ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy

Autor: **Bc. Josef Marek, DiS.**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří Vyšata, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: **2017/2018**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Josef MAREK, DiS.**
Osobní číslo:	**S16N0088K**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu:	**Experimentální ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy**
Zadávající katedra:	**Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Představení podstaty cíle
3. Teoretická východiska
4. Metodika a plán experimentu
5. Vyhodnocení experimentu
6. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **MÁDL, J.: Teorie obrábění. Skripta vysokoškolská, ČVUT Praha, 1989**
- **STANĚK, J., Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043 363-9**
- **PŘIKRYL, Z. , MUSÍLKOVÁ, R. Teorie obrábění. Praha : SNTL, 1982.**
- **MÁDL, J. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění. Praha : ČVUT, 1990.**
- **VLACH, B. Obrábění na číslicově řízených strojích. Praha : SNTL, 1978.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Vyšata, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Josef Skleničk**a
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2017

Prohlášení o autorství:

Předkládám tímto k posouzení a k obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne…….. ……..

podpis studenta

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Vyšatovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě práce a za odborné rady. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Josefu Skleničkovi, Ph.D. a panu Ing. Miroslavu Gombárovi, Ph.D. za pomoc při plánování a statistickém vyhodnocování experimentu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Marek	**Jméno** Josef	
STUDIJNÍ OBOR	N 2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění “		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Ing. Vyšata, Ph.D.	**Jméno** Jiří	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Experimentální ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy		

FAKULTA	strojní	**KATEDRA**	KTO	**ROK ODEVZDÁNÍ**	2018	

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	68	**TEXTOVÁ ČÁST**	52	**GRAFICKÁ ČÁST**	16

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY**	Diplomová práce se zabývá experimentálním ověřením závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy. V rámci této studie je provedena rešerše zaměřená na obdobné práce, na základě které je následně navržen a vyhodnocen experiment. V závěru je provedeno zhodnocení výsledků, které potvrzuje pravdivost dohledané teorie a rozšiřuje ji o oblast velikostí měrného řezného odporu při tloušťce odřezávané vrstvy menší, než je zaoblení ostří nástroje.
KLÍČOVÁ SLOVA	měrný řezný odpor, řezná síla, tloušťka odřezávané vrstvy, zaoblení řezné hrany

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	**Surname** Marek	**Name** Josef	
FIELD OF STUDY	B 2301 " Manufacturing Technology – Machining Technology"		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Ing. Vyšata, Ph.D.	**Name** Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	~~**BACHELOR**~~	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	Experimental Verification of Dependence of Specific Cutting Resistance on Thickness of Cutted of Layer		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Technology of Metal Cutting		**SUBMITTED IN**	2018

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	68		**TEXT PART**	52		**GRAPHICAL PART**	16

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis focuses on experimental validation of relation between cutting force and thickness of cut-off layer. The first part summarizes bibliographic research and there is also a plan and evaluation of the experiment. The next part consists of evaluation of results, which confirmed the theory and also adds new information about the size of cutting force, when thickness of cut- off layer is smaller than rounding of a blade.
KEY WORDS	Specific Cutting Force, Cutting Force, Thickness of cut-off layer, Cutting Edge

Obsah

1 Úvod 4
2 Představení podstaty cíle 5
3 Teoretická východiska 8
3.1 Teorie vzniku třísky 8
3.2 Teorie vzniku tvářené třísky 10
3.2.1 Primární plastická deformace 11
3.2.2 Sekundární plastické deformace 11
3.2.3 Terciální plastické deformace 12
3.3 Řezné síly při soustružení 12
3.3.1 Faktory působící na řeznou rychlost 14
3.4 Měrný řezný odpor 15
3.5 Navrhování a vyhodnocování experimentů DoE 17
3.5.1 Základní rozdělení experimentů 18
3.5.2 Centrální kompozitní plán 18
3.5.3 Kóvání podle DoE normování 18
3.5.4 Základy statistického vyhodnocování experimentů 19
3.5.5 Nástroje pro vyhodnocování statistických experimentů 19
3.5.6 Definice vybraných pojmů statistického plánování experimentu 19
3.6 Související a předchozí práce 21
4 Návrh experimentu 27
4.1 Materiál obrobku pro experiment 27
4.2 Strojní vybavení pro provedení experimentu 29
4.2.1 Stroj Emco MAXXTURN 25 29
4.2.2 Soustružnický nůž 30
4.2.3 Vybavení pro měření řezných sil 32
4.3 Sestavení plánu experimentu 32

4.3.1 Volba plánu experimentu 32
4.3.2 Volba faktorů experimentu 33
4.3.3 Návrh experimentálních řezných podmínek 33
4.3.4 Sestavení plánu experimentu 34
4.4 Vyhodnocení experimentu 35
4.4.1 Statistické vyhodnocení experimentu 37
4.4.2 Vyhodnocení modelu pro a_p = 0,2 mm 40
4.4.3 Validace přesnosti nalezených modelů pro *Fc* 45
4.4.4 Vyhodnocení závislosti *Kc* na *h(a)* 47
5 Závěr 52
6 Seznam použité literatury 53
7 Přílohy 57

Seznam obrázků

Obrázek 1: Závislost kc na $h(a)$ pro ocel a šedou litinu [19] 6
Obrázek 2: Tříska tvářená soudržná [1] 8
Obrázek 3: Tříska netvářená (vlevo), tříska tvářená elementární (vpravo) [1] 9
Obrázek 4: Schéma druhů třísek [1] 10
Obrázek 5: Experimentálně stanovený tvar oblasti OMNO´ [1] 11
Obrázek 6: Skutečný tvar ostří [26] 12
Obrázek 7: Řezné síly při soustružení [24] 13
Obrázek 8: Vliv řezných podmínek na řezné síly [24] 14
Obrázek 9: Určení koeficientu mc[3] 16
Obrázek 10: Velikost měrného řezného odporu pro různé materiály [3] 16
Obrázek 11: Schéma experimentu podle DoE) [28] 17
Obrázek 12: Body obsaženy v centrálním kompozitním plánu [32] 18
Obrázek 13: Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky[1] 22
Obrázek 14: Závislost měrného řezného odporu na vc a δ 23
Obrázek 15: Závislost řezné síly na rychlosti a posuvu [5] 25
Obrázek 16: Závislost řezné síly na velikosti posuvu[6] 25
Obrázek 17: Výkres polotovaru 28
Obrázek 18: CNC soustruh Emco MAXXTURN 29
Obrázek 19: Vyměnitelná břitová destička [34] 30
Obrázek 20: Výsledek měření zaoblení ostří 31
Obrázek 21: Upnutí soustružnického nože do dynamometru 32
Obrázek 22: Nastavení programu DynoWare 36
Obrázek 23: Vyhodnocování řezných sil 36
Obrázek 24: Graf vlivu *f* na hodnotu *Fc* při a_p = 0,2 mm 40
Obrázek 25: Gaussovo rozdělení reziduí pro *Fc* a a_p = 0,2 mm 41
Obrázek 26: Graf vlivu *f* na hodnotu *Fc* při a_p = 0,4 mm 42
Obrázek 27: Gaussovo rozdělení reziduí pro *Fc* a a_p = 0,4 mm 43
Obrázek 28: Graf vlivu *f* a v_c na hodnotu *Fc* při a_p = 1 mm 44
Obrázek 29: Gaussovo rozdělení reziduí pro *Fc* a a_p = 1 mm 45
Obrázek 30: Tloušťka odřezávané vrstvy 48
Obrázek 31: Velikost měrného řezného odporu pro a_p = 0,2 mm 49

Obrázek 32: Velikost měrného řezného odporu pro a_p = 0,4 mm 50
Obrázek 33: Velikost měrného řezného odporu pro a_p = 1 mm 50
Obrázek 34: Velikost měrného řezného odporu pro a_p = 0,2, 0,4 a 1 mm 51

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty exponentu *u* [1] 22
Tabulka 2: Chemické složení oceli 15142 [23] 28
Tabulka 3: Základní parametry stroje Emco MAXXTURN 25 [33] 30
Tabulka 4: Hodnoty kót VBD [33] 31
Tabulka 5: Plán experimentu 35
Tabulka 6: Shrnutí analýzy vhodnosti pro *Fc* a a_p = 0,2, 0,4 a 1 mm 38
Tabulka 7: Analýza rozptylu ANOVA pro *Fc* a a_p = 0,2, 0,4 a 1 mm 39
Tabulka 8: Chyba přizpůsobení modelů pro *Fc* a a_p = 0,2, 0,4 a 1 mm 39
Tabulka 9: Odhady parametrů modelu pro *Fc* a a_p = 0,2 mm 40
Tabulka 10: Odhady parametrů modelu pro *Fc* a a_p = 0,4 mm 42
Tabulka 11: Odhady parametrů modelu pro *Fc* a a_p = 1 mm 44
Tabulka 12: Validační experiment 47

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Protokol o měření geometrie VBD

Příloha č. 2 – Naměřené řezné síly v průběhu experimentu

Příloha č. 3 – Vypočtené hodnoty měrného řezného odporu

Seznam zkratek a použitých symbolů

VBD	Vyměnitelná břitová destička
CNC	Computer Numeric Control (počítačové číslicové řízení)
S-N-O-P	Stroj, nástroj, obrobek, přípravek
DoE	Design of Experiment (návrh experimentu)
ANOVA	Analysis of variance (analýza rozptylu)

AIC_C	Akaikovo informační kritérium
BIC	Bayesovo informační kritérium
RMSE	Střední čtvercová odchylka
DW	Durbin-Watsonův test autokorelace
RO	Rychlořezná ocel
SK	Slinutý karbid
F_f	posuvová složka řezné síly [F]
F_p	pasivní složka řezné síly [F]
F_c,	hlavní složka řezné síly [F]
k_c	měrný řezný odpor [MPa]
k_{c1}	jednotkový měrný řezný odpor [MPa]
a_p	hloubka odřezávané vrstvy [mm]
S	plocha odřezávané vrstvy [mm^2]
h(a)	tloušťka odřezávané vrstvy [mm]
γo	úhel čela [°]
m_c	koeficient vyjadřující intenzitu změny k_c v závislosti na *h(a)*[-]
u	koeficient [-]

1 Úvod

V současné době je ve strojírenském průmyslu kladen velký důraz na výrobu, která má být rychlá, ekonomicky výhodná, ale také přesná a v neposlední řadě co nejvíce šetrná k životnímu prostředí. Proto je velice nutné nejen hledat, ale také využívat moderní stroje, nástroje, nebo nové technologie výroby.

Obrábění patří mezi základní výrobní technologie a to nejen ve strojírenství. Vzhledem k poměrně drahé výrobní technologii je tento způsob opracování v sériové výrobě často nahrazován odléváním, zápustkovým kováním, nebo svařováním. Obrábění ať již klasických, nebo moderních materiálů je však stále velice rozšířeno a v mnoha případech je nenahraditelné. Zejména proto, že žádná jiná výrobní technologie nedosahuje takové přesnosti a jakosti povrchu. Stále se tedy hojně využívá a to zejména při výrobě přesných součástek v automobilovém, leteckém, nebo energetickém průmyslu. S příchodem moderních technologií, tedy počítačem řízených strojů a s využitím moderních nástrojových materiálů, které dovolují velké úběry, nebo vysoké řezné rychlosti dochází ke snížení pracnosti a tím i snížení nákladů při obrábění. Nehledě na tyto skutečnosti je také z hlediska ekonomičnosti výroby velice důležité dodržení dostatečně pevného a tuhého upnutí, využití chlazení, správně zvolený nástrojový materiál, nebo vhodně zvolené řezné podmínky pro dosažení pokud možno optimálního řezného procesu.

Velmi výrazný vliv na obrábění má také materiál obrobku, který musí splňovat určité mechanické, chemické, nebo jiné požadavky dané konstruktérem. Z hlediska obrábění by měl mít dobrou obrobitelnost. Tedy tvořit třísky přijatelného tvaru, dosahovat dobré jakosti obrobeného povrchu, nebo neotupovat nadměrně nástroj. Materiál si volí většinou konstruktér, který by měl mino jiné přihlížet i na jeho obrobitelnost.

Při obrábění působí na břit nástroje řezná síla, pokud je tato síla vydělena plochou odřezávané vrstvy, hovoří se o takzvaném měrném řezném odporu. Ten je závislý na mnoha různých faktorech. Například na řezné rychlosti, hloubce odřezávané vrstvy, geometrii nástroje, materiálu obrobku, nebo na tloušťce odřezávané vrstvy. Podle teorie se měrný řezný odpor snižuje při zvětšování tloušťky odřezávané vrstvy.

Lze tedy formulovat a následně ověřit hypotézu, že zvětšení tloušťky odřezávané vrstvy může pozitivně ovlivnit, tedy snížit měrný řezný odpor. Ověřením této hypotézy se zabývá předložená studie.

2 Představení podstaty cíle

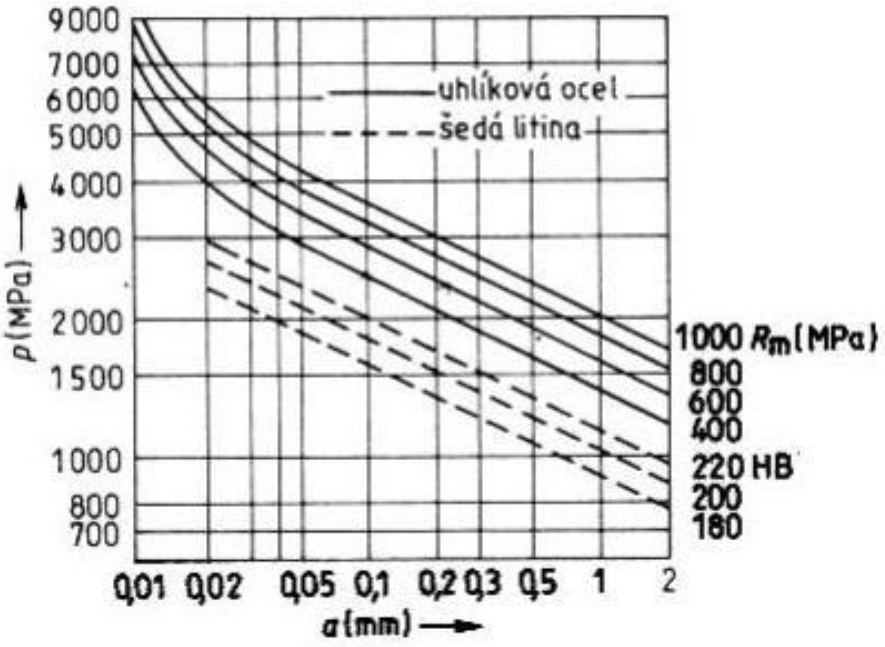
Měrný řezný odpor závisí na mnoha různých faktorech. Jedním z hlavních činitelů, kteří ovlivňují jeho velikost, jsou mechanické vlastnosti obráběného materiálu, jako je například pevnost, tvrdost, nebo houževnatost. Dalším ovlivňujícím činitelem je například použití procesní kapaliny, která může mít i mazací účinky. Nebo naopak obrábění za sucha, tedy bez použití procesní kapaliny. Dalším ovlivňujícím faktorem řezné síly je soustava S-N-O-P. Tedy stroj, nástroj, obrobek a přípravek. Tato soustava by měla mít pokud možno co nejvyšší tuhost.

V praxi je snaha, z hlediska nižšího zatížení stroje a nástroje, měrný řezný odpor minimalizovat. Proto je velice důležité důkladně prozkoumat faktory ovlivňující jeho velikost. Podle dostupné teorie obrábění se měrný řezný odpor snižuje se zvětšující se tloušťkou třísky. To je velice důležité při navrhování řezných podmínek, zejména pak z hlediska optimálnosti řezného procesu. [1]

Často je v praxi snaha obrábět pokud možno celý přídavek najednou. Při dokončovacích operacích je možné tuto zásadu jednoznačně použít. S ohledem na rostoucí náklady na obrábění a s požadavky obrobené plochy, zejména z hlediska drsnosti a přesnosti, je snahou odebrat co nejmenší tloušťku materiálu. Přídavek na obrábění musí zohlednit nepřesnosti předchozí operace, zaoblení ostří, nebo nárůst měrného řezného odporu s poklesem tloušťky odřezávané vrstvy. [20]

Pro hrubování tato zásada většinou neplatí. Někdy může být výhodnější odebrat materiál na více třísek a to z hlediska menších řezných sil. Při odebírání velkého množství materiálu je zpravidla nutné snížit posuv a tím i tloušťku třísky. To vede ke zvýšení měrného řezného odporu. Počet požadovaných třísek, z hlediska snížení měrného řezného odporu a tím i snížení zatížení stroje a nástroje vyplývá z následujícího obrázku (viz Obrázek 1). [20]

Následující obrázek ukazuje, jak se mění velikost měrné řezné síly se zvětšující se tloušťkou odřezávané vrstvy. Graf byl vytvořen pro dva materiály, pro ocel a šedou litinu. Hodnoty měrného řezného odporu pro ocel jsou v grafu zakresleny souvislou čarou, přerušovanou čarou jsou znázorněny hodnoty pro šedou litinu. Jak je z grafu patrné, nejvyšších hodnot je dosaženo při minimální tloušťce odřezávané vrstvy, s jejím zvětšováním se měrný řezný odpor prudce snižuje. [19]



Obrázek 1: Závislost k_c na *h(a)* pro ocel a šedou litinu [19]

Podstatou této práce je tedy prověření výše popsané závislosti. Ještě před naplánováním samotného experimentu je důležité prostudovat literaturu, která se zabývá touto problematikou. Dalším krokem je naplánování a provedení experimentu. Velice důležitou částí je následné vyhodnocení experimentu a shrnutí výsledků.

Na základě přínosu kapitoly s názvem Teoretická východiska je možno navrhnout plán experimentu. Ten by měl být s největší pravděpodobností realizován v prostorách univerzity na CNC soustruhu, který je vybaven dynamometrem. Experiment je vhodné realizovat při podélném soustružení, kdy se bude měnit posuv na otáčku a tím i tloušťka odřezávané vrstvy. Aby byl minimalizován vliv nepřesností při provedení a následném vyhodnocení experimentu, je nutné měření každého bodu několikrát zopakovat. Velice zajímavé by mohli být naměřené výsledky před a při dosažení tloušťky třísky rovnající se zaoblení břitu. Při experimentu není možné měřit přímo měrný řezný odpor, musí být měřena hlavní složka řezné síly, která se následně přepočte na měrnou řeznou sílu. Velice důležité je sledovat tvorbu nárůstku, který mění geometrii ostří nástroje a tím ovlivňuje velikost řezných sil. Vyhodnocení experimentu proběhne statisticky a graficky. Posledním krokem je shrnutí a zhodnocení výsledků.

Jak již bylo výše uvedeno, tloušťka odřezávané vrstvy je pouze jedním z faktorů ovlivňujícím měrný řezný odpor. V budoucnu by mohly být provedeny další experimenty,

zaměřené na zbylé faktory ovlivňující řezný proces. Všechny výsledky mohou být použity pro vytvoření aplikace, která by umožňovala navržení nejvýhodnějších řezných podmínek pro výrobu daného obrobku.

V dostupné literatuře prozatím nebylo nalezeno, jak se chová měrný řezný odpor, pokud se tloušťka třísky rovná, nebo je menší než zaoblení ostří nástroje. Jedním z hlavních úkolů této studie je tedy najít literaturu, která se zabývá tímto problémem a porovnat ji s vyhodnocenými výsledky experimentu.

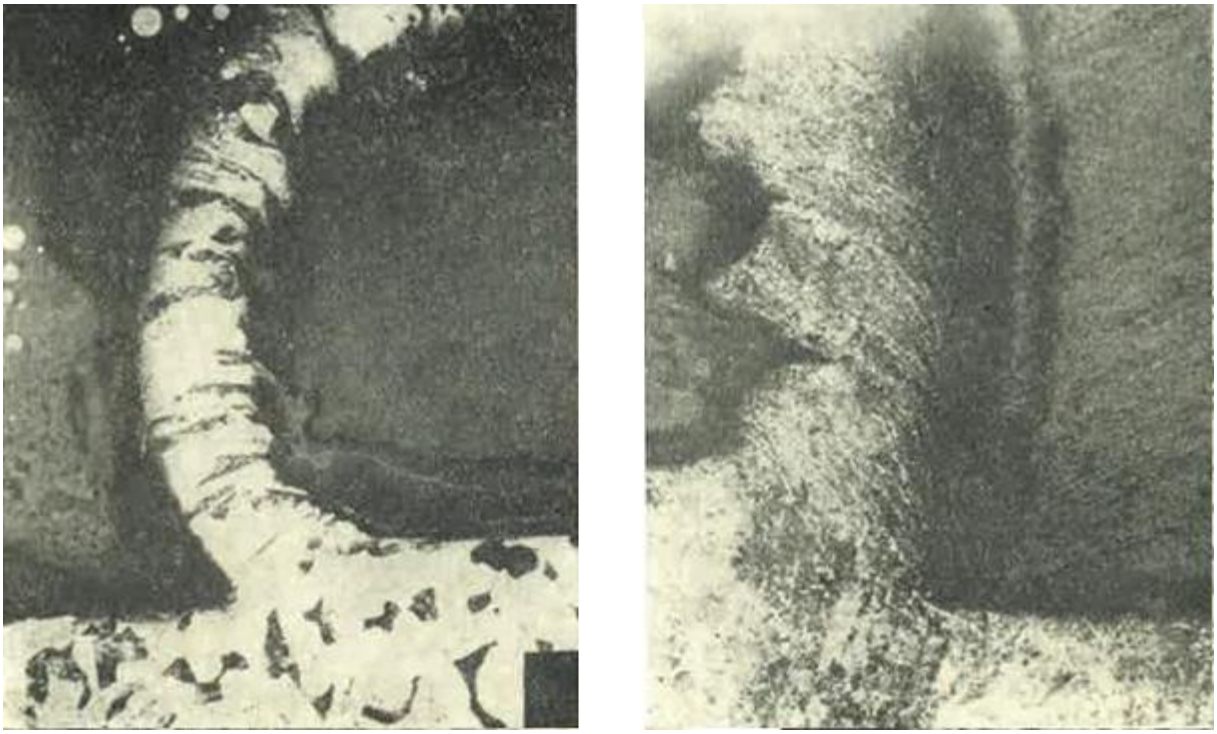
3 Teoretická východiska

Cílem této kapitoly je dohledat a zpracovat literaturu zabývající se výše popsanou problematikou. Nejprve je zpracována část zabývající se teorií vzniku třísky při obrábění, dále pak popis řezných sil, měrného řezného odporu a faktory, které ovlivňují jeho velikost, zejména vliv tloušťky odřezávané vrstvy. V závěru kapitoly je provedena rešerše zaměřená na podobné práce a jejich výsledky. Z této části následně vychází plán experimentu.

3.1 Teorie vzniku třísky

Aby bylo možné zjistit vliv tloušťky odřezávané vrstvy na měrný řezný odpor, je nutné nejprve prozkoumat a popsat teorii vzniku třísky, protože právě tvorba třísky má zásadní vliv na velikost řezných sil a tedy i na velikost měrného řezného odporu. Hlavním cílem této kapitoly je tedy popsání výše zmíněné teorie.

