností vůči účinkům spalin. Všechny tyto vlastnosti materiál Inconel 713 LC předurčují k použití v leteckém průmyslu jako materiál, ze kterého se vyrábí lopatky proudových motorů. [20]



17 Měřící zařízení

#### 6.4. Ekvivalentní hloubka třísky

Vzhledem k vlastnostem brusného kotouče, kdy dochází k uvolňování zrn a není pevně daná geometrie nástroje, mají obecně dané vztahy platící pro obrábění omezenou platnost. Z toho důvodu se pro výpočty týkající se broušení používá ekvivalentní tloušťka broušení  $h_{eq}$ . [21]

Jedná se o teoretickou hodnotu vycházející z nutné kontinuity materiálu, kdy materiál vstupující do oblasti řezání z ní musí na druhé straně také vystupovat. Materiál o tloušťce odebíraného materiálu  $a_e$  vstupuje do řezání rychlostí posuvu a brousící prostor opouští formou třísky. Vytvořené třísky pak můžeme spojit v teoretickou vrstvu

materiálu označenou jako ekvivalentní tloušťka třísky  $h_{eq}$ , která opouští prostor broušení rychlostí brusného kotouče  $v_c$ . Tuto materiálovou bilanci můžeme vyjádřit rovnicí

$$v_f * a_e = v_c * h_{eq} \quad (6.1)$$

Vzhledem k rozdílným jednotkám rychlostí, kdy řezná rychlost se udává v m/s a posuvová rychlost v mm/min je třeba ještě provést úpravu převedením na stejné jednotky. Výslednou hodnotu ekvivalentní třísky pak vypočítáme rovnicí

$$h_{eq} = \frac{v_f}{60 * v_c} * a_e \quad [\mu m] \quad (6.2)$$

Hodnoty ekvivalentních tlouštěk broušení pro zadaný plán jsou zobrazeny v tabulce číslo 3.

