

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Experimentální zjišťování měrné řezné síly a její vliv na
obrábění**

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pelikán

Praha 2020

Jiřinský Jiří

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jiřinský** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **473679**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální zjišťování měrné řezné síly a její vliv na obrábění

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental Determination of Specific Cutting Force and its Influence on Machining

Pokyny pro vypracování:

1. Definice řezných sil při obrábění
2. Parametry ovlivňující řezné síly
3. Měření řezných sil
4. Experimentální vyhodnocení měrných řezných sil při soustružení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Pelikán, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

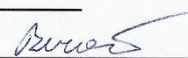
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Lukáš Pelikán
podpis vedoucí(ho) práce

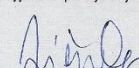

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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.

30.6.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze 2. 7. 2020

.....

Jiřinský Jiří

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Lukášovi Pelikánovi za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích při zpracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá řeznými silami a měrnou řeznou silou při soustružení oceli ČSN 11 110. Teoretická část popisuje síly působící při řezném procesu a vliv řezných podmínek na měrný řezný odpor. V experimentální části byly naměřeny síly při různých posuvech. Závěrem je vyhodnocení jednotlivých naměřených složek sil a měrných řezných sil.

Klíčová slova: technologie obrábění, řezná síla, měrná řezná síla, řezné podmínky

Abstract

This bachelor thesis is focused on cutting forces and specific cutting force during steel turning ČSN 11 110. Theoretical part describes forces during the cutting process and an influence of the cutting conditions on the specific cutting resistance. In the experimental part were measured forces at different strokes. The conclusion is an evaluation of particular components of forces and specific cutting forces.

Keywords: Machinning technology, Cutting Force, Specific Cutting Force, cutting conditions

Obsah

1	ÚVOD.....	7
2	TVORBA TRÍSKY.....	8
3	SÍLY PŘI OBRÁBĚNÍ.....	9
3.1	SÍLY PŘI SOUSTRUŽENÍ	11
3.2	ŘEZNÁ SÍLA.....	11
3.3	POSUVOVÁ SÍLA	11
3.4	PASIVNÍ SÍLA	12
4	MĚRNÝ ŘEZNÝ ODPOR.....	13
4.1	DEFINICE	13
4.2	VLIV MATERIÁLU OBROBKU	14
4.3	VLIV GEOMETRIE NÁSTROJE	15
5	OVLIVNĚNÍ ŘEZNÉHO PROCESU SILAMI.....	19
5.1	DEFORMACE.....	19
5.2	VIBRACE	19
5.2.1	REGENERATIVNÍ PRINCIP	20
6	METODY MĚŘENÍ SIL PŘI OBRÁBĚNÍ.....	21
6.1	NEPŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL.....	21
6.2	PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL.....	22
6.2.1	DYNAMOMETRY.....	23
7	ROZBOR EXPERIMENTU	27
7.1	STROJ.....	27
7.2	NÁSTROJ.....	28
7.3	MATERIÁL OBROBKU PRO EXPERIMENT	29
7.4	DYNAMOMETRICKÉ ZAŘÍZENÍ	29
7.5	VOLBA PARAMETRŮ MĚŘENÍ	30
7.6	SCHÉMA NAVRŽENÉHO EXPERIMENTU	32
8	ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	33
8.1	NÁVRH ŘEZNÝCH PODMÍNEK	33
9	REALIZACE EXPERIMENTU	34
9.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY	34
9.2	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	36
9.2.1	POSUVOVÁ SÍLA	37
9.2.2	PASIVNÍ SÍLA.....	38
9.2.3	ŘEZNÁ SÍLA	39
9.2.4	MĚRNÝ ŘEZNÝ ODPOR	40
10	ZÁVĚR.....	42
11	ZDROJE	43

1 Úvod

Náplní této bakalářské práce je určení řezných sil a měrného řezného odporu v závislosti na odebírané vrstvě materiálu resp. posuvu při soustružení. První polovina této práce je teoretická a zabývá se popisem silových poměrů, vlivem řezných podmínek na síly a záležitostmi, které doprovázejí řezný proces. Dále práce popisuje zařízení, pomocí jehož se dají měřit síly při obrábění. Druhá část práce je praktická a bude zde navržen a proveden experiment.

Cílem této bakalářské práce bude naměření řezných sil a následné určení měrného řezného odporu. Na základě těchto naměřených údajů se určí hodnoty řezných sil, výsledná síla řezání a velikost měrného řezného odporu. Hodnoty sil budou měřeny pomocí třísložkového odporového dynamometru. Podle teoretických poznatků by se měl měrný řezný odpor při zvětšování odřezávané vrstvy zmenšovat. Ověření této hypotézy a vyhodnocení měrného řezného odporu, který bude experimentálně naměřen, je závěrem této práce.

2 Tvorba třísky

Při vnikání řezného klínu do materiálu obrobku vzniká v obráběném materiálu stav napjatosti, který způsobuje v mezní situaci jeho dělení. Tento proces dělení doprovází větší či menší plastické a elastické deformace. [10]

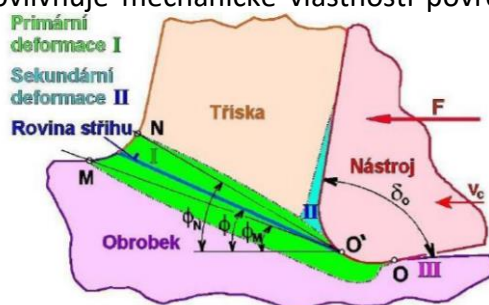
Tvorba třísky se rozděluje na tři oblasti:

- I. Primární plastická deformace
- II. Sekundární plastická deformace
- III. Terciární plastická deformace

V oblasti primární plastické deformace se obráběný materiál zpevňuje. Na konci této oblasti je vyčerpána plasticita materiálu, po které dojde ke kluzu uvnitř materiálu. U ostří břitu je intenzita plastické deformace a deformační rychlost největší, čímž je nejvyšší také pevnost materiálu u ostří. V této části oblasti primární plastické deformace vzniká velká část řezného odporu, který se projevuje v závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy viz. další kapitoly. [13]

Sekundární plastické deformace vznikají na spodní straně třísky po průchodu materiálu oblastí primární. Při oddělování třísky dochází k velkému tření mezi čelem nástroje a třískou, což má za následek plastickou deformaci tenké spodní vrstvy třísky. Kvůli vysokým teplotám, vzniklým velkými třením, se může na nástroj navařovat část třísky a tvořit se takzvaný nárůstek. Tento nárůstek pak negativně ovlivňuje řezný proces. [16]

V oblasti terciární plastické deformace neboli tzv. oblasti povrchové vrstvy plochy řezu vzniká napětí mezi nástrojem a obrobkem, které vytváří plastickou deformaci povrchu, která ovlivňuje mechanické vlastnosti povrchové vrstvy (např. drsnost, pevnost). [16]



Obrázek 1 – Oblasti plastických deformací v zóně řezání [22]

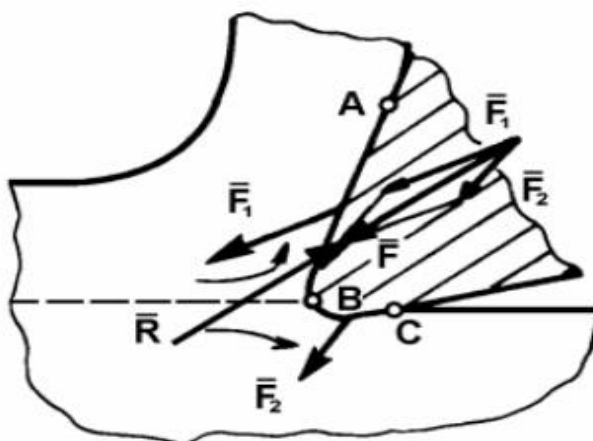
3 Síly při obrábění

Při řezném procesu se zároveň s jevy deformačními prosazují poměry silové, jejichž poznání umožňuje získat přehled o mechanickém namáhání soustavy obrábění. Zároveň s tím získáváme také podklady pro řešení celé technologické soustavy, a to jak z hlediska pevnosti, tak také z hlediska její tuhosti včetně dynamické stability řezného procesu. [1,10]

Nejvýznamnější veličinou tohoto procesu je řezná síla F , kterou je potřeba chápat jako veličinu časově proměnnou. V obráběném materiálu nastává stav napjatosti, který způsobuje řezný odpor R . Tento odpor musí být při řezném procesu neustále překonáván silou F . Řezná síla F je celková síla nástroje, která působí na obrobek. Řezný odpor R je naopak silou obrobku působící na nástroj. [1]

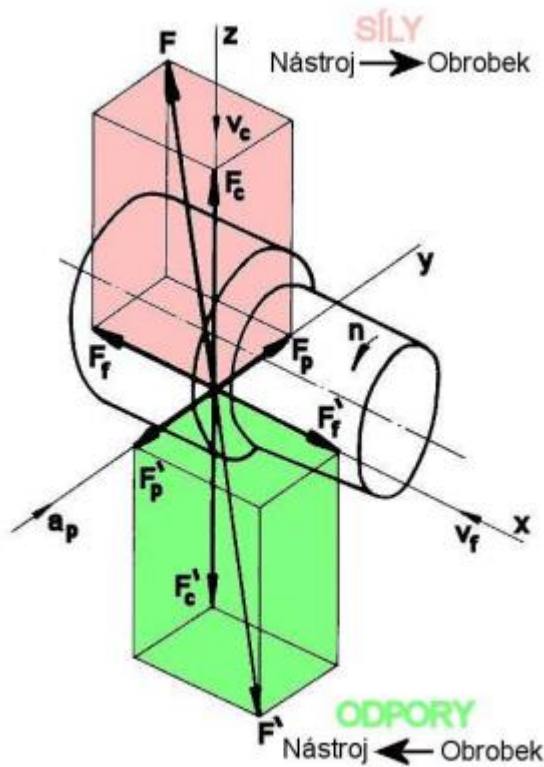
$$\text{Musí platit podmínka rovnováhy: } F = -R(N) \quad (1.)$$

Řezná síla je jev dynamický. V závislosti na čase její okamžitá velikost F_{ok} kolísá (\pm až 20%) a to i za konstantních řezných podmínek. Největší podíl na kolísání má určitá drsnost obráběné plochy a rozptyl mechanických vlastností obráběného materiálu [1].



Obrázek 2 – Rozklad síly obrábění při soustružení [1]

Rozložením síly obrábění do složek jsme schopni určit velikost a směr výsledného působení sil. Tato síla se rozkládá na složku aktivní F_1 , kterou můžeme dále rozdělit na řeznou sílu F_c a posuvovou složku síly F_f . Druhá složka obráběcí síly je pasivní a značí se F_2 , tato složka se dále nerozkládá a označujeme ji F_p [1,10].



Obrázek 3 – Řezné síly a odpory při podélném soustružení [2]

Poměr velikostí jednotlivých složek je určen především technologií obrábění, geometrií nástroje, řezným prostředím a také materiálem řezného nástroje. Nejčastěji užívaným poměrem u soustružení je $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$ [1].

Celkovou sílu obrábění lze stanovit vztahem: [13]

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

3.1 Síly při soustružení

Všechny tyto následující složky síly budou posuzovány a popisovány v rámci technologie soustružení.