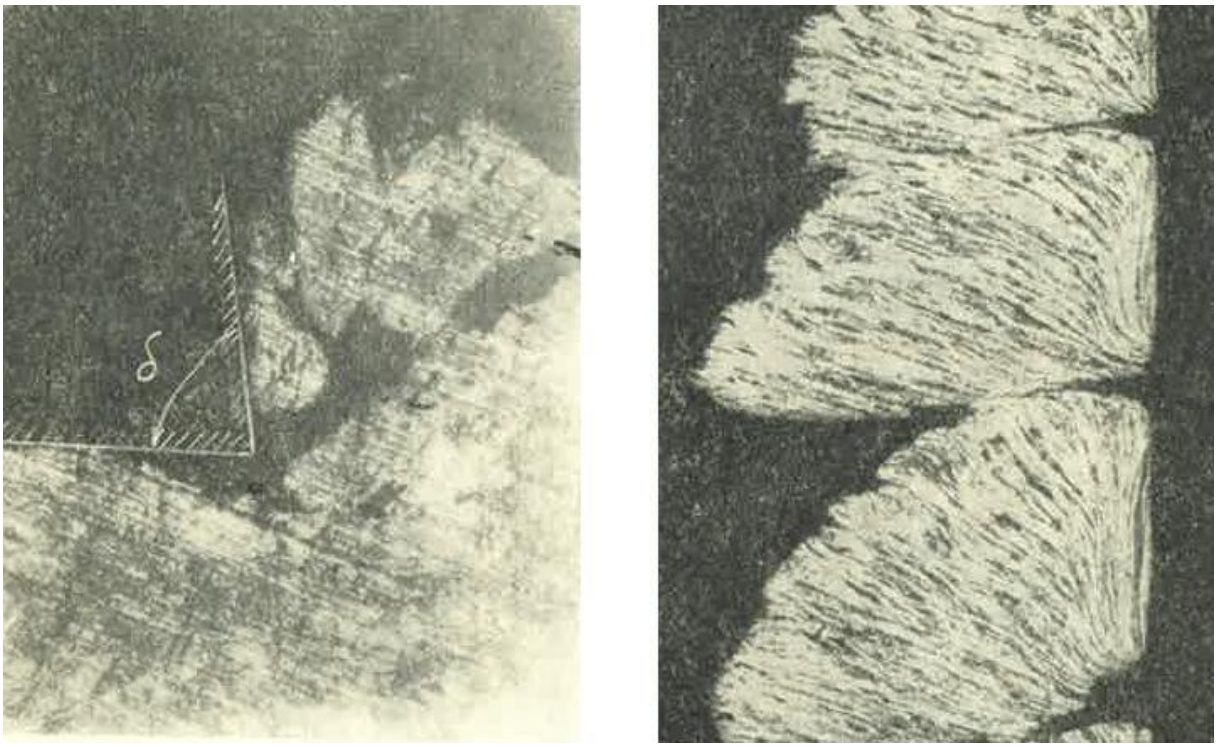
Proces obrábění, ať již krystalických, nebo amorfních materiálů probíhá za stálého působení silového zatížení odřezávané vrstvy řezným nástrojem. U krystalických materiálů, jako jsou kovy, dochází při tvorbě třísky k tváření. Proto se tato tříska nazývá tvářená. Takto vzniklá tříska je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 2). [1]



Obrázek 2: Tříska tvářená soudržná [1]

Při obrábění nekrystalických látek, jako jsou plasty, sklo, nebo dřevo, dochází k oddělování třísky křehkým lomem, nebo štěpením. Takto vzniklá tříska nevzniká tedy tvářením a nazývá se netvářená. Netvářená tříska je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 3). [1]

Způsob vzniku tvářené a netvářené třísky se od sebe zásadně liší. V praxi většinou dochází ke vzniku plastických třísek, vzhledem k nejčastěji používaným obráběným materiálům, které z velké části tvoří kovy. Vzhledem k tomu, že v této práci bude proveden experiment, při kterém bude obráběna ocel, bude zde popsán pouze mechanismus tvorby tvářené třísky. [1]



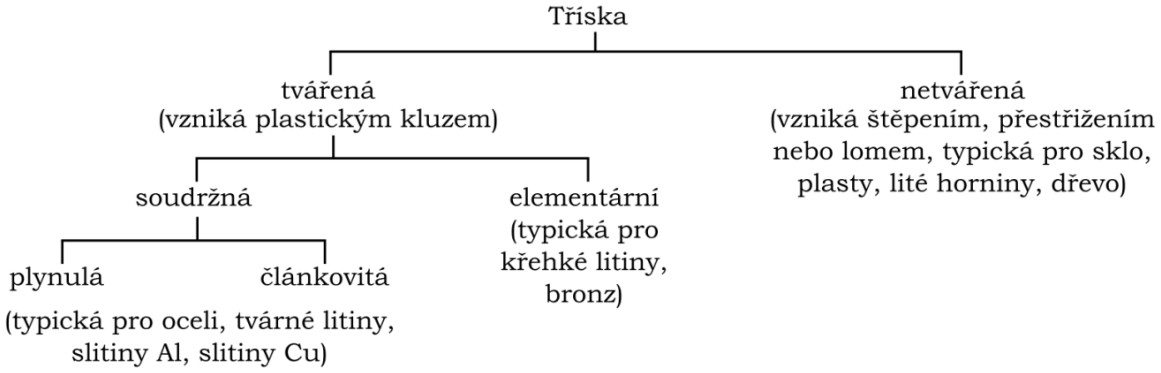
Obrázek 3: Tříska netvářená (vlevo), tříska tvářená elementární (vpravo) [1]

Velikost neboli stupeň plasticity kovů a jejich slitin je závislý především na jejich chemickém složení, na krystalické stavbě a na podmínkách, při kterých je materiál deformován. Tedy na teplotě, na rychlosti, jakou deformace probíhá a na stavu napjatosti materiálu. Vzhledem k velikosti plasticity materiálu tedy dochází při vzniku třísky k menší, nebo větší plastické deformaci. [1]ˇ

Vlivem působení sil břitu nástroje na obráběný materiál „*dochází pod vlivem deformace k porušení soudržnosti (překročení kohezní pevnosti) mezi deformovaným a nedeformovaným materiálem jen v místech vysoké deformační rychlosti a velkých tahových napětí. Je to zpravidla těsně u ostří nástroje. Tímto rozrušením materiálu vzniká obrobená plocha, mezi*

jednotlivými elementy třísky nevede plastický skluz k překročení kohezní pevnosti, a proto zůstávají navzájem spojeny. Takto vytvořenou třísku lze nazvat soudržnou“.[1] Soudržná tříska je vidět na předchozím obrázku (viz Obrázek 2). [1]

Při určitých podmínkách, zejména při nižších teplotách, vysoké rychlosti deformace a napjatosti blížící se všestrannému tahu, předchází překročení kohezní pevnosti velmi malá deformace kluzem. Porušení soudržnosti pak většinou probíhá po celé dělící rovině mezi deformovanou a nedeformovanou částí materiálu. Tímto způsobem vzniká tříska tvářená elementární (viz Obrázek 3). Druhy třísek vznikajících při obrábění jsou na následujícím obrázku (viz Obrázek 4). [1]



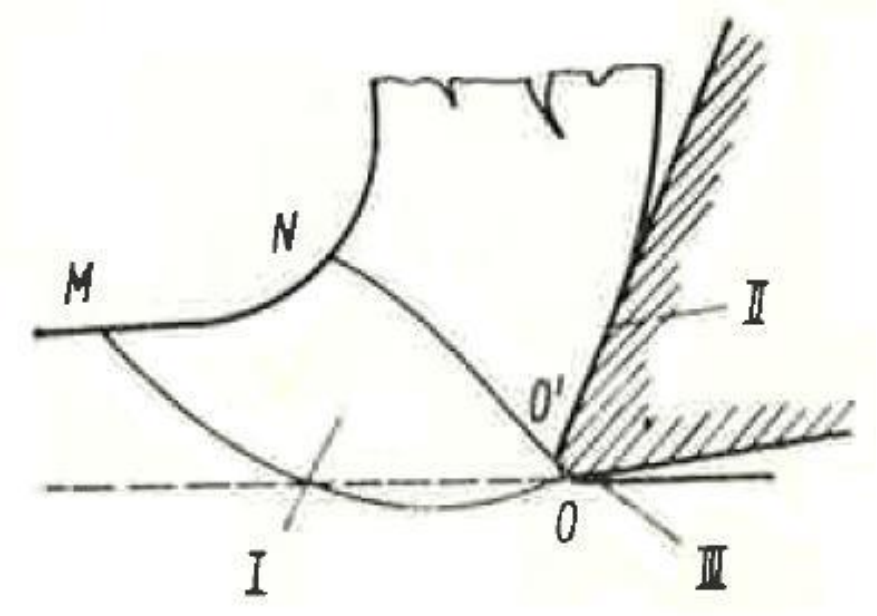
Obrázek 4: Schéma druhů třísek [1]

3.2 Teorie vzniku tvářené třísky

Vzhledem ke skutečnosti, že je plánováno zkoumat velikost měrného řezného odporu při obrábění oceli, předpokládá se vznik tvářené třísky.

Tvorba třísky je zpravidla zkoumána při takzvaném volném ortogonálním řezání. Při tomto způsobu obrábění je hlavní ostří nástroje kolmé na směr hlavního řezného pohybu a délka ostří je větší než šířka odřezávaného materiálu. Experimenty provedené tímto způsobem při obrábění kovů ukazují, že plastická deformace probíhá ve třech následujících oblastech (viz Obrázek 5). [1]

1. Primární plastická deformace I. (v odřezávané vrstvě)
2. Sekundární plastická deformace II. (v povrchových vrstvách styčné plochy třísky s čelem nástroje)
3. Terciální plastická deformace III. (v povrchové vrstvě obrobené plochy)



Obrázek 5: Experimentálně stanovený tvar oblasti OMNO´ [1]

3.2.1 Primární plastická deformace

Na předchozím obrázku (viz Obrázek 5) je vidět experimentálně stanovená oblast primární deformace, její hranice tvoří křivky *OM* a *O´N*. V oblasti primární plastické deformace dochází vlivem působícího napětí ke vzniku kluzných rovin, k plastické deformaci a oddělení třísky. Směr vzniku kluzných rovin je ovlivněn zejména vlastnostmi materiálu, geometrií ostří nástroje ale také velikostí posuvu nebo řezné rychlosti. Tvar a velikost této oblasti výrazně ovlivňuje vznikající třísky. [1]

3.2.2 Sekundární plastické deformace

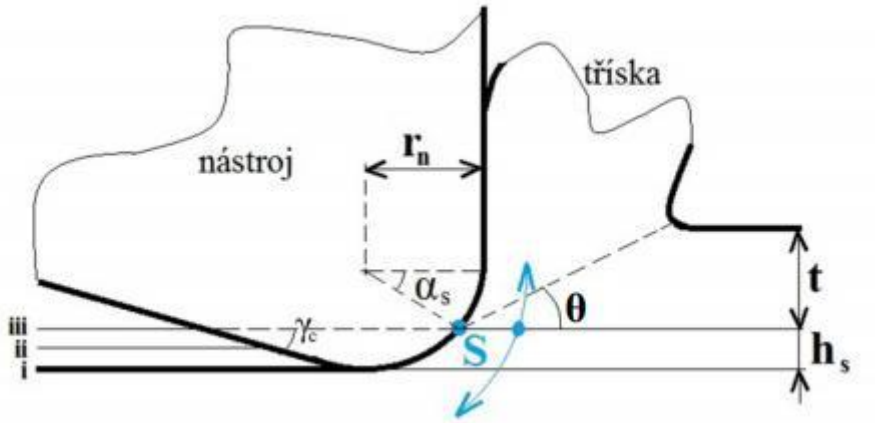
Tříska, která vznikla při primární deformaci, odchází dále po čele řezného nástroje a z velké části svého objemu se již plasticky nedeformuje. V této části dosahuje teplota třísky okolo 10^2°C a tlaky působící na styčnou plochu s čelem nástroje dosahují až 10^4MPa. Na styčné ploše dochází ke tření, které je způsobeno jednak překonáváním mikro nerovnostmi povrchu a jednak překonáváním adheze mezi materiálem břitu a třísky. [1]

Na začátku se uskutečňuje styk břitu a odcházející třísky pouze po vrcholcích mikro nerovností nástroje. Vlivem vysokých teplot a tlaků však při obrábění dochází k plastické deformaci těchto nerovností. Následně dochází k popraskání vrstev kysličníků na povrchu břitu, tím může dojít k navařování za studena a ke vzniku nárůstku. Ten je při obrábění

nežádoucí. V průběhu experimentu je velice důležité sledovat tvorbu nárůstku, protože tím by došlo ke změně geometrie nástroje a k ovlivnění velkosti naměřených sil. [1]

3.2.3 Terciální plastické deformace

K terciální deformaci dochází jednak v odřezávané vrstvě a jednak na povrchu obrobené vrstvy. Tato deformace je způsobena zejména vlivem zaoblení ostří nástroje. Žádné ostří není dokonale ostrá hrana, ve skutečnosti je tvořená válcovou plochou o poloměru v řádech mikrometrů. Následující obrázek ukazuje (viz Obrázek 6), že část materiálu odchází pryč po čele nástroje, ta je označená písmenem t, část materiálu je plastickou deformací zatlačována pod břit nástroje, ta je označena jako h_S. Tato část se nazývá neodříznutá tloušťka odřezávané vrstvy. Jelikož se tak děje při teplotě značně nižší, než je teplota rekrystalizace, dochází ke zpevnění obrobené plochy. [1] Podle literatury [26] je velikost úhlu α_s = 37,6°.



Obrázek 6: Skutečný tvar ostří [26]

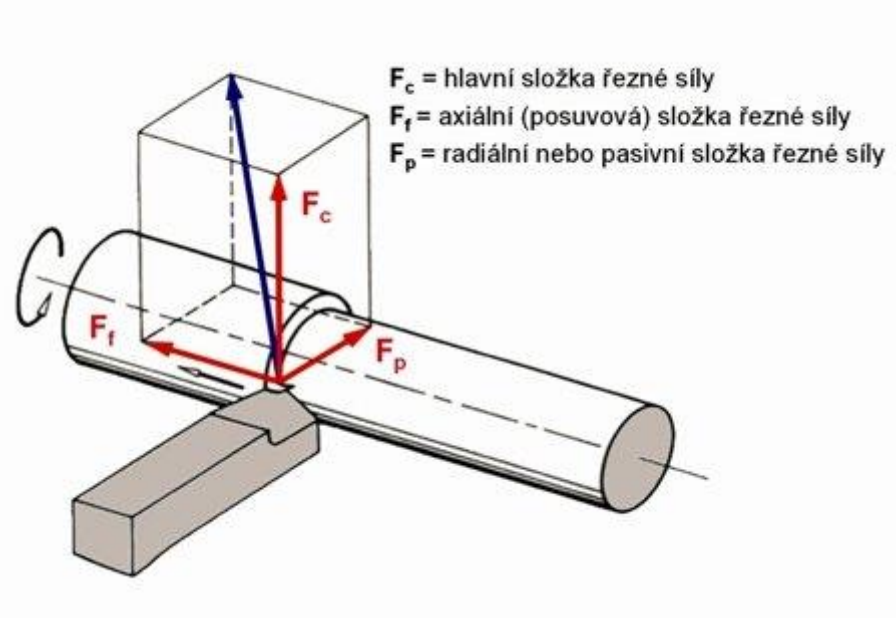
3.3 Řezné síly při soustružení

Při obrábění materiálů je řezný nástroj vtlačován silou do materiálu obrobku. Při tomto procesu vzniká tříska, jak bylo popsáno v kapitole 3.1. Na velikost sil vznikajících při obrábění má největší vliv obrobitelnost materiálu, geometrie ostří nástroje a řezné podmínky.

Řezná síla, která vtlačuje nástroj do materiálu, působí v obecném směru a lze ji rozdělit do tří navzájem kolmých sil. Jedná se o sílu posuvovou F_f, která působí ve směru posuvu, o sílu pasivní F_p ve směru normály k ploše řezu a o sílu F_c, která je kolmá na obě předchozí síly. Všechny tyto síly jsou vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 7). [25]

Hlavní složka řezné síly F_c je definována jako síla ve směru hlavního řezného pohybu. Jedná se o nejdůležitější a největší složku sil při obrábění. Využívá se například pro výpočet

kroutícího momentu, namáhání nástroje, příkonu elektromotoru nebo měrného řezného odporu. [25]



Obrázek 7: Řezné síly při soustružení [24]

Pasivní složka řezné síly F_p je definována jako síla působící v radiálním směru vzhledem k obrobku. Je to síla, která vtlačuje nástroj do záběru s obrobkem. Tato složka řezných sil způsobuje, zejména pak při obrábění štíhlých a dlouhých obrobků, průhyb obráběných součástí. To má za následek vznik chvění a nepřesností při obrábění, zejména z hlediska rozměrů, geometrického tvaru a drsnosti obrobené plochy. Velikost pasivní síly ovlivňuje konstrukci nástroje, způsob upnutí, tvar obrobků, nebo způsob výroby. [25]

Posuvová složka síly F_f působí ve směru osy obrobku. Její velikost ovlivňuje například dimenzování posuvových jednotek strojů, pevnost nástroje, nebo jeho uložení. Zejména pak při využití větších posuvů. Při obrábění středně tvrdých ocelí za běžných podmínek je poměr těchto sil následující: [25]

$$F_c : F_p : F_f = 1 : 0{,}4 : 0{,}25 \quad (1)$$

Celkovou řeznou sílu lze vypočítat podle následujícího vztahu: [25]

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

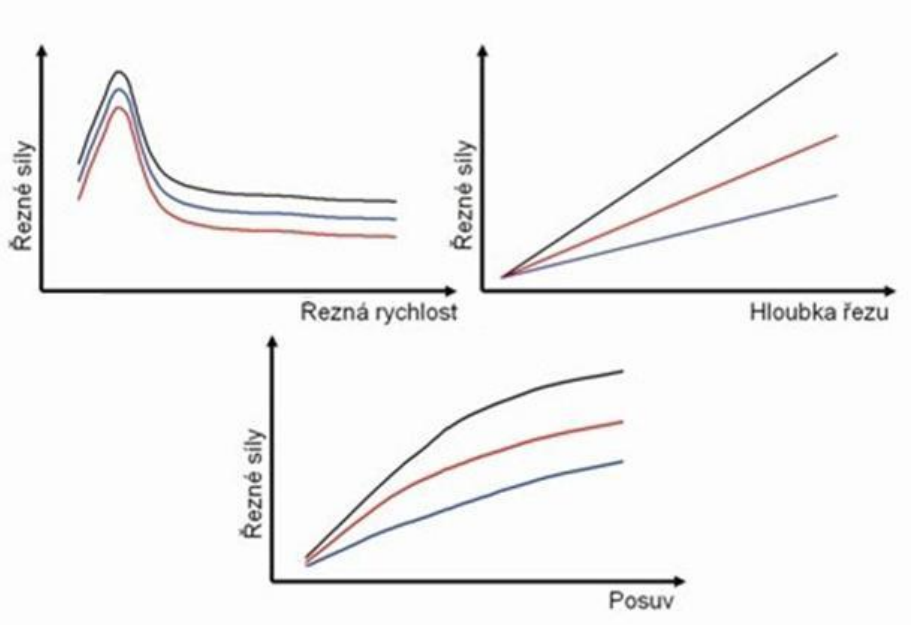
3.3.1 Faktory působící na řeznou rychlost

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících velikost řezných sil je obrobitelnost materiálu. Obrobitelnost je úzce spojena s ekonomikou výroby. Vyjadřuje, za jakých podmínek může být daný materiál obráběn. Snahou je obrábět při pokud možno co nejnižších nákladech a dosáhnout co nejvyšší produktivity. Vhodnost materiálu pro obrábění ovlivňují zejména řezné síly, životnost nástroje, teplota v místě řezu, tvar třísky, nebo integrita povrchu [24].

Jedním z hlavních limitujících prvků při hodnocení obrobitelnosti jsou tedy řezné síly. Tyto síly ovlivňují zejména spotřebu energie při procesu řezání. Při vysokých řezných silách dochází k vysoké spotřebě energie, k opotřebení nástroje, k vylomení řezné hrany, nebo k deformaci obrobku [24].

Řezné síly jsou ovlivněny zejména materiálem obrobku, geometrií břitu a zvolenými řeznými podmínkami. S tvrdostí obráběného materiálu, tedy s odolností vůči deformacím, rostou i řezné síly. Dalším významným faktorem je velikost zaoblení řezné hrany. Se zvětšujícím se poloměrem zaoblení řezné hrany se opět zvyšují řezné síly. Velkou roli hraje v tomto případě také úhel čela nástroje. S pozitivním úhlem čela se řezné síly snižují [24].

Tyto faktory poprvé shrnul německý vědec Victor Kienzl ve svém díle Spezifische Schnittkraefte bei der Metallbearbeitung 1957, byly nazvány jako Kienzlův princip (viz Obrázek 8). Tento obrázek ukazuje vliv posuvu, hloubky řezu a řezné rychlostí na řezné síly. [24]



Obrázek 8: Vliv řezných podmínek na řezné síly [24]

3.4 Měrný řezný odpor

Vzhledem k tématu této práce je vhodné nyní definovat, co je to měrný řezný odpor a jak ho lze určit.