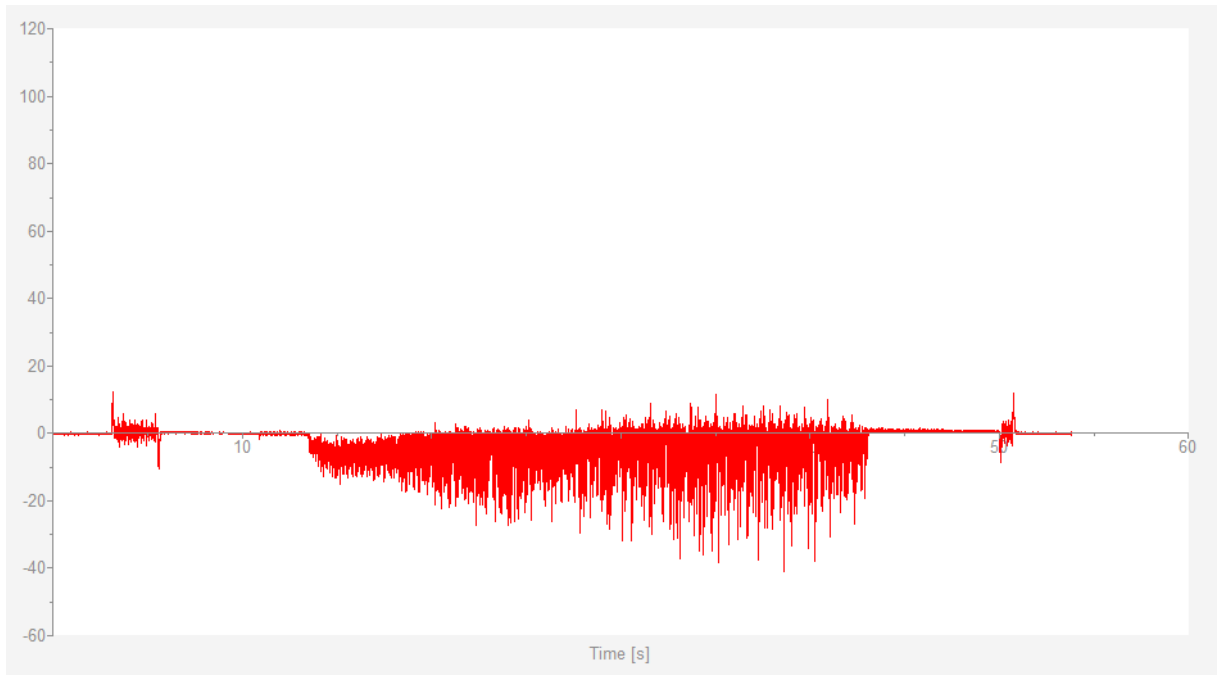
Tabulka 3 Ekvivalentní hloubka třísky

Ekvivalentní hloubka třísky $h_{eq}$ [ $\mu m$ ]								
$a_e$ [mm]	$v_f$ [mm/min]							
	/	100	200	300	400	800	1200	1600
<b>0,01</b>	-	-	-	0,002	0,004	0,007	0,009	
<b>0,02</b>	-	-	-	0,004	0,009	0,013	0,018	
<b>0,03</b>	-	-	-	0,007	0,013	0,020	0,027	
<b>0,05</b>	-	-	-	0,011	0,022	0,033	0,044	
<b>0,1</b>	-	-	-	-	0,044	0,067	-	
<b>0,2</b>	-	-	-	0,044	0,089	-	-	
<b>0,3</b>	-	-	-	0,067	0,133	-	-	
<b>0,7</b>	0,039	0,078	0,117	-	-	-	-	

Je třeba si ale uvědomit, že hodnoty vycházející z tabulky platí ve chvíli, kdy je řezná rychlost pro všechny měření stejná. Ve skutečném broušení dochází k postupnému zmenšování brusného kotouče vlivem vylamování zrn a tím řezná rychlost klesá.

## 7. Řezné síly

Naměření hodnot probíhalo podle popisu experimentu, kdy se hodnoty použité řezné síly získali pomocí dynamometru a jejich průběh se zaznamenal a uložil pomocí programu DynoWare. Naměřené hodnoty jsou záporné díky souřadnému systému dynamometru, který měl opačnou orientaci než směr broušení.



*18 Ukázka výstupu měření řezných sil z programu DynoWare*

Velikost naměřených hodnot jsem získal prací v softwaru DynoWare. Je třeba si uvědomit, že vzhledem k měnící se geometrii zabírajícího kotouče a působením dynamických účinků sil není velikost řezné síly konstantní, ale velice kolísá. Z toho důvodu jsem pro zpracování hodnot používal průměrnou hodnotu za krátký časový okamžik.



19 Kolísání velikosti řezných sil

Pomocí funkce *Statistics* se nejprve zjistila velikost průměrné působící síly před začátkem obrábění. Velikost této síly by měla být nulová, ale použitý dynamometr vykazoval určitou chybu a naměřená velikost síly se pohybovala v řádu desetin Newtonu.

Následně se stejnou funkcí zjistila hodnota průměrné řezné síly na počátku obrábění a velikost průměrné řezné síly na konci záběru. Pro velikost skutečné síly se následně od těchto hodnot odečetla velikost síly na prázdko a výsledná velikost se získala zprůměrováním hodnot na počátku a na konci záběru brusného kotouče. Výsledné hodnoty, převedené na kladná čísla, jsou zobrazeny v tabulce 4.

Tabulka 4 Velikost průměrných řezných sil

Řezná síla $F_c$ [N]								
		$v_f$ [mm/min]						
$a_e$ [mm]	/	100	200	300	400	800	1200	1600
	<b>0,01</b>	-	-	-	2,26	3,67	2,18	3,02
	<b>0,02</b>	-	-	-	0,56	1,69	3,27	3,55
	<b>0,03</b>	-	-	-	4,40	3,05	3,80	2,96
	<b>0,05</b>	-	-	-	4,09	6,54	4,53	6,03
	<b>0,1</b>	-	-	-	-	11,04	12,48	-
	<b>0,2</b>	-	-	-	17,37	22,95	-	-
	<b>0,3</b>	-	-	-	16,39	26,80	-	-
	<b>0,7</b>	12,28	15,31	19,08	-	-	-	-

Vzhledem k rozdílné šířce záběru je třeba naměřené hodnoty zpracovat. Pro porovnání se nejlépe hodí převést na měrnou řeznou sílu  $k_c$ . Ta nám značí množství síly působící na jednotku plochy řezu. Pro broušení získáme velikost měrné řezné síly ze vztahu

$$k_c = \frac{F_c}{b \cdot a_e} \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad (7.1)$$