3.1.1 Řezná síla

Řezná neboli tangenciální složka síly F_c má největší význam na řezný proces a je základní veličinou při volbě řezných podmínek. Je definována jako síla ve směru hlavního řezného pohybu [6,19]. Značnou část této síly ovlivňuje velikost tření, které vzniká kontaktem mezi obrobkem a nástrojem resp. mezi třískou a čelem nástroje. Pomocí řezné síly se určuje celkové množství tepla, které se uvolní při řezném procesu, a dále také potřebný výkon elektromotoru. Tato síla je největší a podílí se na celkovém příkonu asi 99%. [13,20]

Řezný výkon potřebný pro řezání je dán vztahem:

$$P_c = \frac{F_c v_c}{60} \text{ [W]} \quad (3.)$$

Potřebný výkon elektromotoru je ovlivněn účinností stroje a je dán vztahem:[13]

$$P_M = \frac{F_c v_c}{60 \eta} \text{ [W]} \quad (4.)$$

Kde:

v_c – řezná rychlost [m/min]

η – účinnost stroje [-]

3.1.2 Posuvová síla

Posuvová neboli axiální složka síly F_f působí ve stejném směru jako posuv nástroje a směr osy obrábění. Je kolmá na směr tangenciální i radiální složky síl a její velký význam je k určování posuvových mechanismů, zejména pak při větších posuvech [13,20].

Posuvová síla tvoří obvykle 40-50% velikosti síly řezné, oproti které se na celkovém příkonu podílí jen velmi málo, protože rychlost posuvu je velmi malá v porovnání s řeznou rychlostí. Tato síla zároveň působí ve směru největší tuhosti soustavy S-N-O (stroj-nástroj-obrobek) [13,20].

3.1.3 Pasivní síla

Pasivní neboli radiální složka síly F_p působí radiálně ve směru, který je kolmý na obráběnou plochu. Je to síla, která vtlačuje nástroj do záběru s obrobkem. Při podélném soustružení, kdy pasivní síla působí v rovině zadní, je funkcí přísuvu či specifického tlaku, který namáhá tuhost soustavy S-N-O [13,20].

Velikost pasivní síly je asi 25% velikosti síly řezné a působí ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy.

Pasivní síla výrazně ovlivňuje [13]:

- přesnost obrobené plochy, především elastickou deformaci obrobku nebo nástroje
- chvění při obrábění

4 Měrný řezný odpor

4.1 Definice

Měrný řezný odpor, také nazývaný jako měrná řezná síla, která je označována k_c , je specifická materiálová konstanta. Lze ho vyjádřit jako řeznou sílu F_c působící ve směru hlavního pohybu na plochu řezu A_D [18].

Velikost měrného řezného odporu je možné určit vztahem [13]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [MPa] \quad (5.)$$

Kde:

k_c – měrná řezná síla [MPa]

F_c – řezná síla [N]

A_D – plocha řezu [mm²]

Měrná řezná síla nezávisí jen na obráběném materiálu, ale mění se také s posuvem, řeznou rychlostí, úhlem řezu apod. Velký význam na změnu velikosti měrného řezného odporu má posuv f viz. Obr.4 [13].

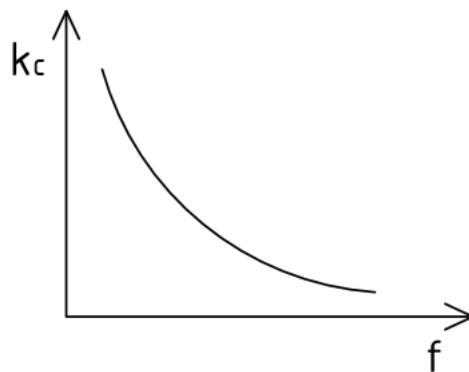
Pro posuv platí: [13]

$$k_c = \frac{C_{kc}}{f^{u_{kc}}} [MPa] \quad (6.)$$

Kde:

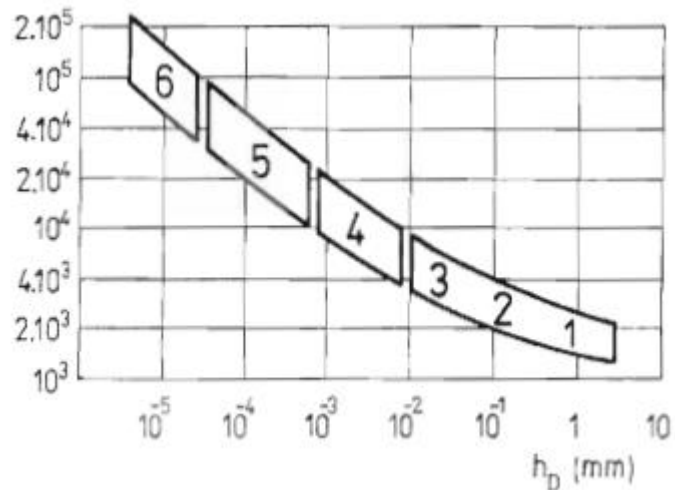
f - posuv [mm]

C_{kc} , u_{kc} – empirické konstanty



Obrázek 4 - Závislost měrné řezné síly na posuvu [13]

U různých technologií obrábění se používají různé rozsahy posuvů a tudíž jsou u jednotlivých technologií různé rozsahy měrné řezné síly. Měrná řezná síla se zvětšuje spolu se zmenšujícím se úběrem odřezávané vrstvy - viz obr. 5 [13].



Obrázek 5 – Vliv různých technologií na měrnou řeznou síly [13]

(1: soustružení, 2: vrtání, 3: frézování, 4: vystružování, 5: broušení, 6: lapování)

4.2 Vliv materiálu obrobku

Řezné síly jsou ovlivněny materiálem obrobku, který je ovlivňuje zejména svou pevností, tvrdostí, houževnatostí a zpevňovací schopností. Čím je tvrdost či odolnost vůči deformaci materiálu obrobku větší, tím vyšší jsou řezné síly a měrný řezný odpor [15].

Měrný řezný odpor pro uvažovanou technologii lze vyjádřit jako násobek pevnosti v tahu R_m a to vztahem: [13]

$$k_c = C_k R_m \text{ [MPa]} \quad (7.)$$

Kde:

R_m – pevnost v tahu [MPa]

C_k – konstanta

Konstanta C_k přísluší dané technologii a určitým pracovním podmínkám. Velikost konstanty C_k se nejčastěji pohybuje pro následující operace v dále uvedených rozsazích:

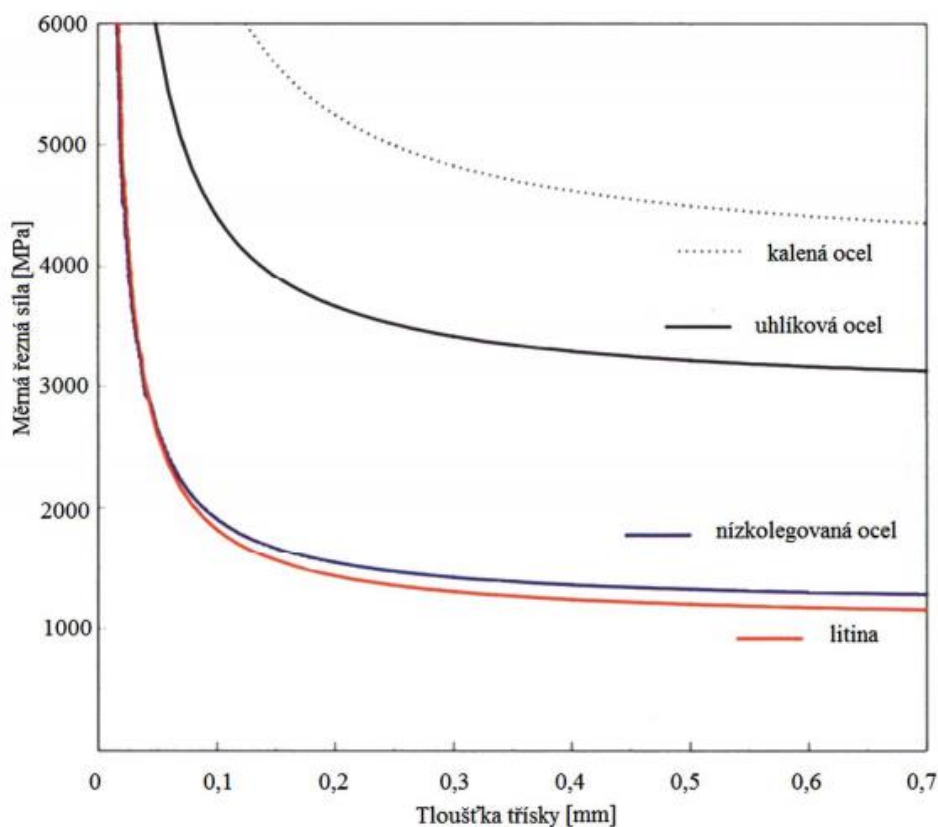
[C_{vu}]

3-5: soustružení

3-6: vrtání,

4-10: frézování,

20-35: broušení.



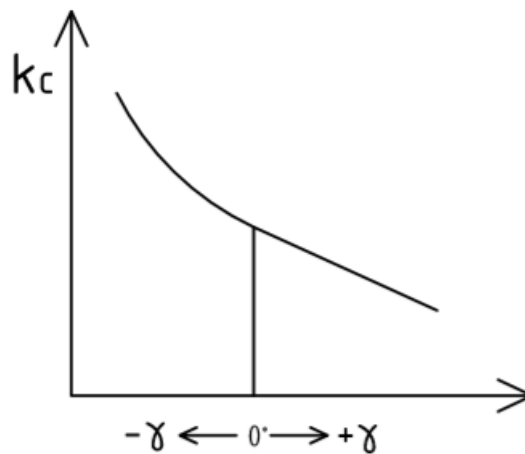
Obrázek 6 – Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky a obráběném materiálu [17]

4.3 Vliv geometrie nástroje

Geometrické parametry nástroje mají na sílu řezání a analogicky i na měrný řezný odpor velký vliv.

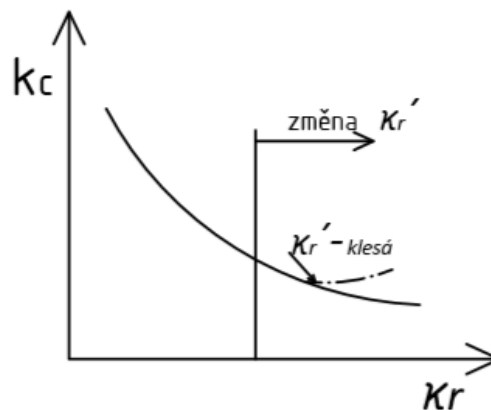
Nejvýznamnější vlastností nástroje je jeho ostrost, která působí na řeznou sílu. Čím je řezná hrana nástroje ostřejší (neboli čím více je pozitivní úhel čela), tím budou řezné

síly nižší. Ostrost je definována zejména úhlem čela. Řezná síla bude přibližně o 1 až 1,5% nižší, když se úhel čela zvětší o 1° [16].