Měrný řezný odpor neboli měrná řezná síla, označovaná jako k_c, je specifická materiálová konstanta. Tato konstanta může být využita například pro výpočet krouticího momentu. Lze ji vyjádřit jako řeznou sílu F_c působící ve směru hlavního řezného pohybu, která je vydělena plochou řezu. Za předpokladu, že je plocha řezu 1 mm^2 a tloušťka odřezávané vrstvy je 1 mm, jedná se o tzv. jednotkový měrný řezný odpor. Ten je označován jako k_{C1}. Velikost měrného řezného odporu se vypočítá podle následujícího vztahu: [3]

$$k_c = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \qquad (3)$$

kde:

k_c ..... měrná řezná síla [MPa]

F_c ..... hlavní složka řezné síly [N]

S ..... plocha odřezávané vrstvy [mm^2]

Při určení měrného řezného odporu u podélného soustružení musí být velikost úhlu čela γ_o =0° a úhel nastavení hlavního ostří 90°. Pokud nejsou dodrženy tyto podmínky, je nutné udělat korekci. Měrný řezný odpor je pak možné vypočítat na základě následující rovnice: [3]

$$k_c = k_{c1} \cdot h^{-mc} \cdot \left(1 - \frac{\gamma o}{100}\right) \text{ [MPa]} \qquad (4)$$

kde:

k_c ..... měrný řezný odpor [MPa]

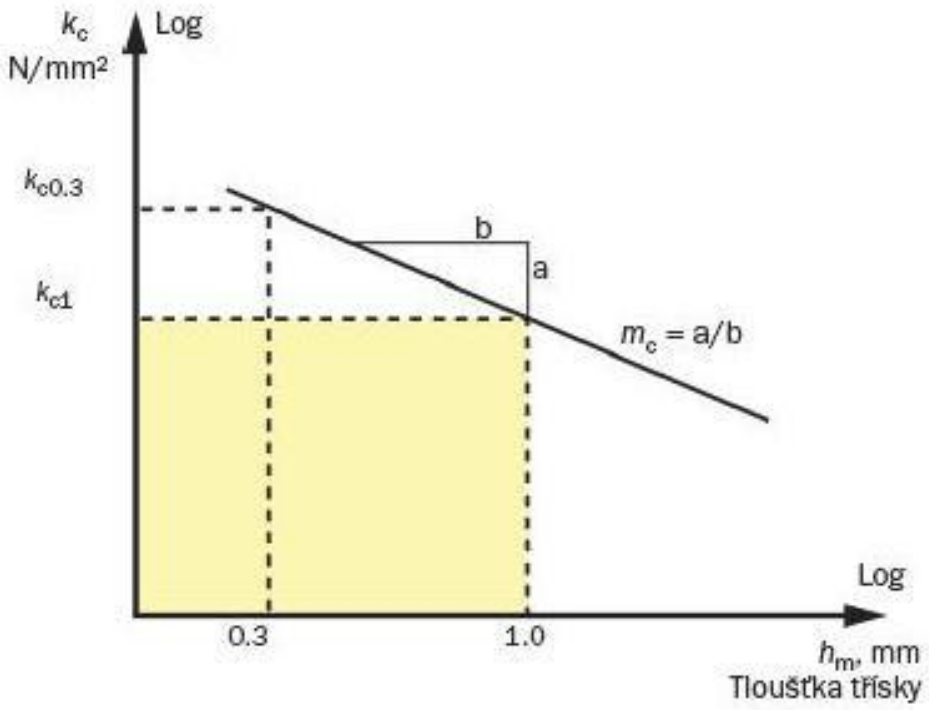
k_{c1} ..... jednotkový měrný řezný odpor [MPa]

h ..... tloušťka odřezávané vrstvy [mm]

γo ..... úhel čela v ortogonální rovině [°]

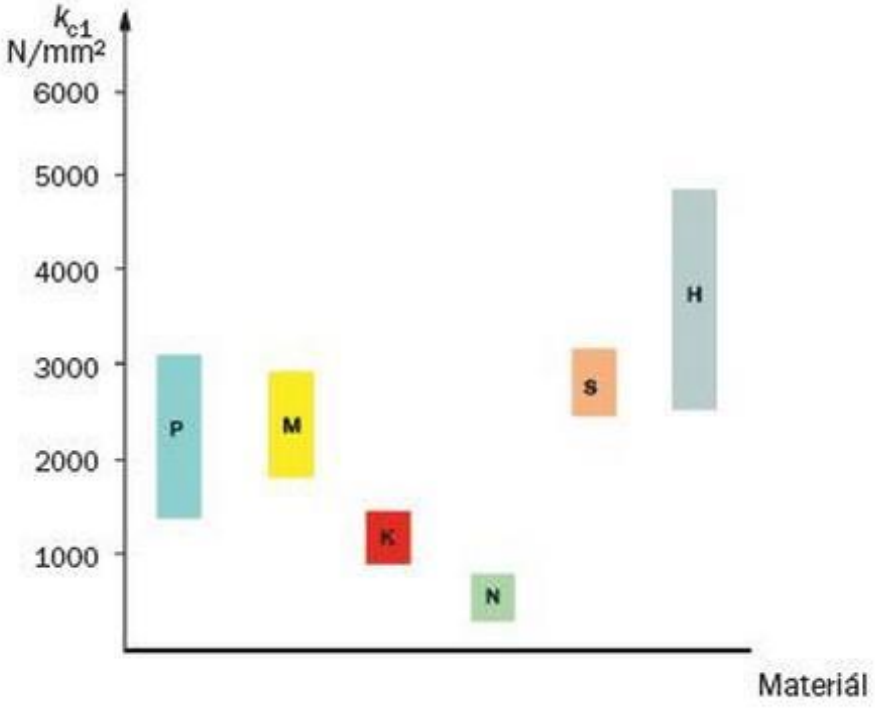
m_c ..... koeficient vyjadřující intenzitu změny měrného řezného odporu v závislosti na tloušťce třísky [-]

Velikost koeficientu m_c je možné určit podle následujícího grafu (viz Obrázek 9).



Obrázek 9: Určení koeficientu m_c [3]

Hodnoty jednotkového měrného řezného odporu pro jednotlivé materiály jsou experimentálně zjišťovány a uváděny v tabulkách nebo grafech. Následující graf (viz Obrázek 10) ukazuje hodnoty K_{c1} pro materiály dle tříd obrobitelnosti. [3]

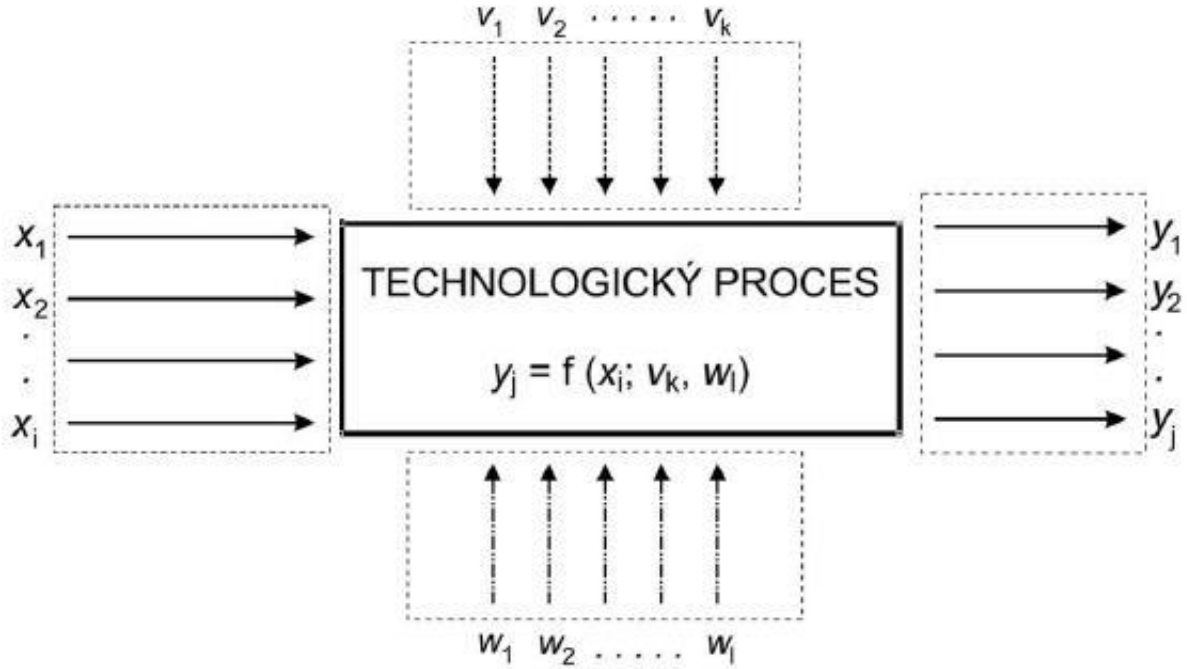


Obrázek 10: Velikost měrného řezného odporu pro různé materiály [3]

3.5 Navrhování a vyhodnocování experimentů DoE

Vzhledem k naplánování a následnému statistickému vyhodnocení experimentu je nutné nejprve pochopit základní principy používané v matematické statistice. Zkratka DoE znamená Design of Experiment a jedná se vlastně o návod sloužící k navrhování a vyhodnocování experimentů.

Zkoumaný proces je zpravidla ovlivněn mnoha vlivy. Některé je možné aktivně řídit některé ne. Vstupy do procesu se nazývají faktory, naopak výsledky plynoucí z procesu jsou odezvy. Hlavním úkolem metody DoE je najít kombinaci faktorů tak, aby odezvy co nejvěrohodněji popisovali zkoumaný jev. Aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků, je nutné odezvy sledovat v několika bodech experimentálního prostoru. S počtem sledovaných bodů však vzrůstá časová a finanční náročnost experimentu. Schéma experimentu podle této metody je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 11). [28]



Obrázek 11: Schéma experimentu podle DoE [28]

Na obrázku jsou patrné vstupy a výstupy procesu. Vstupy označené jako *x* jsou kontrolované faktory. Do procesu dále vstupují konstantní, neboli nekontrolované faktory označené jako *v* a náhodné faktory *w*, které způsobují šum. Odezvy neboli závisle proměnné jsou označeny písmenem *y*. [18]

3.5.1 Základní rozdělení experimentů

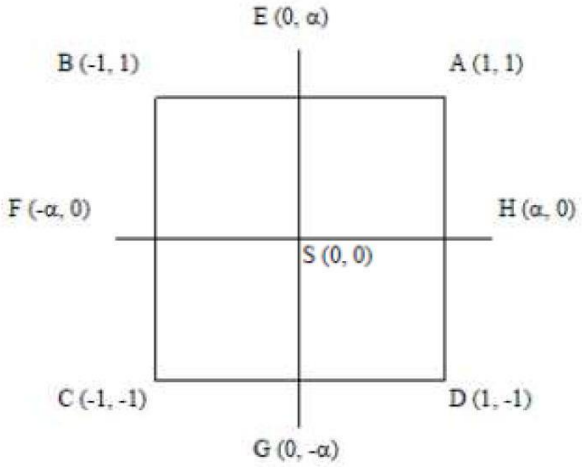
Podle použité literatury [28] lze rozdělit experimenty na několik různých typů. Jedná se například o 2_{k-p} a 3_{k-p} standardní návrhy (Box, Hunter a Hunter), o návrhy se dvěmi a třemi úrovněmi, o *D* a *A (T)* optimální plány nebo o centrální kompozitní plány.
Vzhledem k předpokladu, že v tomto případě bude závislost nelineární a lze předpokládat interakce proměnných, se jako nejvýhodnější jeví využití centrálního kompozitního plánu.

3.5.2 Centrální kompozitní plán

Centrální kompozitní plán je složen ze tří částí. První část tvoří krychlové body, které musí být v plánu vždy. Jejich počet lze určit pomocí vztahu: $n = 2^{k-p}$. Tyto body slouží pro výpočet efektů faktorů. Další částí jsou centrální body, které slouží pro vyjádření čisté chyby měření. Minimální počet centrálních bodů jsou dva, pokud jsou všechny faktory kvantitativní, mohou být centrální body přidány. Centrální body nemohou být použity pro výpočet efektů faktorů. Poslední část centrálního kompozitního plánu tvoří hvězdicové body. Počet těchto bodů lze vypočítat podle vztahu: $n = 2k$. Hvězdicové body slouží pro výpočet koeficientů v úplném kvadratickém modelu a zvyšují přesnost výpočtu regresivních koeficientů. [18]

3.5.3 Kódování podle DoE normování

Plán experimentu a jeho vyhodnocování se provádí v tzv. kódovaném měřítku. Každý z faktorů je uvažován na dvou úrovních. Dolní úroveň je označena jako -1, horní potom jako +1. V centrálním kompozitním plánu mají takto kódované body souřadnice dle následujícího obrázku (viz Obrázek 12). Krychlové body jsou zastoupeny písmeny *A, B, C, D,* body *E, F, G* a *H* jsou tzv. hvězdicové body. Písmeno *S* označuje centrální bod. Součet těchto bodů tvoří celkový počet bodů centrálního kompozitního plánu. [32]



Obrázek 12: Body obsaženy v centrálním kompozitním plánu [32]

3.5.4 Základy statistického vyhodnocování experimentů

Základním faktorem pro matematickou statistiku jsou vstupy. Tyto vstupy většinou tvoří data, která v sobě nesou určitou informaci. Aby mohla být tato data věrohodně zpracována a vyhodnocena je nutné je nejprve získat. Právě získáváním a sbíráním dat se zabývá statistické navrhování experimentů. Navrhování statistických experimentů lze rozdělit na dvě části, na vlastní plán experimentu a na jeho následné vyhodnocení. [18]

Ve vlastním plánu experimentu jsou využity dva principy, opakování experimentu a randomizace. Opakování experimentu slouží pro zjištění velikosti chyby, při malých rozptylech naměřených hodnot zpřesňuje odhad efektu faktorů. Randomizace zaručuje, že hodnoty jsou měřeny náhodně. Náhodnost měření je jedním z předpokladů statistických metod. [29]

Vyhodnocování výsledků vychází z návrhu samotného experimentu. V průběhu statistického vyhodnocování je hledán vliv jednotlivých faktorů a jejich interakcí. Cílem vyhodnocení je nalezení faktorů, které mají statisticky významný vliv na sledovanou veličinu. Vyhodnocení experimentu se považuje za ukončené, pokud je prokázán, nebo popřen vliv jednotlivých faktorů na sledovanou veličinu. [29]

3.5.5 Nástroje pro vyhodnocování statistických experimentů

Jedním z nejdůležitějších nástrojů statistického usuzování je testování hypotéz. Podmínkou pro uplatnění testování hypotéz je splnění předpokladu normality dat u sledovaných veličin. [30]

Dalším nástrojem statistického vyhodnocování je například Fisherův test – F-test, který slouží pro srovnání dvou přesností hodnot z různých zařízení. [31] Metoda ANOVA hodnotí vztahy mezi rozptyly porovnávaných souborů. Touto metodou lze určit, zda mají dané faktory statisticky významný vliv na sledovanou veličinu. [31] Pro určení míry pravděpodobnosti mezi porovnávanými a zadanými hodnotami se využívá Studentův T-test.
Matematická statistika využívá celou řadu nástrojů, například Durbin - Watsonův test pro zjištění autokorelace, Shapiro – Wilkův test normality apod. [18]

3.5.6 Definice vybraných pojmů statistického plánování experimentu

Níže uvedené pojmy používané při matematické statistice jsou nezbytné pro sestavení plánu experimentu. Podle [31] se jedná o následující pojmy:

Nezávisle proměnná – vstupní veličina ovlivňující výstupní závisle proměnnou (v tomto případě se jedná například o řeznou rychlost, nebo velikost posuvu).

Závisle proměnná – výstupní veličina, která je závislá na vstupní veličině (v tomto případě se jedná o řeznou sílu).

Spojitá proměnná – může nabývat libovolných hodnot v daném intervalu.

Diskrétní proměnná – dosahuje konečného počtu hodnot.

Blokové uspořádání plánu – plán experimentu je sestaven v samostatných blocích, které jsou definovány například hloubkou odřezávané vrstvy.

Statistická hypotéza – tvrzení, které se týká neznámé vlastnosti rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné nebo jejich pramenů. [28]

Nulová hypotéza H_0 - hypotéza , která je ověřována.

Alternativní hypotéza H_1 - Hypotéza, která stojí proti nulové hypotéze.

Statistické testy – postupy pro ověření platnosti nulové hypotézy.

Testovací kritérium – jedná se o náhodnou veličinu závislou na náhodném výběru, která se vztahuje k nulové hypotéze (statistika). [29]

Hladina významnosti – určuje hranici pro přijetím nebo zamítnutí nulové hypotézy (ve strojírenství se většinou stanovuje 5%).

Signifikantní – znamená statisticky významný.

Reziduum – rozdíl mezi naměřenou a vypočtenou hodnotou.

Pravděpodobnost p (p-value) – hodnota, podle které je zamítnuta, nebo potvrzena nulová hypotéza.

Faktor – nezávisle proměnná, faktory lze rozdělit na kontrolované, konstantní a náhodné. Podle použité literatury [28] musí kontrolované faktory plnit následující podmínky:

- Nesmí být funkcí jiných faktorů.
- Je řiditelný (je konstantní v průběhu experimentu, nebo se mění podle předem daného způsobu).

- Je technicky řešitelný, včetně kombinací s ostatními faktory.
- Musí být nezávislý, může nabývat všech hodnot bez ohledu na velikost ostatních faktorů.
- Pro použití v centrálním kompozitním plánu se musí jednat o spojitou proměnnou.

3.6 Související a předchozí práce

V rámci této kapitoly jsou zpracovány odborné texty zabývající se vlivem tloušťky odřezávané vrstvy na velikost měrného řezného odporu.

Experimenty popsané v knize Teorie obrábění od Musílkové a Přikryla [1] jsou zaměřeny nejen na chování měrného řezného odporu v závislosti na tloušťce odřezávané vrstvy, ale také v závislosti na velikosti řezné rychlosti, nebo na tvaru geometrie ostří. Podle této knihy velikost řezného odporu určují zejména fyzikální vlastnosti obráběného materiálu a velikost průřezu odřezávané vrstvy. Dále řezný odpor ovlivňuje například geometrie ostří nástroje, řezné prostředí apod. [1]

Měrný řezný odpor není konstantní veličinou pro daný materiál a mění se spolu s řeznými podmínkami. Jeho velikost ovlivňuje v největší míře tloušťka odřezávané vrstvy *h(a)*, dále také úhel řezu δ a řezná rychlost *v*. Určitou měrou ovlivňuje také velikost měrného řezného odporu poloměr zaoblené špičky *r*, nebo úhel hřbetu α. [1]

Obráběný materiál pak ovlivňuje velikost měrného řezného odporu zejména svojí pevností, houževnatostí, tvrdostí, nebo schopností zpevňování. Tyto a některé další řezné podmínky následně určují velikost deformační práce a tření. Závislost měrného řezného odporu na tloušťce třísky je vyjádřená následujícím vztahem: [1]

$$F_C = \frac{c}{h^u} \qquad \text{[MPa]} \qquad (5)$$

kde

F_C ..... řezná síla [MPa]

c ..... měrné teplo $[J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

h ..... tloušťka odřezávané vrstvy [mm]

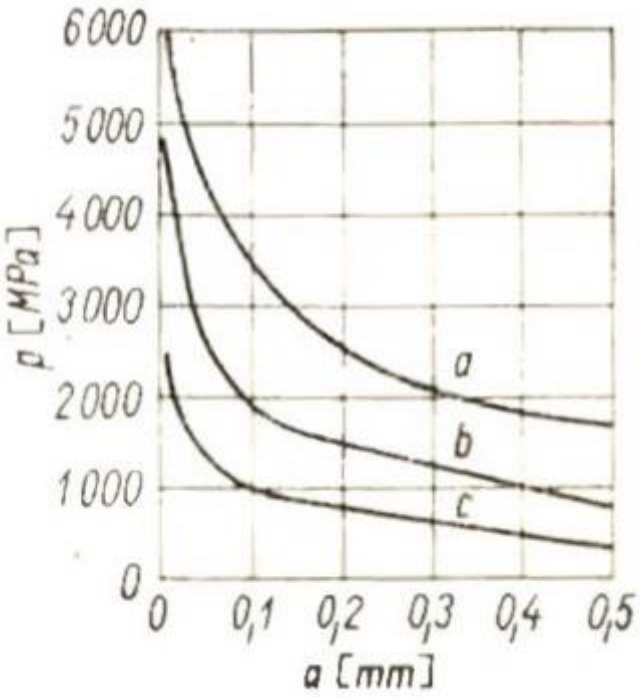
u ..... koeficient [-]

Velikost exponentu *u* ovlivňují fyzikální vlastnosti materiálu obrobku, tloušťka třísky a částečně ostatní parametry. Velikost exponentu *u* je tedy vždy určena pro různé tloušťky třísky. Na základě experimentu provedeného v laboratořích obrábění FS ČVUT jsou střední hodnoty *u* pro soustružení šedé litiny, oceli a slitin hliníku uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 1) experiment byl proveden při řezné rychlosti v_c=45m/min. Pro jednotlivé materiály byly zvoleny nejvhodnější úhly řezu. Exponent *u* pak dosahoval hodnot u=0,12 až 0,78. [1]

Hodnoty exponentu *u*								
Tloušťka třísky h(a) [mm]	Ocel				Šedá litina		Slitiny hliníku	
	< 800 Mpa		> 800 Mpa					
	RO	SK	RO	SK	RO	SK	RO	SK
0,02-0,05	0,22	0,38	0,12	0,31	0,58	0,35	0,56	0,6
0,06-0,25	0,28	0,39	0,23	0,26	0,42	0,31	0,24	0,38
0,26-0,50	0,6	0,85	0,52	0,41	0,49	0,78	0,4	0,39

Tabulka 1: Hodnoty exponentu u [1]

Následující obrázek (viz Obrázek 1) ukazuje výsledek experimentu podle zdroje. [1] Tedy závislost měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy.

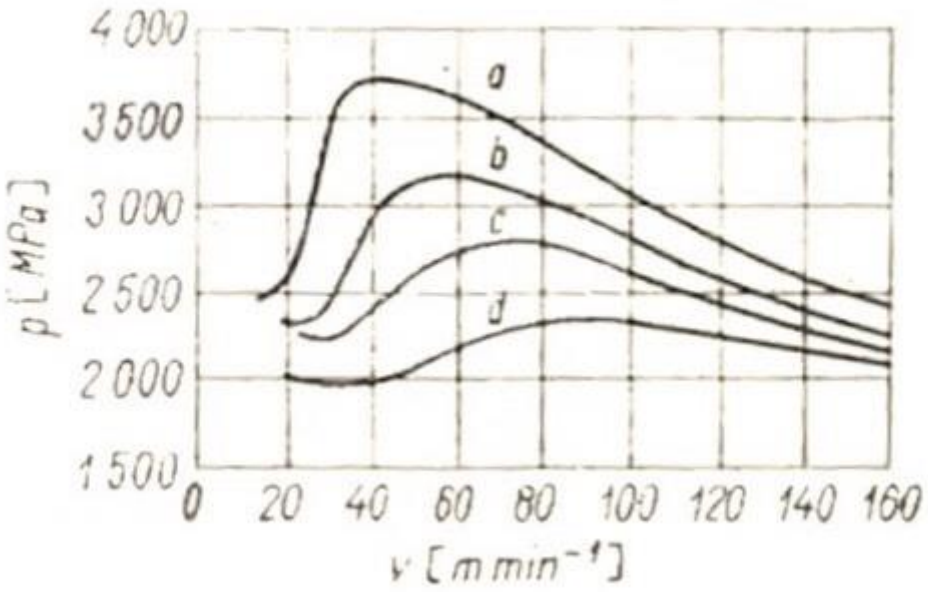


Obrázek 13: Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky[1]

Křivka a reprezentuje hodnoty měrného řezného odporu pro ocel při řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min, křivka b byla vytvořena pro šedou litinu při $v_c = 75$ m/min a c ukazuje hodnoty pro slitinu hliníku při $v_c = 220$ m/min. [1]

Celkem nepatrný vliv má na velikost měrného řezného odporu šířka třísky b. Proto je také závislost měrného řezného odporu na průřezu třísky podobná jako na tloušťce třísky. [1]

Podle studie provedené v literatuře [1] řezná rychlost ovlivňuje velikost měrného řezného odporu zejména proto, že ovlivňuje velikost oblasti OMNO′ a současně intenzitu primární deformace. Dále má velký vliv na teplotu deformovaného materiálu a určuje rychlost deformace tohoto obráběného materiálu. V neposlední řadě ovlivňuje řezná rychlost velikost součinitele tření a to jak na čele, tak na hřbetě a tím ovlivňuje vznik a růst nárůstku. Všechny tyto změny mají vliv na velikost měrného řezného odporu. Vliv řezné rychlosti se pak snižuje se zmenšujícím se úhlem řezu δ, jak je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 14) [1]



Obrázek 14: Závislost měrného řezného odporu na v_c a δ

Na obrázku je vidět soustružení oceli o pevnosti σ_{pt}=650 MPa při tloušťce třísky $h(a)$=0,15 mm a hloubce řezu a_p=2 mm. Křivka a představuje hodnoty K_c při úhlu řezu δ=100°, křivka b při δ=90°, c při δ=80° a křivka d byla vytvořena při úhlu řezu δ= 70°. Jak je vidět na předchozím obrázku, se zvyšující se řeznou rychlostí klesá vliv řezné rychlosti na měrný řezný odpor. Při řezném úhlu menším než 70° má řezná rychlost velmi malý vliv na měrný řezný odpor. [1]

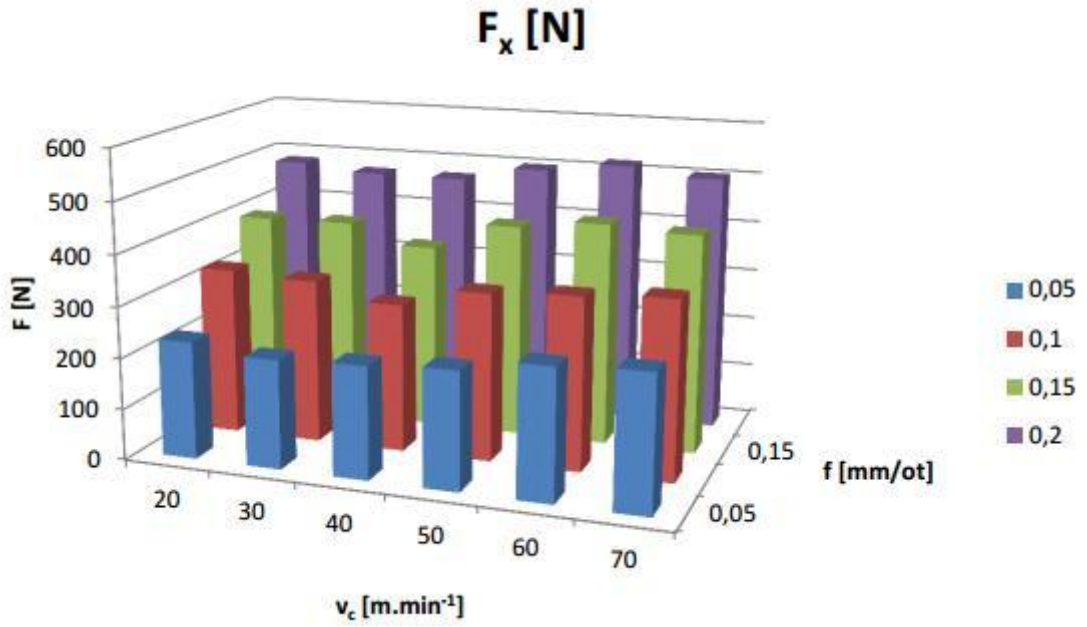
Výše popsané experimenty potvrzují teorii chování měrného řezného odporu v závislosti na tloušťce odřezávané vrstvy. Vzhledem k roku vydání 1982 je nutné konstatovat, že v dnešní době je díky moderním nástrojovým materiálům využívána mnohem větší řezná rychlost při obrábění. Také v této práci nebyla uvedena velikost zaoblení ostří a nelze tedy určit, jak se měrný řezný odpor chová, pokud je tloušťka odřezávané vrstvy menší než zaoblení ostří nástroje.