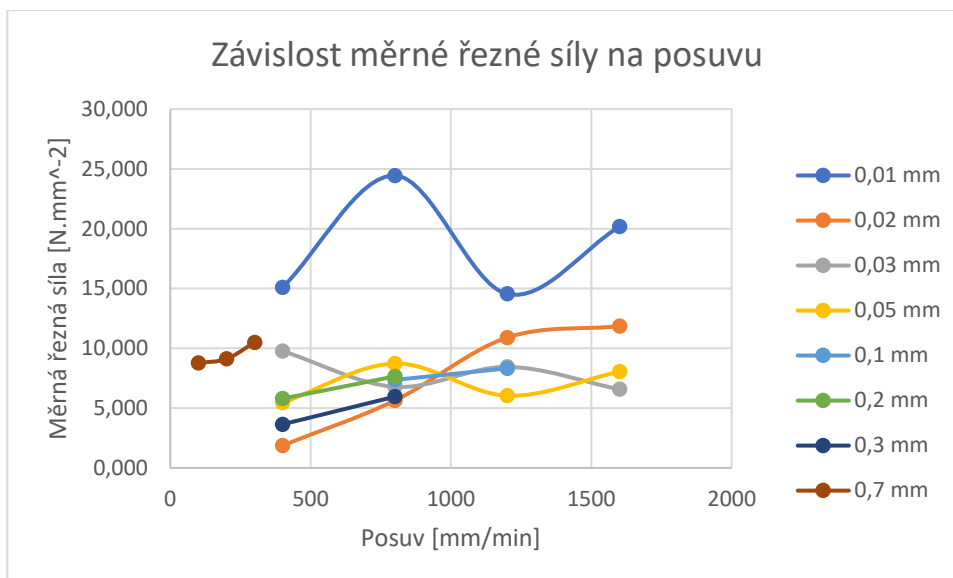
Dopočítané množství měrné řezné síly je zobrazeno v tabulce 5.

Tabulka 5 Dopočítaná měrná řezná síla

Měrná řezná síla $k_c$ [N. mm <sup>-2</sup> ]								
$a_e$ [mm]	$v_f$ [mm/min]							
	/	100	200	300	400	800	1200	1600
0,01	-	-	-	15,083	24,440	14,547	20,162	
0,02	-	-	-	1,874	5,630	10,897	11,847	
0,03	-	-	-	9,773	6,782	8,449	6,573	
0,05	-	-	-	5,457	8,725	6,039	8,044	
0,1	-	-	-	-	7,358	8,320	-	-
0,2	-	-	-	5,791	7,651	-	-	-
0,3	-	-	-	3,643	5,956	-	-	-
0,7	8,769	9,110	10,483	-	-	-	-	-

Z tabulky je vidět, že největší množství měrné řezné síly bylo dosaženo při obrábění o tloušťce třísky 0,01 mm. Nejmenší měrné řezné síly byla zjištěny při zvoleném posuvu  $v_f = 400 \text{ mm/min}$ . Pro lepší názornost průběhu měrné řezné síly ukazuje obrázek 20 závislost měrné řezné síly na posuvu.

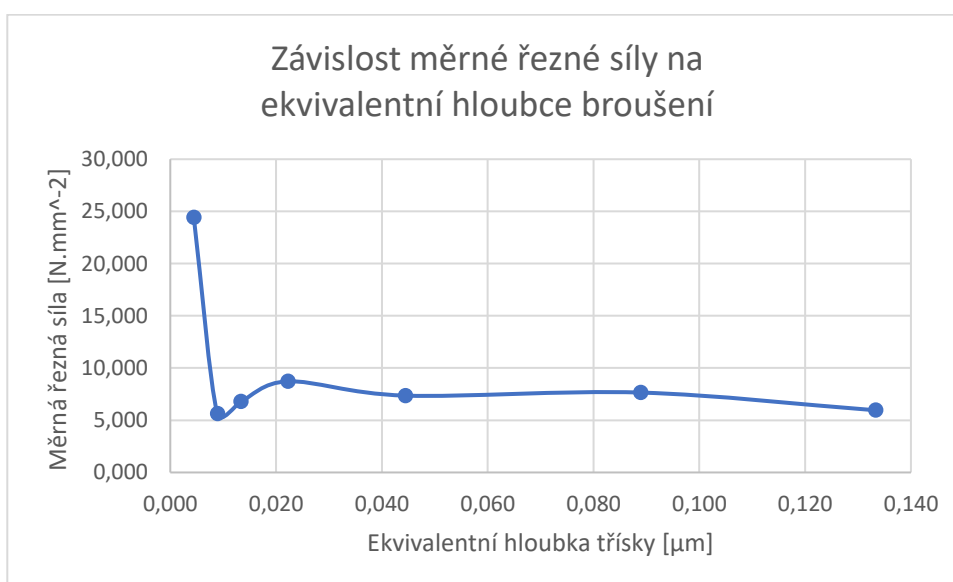




20 Závislost měrné řezné síly na posuvu

Přestože hodnoty naměřené zejména u malých hloubek řezu značně kolísají, dal by se vypořádat určitý trend. S rostoucí hodnotou posuvu za konstantní hloubky obrábění měrná řezná síla roste. Pro konstantní hodnotu posuvu s rostoucí hloubkou třísky měrná řezná síla klesá.