Obrázek 7- Závislost měrné řezné síly na úhlu čela [16]

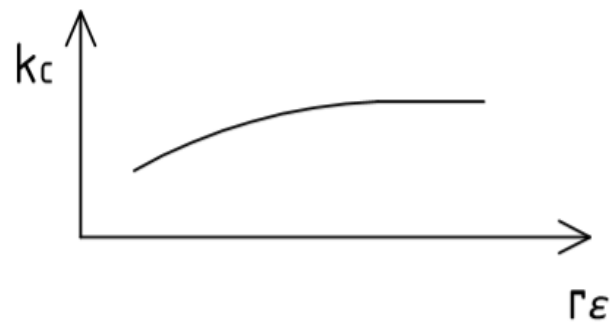
Vliv úhlu nastavení má na rozložení síly soustružení také značný vliv. Charakter závislosti měrného řezného odporu na úhlu nastavení κ_r je na obr. 8



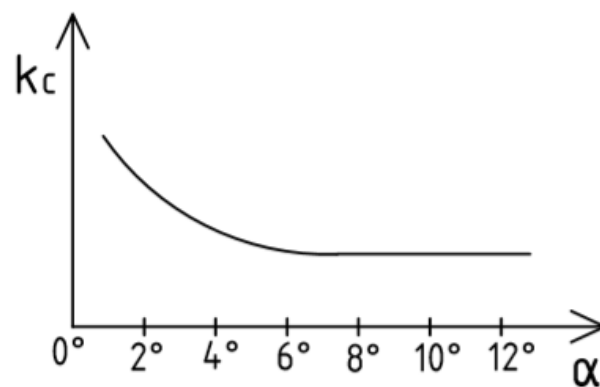
Obrázek 8 - Závislost měrné řezné síly na úhlu nastavení [16]

Při zvětšování úhlu nastavení se může zmenšovat vedlejší úhel κ_r' . Tím se poté zvětšuje část řezné síly vnikající na vedlejším břitu a měrný řezný odpor může zvětšováním úhlu nastavení růst viz. Obr. 8 [16].

Poloměr špičky r_ϵ má opačný vliv na měrný řezný odpor než má úhel nastavení. Hodnota úhlu nastavení klesá se zvětšující se hodnotou poloměru špičky a měrný řezný odpor roste. Tento vliv není příliš výrazný podobně jako vliv úhlu hřbetu [16].

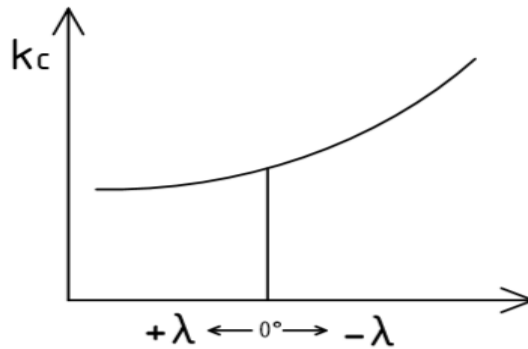


Obrázek 9 - Závislost měrné řezné síly na poloměru špičky [16].



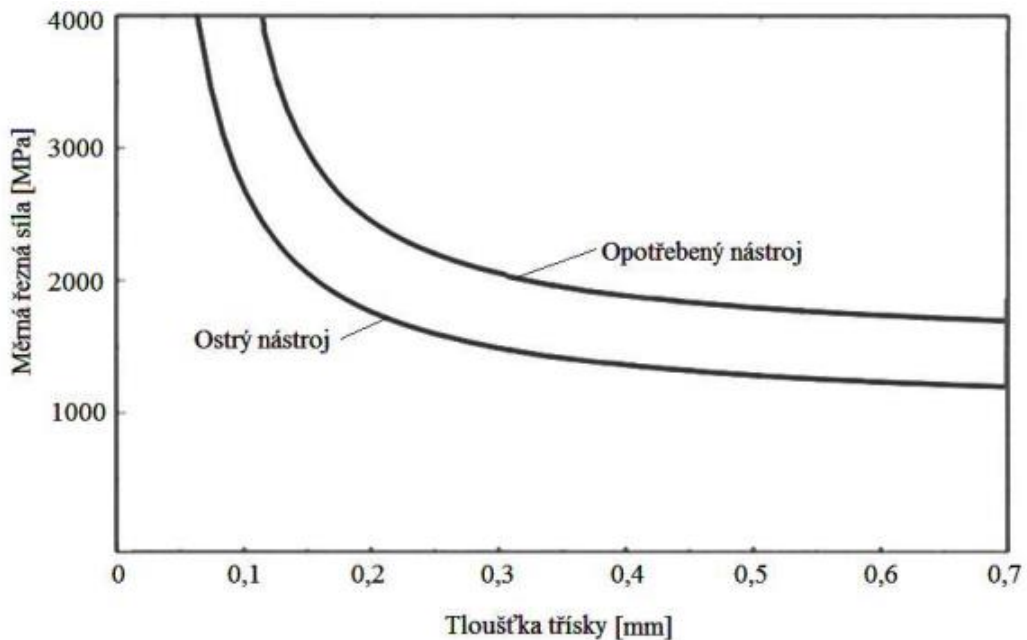
Obrázek 10 – Závislost měrné řezné síly na úhlu hřbetu [16]

Úhel sklonu ostří λ_s působí na směr odcházející třísky. Celková deformace potřebná na stáčení třísky se spolu se složkou třecí řezné síly na čele břitu při zmenšování úhlu sklonu ostří zvětšuje [9,16].



Obrázek 11 - Závislost měrné řezné síly na sklonu ostří [16]

Při růstu opotřebení řezného nástroje dochází k postupnému zvyšování měrné řezné síly. Opotřebení nástroje ovlivňuje třecí složku řezné síly [16].



Obrázek 12 - Vliv opotřebení nástroje na velikost měrné řezné síly uhlíkové oceli

[17]

5 Ovlivnění řezného procesu silami

5.1 Deformace

Působením řezných sil vznikají deformace součástí obráběcího stroje, nástroje a obrobku. Tyto deformace mají za následek změnu polohy ostří nástroje vůči obrobku a také vliv na přesnost rozměrů a tvar obrobku. Odolnost proti deformacím se označuje tuhost. Výsledná tuhost soustavy S-N-O, je veličina která se mění v závislosti na poloze nástroje vůči obráběcímu stroji resp. obrobku. [5]

Tuhost soustavy se může vyjádřit jako poměr síly, která působí kolmo na obrobenou plochu k posunutí hrotu nástroje: [6]

$$c = \frac{F_p}{y} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (8.)$$

Kde:

F_p – radiální síla [N]

y – posunutí nástroje [mm]

Výslednou tuhost soustavy určuje deformace celé technologické soustavy. Tuhost stroje je charakterizována jednotlivými částmi stroje. Tuhost nástroje je charakterizována především délkou, průměrem a materiálem nástroje. Tuhost obrobku lze popsat obdobně jako tuhost nástroje. Nedostatečná tuhost soustavy znamená větší náchylnost ke vzniku vibrací, které jsou popsány v následující podkapitole. [17]

5.2 Vibrace

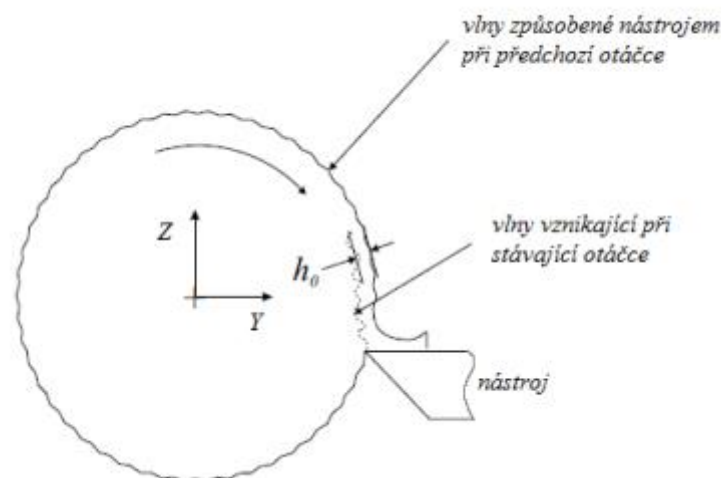
Mezi doprovodné jevy, které se objevují při obrábění, patří vibrace a kmitání celé soustavy. Je to škodlivý nežádoucí stav, kdy řezná síla neustále kolísá, což má za následek zhoršení kvality obrobené plochy, zkrácení životnosti nástroje a vyšší hlučnost při řezání. U obráběcích strojů se vyskytují všechny druhy kmitání: volné, vynucené a samobuzené. V tomto případě označujeme kmitání slovem chvění [2,14].

Chvění je způsobeno změnou statické složky řezné síly. Řezná síla se mění spolu s průřezem třísky resp. hloubkou třísky. Změna hloubky třísky je určena změnou polohy nástroje a obrobku v důsledku kmitání systému S-N-O. Změnou řezné síly resp.

proměnnou hloubkou třísky vzniká kmitání, které nazýváme samobuzené. Budícím faktorem chvění může být buďto nehomogenita obráběného materiálu či samotné najetí neboli náraz nástroje do materiálu. Toto kmitání vzniká při překročení určité mezní hodnoty, která se nazývá mezní šířka třísky neboli mezní axiální hloubka třísky [19].

5.2.1 Regenerativní princip

Kmity podle regenerativního principu vznikají díky obrábění zvlněného povrchu obrobku kmitajícím břitem nástroje. Tento zvlněný povrch vznikl při předchozím řezu např. najetím ostří na nehomogenní část materiálu. Zvlnění povrchu obrobku mění hloubku řezu a průřez třísky, čímž se periodicky mění i velikost řezné síly, která budí celý systém. Tímto způsobem se regenerují vlny při každém řezu. Pokud by byl zajištěn konstantní průřez třísky, řezná síla by se neměnila a samobuzené kmitání by nevznikalo [19].



Obrázek 13 – Proces regenerativního kmitání [2]

6 Metody měření sil při obrábění

Měření sil při řezném procesu se provádí za účelem analyzovat řezné silové působení a optimalizovat technologické podmínky obrábění. Při zkoumání sil v praxi rozdělujeme dva typy měření, kterými jsou přímé a nepřímé stanovení řezných sil.

6.1 Nepřímé měření sil

Nepřímé měření sil vychází převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Ze vztahu pro užitečný výkon můžeme nepřímým měřením z výkonu elektromotoru nebo z točivého momentu stanovit pouze tangenciální složku síly řezání [1].

Vztah pro užitečný výkon [1]:

$$P_{u\dot{z}} = F_c \cdot v_c \text{ [W]} \quad (8.)$$

Kde:

P_u – užitkový výkon (W)

F_c – řezná (tangenciální) složka síly (N)

v_c – řezná rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Při měření výkonu elektromotoru stroje se nejvíce používají wattmetry, které udávají přímý údaj. Vychází se z užitečného výkonu, který je potřebný k vlastnímu řezání. Nejprve se změří výkon nezatíženého stroje a poté se proměří výkon stroje při obrábění. Pro užitečný výkon platí [1]:

$$P_{u\dot{z}} = P_c - P_o \text{ [W]} \quad (9.)$$

Kde:

P_c – celkový výkon obráběcího stroje [W]

P_o – výkon při chodu na prázdno [W]

Tato metoda nepřímého měření je poměrně jednoduchá, není potřeba žádná speciální měřicí technika a je jí možné použít u všech způsobů obrábění. Její nevýhodou je naopak nepřesnost, která je způsobena rozdílnou účinností stroje při chodu v zatížení

a bez něj. Další nepřesnost způsobuje zanedbání ostatních složek sil, které také působí na výkon elektromotoru [1].

6.2 Přímé měření sil

Přímé měření složek sil řezání se zakládá na měření deformací v soustavě S-N-O během řezného procesu prostřednictvím dynamometrů. Deformace vzniká působením sil a momentů se pak měří mechanicky, hydraulicky, pneumaticky nebo elektricky. Nejvyšší požadavky jsou kladeny na:

1. Citlivost dynamometrů, která souvisí s citlivostí použité měřicí metody. Dynamometr musí mít takovou citlivost, aby celkové hodnotě měřené veličiny odpovídala nejmenší odečítaná jednotka při dodržení dostatečné přesnosti odečítání.