Další experimenty zabývající se touto problematikou jsou shrnuty v bakalářské práci Michala Bucka. Kde byly provedeny pokusy zabývající se měřením sil při frézování kompozitních materiálů. Vedle tloušťky odřezávané vrstvy je zde také měněna geometrie ostří a tak lze výsledky jen obtížně použít pro určení závislosti měrné řezné síly na tloušťce odřezávané vrstvy. [4]

Pan Ing. Zdeněk Fiala se v práci, Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC stroje [7], také věnuje problematice velikosti měrného řezného odporu. Zaměřuje se především na měření sil při obrábění kompozitních materiálů. Experimenty v tomto případě ukazují, že se měrný řezný odpor s rostoucím posuvem snižuje. [7]

Zde je nutné konstatovat, že většina nalezených prací se zaměřuje na měření řezných sil. Ty však už nejsou dále přepočítány na měrný řezný odpor. Většina experimentů ukazuje, že se zvyšujícím se posuvem se zvyšuje řezná síla. Vzhledem k poznatkům uvedeným v kapitole 3.4 lze usuzovat, že při následném přepočtu na měrný řezný odpor potvrdí tyto práce klesající tendenci K_C při zvětšující se tloušťce odřezávané vrstvy. Výsledky uvedené v těchto pracích mají tedy malou vypovídací hodnotu o průběhu K_C.

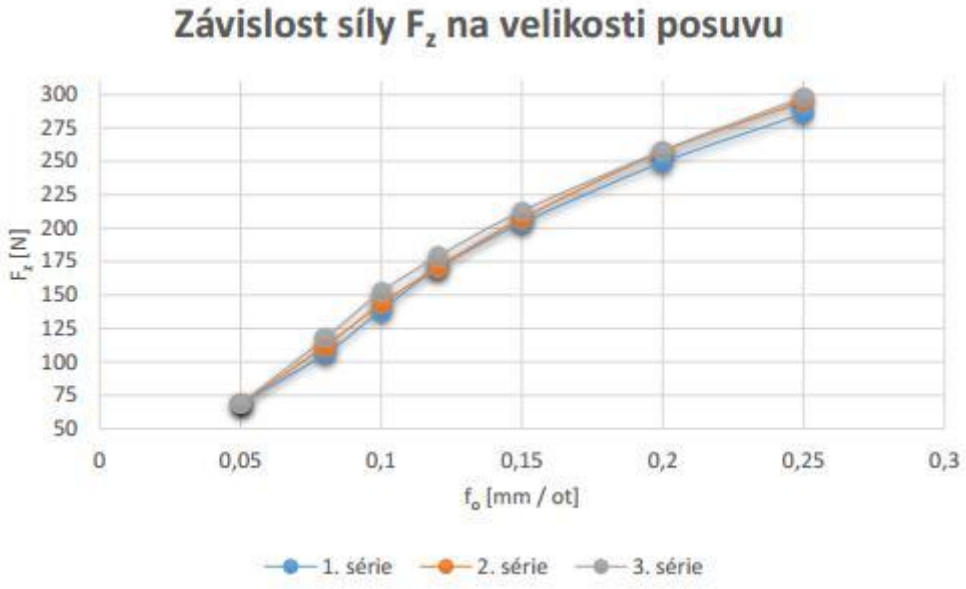
Jiří Smola v rámci své diplomové práce [5] provedl pokusy zabývající se měřením řezných sil při frézování slitin titanu. Byly zvoleny čtyři hodnoty posuvů od 0,05 mm do 0,2 mm. Pro každou hodnotu posuvu je provedeno několik pokusů, při kterých se zvyšovala řezná rychlost. Výsledky pokusů jsou vidět v následujícím grafu (viz Obrázek 15). [5]



Obrázek 15: Závislost řezné síly na rychlosti a posuvu [5]

Z obrázku je patrné, že velikost posuvu má zásadní vliv na velikost řezné síly. Graf také ukazuje, že se zvyšující se hodnotou posuvu se zvětšuje závislost řezné síly na řezné rychlosti.

Jan Pernikl se ve své práci, Monitorování procesu vrtání [6], také zabýval měřením řezných sil. Konkrétně měřením sil při různých velikostech posuvů při vrtání. Výsledky jsou opět vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 16)



Obrázek 16: Závislost řezné síly na velikosti posuvu[6]

Studie s názvem Výzkum obrobitelnosti kompozitních materiálů [8] se zabývá měřením řezných sil při frézování. V samotném experimentu jsou měřeny řezné síly při frézování kompozitních materiálů. Experimenty jsou provedeny při konstantním posuvu. Nelze tedy tyto výsledky použít. [8] Podobně je tomu u práce pana Lukáše Matuly s názvem Vliv volby nástroje na parametry řezného procesu. [9] Kde bylo měření řezných sil zaměřeno na to, jak ovlivňuje řezné síly geometrie ostří nástroje.

Obdobnou prací se zabýval také pan Josef Sklenička ve své disertační práci [18], kde bylo řešeno silové zatížení šroubovitého vrtáku konkrétně posuvové síly a krouticího momentu. Byl zde měřen řezný odpor pomocí dynamometru, ovšem v závislosti na řezné rychlosti.

Jak bylo uvedeno výše, většina prací popisuje velikosti řezných sil, ať již při klasickém nebo vysokorychlostní obrábění, a to s použitím běžných, nebo moderních nástrojových materiálů. Jsou to například tyto práce. [8], [12], [13], [14], [15]

Další studie se zabývá životností při obrábění super slitiny Inconel 718 [16], nebo silami působícími na břit při odebírání třísky blížící se velikosti zaoblení ostří břitu. [17]

Na základě rešeršní činnosti lze konstatovat, že problematikou velikosti měrného řezného odporu se zabývá velice málo autorů a tato oblast tak není dostatečně popsána. Dohledaná literatura potvrdila snižující se tendenci k_c při zvětšující se tloušťce $h(a)$, většina experimentů však byla provedena při podstatně nižších řezných rychlostech, než jaké se dnes běžně používají díky moderním nástrojovým materiálům.

V žádné odborné literatuře nebylo nalezeno chování měrného řezného odporu, pokud je tloušťka třísky větší, menší anebo rovna zaoblení břitu nástroje.

4 Návrh experimentu

Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že chování měrného řezného odporu při tloušťce odřezávané vrstvy menší, než zaoblení ostří nástroje, není dostatečně popsáno a že většina experimentů byla provedena při podstatně nižší řezné rychlosti, než jaká se používá v současné době při využití moderních nástrojových materiálů.

Dále byla popsána v rešerši určitá závislost měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy, na velikosti řezné rychlosti a také na hloubce řezu. Bylo zjištěno, že největší vliv na měrný řezný odpor má tloušťka odřezávané vrstvy. Řezná rychlost má podstatně menší vliv, který se projevuje pouze při dosažení určitých hodnot. Posledním faktorem je šířka odřezávané vrstvy, která výrazně ovlivňuje velikost řezných sil, po přepočtu na měrný řezný odpor je však tento vliv minimální.

Po zhodnocení těchto zjištění, je předložená studie zaměřena na řešení výše popsané problematiky. Je tedy nutné sestavit experiment, který by měl objasnit chování měrného řezného odporu v oblasti tloušťky třísky rovnající se velikosti zaoblení ostří nástroje. Dalšími kroky je prozkoumání závislosti měrného řezného odporu na řezné rychlosti a hloubce řezu. Data získaná z experimentu budou následně statisticky vyhodnocena. Cílem vyhodnocení je nalezení funkce popisující výše popsanou závislost měrného řezného odporu na jednotlivých faktorech. Vzhledem k rozsahu experimentu je měření provedeno pouze pro jeden materiál.

Experiment bude z hlediska vybavenosti pracoviště realizován na Západočeské univerzitě při podélném soustružení. K měření velikosti sil bude použit dynamometr.

4.1 Materiál obrobku pro experiment

Jako materiál pro provedení experimentu byla zvolena ocel 15 142, zušlechtěná na 1000 MPa. Hlavním důvodem této volby je jednak časté používání tohoto materiálu pro obrábění a jednak jeho dostupnost.

Jedná se o běžně používanou ocel se zvýšenou prokalitelností, která je vhodná zejména pro namáhané strojní součásti. Používá se například při výrobě silničních motorových vozidel, kde je zapotřebí velké pevnosti a vysoké houževnatosti. [23] Po zakalení je možné docílit tvrdosti okolo 58 HRC. Do průměru 100 mm je možné zušlechtit tento materiál nad 1000 MPa, při zachování poměrně dobré houževnatosti. Ocel je nutné kalit do méně razantního prostředí, protože je náchylná ke vzniku trhlin nebo povrchových vad. Po zakalení

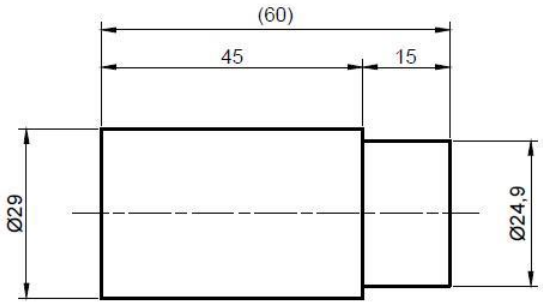
velmi dobře odolává opotřebení a patří mezi nejrozšířenější oceli používané k zušlechťování. Chemické složení oceli je vidět v následující tabulce (viz Tabulka 2).

Chemické složení oceli 15 142										
Značka oceli	Chemické složení v %								Tvrdost ve stavu	
									Žíh. Na měkko	Zušlech-těném
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni max.	P max.	S max.	HB max.	HRC min.
DIN 42CrMo4	0,38-0,45	0,60-0,90	max. 0,40	0,90-1,20	0,15-0,30		0,035	0,035		
ČSN 15 142	0,38-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	0,90-1,20	0,15-0,30	0,5	0,035	0,035	217	359

Tabulka 2: Chemické složení oceli 15142 [23]

Aby byly výsledky experimentu objektivní a nebyly ovlivněny například různým chemickým složením materiálu obrobku, musí být polotovary vyrobeny z jednoho kusu kruhové tyče. Tím se docílí stejného chemického složení všech polotovarů a také naprosto stejného tepelného zpracování. Jako polotovar byla zvolena válcová tyč o průměru 30 mm.

Z hlediska vyloučení vlivu válcovaného povrchu materiálu, který může být zpevněný, bude vždy před samotným experimentem polotovar obroben na průměr 29 mm. Jelikož se experiment bude provádět při vysokých řezných rychlostech, je vhodné osadit konce polotovarů na průměr 25 mm a použít kleštinový upínač, který prakticky není na rozdíl od univerzálního sklíčidla omezen maximálními dovolenými otáčkami. Z hlediska možného rozkmitání obrobku byl kvalifikovaným odhadem stanoven minimální průměr polotovaru 20 mm. Pod tímto rozměrem již nebude probíhat měření řezných sil. Výkres polotovaru je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 17).



Obrázek 17: Výkres polotovaru

4.2 Strojní vybavení pro provedení experimentu

Experiment je vhodné realizovat při podélném soustružení v prostorách Západočeské univerzity. Vzhledem ke strojnímu vybavení byl zvolen stroj Emco MAXXTURN 25.

4.2.1 Stroj Emco MAXXTURN 25

Jedná se o horizontální CNC soustruh, který je vybaven vedle hlavního vřetena také opěrným vřetenem a dvanácti-polohovou revolverovou hlavou pro upínání nástrojů. Další výhodou stroje je možnost poháněných nástrojů. Stroj Emco MAXXTURN 25 je určen vzhledem ke své velikosti zejména pro komplexní opracování menších strojních součástí, kde vyniká poměrně vysokou přesností výroby. CNC Soustruh je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 18). [33]

Obrázek 18: CNC soustruh Emco MAXXTURN

Tento stroj byl vybrán pro provedení experimentu zejména proto, že katedra obrábění disponuje dynamometrem, který je možno upnout právě do tohoto soustruhu. V minulosti již také proběhly experimenty zabývající se měřením řezných sil právě na tomto stroji. Základní parametry stroje jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 3), jedná se například o

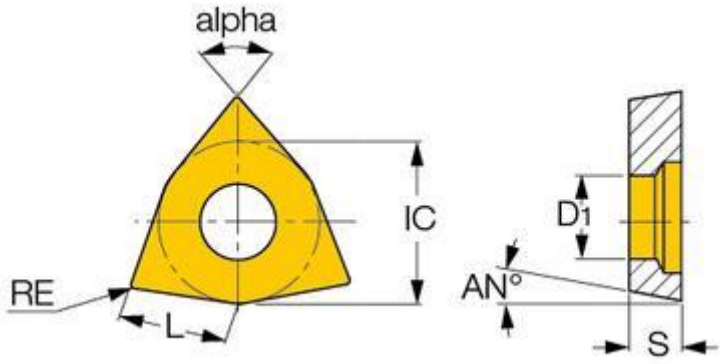
maximální otáčky, které jsou velice důležité z hlediska dosažení řezné rychlosti, o maximální krouticí moment, nebo o velikost pracovního prostoru. Na základě těchto technických parametrů je možné konstatovat, že stroj plně vyhovuje pro plánovaný experiment. [33]

Základní parametry stroje Emco MAXXTURN 25	
Max. průchod vřetena	25,4 mm
Max. průměr obrábění	114 mm
Oběžný průměr nad ložem	325 mm
Max. otáčky	8000 ot/min
Max. výkon vřetena	6,5 kW
Max. kroutící moment	30 Nm
Rozměry (délka x šířka x výška)	2180 x 1425 x 1870 mm
Hmotnost stroje	2 100 kg

Tabulka 3: Základní parametry stroje Emco MAXXTURN 25 [33]

4.2.2 Soustružnický nůž

Soustružnický nůž pro provedení experimentu byl volen s ohledem na požadavky uvedené v kapitole 3.4. Kde bylo popsáno, že úhel nastavení hlavního ostří musí být 90° a úhel čela je 0°. Na základě těchto skutečností byl zvolen držák a vyměnitelná břitová destička, které splňují tyto požadavky. Byla vybrána VBD od firmy Iscar s označením WPEB060404N08 IC908, její geometrický tvar je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 19). [34]



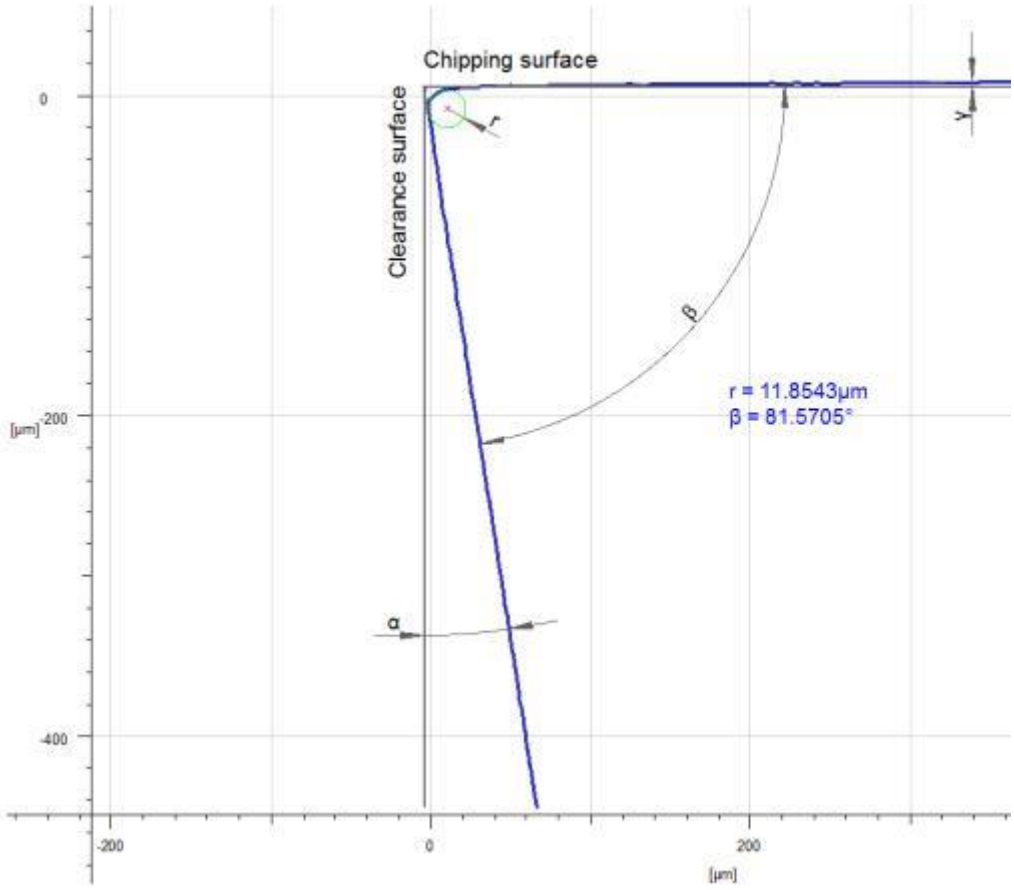
Obrázek 19: Vyměnitelná břitová destička [34]

Velikosti jednotlivých kót VBD jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 4). Výrobce dále uvádí, že maximální posuv f=0,2 mm/ot. a maximální hloubku řezu a_p=3 mm. [33]

Hodnoty jednotlivých kót VBD [mm]					
L	S	RE	IC	D1	AN
6.00	4.00	0.40	9.52	3.70	8.0

Tabulka 4: Hodnoty kót VBD [33]

Vzhledem k plánu experimentu a tedy k prozkoumání měrného řezného odporu při nižší tloušťce odřezávané vrstvy, než je zaoblení ostří nástroje, je nyní nutné toto zaoblení určit. Pro změření velikosti zaoblení byl využit opticko-skenovací přístroj. Výsledek měření je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 20). Bylo naměřeno zaoblení ostří nástroje r=0,012 mm. Měřící protokol je uveden v příloze (viz příloha č. 1)



Obrázek 20: Výsledek měření zaoblení ostří

Jak bylo uvedeno v rešerši, část materiálu je odřezávána a část je zatlačována vlivem zaoblení ostří nástroje zpět do obrobku. Je tedy nutné vypočítat minimální hloubku řezu, respektive jak velká je neodřezávaná vrstva materiálu. Tloušťka neodřezávané vrstvy byla vypočtena vzhledem k poznatkům uvedeným v kapitole 3.2.3 jako h_S=0,0027.

4.2.3 Vybavení pro měření řezných sil

Pro měření řezných sil je použit piezoelektrický dynamometr od firny Kistler. Tento dynamometr, jak napovídá název, pracuje na principu piezoelektrického jevu a převádí měřené síly na elektrický signál. Vlastní snímač vytváří při zatížení silou díky deformaci piezoelektrické látky slabý elektrický náboj, ten je následně zesílen, digitalizován a vyhodnocen ve speciálním softwaru. [27]

Jelikož budou měřeny síly působící na soustružnický nůž, nástroj je upnut přímo na dynamometru, jak je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 21).

Obrázek 21: Upnutí soustružnického nože do dynamometru

4.3 Sestavení plánu experimentu

Sestavení plánu experimentu je provedeno a popsáno v následujících podkapitolách.

4.3.1 Volba plánu experimentu

Při tvorbě plánu experimentu je důležité vědět, jestli je průběh sledované odezvy lineární nebo nelineární a jestli dojde k interakcím mezi kontrolovanými faktory.

V případě této práce se bude podle poznatků získaných při rešerši jednat o nelineární model s interakcemi mezi některými kontrolovanými faktory. Vzhledem k těmto skutečnostem byl zvolen centrální kompozitní plán v blokovém uspořádání.

4.3.2 Volba faktorů experimentu

Při volbě faktorů experimentu je důležité určit, které faktory vstupující do experimentu jsou konstantní a které jsou kontrolované. Vzhledem k hledané závislosti velikosti měrného řezného odporu na tloušťce, šířce odřezávané vrstvy a řezné rychlosti se nabízí volba následujících kontrolovaných faktorů:

- posuv na otáčku f [mm]
- řezná rychlost v_c [m/min]

Hloubka řezu a_p je v tomto případě zvolená jako diskrétní proměnná. Její velikost se mění skokově a je vždy stejná pro celý blok měření.

Ostatní parametry vstupující do procesu jsou zvoleny jako konstantní. Jedná se například o nástrojové úhly na břitové destičce. Aby byla tato podmínka dodržena, je důležité, aby nedocházelo k tvorbě nárůstku. Tím by došlo ke změně geometrie nástroje a tím k porušení tvrzení, že geometrie nástroje je konstantní parametr.

Dalším konstantním parametrem je řezné prostředí. Experiment bude probíhat bez procesní kapaliny, která by mohla při změně koncentrace nebo směru průtoku výrazně ovlivnit experimentální měření.

Jelikož je experiment proveden pouze pro jeden druh materiálu, patří materiál obrobku také do konstantních parametrů. Aby však bylo toto tvrzení pravdivé, je důležité, použít materiál z jedné tavby jak popisuje kapitola 4.1. Další podmínkou je přerovnání povrchu obrobku vždy po provedení úběru pro kontrolní měření. Přerovnání je nutné provádět vždy stejnými podmínkami, aby nerovnosti povrchu neovlivňovaly naměřené hodnoty. Dalšími konstantními parametry jsou například stroj, upínací kleština, upnutí nástroje do dynamometru, apod.

4.3.3 Návrh experimentálních řezných podmínek

Určení intervalů u kontrolovaných faktorů bylo provedeno na základě poznatků z rešerše, konzultacemi s odbornou veřejností a s ohledem na kapitolu, která uvádí, že kombinace

všech kontrolovaných faktorů musí být proveditelná. U konstantních faktorů se pak předpokládá, že jsou konstantní po celou dobu průběhu experimentu.