Hodnoty měrné řezné síly se dají ještě zobrazit v závislosti na ekvivalentní hloubce broušení. Tato závislost pro konstantní hodnotu posuvu  $f = 800 \text{ mm/min}$  je zobrazena na obrázku 21.



21 Závislost měrné řezné síly na ekvivalentní hloubce broušení

V obrázku je zcela patrné, že s rostoucí ekvivalentní hloubkou třísky měrná řezná síla nejprve prudce klesne, poté následuje v intervalu mezi 0,01 a 0,02  $\mu\text{m}$  menší nárůst a od hodnoty kolem 0,02  $\mu\text{m}$  drží hodnota měrné řezné síly takřka konstantní velikost.

### 7.1. Výkon

Naměřené hodnoty řezných sil se mohou použít ještě k zjištění výkonu brusky nepřímou metodou. K výpočtu výkonů se použije vzorec 7.2. Vypočítaná hodnota výkonu odpovídá množství naměřených, nijak zpracovaných, hodnot řezné síly.

$$P = F_c * v_c \quad [W] \quad (7.2)$$

Hodnoty vypočítaného výkonu jsou zobrazeny v tabulce 6.

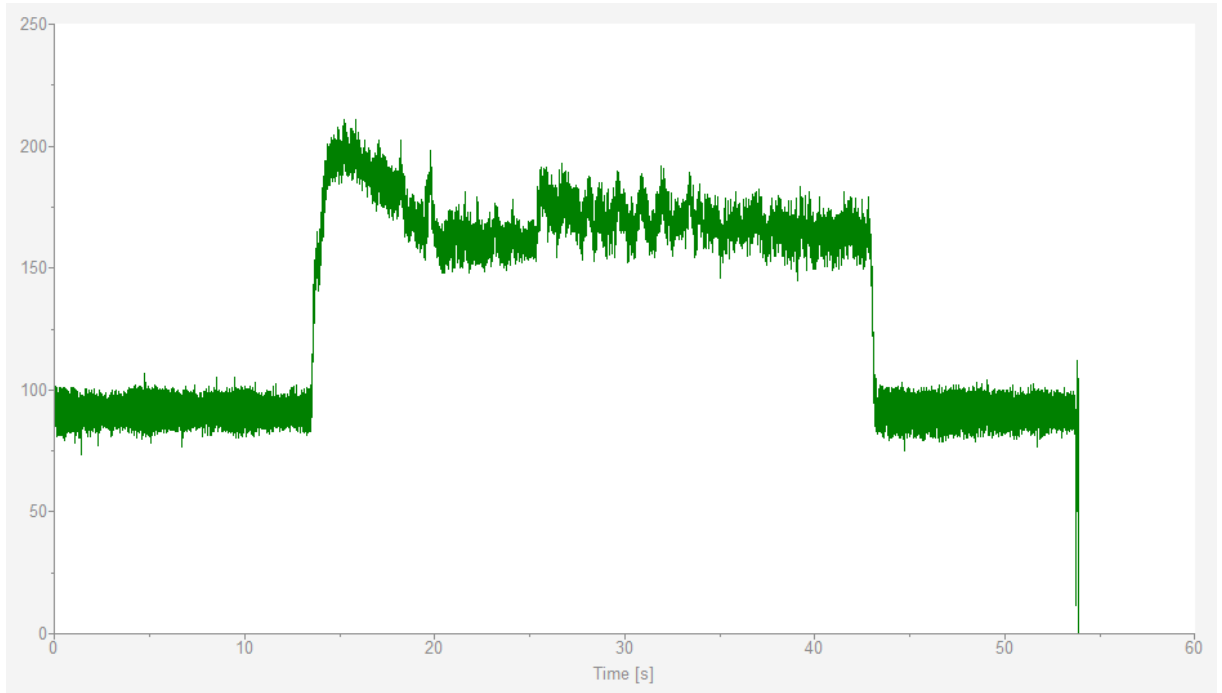
Tabulka 6 Dupočítaný výkon

Výkon P [W]								
$a_e$ [mm]	$v_f$ [mm/min]							
	/	100	200	300	400	800	1200	1600
0,01	-	-	-	67,87	109,98	65,46	90,73	
0,02	-	-	-	16,87	50,67	98,07	106,62	
0,03	-	-	-	131,94	91,56	114,06	88,74	
0,05	-	-	-	122,79	196,32	135,87	180,99	
0,1	-	-	-	-	331,11	374,40	-	
0,2	-	-	-	521,19	688,62	-	-	
0,3	-	-	-	491,75	804,06	-	-	
0,7	368,28	459,15	572,37	-	-	-	-	

Z tabulky je patrné, že hodnoty zejména menších hloubek řezu značně kolísají. Přesto se dá odvodit, že za konstantního posuvu s rostoucí hloubkou řezu roste také výkon. Stejně tak, za konstantní hloubky řezu roste výkon se vzrůstajícím rostoucím posuvem.