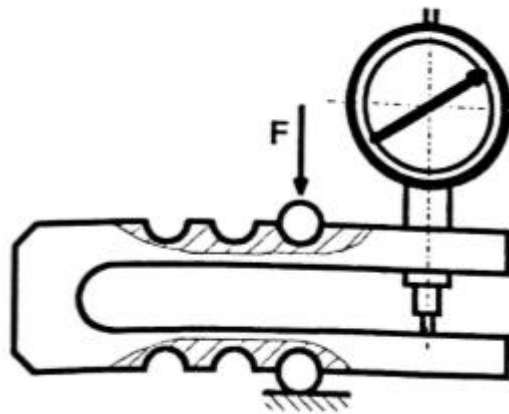
2. Tuhost dynamometrů, která je určena podle velikosti zatěžující síly F , která způsobuje deformaci y . Velikost této deformace závisí na provedení deformačního elementu – čidla, tvaru, celkovém konstrukčním provedení dynamometru a také na měřicí metodě, která je použita. Při dynamickém měření je zásadní dostatečná tuhost dynamometru.

3. Konstrukci dynamometrů, která musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly.

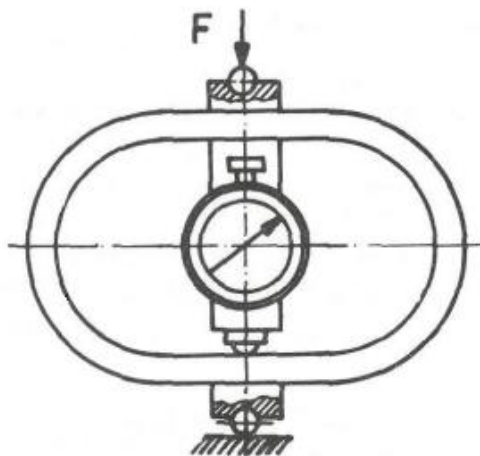
4. Setrvačnosti dynamometrů, která závisí přímo úměrně na hmotnosti soustavy. Především při dynamických měřeních je nutné sledovat skutečné hodnoty maximálních a minimálních hodnot měřené síly řezání a také časový průběh. Setrvačnost by měla být co nejmenší [3].

6.2.1 Dynamometry

U mechanických dynamometrů je podstatou mechanické snímání deformace deformačního členu úchylkoměrem, mikrokátorem apod. Zpravidla se používají při cejchování jiných druhů dynamometrů. Výhodou těchto dynamometrů je jednoduchá konstrukce a spolehlivost. Vyznačují se stálostí údajů a přesností. Nevýhodou je naopak velká závislost jejich údajů na teplotě a malý rozsah měřených sil [4,9].

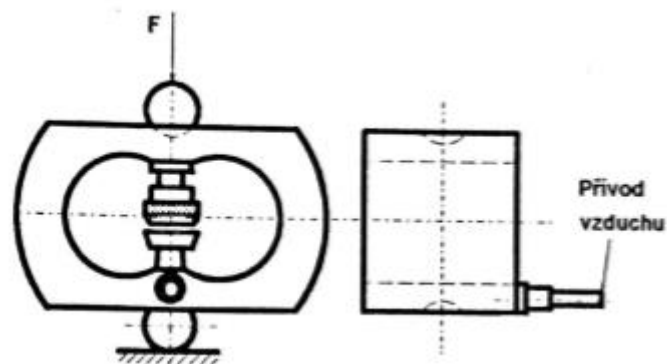


Obrázek 14 – Třmenový dynamometr [4]



Obrázek 15 – Prstencový dynamometr [3]

Podstatou pneumatických dynamometrů je čidlo, které měří pomocí systému klapka-tryska. Tento princip využívá dynamické vlastnosti vzduchu protékajícího štěrbinou. V závislosti na mezeře mezi klapkou a tryskou čidla se měří tlakové nebo průtokové změny. Na obr. 16 je pneumatický dynamometr fungující na tomto principu. Jak se mění vzdálenost klapky od trysky (která se mění působením síly), mění se i tlak přiváděného vzduchu, který je úměrný působící síle. Tento typ dynamometrů je spolehlivý, má vysokou citlivost a relativně nízké náklady na pořízení a provoz [4].



Obrázek 16 – Pneumatický dynamometr [4]

Základem hydraulických dynamometrů je přenos měření síly či momentu na píst nebo membránu hydraulického obvodu. Tento pohyb způsobuje změnu tlaku v kapalině, která je poté snímána pomocí manometru či jiného přístroje. Tyto dynamometry mají jednoduché konstrukce a možnost snadného měření více složek současně. Jejich nevýhodou je nízká citlivost, velká setrvačnost a požadavky na dokonalé utěsnění systému. Z tohoto důvodu se nedoporučují používat pro dynamická měření. V dnešní době se používají spíše výjimečně [3].

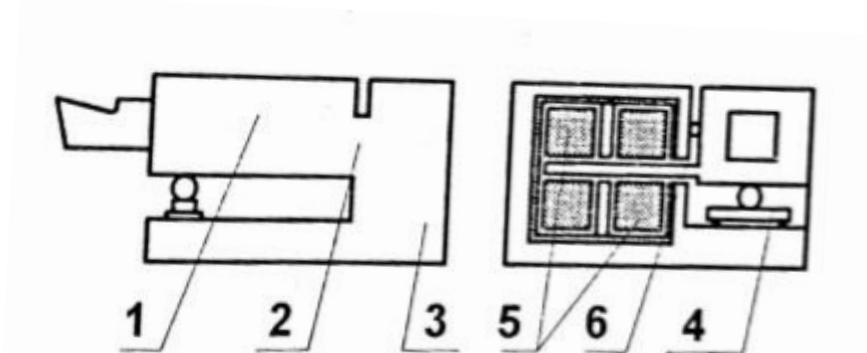
Dynamometry fungující na elektrickém principu a jsou v dnešní době nejrozšířenější a nejvíce používané v praxi. Jejich hlavní přednosti jsou [3]:

- 1) Snadný přenos signálu a jeho upravování
- 2) Možnost použití při rotujících a pohybujících se součástech
- 3) Využití malých měřících ploch
- 4) Snadná dostupnost a čistota provozu

Elektrické dynamometry rozlišujeme podle způsobu mechanicko-elektrické transformace na dva základní typy systémů [3]:

- 1) Parametrické systémy, kde se mění jeden z parametrů elektrického obvodu – indukčnost L , kapacita C , odpor R .
- 2) Generátorové systémy, které jsou založeny na vzniku napětí či proudu při deformaci elementů. Podstatou využití je piezoelektrický jev.

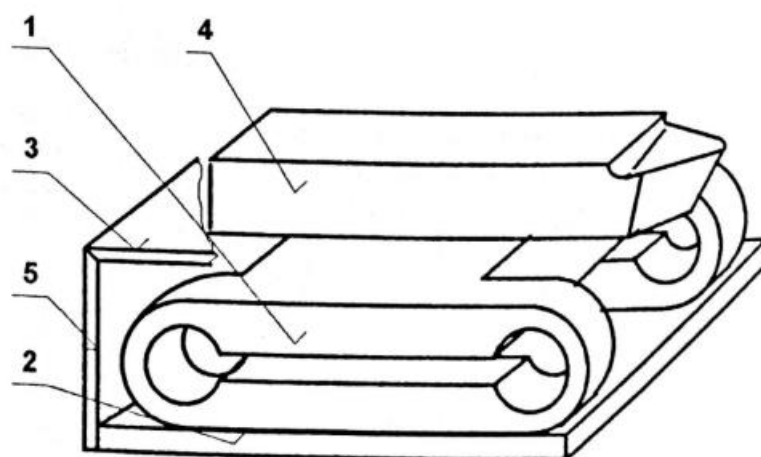
Indukční dynamometry využívají indukční snímač, ve kterém vyvolává změnu indukčnosti cívky snímaná deformace. Tyto dynamometry jsou teplotně stabilní a velmi citlivé [4].



Obrázek 17 – Schéma indukčního dynamometru [4]

- 1: nožový držák, 2: nosník držáku, 3: těleso dynamometru, 4: deformační nosník,
5: snímač, 6: kotva

Odporové dynamometry využívají změny odporu snímačů, které jsou způsobovány deformacemi. Odporové tenzometry, ve kterých jsou změny odporu způsobeny deformací vodiče nebo polovodiče, jsou nejužívanější. Odporové tenzometry jsou přímo spojené s deformačním elementem. Změně odporu vodiče je přímo úměrná deformace, která je důsledkem působení síly řezání. Deformováním vodiče se mění délka a průřez vodiče, tím pádem dochází i ke změně měrného odporu materiálu vodiče. Existují tenzometry drátkové a fóliové, kde je měřící element vyroben z tenké fólie o tloušťce 0,012-0,015 mm [3].



Obrázek 18 – Konstrukce třísložkového soustružnického tenzometrického dynamometru (1: deformační těleso, 2: základová deska, 3: krycí deska, 4: nožový držák, 5: kryt) [4]

Piezoelektrické dynamometry využívají piezoelektrického jevu, díky kterému snímají deformace. Tento jev je charakterizován tím, že při deformaci krystalu se na jeho povrchu generuje elektrické napětí. Typickým piezoelektrickým materiálem je křemen. Hlavní částí piezoelektrického snímače je měřicí destička vyříznutá z příslušného materiálu. Při deformaci snímače je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly [3].

7 Rozbor experimentu

Tato část diplomové práce se zabývá použitými stroji, měřidly, přístroji, řezným nástrojem a materiálem. Veškeré použité stroje a zařízení jsou součástí laboratoře Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na ČVUT v Praze.

7.1 Stroj

Pro měření byl použit univerzální soustruh SV18RA (obr.19) od výrobce TOS TRENČÍN. Parametry soustruhu jsou uvedeny v tabulce 1. Součástí soustruhu je univerzální sklíčidlo a pinola s hrotem, který slouží k opření obrobků.



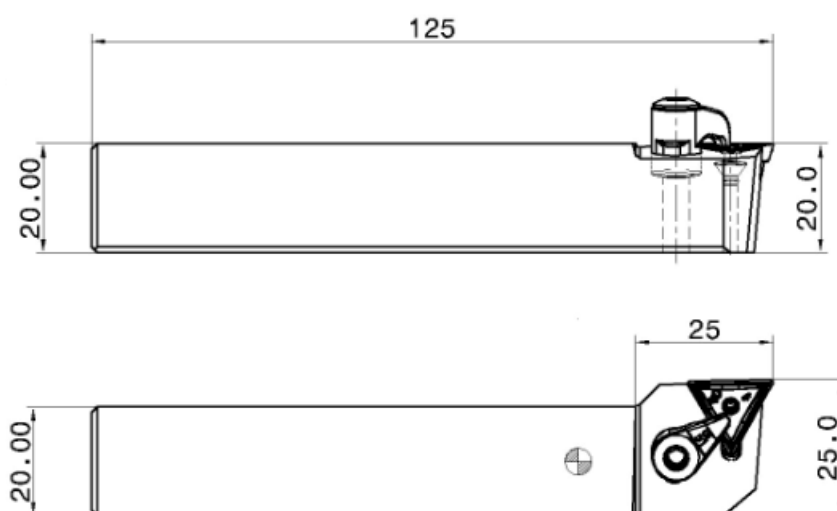
Obrázek 19 –Univerzální soustruh TOS Trenčín

Tabulka 1 - Parametry soustruhu SV18RA

Základní parametry soustruhu TOS Trenčín SV18RA	
Oběžný průměr nad ložem	380 mm
Oběžný průměr nad suportem	215 mm
Vzdálenost hrotů	750 mm
Max. hmotnost obrobku	300 kg
Elektromotor pro pohon vřeteníku	7,5 kW
Max. otáčky vřetene	2800 ot/min.
Rozměry stroje	2520x950 mm
Hmotnost stroje	1780 kg

7.2 Nástroj

K tomuto experimentu byl použit soustružnický nůž CTGPR 2020K-16 od firmy Iscar s úhlem nastavení $K_r = 91^\circ$ a břitovou destičku typu T. U tohoto nože je uchycení břitové destičky pomocí upínky, která tlačí na destičku přitlačnou silou vyvinutou šroubovým spojením.