Vzhledem ke kapitole k poznatkům v kapitole 4.2.2, ve které byl proveden popis geometrie VBD včetně velikosti zaoblení ostří, výpočtu minimální tloušťky odřezávané vrstvy a maximální velikosti posuvu udávané výrobcem VBD byl navržen následující interval pro velikost posuvu $f_{ot} = \langle 0{,}008 - 0{,}2 \rangle$ [mm/ot].

Dalším sledovaným parametrem je řezná rychlost. Interval řezné rychlosti byl zvolen co největší s ohledem na omezující podmínky. Omezujícími faktory byly v tomto případě průměr polotovaru a maximální otáčky stroje. Na základě těchto skutečností byl určen následující interval řezné rychlosti $v_c = \langle 50 - 560 \rangle m/min$.

Posledním sledovaným parametrem je hloubka řezu. Vzhledem k úhlu nastavení hlavního ostří 90° a k velikosti zaoblení špičky nástroje $\varepsilon_r = 0{,}4$ mm, byly pro hloubku řezu a_p zvoleny diskrétní hodnoty 0,2, 0,4 a 1 mm.

Výše zvolené řezné podmínky jsou voleny tak, aby byly navzájem kombinovatelné a umožňovaly tak provedení experimentu z technického hlediska.

4.3.4 Sestavení plánu experimentu

Na základě předchozích kapitol je sestaven experiment pro zjištění statistického modelu průběhu řezné síly v závislosti na výše zmíněných faktorech. Jak uvádí předchozí kapitola 4.3.1, je zvolen centrální kompozitní plán v blokovém uspořádání. Sestavený plán experimentu je vidět v následující tabulce (viz Tabulka 5).

Tabulka ukazuje jeden blok experimentu. Celý experiment se skládá ze třech bloků, které se liší pouze hloubkou úběru a_p. Po sestavení plánu je vidět, že každý blok tvoří čtrnáct bodů. Jedná se o centrální body *2, 5, 6, 8, 13, 14,* o krychlové body *1, 3, 4, 7* a o hvězdicové body *9, 10, 11, 12.* Centrální body umožňují provedení kontroly, zda je experiment prováděn korektně. V tomto případě by měli odhalit například vznik nárůstku nebo otupení nástroje, což by se projevilo změnou naměřených hodnot. Pro zvýšení vypovídající hodnoty je každý bod měření opakován šestkrát.

Plán experimentu		
Měření	***Vc* [m/min]**	***f* [mm/ot.]**
1	485	0,172
2	305	0,104
3	125	0,172
4	485	0,036
5	305	0,104
6	305	0,104
7	125	0,036
8	305	0,104
9	305	0,200
10	50	0,104
11	560	0,104
12	305	0,008
13	305	0,104
14	305	0,104

Tabulka 5: Plán experimentu

Z takto sestaveného experimentu vyplývá, že v každém bloku je provedeno 84 měření, celkový počet naměřených hodnot je tedy 252. Vzhledem k počtu měření, přerovnání obrobené plochy vždy mezi jednotlivými body a k velikosti a_p vyplývá celkový počet polotovarů. Na provedení experimentu je potřeba 59 polotovarů. Jelikož může dojít během měření k chybě obsluhy nebo například k ulomení špičky nástroje, a tedy k opakování měření, je nezbytné připravit minimálně 70 kusů polotovarů.

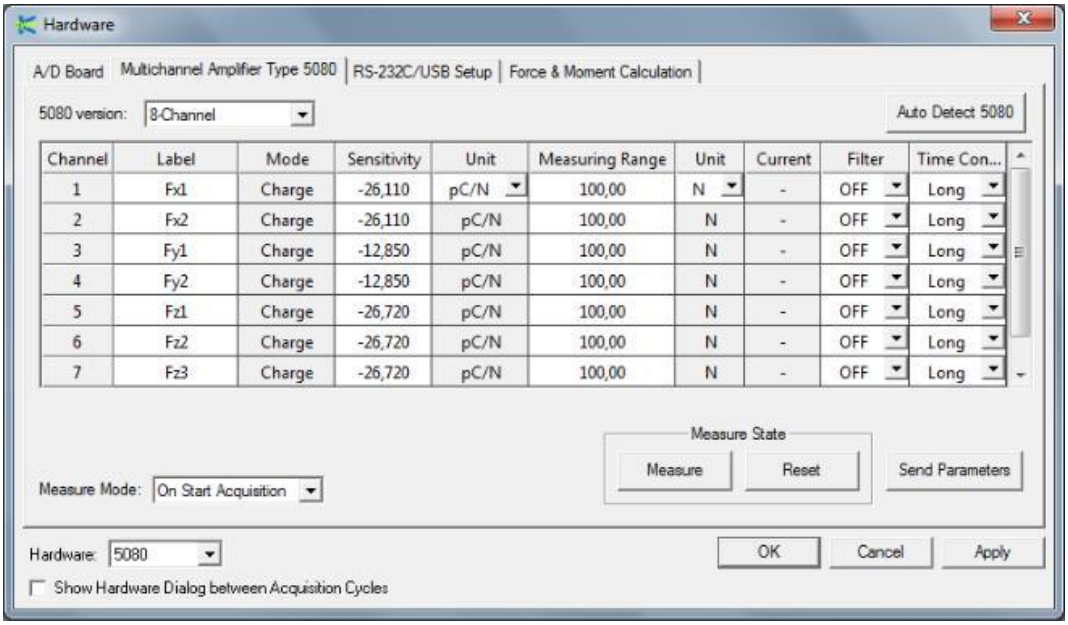
4.4 Vyhodnocení experimentu

Experiment proběhl na Západočeské univerzitě v Plzni. Na stroji MAXXTURN 25, jak je uvedeno v kapitole 4.2.1.

Ještě před začátkem samotného měření je nezbytné připravit pracoviště. Prvním krokem je upnutí dynamometru s držákem vyměnitelné břitové destičky do stroje, aby bylo možné realizovat měření. Dalším použitým vybavením je zesilovač, digitalizační karta a počítač pro vyhodnocování řezných sil. Elektrický náboj z dynamometru je veden přes zesilovač a digitalizační kartu do počítače, kde je vyhodnocován. Vyhodnocování se provádí ve speciálním programu s názvem DynoWare.

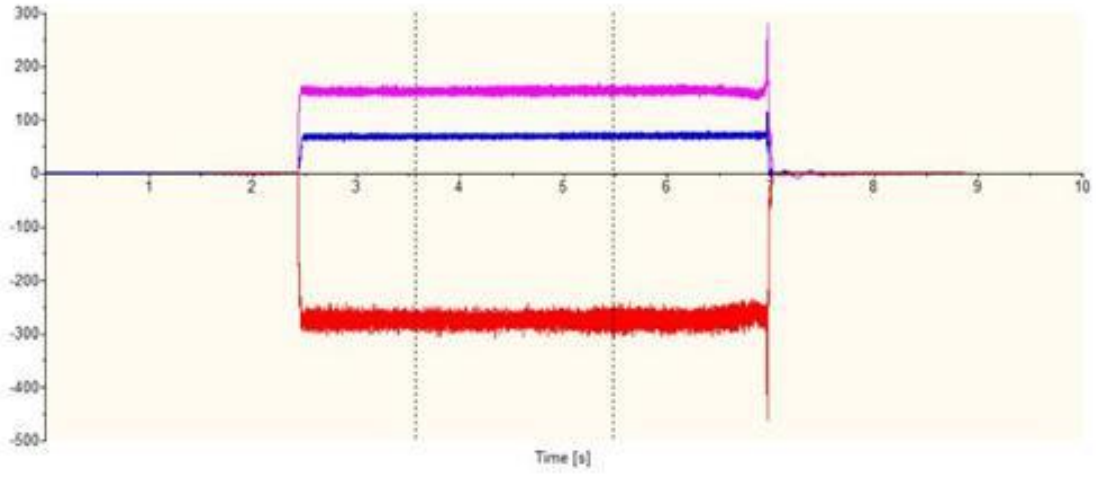
Před samotným měřením je důležité vyzkoušet funkčnost měřící soustavy a nastavit software. Tedy založit nový soubor, ve kterém jsou uložena data z měření a správně nastavit hodnoty na zesilovači, tak aby bylo měření co nejpřesnější a aby nedošlo k přetížení jeho

kanálů. Velikost vyhodnocovaných sil pro nastavení zesilovače je nutné nejprve odhadnout na základě plánovaných řezných podmínek a po prvním měření popřípadě upravit. Pokud jsou síly větší, než je nastavené rozpětí, dojde k přetížení kanálu, které je signalizováno červenými diodami. Naměřené hodnoty pak nemusejí být správné a je nutné měření opakovat. Nastavení softwaru je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 22).



Obrázek 22: Nastavení programu DynoWare

Vyhodnocování naměřených sil je vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 23). Vedle hlavní složky řezné síly vyhodnocuje měřící soustava také posuvovou a normálovou složku sil. Při tomto experimentu však byla vyhodnocována pouze hlavní složka řezné síly, která slouží pro výpočet měrného řezného odporu.



Obrázek 23: Vyhodnocování řezných sil

Jak je vidět na předchozím obrázku, software vykreslil křivku naměřených řezných sil. Při najetí nástroje do materiálu dochází k rozkmitání soustavy S-N-O-P a tím k ovlivnění řezných sil. Proto je při vyhodnocování uvažována pouze střední část měření, která je nejméně rozkmitaná. Tuto oblast si volí obsluha počítače. Na předchozím obrázku je tato oblast ohraničena dvěma svislými čarami. Po volbě měřené oblasti následně software zobrazí naměřenou hodnotu sil.

Vždy po provedení kontrolního měření byl povrch obrobku přerovnán, aby bylo dosaženo stejných výchozích podmínek pro všechna měření. Naměřené hodnoty řezných sil jsou uvedeny v příloze č. 2.

4.4.1 Statistické vyhodnocení experimentu

Tato kapitola se zabývá statistickým vyhodnocením naměřených dat z experimentu. Postup a metody použité při vyhodnocení jsou popsány v rešeršní části.

Nejprve je nutné uvést, že vzhledem k rozdílnosti jednotlivých bloků experimentu rozdělených dle velikosti a_p a k dosažení vyšší vypovídající hodnoty vyhodnocených dat je výhodnější vyhodnotit jednotlivé bloky jako samostatné modely.

Dalším předpokladem správného vyhodnocení experimentu je dodržení nezávislosti vstupních proměnných, jak bylo popsáno v kapitole 3.5.6. Vzhledem k tomu, že měrný řezný odpor je funkcí a_p, f, F_c, v_c, a řezná síla F_c je zároveň funkcí a_p, f, v_c , není dodržena podmínka nezávislosti vstupních proměnných. Proto není možné měrný řezný odpor modelovat přímo. Na základě tohoto faktu bylo rozhodnuto modelovat velikosti řezných sil a až poté z těchto sil vypočítat pomocí nalezeného modelu měrný řezný odpor.

Vzhledem k výše popsanému jsou nezávisle proměnné pouze dvě a to řezná rychlost v_c a posuv na otáčku f. Výsledná funkce je tedy hledána ve tvaru:

$$Fc = f(v_c, f) \tag{6}$$

Následující tabulka (viz Tabulka 6) představuje shrnutí analýzy vhodnosti modelu působením faktorů na změnu hodnoty F_c pro hloubky řezu a_p= 0,2, 0,4 a 1 mm. Z tabulky vyplývá, že podíl variability hodnot F_c (RSquare) představuje hodnoty 97,4247 až 99,6308 %. Upravený index determinace (RSquare Adj), podmiňující míru vysvětlení variability daného modelu dosahuje hodnot 97.2101 až 99,52 %. Zde je nutné konstatovat, že vzhledem k vysoké

hodnotě upraveného indexu determinace je možné mluvit o funkčních modelech. Průměrná hodnota F_c je pro a_p= 0,2 mm 62,39 N, pro a_p= 0,4 mm 115,51 N a pro a_p= 1 mm 276,79 N.

Shrnutí analýzy vhodnosti pro Fc a ap			
Ukazatel	**ap=0,2 mm**	**ap=0,4 mm**	**ap=1 mm**
RSquare	0,974247	0,995974	0,996308
RSquare Adj	0,972101	0,994185	0,9952
Root Mean Square Error	3,652474	3,35153	8,327941
Mean of Response	62,39174	115,5111	276,7899
Observations (or Sum Wgts)	14	14	14
AICc	82,2435	91,4083	111,8689
BIC	81,76008	83,24264	107,5642

Tabulka 6: Shrnutí analýzy vhodnosti pro Fc a a_p = 0,2, 0,4 a 1 mm

Jak je vidět v předchozí tabulce, hodnota AIC_C, neboli Akaikovo informační kritérium dosahuje hodnot 82.2435 až 111,8689, Bayesovo informační kritérium (BIC) dosahuje hodnot 81.76008 až 107,5642. Zde platí, že při porovnání více modelů je model s nižšími hodnotami AIC_C a BIC lepší. RMSE (střední čtvercová odchylka, RMSD) je často používaná míra rozdílu mezi hodnotami predikovanými modelem a hodnotami skutečně pozorovanými z prostředí, které se modeluje. Tyto individuální rozdíly se také nazývají zbytky a RMSE slouží pro jejich seskupení do jednoho ukazatele predikované síly. RMSE dosahuje v těchto případech pro jednotlivé hloubky řezu a_p hodnot 3,652474, 3,35153 a 8,327941.

Z následující tabulky (viz Tabulka 7) analýzy rozptylu (ANOVA), je možné usuzovat, že variabilita způsobená náhodnými chybami je výrazně menší, než variabilita naměřených hodnot vysvětlená modelem. Hodnota dosažené hladiny významnosti (Prob>F) poukazuje na adekvátnost použitých modelů na základě Fisher-Snedecorova testovacího kritéria. Důvodem je samotná povaha testu. Nulová statistická hypotéza, která je testována tvrdí, že žádný z členů modelu nemá vliv na hodnotu zkoumané proměnné. Protože pracujeme s hladinou významnosti 5 % a dosažená hodnota Prob > F je menší než hladina významnosti můžeme tvrdit, že v modelech existuje vždy alespoň jeden nenulový člen, který má vliv na hodnotu zkoumané proměnné.

Analýza rozptylu ANOVA pro Fc a ap=0,2 mm					
Source	**DF**	**Sum of Squares**	**Mean Square**	**F Ratio**	**Prob > F**
Model	1	6056,0795	6056,08	453,9597	<,0001
Error	12	160,0868	13,34		
C. Total	13	6216,1663			
Analýza rozptylu ANOVA pro Fc a ap=0,4 mm					
Source	**DF**	**Sum of Squares**	**Mean Square**	**F Ratio**	**Prob > F**
Model	4	25008,956	6252,24	556,6079	<,0001
Error	9	101,095	11,23		
C. Total	13	25110,051			
Analýza rozptylu ANOVA pro Fc a ap=1 mm					
Source	**DF**	**Sum of Squares**	**Mean Square**	**F Ratio**	**Prob > F**
Model	3	187134,94	62378,3	899,4114	<,0001
Error	10	693,55	69,4		
C. Total	13	187828,49			

Tabulka 7: Analýza rozptylu ANOVA pro Fc a a_p = 0,2, 0,4 a 1 mm

Další testování použitých modelů je provedeno testem chyby nedostatečného přizpůsobení modelu, kde je hodnocen rozptyl reziduí a rozptyl naměžených hodnot uvnitř skupin. Tím je testováno, zda regresní model dostatečně vystihuje sledovanou závislost. Hodnoty z tohoto testu jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 8)

Chyba přizpůsobení modelu pro Fc a ap=0,2 mm						
Source	**DF**	**Sum of Squares**	**Mean Square**	**F Ratio**	**Prob > F**	**Max RSq**
Lack Of Fit	3	88,65646	29,5522	3,7235	0,0545	0,9885
Pure Error	9	71,43034	7,9367			
Total Error	12	160,08681				
Chyba přizpůsobení modelu pro Fc a ap=0,4 mm						
Source	**DF**	**Sum of Squares**	**Mean Square**	**F Ratio**	**Prob > F**	**Max RSq**
Lack Of Fit	4	53,0833	13,2708	1,382	0,3595	0,9981
Pure Error	5	48,01148	9,6023			
Total Error	9	101,09478				
Chyba přizpůsobení modelu pro Fc a ap=1 mm						
Source	**DF**	**Sum of Squares**	**Mean Square**	**F Ratio**	**Prob > F**	**Max RSq**
Lack Of Fit	5	353,24861	70,6497	1,0381	0,4842	0,9982
Pure Error	5	340,29737	68,0595			
Total Error	10	693,54599				

Tabulka 8: Chyba přizpůsobení modelů pro Fc a a_p = 0,2, 0,4 a 1 mm

Vzhledem k dosažení hodnoty významnosti 0,0545 Fisherovým testem, pro F_c a hloubku řezu a_p = 0,2 mm, hodnoty 0,3595 pro a_p = 0,4 mm a 0,4842 pro a_p = 1 mm, můžeme přijmout nulovou statistickou hypotézu, která vyplývá z povahy testu chyby nedostatečného přizpůsobení. Můžeme take konstatovat, že modely dostatečně vystihují variabilitu experimentálně získaných údajů.

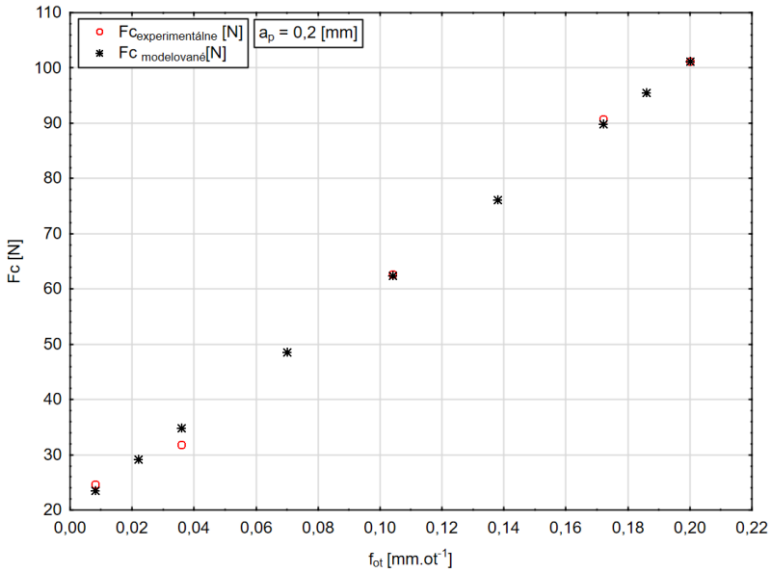
4.4.2 Vyhodnocení modelu pro a_p = 0,2 mm

Po splnění základních předpokladů kladených na model jako takový, tedy adekvátní model, je vytvořena tabulka odhadů parametrů modelu (viz Tabulka 9). Nyní můžeme vidět, že signifikantním faktorem na hladině významnosti 5 %, který ovlivňuje změnu hodnoty Fc je posuv. Vliv řezné rychlosti byl v tomto případě vyhodnocen jako statisticky nevýznamný faktor.

Odhady parametrů modelu pro Fc a ap=0,2 mm						
Term	**Estimate**	**Std Error**	**t Ratio**	**Prob>|t|**	**Lower 95%**	**Upper 95%**
Intercept	62,39174	0,976165	63,92	<,0001*	60,26486	64,51862
x_2	38,91032	1,826233	21,31	<,0001*	34,9313	42,88934
* - signifikantní na hladině významnosti 5%, x2 – posuv [mm.ot-1]						

Tabulka 9: Odhady parametrů modelu pro Fc a a_p = 0,2 [mm]

Následující graf (viz Obrázek 24) ukazuje vliv velikosti posuvu na hlavní složku řezných sil F_c. Podle předpokladů se řezná síla zvyšuje se zvyšující se velikostí posuvu.



Obrázek 24: Graf vlivu *f* na hodnotu *Fc* při a_p = 0,2 [mm]

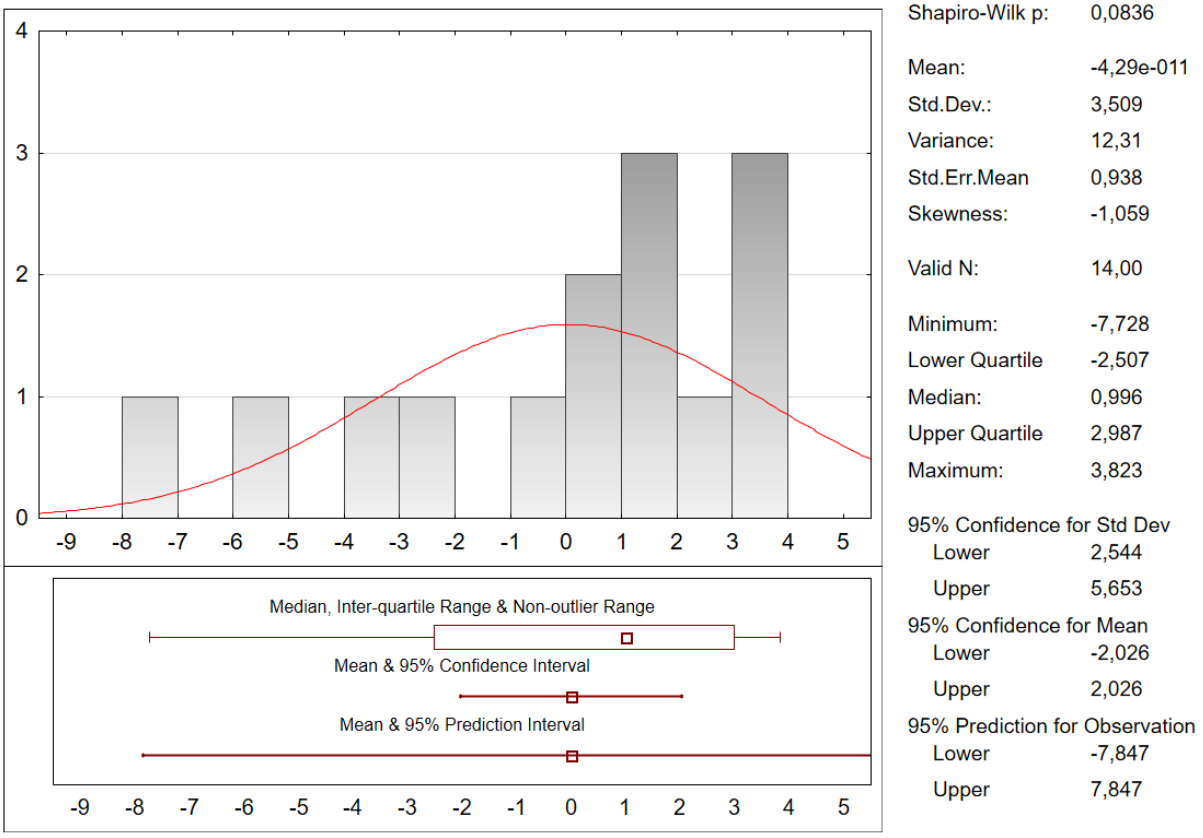
Výsledná rovnice má potom tvar:

$$\hat{y} = 62,392 + 38,190.x_2 \quad (7)$$

Po převodu do přirozeného měřítka dostáváme výslednou funkci závislosti řezné síly F_c na velikosti posuvu f při hĺoubce řezu a_p = 0,2 mm ve tvaru:

$$F_c = 20,275 + 404,971 \cdot f \quad (8)$$

Pro kompletnost vykonané analýzy a potvrzení správnosti a vhodnosti zvoleného modelu, je zapotřebí ještě ověřit rezidua. Rozdíl mezi skutečně naměřenými hodnotami a hodnotami predikovanými, vypočítanými pomocí predikčního modelu z hlediska jejich rozdělení a autokorelace. Hodnotou Durbin-Watsonova testu autokorelace DW = 1,8942813 (p=0,4245) je možné přijmout nulovou statistickou hypotézu o neexistenci autokorelace a dosažená hladina významnosti Shapiro-Wilksova testu (viz Obrázek 25) poukazuje na Gaussovo rozdělení reziduí. Závěrem tedy můžeme zhodnotit predikční model jako statisticky a numericky korektní.