## 8. Řezný příkon

Zároveň s měřením řezných sil měřil a zaznamenával dynamometr souběžně také množství příkonu odebíraného ze sítě obráběcím strojem. Naměřená data se uložila pomocí softwaru DynoWare.



22 Ukázka výstupu měření příkonu z programu DynoWare

Z obrázku je vidět, že množství odebíraného příkonu při běhu stroje naprázdno se pohybovalo kolem 90 W, v záběru množství příkonu vzrostlo. Po odečtení hodnot naprázdno se získalo množství potřebného příkonu pro obrábění. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v tabulce.

Tabulka 7 Odebíraný příkon

		Příkon $P_0$ [W]						
		$v_f$ [mm/min]						
$a_e$ [mm]	/	100	200	300	400	800	1200	1600
	0,01	-	-	-	46,95	62,95	48,47	51,80
	0,02	-	-	-	32,70	39,35	62,37	68,16
	0,03	-	-	-	87,30	66,68	72,38	71,78
	0,05	-	-	-	70,50	120,40	86,25	117,95
	0,1	-	-	-	-	200,50	255,25	-
	0,2	-	-	-	303,50	427,60	-	-
	0,3	-	-	-	266,44	503,53	-	-
	0,7	63,80	82,15	92,63	-	-	-	-

Naměřená data ukazují, že stejně jako u řezných sil data značně kolísají do tloušťky třísky 0,05 mm. Od tloušťky třísky je značně patrný trend, že příkon s rostoucím posuvem i hloubkou řezu roste.

Pro rozdílné řezné podmínky je třeba k vyhodnocení přepočítat množství příkonu na měrný řezný výkon. Přepočet provedu pomocí vzorce 8.1. Vzhledem k rozdílným jednotkám mezi řeznou rychlostí a posuvem je pak třeba ještě převést veličiny na stejné jednotky vynásobením vzorce 60. [22]

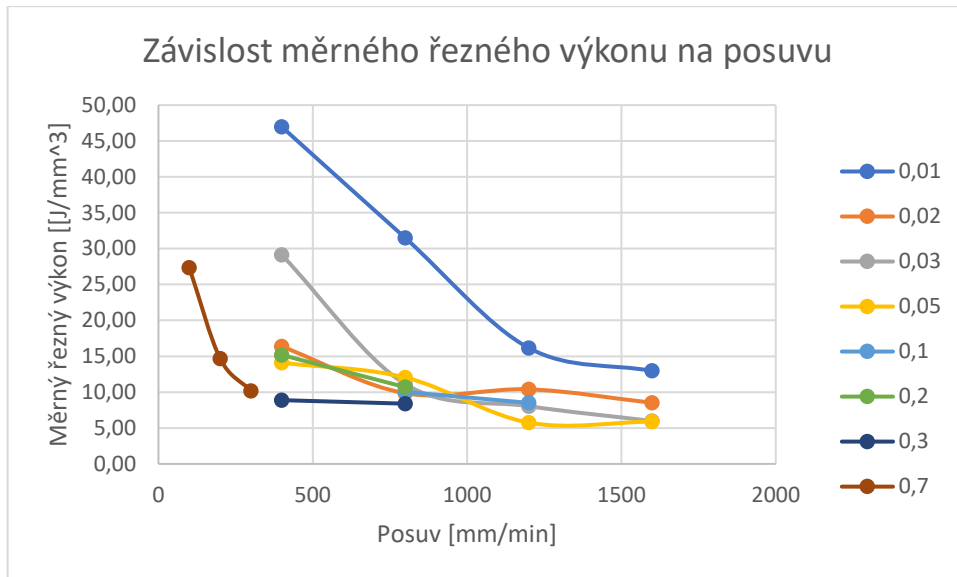
$$p_c = \frac{F_c * v_c}{a_e * b * v_f} \text{ [J/mm}^3\text{]} \quad (8.1)$$

Dopočítané hodnoty měrného řezného výkonu jsou zobrazeny v tabulce 8.