Obrázek 20 – Nožový držák typu CTGPR 2020K-16 [21]

Vzhledem k plánu experimentu je nutné znát řeznou geometrií, která je dána použitým nožovým držákem a tvarem VBD. Geometrie soustružnického nože byla změřena pomocí stojánkového a křidélkového úhlooměru. Poloměr špičky břitové destičky byl změřen díky dílenskému mikroskopu, jehož součástí byly šablony s velikostmi poloměrů. Výsledek měření je vidět v následující tabulce.

Tabulka 2 - Geometrie nástroje

úhel nastavení hlavního ostří - κ_r	91°
úhel špičky - ϵ_r	85°
úhel čela - γ	6°
úhel hřbetu - α	6°
úhel břitu - β	78°
sklonu ostří - λ	0°
poloměr špičky VBD - r_ϵ	0,7

7.3 Materiál obrobku pro experiment

Pro experiment byl použit materiál ČSN 11 110. U tohoto materiálu je zaručená dobrá obrobitelnost a lámavost třísky, díky většímu obsahu síry, která je vázaná zvýšeným obsahem manganu.

Tato takzvaně automatová ocel má pevnost v tahu 360-530 MPa a je vhodná na výrobu méně namáhaných strojních dílu, především pro součásti vyráběné na automatech. Hodí se na výrobu hřídelů, čepů, kolíků, šroubů a matic. [8,12]

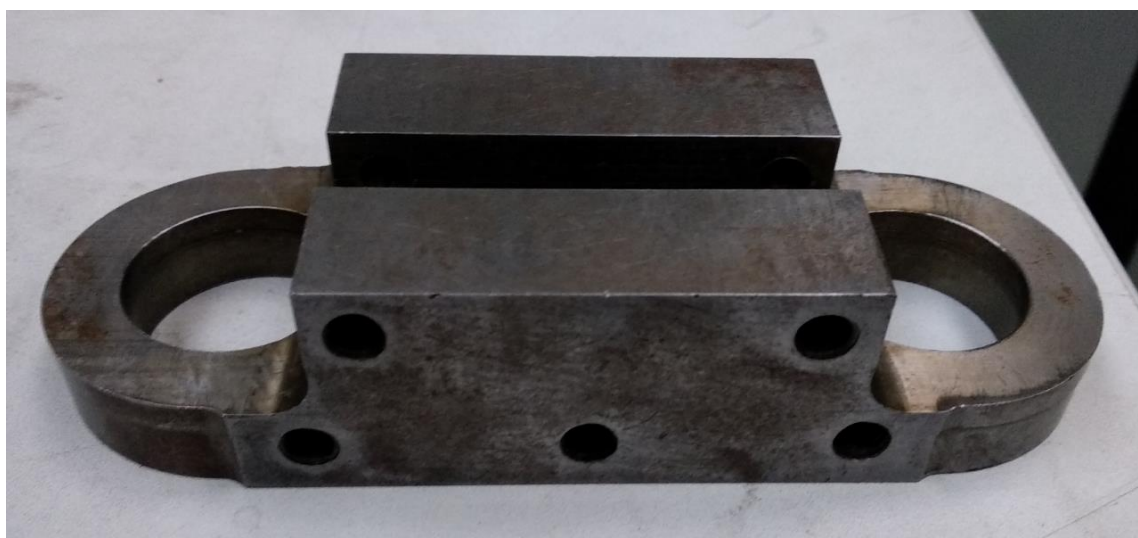
Tabulka 3 – Chemické složení materiálu ČSN 11 110 [12]

Obsah prvků	C	Mn	Si max.	P max.	S
	0,07-0,16 %	0,70-1,10%	0,40%	0,10%	0,15-0,25%

7.4 Dynamometrické zařízení

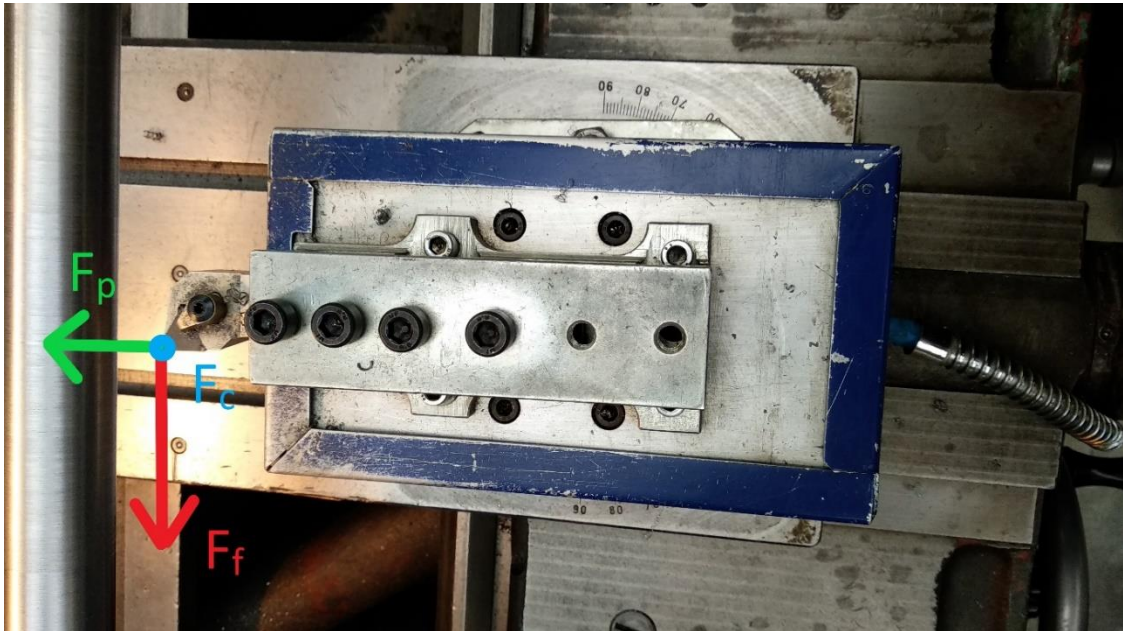
Pro měření řezných sil byl použit třísložkový odporový dynamometr, který byl nainstalován na daném stroji a propojen s počítačem, do kterého se hodnoty rovnou zapisují a jsou připraveny k dalšímu zpracování.

Snímačem tohoto dynamometru jsou odporové tenzometry, které jsou nalepeny na tělesu (obr.20). Vysvětlení principu tohoto dynamometru je k nalezení v kapitole 5.2.1.



Obrázek 21 – Těleso k měření tenzometrickým dynamometrem při soustružení

Protože se měří síly působící na soustružnický nůž, nástroj je připevněn k deformačnímu tělesu (obr.21) a následně upnut k soustruhu, jak je vidět na následujícím obrázku 22.



Obrázek 22 – Připevnění soustružnického nože k dynamometru.

7.5 Volba parametrů měření

Ještě před zahájením samotného experimentu je důležité si určit, jaké parametry řezného procesu jsou konstantní a které jsou kontrolované. Kvůli hledané závislosti velikosti měrného řezného odporu na řezné rychlosti, šířce a tloušťce odřezávané vrstvy se nabízí tato volba kontrolovaných faktorů:

- Posuv na otáčku f [mm]
- Řezná rychlost v_c [m/min]
- Hloubka řezu a_p [mm]
- Nástrojové úhly
- Řezné prostředí
- Druh materiálu
- Strojní a nástrojové vybavení

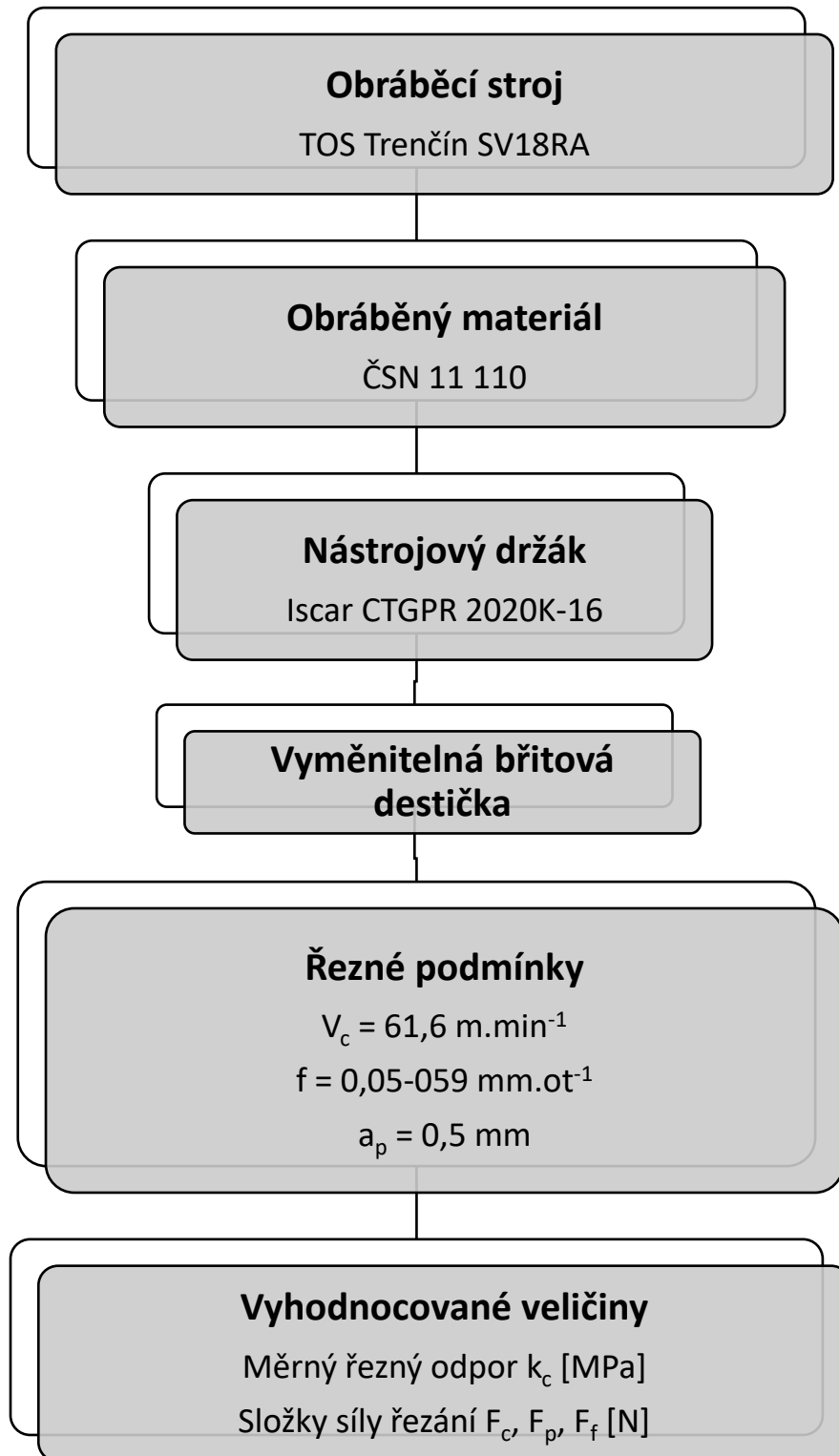
Pro experimentální část práce byl jako kontrolovaný parametr zvolen posuv na otáčku f .