Obrázek 25: Gaussovo rozdělení reziduí pro *Fc* a a_p = 0,2 mm

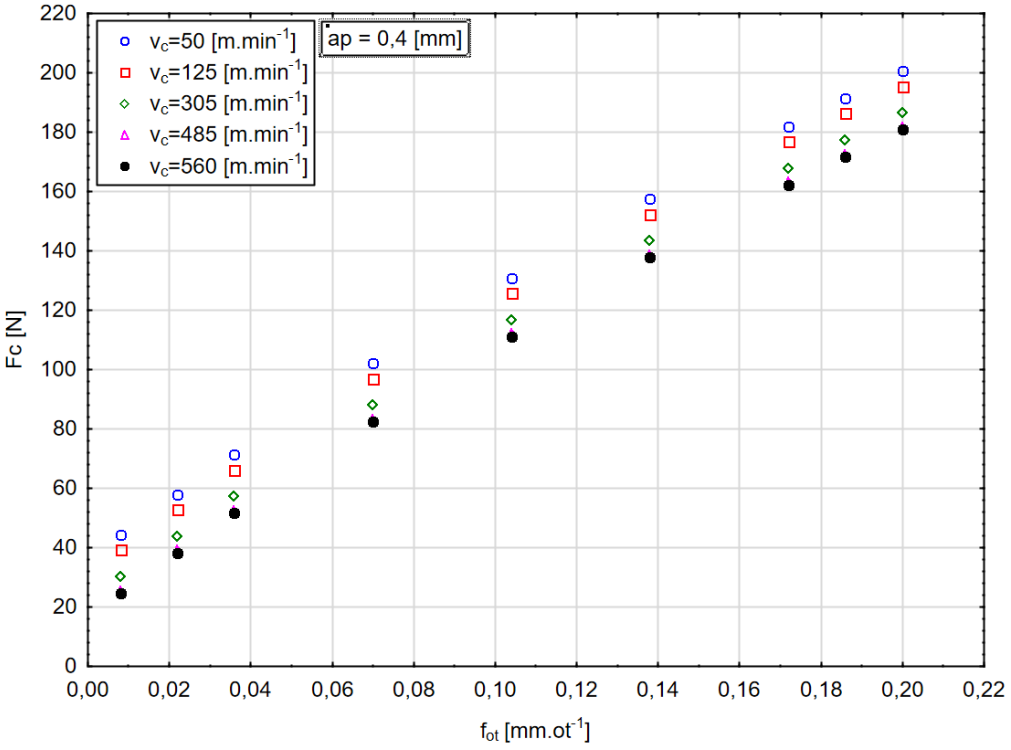
4.4.3 Vyhodnocení modelu pro ap =0,4 mm

Následující tabulka ukazuje odhady parametrů modelu pro F_c a a_p =0,4 mm (viz Tabulka 10). V tabulce je vidět, že signifikantními faktory na hladině významnosti 5 %, které ovlivňují změnu hodnotyF_c je posuv f, řezná rychlost v_c a jejich druhé mocniny.

Odhady parametrů modelu pro Fc a ap=0,4 mm						
Term	**Estimate**	**Std Error**	**t Ratio**	**Prob>|t|**	**Lower 95%**	**Upper 95%**
Intercept	116,6945	1,368256	85,29	<,0001*	113,5992	119,7897
x_2	78,17154	1,675761	46,65	<,0001*	74,38071	81,96238
x_1	-9,8544	1,675761	-5,88	0,0002*	-13,6452	-6,06357
$x_2 * x_2$	-8,44549	2,466653	-3,42	0,0076*	-14,0254	-2,86553
$x_1 * x_1$	4,303682	2,466653	1,74	0,115	-1,27628	9,883639
* - signifikantní na hladině významnosti 5%, x2 – posuv [mm.ot-1], x1 – vc [m.min-1]						

Tabulka 10: Odhady parametrů modelu pro Fc a a_p = 0,4 mm

Následující graf (viz Obrázek 26) ukazuje vliv velikosti posuvu na hlavní složku řezných sil F_c. Je velice dobře patrné, že řezná síla se podle předpokladu zvyšuje se zvyšující se velikostí posuvu. Naopak se zvyšující se řeznou rychlostí se snižuje velikost řezných sil.



Obrázek 26: Graf vlivu *f* na hodnotu *Fc* při a_p = 0,4 mm

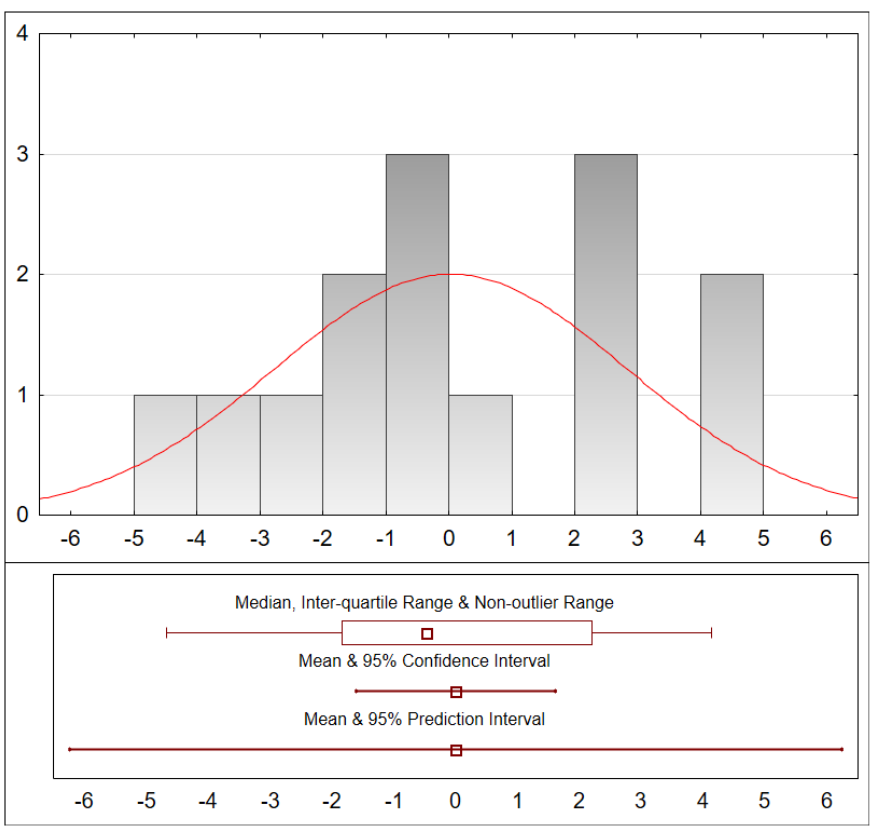
Výsledná rovnice má potom tvar:

$$\hat{y} = 116,694 + 78,172.x_2 - 9,854.x_1 - 8,445.x_2^2 + 4,304.x_1^2 \quad (9)$$

Po převodu do přirozeného měřítka dostáváme výslednou funkci závislosti řezné síly F_c při hloubce řezu a_p= 0,4 mm na signifikantních faktorech ve tvaru:

$$F_c = -915,492 \cdot f^2 + 1003,986 \cdot f + 0,0000664 \cdot v_c^2 - 0,07919 \cdot v_c + 40,157 \quad (10)$$

Pro kompletnost vykonané analýzy a potvrzení správnosti a vhodnosti zvoleného modelu, je opět zapotřebí ověřit rezidua. Hodnotou Durbin-Watsonova testu autokorelace je v tomto případě DW = 1,1726325 (p=0,0901). Je tedy možné přijmout nulovou statistickou hypotézu o neexistenci autokorelace a dosažená hladina významnosti Shapiro-Wilksova testu (viz Obrázek 27) poukazuje na Gaussovo rozdělení reziduí. Závěrem tedy můžeme opět zhodnotit predikční model jako statisticky a numericky korektní.



Shapiro-Wilk p:	0,746
Mean:	1,43e-011
Std.Dev.:	2,789
Variance:	7,777
Std.Err.Mean	0,745
Skewness:	-0,0373
Valid N:	14,00
Minimum:	-4,678
Lower Quartile	-1,828
Median:	-0,486
Upper Quartile	2,206
Maximum:	4,139
95% Confidence for Std Dev	
Lower	2,022
Upper	4,493
95% Confidence for Mean	
Lower	-1,610
Upper	1,610
95% Prediction for Observation	
Lower	-6,236
Upper	6,236

Obrázek 27: Gaussovo rozdělení reziduí pro *Fc* a a_p = 0,4 mm

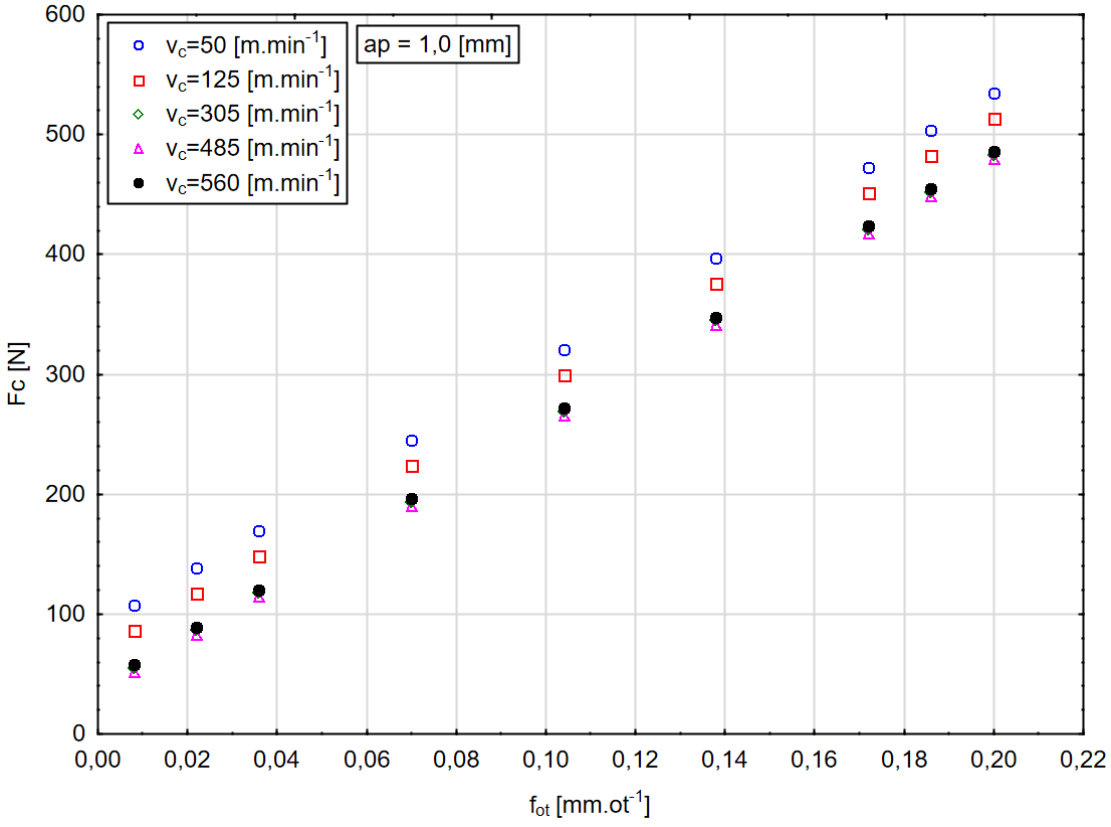
4.4.4 Vyhodnocení modelu pro ap =1 mm

Následující tabulka (viz Tabulka 11) ukazuje odhady parametrů modelu pro F_c a a_p=1 mm. V tabulce je vidět, že signifikantními faktory na hladině významnosti 5 %, které ovlivňují změnu hodnoty F_c je posuv f, řezná rychlost v_c a jejich druhé mocniny.

Odhady parametrů modelu pro Fc a ap=1 mm						
Term	**Estimate**	**Std Error**	**t Ratio**	**Prob>|t|**	**Lower 95%**	**Upper 95%**
Intercept	268,9157	2,828863	95,06	<,0001*	262,6126	275,2188
x_2	214,0794	4,163961	51,41	<,0001*	204,8016	223,3573
x_1	-24,5128	4,163961	-5,89	0,0002*	-33,7907	-15,2349
$x_1 * x_1$	27,55953	6,111025	4,51	0,0011*	13,94332	41,17574
* - signifikantní na hladině významnosti 5%, x2 – posuv [mm.ot-1], x1 – vc [m.min-1]						

Tabulka 11: Odhady parametrů modelu pro *Fc* a a_p = 1 mm

Následující graf (viz Obrázek 28) závislosti F_c na řezné rychlosti a velikosti posuvu ukazuje podobně jako v předchozím případě, že řezná síla se podle předpokladu zvyšuje se zvyšující se velikostí posuvu. Naopak se zvyšující se řeznou rychlostí se opět snižuje velikost řezných sil.



Obrázek 28: Graf vlivu f a v_c na hodnotu *Fc* při a_p = 1 mm

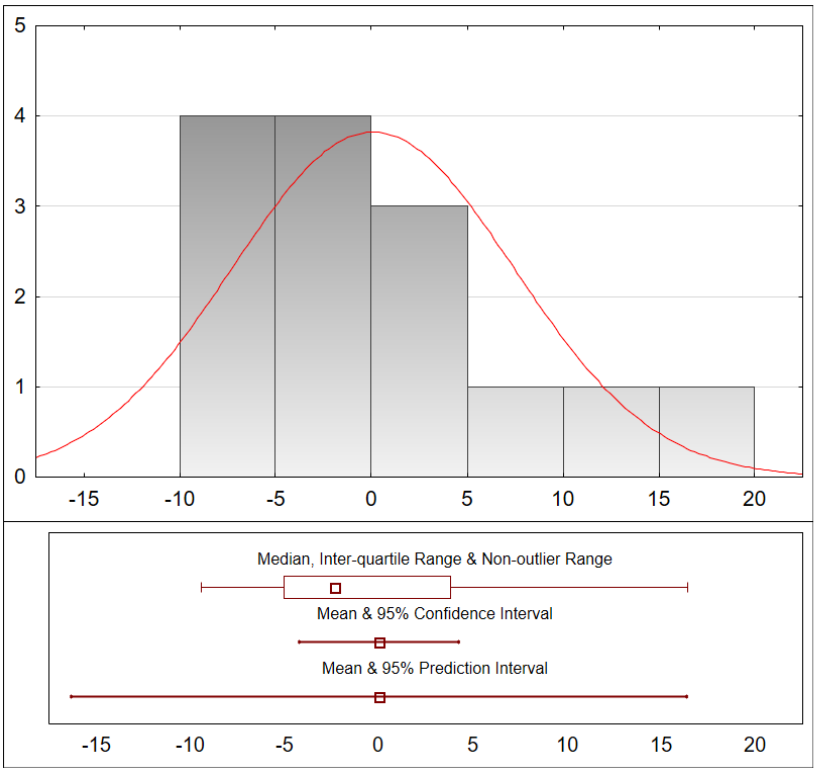
Výsledná rovnice má potom tvar:

$$\hat{y} = 268,916 + 214,079.x_2 - 24,513.x_1 + 27,559.x_1^2 \qquad (11)$$

Po převodu do přirozené míry dostáváme výslednou funkci závislosti řezné síly F_c při hĺoubce řezu a_p= 1 mm na signifikantních faktorech ve tvaru:

$$F_c = 0{,}0004243 \cdot v_c^2 - 0{,}355 \cdot v_c + 2228{,}064 \cdot f + 106{,}025 \qquad (12)$$

Pro kompletnost vykonané analýzy a potvrzení správnosti a vhodnosti zvoleného modelu je opět zapotřebí ověřit rezidua. Hodnotou Durbin-Watsonova testu autokorelace je v tomto případě DW = 1,8666597 (p=0,4392). Je tedy možné přijmout nulovou statistickou hypotézu o neexistenci autokorelace a dosažená hladina významnosti Shapiro-Wilksova testu (viz Obrázek 29) poukazuje na Gaussovo rozdělení reziduí. Závěrem tedy můžeme opět zhodnotit predikční model jako statisticky a numericky korektní.



Shapiro-Wilk p:	0,313
Mean:	-1,21e-010
Std.Dev.:	7,304
Variance:	53,35
Std.Err.Mean	1,952
Skewness:	0,956
Valid N:	14,00
Minimum:	-9,401
Lower Quartile	-5,012
Median:	-2,330
Upper Quartile	3,799
Maximum:	16,42
95% Confidence for Std Dev	
Lower	5,295
Upper	11,77
95% Confidence for Mean	
Lower	-4,217
Upper	4,217
95% Prediction for Observation	
Lower	-16,33
Upper	16,33

Obrázek 29: Gaussovo rozdělení reziduí pro *Fc* a a_p = 1 mm

4.4.5 Validace přesnosti nalezených modelů pro *Fc*

Pro ověření správné funkce výpočtových modelů je nutné provést validaci. Validace nalezených modelů je provedena ve dvou bodech. První částí je naměření hlavní složky řezné síly pro náhodně zvolené řezné podmínky při dodržení jednotlivých hloubek řezu. Experiment

pro validaci byl proveden podobně jako v prvním případě. Hlavním rozdílem je počet opakování měření. Zatímco v prvním případě bylo měření každého bodu šestkrát opakováno, při validačním experimentu je každý bod měřen pouze jednou. Náhodně zvolené řezné podmínky s naměřenými hodnotami jsou vidět v následující tabulce (viz Tabulka 12).

Druhou částí validace je provedení výpočtu řezných sil podle modelů (rovnic 8, 10, 12) v kapitole 4.4 a provedení výpočtu chyby dle následující rovnice [32].

$$chyba_i = \frac{m_i - v_i}{m_i} \cdot 100[\%] \quad (13)$$

kde

m(i) ..... je naměřená hodnota v i-tém bodě

v(i) ..... je vypočítaná hodnota v i-tém bodě

i ..... je počet bodů porovnání od 1 do n

Plán experimentu pro validaci						
ap [mm]	*f* [ot/min]	*Vc* [m/min]	*Fc* naměřené [N]	*Fc* vypočtené [N]	Chyba [%]	průměrná chyba pro jednotlivá ap [%]
0,2	0,104	305	58,19	62,39	7,22	12,97
0,2	0,104	305	64,3	62,39	2,97	
0,2	0,17	540	72,09	89,12	23,62	
0,2	0,09	400	52,01	56,72	9,06	
0,2	0,1	280	57,36	60,77	5,95	
0,2	0,05	160	36,49	40,52	11,05	
0,2	0,03	90	24,77	32,42	30,9	
0,4	0,104	305	107	116,69	9,06	6,42
0,4	0,104	305	113	116,69	3,27	
0,4	0,07	105	98	98,37	0,37	
0,4	0,12	330	120,1	128,55	7,04	
0,4	0,13	460	126,8	132,83	4,75	
0,4	0,02	210	40,5	46,17	14	
1	0,104	305	269,1	268,94	0,06	2,75
1	0,104	305	274,3	268,94	1,95	
1	0,06	420	176,8	165,46	6,42	
1	0,11	333	277,9	279,95	0,74	
1	0,19	545	434,5	461,91	6,31	
1	0,03	265	109,3	108,59	0,65	
1	0,15	94	398,3	410,61	3,09	

Tabulka 12: Validační experiment

Tabulka ukazuje chybovost jednotlivých modelů. Pouze u několika hodnot se výpočet řezné síly liší od naměřené hodnoty o více než 10%. To může být způsobenou například chybou měření, nebo otupením břitu nástroje. U většiny však lze konstatovat, že nalezené modely dosahují poměrně vysoké přesnosti a jsou tedy funkční.

4.4.6 Vyhodnocení závislosti *Kc* na *h(a)*

Vzhledem k zadání této práce, tedy k experimentálnímu ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy je nyní nutné sestavit graf závislosti K_C na *h(a)*. Pro sestavení grafu je nutné určit velikost měrného řezného odporu a velikost tloušťky odřezávané vrstvy.

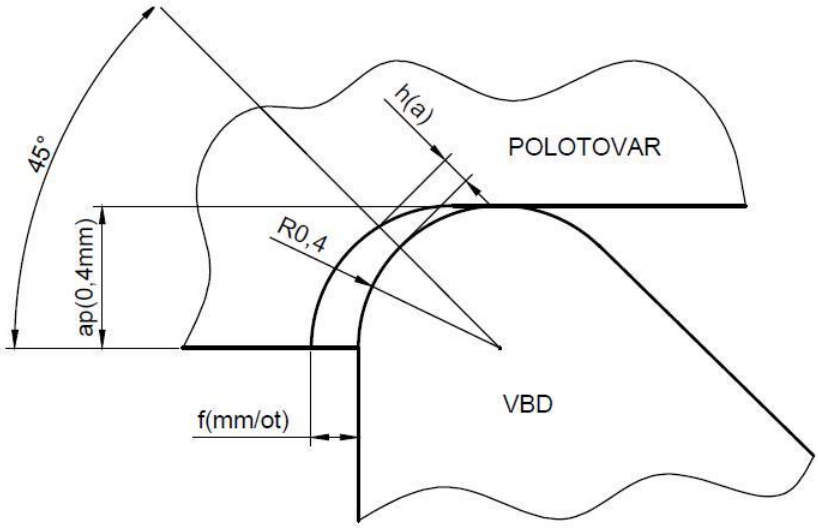
Pro určení měrného řezného odporu je potřeba určit velikost síly F_c a plochu odřezávané vrstvy, jak bylo uvedeno v kapitole 3.4. Síly byly vypočítány podle funkcí určených v předchozí kapitole. Výpočty jednotlivých sil jsou uvedeny v příloze č 3. Plochy odřezávané vrstvy byly učeny pomocí software Catia.