Tabulka 8 Měrný řezný výkon

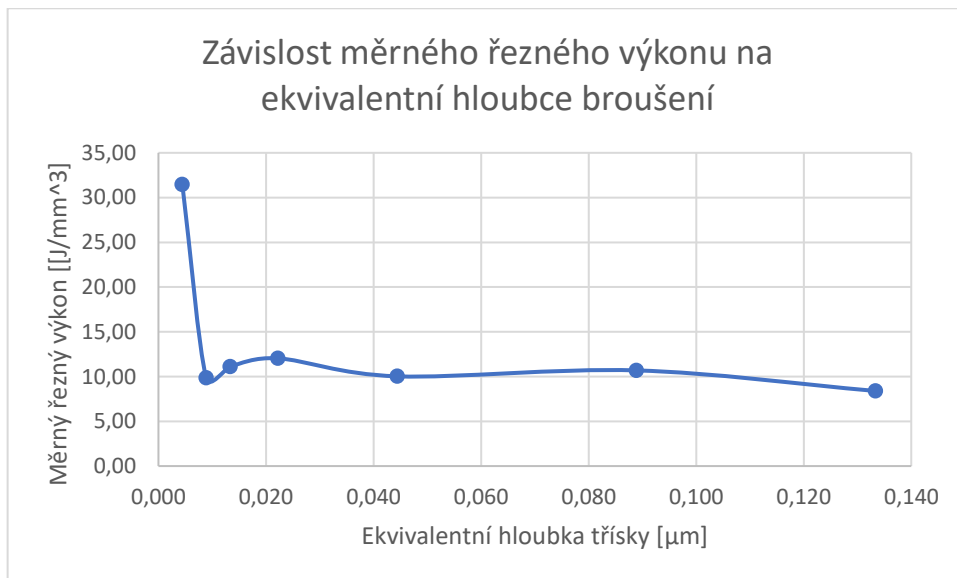
Měrný řezný výkon $p_c$ [J/mm <sup>3</sup> ]								
$a_e$ [mm]	$v_f$ [mm/min]							
	/	100	200	300	400	800	1200	1600
0,01	-	-	-	46,95	31,48	16,16	12,95	
0,02	-	-	-	16,35	9,84	10,40	8,52	
0,03	-	-	-	29,10	11,11	8,04	5,98	
0,05	-	-	-	14,10	12,04	5,75	5,90	
0,1	-	-	-	-	10,03	8,51	-	
0,2	-	-	-	15,18	10,69	-	-	
0,3	-	-	-	8,88	8,39	-	-	
0,7	27,34	14,67	10,18	-	-	-	-	

Podle vzorce na výpočet by měl měrný řezný výkon klesat s rostoucím posuvem, šířkou záběru a tloušťkou třísky. Naměřené hodnoty tento předpoklad potvrzují u posuvu a šířky záběru. Naopak mění se tloušťka třísky předpoklad daný vzorcem nepotvrzuje. Závislost měrného řezného příkonu na posuvu je zobrazena v grafu.



23 Závislost měrného řezného výkonu na posuvu

Měrný řezný výkon můžeme vyjádřit ještě v závislosti na ekvivalentní hloubce broušení. Pro hodnotu posuvu 800 mm/min je tato závislost zobrazena na obrázku 24.



24 Závislost měrného řezného výkonu na ekvivalentní hloubce broušení

Na obrázku 24 je vidět, že nejprve dojde k prudkému snížení měrného řezného výkonu a poté od hodnoty ekvivalentní hloubky třísky  $h_{eq} = 0,01 \mu\text{m}$  drží měrný řezný výkon skoro konstantní velikost.

## 9. Závěr

Obsah této bakalářské práce pojednává o množství energie potřebné pro základní operaci obrábění, řezný proces. Experimentální část se zaměřila na konkrétní složku obrábění v podobě broušení. Během experimentu byly naměřeny velikosti sil a množství odebíraného příkonu za různých řezných podmínek při broušení materiálu Inconel 713 LC.

Broušením drážek se pomocí dynamometru naměřily hodnoty řezných sil a příkonu pro celkem 25 řezných podmínek zahrnujících 8 různých hloubek třísky a 7 různých posuvů. U malých hloubek třísky byly voleny rychlejší hodnoty posuvu, naopak u nejhlubší třísky, tj.  $a_e = 0,7 \text{ mm}$ , byly zvoleny jen nízké posuvové rychlosti a menší šířka záběru.

Z naměřených hodnot bylo vidět, že velikost řezných sil do hloubky  $a_e = 0,05 \text{ mm}$  značně kolísaly. Z hodnot s hloubkou řezu  $a_e = 0,1 \text{ mm}$  už se pak dali vyzorovat určité trendy. Podobné výsledky se daly zjistit také z naměřených hodnot příkonu. Je otázkou, jestli toto kolísání bylo zapříčiněno nějakou chybou měření nebo jestli se jedná o opakující se trend.

Řezné síly se vzrůstajícím posuvem i tloušťkou třísky rostly. Nejmenší naměřená řezná síla byla naměřena za podmínek  $a_e = 0,02 \text{ mm}$  a  $v_f = 400 \text{ mm/min}$ , největší pak za podmínek  $a_e = 0,3 \text{ mm}$  a  $v_f = 800 \text{ mm/min}$ .