Konstantní bude hloubka řezu a_p spolu s řeznou rychlostí v_c . Z konstantní řezné rychlosti je zřejmé, že otáčky obrobku a průměr obráběné plochy zůstávají po dobu měření neměnné.

Zbylé parametry, které ovlivňují řezný proces, byly zvoleny jako konstantní. Jde například o nástrojové úhly na soustružnickém noži či břitové destičce. Aby toto tvrzení bylo pravdivé, je důležité, aby se na břitové destičce nevytvářel nárůstek. Nárůstek by změnil geometrii nástroje a tím by nebyla dodržena podmínka, že geometrie nástroje je konstantní parametr.

Mezi konstantní parametry patří také materiál obrubku, protože pro experiment byl použit pouze jeden druh materiálu. Další důležitou podmínkou pro splnění je povrch materiálu. Proto je nutné provést přerovnění povrchu materiálu, aby byl na celém obrobku stejný a nerovnosti povrchu neovlivňovaly naměřené hodnoty. Ostatní stálé parametry jsou například stroj, upnutí nástroje do dynamometru, apod.

7.6 Schéma navrženého experimentu



8 Zpracování a vyhodnocení experimentu

Tato část bakalářské práce se zabývá vyhodnocením experimentu.

8.1 Návrh řezných podmínek

Velikosti konstantních parametrů a intervaly kontrolovaných parametrů byly určeny na základě předchozích kapitol a možnostech dostupné techniky a materiálů. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole 6.5, kontrolovaným parametrem byl posuv na otáčku f . Soustruh, na kterém experiment probíhal, měl následující interval velikostí posuvů $f = \langle 0,05 - 0,59 \rangle$ [mm/ot]. Tento interval byl rozdělen na 15 hodnot, které rostly od nejmenšího možného posuvu po největší, jak je vidět v následující tabulce 4.

Další parametry byly po celou dobu měření konstantní. Určení řezné rychlosti v tomto případě omezuje průměr obrobku a maximální otáčky stroje. Průměr obrobku byl 35 mm a jeho otáčky byly zvoleny 560 m/min , což odpovídá řezné rychlosti $v_c \doteq 50 \text{ m/min}$

Posledním parametrem, který lze měnit, byla hloubka řezu. Pro úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 91^\circ$ a velikosti zaoblení špičky destičky $r_\varepsilon = 0,7 \text{ mm}$, byla zvolena hloubku řezu $a_p = 0,5 \text{ mm}$.

Tabulka 4

Plán experimentu			
Měření	f [mm/ot]	a_p [mm]	v_c [m/min.]
1	0,05	0,5	61,5
2	0,088		
3	0,127		
4	0,175		
5	0,2		
6	0,243		
7	0,28		
8	0,31		
9	0,35		
10	0,4		
11	0,43		
12	0,47		
13	0,51		
14	0,56		
15	0,59		

9 Realizace experimentu

Praktická část bakalářské práce proběhla na ČVUT v Praze. Na stroji TOS TRENČÍN SV18 RA, jak je již uvedeno v kapitole 6.

Před samotným zahájením měření bylo nutné připravit pracoviště. První byla nutná kontrola stroje, poté následovala kontrola upnutí obrobku (pro menší házení byl obrobek podepřen hrotem upnutým v pinole koníku).

Dalším krokem bylo odzkoušení a zkontrolování dynamometru, který byl na stroji připevněn namísto nožové hlavy. Pomocí závaží o známe hmotnosti byla ověřena funkčnost a přesnost dynamometru a tím bylo zjištěno, že dynamometr je nastaven a připevněn správně.

Poslední proběhlo zarovnání obrobku na průměr 35mm a zároveň obrobení povrchu materiálu na stejnou jakost. Po výměně dosavadní destičky za novou mohlo měření začít.

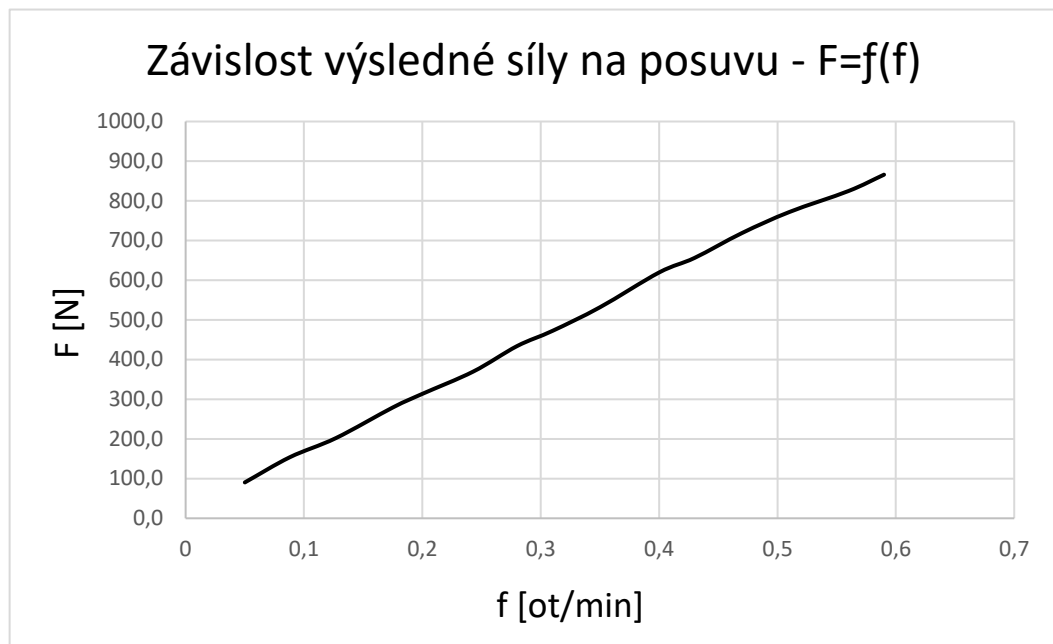
9.1 Naměřené hodnoty

Hodnoty F_p, F_c, F_f , v tabulce 5 jsou průměrem dvou provedených měření, která proběhla při stejných podmínkách a při každém z nich byla použita nová destička. Z těchto tří hodnot byla následně vypočítána výsledná síla F .

Tabulka 5

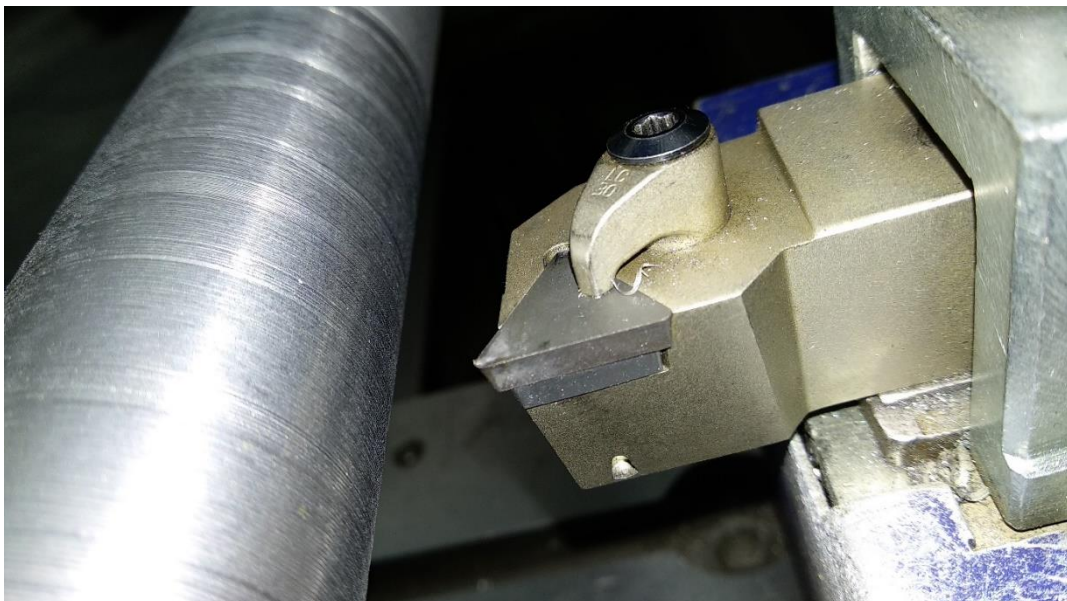
Ø měření				
f[mm.ot]	F_f [N]	F_p [N]	F_c [N]	F -Výsledná síla
0,05	19,1	47,55	74,5	90,4
0,088	32,25	86,8	122,9	153,9
0,127	32,25	117,75	161,2	202,2
0,175	40,85	165,9	220,9	279,3
0,2	40	191,25	245,4	313,7
0,243	39,95	231,25	285,85	369,8
0,28	42,1	275,1	333,1	434,1
0,31	42,95	299,15	363,2	472,5
0,35	47,3	344,7	402,3	531,9
0,4	49,45	411,75	460,3	619,6
0,43	42,55	437,55	487,4	656,4
0,47	44,7	486,55	527,35	718,9
0,51	40,1	516,9	571,9	771,9
0,56	27,5	552,4	612	824,9
0,59	26,4	583,4	639,5	866,0

Výsledná síla rostla lineárně s posuvem, jak bylo předpokládáno. Tento růst neovlivnila ani posuvová složka, která měla od hodnoty posuvu 0,4 ot/min klesající charakter.



Graf 1

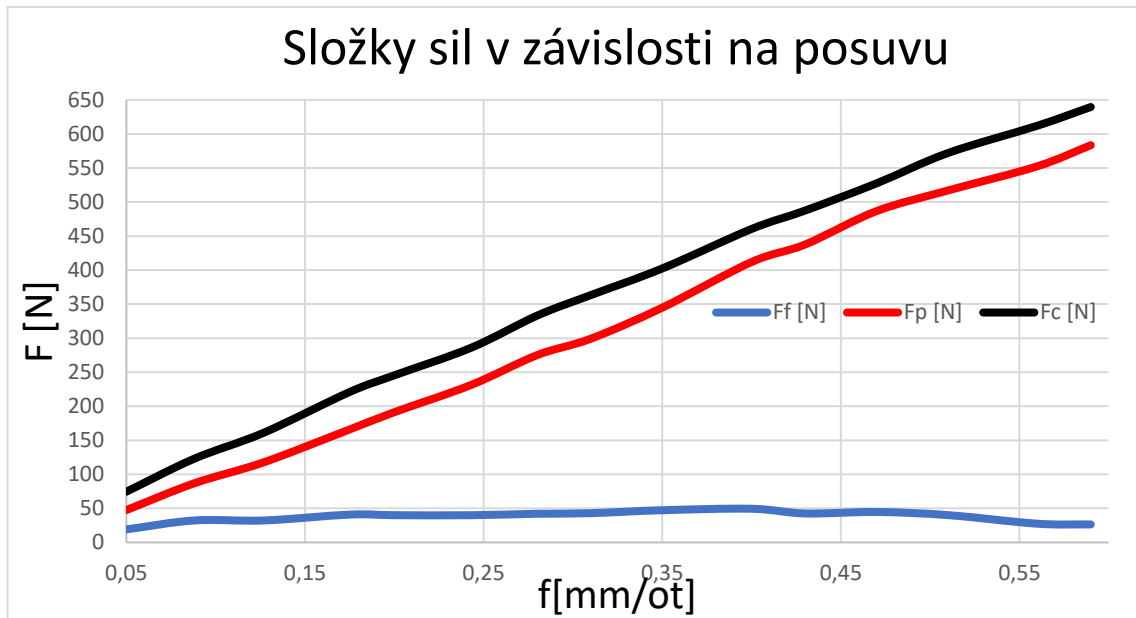
Během experimentu byl pozorován vznik nárůstku, který se vytvořil při velikosti posuvu 0,127 mm/ot, který byl nadále stabilní do 0,35 mm/ot a poté se od 0,47 začal zvětšovat. Nárůstek lze vidět na obrázku 23.