Tloušťka odřezávané vrstvy se podle teorie při použití nože s nastavením hlavního ostří 90° rovná velikosti posuvu na otáčku. Vzhledem však k malým velikostem a_p není konec hlavního ostří vlivem zaoblení špičky ε_r=0,4 mm nastaven na 90°. Tloušťka odřezávané vrstvy byla zvolena jako velikost posuvu pouze pro případ kdy a_p=1 mm, protože při tomto úběru materiálu je 60% hlavního ostří skloněno pod úhlem 90°. Pro oba zbylé případy bylo nutné velikost tloušťky odřezávané vrstvy určit pomocí výpočtu. Zaoblení špičky nástroje tedy bylo nahrazeno tečnou přímkou, která je kolmá na střední úhel kruhové výseče, kterou tvoří špička nože v záběru. Velikosti úhlů byly na základě geometrického tvaru určeny jako 22,5° pro a_p=0,2 mm a 45° pro a_p=1 mm. Tloušťka odřezávané vrstvy pak byla vypočtena jako:

$$h(a)_{a_P 0,2} = \sin 22{,}5° \cdot f \tag{14}$$

$$h(a)_{a_P 0,4} = \sin 45° \cdot f \tag{15}$$

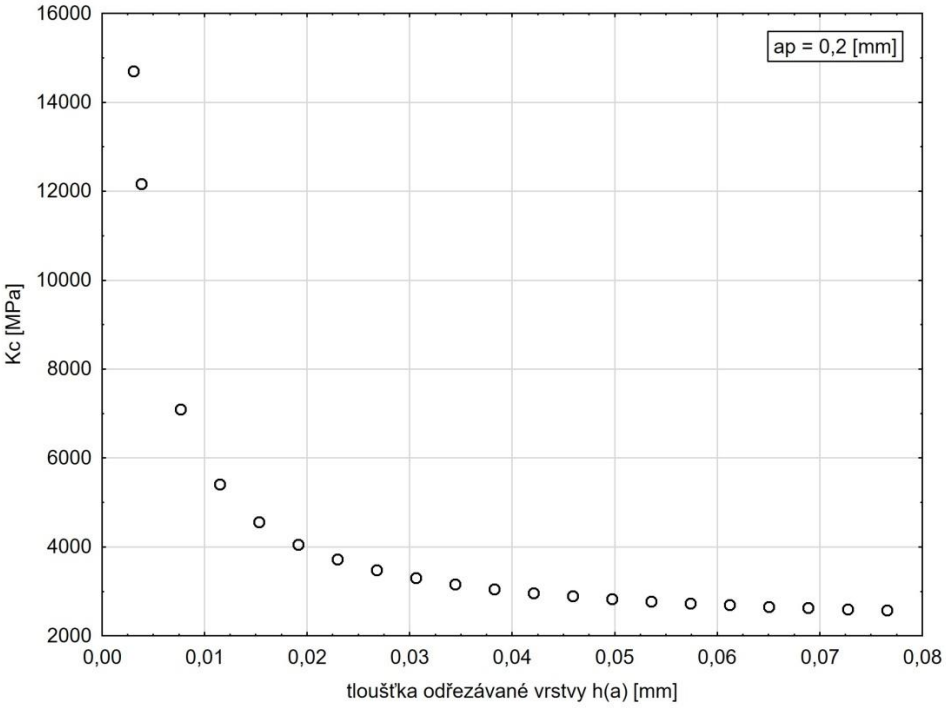
Výpočty tloušťky odřezávané vrstvy pro jednotlivé velikosti posuvů jsou v příloze č. 3. Na následujícím obrázku je vidět výše popsané určení tloušťky odřezávané vrstvy (viz Obrázek 1).



Obrázek 30: Tloušťka odřezávané vrstvy

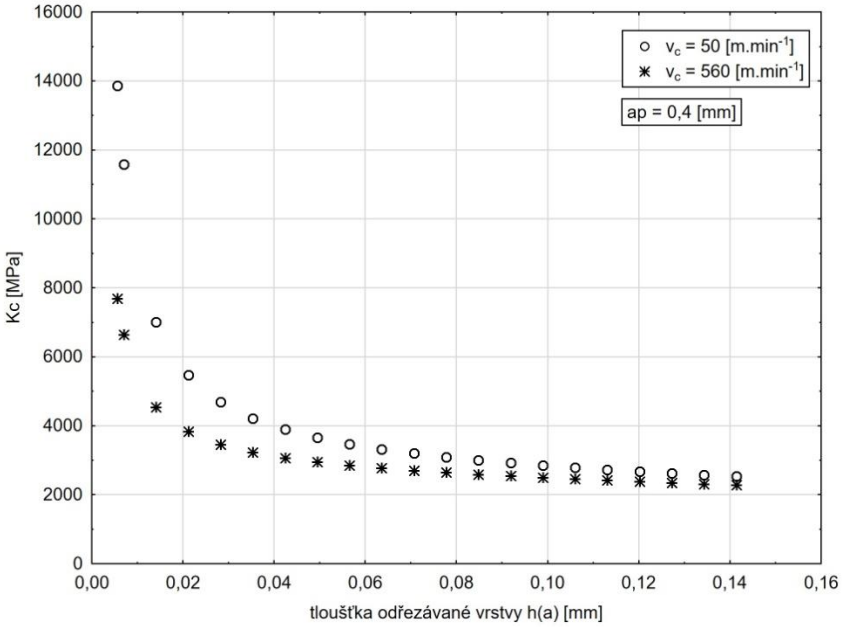
Následující graf (viz Obrázek 31) ukazuje závislost měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy pro a_p = 0,2 mm. Tento graf potvrzuje teorii uvedenou v rešerši, tedy že měrný řezný odpor se snižuje se zvětšující se tloušťkou odřezávané vrstvy. Na rozdíl od prostudovaných prací však tento graf ukazuje i chování v oblasti okolo zaoblení břitu, které je

v tomto případě 0,012 mm. V této oblasti se velikost K_C rapidně zvyšuje, při tloušťce odřezávané vrstvy 0,0056 mm je velikost měrného řezného odporu vyšší, než 14 000MPa. Velice zajímavé je také zjištění, že v tomto případě nemá řezná rychlost statisticky významný vliv na K_C.



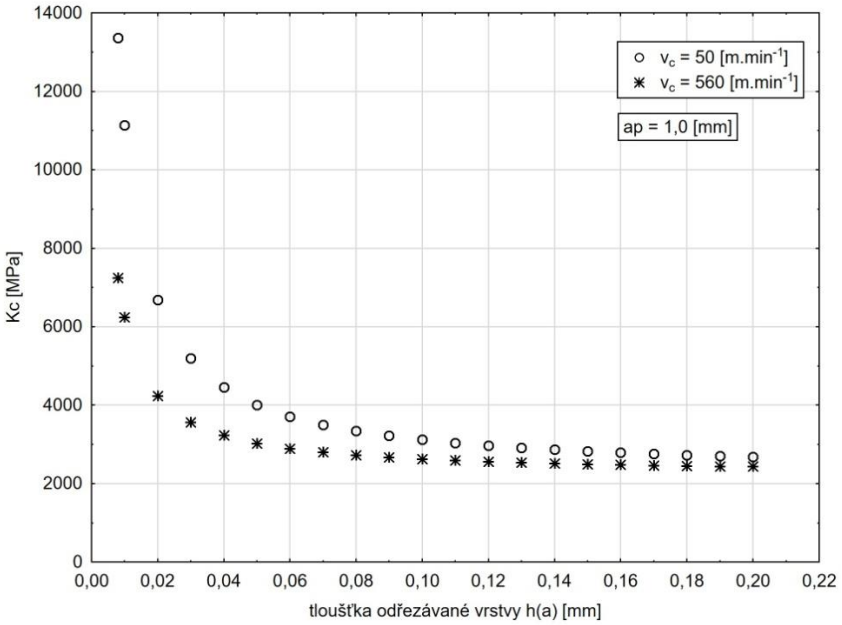
Obrázek 31: Velikost měrného řezného odporu pro a_p = 0,2 mm

Další graf (viz Obrázek 32) ukazuje závislost měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy a na řezné rychlosti pro a_p = 0,4 mm. Tento graf ukazuje obdobnou závislost jako předchozí graf pro K_C v závislosti na *h(a)*. Zde se však navíc projevuje vliv řezné rychlosti. Body označené kolečkem jsou hodnoty K_C pro řeznou rychlost v_C=50m/min. Hvězdička představuje hodnoty K_C pro řeznou rychlost v_C=560m/min. Graf ukazuje, že pro řeznou rychlost 560m/min při tloušťce odřezávané vrstvy 0,0056 mm je měrný řezný odpor nižší o 6000MPa oproti řezné rychlosti 50m/min. Tento rozdíl je nejvyšší při minimální tloušťce odřezávané vrstvy, se zvětšujícím se posuvem a tedy i tloušťkou *h(a)* dochází prakticky k vyrovnání měrného řezného odporu pro obě řezné rychlosti.



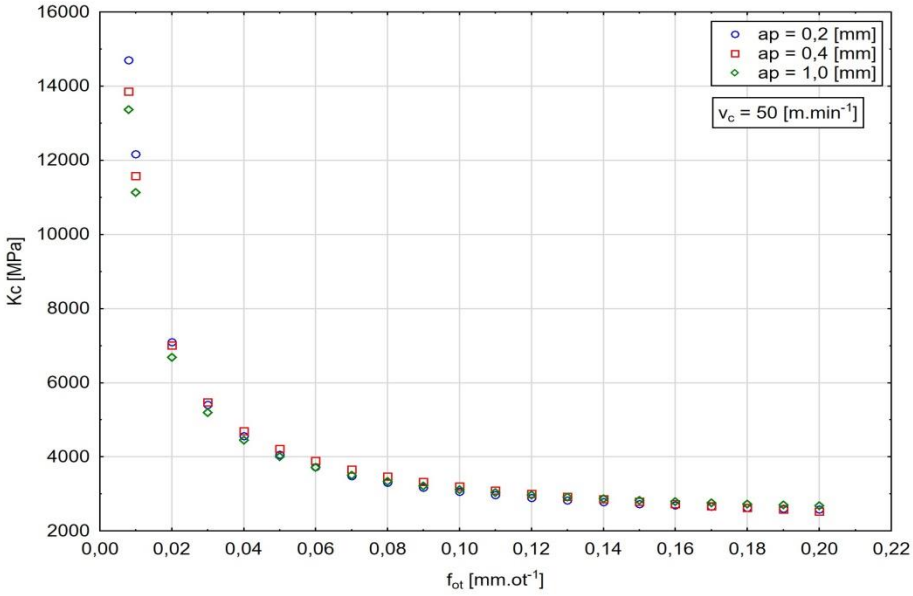
Obrázek 32: Velikost měrného řezného odporu pro a_p = 0,4 mm

Následující graf (viz Obrázek 33) ukazuje závislost měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy a na řezné rychlosti pro a_p = 1 mm. Tento graf ukazuje velice podobnou závislost K_C jako předchozí případ pro a_p = 0,4 mm. Opět se zde projevuje vedle vlivu tloušťky odřezávané vrstvy také vliv řezné rychlost a to zejména při malé tloušťce odřezávané vrstvy. Lze tedy konstatovat, že tato část experimentu opět potvrzuje poznatky shrnuté v rešerši.



Obrázek 33: Velikost měrného řezného odporu pro a_p = 1 mm

Vzhledem k velké podobnosti všech bloků byl vytvořen ještě jeden graf (viz Obrázek 34) pro porovnání vlivu a_p. Do grafu byly zaneseny hodnoty k_C pro jednotlivé hloubky řezu při konstantní řezné rychlosti v_c = 50m/min. Tento graf ukazuje, že při konstantní řezné rychlosti jsou hodnoty k_C prakticky stejné pro všechny a_p. Tento graf tedy potvrzuje poznatky z rešerše o tom, že hloubka odřezávané vrstvy má pouze malý vliv na velikost měrného řezného odporu.



Obrázek 34: Velikost měrného řezného odporu pro a_p = 0,2, 0,4 a 1 mm

Závěr

Na základě provedené rešerše lze konstatovat, že nejméně popsanou oblastí z hlediska velikosti tloušťky odřezávané vrstvy na měrný řezný odpor je menší, než je zaoblení ostří nástroje. V odborné literatuře byly nalezeny další faktory ovlivňující velikost měrného řezného odporu. Vyjma vlastností materiálu a řezného prostředí se jedná například o řeznou rychlost. Rovněž bylo zjištěno, že většina experimentů byla provedena při podstatně nižší řezné rychlosti, než jaká se dnes běžně používá díky moderním nástrojovým materiálům. Dalším faktorem je hloubka odřezávání vrstvy, která by podle teorie neměla mít výrazný vliv na měrný řezný odpor.

Vzhledem k těmto poznatkům je experimentální část zaměřena na výše zmíněnou problematiku. Byly tedy zvoleny jednotlivé vstupní faktory pro naplánování o provedení experimentu, které by měly potvrdit, nebo vyvrátit tato tvrzení. Právě experiment a jeho vyhodnocení je stěžejní částí této studie. Experiment byl z hlediska vybavenosti strojního zařízení proveden na Západočeské univerzitě v Plzni. Při vyhodnocování byly nejprve nalezeny statistické modely pro učení hlavní složky řezné síly při různých řezných podmínkách. Z těchto sil jsou následně vypočítány hodnoty měrného řezného odporu. Na základě výsledků lze konstatovat, že nalezené statistické modely pro určení hlavní složky řezné síly dostatečně popisují sledované veličiny. To bylo potvrzeno provedením validačního experimentu, který ukázal dostatečnou přesnost těchto modelů.

Vyhodnocení závislosti měrného řezného odporu potvrdilo popsanou teorii, tedy že měrný řezný odpor dosahuje nejvyšších hodnot při minimální tloušťce odřezávané vrstvy a s jejím zvětšováním klesá. Bylo potvrzeno, že hloubka řezu nemá prakticky vliv na velikost měrného řezného odporu. Výsledky dále ukazují, že vliv řezné rychlosti nemá při a_p=0,2 mm statisticky významný vliv a projevuje se až při hodnotě a_p=0,4 mm. Největší vliv má řezná rychlost při tloušťce odřezávané vrstvy menší než 0,1 mm, kde vyšší řezná rychlost dramaticky snižuje měrný řezný odpor.

Hlavním přínosem této práce je prostudování a popis výše zmíněných skutečností. Jako pokračování tohoto výzkumu se nabízí rozšíření experimentu o další hloubky řezu, o jiné materiály, nebo o výzkum vlivu geometrie nástroje na měrný řezný odpor. Výsledky pak mohou být použity například pro sestavení aplikace sloužící k volbě řezných podmínek.

5 Seznam použité literatury

[1] PŘIKRYL, Zdeněk a MUSÍLKOVÁ, Rosa. *Teorie obrábění*. 3. opr. vyd. Praha: SNTL, 1982. 235 s.

[2] ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I., SKLENIČKA, J. *Konstrukce speciální frézy pro obráběni těžkoobrobitelných materiálů*. Plzeň, 2011., ISBN: 978-80-7043-934-0.

[3] SANDVIK Coromant. *Měrná řezná síla*. [Online]. 2018 [Cit. 2018-03-3]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz /knowledge/materials/workpiece materials/ the specific_cutting_force/pages/default.aspx

[4] BUCKO, Michal. *Frézování vlákny vyztužených polymerů-silové účinky*. České vysoké učení technické v Praze, 2017. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/-handle/10467/73425/F2-BP-2017-Bucko-Michal-Bakalarska%20prace%20final.pdf?sequence=-1

[5] SMOLA, Jiří. *Řezný proces a parametry povrchu při obrábění slitin titanu.* 2017. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73360/F2-DP-2017-Smola-Jiri-Diplomova_prace_Smola.pdf?sequence=-1

[6] PERNIKL, Jan. *Monitorování procesu vrtání.* 2015. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz /bitstream/handle/10467/63663/F2-DP-2015-Pernikl-Jan-DP_2015_PerniklJan.pdf?-sequence=-1

[7] FIALA, Zdeněk. *Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie*. Vysoké učení technické, 2014. Dostupné z: http://www.vutium.vutbr.cz/ tituly/pdf/ukazka/978-80-214-5000-4.pdf

[8] ŠMEJKAL, Martin. *Rozklad řezných sil na břitu šroubovitého vrtáku*. 2012. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/2613/1/BP_ final%20martin-%20smejkal %20verze%20pdf.pdf

[9] MALUČKÝ, Michal. *Výzkum obrobitelnosti kompozitních materiálů mechanickými způsoby obrábění.* 2012. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/ 10563/22345/malu%C4%8Dk%C3%BD_2012_dp.pdf?sequence=1

[10] MATULA, Lukáš. *Vliv volby nástroje na parametry řezného procesu*. 2012. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22103/matula_2012_bp.pdf?sequence=1

[11] TVORBA TRIESKY [online]. Copyright © [cit. 12.02.2018]. Dostupné z: https://ingslov .files.wordpress.com/2015/05/03-tvorba-trieskyrezny-nastrojsily-a-vykon.pdf

[12] RAO, Posinasetti Nageswara. *Manufacturing technology: metal cutting and machine tools*. Tata McGraw-Hill Education, 2013. 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

[13] STEPHENSON, David A.; AGAPIOU, John S. *Metal cutting theory and practice*. CRC press, 2016. Dostupné z: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/52089204/Book-Metal_Cutting_Theory_and_Practice-_by_David_Stephenson_John_.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1519033057&Signature=wdecq01yGYoIAU6uurE8XkP%2FyeI%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DBook-Metal_Cutting_Theory_and_Practice-.pdf

[14] MEDDOUR, I., et al. *Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool*: cutting conditions optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77.5-8: 1387-1399. Dostupné z: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-014-6559-z.pdf

[15] COURBON, Cedric, et al. *On the existence of a thermal contact resistance at the tool-chip interface in dry cutting of AISI 1045*: formation mechanisms and influence on the cutting process. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50.1: 1311-1325. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112004681

[16] STORCH, Borys; ZAWADA-TOMKIEWICZ, Anna. *Distribution of unit forces on the tool edge rounding in the case of finishing turning.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60.5-8: 453-461. Dostupné z: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-011-3617-7.pdf

[17] BUSHLYA, Volodymyr; ZHOU, Jinming; STÅHL, Jan-Eric. E*ffect of cutting conditions on machinability of superalloy Inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools*. *Procedia CIRP*, 2012, 3: 370-375. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Volodymyr_Bushlya/publication/257745478_Effect_of_Cutting_Conditions_on_Machinability_of_Superalloy_Inconel_718_During_High_Speed_Turning_with_Coated_and_Uncoated_PCBN_Tools/links/02e7e528b0ea38ad87000000/Effect-of-Cutting-Conditions-on-Machinability-of-Superalloy-Inconel-718-During-High-Speed-Turning-with-Coated-and-Uncoated-PCBN-Tools.pdf

[18] SKLENIČKA, Josef. *DISERTAČNÍ PRÁCE Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení šroubovitého vrtáku Autor:*. Západočeská univerzita Plzeň, 2017.

[19] COPTKM. [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=32841&revision=-1&instance=2

[20] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998.

[21] MICHÁLEK, J.: *Navrhováni a vyhodnocování experimentů (DOE) - Učební texty k semináři*. [Online]. 3 prosinec 2010. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_05_1012_2.pdf

[18] *BOLZANO* [online]. [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf

[23] *T-PROM* [online]. [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: http://www.tprom.cz/wiki/ocel/15142

[24] MM-SPECTRUM[online]. [cit. 2018-20-03]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html

[25] BILÍK, Oldřich. *Obrábění I. - 1. díl.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2001. ISBN 80-7078-811-9

[26] WALDORF, D. J., DEVOR, R. E., KAPOOR, S. G.: An Evaluation of Ploughing Models for Orthogonal Machining. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1999, vol. 121, issue 4, s. 550- [cit. 2018-03-28]. DOI: 10.1115/1.2833050. Dostupné z: http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1434831.

[27] MAŠEK, A.: Silové zatíženi šroubovitého vrtáku ve vztahu k makrogeometrii nástroje. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.

[28] GOMBÁR, M.: *Plánovanie experimentov (DoE) ako nástroj efektivného výskumu technologických procesov.* Prešov, 2017. Podklady k přednáškám

[29] MICHÁLEK, J.: *Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE) - Učební texty k semináři*. [Online]. 3 prosinec 2010. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_05_1012_2.pdf

[30] BÍCOVÁ, K.: *Příspěvek k hodnoceni ukazatelů výrobního procesu.* Plzeň, 2016. Disertační práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.

[31] HENDL, J.: *Přehled statistických metod: Analýza a metanalýza dat*. Praha: Portál, 2015. ISBN 978-80-262-0981-2

[32] TOŠENOVSKÝ, J.: *Plánování experimentů*, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012.

[33] KOVO-STROJE.SK. [online]. [cit. 2018-22-03]. Dostupné z: https://www.kovo-stroje.sk/ sustruhy-emco/horizontalny-cnc-sustruh-maxxturn-25/

[34] ISCAR. [online]. [cit. 2018-20-03]. Dostupné z:http://www.iscar.com/ecatalog/Item.aspx?cat=5505969&fnum=1191&mapp=IS&GFSTYP=M&srch=1

6 Přílohy

PŘÍLOHA č. 1

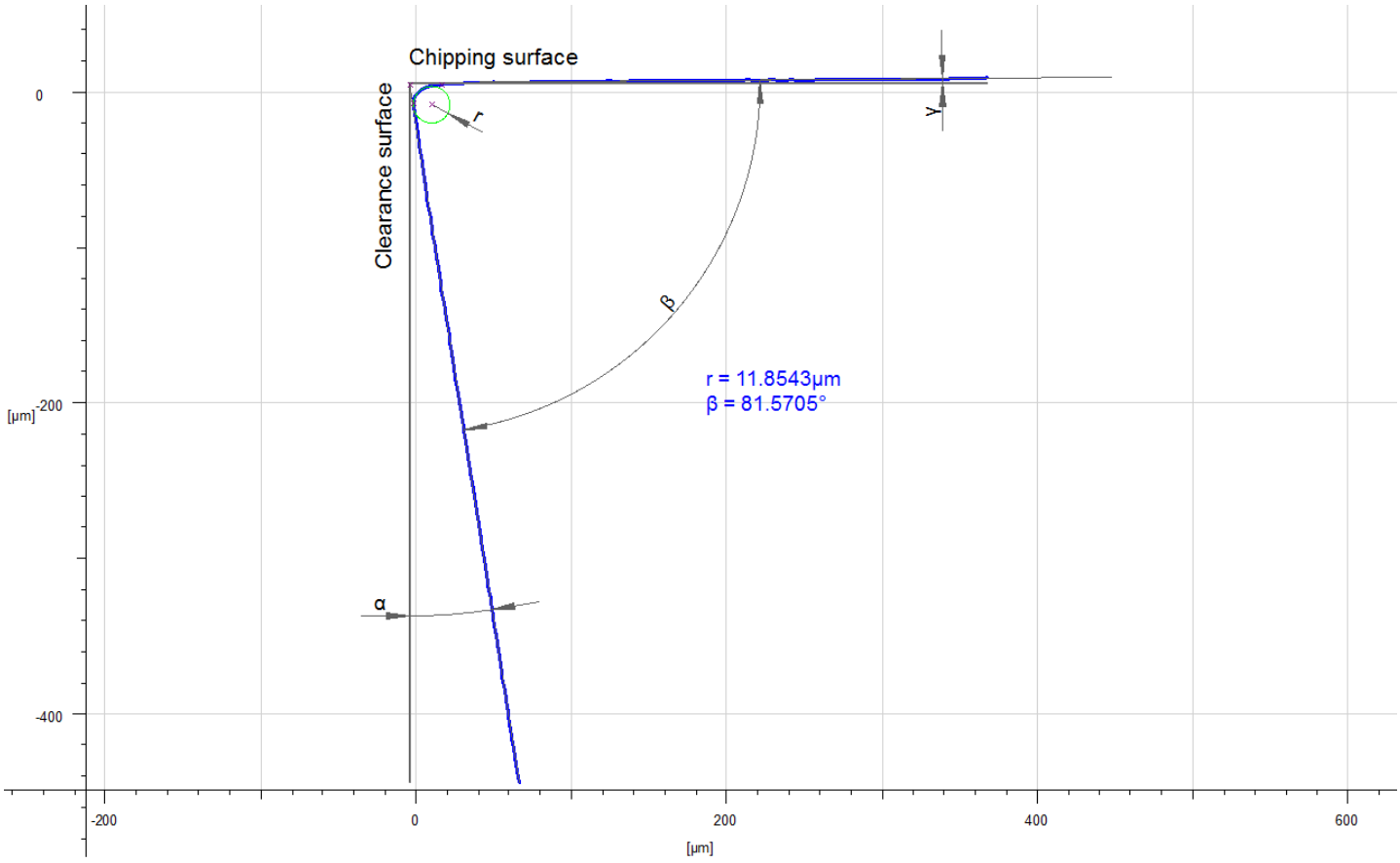
Protokol o měření geometrie VBD

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

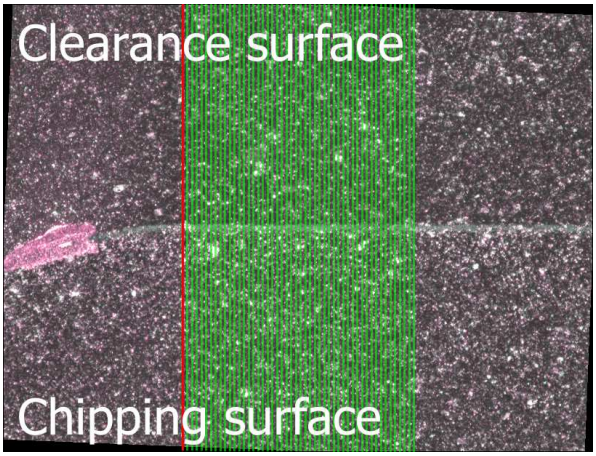
Měřicí protokol
Cutting Edge Measurement