Vzhledem k rozdílným řezným podmínkám pak k celkovému vyhodnocení řezných sil byla vypočítána hodnota měrné řezné síly. Tam se data značně změnily. Nejvyšší hodnoty měrné řezné síly byla naměřeny u hloubky řezu  $a_e = 0,01 \text{ mm}$  a s rostoucí hloubkou řezu klesaly. Stejně tak se ukázalo, že s rostoucí hodnotou posuvu za konstantní hloubky řezu měrná řezná síla roste.

Během měření hodnot řezné síly došlo také k měření odebíraného příkonu. Stejně jako při měření příkonu byla nejvyšší zaznamenaná hodnota při podmínkách  $a_e = 0,3 \text{ mm}$  a  $v_f = 800 \text{ mm/min}$ . Vzhledem k rozdílným podmínkám bylo pro vyhodnocení třeba data zpracovat na měrný výkon.

Stejně jako u zpracovaných měrných řezných sil se i u měrného výkonu ukázalo, že nejvyšší hodnoty patří malé hloubce třísky  $a_e = 0,01 \text{ mm}$ . Nejmenší měrný řezný výkon byl naměřen za podmínek  $a_e = 0,05 \text{ mm}$  a  $v_f = 1200 \text{ mm/min}$ .

Ze zpracovaných hodnot můžeme říci, že předpoklad daný vzorcem na měrný výkon platí. S rostoucími hodnotami hloubky třísky, posuvu a šířky záběru dochází ke klesání měrného příkonu.

Závislost měrného řezného výkonu i měrné řezné síly na ekvivalentní hloubce broušení vykazovala v obou případech podobný charakter. Nejprve došlo k prudkému snížení a od hodnoty  $h_{eq} = 0,02 \mu\text{m}$  držela hodnota jak řezného příkonu, tak řezné síly skoro konstantní velikost.

Pro kompletní posouzení energetické náročnosti by bylo třeba provést více měření. Kromě opakovaného měření ke zvýšení spolehlivosti by bylo vhodné získat data z více řezných podmínek. Zároveň je třeba sledovat také úbytek kotouče, vzhledem k rozsahu práce tento údaj sledován nebyl. Ideální by pak bylo také zkusit kombinovat různé řezné prostředí, obráběné materiály a brusné kotouče.

## 10. Seznam použité literatury

[1] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění - 1. část*. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ - FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ - ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, 2003. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)

[2] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.

[3] BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana; PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.

[4] Groover, Mikell P. *Fundamentals Of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*; 4th edition. John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN: 978-0470-467002

[5] *Difference between Orthogonal and Oblique Cutting*. [online]. [citace 29 – 01 – 2019]. Dostupné z: <https://www.mech4study.com/2016/10/difference-between-orthogonal-and-oblique-cutting.html>

[6] Kılıçaslan, Cenk. *Modelling of metal cutting by finite element method*. [online]. [citace 29 – 01 – 2019]. Dostupné z [https://www.researchgate.net/publication/280682774\\_Modelling\\_of\\_metal\\_cutting\\_by\\_finite\\_element\\_method](https://www.researchgate.net/publication/280682774_Modelling_of_metal_cutting_by_finite_element_method) 2009

[7] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I: elektroerozivní, elektrochemické a chemické obrábění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3943-1.

[8] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

[9] DAVOODI, Behram, HOSSEINZADEH, Hossein. A new method for heat measurement during high speed machining. *Measurement*. 2012, 45(8). 2135-2140. ISSN 0263-2241. [online]. [citováno 11 – 02 – 2019]. Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112002291?via%3Dihub>

[10] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5.

[11] SCHNEIDER, George. *Cutting tool applications*. ASM International, 2002. ISBN 978-0615121918.

[12] *Obrobitelnost*. [online]. [citováno 06 – 03 – 2019]. Dostupné z <http://www.bogner.cz/files/files/Obrobitelnost.pdf>

[13] YAN, Pei, RONG, Yiming, WANG, Gang. The effect of cutting fluids applied in metal cutting process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*,



Part B: Journal of Engineering Manufacture. 230. 10.1177/0954405415590993. [online] [citováno 23 – 04 – 2019]. Dostupné z [https://www.researchgate.net/publication/281225720\\_The\\_effect\\_of\\_cutting\\_fluids\\_applied\\_in\\_metal\\_cutting\\_process](https://www.researchgate.net/publication/281225720_The_effect_of_cutting_fluids_applied_in_metal_cutting_process)

[14] RAJEMI, Mohamad Farizal. *Energy Analysis un Turning and Milling*. PhD Dissertation, The University od Manchester, United Kingdom, 2010. [online]. [citováno 29 – 01 – 2019]. Dostupné z [https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/54505753/FULL\\_TEXT.PDF](https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/54505753/FULL_TEXT.PDF)

[15] Algoritmizace optimalizačních úloh pro obrábění. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum*. [online]. [citováno 03 – 05 – 2019]. Dostupné [z https://www.mmspektrum.com/clanek/algoritmizace-optimalizacnich-uloh-pro-obrabeni.html](https://www.mmspektrum.com/clanek/algoritmizace-optimalizacnich-uloh-pro-obrabeni.html)

[16] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2019-07-08]. ISBN 978-80-248-1505-3.

[17] BRH20CNC. [online]. [citováno 11 – 06 – 2019]. Dostupné z <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>

[18] STRATO Ultra. [online]. [citováno 11 – 06 – 2019]. Dostupné z [https://www.tyrolit.at/fileadmin/products/doc/0cce0f2519ef\\_20054185-gb-0814\\_strato\\_ultra\\_rz\\_low.pdf](https://www.tyrolit.at/fileadmin/products/doc/0cce0f2519ef_20054185-gb-0814_strato_ultra_rz_low.pdf)

[19] Data sheet, type 9265B. [online]. [citováno 11 – 06 – 2019]. Dostupné z <http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-152e-12.09.pdf>

[20] JONŠTA, Petr. Structural characteristics of nickel super alloy INCONEL 713LC after heat treatment. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007, 21(2). ISSN 1734-8412. [online]. [citováno 11 – 06 – 2019]. Dostupné z [http://jamme.acmsse.h2.pl/papers\\_vol21\\_2/1554S.pdf](http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol21_2/1554S.pdf)

[21] HUMÁR, Anton. Technologie obrábění - 3. část. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ - FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ - ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, 2005. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)

[22] MASOUMI, Hamed, SAFAVI, Seyed Mohsen, SALEDI, Mehdi. Grinding Force, Specific Energy and Material Removal Mechanism in Grinding of HVOF-Sprayed WC-Co-Cr Coating. [online]. [citováno 20 – 06 – 2019]. Dostupné z [https://www.researchgate.net/publication/263679296\\_Grinding\\_Force\\_Specific\\_Energy\\_and\\_Material\\_Removal\\_Mechanism\\_in\\_Grinding\\_of\\_HVOF-Sprayed\\_WC-Co-Cr\\_Coating](https://www.researchgate.net/publication/263679296_Grinding_Force_Specific_Energy_and_Material_Removal_Mechanism_in_Grinding_of_HVOF-Sprayed_WC-Co-Cr_Coating)

## 11. Seznam obrázků

1 Volné řezání [5] .....	11
2 Vázané řezání [5] .....	11
3 Oblasti plastických deformací [6] .....	12
4 Síly při ortogonálním řezání [4] .....	14
5 Síly při vázaném řezání [4] .....	14
6 Vznik a odvod tepla [1] .....	18
7 Podíl odvodu tepla v závislosti na řezné rychlosti [2] .....	18
8 Odvod tepla při konvenčním a vysokorychlostním obráběním [9] .....	19
9 Dílčí subsystémy monitorování [15] .....	26
10 Polotovary upnutý v dynamometru .....	30
11 Schématické zobrazení umístění drážek .....	32
12 Ukázka použitého NC kódu .....	33
13 Zařízení na pracovišti .....	33
14 Ovládací panel brusky .....	34
15 Brusný kotouč Strato Ultra .....	35
16 Souřadný systém dynamometru .....	35
17 Měřicí zařízení .....	36
18 Ukázka výstupu měření řezných sil z programu DynoWare .....	38
19 Kolísání velikosti řezných sil .....	39
20 Závislost měrné řezné síly na posuvu .....	41
21 Závislost měrné řezné síly na ekvivalentní hloubce broušení .....	41
22 Ukázka výstupu měření příkonu z programu DynoWare .....	43
23 Závislost měrného řezného výkonu na posuvu .....	45
24 Závislost měrného řezného výkonu na ekvivalentní hloubce broušení .....	45

## 12. Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdělení materiálů dle obrobitelnosti .....	21
Tabulka 2 Plán experimentu .....	31
Tabulka 3 Ekvivalentní hloubka třísky .....	37
Tabulka 4 Velikost průměrných řezných sil .....	39
Tabulka 5 Dypočítaná měrná řezná síla .....	40
Tabulka 6 Dypočítaný výkon .....	42
Tabulka 7 Odebíraný příkon .....	43
Tabulka 8 Měrný řezný výkon .....	44