Obrázek 23 - VBD s nárůstkem

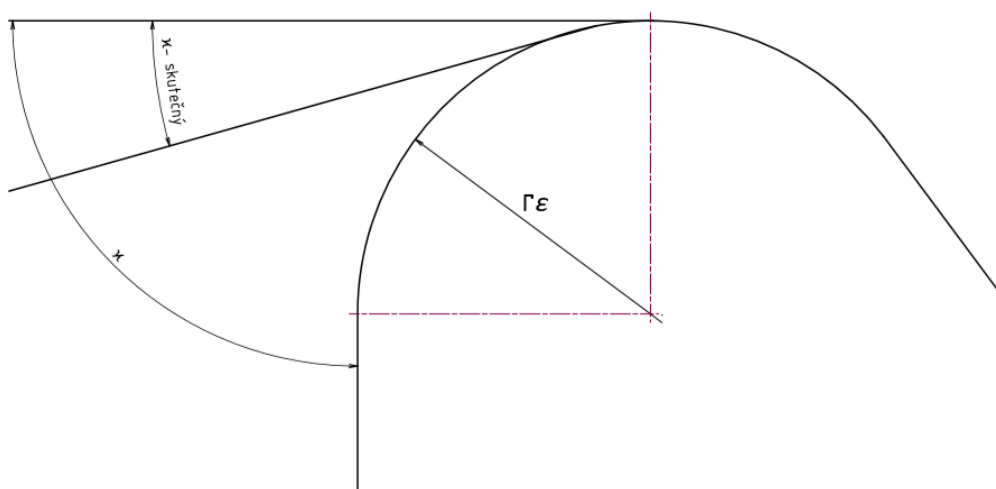
9.2 Vyhodnocení experimentu

Zde lze vidět grafické porovnání velikostí sil při různých posuvech. Grafu 2 zobrazuje, jak malá byla posuvová síla v porovnání se silou řeznou a pasivní.



Graf 2

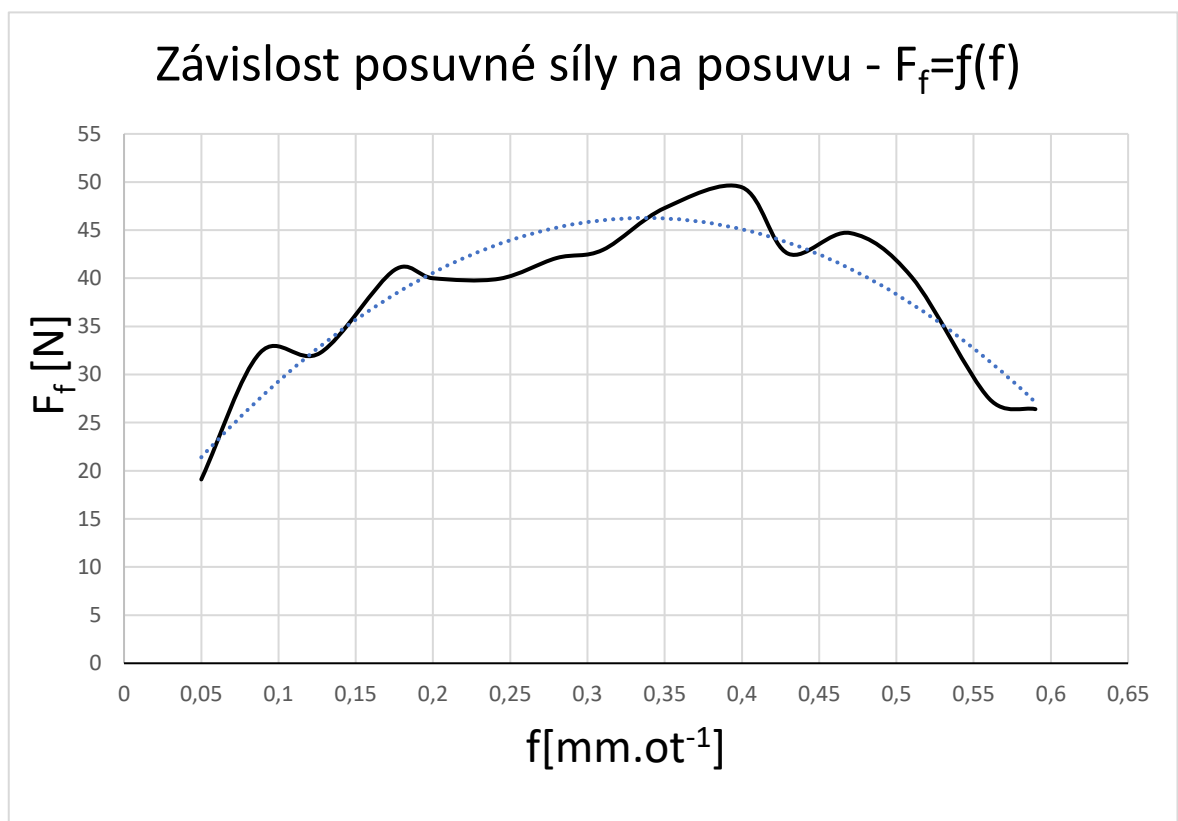
Poměr sil $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,85 : 0,1$, který vyšel z průměru naměřených sil, lze odůvodnit především velikostí poloměru břitové destičky. Rádus břitové destičky byl v tomto případě výrazně větší ve srovnání s hloubkou řezu. Rádus tak zcela změnil úhel nastavení hlavního ostří, jak lze vidět na obrázku 24. Úhel nastavení byl ve skutečnosti mnohonásobně menší, čímž se výrazně změnil poměr sil, a to tak, že pasivní síla mnohem větší a posuvová menší.



Obrázek 24 - Změna úhlu nastavení způsobená velikostí břitové destičky

9.2.1 Posuvová síla

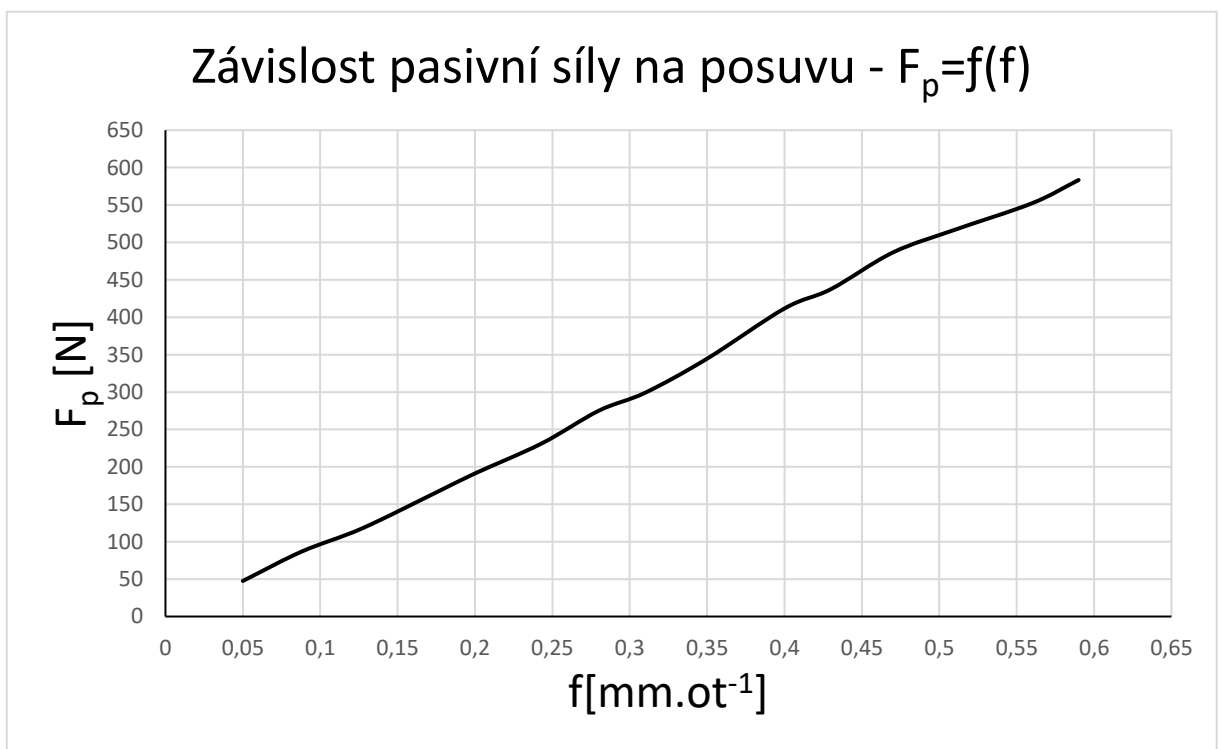
Na grafu 3 lze pozorovat průběh síly v axiální směru v závislosti na měnícím se posuvu. Lze také vidět předpokládaný růst posuvové síly s posuvem do velikosti 0,4 mm/ot. Poté začala posuvová složka síly klesat s nadále rostoucím posuvem. Toto zjištění nebylo potvrzením teoretického úsudku, že spolu s rostoucím posuvem roste i axiální složka síly. Tuto skutečnost mohlo ovlivnit vytvoření nárůstku a následně jeho zvětšení. Nárůstek zvětšil poloměr špičky a tím začala klesat posuvová síla, jak je vysvětleno výše, což lze pozorovat na grafu.