ReferenceType:	**Standard Curved Edge 20x**
Number of extracted profiles:	**50**
Edge profile type:	**No Bevel**
Date of measurement:	**23.2.2018 8:17:08**
Operator:	**Administrator**

Profile #1



Surface

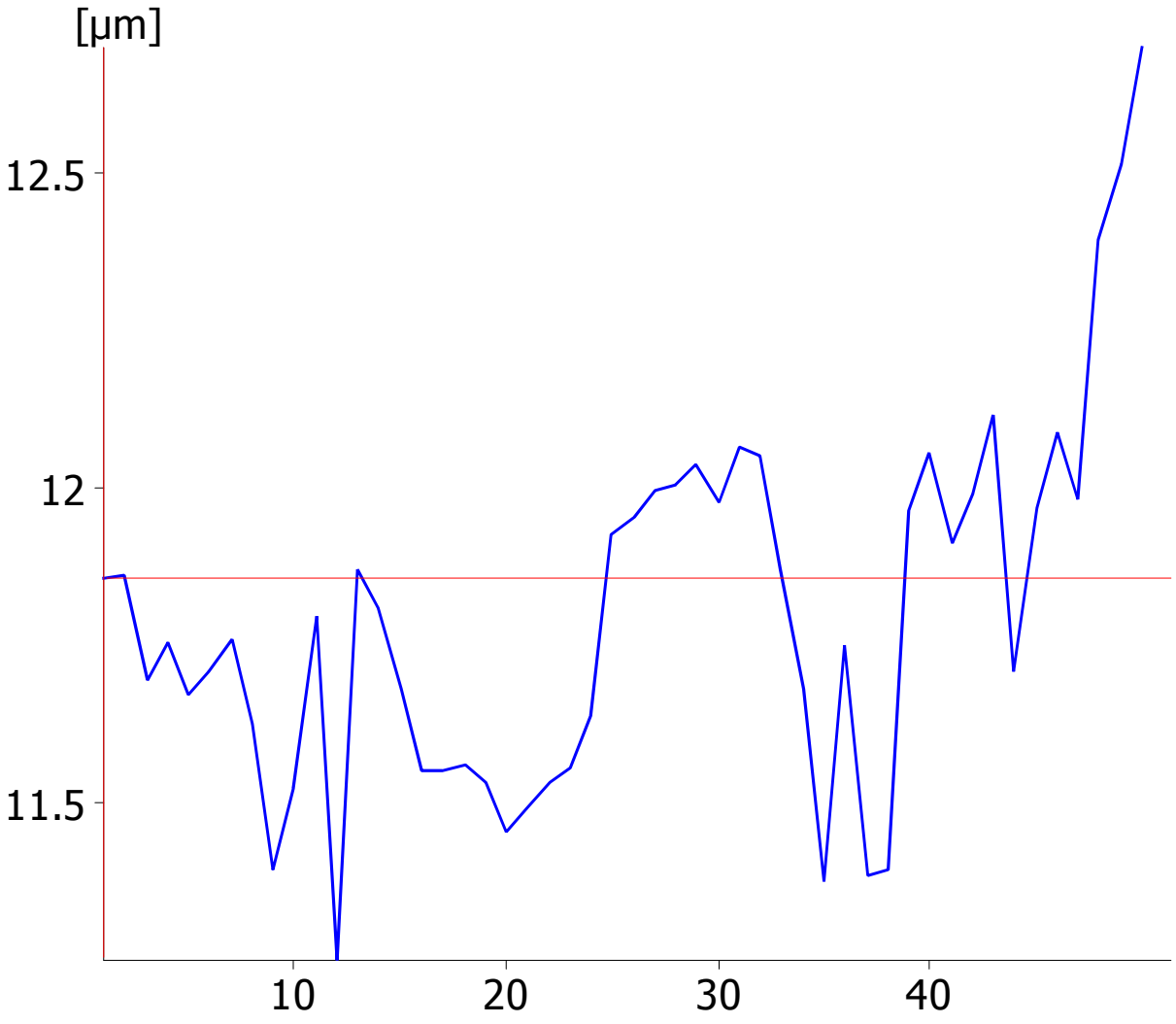


Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

Profile Parameter Statistics

	visible	r [µm]	Ecq [µm]	α [°]	β [°]	γ [°]	Sα [µm]	Sγ [µm]	K	Δr [µm]	W [µm]
Mean:		11.7982	0.1663	8.8910	81.5875	-0.4785	12.3551	18.6874	1.5143	6.7944	11.9917
Std. Dev.:		0.2928	0.0400	0.0143	0.0228	0.0099	0.2808	1.1392	0.1133	0.1453	0.2400
Minimum:		11.2493	0.0873	8.8618	81.5575	-0.5056	11.6805	16.8038	1.3338	6.5320	11.5783
Maximum:		12.6967	0.2542	8.9081	81.6411	-0.4637	13.1799	20.7059	1.7408	7.0368	12.4305
Median:		11.7771	0.1616	8.8921	81.5869	-0.4767	12.3326	18.4775	1.4990	6.7758	11.9505
Robust:		11.7240	0.1476	8.9058	81.5645	-0.4781	12.2548	18.1514	1.4668	6.7065	11.8615

Edge Parameter r



Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

Profile Parameters

	visible	r [µm]	Ecq [µm]	α [°]	β [°]	γ [°]	Sα [µm]	Sγ [µm]	K	Δr [µm]	W [µm]
1:	yes	11.8543	0.2026	8.8991	81.5705	-0.4696	12.2242	20.2278	1.6547	6.9854	12.2950
2:	yes	11.8587	0.2055	8.8980	81.5716	-0.4696	12.0892	20.6215	1.7058	6.9826	12.2759
3:	yes	11.6916	0.2154	8.8962	81.5808	-0.4770	12.2819	20.3764	1.6591	7.0020	12.3334
4:	yes	11.7554	0.2376	8.9026	81.5737	-0.4764	12.4084	20.2943	1.6355	7.0368	12.4015
5:	yes	11.6690	0.2542	8.9055	81.5691	-0.4745	12.2463	20.6012	1.6822	7.0265	12.3753
6:	yes	11.7093	0.2520	8.9047	81.5625	-0.4671	12.2593	20.5739	1.6782	7.0336	12.3822
7:	yes	11.7575	0.2352	8.9063	81.5626	-0.4689	12.3088	20.4678	1.6629	7.0358	12.3850
8:	yes	11.6255	0.2177	8.9060	81.5644	-0.4704	12.1826	20.7059	1.6996	7.0154	12.3355
9:	yes	11.3941	0.1856	8.9040	81.5625	-0.4665	11.9212	20.5415	1.7231	6.9008	12.1065
10:	yes	11.5228	0.2096	8.9040	81.5617	-0.4657	11.6805	20.3339	1.7408	6.8167	11.9710
11:	yes	11.7966	0.2118	8.9057	81.5591	-0.4649	11.8604	19.6727	1.6587	6.8134	12.0002
12:	yes	11.2493	0.1726	8.9062	81.5575	-0.4637	11.9846	19.4944	1.6266	6.7830	11.9159
13:	yes	11.8704	0.2139	8.9060	81.5602	-0.4661	12.0623	19.2499	1.5959	6.8256	12.0438
14:	yes	11.8071	0.1953	8.9067	81.5615	-0.4682	12.0086	18.7178	1.5587	6.7239	11.8562
15:	yes	11.6777	0.1782	8.9073	81.5611	-0.4684	12.0538	18.2179	1.5114	6.6512	11.7324
16:	yes	11.5491	0.1799	8.9073	81.5671	-0.4743	12.0690	18.2817	1.5148	6.6475	11.7270
17:	yes	11.5490	0.1740	8.9078	81.5738	-0.4815	12.3759	18.0523	1.4587	6.7067	11.8597
18:	yes	11.5611	0.1857	8.9081	81.5714	-0.4795	12.4154	17.6315	1.4201	6.6577	11.7842
19:	yes	11.5327	0.1951	8.9081	81.5692	-0.4773	12.2747	17.5844	1.4326	6.6144	11.7061
20:	yes	11.4519	0.1761	8.9072	81.5684	-0.4756	12.1448	17.5667	1.4464	6.5567	11.5901
21:	yes	11.4910	0.1685	8.9066	81.5693	-0.4758	12.3685	17.6054	1.4234	6.6205	11.7083
22:	yes	11.5298	0.1621	8.9040	81.5706	-0.4746	12.4341	17.2371	1.3863	6.5883	11.6592
23:	yes	11.5554	0.1663	8.9019	81.5731	-0.4750	12.4031	16.8038	1.3548	6.5320	11.5783
24:	yes	11.6365	0.1611	8.8979	81.5782	-0.4761	12.3564	17.0716	1.3816	6.5639	11.6293
25:	yes	11.9266	0.1503	8.8934	81.5848	-0.4782	12.6825	16.9511	1.3366	6.6362	11.7644
26:	yes	11.9507	0.1584	8.8908	81.5889	-0.4797	12.6044	17.1946	1.3642	6.6556	11.7932
27:	yes	11.9948	0.1504	8.8878	81.5932	-0.4810	12.7470	17.0022	1.3338	6.6625	11.8136
28:	yes	12.0017	0.1461	8.8872	81.5963	-0.4835	12.6939	17.1728	1.3528	6.6756	11.8309
29:	yes	12.0375	0.1493	8.8851	81.6006	-0.4857	12.6788	17.6480	1.3919	6.7475	11.9464
30:	yes	11.9754	0.1764	8.8832	81.6032	-0.4864	12.5710	18.2895	1.4549	6.8136	12.0480
31:	yes	12.0619	0.1674	8.8831	81.5960	-0.4791	12.7192	18.2741	1.4367	6.8562	12.1233
32:	yes	12.0509	0.1582	8.8770	81.5969	-0.4739	12.7051	18.3098	1.4411	6.8540	12.1169
33:	yes	11.8678	0.1520	8.8778	81.5941	-0.4719	12.4366	18.2795	1.4698	6.7674	11.9547
34:	yes	11.6811	0.1287	8.8783	81.5925	-0.4707	12.3031	18.2282	1.4816	6.7069	11.8424
35:	yes	11.3719	0.1100	8.8792	81.5936	-0.4728	12.2638	18.9443	1.5447	6.7708	11.9279
36:	yes	11.7488	0.1277	8.8817	81.5939	-0.4755	12.2725	18.8011	1.5320	6.7809	11.9591
37:	yes	11.3840	0.1156	8.8800	81.6000	-0.4800	12.1581	18.8747	1.5524	6.7373	11.8686
38:	yes	11.3937	0.1239	8.8787	81.6045	-0.4832	12.0915	19.1641	1.5849	6.7599	11.9000
39:	yes	11.9632	0.1444	8.8788	81.6057	-0.4845	12.3075	19.0846	1.5506	6.8470	12.0712
40:	yes	12.0525	0.1444	8.8804	81.6035	-0.4840	12.4418	19.1773	1.5414	6.9050	12.1786
41:	yes	11.9094	0.1598	8.8817	81.6016	-0.4832	12.4224	19.3302	1.5561	6.9116	12.1846
42:	yes	11.9873	0.1574	8.8810	81.6015	-0.4825	12.4259	19.0673	1.5345	6.8826	12.1384

Naměřila: Ivana Zetková, 23.2.2018 8:17:09

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

	visible	r [µm]	Ecq [µm]	α [°]	β [°]	γ [°]	Sα [µm]	Sγ [µm]	K	Δr [µm]	W [µm]
43:	yes	12.1130	0.1339	8.8768	81.6077	-0.4845	12.5571	18.6679	1.4866	6.8656	12.1185
44:	yes	11.7060	0.0953	8.8739	81.6128	-0.4868	12.4229	18.4046	1.4815	6.7586	11.9211
45:	yes	11.9645	0.0873	8.8733	81.6174	-0.4907	12.4231	17.5559	1.4132	6.6570	11.7541
46:	yes	12.0884	0.0927	8.8708	81.6241	-0.4949	12.2924	17.9838	1.4630	6.6893	11.7988
47:	yes	11.9802	0.1109	8.8706	81.6271	-0.4977	12.2520	18.5435	1.5135	6.7482	11.8939
48:	yes	12.3921	0.1253	8.8673	81.6336	-0.5009	12.7310	18.7448	1.4724	6.9397	12.2615
49:	yes	12.5119	0.1528	8.8645	81.6411	-0.5056	12.9581	18.3324	1.4147	6.9467	12.2916
50:	yes	12.6967	0.1396	8.8618	81.6408	-0.5026	13.1799	18.4115	1.3969	7.0258	12.4305

PŘÍLOHA č. 2

Naměřené řezné síly v průběhu experimentu

Výsledky měření Fc pro ap=0,2mm								
č. Měření	Vc [m/min]	f [mm/ot]	Fc1 [N]	Fc2 [N]	Fc3 [N]	Fc4 [N]	Fc5 [N]	Fc6 [N]
1	485	0,172	62,76	82,31	82	81,56	82	83,02
2	305	0,104	63,14	63,13	62,31	62,41	62,96	62,33
3	125	0,172	89,08	92,76	92,35	90,92	88,72	101,7
4	485	0,036	31,59	31,39	31,61	31,78	32,16	32,29
5	305	0,104	61,58	61,81	65,6	63,99	64,56	64,31
6	305	0,104	63,5	64,75	63,72	63,19	64,97	65,88
7	125	0,036	28,91	29,49	28,83	29,11	34,05	36
8	305	0,104	65,49	65,9	66,01	65,14	65,2	64,53
9	305	0,200	98,61	102,2	102,3	102,9	101,5	99,52
10	50	0,104	61,7	65,74	67,34	67,57	65,02	66,06
11	560	0,104	57,83	56,66	58,34	62,35	61,41	62,72
12	305	0,008	23,87	23,75	23,82	24,82	25,19	26,23
13	305	0,104	65,42	65,94	65,88	67,27	66,3	66,48
14	305	0,104	65,46	66,13	66,04	65,59	66,34	69,15

Výsledky měření Fc pro ap=0,4mm								
č. Měření	Vc [m/min]	f [mm/ot]	Fc1 [N]	Fc2 [N]	Fc3 [N]	Fc4 [N]	Fc5 [N]	Fc6 [N]
1	485	0,172	158,2	166,9	167,1	150,7	155,2	156,2
2	305	0,104	106,2	112,4	113,9	111,7	111	116,9
3	125	0,172	179	176,2	173,8	172,6	179,9	175,6
4	485	0,036	58,24	56,99	57,28	54	54,22	57,64
5	305	0,104	116,3	116,1	115,3	114,2	114	113,3
6	305	0,104	118,3	118	116	115,7	115,1	113,8
7	125	0,036	61,53	64,03	67,1	64,64	62,65	62
8	305	0,104	113,9	119,3	118,4	118,1	117,1	117,6
9	305	0,200	186,6	188,2	187,2	184,9	195	194
10	50	0,104	131,3	133,5	132,1	134	134	132,4
11	560	0,104	103,6	105,7	107,2	114,3	116,2	117,3
12	305	0,008	29,92	28,78	29,36	27,46	30,42	26,77
13	305	0,104	114,4	114,3	121,6	120,4	119,8	122,9
14	305	0,104	119,3	118	116,4	124,4	123,6	123,3

Výsledky měření Fc pro ap=1mm								
č. Měření	Vc [m/min]	f [mm/ot]	Fc1 [N]	Fc2 [N]	Fc3 [N]	Fc4 [N]	Fc5 [N]	Fc6 [N]
1	485	0,172	420,1	449	396,2	421,3	405,3	418
2	305	0,104	263,1	270,2	281,1	280	277,6	274,6
3	125	0,172	445,9	441	452,4	436,8	441,6	444,7
4	485	0,036	114,5	114,6	118,9	118,8	116,6	123,3
5	305	0,104	286,3	283,9	281,3	280,9	289,6	290
6	305	0,104	288,9	281,7	297,1	295,7	293,1	291,8
7	125	0,036	139,3	137,1	143,4	140,3	138,4	137
8	305	0,104	246,4	260,2	261,8	267,4	269,9	270,8
9	305	0,200	462,1	465,8	472	467,7	498,6	513,5
10	50	0,104	328,4	333,5	328,1	323,4	343,8	333,9
11	560	0,104	254,2	275,7	257	274,5	261,8	278,5
12	305	0,008	54,22	49,79	50,4	48,02	59,4	46,82
13	305	0,104	257,4	265,4	263,2	277,7	269,3	270,8
14	305	0,104	253,5	267,9	265	265,7	263,4	272

PŘÍLOHA č. 3

Vypočtené hodnoty měrného řezného odporu

Vypočtené hodnoty měrného řezného odporu při ap=0,2					
ap [mm]	f [mm/ot]	S [mm^2]	Fc [N]	Kc [MPa]	h(a) [mm]
0,2	0,008	0,00159995	23,51477	14697,19	0,003061467
0,2	0,01	0,00199990	24,32471	12162,96	0,003826834
0,2	0,02	0,00399917	28,37442	7095,077	0,007653669
0,2	0,03	0,00599719	32,42413	5406,554	0,011480503
0,2	0,04	0,00799333	36,47384	4563,034	0,015307337
0,2	0,05	0,00998697	40,52355	4057,642	0,019134172
0,2	0,06	0,01197741	44,57326	3721,444	0,022961006
0,2	0,07	0,01396422	48,62297	3481,968	0,02678784
0,2	0,08	0,01594659	52,67268	3303,069	0,030614675
0,2	0,09	0,01792280	56,72239	3164,817	0,034441509
0,2	0,1	0,01989584	60,7721	3054,513	0,038268343
0,2	0,11	0,02186203	64,82181	2965,041	0,042095178
0,2	0,12	0,02382230	68,87152	2891,053	0,045922012
0,2	0,13	0,02577642	72,92123	2828,99	0,049748846
0,2	0,14	0,02772424	76,97094	2776,305	0,053575681
0,2	0,15	0,02966559	81,02065	2731,132	0,057402515
0,2	0,16	0,03160034	85,07036	2692,071	0,061229349
0,2	0,17	0,03352835	89,12007	2658,051	0,065056184
0,2	0,18	0,03544950	93,16978	2628,24	0,068883018
0,2	0,19	0,03736370	97,21949	2601,977	0,072709852
0,2	0,2	0,03927084	101,2692	2578,738	0,076536686

Vypočtené hodnoty měrného řezného odporu při ap=0,4 mm									
ap [mm]	Vc1 [m/min]	Vc2 [m/min]	f [mm/ot]	S [mm^2]	Fc1 [N]	Fc2 [N]	Kc 1 [MPa]	Kc 2 [MPa]	h(a) [mm]
0,4	50	560	0,008	0,00319995	44,336797	24,606937	13855,465	7689,7878	0,005656854
0,4	50	560	0,01	0,00399990	46,311811	26,581951	11578,242	6645,6538	0,007071068
0,4	50	560	0,02	0,00799917	56,077023	36,347163	7010,3552	4543,8668	0,014142136
0,4	50	560	0,03	0,01199719	65,659137	45,929277	5472,8763	3828,3362	0,021213203
0,4	50	560	0,04	0,01599333	75,058153	55,328293	4693,091	3459,4605	0,028284271
0,4	50	560	0,05	0,01998697	84,27407	64,54421	4216,4505	3229,3144	0,035355339
0,4	50	560	0,06	0,02397741	93,306889	73,577029	3891,4499	3068,5979	0,042426407
0,4	50	560	0,07	0,02796422	102,15661	82,426749	3653,1185	2947,5791	0,049497475
0,4	50	560	0,08	0,03194659	110,82323	91,093371	3469,016	2851,4271	0,056568542
0,4	50	560	0,09	0,03592280	119,30675	99,576895	3321,1986	2771,9692	0,06363961
0,4	50	560	0,1	0,03989584	127,60718	107,87732	3198,5084	2703,9741	0,070710678
0,4	50	560	0,11	0,04386203	135,72451	115,99465	3094,3508	2644,5344	0,077781746
0,4	50	560	0,12	0,04782230	143,65874	123,92888	3004,0114	2591,4453	0,084852814
0,4	50	560	0,13	0,05177642	151,40987	131,68001	2924,3015	2543,2428	0,091923882
0,4	50	560	0,14	0,05572424	158,9779	139,24804	2852,9397	2498,8773	0,098994949
0,4	50	560	0,15	0,05966559	166,36283	146,63297	2788,2542	2457,5802	0,106066017
0,4	50	560	0,16	0,06360034	173,56466	153,8348	2728,9896	2418,7733	0,113137085
0,4	50	560	0,17	0,06752835	180,5834	160,85354	2674,1865	2382,015	0,120208153
0,4	50	560	0,18	0,07144950	187,41904	167,68918	2623,098	2346,9608	0,127279221
0,4	50	560	0,19	0,07536370	194,07158	174,34172	2575,1334	2313,3381	0,134350288
0,4	50	560	0,2	0,07927084	200,54102	180,81116	2529,8208	2280,929	0,141421356

Vypočtené hodnoty měrného řezného odporu při ap=1 mm									
ap [mm]	Vc1 [m/min]	Vc2 [m/min]	f [mm/ot]	S [mm^2]	Fc1 [N]	Fc2 [N]	Kc 1 [MPa]	Kc 2 [MPa]	h(a) [mm]
1	50	560	0,008	0,00799995	107,16	58,11	13395,12	7263,79	0,008
1	50	560	0,01	0,00999990	111,62	62,57	11161,75	6256,67	0,01
1	50	560	0,02	0,01999917	133,90	84,85	6695,13	4242,51	0,02
1	50	560	0,03	0,02999719	156,18	107,13	5206,41	3571,25	0,03
1	50	560	0,04	0,03999333	178,46	129,41	4462,20	3235,74	0,04
1	50	560	0,05	0,04998697	200,74	151,69	4015,83	3034,56	0,05
1	50	560	0,06	0,05997741	223,02	173,97	3718,39	2900,58	0,06
1	50	560	0,07	0,06996422	245,30	196,25	3506,08	2805,00	0,07
1	50	560	0,08	0,07994659	267,58	218,53	3347,00	2733,46	0,08
1	50	560	0,09	0,08992280	289,86	240,81	3223,45	2677,98	0,09
1	50	560	0,1	0,09989584	312,14	263,09	3124,68	2633,66	0,1
1	50	560	0,11	0,10986203	334,42	285,37	3044,03	2597,55	0,11
1	50	560	0,12	0,11982230	356,70	307,65	2976,94	2567,58	0,12
1	50	560	0,13	0,12977642	378,98	329,93	2920,28	2542,32	0,13
1	50	560	0,14	0,13972424	401,26	352,21	2871,83	2520,78	0,14
1	50	560	0,15	0,14966559	423,55	374,50	2829,94	2502,21	0,15
1	50	560	0,16	0,15960034	445,83	396,78	2793,39	2486,06	0,16
1	50	560	0,17	0,16952835	468,11	419,06	2761,23	2471,90	0,17
1	50	560	0,18	0,17944950	490,39	441,34	2732,73	2459,39	0,18
1	50	560	0,19	0,18936370	512,67	463,62	2707,32	2448,29	0,19
1	50	560	0,2	0,19927084	534,95	485,90	2684,53	2438,38	0,2