Graf 3

9.2.2 Pasivní síla

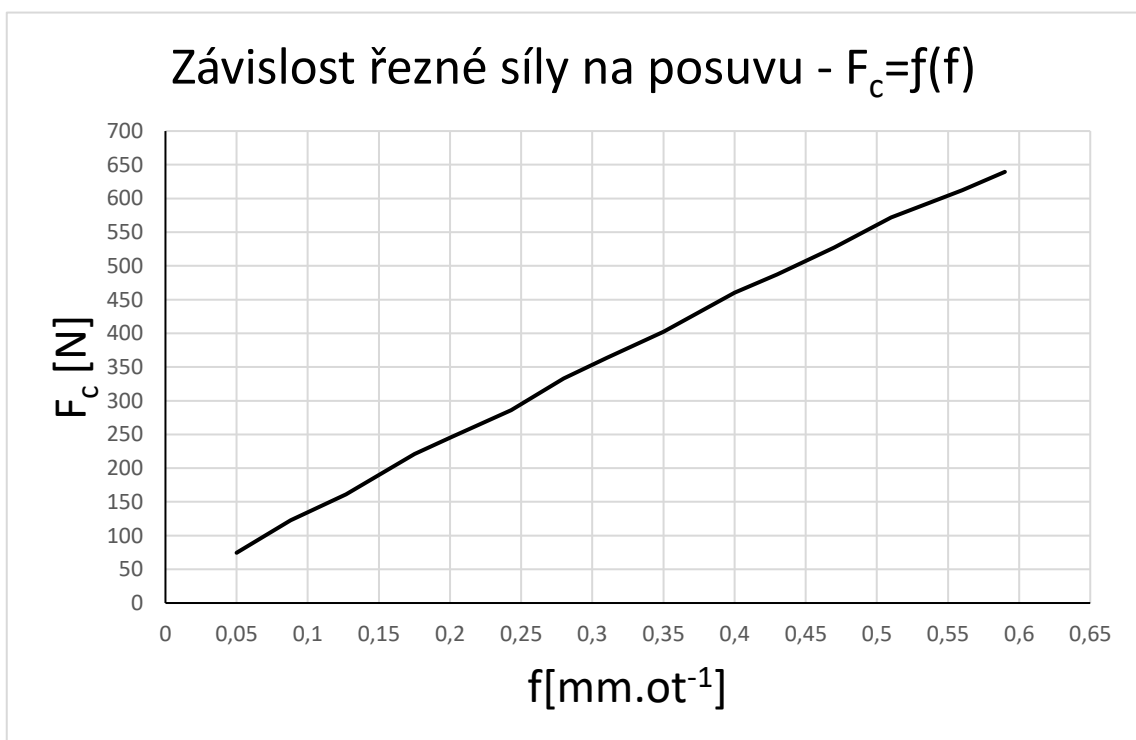
Na grafu 4 závislosti pasivní síly s posuvem můžeme pozorovat lineární růst s posuvem, jak bylo předpokládáno. Velké hodnoty byly odůvodněny geometrií. Tuto sílu by mohly ovlivňovat vzniklé vibrace, protože působila ve směru nejmenší ztuhosti S-N-O. Vibrace by se mohly tvořit najetím břitu do nerovností vzniklých např. nehomogenitou materiálu nebo najetím do předchozího vzoru soustružení. Tyto skutečnosti byly eliminovány zejména zarovnáním povrchu před začátkem měření.



Graf 4

9.2.3 Řezná síla

Na grafu 5 lze vidět téměř stejný průběh jako u grafu pasivní složky. Spolu se zvětšujícím se posuvem roste řezná síla. Dle grafu neovlivnil vznik nárůstku stoupající tendenci řezné síly. Lze pouze odhadovat, zda by se nepatrně mohla zvětšit řezná síla po zvětšení nárůstku. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, velký vliv na řeznou sílu mělo řezné prostřední. Pokud by tedy byla použita řezná kapalina, zmenšila by tření mezi břitem a obrobkem a tím zároveň i řeznou sílu.



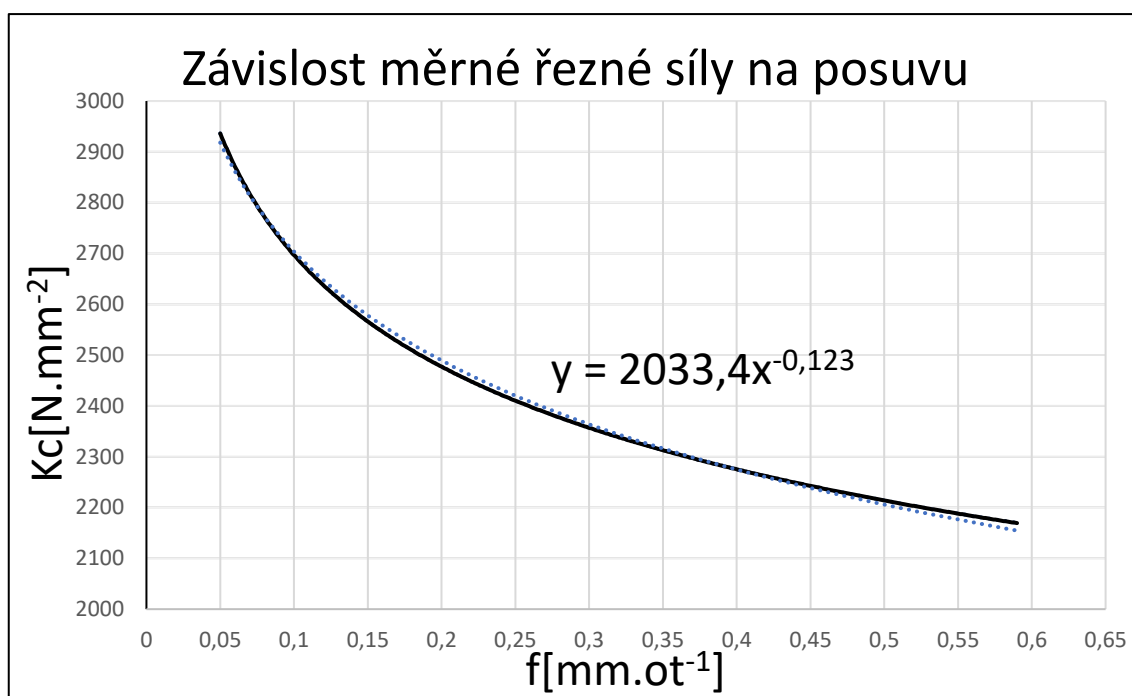
Graf 5

9.2.4 Měrný řezný odpor

Tabulka 6

Měrná řezná síla		
f[mm.ot]	A _b [mm ²]	k _c [N.mm ⁻²]
0,05	0,025	2980
0,088	0,044	2793,1818
0,127	0,0635	2538,5827
0,175	0,0875	2524,5714
0,2	0,1	2454
0,243	0,1215	2352,6749
0,28	0,14	2379,2857
0,31	0,155	2343,2258
0,35	0,175	2298,8571
0,4	0,2	2301,5
0,43	0,215	2266,9767
0,47	0,235	2244,0426
0,51	0,255	2242,7451
0,56	0,28	2185,7143
0,59	0,295	2167,7966

Tabulka 6 obsahuje vypočítané hodnoty měrné řezné síly, průřezy odebírané třísky a závislost k_c na f . Na grafu 6 lze pozorovat vliv posuvu respektive průřez třísky na k_c a zároveň graf ukazuje, že při posuvu 0,05 je měrný řezný odpor o 800 MPa vyšší než při posuvu 0,59. Je tedy možné konstatovat, že poloměr špičky ovlivnil měrný řezný odpor změnou úhlu nastavení, jak je uvedeno v kapitole 3.3. Je tedy možné, že měrná řezná síla byla větší než kdyby byl úhel nastavení 91° , který byl původně uvažován.



Graf 6

Tato část experimentu potvrzuje poznatky shrnuté v části rešerší. Konkrétně jev, kdy se při zmenšování velikost třísky zároveň zvětšuje měrný odpor a naopak. Pokud by proběhla další měření se stejnými parametry v rozdílném řezném prostředí či s odlišnou geometrií nástroje, jejich průběh by měl být stejný pouze s jinými hodnotami měrného řezného odporu.

10 Závěr

Bakalářská práce se zabývala silami a řezným odporem při soustružení. Hlavním úkolem této práce bylo určení měrné řezné síly a její vliv na obrábění. Práce obsahuje shrnutí informací o řezných silách při soustružení, vlivech, které způsobují a parametrech, které je ovlivňují. Z odborné literatury bylo zjištěno několik faktorů ovlivňující řezné síly a měrnou řeznou sílu. Kromě vlastností materiálu a řezných podmínek se jedná například o řezné prostřední či vlastnosti nástroje. Vzhledem k teoretickým poznatkům je experimentální část zaměřena na řezné síly v závislosti na posuvu.

Vyhodnocení experimentu potvrdilo popsanou teorii, tedy že nejvyšší hodnoty měrného řezného odporu jsou při minimální tloušťce odřezávané vrstvy (respektive při minimálním posuvu) a s jejím zvětšováním klesají. Pro materiál ČSN 11 110 vyšel měrný řezný odpor $y = 2033,4 f^{-0,123}$.

Jak již bylo zmíněno výše, měrná řezná síla nezávisí jen tloušťce odřezávané vrstvy, ta je pouze jedním z faktorů. Závisí i na obráběném materiálu, řezné rychlosti, úhlu řezu, úhlu nastavení či dalších parametrech. V budoucnu by tedy mohli být provedeny další experimenty zaměřené na zbylé faktory ovlivňující řezný proces.

11 Zdroje

- [1] *Měření složek síly řezání* [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- [2] *Vibrace při obrábění kovů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27465
Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- [3] *Přímé měření síl a momentů* [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [4] KAFKA, Jindřich a Martin VRABEC. *Technologie obrábění: návody ke cvičení*. Vyd. 3. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-03434-8.
- [5] BRYCHTA, Josef. *Výrobní stroje obráběcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0237-6. BRYCHTA, Josef. *Výrobní stroje obráběcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0237-6.
- [6] TUHOST TECHNOLOGICKÉ SOUSTAVY A PŘESNOST A KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_11.pdf
- [7] ZOBL, Martin. *Tvorba metodiky série experimentů pro stanovení vlivu příčného vyklonění vlečeného nástroje na řezný proces* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/handle/11025/4254> Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce Jiří Vyšata
- [8] Třídy ocelí dle ČNS. *Ripra s.r.o* [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://pdms-help.webnode.cz/news/tridy-oceli-dle-csn/>
- [9] RAO, P.N. *Manufacturing Technology Volume 2: Metal Cutting and Machine Tools* [online]. 2013. [cit. 2020-07-02]. ISBN 978-1259029561. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=MCDZAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=\(Specific+cutting+force\)+and+\(specific+cutting+resistance\)+and+\(chip+thickness\)+and+\(feed+rate\)+and+\(turning\)&ots=E7bbq1Bqgi&sig=wti4jrbBlVn-f69LaHqkk9NgaMk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=MCDZAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=(Specific+cutting+force)+and+(specific+cutting+resistance)+and+(chip+thickness)+and+(feed+rate)+and+(turning)&ots=E7bbq1Bqgi&sig=wti4jrbBlVn-f69LaHqkk9NgaMk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [10] RADOVANOVIĆ, M., P. JANKOVIĆ a P. DAŠIĆ. *Experimental determination of cutting force by longitudinal turning of C60E steel* [online]. 2006 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Predrag_Dasic/publication/250916980_Experimental_determination_of_cutting_force_by_longitudinal_turning_of_C60E_steel
- [11] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. [cit. 2019-11-9]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [12] *FS-Ju Feng Special Steel* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.ifs-steel.com/en/steelDetail/DIN-10S20/DIN-10S20.html>

- [13] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [14] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [15] DE VOS, Patrick. Jak je to s řeznými silami ? *Průmyslové spektrum* [online]. , 68 [cit. 2019-11-10]. DOI: 120314. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>
- [16] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [17] FIALA, Zdeněk. *ANALÝZA MĚRNÝCH ŘEZNÝCH SIL PRO NOVÉ OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY A CNC TECHNOLOGIE* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30311592.pdf>. Dizertační práce. VUT. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- [18] SANDVIK Coromant: *Specific cutting force* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/specific-cutting-force.aspx>
- [19] FOJTŮ, Petr. Problematika samobuzeného kmitání při obrábění. *Sborník konference* [online]. 2009, , 15 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>
- [20] SADÍLEK M., DUBSKÝ J., SADÍLKOVÁ Z., PORUBA Z. *Cutting forces during turning with variable depth of cut* [online]. VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Ostrava, Czech Republic, 2015 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213020915001056>
- [21] ISCAR [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3600240&fnum=71&mapp=IS&GFSTYP=M&srch=1>
- [22] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012 [cit. 2020-07-13]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf